

# PREVISÃO DA GEADA

ADALBERTO SERRA

## 1 – CLASSIFICAÇÃO

### A – *Geadas negras*

Ocorre durante a passagem, sobre dada região, de massas polares frias de origem antártica, e correntes S a SW (no Brasil sul). O ar, bastante seco, não forma um depósito de gelo, pois sua temperatura permanece acima do “ponto de orvalho”. Mas, sendo a mesma inferior a 0°, faz congelar a água e os líquidos no interior das plantas, queimando folhas e talos. Dêsse modo, obstruídos os vasos, a seiva não pode mais subir, e a árvore morre enegrecida.

O fenômeno é extremamente raro na região cafeeira de São Paulo e Paraná, mas, quando ocorre, dura alguns dias e acarreta prejuízos consideráveis (como em 23 e 24 de junho de 1918). Nenhuma medida pode ser tomada em defesa das culturas neste caso, pois é o próprio ar que está frio e não apenas o solo.

### B – *Geadas de vento*

Trata-se de um nome impróprio, designando os efeitos danosos produzidos nos cafezais pelos ventos frios e cortantes polares, de SE a SW, mas cuja temperatura se conserva 2 a 3° acima de zero. São êles, na verdade, muito nocivos durante o período de formação do fruto. O nome “geada” não tem contudo cabimento, pois a mesma não se pode formar em temperaturas positivas.

### C – *Geadas brancas*

a) Para melhor compreendê-la é necessário principiarmos pelo estudo do “orvalho”.

Este fenômeno consiste no aparecimento de pequenas gotas d’água que cobrem as “superfícies” expostas à radiação noturna, como o solo, pedras, telhas, folhas, etc. Com a progressiva perda de calor pela radiação, a temperatura *de tais corpos* (não do ar, propriamente) cai abaixo do “ponto de orvalho”, e assim a pequena lâmina atmosférica em contacto com o solo ou as folhas se resfria, condensando o seu vapor em gotas.

Note-se que a temperatura do próprio ar não desceu tanto, nem atingiu à de saturação (*dew-point*), caso em que ocorreria “nevoeiro”. Antes, ela se conserva perto de 5° superior à do solo, notando-se neste uma “inversão”: a tem-

---

*Nota do autor* – Por solicitação do Sr. Diretor do Serviço de Meteorologia, e para esclarecimento da “Comissão de Defesa contra a Geada”, foi redigido o presente relatório, que procuramos tornar tão completo quanto possível, mau grado a rapidez com que teve de ser preparado.

Ainda segundo as recomendações daquela autoridade (Ten. Cel. JOÃO LUIS VIEIRA MALDONADO, não foram focalizados quaisquer aspectos da defesa contra o fenômeno, todos já resolvidos pela referida “Comissão”. Mas somente os que dizem respeito à “previsão da geada”, a cargo do Serviço de Meteorologia.

peratura, mínima na superfície, aumenta para o ar livre, como também para o subsolo. O orvalho ocorre sobretudo em noites de céu limpo, dado que as nuvens reduzem a queda da temperatura, devolvendo à Terra parte da radiação



emitida. O fenômeno é também mais intenso sobre os corpos de maior poder emissor. Trata-se aliás de um meteoro benéfico, que conserva a planta refrescada e umedecida pela evaporação das gotas sob o sol da manhã, assim defendendo-a de um súbito aquecimento.

b) Se, contudo, o “ponto de orvalho” se encontrar abaixo de  $0^{\circ}$ , e a temperatura das superfícies expostas, como o solo, as plantas, etc., cair abaixo do referido *dew-point*, pela radiação noturna, o vapor d’água sublimará diretamente em gelo, sem passar pela fase líquida do orvalho.

Forma-se então a “geada branca”, por um mecanismo idêntico ao do orvalho, mas operando em temperaturas negativas. Como já explicamos, não é necessário que a temperatura do próprio ar desça abaixo de zero graus centígrados.

A planta fica desse modo coberta por grãos de gelo, constituindo a “geada branca”, que entretanto não causa diretamente prejuízo. Ela apenas “testemunha” que o vegetal se resfriou em excesso. E é sobretudo o rápido aquecimento posterior, ao levantar do sol, que causará maior estrago, destruindo os brotos e danificando as culturas. Se o dia amanhecer encoberto, permitindo um lento degelo, as perdas serão bem menores. Mas é raro que tal aconteça, pois a geada, no Paraná, ocorre em centros de anticiclone frio, de céu geralmente limpo em virtude da subsidência em altitude.

Do que ficou dito, depreende-se o erro da expressão “queda de geada”, pois esta *não cai* como chuva, antes se *forma* diretamente no local.

## 2 – ÍNDICES

Como vimos, é sobretudo a superfície do solo que, irradiando calor para o espaço durante a noite, sofre um resfriamento acentuado.

Este se propaga lentamente para cima, e assim a baixa temperatura inferior se comunica ao ar superficial que, por mais pesado, e dadas as condições de calma, não se mistura com as camadas mais elevadas, antes escorre lentamente ao longo dos vales e se acumula nos baixios. Mesmo assim, segundo ficou dito, a geada só ocorrerá quando a temperatura no solo cair abaixo do ponto de orvalho, e se este último for negativo. O prognóstico do fenômeno exige portanto:

1.º) A avaliação da queda de temperatura superficial, cujo valor extremo será sempre bem inferior (perto de  $5^{\circ}$  em média) ao da mínima do ar, esta medida no abrigo, a 1,70 metro de altura. O respectivo estudo porém, só poderá ser feito após o da radiação noturna, objeto do capítulo seguinte.

2.º) A previsão do “ponto de orvalho” na ocasião da geada.

Trata-se, como o provou NORMAND, de um elemento “conservativo” das massas de ar, não afetado pelas variações de temperatura (à pressão constante).

É contudo modificado pelos processos de evaporação e condensação. Mas, como diz PETERSEN, não ultrapassam de 1,5 as suas variações, em condições estáveis como as de geada no Brasil. Na verdade, o *dew-point* sobe 1,5 das 18 às 21h, mas depois declina novamente 1,5 até às 6h da manhã, não se cometendo erro sensível em supor válido, para toda a noite, o *dew-point* de 18h.

É o seguinte o mecanismo das variações: o valor do ponto de orvalho cresce durante o dia das 6 às 10h, dada a evaporação no solo. Às 10h a turbulência começa a levar o vapor para maior altura, e o *dew-point* declina até às 17h.

Com a redução da turbulência o mesmo vapor desce agora ao solo, resultando num aumento médio de 1,5 no *dew-point*, até às 22h. Neste momento, a progressiva deposição de orvalho vai reduzindo, também de 1,5, o valor do elemento até às 6h.

Pelo exposto, torna-se fácil compreender as regras seguintes:

a) "Ler o psicrômetro às 21h, calcular o *dew-point*, e subtrair 2º do valor encontrado. Se o resultado for abaixo (inferior) de 0º, prever geada".

Pois a temperatura do ar vai declinando até alcançar o ponto de orvalho. Aí a condensação, e conseqüente liberação do calor latente da água, reduzem a queda, que geralmente não ultrapassa 2º abaixo do *dew-point*.

b) "Se já bem cedo, antes de 24h, o termômetro caiu abaixo de 2º, a geada é quase certa". Trata-se da "temperatura de alarma", para a qual são regulados termômetros ligados a um sirene, a todos conclamando para as medidas de defesa.

No caso do Paraná a regulagem deverá ser feita para valores mais altos, a serem determinados por estudos locais.

