

ANTONIO CARLOS BATISTA

Determinação de Umidade do Material
Combustível sob Povoamentos
de *Pinus taeda*

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau e título de Mestre em Ciências Florestais.

CURITIBA

1984



COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

PARECER

Os membros da Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado apresentada pelo candidato ANTONIO CARLOS BATISTA, sob o título "DETERMINAÇÃO DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL SOB POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*" para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, área de concentração SILVICULTURA, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação, completando assim os requisitos necessários para receber o grau e o Diploma de Mestre em Ciências Florestais. Observação: O critério de avaliação da mesma a partir de novembro de 1980 é apenas APROVADA ou NÃO APROVADA.

Curitiba, 21 de agosto de 1984.

Professor Antonio Resende Soares, DR.
Primeiro Examinador

Professor Antonio José de Araujo, DR.
Segundo Examinador

Professor Ronaldo Viana Soares, Ph.D
Presidente



AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Ronaldo Viana Soares, pela dedicação na orientação deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Antonio José de Araújo pelo estímulo e co-orientação.

Ao Prof. Nelson Rossot pelo fornecimento dos programas e auxílio na computação dos dados.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e à CAPES pelo apoio financeiro.

A todos os colegas que contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA DO AUTOR

ANTONIO CARLOS BATISTA, filho de Joel Mendes Batista e Isolina Ruths Batista, nasceu em Curitiba, PR, a 5 de novembro de 1956.

Realizou seus estudos primários no Grupo Escolar Padre Olímpio de Souza e os secundários no Seminário São José e Colégio Estadual Nilson Baptista Ribas, em Curitiba, PR.

Em 1975, iniciou o Curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal do Paraná, graduando-se em janeiro de 1979.

Em janeiro de 1979 ingressou na Universidade Federal Rural de Pernambuco como Professor colaborador, onde atualmente é Professor Assistente do Curso de Engenharia Florestal, responsável pela disciplina de Proteção Florestal.

Em março de 1982, iniciou o Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração Silvicultura, na Universidade Federal do Paraná, concluindo os requisitos para a obtenção do grau e título de Mestre em Ciências Florestais em agosto de 1984.

SUMÁRIO

	<u>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</u>	vi
	<u>LISTA DE TABELAS</u>	vii
	<u>RESUMO</u>	x
1	<u>INTRODUÇÃO</u>	1
2	<u>REVISÃO DA LITERATURA</u>	3
2.1	RELAÇÃO ENTRE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL E FATORES METEOROLÓGICOS	5
2.2	SECAGEM DO MATERIAL COMBUSTÍVEL	8
2.3	ESTIMATIVA DA UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL	10
2.3.1	Correlações estatísticas	11
2.3.2	Indicadores de umidade	16
3	<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	20
3.1	LOCAL DE ESTUDO	20
3.2	CLIMA	20
3.3	COLETA DE DADOS	22
3.3.1	Dados de campo	22
3.3.1.1	Material combustível	22
3.3.1.2	Indicadores de umidade	23
3.3.2	Dados de laboratório	26
3.3.3	Observações meteorológicas	26
3.4	VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS	26

3.5	DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES POR CLASSE DE MATERIAL COMBUSTÍVEL	27
3.6	USO DOS INDICADORES PARA A ESTIMATIVA DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL	28
4	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	30
4.1	NÚMERO DE AMOSTRAS	30
4.2	CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL	30
4.3	DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DAS EQUAÇÕES	35
4.3.1	Classe de acículas	35
4.3.2	Classe < 0,7 cm de diâmetro	41
4.3.3	Classe de 0,7 a 2,5 cm de diâmetro	46
4.3.4	Classe de 2,5 a 7,6 cm de diâmetro	50
4.4	DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DAS EQUAÇÕES UTILIZANDO INDICADORES DE UMIDADE	53
5	<u>CONCLUSÕES</u>	56
	<u>SUMMARY</u>	58
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DSA	-	Déficit de saturação do ar
EMC	-	Conteúdo de umidade de equilíbrio
FWI	-	Canadian Forest Fire Weather Index (Índice Meteorológico Canadense de Perigo de Incêndio)
NFDRS	-	National Fire Danger Rating System (Sistema Nacional de Estimativa de Perigo de Incêndio)
PS	-	Peso seco
PU	-	Peso úmido
T	-	Temperatura
TMV	-	Tensão máxima de vapor
TPO	-	Temperatura de ponto de orvalho
TRV	-	Tensão real de vapor
UR	-	Umidade relativa
1H-TL	-	Classe de material combustível de 1 hora de <i>timelag</i> (tempo de resposta)
10H-TL	-	Classe de material combustível de 10 horas de <i>timelag</i>
100H-TL	-	Classe de material combustível de 100 horas de <i>timelag</i>
1000H-TL	-	Classe de material combustível de 1000 horas de <i>timelag</i>

LISTA DE TABELAS

1	TEMPERATURA MÉDIA MENSAL E PRECIPITAÇÃO TOTAL MENSAL, NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DO CANGUIRI NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1970 A FEVEREIRO DE 1984 E NOS MESES DE COLETA DE DADOS	21
2	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), INVERNO 1983	31
3	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), VERÃO 1984	32
4	EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DE ACÍCULAS. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), INVERNO 1983	36
5	EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DE ACÍCULAS. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), VERÃO 1984	37

6	EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS < 0,7 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), INVERNO 1983	43
7	EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS < 0,7 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), VERÃO 1984	44
8	EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS DE 0,7 a 2,5 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), INVERNO 1983	47
9	EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS DE 0,7 a 2,5 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), VERÃO 1984	48
10	EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS DE 2,5 a 7,6 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), INVERNO 1983	51
11	EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS DE 2,5 a 7,6 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), VERÃO 1984	52

12	EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL ATRAVÉS DE INDICADORES DE UMIDADE. POVOAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> , 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), INVERNO 1983	54
----	---	----

