

# MEDIDA DA TRANSPIRAÇÃO E BIOMASSA DE CONÍFERAS COM ÁGUA TRITIADA

CLÓVIS ANGELI SANSIGOLO

Orientador: Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Energia Nuclear na Agricultura.

PIRACICABA  
Estado de São Paulo - Brasil  
Dezembro, 1979

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao *Dr. Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz* por seu interesse e dedicação constantes na orientação geral deste trabalho, e a todos que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para sua realização.

Agradece também à *Comissão Nacional de Energia Nuclear*, pela Bolsa de Estudos concedida e ao *Centro de Energia Nuclear na Agricultura*, pelas facilidades oferecidas.

## ÍNDICE

	<u>Página</u>
1. RESUMO .....	1
2. INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA .....	2
3. TEORIA .....	6
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	13
4.1. Campo Experimental .....	13
4.1.1. Localização e Caracterização .....	13
4.1.2. Parâmetros Meteorológicos .....	14
4.2. Técnicas com Trítio .....	16
4.2.1. Injeção e Coleta de Amostras .....	16
4.2.2. Extração e Contagem .....	17
4.3. Métodos Analíticos .....	19
4.3.1. Transpiração .....	19
4.3.2. Tempo Médio de Residência .....	21
4.3.3. Biomassa .....	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	24
5.1. Amostragem e Processamento .....	24
5.2. Transpiração Média .....	25
5.3. Transpiração Média Diária .....	37
5.4. Tempo Médio de Residência .....	40
5.5. Biomassa .....	42
6. CONCLUSÕES .....	45
7. SUMMARY .....	47
8. BIBLIOGRAFIA .....	48

## LISTA DAS TABELAS

<u>Tabela</u>	<u>Página</u>
1 - Descrição das árvores e quantidades de HTO usadas nos experimentos de transpiração e biomassa .....	16
2 - Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo e cálculo da área sob a curva resposta para a árvore 1 ....	27
3 - Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo e cálculo da área sob a curva resposta para a árvore 2 ....	28
4 - Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo e cálculo da área sob a curva resposta para a árvore 3 ....	29
5 - Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo e cálculo da área sob a curva resposta para a árvore 4 ....	30
6 - Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo e cálculo da área sob a curva resposta para a árvore 5 ....	31
7 - Transpiração média ( $\bar{F}$ , l/dia) de <i>Pinus caribaea</i> calculada pela solução da equação de Stewart-Hamilton para as cinco árvores que tiveram injeções de água tritiada sob duas condições climáticas distintas .....	34
8 - Transpiração média diária ( $F_1$ , l/dia) computada a partir dos fluxos médios e das variáveis climáticas para as três árvores que tiveram injeções de água tritiada no período de verão .....	38

TabelaPágina

9	-	Transpiração média diária ( $\underline{F}_1$ , l/dia) computada a partir dos fluxos médios e das variáveis climáticas para as duas árvores que tiveram injeções de água tritiada no período do inverno .....	39
10	-	Valores dos tempos médios de residência da água nas árvores ( $\underline{T}_m$ , h) obtidos através de $\underline{T}_s$ , $\underline{T}_m^*$ e $\underline{T}_p$ .....	41
11	-	Estimativas da biomassa ( $\underline{D}$ , Kg) de <i>Pinus caribaea</i> e comparação das medidas feitas pelo método do trítio durante o período de verão com o método da pesagem após a colheita .....	43

## LISTA DAS FIGURAS

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
1 -	Curva de retenção da água no solo .....	15
2 -	Esquema do extrator de água dos tecidos foliares .....	18
3 -	Curvas atividade específica $\{f'(t), \text{DPM/mL}\}$ em função do tempo ( $t, h$ ) para as três árvores que receberam injeções de água tritiada no período de verão .....	32
4 -	Curvas atividade específica $\{f'(t), \text{DPM/mL}\}$ em função do tempo ( $t, h$ ) para as duas árvores que receberam injeções de água tritiada no período de inverno .....	33

---

## 1. RESUMO

---

---

O uso da água tritiada nas medidas diretas da transpiração e biomassa de *Pinus caribaea* é discutido. O método é baseado na teoria da dinâmica de traçadores para sistemas em equilíbrio dinâmico.

É dada ênfase tanto aos aspectos teóricos como aos experimentais e analíticos referentes à evolução no espaço e no tempo do traçador na árvore. O tempo médio de residência da água na árvore, parâmetro essencial para determinação da biomassa, é estudado em detalhes após examinadas teórica e experimentalmente as várias alternativas para sua obtenção.

Uma nova metodologia de preparo das amostras para análise de trítio é apresentada. São também apresentados os dados de transpiração, biomassa e tempo médio de residência da água obtidos sob duas condições climáticas distintas: verão e inverno. Conclui-se que o método pode ser aplicado, com vantagens, para as determinações de transpiração e biomassa em florestas de pinheiros.

---

## 2. INTRODUÇÃO e REVISÃO DE LITERATURA

---

Os processos físicos que ocorrem na biosfera proporcionando distintas condições climáticas são bastante complexos e difíceis de serem estudados isoladamente e, por isso, são convenientemente agrupados em dois ciclos: o energético e o hidrológico.

Estes dois ciclos são tão interdependentes que é praticamente impossível realizar-se o estudo de um deles sem o conhecimento do outro. A evaporação, por exemplo, é um fenômeno de síntese desses dois ciclos e, portanto, o seu conhecimento é de vital importância.

O estudo detalhado de um ecossistema exige o conhecimento qualitativo e quantitativo da transpiração das plantas para que seja possível estimar-se o balanço hídrico e o energético. A medida da transpiração das plantas e, principalmente, das florestas sempre foi uma das grandes preocupações dos pesquisadores, pois a planta é o elo de ligação entre o solo e a atmosfera.



A maioria dos métodos usados até os dias de hoje são estimativas teórico-empíricas que levam em conta alguns parâmetros do solo ou da atmosfera como, por exemplo, o método aerodinâmico de Thornthwaite e Holzman, ou o energético de Bowen ou, ainda, o mais frequente: o método combinado de Penman.

Muito embora sejam valiosíssimas as contribuições que têm proporcionado esses métodos estimativos, para certos tipos de pesquisas, porém, há a necessidade de dados mais reais, mais concretos, obtidos diretamente das plantas submetidas às condições diversas de disponibilidade hídrica e energética.

Vários métodos de medidas diretas existem para a determinação do movimento da água em árvores, incluindo o uso de radioisótopos (*LEYTON, 1972; OWSTON et alii, 1972*) e pulsos de calor (*CLINE e CAMPBELL, 1976; LASSOIE et alii, 1977*). As determinações do fluxo volumétrico usando estas técnicas são muito difíceis e esses fluxos são frequentemente apresentados como velocidades. Os numerosos métodos para a medida da transpiração de árvores sob condições de campo foram revistos por *SLATYER (1967), RUTTER (1968) e SLAVÍK (1974)* e todos apresentam problemas que não foram adequadamente resolvidos.

*KLINE et alii (1970)* propuseram um método diferente para as medidas de transpiração, baseado na análise teórica de dinâmica de traçadores, desenvolvida por *BERGNER (1961, 1964; 1965 e 1966), ZIERLER (1964), LJUNGGREN (1967) e ORR e GILLESPIE (1968)*. A medida não destrutiva das taxas de transpiração utiliza a água tritiada como traçador. A água tri-

tiada é adicionada ao fluxo por injeção no tronco ao nível do solo e o seu destino é seguido por monitoramento do trítio em função do tempo na folhagem. A transpiração da árvore é proporcional à área sob a curva atividade específica em função do tempo.

*KLINE et alii (1976)* descreveram um método para a estimativa da transpiração de uma floresta de Douglas Fir, usando o método do trítio. Através da relação linear entre a transpiração e a seção do alburno das árvores, os valores medidos com HTO puderam ser estendidos para a floresta toda por amostragem do alburno das diferentes classes de tamanho.

*JORDAN e KLINE (1977)* utilizaram o método de *KLINE et alii (1976)* numa floresta tropical situada na Bacia Amazônica e concluíram que a área do alburno tem alta correlação com a transpiração quando há um alto e contínuo suprimento de água, independente da espécie.

*KLINE et alii (1972a e 1972b)* aplicaram a teoria da dinâmica de traçadores, discutida extensivamente por muitos autores, entre eles *BERGNER (1961; 1964; 1965 e 1966)*, *ZIERLER (1964)* e *LJUNGGREN (1967)* sob o ponto de vista do tempo médio de residência e volume do compartimento de sistemas biológicos e industriais em equilíbrio dinâmico, nas medidas não destrutivas da biomassa de algumas coníferas e concluíram que o método do trítio pode ser geralmente usado nessas determinações.

Os dados de medidas diretas de transpiração de árvores são raros e os poucos existentes são referentes a condições climáticas bastante diferentes das nossas e as espécies usadas não têm interesse econômico para nós.

O objetivo principal deste trabalho foi o de tentar desenvolver uma metodologia precisa e viável para as nossas condições, de se medir esses importantes parâmetros, tendo em vista o elevado interesse econômico que os pinheiros representam para o país. O conhecimento das taxas de transpiração, dos tempos médios de residência da água nas árvores e da biomassa produzida em plantios comerciais, nas diversas condições climáticas, certamente, contribuirá de maneira significativa para a economia nacional. A metodologia aqui desenvolvida, certamente contribuirá para isso.