### 3 - RADIAÇÃO

#### A - Céu limpo

A superfície do solo emite radiação como um corpo negro, pela fórmula de STEFAN

$$R_s = \sigma T_s^4, \text{ onde}$$

$$\sigma = 8,26 \times 10^{-11} = \text{constante de STEFAN}$$

$T_s$  = temperatura absoluta da superfície

$T_s = t + 273^\circ$ , sendo

$t$  = temperatura ( $^\circ\text{C}$ )

$R_s$  = radiação do solo em calg/cm<sup>2</sup>/mín.

Tal radiação, emitida em onda longa (cêrca de 10  $\mu$ , no infra-vermelho), devido à lei de WIEN, assume valores mais intensos nas altas temperaturas, como vemos abaixo:

t no solo	-10°	0°	10°	20°	30°	40°
$R_s = \sigma T_s^4$	0,395	0,459	0,530	0,609	0,696	0,792

Convém lembrar que em nada influi, no caso, a "natureza" da superfície, mas somente a sua temperatura, dado que a emissão se produz como num "corpo negro". Esta radiação do solo ( $R_s = \sigma T_s^4$ ) é, contudo, em grande parte absorvida pela atmosfera. Assim, nos comprimentos de onda 5,5 a 7  $\mu$ , e acima de 14  $\mu$ , a radiação é totalmente absorvida pelo vapor d'água. De 7 a 8,5  $\mu$  e 11 a 14  $\mu$  a absorção é apenas parcial. E por fim, de 8,5 a 11  $\mu$  o vapor fica transparente à radiação, que nesta faixa passa livremente.

Claro está que o ozônio também absorve (nos comprimentos de 9 a 10  $\mu$ ) e o gás carbônico igualmente (acima de 4  $\mu$ , e de 12 a 16,3  $\mu$ ), sendo mesmo considerado nas cartas de ELSASSER. Mas, segundo BRUNT, é pequena a sua contribuição, motivo por que só figura nas fórmulas, englobado nas constantes. Ora, a atmosfera, pela lei de KIRCHOFF, reemitirá toda a radiação que absorveu ( $R_a$ ) sendo porém  $R_a < R_s$ . Tal radiação é inferior à do solo, em parte devido às perdas através das faixas transparentes (8,5 a 11  $\mu$ ), e em parte dada a menor temperatura do ar superior, que lhe acarreta valores mais baixos da radiação, conforme a lei de STEFAN. Por outro lado, enquanto a emissão radiativa do solo era toda numa direção (para cima), a da atmosfera se faz em dois sentidos, e só volta a ser absorvida pela superfície a parte dirigida para baixo.

Dêsse modo, a "radiação efetiva" (realmente perdida pelo solo) será a diferença entre a emitida e a recebida de volta da atmosfera, ou seja:

$$R_n = R_s - R_a.$$

Se o cálculo de  $R_s$  é bastante preciso, o de  $R_a$  só pode ser feito através de métodos empíricos.

BRUNT, levando em conta que a absorção da radiação em onda longa pela atmosfera se efetua sobretudo através do vapor d'água, estabeleceu a fórmula

$$R_a = \sigma T_s^4 (a + b \sqrt{e}), \text{ sendo}$$

$R_a$  = radiação da atmosfera para a superfície

$T_s$  = temperatura do solo

$e$  = tensão do vapor (mb) a 1,70 m.A do ar superior) função desta, decresce pela lei de HANN

$a, b$  constantes que apresentam valores diversos.

Assim, em França, BAUR e PHILIPS acharam

$$a = 0,60$$

$$b = 0,042$$

Outros autores indicam

$$a = 0,48$$

$$b = 0,065$$

Nos E. Unidos JACOBS achou, como média das várias séries,

$$a = 0,44$$

$$b = 0,080$$

Tal fórmula se compreende logicamente como uma redução nos valores da lei de STEFAN, dado que a atmosfera não funciona como um corpo negro, e irradia tanto mais, quanto mais vapor d'água contiver

Em conclusão, e segundo BRUNT, a radiação efetiva do solo, chamando  $T_s = T$ , será:

$$\begin{aligned} R_n &= R_s - R_a = \sigma T^4 - \sigma T^4 (a + b \sqrt{e}) = \\ &= \sigma T^4 (1 - a - b \sqrt{e}), \end{aligned}$$

que se torna, para

$$a = 0,44,$$

$$b = 0,080 \text{ em } R_n = \sigma T^4 (0,56 - 0,08 \sqrt{e}).$$

E dêsse modo, quanto menor a tensão do vapor  $e$ , maior a radiação efetiva.

Ora, durante uma noite, a queda na temperatura  $t$ , mesmo acentuada, só acarreta uma pequena variação em  $T = t + 273^\circ$ ; quanto à tensão do vapor ( $e$ ) também pouco varia, segundo o comprovam as estatísticas. Por tudo isto,  $R_n$  é suposto constante no decorrer da noite, hipótese fundamental para a solução matemática do problema.

Note-se que ANGSTRÖM já obtivera uma fórmula semelhante para a radiação efetiva do solo,

$$R_n = \sigma T^4 (A + B \times 10^{-\gamma p})$$

na qual, segundo PHILIPS,

$$A = 0,220$$

$$B = 0,148$$

$$\gamma = 0,0068$$

$$p = \text{tensão do vapor (mm)}.$$

Da parcela  $\frac{B}{10^{\gamma p}}$  conclui-se igualmente que quanto menor a tensão do vapor, maior a radiação efetiva  $R_n$ , dêsse modo muito intensa nas massas polares continentais, onde a baixa temperatura é associada à grande secura do ar.

### B - Céu encoberto

Até aqui estudamos a radiação noturna efetiva (do solo menos a da atmosfera) para o caso do céu limpo. Havendo nuvens, estas irão contribuir, com a sua própria radiação, para aumentar a parcela de retorno ao solo, tudo resultando em maior diminuição da radiação efetiva (e portanto da queda de temperatura à noite). A base das nuvens radia como um corpo negro  $R_c = \sigma T_m^4$ , sendo  $T_m$  a temperatura da referida base, assim tanto maior quanto mais baixa a nuvem. Por este fato, nuvens altas pouco influem na queda de temperatura do solo, mas um céu coberto por nebulosidade baixa ( $N_s$ ,  $S_c$ ,  $C_b$ ) influi bastante, reduzindo de muito a variação noturna, e elevando as mínimas.

Sob céu encoberto, ( $m = 10$ ) a radiação efetiva do solo será portanto

$$\begin{aligned} R_{nc} &= (R_s - R_n) - R_c = \\ &= R_n - R_c, \text{ sendo } R_n \text{ a radiação efetiva com céu limpo, já calculada.} \end{aligned}$$

$R_c = \sigma T_m^4$  pode ser calculada pelo valor médio das temperaturas  $T_m$  na base das nuvens, bem conhecido através das sondagens. Geralmente, porém, a cobertura não é total, atingindo apenas  $\frac{m}{10}$  partes. Neste caso, a parte descoberta corresponde a  $\left(1 - \frac{m}{10}\right)$  do céu, e a coberta a  $\frac{m}{10}$ .