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido na Estação Experimental do Canguiri, da Universidade Federal do Paraná, Piraquara, em talhões de *Pinus taeda*, tendo os seguintes objetivos: determinar o grau de correlação entre elementos meteorológicos e o conteúdo de umidade do material combustível, desenvolver equações para estimar o conteúdo de umidade do material combustível em função de variáveis meteorológicas e obter estimativas do conteúdo de umidade em função de indicadores de umidade. O material combustível coletado em dois períodos, inverno e verão, foi separado em quatro classes: acículas e material lenhoso com as seguintes classes de diâmetro: < 0,7 cm, 0,7 a 2,5 cm e 2,5 a 7,6 cm. Foram construídos três tipos de indicadores de madeira de *Araucaria angustifolia*, um para acompanhar a variação de umidade das acículas e do material lenhoso da classe de < 0,7 cm e os demais para acompanhar cada uma das classes restantes. Foram determinadas, em cada período, as correlações simples entre cada uma das classes de material combustível e as variáveis meteorológicas simples: umidade relativa (UR), temperatura do ar (T), temperatura de ponto de orvalho (TPO), tensão máxima de vapor (TMV), tensão real de vapor (TRV) e deficit de saturação do ar (DSA). Para compor as equações foram consideradas também as variáveis combinadas T-TPO e (1-UR) x TMV. No inverno, os valores médios de umidade relativa apresentaram as maiores correlações com o conteúdo de umidade de todas as classes de material combustível. No verão as variáveis se alternaram como as mais correlacionadas com o conteúdo de umidade do material combustível. A melhor correlação foi obtida entre a variável umidade relativa e o conteúdo de umidade da classe de acículas no período do inverno ($R = 0,9345$). As variáveis meteorológicas apresentaram melhores correlações com o conteúdo de umidade das classes de acículas e < 0,7 cm de diâmetro do que com as classes de maior diâmetro. No inverno, para as classes de acículas e de materiais lenhosos com diâmetro < 0,7 cm e de 0,7 a 2,5 cm a melhor estimativa do teor de umidade, foi obtida com a variável combinada T-TPO, e para a classe de 2,5 a 7,6 cm de diâmetro a melhor estimativa foi obtida com a variável umidade relativa. No verão, para as classes de acículas e de materiais lenhosos com diâmetro < 0,7 cm e 2,5 a 7,6 cm a variável combinada TMV x (1-UR) forneceu a melhor estimativa do conteúdo de umidade, sendo que para a classe de 0,7 a 2,5 cm de diâmetro a melhor estimativa foi obtida com a variável umidade relativa. Considerando-se apenas as variáveis simples, a umidade relativa foi selecionada para estimar o conteúdo de umidade de todas as classes de material combustível

no inverno e para as classes de acículas e de 0,7 a 2,5 cm no verão; para as classes < 0,7 cm e de 2,5 a 7,6 cm as variáveis simples selecionadas foram DSA e T, respectivamente. A utilização dos indicadores de umidade não forneceu estimativas confiáveis do conteúdo de umidade das classes dos materiais combustíveis estudados, provavelmente devido ao tipo de madeira usada e a falta de climatização preliminar dos indicadores.

1 INTRODUÇÃO

A expansão das áreas de reflorestamentos na região sul tem provocado uma necessidade contínua de se aprimorarem as técnicas de manejo e proteção destas áreas. Os incêndios florestais são uma preocupação constante e um dos principais objetivos dos planos de proteção para as florestas implantadas.

A introdução da técnica de queima controlada nos planos de prevenção pode resultar em grande eficiência na diminuição do risco de incêndios florestais e controle de pragas. O estudo do comportamento do fogo é de fundamental importância tanto para a prescrição de queimas como para o planejamento de controle de incêndios florestais.

Conhecer a umidade do material combustível é imprescindível para a determinação de parâmetros ligados ao comportamento do fogo, tais como intensidade e velocidade de propagação, além de ser fator decisivo na obtenção de sucesso na queima controlada.

Até o presente, no Brasil, a determinação da umidade do material combustível tem sido feita através de medições diretas em amostragem de campo e determinação em laboratório. Para se obter o conteúdo de umidade do material amostrado utiliza-se normalmente a pesagem. As amostras representativas de combustíveis são coletadas no local a ser queimado e colocadas em recipientes onde possam ser pesadas. A seguir são

secas até peso constante, e novamente pesadas, determinando-se desta forma o teor de umidade. Utilizando-se secagem em estufa, este processo é concluído no mínimo em 24 horas. O procedimento descrito é pouco operacional, visto que se torna oneroso e dispende muito tempo à medida que aumenta a área ou número de amostras.

O desenvolvimento de métodos indiretos que forneçam estimativas do conteúdo de umidade do material combustível mediante parâmetros correlatos de fácil determinação é uma forma mais rápida de se obter a umidade.

O uso de indicadores é outra alternativa para a obtenção da estimativa do conteúdo de umidade do material combustível florestal. Estes elementos são padronizados com características definidas, de modo que o seu conteúdo possa ser rapidamente determinado e esteja estreitamente relacionado com a umidade do material combustível.

O desenvolvimento destes métodos poderia agilizar os trabalhos dos técnicos responsáveis pela proteção destas áreas, visto que a umidade do material combustível é um dos mais importantes fatores ligados ao problema do fogo.

Os objetivos do presente trabalho são:

- a) determinar o grau de correlação entre elementos meteorológicos e o conteúdo de umidade do material combustível;
- b) desenvolver uma metodologia para estimar o conteúdo de umidade do material combustível em função de variáveis meteorológicas;
- c) relacionar a umidade do material combustível com a umidade de indicadores padronizados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Na linguagem de controle de incêndios florestais, combustível é qualquer material orgânico, vivo ou morto, no solo ou acima deste, capaz de entrar em ignição e queimar (SCHROEDER & BUCK²⁰; SOARES²³).

Os materiais vegetais vivos ou mortos, têm diferentes mecanismos de retenção de água e diferentes respostas ao clima. O conteúdo de umidade do material vivo é mais estável e maior do que a do material morto. Deste modo, o material morto é mais seco e responde mais rapidamente às mudanças climáticas, sendo portanto o principal responsável pela propagação do incêndio. O termo material combustível, usado neste trabalho, refere-se ao material vegetal morto. Os materiais combustíveis mortos, conforme definição de DEEMING *et alii*, são combustíveis que ocorrem naturalmente, nos quais o conteúdo de umidade é governado quase que inteiramente pelo clima⁵.

Os materiais combustíveis ocorrem em inúmeras combinações de tipo, quantidade, tamanho, forma, posição e arranjo. Várias pesquisas têm comprovado o fato de que combustíveis de diferentes tamanhos respondem distintamente ao clima e que o comportamento do fogo e os seus danos são diretamente afetados pelo conteúdo de umidade destes combustíveis (FOSBERG *et alii*¹¹).

Para simplificar este problema, BYRAM*, citado por LANCASTER¹⁵, propôs um método de expressar a adsorção e taxas de secagem baseado na umidade de equilíbrio e nas características do combustível, através do princípio de *timelag*.

Define-se umidade de equilíbrio como o conteúdo de umidade atingido uniformemente por todas as partes de um material exposto a uma atmosfera de temperatura e umidade fixas. Isto ocorre quando a pressão de vapor do combustível iguala-se à da atmosfera (ANDERSON *et alii*¹; DEEMING *et alii*⁵).