---

### 3. TEORIA

---

O transporte de massa num sistema é dito em equilíbrio dinâmico quando o fluxo de entrada é igual ao de saída. Não pode haver, portanto, outras adições ou sumidouros de massa e o volume do sistema deve permanecer constante. O que ocorre com o fluxo dentro do sistema não pode ser observado, pois qualquer dispositivo que ali for colocado com esse intuito, provocará alteração do próprio fluxo. Uma maneira de se estudar o comportamento desse transporte é através de algum tipo de traçador adicionado ao fluxo principal e que possua características idênticas às do material em trânsito. Qualquer material diferente adicionado ao fluxo terá um comportamento peculiar, química ou fisicamente. Uma outra maneira é a de se usar os mesmos tipos de moléculas, porém, com um átomo marcado, ou seja, um isótopo, que pode ser radioativo ou estável.

Históricamente, o uso de traçadores em dinâmica de fluidos começou com os trabalhos de *STEWART (1897)*, citado por *LJUNGGREN (1967)* e, posteriormente, continuou com *HAMILTON (1932)*, também citado por *LJUNGGREN*

(1967). Como resultados desses trabalhos pioneiros, tem-se um conjunto de equações referidas como "equações de Stewart-Hamilton", das quais a principal é:

$$Q = v \int_0^{\infty} c(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

onde: Q = quantidade de traçador adicionada ao fluxo  
v = taxa volumétrica de fluxo  
c(t) = concentração do traçador no ponto de observação.

Uma recente contribuição para a teoria de traçadores foi dada por BERGNER (1961; 1964; 1965 e 1966), que discute seus aspectos fundamentais e de validade geral com novos conceitos denominados "dinâmica de traçadores". A fórmula conclusiva de Bergner, válida para qualquer compartimento, é:

$$b^0 = \xi_{se}^0 \int_0^{\infty} \frac{b(t)}{b_s(0)} dt \dots\dots\dots (2)$$

onde: b<sup>0</sup> = volume total do compartimento  
 $\xi_{se}^0$  = fluxo total do ambiente para o compartimento (que é igual ao fluxo do compartimento para o ambiente desde que o sistema está em equilíbrio dinâmico)  
b(t) = quantidade de traçador no compartimento, no tempo t

$b_s(0)$  = quantidade de traçador fornecido ao compartimento, no tempo  $t = 0$ .

Para as medidas de fluxo e quantidade de material em sistemas biológicos em equilíbrio dinâmico, *ORR e GILLESPIE (1968)* propõem o princípio da ocupação. Esse princípio trata das relações entre três parâmetros: ocupação ( $\theta$ ), capacidade (C) e fluxo (F).

Num dado tempo  $t$ , após a administração do traçador, uma parte definida do sistema contém uma fração  $f(t)$  do traçador. Os valores de  $f(t)$  a todo tempo são representados pela curva atividade vs tempo para uma parte definida do sistema.

A ocupação ( $\theta$ ), para alguma parte do sistema, é definida por:

$$\theta = \int_0^{\infty} f(t) dt \dots\dots\dots (3)$$

A capacidade (C) de uma parte qualquer do sistema é a quantidade do material sob estudo (não o traçador) que existe nessa parte do sistema, independente do tempo.

O princípio da ocupação diz que a razão ocupação/capacidade é a mesma para todas as partes do sistema e igual ao recíproco do fluxo de entrada.

$$C = F \cdot \theta \dots\dots\dots (4)$$

Em princípio, pela equação (4), seria possível determinar-se o fluxo (F) pela marcação do fluxo de entrada com um radioisótopo e determinando-se a resultante da curva atividade vs tempo em alguma parte do sistema.

A dificuldade experimental de medições repetidas da fração da atividade original  $f(t)$  e medidas da capacidade  $C$ , tornam impraticável o uso dessa equação. É mais conveniente o uso da atividade específica que está relacionada com a atividade fracional, como é mostrado na equação (5).

$$f(t) = \frac{C}{M} f'(t) \dots\dots\dots (5)$$

onde:  $f'(t)$  = atividade específica

M = total de traçador administrado durante o experimento e os outros parâmetros são os previamente definidos

Substituindo-se os resultados da equação (5) em (3), tem-se

$$\theta = \frac{C}{M} \int_0^{\infty} f'(t) \dots\dots\dots (6)$$

Essa nova expressão, (6), após substituição na equação (4) e rearranjo, torna-se

$$M = F \int_0^{\infty} f'(t) dt \dots\dots\dots (7)$$

Comparando-se as equações (1), (2) e (7):

$$v = \xi_{se}^0 = F$$

$$c(t) = \frac{b(t)}{b^0} = f'(t)$$

$$Q = b_s(0) = M$$

A semelhança entre os resultados de Stewart-Hamilton (1), os de Bergner (2) e os de Orr e Gillespie (7) são evidentes.

A equação (7) diz que, para um sistema em equilíbrio dinâmico, o produto do fluxo pela integral total da curva atividade específica vs tempo é igual ao montante de traçador originalmente administrado. Desde que a atividade total e a curva atividade específica vs tempo podem ambas ser obtidas independentemente, essa equação pode ser resolvida em fluxo.

A teoria da dinâmica de traçadores também permite o cálculo do conteúdo total de material de um sistema através do qual se tem um fluxo. A derivação da expressão que possibilita o cálculo do volume do sistema é dada por ZIERLER (1964):

$$C = F \cdot T_m \dots\dots\dots (8)$$

onde: C = volume do sistema

F = fluxo através do compartimento



$T_m$  = tempo médio de residência do fluido no sistema.

A equação (8) diz, simplesmente, que o volume do sistema é dado pelo produto do fluxo pelo tempo médio de residência do sistema.

O parâmetro mais difícil de ser medido na equação (8) é o tempo médio de residência ( $T_m$ ). A literatura cita três critérios para se obter essa quantidade:

- a) Através da declividade do ramo descendente da curva atividade vs tempo ( $T_p$ );
- b) Pelo cômputo do primeiro momento da curva atividade vs tempo ( $T_m^*$ );
- c) Pela medida do tempo de trânsito entre o ponto de injeção e o ponto de saída do traçador do sistema ( $T_p$ ).

O método da declividade é válido nos casos onde todo o sistema é marcado homogeneamente pelo traçador. A taxa de declínio da atividade no sistema é proporcional ao montante de traçador presente. Tal sistema é descrito por uma equação da forma

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

onde:  $A_0$  é a atividade inicial;  $A$  a atividade no tempo  $t$  e  $\lambda$  a taxa de decréscimo da atividade. O termo  $\lambda$  é a declividade quando os dados descritos por essa relação são plotados em coordenadas semilogarítmicas. O tempo médio de residência é simplesmente o recíproco de  $\lambda$  ( $T_s = 1/\lambda$ ).

*LJUNGGREN (196?)* descreve o método pelo cômputo do primeiro momento da curva atividade vs tempo. O primeiro momento é o eixo centroi

dal da distribuição atividade vs tempo, isto é, o eixo vertical que divide a distribuição em duas partes de áreas iguais.

$$T_m^* = \frac{\int_0^{\infty} t f(t) dt}{\int_0^{\infty} f(t) dt} \dots\dots\dots (9)$$

Em geral, T<sub>m</sub><sup>\*</sup> será sempre o tempo médio de residência do traçador no sistema em estudo. O tempo médio de residência para a substância traçada (T<sub>m</sub>) não é igual ao tempo médio de residência para o traçador (T<sub>m</sub><sup>\*</sup>), desde que o traçador aparentemente está sujeito a interações com o sistema.

O tempo médio de residência para sistemas fluentes pode também ser obtido pela medida da distribuição da atividade de um traçador no sistema em dois pontos ao longo do percurso do fluxo (LJUNGGREN, 1967).

Se T<sub>1</sub> é o tempo de passagem do traçador no ponto 1 e T<sub>2</sub> o tempo de passagem no ponto 2 fluxo abaixo, então T<sub>p</sub> = T<sub>2</sub> - T<sub>1</sub>, onde T<sub>p</sub> é o tempo médio de residência entre dois pontos de subamostragem. Desde que o traçador está sujeito a uma deformação do pico, T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub> são tomados como o tempo quando o pico da distribuição passa nos pontos de amostragem.

No caso de uma injeção instantânea do traçador, fixa-se a posição inicial pela injeção no tempo T<sub>1</sub> = 0 e, nesse caso especial, T<sub>p</sub> = T<sub>2</sub>, que pode ser medido em qualquer ponto fluxo abaixo.

---

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

---

### 4.1. Campo Experimental

#### 4.1.1. Localização e Caracterização

O trabalho foi realizado numa área reflorestada com *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*, de cinco anos de idade, espaçado 3 x 2 m, localizada na fazenda Sertãozinho, à sudeste do Campus da ESALQ/USP, em Piracicaba, SP.

Pelas descrições de *RANZANI et alii* (1966), o solo da área é classificado como um Latossol Vermelho Amarelo Fase Arenosa, cujas características físicas médias são:

densidade global (g/cm<sup>3</sup>): 1,4

porosidade (%): 52,7

#### Composição Granulométrica (%)

areia grossa	areia fina	silte	argila
3,2	66,6	4,2	26,0

---

A curva de retenção da água nesse solo, obtida por secamento em "panela de pressão" e membrana de Richards, é mostrada na Figura 1.

#### 4.1.2. Parâmetros Meteorológicos

Para as estimativas de radiação líquida ( $R_n$ ) na cultura, foram feitas medidas diárias de radiação global ( $R_g$ ) com um piranômetro Eppley mod. PSP acoplado a um registrador gráfico HP-680M e, simultaneamente, por um piranômetro linear ELTEC JE acoplado a um integrador automático ACTRON P-2.

