

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Localização e Características do Lugar de pesquisa**

A área de estudo compreende a região de Pelotas, onde se encontra a Estação Agroclimatológica, convênio EMBRAPA/UFPel, estação fornecedora dos dados, cuja localização geográfica apresenta as seguintes informações: latitude 31°52'00" S, longitude 52°21'24" W e altitude de 13,24 m.

Climatologicamente, através da classificação de Köppen, na região em estudo predomina o clima tipo úmido Cf, o qual apresenta variedade subtropical, ou seja, Cfa (MORENO, 1961).

O solo característico do lugar é o Planossolo Hidromórfico eutrófico solódico, que apresenta caráter solódico dentro de 120 cm de profundidade (STRECK et al, 2002).

### **3.2 Dados Meteorológicos utilizados**

São dados de temperatura do solo, sob vegetação rasteira nativa (média diária), nas profundidades relativas a 5, 10 e 20 cm, coletados pela Estação Agroclimatológica, convênio EMBRAPA/UFPel, de Capão do Leão, de 1966 a 1988, que foram usados como referência para comparação com os resultados obtidos pelo Modelo Híbrido, de S. Kang.

Foram utilizados, também, dados de temperatura média diária do ar, coletados pela mesma estação, bem como, médias de sete meses, seis por ano, de 1961 a 1988, de temperaturas médias, máximas e mínimas, do solo sob vegetação

rasteira nativa, nas profundidades de solo de 2, 5, 10 e 20 cm, para a obtenção de estimativas de difusividade térmica<sup>1</sup> em 5, 10 e 20 cm de profundidade.

O estudo foi realizado através de uma análise estatística, levando em conta, com relação aos dados informados anteriormente, um período mínimo de quinze anos, para caracterizar o trabalho climatológico.

### 3.3 Desenvolvimento do Modelo Híbrido

O Modelo Híbrido, de S. KANG, proporciona a obtenção de temperatura média diária do solo, levando-se em consideração a temperatura do ar, a topografia, e a cobertura foliar/detrítica da superfície. Este modelo se baseia na *física de transferência de calor*, bem como numa relação *empírica* entre temperatura do ar e temperatura do solo.

#### 3.3.1 Difusão de Calor no Solo

Numa situação tridimensional a condução do calor em um meio material pode ser expressa pela seguinte equação diferencial (CARSON, 1963):

$$\rho c(\partial T/\partial t) = \nabla(\lambda \nabla T) \quad (1)$$

onde,  $\rho$  é a densidade do meio em  $\text{g/m}^3$ ;  $c$  a capacidade de calor específico em  $\text{J/g.K}$ ;  $T$  a temperatura em Kelvin;  $t$  o tempo;  $\lambda$  a condutividade térmica em  $\text{W/m.K}$ . O produto  $\rho c$  constitui a capacidade calorífica volumétrica,  $C$ , do meio e é dada em  $\text{J/K}$ .

A quantidade  $\nabla T$  representa o gradiente de temperatura do meio, ou seja:

$$\nabla T = (\partial T/\partial x)\hat{i} + (\partial T/\partial y)\hat{j} + (\partial T/\partial z)\hat{k} \quad (2)$$

Deseja-se verificar a condução de calor no solo, de cima para baixo, pois verticalmente há uma maior variação em sua composição e umidade do que

---

<sup>1</sup>Índice que traduz a facilidade com que uma substância sofre mudança de temperatura (MOTA, 1983).

horizontalmente. Pode-se, então, simplificar a equação (1), tomando-se o caso unidimensional na direção z (vertical), como segue:

$$\rho c (\partial T / \partial t) = (\partial / \partial z) [\lambda (\partial T / \partial z)] \quad (3)$$

Supondo o meio homogêneo, o que constitui uma *simplificação*, a sua densidade permanecerá constante, como também sua condutividade térmica e capacidade de calor específico. Portanto, ter-se-á:

$$\partial T / \partial t = (\lambda / \rho c) (\partial^2 T / \partial z^2) \quad (4)$$

sendo  $\lambda / \rho c = k_s$ , a difusividade molecular de calor no solo ou, *difusividade térmica* do mesmo; z a profundidade, em metros.

A equação (4) é uma *simplificação da Natureza (reducionismo)*, no tocante ao que de fato acontece no solo, pois o mesmo possui uma composição complexa entre matéria orgânica, minerais, ar e água, em que as transferências de calor ocorrem de diferentes maneiras, como condução molecular, movimento do ar e da água, bem como, por radiação. Na realidade as propriedades térmicas do solo variam com a profundidade e o tempo.