De acordo com o princípio de *timelag*, a aproximação dos valores dos conteúdos de umidade em relação à umidade de equilíbrio, mesmo acima ou abaixo do equilíbrio, segue um curso logarítmico, em vez de uma linha reta até que não haja mais água na superfície dos combustíveis. BYRAM* definiu *timelag* como o intervalo de tempo requerido para a umidade do material combustível perder $1-1/e$ (e = base do logaritmo neperiano), ou aproximadamente 63% de diferença entre um valor inicial uniforme de equilíbrio para um novo equilíbrio, depois do ambiente ter mudado instantaneamente.

Na verdade, o conceito de *timelag* é teórico, porque na natureza o equilíbrio não é atingido devido às condições ambientais raramente permanecerem estáveis por longos períodos. O conceito, no entanto, é válido e muito útil (LANCASTER¹⁵).

* BYRAM, G.M. "An analysis of the drying process in forest fuel material." Trabalho apresentado no Int. Symp. Humidity and Moisture, 1963. 38 p. (não publicado).

Assim, os combustíveis podem ser classificados através do seu *timelag* ou tempo de resposta, como:

- a) classe de 1 hora (1H-TL), correspondente a combustíveis com diâmetro inferior a 0,7 cm;
- b) classe de 10 horas (10H-TL), correspondente a combustíveis com diâmetros de 0,7 até 2,5 cm;
- c) classe de 100 horas (100H-TL), correspondente a combustíveis com diâmetro entre 2,5 a 7,6 cm.

Outras classes podem ser consideradas, como a de 1000 horas (1000H-TL) por exemplo. A importância destes materiais no estudo do comportamento do fogo e controle de incêndios, no entanto, é relativamente menor do que as outras classes porque requerem períodos muito prolongados de seca para perderem umidade (FOSBERG & DEEMING¹⁰).

2.1 RELAÇÃO ENTRE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL E FATORES METEOROLÓGICOS

O estudo das relações entre variáveis meteorológicas e umidade do material combustível desenvolveu-se de modo expressivo entre as décadas de 1920 e 1940 (PÉCH¹⁹; FOSBERG⁷). Neste período vários trabalhos importantes foram publicados, fornecendo as bases para o desenvolvimento posterior de sistemas para uso no campo.

A partir de 1960, o avanço tecnológico dos métodos de controle de incêndios florestais e as práticas de queima controlada, no Canadá, E.U.A. e Austrália, e o aumento da procura por sistemas mais precisos de avaliação de perigo de fogo, principalmente nesses países, induziram a investigações mais profundas sobre os problemas das relações entre umidade

do material combustível e clima (KING & LINTON¹⁴, STEEN²⁴, STOREY²⁵, NELSON¹⁸).

O conteúdo de umidade do material combustível pode apresentar uma grande variação. De acordo com BROWN & DAVIS raramente chega abaixo de 2% mas pode exceder 200% após longos períodos de precipitação³.

Quando parte de uma planta morre, o crescimento e a elaboração de alimento param, cessando a circulação da água. A água contida nos tecidos evapora-se até que os mesmos tecidos mortos tornem-se secos ao ar. A quantidade de água remanescente é variável e está sempre mudando em função das condições ambientais (SCHROEDER & BUCK²⁰).

BROWN & DAVIS consideram que as principais variáveis climáticas que controlam a umidade de combustível são precipitação, umidade relativa e temperatura. O vento e a radiação solar são fatores importantes na secagem, mas exercem sua influência pela modificação da temperatura dos combustíveis e a temperatura e umidade relativa no fino filme de ar adjacente³. KING & LINTON¹⁴ afirmam que o vento afeta consideravelmente a variação do conteúdo de umidade e concordam com BROWN & DAVIS³, ao considerar que a radiação solar tem seu efeito por aquecer o combustível.

Para SIMARD, as variáveis climáticas relacionadas com o ganho de umidade são a precipitação e o orvalho, enquanto que a perda de umidade depende da pressão de vapor, temperatura e umidade atmosférica²¹.

BROWN & DAVIS afirmam que a única maneira pela qual o combustível, com conteúdo de umidade de 25 a 30%, pode ter um aumento apreciável na umidade é através da precipitação. No

entanto, os combustíveis expostos a céu aberto em noites claras, sem nuvens, ganham considerável umidade, em locais baixos, pelo recebimento do orvalho³.

O caráter higroscópico do material combustível é um fator muito importante nas relações do clima com a umidade do combustível. Através da higroscopicidade, o material pode adsorver vapor d'água do ar. A água que o material adsorve do ar é chamada de água higroscópica. Suas propriedades são diferentes daquelas da água livre: o ponto de ebulição é mais alto e o ponto de congelamento mais baixo. É necessária energia para separar a água higroscópica do material (SCHROEDER & BUCK²⁰; BROWN & DAVIS³).

A quantidade de água higroscópica nos combustíveis é determinada em parte pela temperatura, mas a umidade relativa é o principal fator controlador (COUNTRYMAN⁴, BROWN & DAVIS³).

A temperatura e a umidade têm também um efeito pronunciado na taxa pela qual a água higroscópica está saindo ou entrando no combustível, quando não existem condições de equilíbrio. Como raramente as condições de equilíbrio ocorrem, os combustíveis florestais estão geralmente perdendo ou ganhando umidade, enquanto a temperatura e a umidade relativa seguem seu ciclo diário (BROWN & DAVIS³).

As variações dos fatores climáticos combinados com diferentes classes de combustíveis produzem efeitos retardados no conteúdo de umidade. Tais efeitos podem ser medidos em minutos nos combustíveis finos ou de respostas rápidas enquanto que nos combustíveis de maiores dimensões o efeito será sentido num prazo maior de tempo (KING & LINTON¹⁴, SCHROEDER & BUCK²⁰, BROWN & DAVIS³).

De acordo com SIMARD & MAIN, diferentes classes ou tipos de combustíveis têm relações distintas com os fatores climáticos. No material combustível ocorrem ciclos contínuos de umedecimento e secagem. Estes ciclos são controlados por movimentos relativamente lentos de líquido ou vapor através de condução e difusão, e superfícies que absorvem e evaporam rapidamente. A taxa global de mudança no conteúdo de umidade é limitada pelo processo mais lento²². Por exemplo, devido a taxa limitante na qual a água se difunde na madeira ser menor do que a maioria das taxas de precipitação, o excesso de chuva escorre pela madeira sólida, e desse modo o umedecimento dos ramos pode ser relacionado com a duração da precipitação (FOSBERG⁸).

Por outro lado, o *litter* retém muito do excesso de água na estrutura formada pela camada de folhas. Desta forma o tamanho relativamente pequeno e a baixa densidade das partículas do *litter* e a grande superfície em relação ao volume reduzem a importância relativa do efeito limitante da difusão, e o umedecimento do *litter* fica mais estreitamente relacionado com a quantidade de precipitação (SIMARD²¹).