A radiação líquida ( $R_n$ ) foi então calculada segundo as relações propostas por *OMETTO (1968)*, válida para a região de Piracicaba nos períodos de primavera-verão (10) e outubro inverno (11):

$$R_n = - 12,0 + 0,56 R_g \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$R_n = - 23,0 + 0,45 R_g \quad \dots\dots\dots (11)$$

Os demais parâmetros meteorológicos usados diretamente para o trabalho, como temperatura média, máxima e mínima do ar e umidade relativa, bem como outros dados necessários para controle, tais como velocidade e direção do vento, horas de insolação, precipitação e evaporação de superfície livre de água, foram fornecidos pelo Posto Agrometeorológico do Departamento de Física e Meteorologia, o qual dista cerca de 500 m do campo experimental.

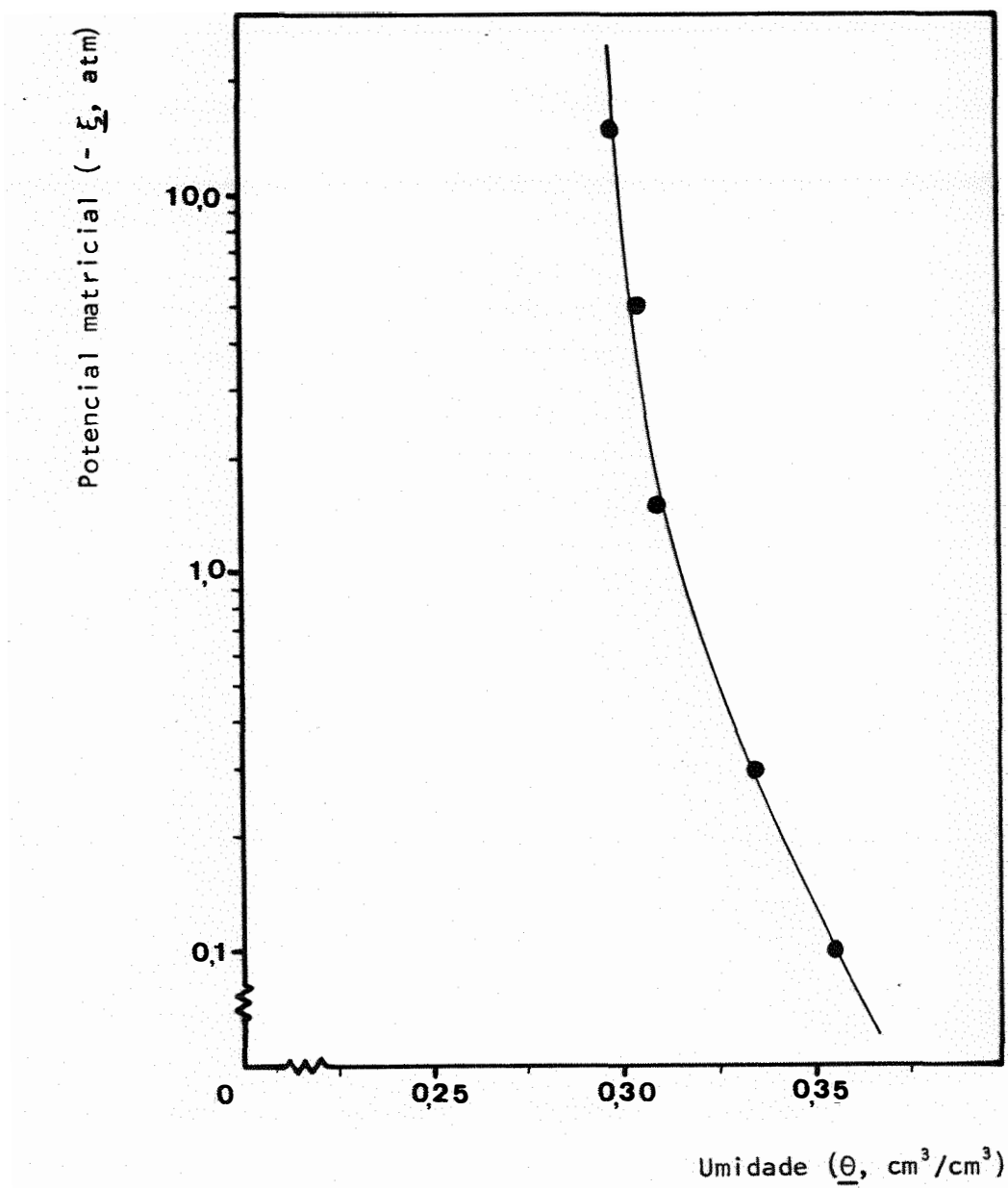


Figura 1 - Curva de retenção da água no solo

## 4.2. Técnicas com Trítio

### 4.2.1. Injeção e Coleta de Amostras

As injeções de água tritiada (HTO) foram feitas em cinco árvores, representativas do povoamento e localizadas no seu interior, sendo três no período de verão e duas no de inverno, visando a obtenção de dados sob condições climáticas bem distintas.

A Tabela 1 mostra as características das árvores e as quan-  
tidades de HTO usadas nos experimentos de transpiração e biomassa.

Tabela 1 - Descrição das árvores e quantidades de HTO usadas nos experi-  
mentos de transpiração e biomassa.

<u>Á</u> rvore	Altura (m)	DAP <u>a/</u> (cm)	Total de HTO Injetada (DPM) <u>b/</u>	Data de Injeção
1	6,4	10,3	2,026 exp 9	23/01/79
2	6,7	12,7	2,026 exp 9	23/01/79
3	6,9	14,3	2,026 exp 9	23/01/79
4	6,9	11,8	1,969 exp 9	16/07/79
5	7,8	14,3	1,969 exp 9	16/07/79

a/ diâmetro à altura do peito

b/ desintegração por minuto

A água tritiada com atividade específica conhecida foi in-  
troduzida no caule da árvore a 30 cm acima do nível do solo. A injeção  
foi feita pipetando-se 1 ml da solução de trítio em cada um dos três bura-

cos furados imediatamente antes e selados imediatamente após com massa e fita adesiva. Os buracos para injeção foram feitos com uma broca de 4,0 mm de diâmetro, igualmente espaçados no tronco até uma profundidade de 4,0 cm.

Após a injeção, foram retiradas amostras de folhas das árvores até que o pulso de HTO tivesse passado completamente através da copa das árvores. A amostragem foi feita coletando-se 60 a 80 folhas representativas da copa inteira da árvore, uma a seis vezes diariamente, com maior frequência no início do experimento. Imediatamente após a colheita, as amostras foram colocadas em sacos plásticos e guardadas a frio em geladeira para se evitar a perda de trítio por evaporação.

#### 4.2.2. Extração e Contagem

A água dos tecidos foliares foi extraída das amostras por prensagem num sistema que é mostrado na Figura 2. A amostra é comprimida no cilindro do extrator a  $1.000 \text{ Kg/cm}^2$ , usando uma prensa hidráulica de laboratório e a solução aquosa é recolhida num copo plástico. Após cada prensagem, o extrator é lavado em água corrente e seco com papel toalha.

As soluções dos copos plásticos são colocadas em tubos de ensaio de 10 ml para clarificação, que foi feita por centrifugação a 4.000 rpm durante 10 minutos. Dessa solução, é retirado 1 ml que é colocado junto a 10 ml de solução cintiladora em frascos de contagem.

A solução cintiladora usada para as contagens de trítio nas soluções aquosas foi a de *PATTERSON e GREENE (1967)*, preparada como descrição