A radiação efetiva  $R$  será então a soma da fração  $\left(1 - \frac{m}{10}\right)$  da radiação sob céu limpo  $R_n$ , mais a fração  $\frac{m}{10}$  da radiação efetiva com céu coberto  $R_{nc}$ , ou:

$$\begin{aligned} R &= R_n \left(1 - \frac{m}{10}\right) + R_{nc} \frac{m}{10} \\ &= R_n - R_n \frac{m}{10} + \frac{R_{nc}}{R_n} R_n \frac{m}{10} = \\ &= R_n \left[1 - \frac{m}{10} \left(1 - \frac{R_{nc}}{R_n}\right)\right] = \\ &= R_n \left[1 - K \frac{m}{10}\right], \text{ onde} \\ K &= \left(1 - \frac{R_{nc}}{R_n}\right) \end{aligned}$$

Como sabemos,  $R_n > R_{nc}$ . Se o céu está coberto,  $m = 10/10$  e

$$\begin{aligned} R &= R_n \left[1 - \left(1 - \frac{R_{nc}}{R_n}\right) \frac{10}{10}\right] = \\ &= R_n \left[1 - 1 + \frac{R_{nc}}{R_n}\right] = R_{nc}. \end{aligned}$$

Se o céu fôr limpo,  $m = 0/10$  e

$$R = R_n \left[1 - \left(1 - \frac{R_{nc}}{R_n}\right) \times 0/10\right] = R_n, \text{ tudo provando a}$$

coerência da fórmula.

Os valores de  $K = \left(1 - \frac{R_{nc}}{R_n}\right)$  estão tabelados abaixo. Como vimos,  $R_c$  constitui a radiação da cobertura total de nuvens, tanto maior quanto mais alta a temperatura, isto é, quanto mais baixo o teto. Para nuvens muito baixas,  $R_c \cong R_n$ , tornando  $R_{nc} = R_n - R_c$  quase nulo, o que acarreta um valor de  $K = \left(1 - \frac{R_{nc}}{R_n}\right)$  muito elevado. Já para nuvens altas,  $R_c$  é fraco, acarretando (como  $R_{nc} = R_n - R_c$ ) que  $R_{nc} \cong R_n$ , ou  $K = [1 - \sim 1] \cong 0$ .

Eis os valores de K, conforme a altura das nuvens:

Teto (m)	1500	2000	3000	5000	8000
K	0,87	0,83	0,74	0,62	0,45

Dáí resultando, segundo GEIGER, para

Nuvens baixas e grossas (Sc, Ns, St):  $K = 0,76$

Nuvens altas, tênues (Ac, As, Cs):  $K = 0,52$

Nuvens de gêlo (véu de Ci):  $K = 0,26$

JACOBS, nos E. Unidos, adotou os seguintes valores:

Cobertura	K
Ns, St, Sc	0,864
Ac, As	0,769
Cs	0,135
Limpo	0,000

Vemos assim que, pela fórmula

$$R = R_n \left[ 1 - K \frac{m}{10} \right], \text{ teremos para 10 partes de nuvens baixas:}$$

$$R = R_n \left[ 1 - K \times \frac{10}{10} \right] = R_n [1 - 0,864] =$$

$= R_n \times 0,136$ , concluindo-se que neste caso a radiação efetiva é apenas 1/10 da observada com céu limpo.

Como adiante veremos, será esta igualmente a relação das quedas de temperatura nos dois casos.

#### 4 - TEMPERATURA

Até agora deduzimos a quantidade de calor perdida pelo solo sob o efeito da radiação (R). Já vimos que para céu limpo a perda efetiva  $R_n$  era constante durante tôda a noite; o mesmo se poderá dizer para céu coberto ou

nublado, supondo invariável a cobertura  $\frac{m}{10}$ , pois então

$$R = R_n \left[ 1 - K \frac{m}{10} \right], \text{ onde}$$

$R_n$ , K e m são constantes.

Para compensar tal perda, o solo só encontra, à noite, uma fonte de calor, que é o armazenado no subsolo, durante o dia. Assim, só poderá perder o

valor  $R$  para o espaço, através de um fluxo, também igual e constante, de calor do subsolo, dado pela fórmula de NEWTON, numerada (18) em BRUNT:

$$R = Q = K_1 \rho_1 c_1 \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (18)$$

e na qual

$z$  = profundidade (contada positivamente para baixo), sendo

$z = 0$  na superfície.

$T$  = temperatura absoluta

$K_1$  = condutividade específica, adiante definida.

$\rho_1$  = densidade do solo

$c_1$  = calor específico do solo =

= n.º de calorías que fazem aumentar de 1º a temperatura da unidade de volume do mesmo.

A lei de NEWTON é evidente: o fluxo de calor será proporcional à condutibilidade  $K_1$ , à densidade  $\rho_1$ , ao calor específico  $c_1$ , e ao gradiente interno de temperatura  $\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)$ , tomado no ponto que nos interessa ( $z = 0$ ).

Por outro lado, a "variação de temperatura" que tal radiação  $R$  acarreta, será função da "natureza" do solo, pois dependerá da rapidez com que a perda de calor na superfície é compensada pelo citado afluxo térmico das camadas profundas, tudo segundo a fórmula de condução do calor

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (17)$$

equação (17) de BRUNT, na qual  $t$  é agora o "tempo", em segundos devendo  $R$  então ser expresso igualmente em cal/cm²/seg.

Tal fórmula é apenas um caso particular da equação do calor de FOURIER (1822)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = h^2 \nabla^2 T,$$

o operador  $\nabla^2$  (Laplaciano) estando simplificado para uma só dimensão ( $z$ ), enquanto  $h^2$  é uma constante.

Segundo FOURIER  $h^2 = \frac{K}{c_1 \rho_1}$  onde

$K$  = condutividade térmica

$\rho_1$  = densidade

$c_1$  = calor específico.

BRUNT chama  $h^2$  de  $K_1$  (condutividade específica) e assim

$$K = h^2 c_1 \rho_1 = K_1 c_1 \rho_1.$$

Como em (18)  $R$  é constante, e no membro direito  $K_1$ ,  $c_1$ ,  $\rho_1$  são fixos para cada espécie de solo, segue-se igualmente

$$\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = \text{constante na superfície } (z = 0).$$

Derivando (17) em relação a  $z$ :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = K_1 \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).$$

E, desenvolvendo o primeiro membro

$$\frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial S}{\partial t}.$$

(chamando  $S = \frac{\partial T}{\partial z}$ ) ou

invertendo a ordem de derivação no segundo membro:

$$\frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}$$

De tudo resulta a fórmula

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (20)$$

Trata-se de uma equação em derivadas parciais, que deverá ser resolvida mediante a condição limite

$$\frac{\partial T}{\partial z} = S = \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \text{ em } z = 0, \text{ dada por (18)}$$

A solução de (20) é, segundo BRUNT

$$S = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^{\infty} e^{-u^2} du \quad (21)$$

na qual  $\pi = 3,1416$ .