Para resolver a equação (4) devem-se estabelecer as condições de contorno, quais sejam: (a) na *superfície* há uma *variação senoidal* de temperatura, que reflete os ciclos diário e anual da radiação solar e (b) Para z tendendo ao *infinito*, T aproxima-se de uma *constante*,  $T_{med}$ .

### 3.3.2 Derivação da Relação Úmida

As variações diárias e anuais de temperatura de solo, na superfície, podem ser representadas por funções senoidais como a seguinte (KANG et al., 2000):

$$T = T_{med} + A_0 \text{ sen } \omega t \quad (5)$$

onde  $T_{med}$  é a temperatura média do solo,  $A_0$  a amplitude da onda de temperatura à superfície do solo ( $z=0$ ).

Quando  $T$  aproxima-se de  $T_{med}$ , com o aumento da profundidade do solo  $z$ , e a difusividade térmica  $k_s = \lambda/\rho c$ , em  $m^2/s$ , sendo uma constante no decorrer do tempo, tem-se, como solução para a equação (4), o que segue (ROSENBERG et al., 1983 apud KANG et al., 2000):

$$T(z,t) = T_{med} + \{A_0 \exp[-z (\omega / 2k_s)^{1/2}]\} \{\text{sen} [\omega t - z (\omega / 2k_s)^{1/2}]\} \quad (6)$$

Tomando-se a equação (5) para uma determinada profundidade, ter-se-á o que segue:

$$T = T_{med} + A_z \text{sen } \omega t \quad (7)$$

onde  $A_z$  representa a amplitude térmica na profundidade  $z$ .

A partir de uma comparação entre as equações (6) e (7), pode-se definir uma razão úmida de faixa de temperatura, numa determinada profundidade de solo, através de (KANG et al., 2000):

$$DR_z \equiv (A_z/A_0) = \exp[-z (\pi / k_s p)^{1/2}] \quad (8)$$

onde  $DR_z$  é a razão úmida de temperatura do solo na profundidade  $z$ , em cm;  $k_s$  a difusividade térmica, em  $cm^2/s$ , e  $p$  o período diário ou anual (qualquer um dos dois) de variação de temperatura, em segundos.  $A_z$  e  $A_0$  representam a amplitude de onda de temperatura à profundidade de solo  $z$  e à superfície, respectivamente.

### 3.3.3 Descrição do Modelo Empírico

Zheng et al. (1993 apud KANG et al., 2000) introduziram duas equações empíricas para realizar a estimação de temperatura diária de solo, a dez centímetros de profundidade, debaixo de cobertura vegetal, a qual utiliza um fator escalar constante,  $M$  e a Lei de Beer-Lambert. Quando  $A_j > T_{j-1}$  e quando  $A_j \leq T_{j-1}$ , os valores de temperaturas médias de solo, a dez centímetros de profundidade, foram calculadas, respectivamente, pelas equações (9) e (10):

$$T_j = T_{j-1} + (A_j - T_{j-1}) M \exp[-k (IAF_j)] \quad (9)$$

$$T_j = T_{j-1} + (A_j - T_{j-1}) M \quad (10)$$

onde  $T_j$  e  $T_{j-1}$  são temperaturas médias de solo, debaixo de vegetação, no dia atual e dia anterior, respectivamente.  $A_j$  representa a média diária, em onze dias, da temperatura do ar. Foi escolhido um período de onze dias para reduzir o efeito de extremos neste parâmetro. IAF representa o índice de área de folha em dia Juliano;  $k$  um *coeficiente de extinção* usado na Lei de Beer-Lambert, que descreve a interceptação de radiação solar através de cobertura (caracteriza a capacidade de absorção que diversos materiais possuem, para determinado comprimento de onda de radiação, pois para materiais diferentes, mas que apresentam densidades idênticas, a absorção é distinta em cada um deles, sendo também denominada *seção cruzada de massa extinta* e apresentada em unidade de área por massa) e  $M$  um fator escalar derivado de equações de regressão regionais que usam medidas de temperatura do ar e temperatura de solo a dez centímetros de profundidade. A temperatura de solo no primeiro dia de simulação foi determinada de outra equação de regressão em solo desnudo (ZHENG et al., 1993 apud KANG et al., 2000).