2.2 SECAGEM DO MATERIAL COMBUSTÍVEL

O processo de secagem nos combustíveis florestais, de uma condição úmida para um valor de equilíbrio, toma normalmente uma forma exponencial negativa (NELSON¹⁸, VAN WAGNER^{27,28}).

VAN WAGNER e SCHROEDER & BUCK consideram que a forma exponencial de secagem é tanto empírica quanto teórica, sendo um princípio comumente utilizado para descrever a secagem de materiais úmidos. De acordo com este princípio, se uma

camada de material é suficientemente úmida, o processo de secagem pode passar inicialmente por um período constante na taxa de secagem. O processo é controlado pelos mesmos fatores que afetam a evaporação de uma superfície de água livre. É discutível se os combustíveis florestais são suficientemente úmidos em determinadas situações para secarem desta maneira num período de tempo apreciável. Uma vez que a superfície, toda ou em parte, não pode ser mantida por tempo prolongado num estado saturado, inicia-se então um período de queda da taxa de secagem e a taxa instantânea de perda de umidade cai continuamente. Este período pode ser dividido em duas zonas:

- a) zona de secagem de superfície insaturada, na qual a taxa de secagem depende de:
 - i) fatores que afetam a difusão de umidade fora da superfície de evaporação;
 - ii) fatores que afetam a taxa de movimento interno de umidade;
- b) zona controlada pelo movimento interno de umidade, na qual a superfície de evaporação pode retrair-se para dentro do sólido e a influência das variáveis externas reduzir-se^{20,26}.

VAN WAGNER²⁶ apresenta estas zonas como dois modos de secagem:

- a) modo de secagem por evaporação: a taxa de secagem parece ser controlada por todas as variáveis que afetam a evaporação de superfície e a difusão interna;
- b) modo de secagem por difusão: a taxa de secagem parece ser controlada somente pela temperatura através

do seu efeito na pressão interna de saturação de vapor e portanto no coeficiente de difusão.

2.3 ESTIMATIVA DA UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL

Na literatura encontram-se vários métodos de determinação indireta do conteúdo de umidade. Não existem métodos rápidos e convenientes para sua determinação direta.

Normalmente, os métodos se distinguem pelo princípio ou princípios estabelecidos para o seu desenvolvimento. A metodologia utilizada pelo *National Fire Danger Rating System* (NFDRS) dos E.U.A. é baseada na teoria de difusão da umidade na madeira. Soluções de equações diferenciais através de técnicas analíticas e numéricas, seguidas de ajustamentos de laboratório fornecem uma técnica de avaliação da umidade que é dependente apenas das condições externas ou ambientais (FOSBERG⁹). De acordo com DEEMING *et alii* o sistema do NFDRS é puramente analítico, sendo baseado na física de troca de umidade, transferência de calor e outros aspectos⁵.

O sistema utilizado no *Canadian Forest Fire Weather Index* (FWI) foi inicialmente baseado em análises de dados de campo, coletados por várias décadas. Mais tarde, com estudos de laboratório várias teorias foram comprovadas e o sistema foi ampliado e modificado utilizando-se os princípios estabelecidos por estes estudos. O sistema ficou então fundamentado na teoria da forma exponencial da taxa de secagem, considerando-se os fatores ambientais que afetam a taxa de secagem dos combustíveis (VAN WAGNER²⁶).

Exceto após a ocorrência de chuva, uma estimativa razoavelmente precisa do conteúdo de umidade de combustíveis finos pode ser obtida do seu conteúdo de umidade de equilíbrio correspondente à temperatura e umidade do ar circundante (SIMARD²¹). No entanto, é necessário determinar o conteúdo de umidade de equilíbrio do material em questão, mediante condições controladas de temperatura e umidade, em laboratório (SCHROEDER & BUCK²⁰).

Um dos primeiros métodos empregados na estimativa do conteúdo de umidade faz uso de indicadores de umidade (GISBORNE*, citado em FOSBERG & DEEMING¹⁰).

A obtenção da estimativa do conteúdo de umidade do material combustível mediante o uso de correlações estatísticas é razoavelmente simples de ser obtida (KING & LINTON¹⁴).

O uso de indicadores de umidade e correlações estatísticas para estimativa do conteúdo de umidade serão tratados detalhadamente a seguir.

2.3.1 Correlações estatísticas

O uso de análise de correlação no estudo da associação de variáveis meteorológicas e conteúdo de umidade do material combustível tem sido um instrumento muito valioso na estimativa do conteúdo de umidade.

STICKEL**, citado por PÉCH¹⁹, utilizou correlações entre umidade da manta florestal, umidade relativa e ponto de

*GISBORNE, H.T. Measuring fire weather and forest inflammability. U.S. Dep. Agr. Circ., 398, 1936. 59 p.

**STICKEL, P.W. The measurement and interpretation of Forest fire weather in the Western Adirondacks. The New York State Coll. of For., Bulletin, v. nº 3-a, 1931. 115 p.

orvalho para obter estimativa da umidade. Comprovou no seu trabalho que o ponto de orvalho é levemente melhor indicador do conteúdo de umidade do que a umidade relativa. No entanto, nenhuma de suas correlações puderam explicar mais do que 23% da variação total de umidade. A justificativa fornecida por PÈCH é que provavelmente STICKEL tenha considerado junto os dados obtidos em dias chuvosos e dias sem chuva.

FRANSSILA* citado por PÈCH¹⁹ comparou medições de campo de dias chuvosos com aqueles sem chuva, demonstrando uma forte correlação entre a umidade dos combustíveis e a umidade relativa medida a 15 cm acima do *litter*, em povoamentos de *Pinus sylvestris*, para dias sem chuva e uma correlação muito fraca para os dias com 1 mm ou mais de precipitação. Os coeficientes de correlação foram 0,8894 e 0,1003 respectivamente.

Num estudo detalhado, PÈCH desenvolveu um experimento correlacionando as duas expressões mais comumente usadas da umidade atmosférica, umidade relativa e deficit de saturação, com a umidade do material. Os resultados indicaram que a previsão da umidade do combustível baseada na umidade atmosférica varia nas diferentes horas do dia e da noite. Concluiu também que o grau de associação entre a umidade relativa e as variações de umidade do combustível está diretamente relacionado com a taxa de variação da umidade relativa, e que a umidade relativa é o melhor indicador da umidade do combustível do que o deficit de saturação em todos os períodos, exceto possivelmente durante a noite¹⁹.

*FRANSSILA, M. Kuloväärän ja Säätekijöiden valisesta Riippuvuudesta. (The dependence of forest fire danger on meteorological factors). Acta For. Fennica, 67. 1958.