Para integrar a fórmula de BRUNT

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}, \text{ sendo } S(z, t) = \frac{\partial T}{\partial z}$$

convém recorrer à dedução dada por PIPES (*Applied Mathematics*), pp. 547 a 549:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = h^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}; \quad v(x, t) = \text{temperatura}$$

Vemos que as notações assim se correspondem

PIPES	BRUNT
$v$	$S$
$h^2$	$K_1$
$x$	$z$
$\theta$	$u$
$\left\{ \begin{array}{l} v = v_0 \\ x = 0 \\ t > 0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} S = S_0 = \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \\ z = 0 \\ t > 0 \end{array} \right.$
$\left\{ \begin{array}{l} v = 0 \\ x > 0 \\ t = 0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} S = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ z > 0 \\ t = 0 \end{array} \right.$
$h$	$\sqrt{K_1}$

Após longo desenvolvimento, através do cálculo operacional, e que não caberia aqui repetir, PIPES chega à solução final, para as condições limites estabelecidas:

$$v(x, t) = v_0 \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-\theta^2} d\theta \right]$$

$$\text{onde } w = \frac{a}{2\sqrt{t}} = \frac{x}{2h\sqrt{t}}$$

Temos, contudo que

$$\begin{aligned} \int_0^w \dots &= \int_0^\infty \dots - \int_w^\infty \dots, \text{ ou} \\ v(x, t) &= v_0 \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty e^{-\theta^2} d\theta + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_w^\infty e^{-\theta^2} d\theta \right] = \\ &= v_0 \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_w^\infty e^{-\theta^2} d\theta \right], \\ &\left( \text{dado que } \int_0^\infty e^{-\theta^2} d\theta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \right), \text{ ou} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= v_0 \left[ 1 - 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_w^\infty e^{-\theta^2} d\theta \right] = v_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_w^\infty e^{-\theta^2} d\theta = \\
 &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_0 \int_{\frac{x}{2h\sqrt{t}}}^\infty e^{-\theta^2} d\theta
 \end{aligned}$$

Voltando à notação de BRUNT, segue-se

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^\infty e^{-u^2} du,$$

assim demonstrada.

Ela obedece à condição (18), uma vez que para  $z = 0$  temos

$$S = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \int_0^\infty e^{-u^2} du$$

$$\text{Ora, } \int_0^\infty e^{-u^2} du = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{ e daí } S = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \frac{2 \cdot \sqrt{\pi}}{2} = \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1},$$

condição limite de BRUNT.

Agora, integrando (21) resulta

$$\begin{aligned}
 T = T_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \left\{ \sqrt{K_1 t} \cdot e^{-\frac{z^2}{4K_1 t}} - \right. \\
 \left. - z \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^\infty e^{-u^2} du \right\} \quad (22)
 \end{aligned}$$

Temos, na verdade,

$$\int \partial T = \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \right] \cdot \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^\infty e^{-u^2} du \int dz$$

Mas  $\int \partial T = T - T_1$ , sendo  $T$  a temperatura no instante  $t$ , e  $T_1$  a inicial, a  $t = 0$  (18 horas). Sendo constante o termo da chave, precisamos resolver

$$\int \left\{ \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^\infty e^{-u^2} du \right\} dz,$$

o que faremos por partes, chamando  $U = \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^{\infty} e^{-u^2} du$

e  $dV = dz$ , ou  $V = z$ ,

$$\begin{aligned} \text{Como } \int U dV &= UV - \int V dU, \text{ teremos } \int \left\{ \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^{\infty} e^{-u^2} du \right\} dz = \\ &= z \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^{\infty} e^{-u^2} du - \int z dU. \end{aligned}$$

$$\text{Mas } dU = d \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^{\infty} e^{-u^2} du = \left| e^{-u^2} du \right|_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^{\infty}$$

por se anularem os sinais  $d$  e  $\int$ . Assim o último termo da diferença se torna

$$\begin{aligned} - \int z dU &= - \int z \left| e^{-u^2} du \right|_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^{\infty} \\ &= - \int z \left[ \frac{1}{e^{+\infty}} - e^{-\left(\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}\right)^2} \right] d \left( \frac{z}{2\sqrt{K_1 t}} \right) \end{aligned}$$

pois  $du$ , no limite inferior, é  $d \left( \frac{z}{2\sqrt{K_1 t}} \right)$ .

Prosseguindo, e dado que  $\frac{1}{e^{\infty}} = 0$ , teremos:

$$\begin{aligned} - \int \left( 0 - e^{-\left(\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}\right)^2} \right) \frac{z dz}{2\sqrt{K_1 t}} &= + \int e^{-\frac{z^2}{4K_1 t}} d \left[ \frac{z^2}{2 \times 2\sqrt{K_1 t}} \right] \\ &= + \int e^{-\frac{z^2}{4K_1 t}} d \left( \frac{z^2}{4\sqrt{K_1 t} \sqrt{K_1 t}} \right) \sqrt{K_1 t} \end{aligned}$$

(multiplicando e dividindo por  $\sqrt{K_1 t}$ )

$$\begin{aligned} &= - \int \left[ e^{-\frac{z^2}{4K_1 t}} d \left( \frac{z^2}{4K_1 t} \right) \right] \sqrt{K_1 t} \\ &= - \left| e^{-\frac{z^2}{4 \times K_1 t}} \right| \sqrt{K_1 t} \end{aligned}$$

pois  $\int e^x dx = e^x$ . Substituindo

$$T - T_1 = \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \right] \left\{ z \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^{\infty} e^{-u^2} du - \left( e^{-\frac{z^2}{4 \times K_1 t}} \right) \sqrt{K_1 t} \right\} \text{ Donde}$$

$$T = T_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \left\{ \sqrt{K_1 t} \cdot e^{-\frac{z^2}{4 K_1 t}} - z \int_{\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}}}^{\infty} e^{-u^2} du \right\} \quad (22),$$

como queríamos provar.

Na superfície, onde  $z = 0$ , a temperatura será portanto

$$T = T_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \left\{ \sqrt{K_1 t} \cdot e^0 - \left[ 0 \times \int_0^{\infty} e^{-u^2} du \right] \right\} =$$

$$= T_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}} \sqrt{t} \quad (23).$$

Ora, já vimos que para  $z = 0, S = \frac{\partial T}{\partial z} = \text{constante}$ , condição limite dada por (18). Por outro lado, de (21) e para  $t = 0$ , o limite inferior da

integral fica  $\frac{z}{2\sqrt{K_1 t}} = \infty$ , e assim  $S = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1} \int_{\infty}^{\infty} e^{-u^2} du = 0$ .

Daí, sendo constantes os demais termos, depreende-se, de  $S = \frac{R}{\rho_1 c_1 K_1}$ , que a radiação efetiva  $R$  é nula a  $t = 0$ , quando salta súbitamente para o valor  $R = \text{constante}$ .

No crepúsculo, realmente, o fato se verifica: com a intensa radiação solar à tarde, a radiação para fora,  $R_n$ , é quase nula, mas com o pôr do Sol, às 18h, ela sobe rapidamente para o valor  $R$ .

Resta lembrar apenas que, na prática,  $T_1$  será a temperatura no crepúsculo e, para o cálculo da mínima, deveremos tomar  $t$  (em horas) igual à duração da noite (até a aurora, portanto). A fórmula permite, aliás, determinar a temperatura nas várias horas da noite.

A mudança da unidade de tempo (segundos em horas) deverá ser acompanhada da troca de unidade R para calg/cm<sup>2</sup>/min. Realmente,

$$\begin{aligned} R/\text{seg} \times \sqrt{t \text{ seg}} &= \\ &= R/\text{seg} \times \sqrt{t \text{ horas} \times 3600} = \\ &= \left( \frac{R}{\text{seg}} \times 60 \right) \sqrt{t \text{ horas}} = \\ &= \left( \frac{R}{\text{min.}} \right) \sqrt{t \text{ horas.}} \end{aligned}$$

Convém antes de prosseguirmos, definir melhor a condutividade K<sub>1</sub>, determinada por

$$K_1 = \frac{t (z_2 - z_1)^2}{4 L^2 \pi}$$

sendo t = 24h, z<sub>2</sub> e z<sub>1</sub> duas profundidades no solo, e L a diferença de tempo (em segundos) na ocorrência das temperaturas máximas em z<sub>2</sub> e z<sub>1</sub>. Aliás, pela teoria do calor de FOURIER, K<sub>1</sub> = n.º de calg por cm<sup>2</sup> que atravessa 1 cm de distância vertical no solo, quando nesta distância existir uma diferença de temperatura de 1º.