### 3.3.4 O Modelo Híbrido

Foi realizada uma modificação no modelo desenvolvido por Zheng et al. (1993 apud KANG et al., 2000), de modo a torná-lo de aplicação mais geral. Foram mantidos temperatura do ar e o índice de área foliar como variáveis de entrada, porém foi substituída a média de onze dias pela média diária de temperatura do ar. Além, foi substituído o fator escalar ( $M$ ) pela *razão úmida* ( $DR_z$ ), devido a esta última, na concepção dos autores, responder melhor a mudanças em temperatura de solo, com a profundidade. O modelo é híbrido porque incorpora as equações que descrevem uma troca de calor vertical e utiliza as relações empíricas entre temperatura do solo e temperatura do ar.

Durante o dia há aquecimento por transferência radiativa de cima para baixo, no solo; à noite, ou em dias nublados, a troca líquida pode ser superior em emissão de radiação térmica de ondas longas (radiação terrestre). A radiação de calor é em

parte absorvida por lixo do solo<sup>2</sup> (*LIXO*). O modelo captura estas restrições em troca de calor usando IAF e Lixo de solo dentro da Lei de Beer-Lambert. Lixo de solo é dado como uma unidade de IAF equivalente e que, de acordo com a época do ano, são depositadas, como no outono, e, então, se deterioram durante o ano.

Foi assumido que a temperatura de solo não cairia abaixo do gelo, embora numa profundidade de neve.

A temperatura média diária do solo pode ser calculada, a qualquer profundidade (*z*), utilizando-se as equações seguintes:

Quando  $A_j > T_{j-1}$ ,

$$T_j(z) = T_{j-1}(z) + [A_j - T_{j-1}(z)] \times \{ \exp[-z(\pi / k_s p)^{1/2}] \exp[-k(IAF_j + LIXO_j)] \} \quad (11)$$

E quando  $A_j \leq T_{j-1}$ ,

$$T_j(z) = T_{j-1}(z) + [A_j - T_{j-1}(z)] \times \{ \exp[-z(\pi / k_s p)^{1/2}] \exp[-k(LIXO_j)] \} \quad (12)$$

onde  $A_j$  é a temperatura média diária do ar e  $LIXO_j$  o IAF equivalente de lixo de solo. Os outros parâmetros são os mesmos que foram discutidos nos itens 3.3.2 e 3.3.3. O valor inicial da temperatura de solo é obtido através da multiplicação da  $DR_z$  pela temperatura do ar do primeiro dia Juliano e a IAF equivalente de lixo sobre o solo é assumida como a metade do IAF máximo.

### 3.3.5 Difusividade Térmica do Solo

Neste trabalho, optou-se por uma técnica que utiliza a amplitude térmica do solo para a obtenção de sua *difusividade térmica*, devido ao fato de os dados apresentados não possibilitarem outra alternativa e, também, por motivo desta informação não estar disponível na estação fornecedora dos dados, nem no Departamento de Solos da UFPel.

---

<sup>2</sup>Folhas secas, frutos caídos e qualquer outro material que intercepte a radiação solar sobre a superfície do solo, exceto vegetação rasteira nativa e folhas nas plantas.

Partindo-se da equação (8), chega-se à conclusão que a amplitude de temperatura do solo, numa dada profundidade, será dada por:

$$A_z = A_0 \exp[-z(\omega/2k_s)^{1/2}] \quad (13)$$

que se denomina equação da amplitude.

A partir da equação (13) chega-se a:

$$(A_z/A_0) = \exp[-z(\omega/2k_s)^{1/2}] \Rightarrow \ln(A_z/A_0) = -z(\omega/2k_s)^{1/2} \quad (14)$$

Tomando-se duas profundidades  $z_1$  e  $z_2$ , ter-se-á:

$$\ln(A_{z_1}/A_{z_2}) = -(z_2 - z_1)(\omega/2k_s)^{1/2} \Rightarrow [\ln(A_{z_1}/A_{z_2})]^2 = [-(z_2 - z_1)]^2 (\omega/2k_s) \Rightarrow$$

$$k_s = (\omega/2)[(z_2 - z_1)/\ln(A_{z_1}/A_{z_2})]^2 \quad (15)$$

onde  $A_z = [(T_{\max} - T_{\min})/2]$ ;  $\omega = 7,27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (ciclo diário) ou  $\omega = 1,99 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  (ciclo anual). Pois  $\omega = (2\pi/p)$  e  $p = 24 \times 60 \times 60 \text{ s}$  (ciclo diário) e  $p = 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ s}$  (ciclo anual).