SIMARD & MAIN compararam os seguintes grupos de métodos de previsão de umidade de materiais combustíveis de *Pinus banksiana*: elementos meteorológicos, conteúdo mínimo de umidade de equilíbrio, modelos do NFDRS e modelos do FWI. Os elementos meteorológicos selecionados foram umidade relativa, temperatura, dias desde a última chuva de 0,03 mm ou mais, quantidade e duração da chuva. Os estudos foram feitos em combustíveis finos, *litter* e húmus. Para comparar a habilidade de previsão dos grupos, estes foram correlacionados com as observações diárias de umidade do combustível e então ordenados em ordem decrescente de correlação. Dos resultados pode-se observar que, para cada tipo de combustível, os elementos meteorológicos e umidade de equilíbrio são tão bons ou melhores estimadores do conteúdo de umidade do que o melhor modelo do NFDRS²².

SIMARD & MAIN analisaram também alguns aspectos interessantes dos elementos meteorológicos. A umidade relativa teve uma correlação mais alta com a umidade dos combustíveis finos e *litter* do que a temperatura (que é inversamente relacionada com a umidade), enquanto que o inverso ocorreu para o húmus. As correlações para a umidade relativa nos três tipos de combustíveis foram 0,56; 0,66 e 0,36 respectivamente enquanto que para a temperatura foram -0,51; -0,47 e -0,53. A variável *dias desde a última chuva* teve maior correlação com a umidade dos três tipos de combustíveis do que as variáveis *quantidade de precipitação e duração de precipitação*²².

SIMARD estudou as relações entre as variáveis meteorológicas e a umidade do material combustível. Um dos objetivos do seu trabalho foi desenvolver equações de regressão a

fim de estimar a umidade do material combustível através das observações meteorológicas. Os materiais combustíveis utilizados no seu trabalho foram classificados como combustíveis de rápida e lenta resposta. As variáveis meteorológicas básicas correlacionadas com as variações de umidade nos dois tipos de materiais combustíveis foram umidade relativa, temperatura, vento e duração do dia. Todas as variáveis foram correlacionadas com a variação diária do logaritmo do conteúdo de umidade. Esta por sua vez também foi correlacionada com o peso do material combustível. Para os materiais combustíveis de rápida resposta, entre as séries de equações as variáveis de previsão que mais freqüentemente apareceram foram o conteúdo de umidade inicial, conteúdo de umidade de equilíbrio, mínima umidade relativa e mínima umidade relativa multiplicada pela temperatura ($UR \times T$). Na estimativa dos combustíveis de lenta resposta as variáveis, simples e combinada, selecionadas foram:

- a) variáveis simples: déficit de umidade relativa, temperatura, déficit de pressão de vapor, peso do material, duração do dia e radiação solar;
- b) variáveis combinadas: temperatura e déficit de umidade relativa; duração do dia e déficit de umidade relativa; duração do dia e temperatura; duração do dia, temperatura e déficit de umidade relativa.

As melhores correlações foram obtidas com os valores médios de 24 horas das variáveis meteorológicas observadas. No entanto, as médias de 12 horas e os valores máximos, obtidos à tarde, apresentaram bons resultados. A temperatura, déficit de umidade relativa e duração do dia foram as variáveis mais

importantes na previsão da secagem diária do combustível. A combinação destas três variáveis apresentou um coeficiente de determinação de 0,835.²¹

STOREY, estimando o conteúdo de umidade do material combustível, estabeleceu 24 variáveis meteorológicas determinadas pelos fatores climáticos observados durante intervalos de tempo anteriores às medições do conteúdo de umidade. Foram obtidas estimativas do conteúdo de umidade utilizando-se materiais padronizados em lugar dos materiais combustíveis naturalmente encontrados. Para o estudo dos combustíveis finos foram analisados preliminarmente dez variáveis: temperatura do combustível, temperatura do bulbo seco, temperatura do bulbo úmido, temperatura do ponto de orvalho, quadrado da diferença das temperaturas do bulbo seco e ponto de orvalho, umidade relativa, diferença entre temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, radiação solar 2 horas antecedentes à determinação da umidade e umidade relativa 8 horas antecedentes à determinação da umidade. Os coeficientes de determinação para o conteúdo de umidade, determinado às 14 horas, foram computados para todas as combinações possíveis das 10 variáveis independentes. Uma das melhores combinações de três variáveis foi temperatura do bulbo seco, temperatura do ponto de orvalho e o quadrado da diferença das duas temperaturas ($R^2 = 0,846$)²⁵. O modelo empregado na equação de regressão contendo as variáveis mais fortes foi:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (\text{STOREY}^{25})$$

STOREY determinou uma forma aperfeiçoada da curva para a equação básica de três variáveis. Usando variáveis trans-

formadas obteve o seguinte modelo de regressão²⁵:

$$\ln y = a + b_1(X_1) + b_2(X_2) + b_3 \ln(X_3)$$

onde:

\ln = logarítmo neperiano;

y = conteúdo de umidade do combustível fino;

a, b_1, b_2, b_3 = coeficientes de regressão;

X_1 = temperatura do bulbo seco;

X_2 = temperatura do ponto de orvalho;

X_3 = diferença entre as duas temperaturas.

Para os combustíveis de maiores dimensões STOREY procedeu a mesma análise. A combinação de três variáveis mais promissora foi a temperatura do bulbo seco, temperatura do ponto de orvalho e umidade relativa nas 24 horas antecedentes, obtendo um coeficiente de determinação de 0,672. O modelo resultante foi:

$$\ln y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 \ln(X_3) \quad (\text{STOREY}^{25})$$

onde:

\ln = logarítmo neperiano

y = conteúdo de umidade do combustível (10H-TL);

X_1 = temperatura do bulbo seco;

X_2 = temperatura do ponto de orvalho;

X_3 = umidade relativa 24 horas antecedentes à determinação do conteúdo de umidade do combustível;

a, b_1, b_2, b_3 = coeficientes de regressão.

2.3.2 Indicadores de umidade

A utilização de indicadores para determinação da umidade do material combustível é um processo que é baseado na

analogia física. DEEMING *et alii*, definem o indicador de umidade (*fuel moisture analog*) como um mecanismo que simula a resposta do conteúdo de umidade de classes específicas dos materiais combustíveis quando expostos ao mesmo ambiente⁵. O método consiste basicamente em expor, em condições naturais de campo, artefatos de madeiras com características similares às classes de materiais combustíveis e tamanhos padronizados, com peso previamente determinado. Usando uma escala ou tabela especialmente construída para conversão de peso em porcentagem de umidade, obtém-se diretamente, através da pesagem destes artefatos, o conteúdo de umidade (JEMISON *et alii*¹³).