(Realmente, no chamado "problema de muro", em que duas placas extremas estão a temperaturas T e t, sendo T > t, separadas pela distância e, e apresentando área S, a quantidade de calor Q que atravessa o muro independe da posição da secção no seu interior, e se expressa por

$$Q = K \frac{(T - t)}{e} S$$

Para S = 1 cm<sup>2</sup>, e = 1 cm, (T - t) = 1.º, K = Q, como dissemos).

Substituindo agora R pela sua expressão, já determinada:

$$R = R_n \left( 1 - K \frac{m}{10} \right) \text{ onde}$$

$$R_n = \sigma T^4 (1 - a - b \sqrt{e}), \text{ teremos:}$$

$$T = T_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sigma T^4 (1 - a - b \sqrt{e}) \left( 1 - K \frac{m}{10} \right) \frac{\sqrt{t}}{\rho_1 e_1 \sqrt{K_1}},$$

fórmula final.

Nos E. Unidos, JACOBS tomou para valores das constantes da atmosfera:

$$a = 0,44$$

$$b = -0,08$$

E nos solos a média das diversas espécies, obtendo

$$C_1 = 0,186$$

$$K_1 = 4,7 \times 10^{-3}$$

$$e_1 = 2,66.$$

Assim, para uma temperatura média da superfície  $T = 280^\circ$ , e sendo  $S = \sqrt{\pi} \rho_1 c_1 \sqrt{K_1} = 0,082$ ;  $2 \sigma T^4 = 1,0105$  resultou a fórmula (para céu limpo):

$T = T_1 - 12,1 (0,56 - 0,08 \sqrt{e}) \sqrt{t}$   
que, numa noite média de  $t = 12h$  se torna

$$T = T_1 - 44,5 (0,56 - 0,08 \sqrt{e}).$$

Para céu nublado e noite de 12h:

$$T = T_1 - 44,5 (0,56 - 0,08 \sqrt{e}) \left(1 - K \frac{m}{10}\right), \text{ em que } K \text{ dependerá}$$

do gênero da nuvem. Para o caso de céu limpo, que mais interessa à questão da geada, teremos uma variação de temperatura à noite, segundo (23), e como  $T < T_1$ :

$$\begin{aligned} T_1 - T &= \Delta T = \\ &= + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}} \sqrt{t} = \\ &= + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{(\sigma T^4) (1 - a - b \sqrt{e})}{\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}} \sqrt{t}. \quad (24) \end{aligned}$$

Esta fórmula permite concluir que a curva do termógrafo à noite será uma *parábola*. Com efeito, sendo constantes os vários termos à direita, exceto  $\sqrt{t}$ :

$$\begin{aligned} T_1 - T &= \text{const} \times \sqrt{t} \quad (24) \text{ ou} \\ (T_1 - T)^2 &= (\text{const})^2 \times t, \text{ da forma} \\ y^2 &= 2p x, \text{ parabólica.} \end{aligned}$$

Segundo observações feitas na Inglaterra, não há aliás apenas uma parábola, senão duas, ocorrendo a descontinuidade perto das 20h.

No caso que nos interessa atualmente (a zona cafeeira do Paraná) deveremos tomar para a duração da noite, no inverno,  $t = 13h$ . e assim será preciso

multiplicar a fórmula de JACOBS pelo fator  $\frac{\sqrt{13}}{\sqrt{12}}$ , obtendo

$$T = T_1 - 46,5 (0,56 - 0,08 \sqrt{e}) \left(1 - K \frac{m}{10}\right),$$

na qual  $T_1$  será a temperatura absoluta às 18h de tempo local, e = tensão do vapor (mb) à mesma hora.

Outros autores preferem, em vez de usar o fator  $\left(1 - K \frac{m}{10}\right)$ , calcular a mínima para céu limpo, e adicionar à mesma as seguintes correções, conforme a nebulosidade:

5 a 10 de Ci, Cc, Cs	.....	somar	1º
8 a 10 de Cs	.....	"	2º
7 a 10 de As	.....	"	3º
4 a 7 de Ac	.....	"	3º

10 de Ac .....	”	4°
1 de Ns, St, Ss .....	”	1°
4 a 6 de Ns, St, Sc .....	”	2°
9 de Ns, St, Sc .....	”	4°
10 de Ns, St, Sc .....	”	5°
Nevoeiro .....	”	5°

Tal sistema convirá sobretudo no caso das fórmulas empíricas adiante descritas, e permite justificar uma regra importante: *se a noite fôr coberta e a temperatura às 18h se conservar acima de 4°, a geada é improvável (BROOKS)*, bem como as regras universais:

a) A geada é mais provável em noite limpa, que favorece a radiação para o espaço, não devolvida ao solo pelas nuvens.

b) A geada é mais provável (no Brasil) sob ar polar sêco, de baixa tensão do vapor.

c) A geada é menos provável sob uma floresta que nos campos: a copa das árvores representa aqui o papel da superfície radiante. As fôlhas se resfriam, comunicando tal resfriamento ao ar circunjacente. Este, mais pesado, cai, mistura-se ao mais quente inferior, e assim a temperatura sob a floresta se conserva elevada, defendendo o solo contra a geada. O sombreamento dos cafeeiros (pelo ingazeiro, como se recomenda) seria pois uma boa solução, pelo menos contra a geada branca.

Outro recurso seria o plantio em zonas de grande nebulosidade noturna, o que não é possível encontrar na região.

## 5 – TOPOGRAFIA

### *Vales*

Tudo o que foi dito se refere a um horizonte plano. Nos vales a radiação depende dos taludes, e fica reduzida, conforme a inclinação B dos mesmos, às seguintes porcentagens:

B	0°	5° a 15°	20°	30°	45°	60°	75°	90°
%	100	98	96	90	75	54	28	0

Dessa maneira, a queda de temperatura deveria se reduzir das mesmas frações. Contudo, o vale recolhe o ar frio que desce das encostas, e não se pode calcular com rigor a redução, que só apresentaria aliás, valor sensível com inclinação superior a 30°.

Pelo contrário, os baixios são até zonas muito perigosas, onde se acumula lentamente o ar frio que desce à noite das montanhas, nêles sendo muito frequentes as geadas.

### *Montanhas*

A geada é naturalmente mais freqüente nas zonas de altitude, planaltos e montanhas, que apresentam temperaturas mais baixas, devido ao gradiente

atmosférico normal ( $1^{\circ}/200\text{m}$ , em média), a queda noturna já partindo assim de valores mais próximos de  $0^{\circ}$ . A zona cafeeira do Paraná não se estende às alturas de 900 a 1 000 metros, onde a frequência de geadas tornaria impossível o cultivo. Contudo, zonas mais elevadas são às vezes mais favoráveis que o vale, dado que nas noites calmas o ar frio dos taludes escorre, como já dissemos, para os baixios.

Pois a coluna atmosférica sobre o vale não se resfria, como sabemos. Apenas o ar "junto da montanha", o faz, pela radiação do solo, ficando frio e descendo lentamente por gravidade, tratando-se de um vento com velocidade média de  $1,5\text{m/seg}$ . Não sendo aliás um vento isobárico, inexistente o aquecimento do föhn, e o ar se conserva frio, acumulando no fundo do vale.

Nos taludes porém, como desce em turbilhões, êle vai se misturando com o ar quente da coluna livre central e assim aquecendo. Por êste fato a temperatura nas montanhas é mais elevada à noite que a das zonas baixas, formando o que se chama de *thermal belt*. Claro que em tal zona, que aliás, segundo SCHMIDT, alcança a maior altura pela madrugada, a geada será menos frequente que no planalto superior, ou no vale inferior.