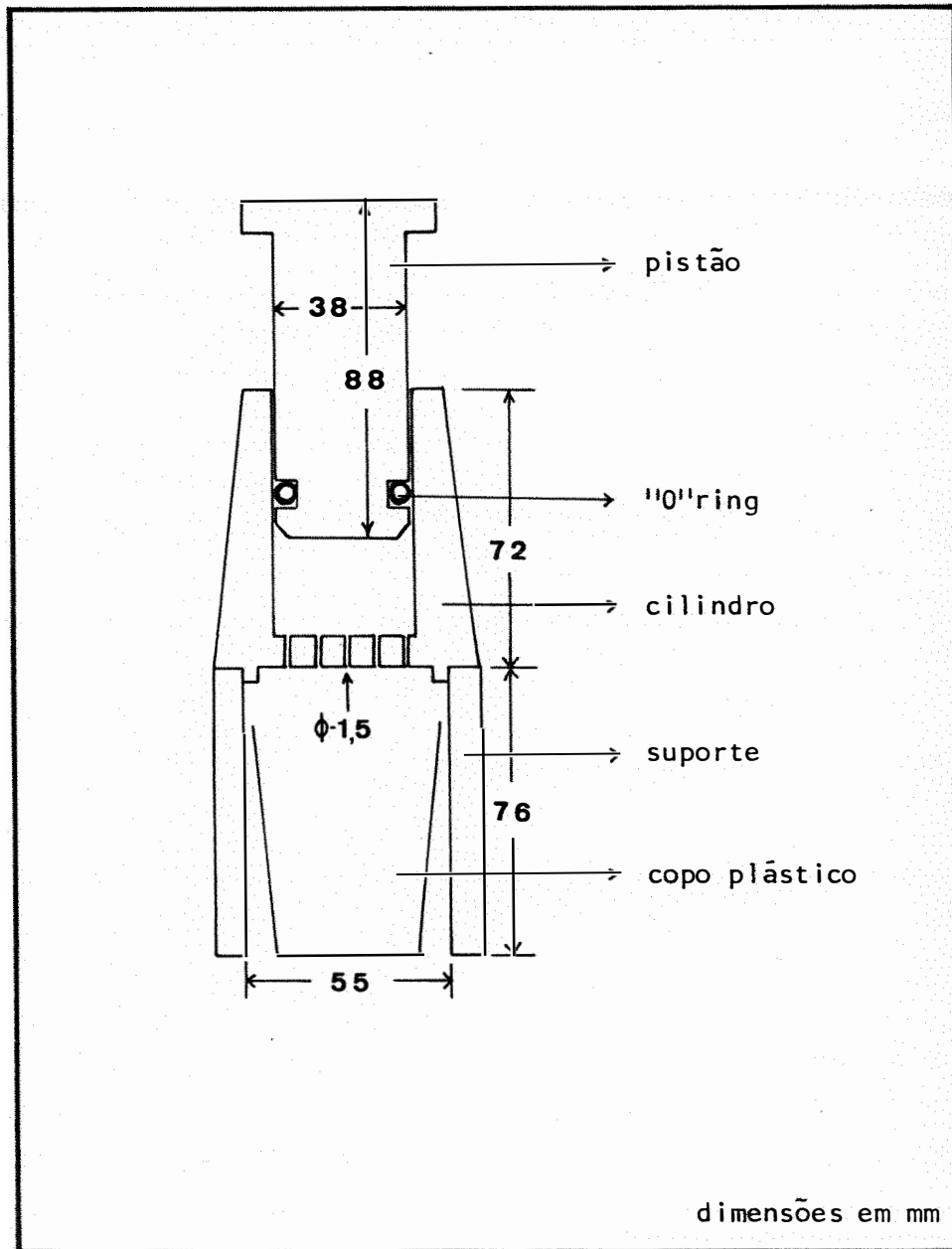


Figura 2 - Esquema do extrator de água dos tecidos foliares



to a seguir:

PPO - 4 g/l

POPOP - 100 mg/l

Tolueno-Triton X-100 - 2:1

O equipamento utilizado nas contagens de trítio foi um cintilador líquido Beckman, mod. LS-230, equipado com circuito de coincidência, 3 canais de contagem simultâneos e uma fonte de 40  $\mu\text{Ci}$  de  $^{137}\text{Cs}$  para padronização externa automática.

A padronização das amostras foi feita pelo método da razão de canais de fonte externa por comparação com uma curva traçada para um conjunto de sete amostras padrão com "quenching" químico crescente, conforme *NASCIMENTO FQ (1977)*. Correções para "background" foram feitas para todas as amostras. Não foi considerado o decaimento radioativo, devido à longa meia vida do trítio (12,26 anos). Os dados foram expressos em OPM/ml (desintegrações por minuto por mililitro).

### 4.3. Métodos Analíticos

#### 4.3.1. Transpiração

O fluxo transpiratório médio ( $\bar{F}$ ) foi computado como o indicado em (12):

$$M = \bar{F} \int_0^{\infty} f'(t) dt \approx \bar{F} \sum_{i=1}^n \overline{f(t)_i} \Delta t \dots\dots\dots (12)$$

onde:  $\overline{f'(t)}$  = atividade específica média no intervalo de tempo  $\Delta t$   
 $n$  = número de intervalos.

Para a resolução da transpiração média durante o período do experimento ( $\overline{F}$ ) em médias diárias ( $F_i$ ), utilizou-se a equação de *MONTEITH (1975)*:

$$T_i = \frac{S \cdot R_n + \rho c (e_s - e) / r_a}{\lambda \cdot S + \lambda \gamma (r_a + r_s) / r_a} \dots\dots\dots (13)$$

onde:  $T_i$  = transpiração média diária ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 $S$  = taxa de mudança da tensão de saturação do vapor d'água com a temperatura, média diária ( $\text{mb} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )  
 $R_n$  = radiação solar líquida, média diária ( $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 $\rho$  = densidade do ar ( $1,29 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )  
 $c$  = calor específico do ar ( $0,240 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )  
 $e_s$  = tensão de saturação do vapor d'água na atmosfera, média diária (mb)  
 $e$  = tensão do vapor d'água na atmosfera, média diária (mb)  
 $r_a$  = resistência externa da floresta ( $\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ )  
 $\lambda$  = calor latente de vaporização da água ( $590 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3}$ )  
 $\gamma$  = constante psicrométrica ( $0,66 \text{ mb} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

O fluxo médio para o período de experimento ( $\overline{T}$ ) é também dado pela solução da equação de Monteith, na qual se usa a média de todas as variáveis:

$$\bar{T} = \frac{\bar{S} \cdot \bar{Rn} + \rho c (\bar{e}_s - \bar{e}) / r_a}{\lambda \cdot \bar{S} + \lambda \gamma (r_a + \bar{r}_s) / r_a} \dots\dots\dots (14)$$

Assumindo ser a transpiração real proporcional à taxa que é computada pela equação de Monteith, usou-se as equações (13) e (14) para se fazer os cálculos relativos:

$$F_i = \bar{F} \left\{ \left[ \frac{S \cdot Rn + \rho c (e_s - e) / r_a}{\bar{S} \cdot \bar{Rn} + \rho c (\bar{e}_s - \bar{e}) / r_a} \right] \left[ \frac{\bar{S} + \lambda / r_a (r_a + \bar{r}_s)}{S + \lambda / r_a (r_a + r_s)} \right] \right\} \dots (15)$$

Supondo-se que não houve muita variação na umidade do solo durante o experimento,  $r_s / \bar{r}_s \approx 1$ , a razão envolvendo resistência estomatal na equação (15) se cancela, desde que os termos  $\bar{S}$  e  $S$  não têm grande influência no valor final.

#### 4.3.2. Tempo Médio de Residência

Os tempos médios de residência ( $T_m$ ) foram calculados de três maneiras, como mostrado em (a), (b) e (c):

(a) Através das declividades dos ramos descendentes das curvas atividade específica em função do tempo ( $T_s$ ):

$$T_s = \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots (16)$$

onde  $\lambda$  é o coeficiente angular da reta de regressão  $\ln$  atividade específica vs tempo.

(b) Pelo cômputo dos primeiros momentos das curvas atividade específica vs tempo (Tm\*):

$$Tm^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_i f'(t)_i \Delta t}{\sum_{i=1}^n f'(t)_i \Delta t} \dots\dots\dots (17)$$

(c) Pela medida dos tempos de trânsito entre o ponto de injeção e o ponto de saída do traçador do sistema (Tp), que são, simplesmente, os tempos de chegada dos picos das distribuições atividade específica em função do tempo.

### 4.3.3. Biomassa

As estimativas da biomassa das árvores foram feitas usando-se a relação (18):

$$D = \frac{1 - f}{f} \bar{F} Tm \dots\dots\dots (18)$$

onde: D = peso seco estimado da árvore

f = fração de umidade determinada em amostras de madeira retiradas do tronco das árvores.

A biomassa real foi obtida cortando-se a parte aérea das árvores, pesando-se o material fresco e corrigindo para peso seco, usando-se a fração de umidade f.

Os desvios entre as biomassas estimadas e reais, foram cal-

culadas por (19):

$$\delta \% = \frac{D_{estimada} - D_{real}}{D_{real}} \cdot 100 \dots\dots\dots (19)$$

---

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 5.1. Amostragem e Processamento

A exatidão das medidas de transpiração e biomassa depende de uma amostragem intensiva e muito bem feita do pulso de trítio em função do tempo na árvore. Esses requisitos demandam num grande número de amostras a serem processadas. Portanto, um dos pontos limitantes para o sucesso do método refere-se à capacidade de processamento das amostras para análise de trítio. Em seus trabalhos, *KLINE* e seus colaboradores têm usado a técnica de destilação das amostras a vácuo para extração da água dos tecidos foliares. Uma das principais vantagens dessa técnica é a diversidade de amostras que pode ser processada, tais como folhas, madeira, solo, etc. E como desvantagens, tem-se que o tempo gasto no preparo das amostras é muito grande, cerca de 12 horas por amostra e o seu custo é elevado, pois, requer uma série de equipamentos e pessoal especializado. Outra desvantagem desse sistema é que ele possibilita, no máximo, a destilação de um volume de amostra correspondente a 10 folhas e

com esse número é praticamente impossível de se obter uma boa amostragem da árvore.

A técnica utilizada no presente trabalho, conforme descrito em 4.2., apresentou-se como a mais vantajosa, não só pela disponibilidade de recursos materiais, mas, principalmente, por eliminar algumas deficiências do método original. O tempo de preparo das amostras e o seu custo são bastante reduzidos. Um único operador é capaz de processar 30 amostras diárias. As amostras assim processadas representam, de fato, a árvore, pois, provêm de 60 a 80 folhas retiradas de todas as partes da árvore.

As amostras, após prensagem, produzem de 3 a 4 ml de solução, da qual, depois de 10 minutos de centrifugação, é retirado 1 ml para contagem. A boa qualidade do produto final pôde ser comprovada pelos elevados índices de eficiência de contagem obtidos no cintilador líquido: superiores a 30%.

Por outro lado, é importante que se frise que a técnica aqui adotada foi adequada para pinheiros e, provavelmente, o será para outras árvores. Porém, pode-se prever dificuldades em aplicá-la em determinados tipos de folhosas.

## 5.2. Transpiração Média

De acordo com o descrito no item 4.2., foram obtidos os valores de atividade específica em função do tempo e, posteriormente, utilizados para o cálculo da área sob a curva resposta. Os resultados para as cinco árvores que tiveram injeções de trítio sob duas condições climá-

ticas distintas são mostrados nas tabelas 2, 3, 4, 5 e 6.