Esta última equação torna possível a obtenção de uma estimativa para o valor da *Difusividade Térmica* de uma faixa vertical de solo,  $k_s$ , a partir de dados de medidas de amplitude, da onda de temperatura do solo, nas profundidades inicial,  $z_1$ , e final,  $z_2$ , desta faixa.

Os dados para o cálculo de  $k_s$ , compõem-se de médias de temperaturas de solo, sob vegetação nativa rasteira, máximas e mínimas, em seis períodos de sete meses, por ano, quais sejam: janeiro/julho, fevereiro/agosto, março/setembro, abril/outubro, maio/novembro e jun/dezembro; num intervalo de 28 anos, entre 1961 e 1988, para as profundidades de 2, 5, 10 e 20 cm, possibilitando a estimativa da *difusividade térmica* nas profundidades de 5, 10 e 20 cm. Para isto foram obtidas aquelas correspondentes às faixas de 2 a 5 cm, de 5 a 10 cm e de 10 a 20 cm. Para as duas faixas de inferiores levaram-se em consideração as de cima, através de médias aritméticas. Utilizou-se o valor de  $\omega$  para o ciclo anual ( $1,99 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ).

O cálculo se fez através de dados medidos de amplitudes das ondas de temperatura, de 25 anos, entre 1961 e 1988, exceto os anos de 1975, 1976 e 1977,

para a profundidade de 5 cm (por falta de dados), e de 28 anos para as demais profundidades, através da equação diferencial de Fourier para a condução de calor no solo. Os valores obtidos corresponderam a cada ano. Foi calculada a média dos resultados, que estavam dentro da faixa compreendida entre 0,001 e 0,01 cm<sup>2</sup>/s, de acordo com Rosenberg et al. (1983 apud KANG et al., 2000) e Marshall et al. (1996 apud KANG et al., 2000). Esta média obtida foi tomada como o valor da *difusividade térmica* do solo, local, àquelas profundidades, respectivas.

### 3.3.6 Índice de Área de Folha

Os valores de altura da vegetação rasteira nativa da Estação convênio EMBRAPA/UFPel variam entre 1 e 3 cm. Acrescenta-se, também, que a mesma é aparada periodicamente, não ultrapassando o valor máximo informado.

Através da equação  $IAF=24h_c$ , sendo  $h_c$  a altura média da vegetação nativa rasteira (em metros), apresentada por Allen et al. (1989), e tendo como valor médio 2,0 cm, chegou-se a um *índice de área foliar* médio de 0,48<sup>3</sup>.

Optou-se por variar este índice durante o ano, em valores mensais, e de acordo com a temperatura, somente, tentando refletir as mudanças sazonais, porém mantendo a média encontrada; tendo como mínimo 0,24 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> e máximo 0,72 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, correspondentes aos mínimo e máximo de altura da vegetação rasteira nativa, obtidos através da equação mostrada acima, ficando em 0,72; 0,72; 0,72; 0,51; 0,39; 0,30; 0,24; 0,30; 0,36; 0,39; 0,51 e 0,60 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, respectivamente para os meses de janeiro a dezembro de cada ano.

Numa primeira etapa, este trabalho seria realizado para solo desnudo e visando o subperíodo semeadura-emergência. Porém não foi realizada, aqui, por não ter havido tempo hábil para digitalização dos dados. Neste caso, o IAF, o *LIXO* e a *seção cruzada de massa extinta* (k), seriam nulos.

Então, foi estimada a temperatura de solo, sob vegetação rasteira nativa, o que tornou necessária a obtenção da *seção cruzada de massa extinta* (k) relativa a esta cobertura, coeficiente, este, empírico, que, primeiramente, foi considerado com magnitude de 0,0393, por comparação de proporcionalidade direta, a partir do ensaio de Kang et al. (2000), entre o IAF médio e o k médio, utilizados, e, depois,

corrigido para o valor mais próximo do real, já que este parâmetro depende da cobertura do solo (THUNHOLM, 1990).

O valor adotado para o *período* ( $p$ ), constituinte do modelo, será de 24x60x60 segundos, referente ao tempo de um dia, por cada etapa analisada, já que serão obtidas médias diárias de temperatura do solo.

*LIXO* terá, neste caso, valor nulo, pois não há, no local, lixo de solo, como folhas caídas no outono ou qualquer outra situação de cobertura, a não ser a de vegetação rasteira nativa, que já estará considerada no IAF.