GEIGER achou para a altura média do *thermal belt* 800 metros, e assim será, esta, nos vales, a zona com menor frequência de geadas.

### Orientação

Há uma diferença sensível na frequência do fenômeno conforme a exposição do terreno, e a sua umidade.

#### a) Caso de solo sêco:

Estando o Sol sempre a norte, durante o inverno do hemisfério sul, as plantações situadas na encosta *leste* recebem o calor solar diretamente a partir das 7 horas, e assim o forte aquecimento completa o estrago já ocasionado pelas geadas. Enquanto isso, os cultivos situados na encosta oeste permanecem na sombra, aquecidos lentamente pelo calor do ar, dando tempo a que o vegetal restabeleça sua circulação, e minorando os efeitos da geada. Já às 12 horas, quando o Sol começa a aquecer diretamente a vertente oeste, esta vai adquirindo maior temperatura, ao passo que a vertente leste fica na sombra, quase não se aquecendo mais. Por tudo isto, a maior temperatura máxima ocorre sempre na encosta NW, no hemisfério sul, enquanto a menor máxima se verifica na encosta SE.

#### b) Caso de solo úmido:

Nestas condições, o aquecimento, a partir de 7 horas na encosta leste, é menos intenso, pois grande parte do calor é gasto na evaporação da água, tornando menos grave o efeito do Sol sobre as plantas, após uma geada. Enquanto isso, o ar aquecido vai secando o solo na encosta oeste. Quando o Sol aí chega, à tarde, já encontra sêca a superfície, sendo empregado todo o calor no aquecimento do ar. Assim, como no caso anterior, a maior temperatura máxima continua a ocorrer na encosta NW, conservando-se fresca a de SE, agora na sombra.

À noite, por outro lado, o resfriamento partirá de um nível mais alto na vertente NW, assim menos sujeita à geada que a de SE, onde às 18h já o ar está mais frio. Serão, portanto, mais raras e menos graves as geadas nas exposições a oeste e noroeste, verificando-se o contrário nas de leste e sueste, à parte outros fatores.

## 6 – SOLO

Até agora este fator só foi levado em conta através de seus valores médios. Devemos porém estudá-lo com maior exatidão.

Segundo DUFOUR, o calor específico  $c_1$  é bastante fraco no ar (0,17) subindo a 10, na água pela própria definição de caloria, enquanto nos minerais oscila em torno de  $c_1 = 0,2$ .

Já a condutividade  $K_1$ , também muito pequena no ar = 0,000054, passa na água para 0,0014, oscilando nos minerais de 0,001 a 0,006. Assim, um solo *bom condutor* permitirá substituir o calor perdido pela radiação, apresentando mínimas mais elevadas que outro mau condutor. Por fim a densidade  $\rho_1$ , de valor 1 na água, cai a 0,1 na neve, que contém grande porcentagem de ar ( $\rho = 0,00127$ ), e se conserva em torno a 2,5 para os minerais da crosta terrestre.

Sabendo agora a composição dos vários solos, será fácil calcular o produto das constantes  $\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}$  no denominador da fórmula de BRUNT.

DUFOUR apresenta o seguinte quadro:

Solo	Sol. %	Liq. %	Gás. %	$\rho_1$	$c_1$	$K_1$	$\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}$
Sêco	60	20	20	1,8	0,23	0,0025	0,0207
Normal	60	30	10	1,9	0,52	0,0030	0,0543
Saturado	60	40	0	2,0	0,81	0,0035	0,0955
Neve	10	—	90	0,1	0,50	0,0050	0,0035

Como vemos, a densidade do solo aumenta com a quantidade de água, líquido pesado que substitui o ar mais leve nos poros da terra. Crescem pela mesma razão os valores de  $c_1$ ,  $K_1$ , e assim do denominador  $\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}$ . A neve, de fraca densidade, constitui um caso à parte, com denominador mínimo. BRUNT cita valores mais generalizados, ou seja (Solo sêco):

$$\rho_1 = 2,5$$

$$c_1 = 0,2$$

$$K_1 = 4,7 \times 10^{-3} = 0,0047.$$

Solo molhado (20% de água): Apenas declara que o valor de  $\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}$  é cinco vezes maior que o do solo sêco, no que concorda praticamente com a tabela de DUFOUR.

Para neve indica:

$$\rho_1 c_1 \sqrt{K_1} = 0,004, \text{ praticamente o citado na tábua anterior.}$$

É fácil concluir, dada a colocação do produto no denominador, que a “queda de temperatura” será inversamente proporcional a  $\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}$ . Assim ela se apresentará bem maior (cêrca de 5 vêzes) sôbre solo sêco que sôbre o saturado. Pois neste a água, com fortes valores de  $\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}$ , substitui o ar, de pequenos valores dos mesmos constituintes. Isto, malgrado os parâmetros da água serem menores que os da parte sólida, que ela não substitui, entretanto. Por êste fato, molhar o solo constitui ótima defesa contra a geada, tanto mais eficaz quanto mais encharcado o chão. E assim, se choveu à tarde, o fenômeno será pouco provável. A não ser que um vento constante, através de forte evaporação, acarrete novo resfriamento. Com efeito, a evaporação de água rouba calor ao solo (calor latente de vaporização), e esfria o ar, sobretudo onde existem plantas rasteiras, ou grama molhada. E, dêsse modo, a chuva pode ser uma arma de dois gumes, tudo dependendo da evaporação, ativada pelo vento. A noite seguinte à chuva, quando limpa e de vento forte será propícia à geada.

Já vimos que se tornam perigosos, propiciando a geada, os solos de fraca condutibilidade. Nestes, além de ser reduzido o afluxo de calor do subsolo, o que acarreta queda acentuada na temperatura superficial, crescem mais dois fatôres:

a) o solo mau condutor, logra armazenar escasso calor durante o dia, e assim pouco tem a devolver à noite.

b) Por fraca penetração do calor diurno, as temperaturas máximas foram altas, o que, aquecendo muito as plantas, torna-as mais sensíveis ao posterior resfriamento abaixo de 0° pela madrugada (geada). Cabe acrescentar que um solo pantanoso, apesar da água, é pouco condutor, e assim favorece as geadas.

Para um cálculo mais rigoroso, convirá usar os valores de DUFOUR, em lugar da simples média já citada no estudo feito por JACOBS. Mas não basta considerar a umidade do solo, e sim sua própria composição química, dada sobretudo a variação de  $K_1$ . Assim o menor produto  $\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}$  se verifica sôbre *areia*, que dará portanto a maior variação, ou seja as menores mínimas. Seguem-se, com variações decrescentes e mínimas cada vez mais fracas: terra leve, terra pesada, pedra e água. Por fim, e como já foi dito, o menor produto corresponde à neve, (dada a grande porcentagem de ar) sôbre a qual as mínimas serão assim extremamente baixas. Mas isto não constitui problema para a zona em estudo. Finalmente a côr do solo também influi, mas agora através do fator radiação R. Quanto mais claro o chão, mais afastado das condições de corpo negro, portanto menos irradiação, acarretando menor resfriamento, e mínimas mais fracas. As “condições da lavoura” também influem: a terra recentemente arada ou revolvida apresenta grande porcentagem de ar, logo, menor densidade e valores mais baixos do produto  $\rho_1 c_1 \sqrt{K_1}$ , (por ser o ar pouco condutor), o que acarreta acentuado resfriamento noturno, e mínimas muito inferiores às do solo endurecido. Lavrar a terra é portanto desaconselhável em época de geada, a menos que se a misturasse com a camada inferior de maior condutibilidade, o que até seria vantajoso.