Vários elementos podem ser usados como indicadores. A escolha da madeira, conforme MATTEWS é devido aos materiais lenhosos serem os principais constituintes dos combustíveis florestais, além de serem de fácil obtenção, e portanto os mais recomendados para a construção de indicadores. Além disso, testes preliminares revelaram que o conteúdo de umidade dos indicadores varia da mesma forma que o conteúdo de umidade de importantes combustíveis florestais, quando expostos aos mesmos fatores atmosféricos. Existem muitas variáveis, tais como espécies, uniformidade e grau de resposta às variações atmosféricas, tamanho e métodos de preparação do indicador que devem ser considerados na seleção do mesmo para uso em determinada região, a fim de se obter resultados consistentes¹⁷.

Na literatura encontram-se indicadores de diferentes tamanhos, formas e tipos. JEMISON *et alii*, por exemplo, descrevem um indicador constituído de três lâminas, cada uma com dimensão de 0,3 cm por 6 cm, 46 cm do comprimento sendo usado

no leste e no sul dos E.U.A. para estimar a umidade de materiais combustíveis finos (classe de 1H-TL)¹³.

No oeste e noroeste dos E.U.A. utilizam-se indicadores feitos de madeira de *Pinus ponderosa* com dimensões de 1,3 cm de diâmetro por 48 cm de comprimento para estimar o conteúdo de umidade de combustíveis de classe de 10H-TL (HARDY *et alii** citado em STOREY²⁵).

FOSBERG & DEEMING, citando GISBORNE**, apresentam os indicadores citados anteriormente para estimar a umidade de materiais combustíveis das classes de 1H-TL e 10H-TL e um indicador de 5,1 cm de diâmetro, construído com madeira de *Pinus ponderosa* para estimar a umidade de combustíveis da classe de 100H-TL¹⁰.

KING & LINTON afirmam que os indicadores usuais são feitos de madeira, geralmente de espécies de *Pinus* de diversos tamanhos tais como toras com diâmetro acima de 30 cm, ripas de 1,0 cm a 1,3 cm de diâmetro, ripas de 0,3 cm a 1,0 cm de espessura, varetas de 0,3 cm de diâmetro ou quadradas, serragem ou acepilhadura. Camadas de acículas de *Pinus* e outros tipos de *litter* florestais também são usados como indicadores¹⁴.

O uso de indicadores é uma maneira simples e de baixo custo de estimar a umidade do material combustível. Os indicadores não medem uma única variável mas medem o efeito líquido dos fatores climáticos que afetam o conteúdo de umidade do

*HARDY, C.E. & SYVERSON, E.D. & DIETERICH, J.H. - Fire weather and fire danger station handbook. U.S. Forest Serv. Intermtn. Forest & Range Exp. Sta. Misc. Pub., 3, 1955. 84 p.

**GISBORNE, H.T. Op. cit.

material combustível (FISCHER & HARDY⁶). Os indicadores de umidade nem sempre indicam o exato conteúdo de umidade do combustível natural, mas a relação entre a umidade do indicador e do combustível é relativamente constante (JEMISON *et alii*¹³).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LOCAL DE ESTUDO

O trabalho foi desenvolvido na Estação Experimental do Canguiri da Universidade Federal do Paraná em talhões de *Pinus taeda* com idade de 18 anos e espaçamento inicial de 2 m x 2 m. A Estação está localizada no município de Piraquara no Km 14 da BR 116, a uma distância de 20 Km de Curitiba. Suas coordenadas geográficas são 25°25' de latitude sul e 49°30' de longitude oeste de Greenwich, e sua altitude é de 930 m acima do nível do mar.

O material combustível depositado no piso florestal desses talhões é constituído basicamente de acículas e galhos de *Pinus taeda* que em sua maioria puderam ser classificadas dentro das classes de materiais avaliadas. A quantidade de material combustível varia entre 10 e 20 toneladas por hectare. Nenhuma queima controlada foi executada nos talhões onde o estudo foi desenvolvido.

3.2 CLIMA

O clima é caracterizado como pluvial, temperado-fresco, subtropical e sempre úmido, sendo segundo a classificação de Koeppen do tipo Cfb. A temperatura média do mês mais quente é abaixo de 22°C e a do mês mais frio superior a 10°C, havendo possibilidade de mais de cinco geadas por ano (MAACK¹⁶).

Os dados meteorológicos que compõem a TABELA 1 referem-se às médias mensais para o período de janeiro de 1970 a fevereiro de 1984, da Estação Agrometeorológica de Piraquara, situada na Estação Experimental do Canguiri.

TABELA 1 - TEMPERATURA MÉDIA MENSAL E PRECIPITAÇÃO TOTAL MENSAL, NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DO CANGUIRI NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1970 a FEVEREIRO DE 1984 E NOS MESES DE COLETA DE DADOS

MÊS	TEMPERATURA MÉDIA (°C)	TEMPERATURA MÉDIA (°C) (COLETA)	PRECIPITAÇÃO TOTAL (mm)	PRECIPITAÇÃO TOTAL (mm) (COLETA)
Janeiro	19,9	21,7 (1)	168,0	147,4 (1)
Fevereiro	20,6	22,1 (1)	123,4	53,4 (1)
Março	19,5		123,2	
Abril	16,5		67,7	
Maiο	14,8	15,7 (2)	97,1	296,7 (2)
Junho	13,4	12,3 (2)	105,5	210,7 (2)
Julho	13,2	14,1 (2)	100,7	255,4 (2)
Agosto	14,0	13,9 (2)	75,5	8,3 (2)
Setembro	14,5		117,9	
Outubro	15,9		136,8	
Novembro	17,4		108,9	
Dezembro	19,0		151,5	
Anual	15,6		1376,2	

(1) 1984

(2) 1983

Fonte: Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR)

3.3 COLETA DE DADOS

3.3.1 Dados de campo

3.3.1.1 Material combustível - A coleta de material combustível para a determinação do conteúdo de umidade foi efetuada em dois períodos. O primeiro teve início em maio e prosseguiu até agosto de 1983. A segunda coleta foi feita nos meses de janeiro e fevereiro de 1984.

Foram coletadas inicialmente, em cada período, 30 amostras, às 15 horas, nos dias sem ocorrência de precipitação e no mínimo 24 horas após a chuva ter cessado, pois estimativas seguras da umidade do material combustível através de variáveis meteorológicas só podem ser obtidas para dias sem influência de precipitação (PÉCH¹⁹, SCHROEDER & BUCK²⁰, SIMARD²¹). Observou-se no entanto que as amostras coletadas 24 horas após vários dias de precipitação ou após uma chuva de grande intensidade apresentaram teores de umidade muito elevados. Para eliminar a influência da precipitação, foi estabelecido o limite máximo de 35% de umidade para todas as classes de material combustível. As amostras que apresentaram valores de umidade superiores ao limite estipulado foram rejeitadas. A seguir, utilizando-se método de amostragem sequencial, calculou-se o número mínimo de amostras necessárias por classe de material combustível. O número de amostras foi calculado pela fórmula:

$$n = \frac{s^2 \cdot t^2}{E^2}$$

onde:

n = número de amostras necessárias;

t = valor tabular de t para $n_p - 1$ graus de liberdade
 (onde n_p = número de amostras da fase preliminar)
 e $p\%$ de probabilidade;

s^2 = variância dos dados coletados na fase preliminar;

$E^2 = (LE\% \cdot \bar{X})^2$;

$LE\%$ = limite de erro porcentual aceitável;

\bar{X} = média aritmética dos dados coletados na fase preliminar.