Portanto, com base no exposto, tem-se as condições necessárias à aplicação do Modelo Híbrido de S. Kang, diante da determinação de todos os parâmetros de entrada para este programa.

Todos os programas para a obtenção dos parâmetros de entrada, como médias *de temperatura do ar e do solo*, *difusividade térmica*, além do próprio *Modelo Híbrido*, foram realizados através de rotinas computacionais desenvolvidas em ambiente MATLAB 7, da Mathwork.

### 3.4 Aplicação do Modelo Híbrido

O Modelo Híbrido foi testado na Coreia do Sul, pela equipe de S. Kang, onde obteve grande eficiência por seus resultados.

Neste trabalho foi utilizado o esquema original desse modelo, havendo modificações em alguns parâmetros de entrada, devido às características locais. Foi realizada simulação a partir do modelo, praticamente, completo para obtenção de resultados em solo sob vegetação rasteira nativa.

A distribuição espacial de temperatura de solo em uma área de montanha e arborizada, onde os dados de temperatura não estejam disponíveis, foi predito, por S. Kang e colaboradores, com o modelo proposto, seguindo os passos contidos na FIG. 1, a seguir, que corresponde a uma tradução do esquema proposto por Kang et al. (2000). Os parâmetros foram: Índice de Área Foliar (IAF) *variável*, com valor médio de  $5,5 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ , obtido através de equipamento adequado, um LI-COR 2000 Plant Canopy Analyzer (KANG et al., 2000); Seção Cruzada de Massa Extinta,  $k =$

---

<sup>3</sup>A altura média da vegetação rasteira nativa é de 2 cm, portanto 0,02 m. Então se tem:  $\text{IAF} = 24 \times 0,02 \Rightarrow \text{IAF} = 0,48$ .

0,45 (fixo); Período de variação da temperatura do solo,  $p = 365 \times 24 \times 60 \times 60$  s e Profundidade,  $z = 10$  cm.

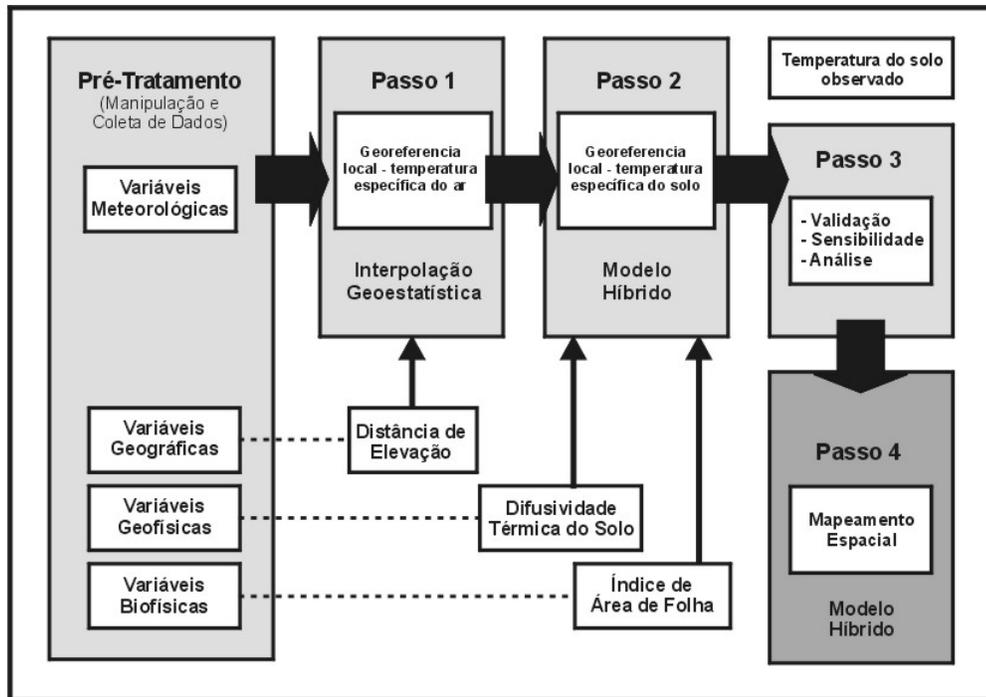


FIGURA 1 – Um diagrama esquemático ilustrado dos passos envolvendo a estimativa de temperatura do solo, a partir de dados meteorológicos, topográficos e biológicos.