## 7 — REVESTIMENTO

A grama, pelo aumento da superfície radiante, através das fôlhas, e pela evaporação d'água, constitui um acentuado fator de resfriamento, favorecendo as geadas.

É assim que para 1 metro quadrado de solo nu há até 50 metros quadrados de fôlhas evaporando, as quais, por ficarem frias, roubam calor ao ar, cuja temperatura assim declina.

Além disso, tanto a grama quanto a vegetação velha isolam o calor, correspondendo portanto a um solo mau condutor. Em resultado o ar fica até 9° mais frio com tal revestimento que no solo nu, o que explica a mais freqüente formação de geadas e neveiros sôbre grama. Por êste fato, aconselha-se *limpar a plantação*, removendo o tapête de fôlhas que acarreta mínimas muito baixas. Esta, às vêzes, a única razão das diferenças de comportamento, quanto à geada, em dois cafèzais semelhantes: um foi cuidado, outro não.

Por fim, tendo em vista o capítulo seguinte, devemos acentuar que a natureza do solo influi mais que a calmaria na formação da geada.

## 8 — VENTO

Fórmulas e regras até agora estudadas se referem às condições de calmaria, bem mais favoráveis à geada branca (de radiação), dada a estratificação do ar frio superficial. Isto porque, se o vento soprar com velocidade forte ou, sendo fraca, na direção de subida da encosta, a geada será difícil.

Realmente, neste último caso fica impedido o acúmulo de ar frio no fundo dos vales; e no primeiro, dada a forte turbulência e mistura com o ar superior mais quente, o vento não permite ao ar superficial a perigosa queda de temperatura que causa a geada.

As condições de calmaria ocorrem sobretudo nos centros de alta pressão que, para permitirem geada, devem ter baixa temperatura e fraca tensão do vapor. Assim, no caso do Paraná e São Paulo, a geada só ocorrerá em centros anticiclônicos, de massa polar continental, e cuja previsão de movimentos ou intensificação terá de ser feita nos centros previsores. As regras necessárias a um tal estudo escapam ao objeto dêste trabalho, mas se encontram condensadas em nossos livros *Previsão do Tempo e Circulação Superior*. De qualquer modo, os princípios de *calmaria favorável à geada*, e *vento desfavorável se referem às condições vigentes à noite*. Durante o dia, entretanto, o contrário pode ocorrer. Com efeito:

1.º) Se o dia foi calmo e limpo, a temperatura se eleva muito no solo, sob a intensa radiação solar. Assim a queda de temperatura à noite parte de um nível mais alto, podendo não descer até 0°, o que evitará a geada.

2.º) Se o dia foi de muito vento, a turbulência mistura o ar superficial com o superior, impedindo uma acentuada elevação da temperatura máxima. A manutenção de fortes ventos à noite, impedirá a geada. Mas se a calmaria ocorrer justamente após 18h, associada a céu limpo, então a geada será muito provável, pois a queda noturna de temperatura já principia de valores  $T_1$  bastante baixos no crepúsculo.

## 9 — FÓRMULAS

*Fórmula de HEWSON*

Além da indicada por BRUNT, outras fórmulas são usadas no cálculo da temperatura mínima, tôdas empíricas e baseadas nos fatôres já estudados.

HEWSON propõe um gráfico, cujas coordenadas são a "umidade relativa às 15h (na vertical) e a diferença entre a "Mínima do dia seguinte e o *dew-point* de hoje às 15h na horizontal.

Os diversos pontos se distribuem em tôrno de uma *parábola* que será determinada exatamente pelo método dos mínimos quadrados. A seguir, dadas a umidade relativa e o *dew-point* de qualquer dia às 15h, bastará extrair da fórmula (ou do gráfico) a diferença (mínima — *dew-point*, a qual somada ao *dew-point* permitirá prever a mínima do dia seguinte.

ANGOT cita outras fórmulas, como por exemplo:

$$m = ct - dT - K \text{ onde}$$

$m$  = temperatura mínima;  $c$ ,  $d$ ,  $K$  são constantes obtidas pelo método dos mínimos quadrados.

$T$  = temperatura às 18h.

$t$  = temperatura *úmida* às 18h.

Recomenda calcular duas fórmulas: uma para noite limpa, outra para noite encoberta.

*Fórmula de YOUNG*

É bastante exata, sobretudo em noite limpa e de calmaria. Mas, conforme o estado do solo, aos valores da mínima calculados dever-se-á *subtrair* 1° para solo sêco, e somar 1° para solo molhado, dados os motivos já expostos. O erro máximo oscila sempre em tôrno de 2°. Cada localidade terá uma fórmula diferente, para levar em conta os fatôres topográficos, calculando-se as constantes pelo método seguinte, que toma em consideração a cobertura. Como já foi dito, a mínima depende do *dew-point* e umidade da véspera às 15h, seja:  $y = f(d) + \varphi(h)$ .

$$y = d - \frac{h - n_1}{n_2} + V_d + V_h$$
, em que  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $V_d$ ,  $V_h$ , variam com a nebulosidade (0 — 2, 3 — 7, 8 — 10),  $V_d$ ,  $V_h$  sendo funções respectivamente do *dew-point* e umidade relativa às 15h.

Eis a forma prática do cálculo:

1.º) Separar as observações:

$y$  = temperatura mínima do *dia seguinte*

$d$  = *dew-point* às 15h

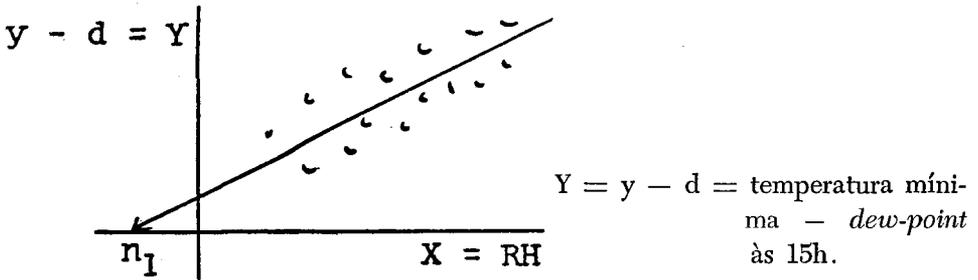
RH = umidade relativa às 15h

N = nebulosidade às 15h

em classes, conforme as nebulosidades:

$$(0 - 2) \quad (3 - 7) \quad \text{e} \quad (8 - 10)$$

2.º) Para cada classe de nebulosidade fazer um gráfico, marcando no eixo dos X a umidade às 15 h e no dos Y o valor:



Agora passar uma reta satisfatória entre os pontos, obtendo:

$$y - d = - \frac{h - n_1}{n_2}$$

(Vd, Vh entrarão como correções posteriores).

Fazendo  $y - d = 0$  ou mínima = *dew-point* às 15 h resulta:

$$0 = - \frac{h - n_1}{n_2}$$

$$0 \times n_2 = 0 = - (h - n_1)$$

$$\text{ou } h = n_1$$

Donde  $n_1$  = umidade de interseção da reta no eixo RH (= X).

Quanto a  $n_2$  = mudança (em RH) na reta para uma variação de 1º em  $y - d$ .