A partir desses dados, construiu-se os gráficos das figuras 3 e 4, que são as curvas-resposta de atividade específica em função do tempo.

Os fluxos transpiratórios médios ( $\bar{F}$ ) foram computados conforme descrito no item 3.3.1. e os resultados são apresentados na tabela 7.

A equação de Stewart-Hamilton (12) é derivada sob a suposição de que o fluxo é medido a uma taxa constante durante o experimento. Esse é o chamado princípio da estacionariedade (ZIERLER, 1964). Como afirmam ORR e GILLESPIE (1968), a equação não é extremamente sensível aos desvios da suposição de fluxo constante e pode ser usada mesmo em sistemas onde essa suposição não é estritamente verdadeira. Aplicando a equação, resulta a estimativa de um fluxo médio sobre os períodos de chuva e sol ou de noite e dia e sobre outras variações que normalmente ocorrem durante o experimento.

Desde que a equação na qual o método é baseado é rigorosamente derivada, o melhor método para a confirmação do experimento é através do exame dos desvios experimentais e das condições necessárias para a derivação. Em particular, a equação de Stewart-Hamilton depende de uma mistura homogênea do traçador.

A árvore é visualizada como um compartimento foliar servido por um fluxo de entrada, água, movendo-se através das partes lenhosas. Portanto, o modelo não requer uma mistura do traçador através da árvore inteira. Se a mistura uniforme é alcançada antes que o fluxo de entrada



Tabela 2 - Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo e cálculo da área sob a curva resposta para a árvore 1.

Amostragem (h)	Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml)	$\Delta t$ (h)	$\overline{f'(t)}$	$\overline{f'(t)} \Delta t$
8:20	0 (injeção)	0	0	0
9:50	1249	1,5	625	938
11:20	2412	1,5	1831	2747
13:15	9564	1,92	5988	11497
14:45	11306	1,5	10435	15653
16:15	20740	1,5	16023	24035
17:45	26608	1,5	23674	35512
21:35	33402	3,83	30005	114919
8:10	29344	10,58	31373	331926
10:10	27708	2,0	28526	57052
12:10	31664	2,0	29686	59372
15:10	11628	3,0	21646	64938
17:40	10078	2,5	10852	27130
8:20	10269	14,67	10172	149223
13:10	8236	4,83	9253	44692
17:40	3485	4,5	5861	26375
9:10	1302	15,5	2394	37107
16:40	1697	7,5	1500	11250
13:10	890	20,5	1294	26527

$$\sum_{i=1}^n \overline{f'(t)}_i \Delta t = 1\ 040\ 894$$

Tabela 3 - Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo e cálculo da área sob a curva resposta para a árvore 2.

Amostragem (h)	Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml)	$\Delta t$ (h)	$\overline{f'(t)}$	$\overline{f'(t)} \Delta t$
8:00	0 (injeção)	0	0	0
9:30	990	1,5	495	743
11:00	917	1,5	954	1431
13:00	959	2,0	938	1876
14:30	6042	1,5	3501	5252
16:00	32396	1,5	19219	28829
17:30	42552	1,5	37474	56211
21:30	19569	4,0	31061	124244
8:00	30752	10,5	25161	264191
10:00	16821	2,0	23787	47574
12:00	11031	2,0	13926	27852
15:00	4498	3,0	7765	23295
17:30	2067	2,5	3283	8208
8:10	1761	14,67	1914	28078
13:00	1308	4,83	1535	7414
17:30	796	4,5	1052	4734
9:00	395	15,5	596	9238
16:30	902	7,5	649	4868
13:00	330	20,5	616	12628

$$\sum_{i=1}^n \overline{f'(t)}_i \Delta t = 656\ 666$$

Tabela 4 - Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo e cálculo da área sob a curva resposta para a árvore 3.

Amostragem (h)	Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml)	$\Delta t$ (h)	$\overline{f'(t)}$	$\overline{f'(t)} \Delta t$
8:40	0 (injeção)	0	0	0
10:10	1023	1,5	512	767
11:40	663	1,5	843	1265
13:30	935	1,83	799	1462
15:00	4331	1,5	2633	3950
16:30	7482	1,5	5907	8860
18:00	10152	1,5	8817	13226
21:50	19313	3,83	14733	56427
8:20	8308	10,5	13811	145016
10:20	11832	2,0	10070	20140
12:20	12560	2,0	12196	24392
15:20	10238	3,0	11399	34197
17:50	10969	2,5	10604	26509
8:30	10801	14,67	10886	159683
13:20	11178	4,83	10990	53079
17:50	5042	4,5	8110	36495
9:20	4881	15,5	4962	76903
16:50	701	7,5	2791	20933
13:20	384	20,5	543	11121

$$\sum_{i=1}^n \overline{f'(t)}_i \Delta t = 694\,425$$

Tabela 5 - Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo e cálculo da área sob a curva resposta para a árvore 4

Amostragem (h)	Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml)	$\Delta t$ (h)	$\overline{f'(t)}$	$\overline{f'(t)} \Delta t$
7:40	0 (injeção)	0	0	0
9:40	261	2,0	131	261
11:40	379	2,0	320	640
14:10	253	2,5	316	790
16:10	507	2,0	380	760
18:10	483	2,0	495	990
22:10	739	4,0	611	2440
8:10	611	10,0	675	6750
11:10	536	3,0	574	1721
14:10	4646	3,0	2591	7773
17:10	12885	3,0	8766	26297
9:10	10250	16,0	11568	185080
13:10	18458	4,0	14354	57416
17:10	33442	4,0	25950	103800
9:10	27081	16,0	30262	484184
17:10	10514	8,0	18798	150380
9:10	8566	16,0	9540	152640
17:10	16801	8,0	12684	101468
9:40	11700	16,5	14251	253133
18:10	11199	8,5	11450	97321
9:40	5077	15,5	8138	126139
17:10	4737	8,0	4906	39244
9:10	2698	15,5	3118	57621
17:10	1292	8,0	1995	15960
12:10	1955	19,0	1624	30847
12:10	665	24,0	1310	31440
12:10	474	48,0	570	27336
9:10	370	69,0	422	29118

$$\sum_{i=1}^n \overline{f'(t)}_i \Delta t = 1\ 972\ 553$$

Tabela 6 - Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo e cálculo da área sob a curva resposta para a árvore 5.

Amostragem (h)	Atividade específica ( $f'(t)$ , DPM / ml)	$\Delta t$ (h)	$\overline{f'(t)}$	$\overline{f'(t)} \Delta t$
7:30	0 (injeção)	0	0	0
9:30	383	2,0	192	383
11:30	313	2,0	348	696
14:00	313	2,5	313	783
16:00	154	2,0	234	467
18:00	234	2,0	194	388
22:00	239	4,0	237	946
8:00	174	10,0	207	2065
11:00	155	3,0	165	494
14:00	211	3,0	183	549
17:00	185	3,0	198	594
9:00	316	16,0	251	4008
13:00	303	4,0	310	1238
17:00	1617	4,0	960	3840
9:00	3662	16,0	2640	42232
17:00	4158	8,0	3910	31280
9:00	3801	16,0	3980	63672
17:00	13422	8,0	8612	68892
9:00	15986	16,5	14704	242616
18:00	16341	8,5	16164	137390
9:30	10038	15,5	13190	204437
17:30	11992	8,0	11015	88120
9:00	11444	15,5	11718	181629
17:00	7179	8,0	9312	74492
12:00	3757	19,0	5468	103892
12:00	2425	24,0	3091	74184
12:00	1916	48,0	2171	104184
12:00	651	69,0	1284	88562