A localização de cada amostra foi definida aleatoriamente num mapa da área por meio de uma tabela de números ao acaso.

Em cada amostra, de 1 m^2 de área, o material foi coletado separadamente em quatro classes:

- a) acículas da camada superficial;
- b) material lenhoso com diâmetro de $< 0,7 \text{ cm}$;
- c) material lenhoso com diâmetro entre $0,7$ e $2,5 \text{ cm}$;
- d) material lenhoso com diâmetro entre $2,5$ e $7,6 \text{ cm}$.

No mesmo local da coleta, determinou-se o peso úmido (PU) de cada classe de material combustível através de uma balança analítica com capacidade para 1610 g , com precisão de décimos de grama. Após cada pesagem, o material foi embalado em saco de polietileno e levado para o laboratório.

3.3.1.2 Indicadores de umidade - Os indicadores de umidade utilizados foram construídos de madeira de pinho (*Araucaria angustifolia*). Foi utilizado o mesmo indicador para se estimar a umidade das classes de acículas e material com diâmetro de 0 a $0,7 \text{ cm}$, considerando-se que esta classe de mate-

rial combustível e a camada superficial de acículas comportam-se similarmente. Desta forma obtiveram-se três tipos de indicadores (Fig. 1A):

- a) indicador de umidade de acículas e material com diâmetro de 0 a 0,7 cm, com dimensões de 0,5 cm x 0,5 cm x 46 cm;
- b) indicador de umidade de material com diâmetro entre 0,7 cm e 2,5 cm, medindo 1,5 cm x 1,5 cm x 46 cm;
- c) indicador de umidade de material com diâmetro entre 2,5 cm e 7,6 cm, medindo 4,5 cm x 4,5 cm x 46 cm.

Quando em uso, o conjunto de indicadores era montado sobre um suporte de madeira (Fig. 1B), de modo a permanecer cerca de 15 cm acima do solo (Fig. 1C). Este conjunto, composto de seis indicadores do tipo a, três indicadores do tipo b e três do tipo c (Fig. 1C), era colocado na mesma amostra onde se determinaria a umidade do material combustível no dia seguinte. Antes de serem expostos ao ambiente, todos os elementos do conjunto foram secos em estufa a uma temperatura de 75°C até peso constante. Cada elemento indicador foi marcado com um número em uma extremidade. Após 24 horas de exposição na amostra, cada elemento era pesado para determinar o peso úmido. Desta forma, a umidade do indicador era determinado pela seguinte fórmula:

$$U\% = \frac{PU - PS}{PS} \times 100$$

onde:

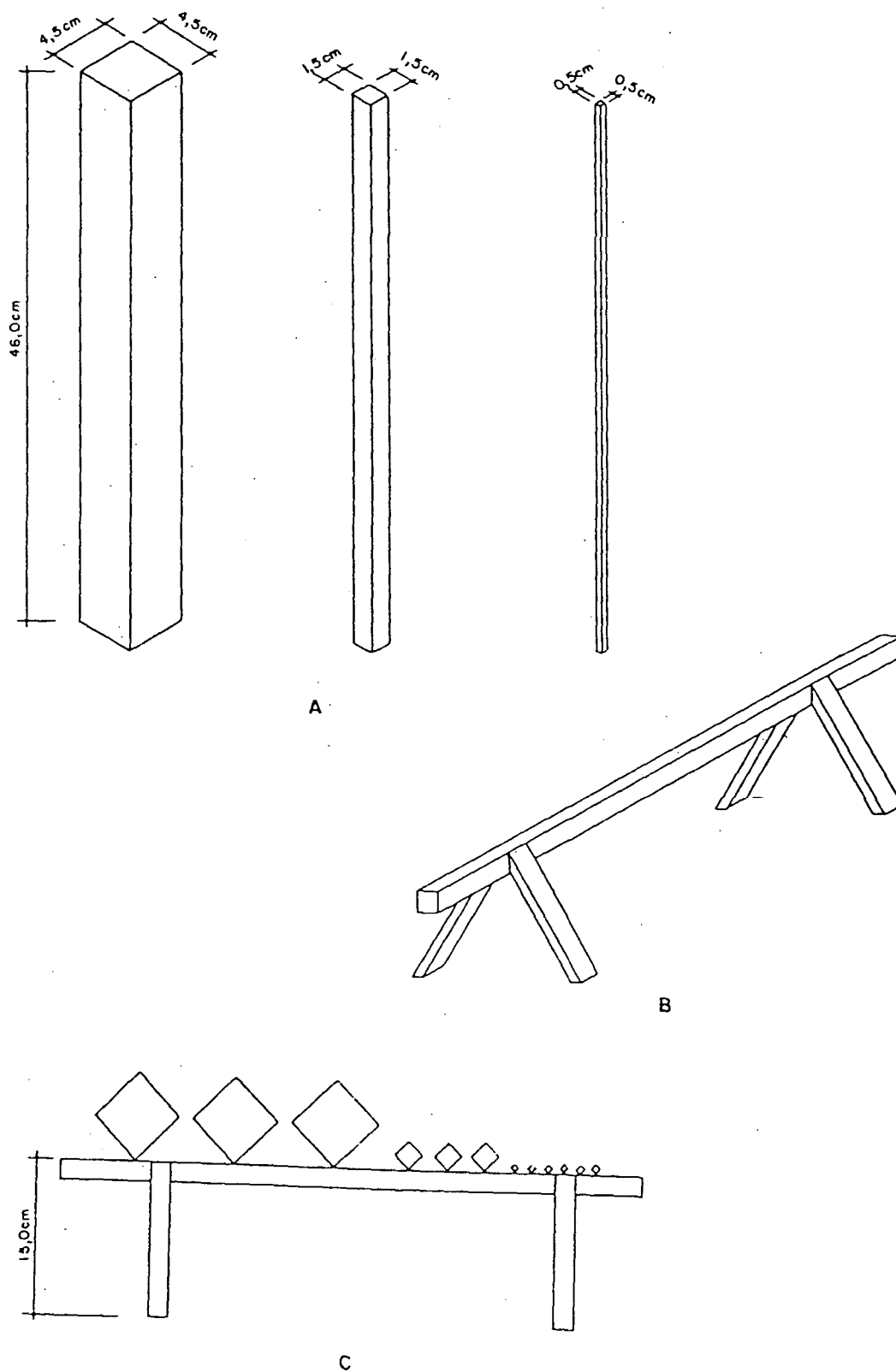
U% = percentagem de umidade do indicador;

PU = peso úmido, em gramas;

PS = peso seco, em gramas.