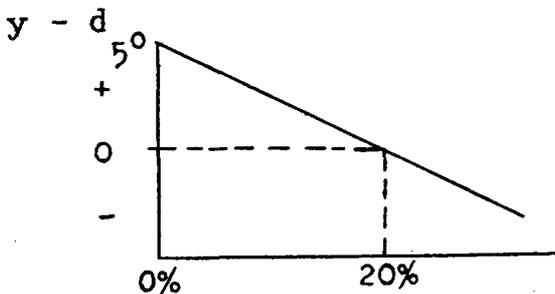
$$\text{Pois } y - d = 1 = - \frac{h - n_1}{n_2}$$

$$n_2 = - (h - n_1)$$

Como  $n_1$  = HR para  $y - d = 0$ ,

e para  $y - d = 1$  dá h, temos:

$$n_2 = - (h - n_1) = \text{variação de h para } 1^\circ.$$



(Se, por ex. varia de RH = 0% para  $y - d = 5^\circ$  até RH = 20% ( $n_1$ ) para  $y - d = 0^\circ$ , teremos  $n_2 = - (16 - 20) = - (-4) = + 4\%$ , pois em  $y - d = 5^\circ$  variou 20%, e em  $y - d = 1^\circ$  variou 4%).

Agora, em cada classe de nebulosidade, faz-se uma ficha para cada observação, calculando os desvios  $y$  — Mínima entre  $y$  (mínima de YOUNG) e a real.

$d^{15h}$	RH <sup>15h</sup>	Mín.real	Mín.calc.	Desvio
30.5	76	28.4	$y$	$y - \text{Mín}$

Arrumam-se as fichas em ordem *crescente* de umidade, e para cada grupo de RH (0 — 10, 10 — 20, ... 90 — 100) calcula-se a correção média  $V_h$ . Aplica-se então o valor  $V_h$  na fórmula, obtendo novo valor  $y'$  ( $\neq y$  anterior), e calcula-se novamente a diferença para a mínima real ( $y' - \text{Mín.}$ ).

Arrumam-se novamente as fichas em ordem crescente de  $d$  (*dew-point*), e calcula-se para grupos de  $5^\circ$  ( $10^\circ - 15^\circ$ ,  $15^\circ - 20^\circ$ , etc) a correção média  $V_d$  de cada grupo.

Tais correções, bem como os valores das constantes, foram por nós calculadas para várias cidades do Brasil, e constam de antiga memória: "Previsão da Temperatura Mínima (1946)". Figuram na mesma fórmulas para Curitiba e Jaguariáiva, podendo o método ser estendido facilmente a outros pontos da zona cafeeira, tão cedo sejam montadas estações meteorológicas na região.

### CONCLUSÃO

O problema da geada é um dos mais graves que enfrenta a lavoura do café, árvore de clima tropical, e no entanto cultivada, *contra todos os princípios ecológicos*, em zona sujeita ao fenômeno. Não acredita o autor, baseado no que afirmam autoridades de renome, que o sistema defensivo proposto, (a cortina de fumaça) tenha eficácia absoluta. Espera contudo que, mediante o emprêgo criterioso das regras e fórmulas aqui coligidas, a geada possa ser prevista com satisfatória exatidão, evitando que os futuros malogros, nas operações de defesa, possam ser atribuídos a erros do Serviço de Meteorologia.

De qualquer modo estas linhas constituem apenas uma introdução ao assunto, devendo novas pesquisas ser realizadas, sobretudo no setor da micro-climatologia.

---

#### RESUMÉ

L'auteur parle d'abord des différentes formes de la gelée et des causes de leur formation.

Comme l'une des plus importantes causes de la formation de la gelée est la radiation nocturne, l'auteur l'étudie théoriquement non seulement pour le ciel limpide mais aussi pour le ciel nuageux.

Il y a ensuite un chapitre sur la deduction de la formule de BRUNT pour le pronostique de la baisse nocturne de la température. C'est de cette formule qu'ont peut déduire les règles de la prévision de la gelée.

L'influence de la topographie sur le refroidissement et aussi celle de la nature du sol sont profondément étudiées ce qui permet d'établir des règles pour une meilleure défense des cultures. On peut inclure parmi ces conseils l'utilisation du facteur vent et celui du revêtement du sol.

Pour finir son étude il expose la formule de YOUNG et la méthode de la détermination des constantes locales.

---

#### RESUMEN

El autor comienza describiendo las diversas formas de helada y las causas de su formación.

De ellas se sobresale la radiación nocturna, expuesta teóricamente para los dos casos del cielo limpio y encubierto.

Se sigue um capítulo detalhado con la deducción de la formula de BRUNT para el pronóstico de la caída de temperatura. De la referida fórmula se deducen reglas de previsión de la helada.

La influencia de la topografía en el resfriamiento así como la de la naturaleza del suelo son estudiadas apuradamente, permitiendo elaborar consejos para una mejor defensa de los plantíos. Se incluye en los mismos el aprovechamiento del factor viento y del revestimiento.

El auctor concluye su trabajo con una exposición de la fórmula de Young y el método para la determinación de las constantes locales.

---

#### SUMMARY

The author describes first the several kinds of frost and the causes of their formation.

From those kinds of frost raises the nightly radiation, theoretically exposed for the two cases of clear and covered sky.

Following, comes a very detailed chapter including the deduction of BRUNT's formula to the prognostication of the nightly fall of temperature. From that related formula they deduct rules about foreseeing of frost.

The influence of topography on cooling, as well as the kind of the ground are deeply studied, so it's possible to elaborate advice about a better defense of plantation. In the same advice they include the employment of wind and of revestment.

The study finishes with an exposition of Young's formula and the determination method of the local constants

---

#### ZUSAMMENFASSUNG

Der Verfasser beginnt mit der Beschreibung der verschiedenen Formen des Frostreifes und der Ursachen ihrer Bildung.

Von diesem hebt sich die naechtlliche Ausstrahlung hervor, teoretisch fuer beide Faelle des klaren und bedeckten Himmels.

Es folgt ein ausfuehrliches Kapitel mit der Schlussfolgerung von BRUNT fuer die oraussage der naechtllichen Temperatursenkung. Von dieser Formel leitet man Regeln fuer die Voraussage vom Rauehreif ab.

Der einfluss der Topographie auf die Abkuehlung, sowie die Bodenbeschaffenheit werden einem gruendlichen Studium unterzogen, wodurch die Ausarbeitung von Ratschlaegen fuer eine bessere Verteidigung der Pflanzungen gewaehrleistet wird. In diesem ist die Ausnutzung des Faktor Wind und Bodenbeschaffenheit eingeschlossen.

Die Beobachtung schliesst mit einer Darlegung der Formel von YOUNG und der Methode der Festlegung der oertlichen Bestaendigkeiten.

#### RESUMO

La aŭtoro komencas priskribante la diversajn formojn de prujno kaj la kaŭzojn de ĝia formado.

El ili distingiĝas la nokta disradiado, teorie elmontrita por la du okazoj de sennuba kaj nuba ĉielo.

Sekvas detala ĉapitro kun la dedukto de la formulo de BRUNT por la antaŭdiro de la nokta falo de temperaturo. De la menciita formulo oni deduktas regulojn de antaŭvido de la prujno.

La influo de la topografio sur la malvarmiĝon same kiel tiu de la karaktero de la grundo estas studitaj ĝisfunde, kio ebligas la ellaboradon de konsiloj por plej bona defendo de la plantejoj. En tiujn oni enkalkulas la utiligon de la faktoro — vento kaj de la kovrado.

La studaĵo finiĝas per elmontro de la formulo de YOUNG kaj de la metodo por determini la lokajn konstantojn