$$\sum_{i=1}^n \overline{f'(t)}_i \Delta t = 1\ 522\ 033$$

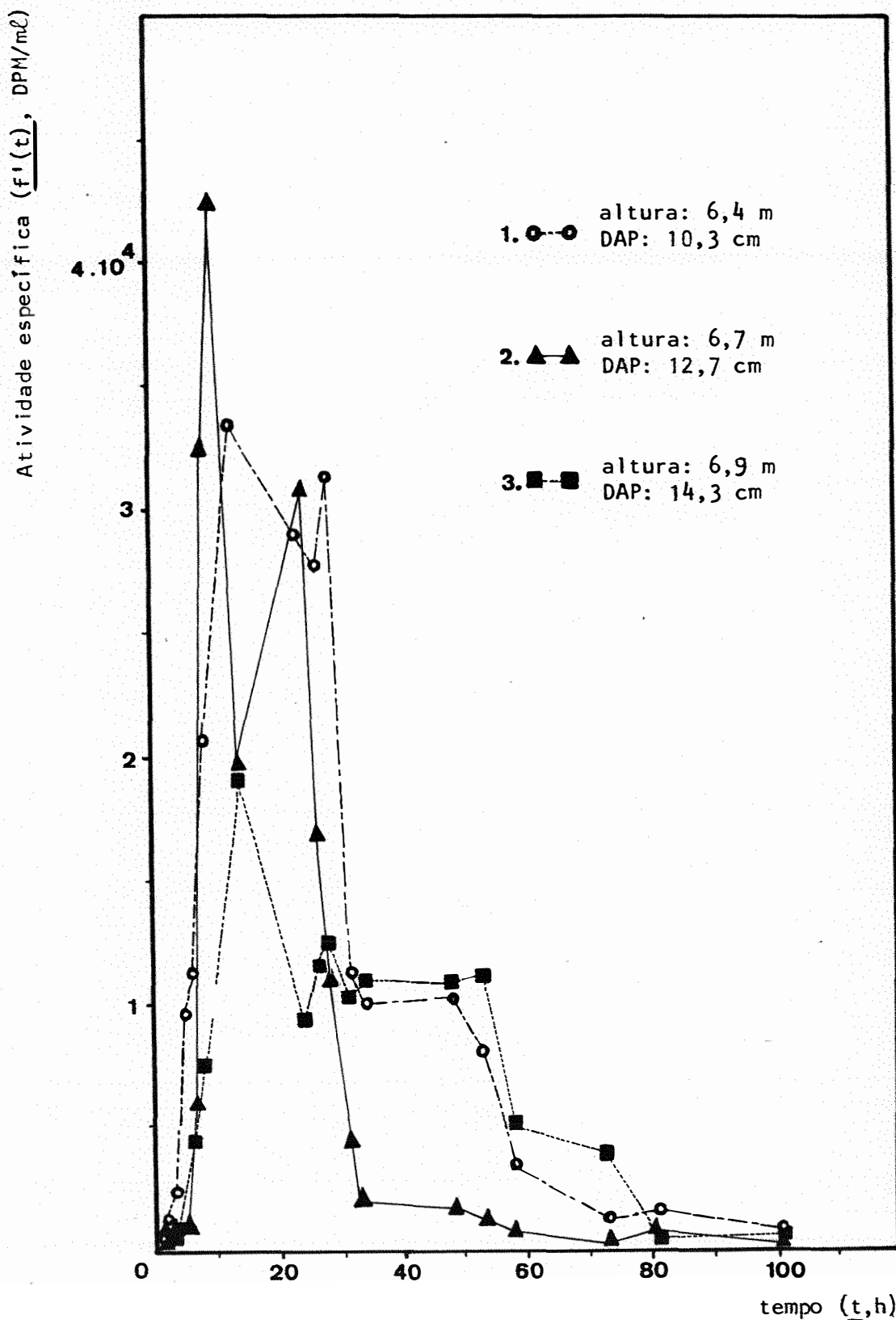


Figura 3 - Curvas atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/mL) em função do tempo ( $t$ , h) para as três árvores que receberam injeções de água tritiada no período de verão

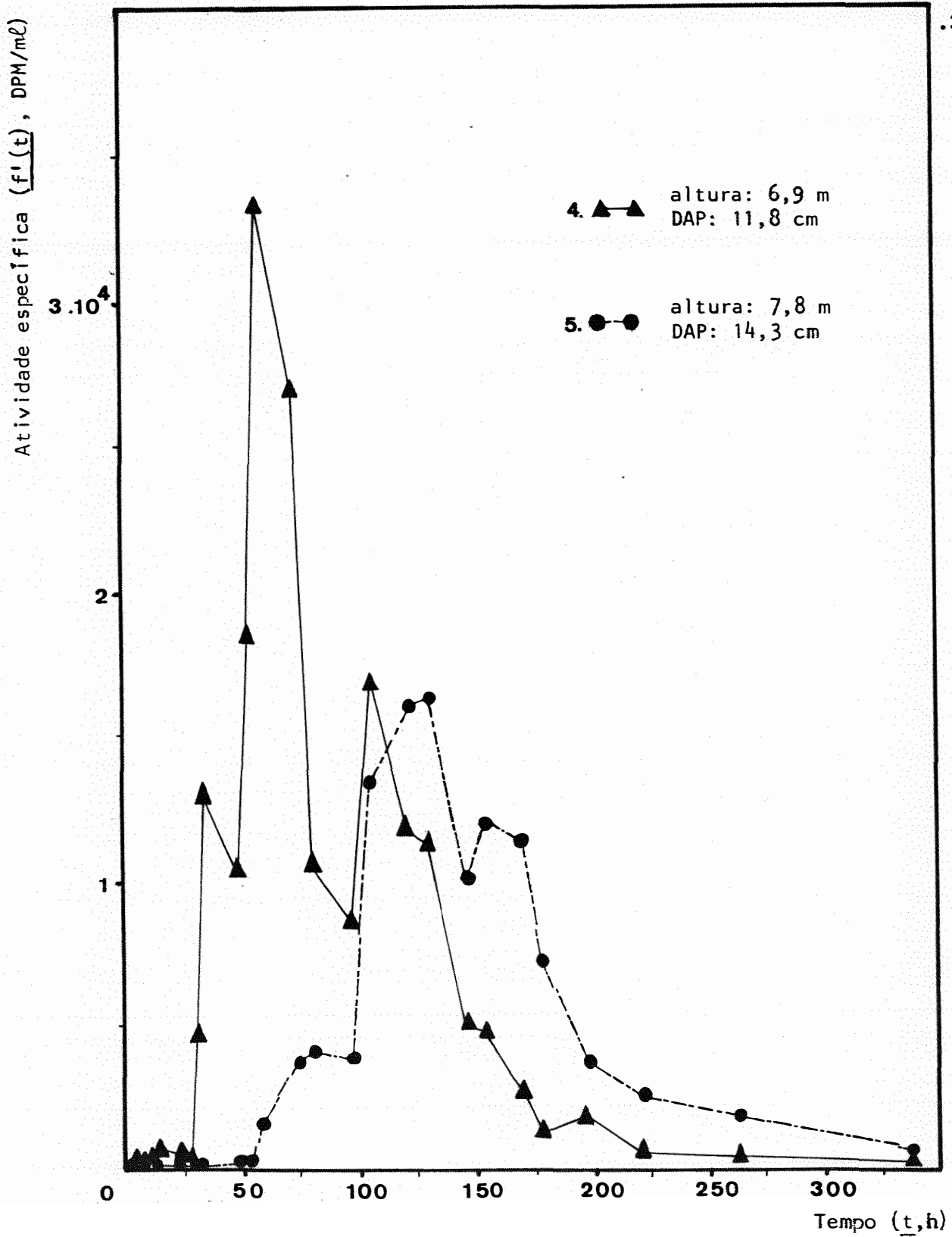


Figura 4 - Curvas atividade específica ( $f'(t)$ , DPM/ml) em função do tempo ( $t$ ,h) para as duas árvores que receberam injeções de água tritiada no período de inverno

Tabela 7 - Transpiração média ( $\bar{F}$ ,  $\ell$ /dia) de *Pinus caribaea* calculada pela solução da equação de Stewart-Hamilton para as cinco árvores que tiveram injeções de água tritida sob duas condições climáticas distintas.

Árvore	Altura (cm)	DAP (cm)	Data de injeção	Total de HTO Injetada (DPM)	Integral da Curva $\int_0^t \frac{f_i(t)}{(\overline{DPM} \cdot h/m\ell)} dt$	Transpiração média ( $\bar{F}$ , $\ell$ /dia)
1	6,4	10,3	23/01/79	2,026 exp 9	1,041 exp 6	46,7
2	6,7	12,7	23/01/79	2,026 exp 9	6,567 exp 5	74,0
3	6,9	14,3	23/01/79	2,026 exp 9	6,944 exp 5	70,0
4	6,9	11,8	16/07/79	1,969 exp 9	1,973 exp 6	24,0
5	7,8	14,3	16/07/79	1,969 exp 9	1,522 exp 6	31,1



chegue ao compartimento foliar, as condições do modelo são satisfeitas.

Outra condição para o uso da equação de Stewart-Hamilton é que o total de trítio do pulso é removido via fluxo transpiratório e nenhum outro caminho significante existe. Na realidade, outros caminhos podem existir:

- a) O trítio pode ser trocado com o hidrogênio de moléculas orgânicas ou ser incorporado dentro delas por fotossíntese e ser removido do fluxo.
- b) Parte da solução de água tritiada pode descer do ponto de injeção e perder-se em direção ao solo.
- c) A água tritiada pode ser aprisionada como água livre em elementos do xilema mais ou menos isolados e tornar-se inviável para a transpiração.

*KLINE et alii (1970)* concluíram pelos seus experimentos com trítio que os dois primeiros caminhos são desprezíveis, porque amostras de solo retiradas da base das árvores não continham trítio na água do solo e amostras de madeira extraídas no final do experimento não continham trítio em seus produtos de combustão.

Para o terceiro caminho pode-se fazer uma correção para a transpiração, estimando o total de trítio na árvore e usando o valor obtido para corrigir o valor M usado na equação (12):

$$M' = M - R$$

onde M é a quantidade de trítio originalmente injetado e R, a quantidade

de trítio residual no final do experimento. Então, a equação (12) é resolvida para  $M'$ . Como regra, o período de amostragem deve se estender até  $R$  tornar-se negligível.

*SLATYER (1967)* descreveu os efeitos de danos ao xilema das árvores que incluem a drenagem dos vasos e a incorporação de ar dentro de les no ponto de dano. Afirmou que existem numerosos caminhos alternativos para a água em torno do ponto de dano e a incorporação de ar não se prolifera através do caule todo mas para perto dessa região. A transpiração total é pouco afetada por pequenos cortes no xilema.

Foi demonstrado por *RANEY e VAADIA (1965)* que plantas transpirando água tritiada têm uma concentração mais baixa de HTO na sua folha gem do que em sua fonte de água. Eles atribuíram o observado às trocas entre as moléculas de água da folha e atmosfera. Nessa troca dinâmica, moléculas de água continuamente deixam a superfície foliar e retornam a e la. A água tritiada parte irreversivelmente da folha como fazem outras moléculas de água e o fluxo de retorno das moléculas da atmosfera para a folha é composto de uma população com identidade diferente daquela que partiu. É esse fluxo de retorno de moléculas de água que dilui a HTO re manescente.

O grau de troca isotópica pode ser medido nas árvores marcadas com HTO usando a razão atividade específica nas folhas sobre a dos ramos em amostras coletadas ao mesmo tempo. Isso pode ser feito porque os ramos são isolados da troca de vapor com a atmosfera (*RANEY e VAADIA, 1965*).

*KLINE et alii (1976)* observaram durante um período experi-

mental que cerca de 30% da água na folhagem era de origem atmosférica.

Se os dados das folhas são usados para construir a curva atividade específica em função do tempo, o fluxo computado inclui o fluxo transpiratório e a troca isotópica.

Uma suposição importante para todo experimento com traçador é que ele se comporta de maneira idêntica à substância sendo traçada. A água tritiada tem uma significativa diferença de massa em relação à água comum, podendo, portanto, ocorrer um enriquecimento em trítio nas folhas devido à evaporação diferencial e aos diferentes coeficientes de difusão molecular da  $\text{HTO}$  e  $\text{H}_2\text{O}$  nas paredes do mesófilo foliar e espaços intercelulares.

Entretanto, nenhum desses fatores chega a influenciar nos resultados de maneira a prejudicá-lo. Para maior rigor, algumas correções podem ser efetuadas, quando se julgar necessário.

### 5.3. Transpiração Média Diária

Os fluxos transpiratórios médios diários ( $F_i$ ), computados a partir dos fluxos médios ( $\bar{F}$ ) e das variáveis climáticas usando a equação de Monteith, conforme o descrito no item 4.3.1., são mostrados nas tabelas 8 e 9.

A avaliação pela equação (15) pode ser vista como um processo de distribuição proporcional de um volume conhecido total de água a dias individuais de diferentes potenciais evaporativos durante o interva-

Tabela 8 - Transpiração média diária ( $F_i$ ,  $\ell$ /dia) computada a partir dos fluxos médios e das variáveis climáticas para as três árvores que tiveram injeções de água tritlada no período de verão.

Data	Radiação Líquida Média Diária ( $R_n$ , $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{dia}$ )	Temperatura Média Diária ( $^{\circ}\text{C}$ )	Défice de Saturação Médio Diário (mb)	Transpiração Média Diária ( $F_i$ , $\ell$ /dia)
23/01/79	305	20,9	100	1. 48,7 2. 77,2 3. 74,0
24/01/79 <sup>a/</sup>	313	22,3	72	1. 49,9 2. 79,2 3. 74,9
25/01/79	223	21,3	44	1. 35,6 2. 56,4 3. 53,4
26/01/79	351	22,3	66	1. 56,0 2. 88,7 3. 83,9
27/01/79	271	23,0	64	1. 43,3 2. 68,7 3. 64,9

$$\frac{a}{\theta} = 0,324 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \text{ e } \xi = 0,5 \text{ atm}$$

Tabela 9 - Transpiração média diária ( $F_i$ ,  $\ell$ /dia), computada a partir dos fluxos médios e das variáveis climáticas para as duas árvores que tiveram injeções de água tritiada no período de inverno.

Data	Radiação Líquida Média Diária ( $R_n$ , cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Temperatura Média Diária (°C)	Défice de Saturação Médio Diário (mb)	Transpiração Média Diária ( $F_i$ , $\ell$ / dia)
16/07/79	100	14,5	42	4. 27,0 5. 35,1
17/07/79	94	14,8	52	4. 25,4 5. 33,0
18/07/79 <sup>a/</sup>	85	10,4	45	4. 23,0 5. 29,9
19/07/79	1	11,0	16	4. 0,2 5. 0,2
20/07/79	98	8,6	40	4. 26,3 5. 34,2
21/07/79	112	9,8	39	4. 30,3 5. 39,4
22/07/79	94	13,1	48	4. 25,3 5. 32,9
23/07/79	41	13,6	49	4. 11,0 5. 14,3
24/07/79	55	16,9	44	4. 14,8 5. 19,2
25/07/79	94	19,2	57	4. 25,4 5. 33,0
26/07/79	118	17,0	39	4. 31,7 5. 41,2
27/07/79	98	15,5	52	4. 26,4 5. 34,3
28/07/79	114	14,8	47	4. 30,7 5. 39,9
29/07/79	114	16,3	61	4. 30,7 5. 39,9
30/07/79	114	17,1	67	4. 30,8 5. 40,1

$$\frac{a/}{\theta} = 0,309 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \text{ e } \xi = 1,5 \text{ atm}$$

lo de tempo experimental. Essa divisão proporcional só pode ser feita sob condições de alta umidade do solo, pois, sabe-se que a maioria das equações de transpiração são válidas somente para condições nas quais a transpiração real é igual à potencial.

Esse método de se distribuir ponderadamente o total transpirado pelo número de dias, levando-se em conta principalmente a energia líquida recebida em cada dia mostrou-se adequado e de grande valia, porque esses valores são mais exatos que as estimativas absolutas pela equação de Monteith.

Comparando-se os dados das tabelas 8 e 9, pode-se verificar que os fluxos transpiratórios médios nos períodos de verão e inverno foram diretamente proporcionais à radiação líquida média em cada período e que esses fluxos no verão foram cerca de três vezes superiores aos no inverno.

#### 5.4. Tempo Médio de Residência

O tempo médio de residência ( $T_m$ ) foi o parâmetro mais difícil de ser obtido, principalmente por não se conhecer "a priori", qual dos critérios de cálculo seria o mais adequado.

Na tabela 10 são mostrados os valores de  $T_m$  calculados através dos três critérios discutidos no item 4.3.2.

Após a análise dos resultados optou-se como tempos médios de residência ( $T_m$ ) os calculados através das declividades dos ramos descendentes das curvas atividade específica em função do tempo ( $T_s$ ). Isso em

virtude do bom ajustamento dos dados experimentais às curvas de regressão efetuado pelo método dos quadrados mínimos, o que implica numa mistura bem homogênea do traçador que é a condição básica para o uso desse critério.

Tabela 10 - Valores dos tempos médios de residência da água nas árvores ( $\bar{T}_m$ , h) obtidos através de  $T_s$ ,  $T_m^*$  e  $T_p$ .

Árvore	Data da injeção	$T_s$ (h)	$T_m^*$ (h)	$T_p$ (h)
1	23/01/79	21,1 (r = 0,96)	23,3	13,3
2	23/01/79	18,1 (r = 0,91)	19,6	9,5
3	23/01/79	24,4 (r = 0,89)	34,2	13,2
4	16/07/79	55,6 (r = 0,93)	75,8	57,5
5	16/07/79	63,7 (r = 0,97)	143,0	130,5

As estimativas de  $\bar{T}_m$  pelo cômputo do primeiro momento da curva ( $T_m^*$ ) apresentaram maior variação e os valores médios tenderam a ser superiores aos de  $T_s$ . A árvore 5 teve os valores de  $\bar{T}_m^*$  e  $T_p$  prejudicados por uma chuva que ocorreu no terceiro dia de experimento.

Os tempos médios de residência ( $\bar{T}_m$ ) obtidos pelos tempos de chegada dos picos ( $T_p$ ) para as árvores 1, 2 e 3 apresentaram valores inferiores aos de  $T_s$ , pois, como as injeções foram feitas de manhã, e os picos das distribuições foram atingidos no mesmo dia, esses tempos se referem ao dia e não à média entre dia e noite como os outros.

Pode-se dizer que, nas condições de verão, o tempo médio de residência foi de  $21,2 \pm 3,2$  h, e no de inverno de  $59,7 \pm 5,7$  h, ou seja, três vezes maior. Esses valores médios de  $T_s$  são de mesma ordem de grandeza dos obtidos por *KLINE et alii (1972b)*.

### 5.5. Biomassa

Os valores de biomassa ( $D$ , Kg), calculados conforme descrito no ítem 3.3.3., são mostrados na tabela 11.

As estimativas de biomassa estão sujeitas a todas as fontes de erro inerentes às medidas de transpiração além da porcentagem de umidade e do tempo médio de residência da água na planta.

A porcentagem de umidade refere-se à média ponderada de umidade da árvore. Na prática, esse dado não é difícil de ser obtido, mas os fatores de ponderação para folhas, ramos e caule não são, geralmente, conhecidos. Como a porcentagem de umidade não é muito diferente entre essas partes, adotou-se o  $f$  da madeira desde que esta constitui a maior porção da biomassa da árvore.

A maior fonte de incerteza nas estimativas de biomassa é devida aos tempos médios de residência que apresentam considerável variação.

Levando-se em conta que o objetivo do presente trabalho foi desenvolver a metodologia e provar a sua viabilidade, não se preocupou com a correta obtenção desses dados. Na verdade, para se conhecer com exatidão os valores de transpiração, tempo médio de residência e biomassa,



Tabela 11 - Estimativas da biomassa ( $\bar{D}$ , Kg) de *Pinus caribaea* e comparação das medidas feitas pelo método do trítio durante o período de verão com o método da pesagem após a colheita.

Árvore	Transpiração Média ( $\bar{F}$ , $\ell/h$ )	Tempo Médio de Residência ( $\bar{T}_s$ , h)	Fração de Umidade ( $\bar{f}$ , %)	H T O	Biomassa ( $\bar{D}$ , Kg) Colheita	Desvio ( $\underline{\delta}$ , %)
1	1,95	21,1	62,0	25,2	18,5	- 36,2
2	3,09	18,1	62,0	34,3	23,3	- 47,2
3	2,92	24,4	62,0	43,7	29,5	- 48,1
4	1,00	55,6	62,0	34,1	34,1	-
5	1,29	63,7	62,0	50,4	50,4	-

há a necessidade de se montar um experimento mais amplo, com um número maior de árvores e maiores recursos materiais. Aí então, a média dos valores obtidos terá um significado mais amplo.

---

## 6. CONCLUSÕES

---

Do trabalho realizado, permite-se concluir que:

1. A metodologia do traçador HTO é um meio real e prático para as medidas de transpiração de árvores sob condições de campo. Tais estudos podem ser economicamente e seguramente realizados com a tecnologia existente.

2. O método do trítio possibilita a obtenção de novos detalhes experimentais sobre hidrologia florestal inviáveis até o momento, e impossíveis de serem obtidos pelos outros métodos estimativos.

3. É possível aliar-se a tecnologia do traçador HTO com a teoria matemática existente da transpiração para, desse modo, obter-se mé dias diárias mais reais que as estimativas absolutas.

4. Os experimentos planejados para as medidas das taxas de

transpiração de árvores sob condições de campo podem também ser usadas, com a coleta de poucos dados auxiliares, nas medidas não destrutivas da biomassa.

5. O melhor critério para obtenção dos tempos médios de residência da água nas árvores foi através das declividades dos ramos descen-dentes das curvas atividade específica vs tempo.

---

## 7. SUMMARY

---

---

The use of tritiated water in direct measurement of transpiration and biomass of *Pinus caribaea* is discussed. The method is based on the theory of tracer dynamics in steady-state systems.

Emphasis was given to theoretical, experimental and analytical aspects related to spatial and temporal evolution of the tracer in the tree. The mean residence time of water in the tree - an essential parameter for biomass determination - was studied after theoretical and experimental investigation of various methods to obtain it.

A new methodology for sample preparation for tritium analysis is presented. Also presented are data on transpiration, biomass and water mean residence time, obtained under two different climatic conditions - summer and winter. It was concluded that the method can be advantageously used to determine transpiration and biomass of pine forests.

---

## 8. BIBLIOGRAFIA

---

BERGNER, E.E. - 1961. Tracer dynamics: I. A tentative approach and definition of fundamental concepts. *J. Theor. Biol.*, London, 2: 120-140.

BERGNER, E.E. - 1964. Tracer dynamics and the determination of pool-sizes and turnover factor in metabolic systems. *J. Theor. Biol.*, London, 6: 137-158.

BERGNER, E.E. - 1965. Exchangeable mass: determination without assumption of isotopic equilibrium. *Science*, Washington, 150: 1048-1050.

BERGNER, E.E. - 1966. Tracer theory: a review. *Isotop. Radiat. Technol.* Washington, 3: 245-262.

CLINE, R.G. e G.S. CAMPBELL - 1976. Seasonal and diurnal water relations of selected forest species. *Ecology*, Brooklin, 57: 367-373.

- FRITSCHEN, L.J.; L. COX e R. KINERSON - 1976. A 28 meter Douglas Fir in a weighing lysimeter. *Forest Science*. Washington, 19: 256-261.
- HINCKLEY, T.M.; J.P. LASSOIE e S.W. RUNNING - 1978. Temporal and spatial variations in the water status of forest trees. *Forest Science*. Washington, monograph 20. 72p.
- JARVIS, P.J.; G.B. JAMES e J.J. LANDSBERG - 1976. Coniferous forest. In: MONTEITH, J.L., ed. *Vegetation and the atmosphere*. New York, Academic Press. V. 2. p. 171-236.
- JORDAN, C.F. e J.R. KLINE - 1977. Transpiration of trees in a tropical rain forest. *J. Appl. Ecol.* Oxford, 14: 853-860.
- KLINE, J.R.; J.R. MARTIN; C.F. JORDAN e J.J. KORANDA - 1970. Measurement of transpiration in tropical trees with tritiated water. *Ecology*. Brooklin, 51: 1068-1073.
- KLINE, J.R.; M.L. STEWART e C.F. JORDAN - 1972a. Estimation of biomass and transpiration in coniferous forests using tritiated water. In: FRANKLIN, J.F.; L.J. DEMPSTER e R.H. WARING, eds. *Research on Coniferous Forest Ecosystems*. Washington, U.S.F.S., p. 159-166.
- KLINE, J.R.; M.L. STEWART; C.F. JORDAN e P. KOVAC - 1972b. Use of tritiated water for determination of plant transpiration and biomass under field conditions. In: IAEA ed. *Isotopes and Radiation in Soil Plant Research Including Forestry*. Vienna, IAEA, p. 419-437.

- KLINE, J.R.; K.L. REED; R.H. WARING e M.L. STEWART - 1976. Field measurement of transpiration in Douglas Fir. J. Appl. Ecol. Oxford, 13: 272-283.*
- LASSOIE, J.P.; D.R.M. SCOTT e L.J. FRITSCHER - 1977. Transpiration studies in Douglas Fir using the heat pulse technique. Forest Science. Washington, 23: 377-390.*
- LEYTON, L. - 1970. Problems and techniques in measuring transpiration from trees. In: LUCKWILL, L.C. e C.V. CUTTING, eds. Physiology of tree crops. London, Academic Press. p. 101-112.*
- LEYTON, L. - 1972. Use of isotopes in tree physiological research. In: IAEA ed. Isotopes and Radiation in Soil-Plant Research Including Forestry. Vienna, IAEA. p. 263-276.*
- LIMA, W.P. - 1975. Estudo de alguns aspectos quantitativos e qualitativos do balanço hídrico em plantações de Eucalyptus e Pinus. Piracicaba, ESALQ/USP. 111p. [Tese de Doutorado].*
- LJUNGGREN, K. - 1967. A review of the use of radioisotope tracers for evaluating parameters pertaining to the flow of material in plant and natural systems. Isotop. Radiat. Technol. Washington, 5: 3-24.*
- MONTEITH, J.L. - 1975. Vegetation and the atmosphere. New York, Academic Press. V. 1, 278p.*



NASCIMENTO F<sup>o</sup>, V.F. - 1977. Métodos de determinação de eficiência de detecção por cintilação líquida e efeito Cerenkov. Piracicaba, CENA, 35p. (Boletim Didático 020).

OMETTO, J.C. - 1968. *Estudo das relações entre: radiação solar global, radiação líquida e insolação.* Piracicaba, ESALQ/USP. 64p. (Tese de Doutorado).

ORR, J.S. e F.C. GILLESPIE - 1968. Occupancy principle for radioactive tracers in steady-state biological systems. *Science*. Washington, 162: 138-139.

OWSTON, P.W.; J.L. SMITH e H.G. HALVERSON - 1972. Seasonal water movement in tree stems. *Forest Science*. Washington, 18: 266-272.

PATTERSON, M.S. e R.C. GREENE - 1965. Measurement of low energy beta-emitters in aqueous solution by liquid scintillation counting of emulsions. *Anal. Chem.* Washington, 37: 854-857.

RANEY, F. e Y. VAADIA - 1965. Movements and distribution of HTD in tissue water and vapor transpired by shoots of Helianthus and Nicotiana. *Pl. Physiol.* New York, 40: 383-387.

RANZANI, G.; O. FREIRE e T. KINJO - 1966. *Carta de solos do município de Piracicaba.* Centro de Estudos de Solos. Piracicaba, ESALQ/USP. 85p.

- RUNNING, S.W.; R.H. WARING e R.A. RYDELL - 1975. Physiological control of water flux in conifers - A computer simulation model. *Oecologia*. Berlin, 18: 1-16.
- RUTTER, A.J. - 1968. Water consumption by forests. In: KOZLOWSKI, T.T., ed. *Water deficits and plant growth*. New York, Academic Press. V. 2, p. 23-84.
- SLATYER, R.O. - 1967. *Plant-water relationships*. New York, Academic Press. 366p.
- SLAVÍK, B. - 1974. Liquid water movement in plants. In: JACOBS, J.; D.L. LANGE; J.S. OLSON e W. WIESER, eds. *Methods of studying plant-water relations*. Berlin, Springer-Verlag. p. 219-235.
- STANHILL, G. - 1973. The water flux in temperate forests: precipitation and evapotranspiration. In: REICHLE, D.E. ed. *Analysis of temperate forest ecosystems*. Berlin, Springer-Verlag. p. 242-256.
- STEWART, C.M. - 1967. Moisture content of living trees. *Nature*. London, 214: 138-140.
- STEWART, M.L.; J.R. KLINE e C.F. JORDAN - 1972. A tritiated water recovery system. *Int. J. Appl. Radiat. Isotopes*. New York, 23: 387-388.
- WANG, C.H.; D.L. WILLIS e W.D. LOVELAND - 1975. *Radiotracer Methodology*

*in the Biological Environmental and Physical Sciences.* New Jersey,  
Prentice-Hall. 480p.

WOODS, F.W. - 1965. Tritiated water as a tool for ecological field  
studies. *Science*. Washington, 147: 148-149.

YONG, S.E.; J.D. DODD e E.R. IBERT - 1970. Tritium collection and  
extraction techniques for plant-water relationships studies. *Ecology*.  
Brooklin, 51: 535-537.

ZIERLER, K.L. - 1964. Basic aspects of kinetic theory as applied to  
tracer distribution studies. In: KNISELEY, R.M. e W.N. TAUXE, eds.  
*Dynamic clinical studies with radioisotopes*. Germantown, U.S. Atomic  
Energy Commission. p. 55-79.