FIGURA 1 - INDICADORES PARA ESTIMAR O CONTEÚDO DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL.

A: INDICADORES; B: SUPORTE; C: INDICADORES EM POSIÇÃO



3.3.2 Dados de laboratório

No Laboratório de Silvicultura do Departamento de Silvicultura e Manejo da UFPR, o material coletado foi colocado em estufa a uma temperatura de 75°C durante 24 horas. Após esse período, o material era retirado e determinava-se o peso seco (PS), mediante pesagem na mesma balança analítica utilizada no campo.

A determinação do conteúdo de umidade por classe de material foi obtida utilizando-se a mesma fórmula usada para os indicadores.

3.3.3 Observações meteorológicas

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos, diariamente, da Estação Agrometeorológica de Piraquara, localizada na Estação Experimental do Canguiri, próxima ao local de coleta de dados, constando de:

- a) temperatura máxima e mínima;
- b) temperatura do termômetro do bulbo seco e do bulbo úmido, às 9, 15 e 21 horas;
- c) precipitação em milímetros de chuva e duração da precipitação;
- d) nebulosidade;
- e) velocidade e direção do vento.

3.4 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Para os estudos de correlação, foram escolhidas seis variáveis meteorológicas básicas, obtidas através dos dados meteorológicos e de tabelas psicométricas:

- a) umidade relativa (UR), obtida através de tabelas psicométricas de dupla entrada, utilizando-se as leituras de temperatura do termômetro de bulbo seco e temperatura do bulbo úmido;
- b) temperatura do ar (T) - obtida diretamente;
- c) temperatura de ponto de orvalho (TPO) - obtida através da temperatura do ar e umidade relativa, utilizando-se as tabelas psicrométricas;
- d) tensão máxima de vapor (TMV) em mm, obtida através da temperatura do ar mediante o uso de tabela;
- e) tensão real de vapor (TRV) em mm, obtida através da TMV e umidade relativa;
- f) déficit de saturação do ar (DSA) em mm, obtida por diferença entre TMV e TRV.

Para cada variável foram consideradas duas observações, sendo usados os valores das variáveis às 15 horas e as médias entre o máximo e o mínimo ocorridos entre às 21 horas do dia anterior e o momento da coleta do material às 15 horas. As correlações das classes de material combustível com as variáveis meteorológicas foram obtidas através de um programa BASIC de correlação simples.

3.5 DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES POR CLASSE DE MATERIAL COMBUSTÍVEL

Todas as variáveis meteorológicas foram consideradas variáveis independentes potenciais para compor as equações estimativas. Além daquelas já definidas anteriormente, foram

utilizadas duas variáveis combinadas. A primeira foi a expressão (T-TPO), utilizada no modelo proposto por STOREY²⁵. A segunda foi a expressão $\left| \left(\frac{100}{100 - UR} \times \frac{1}{TMV} \right) \right|$, empregada por NELSON¹⁸ em estudos experimentais sobre fatores que afetam a umidade de materiais combustíveis. A expressão foi modificada para a forma $(1-UR^*) \times TMV$. Estas duas variáveis combinadas foram transformadas em logaritmo neperiano.

O conteúdo de umidade, variável dependente para todas as classes de material combustível, foi transformado também em logaritmo neperiano. Procedeu-se à escolha das variáveis para compor as equações utilizando-se um programa BASIC de correlação parcial. Das variáveis testadas inicialmente apenas uma era escolhida para compor a equação. A seguir testou-se o ganho em eficiência com a adição de uma segunda variável.

Para os casos em que a variável escolhida inicialmente era uma variável combinada, utilizou-se o mesmo processo para a escolha da melhor variável independente simples.

3.6 USO DOS INDICADORES PARA A ESTIMATIVA DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL

As amostras coletadas no inverno foram também avaliadas através dos indicadores de umidade. A estimativa foi feita em função do peso úmido médio dos indicadores. Foram utilizados dois conjuntos de indicadores. Um destes conjuntos,

* Na expressão modificada a variável UR foi utilizada em centésimos.

depois de seco em estufa até peso constante, era colocado no local onde seria feita a amostragem no dia seguinte. Deste modo, o indicador acompanhava as variações de umidade por um período de 24 horas. Juntamente com a coleta do material combustível às 15 horas, pesava-se cada elemento do conjunto para obtenção do peso úmido. O segundo conjunto de indicadores de umidade, previamente seco em estufa, era então colocado na amostra para o período seguinte. Desta forma o indicador de umidade colocado na amostra iniciava o período de observação com umidade zero.

A diferença existente no peso seco dos dois conjuntos foi corrigida de modo que a variação no peso dos indicadores, devido à umidade, fosse equivalente para ambos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 NÚMERO DE AMOSTRAS

Das 30 amostras coletadas no inverno de 1983, 10 apresentaram teor de umidade acima de 35%. De acordo com BROWN & DAVIS só a precipitação pode elevar o conteúdo de umidade acima de 30%.³ Excluídas as amostras com umidade acima de 35%, o número de amostras restante para cada classe de material combustível foi suficiente para o limite de erro de 10%, e probabilidade de 95%.

Os dados coletados nos meses de janeiro e fevereiro também apresentaram 10 amostras com teor de umidade superior ao limite estipulado. Para um limite de erro de 10% o número de amostras restantes foi suficiente para as classes de 0 a 0,7 cm e de 2,5 cm a 7,6 de diâmetro. Para a classe de acículas e material com diâmetro entre 0,7 cm e 2,5 cm o limite de erro para 20 amostras foi aumentado para 13%, mantendo a probabilidade de 95%.

4.2 CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL

As TABELAS 2 e 3 apresentam os coeficientes de correlação obtidos entre as variáveis meteorológicas e o conteúdo de umidade das classes de material combustível para os períodos de inverno e verão, respectivamente.

TABELA 2 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL. POVOAMENTO DE *Pinus taeda*, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), INVERNO 1983.

CLASSE DE MATERIAL	VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS											
	UR		T		TPO		TMV		TRV		DSA	
	MÉDIA	15 h	MÉDIA	15 h	MÉDIA	15 h	MÉDIA	15 h	MÉDIA	15 h	MÉDIA	15 h
ACÍCULAS	0,9345	0,8559	-0,4588	-0,6426	0,0919	0,2040	-0,4873	-0,6516	0,0780	0,1870	-0,7730	-0,8097
0,-0,7 cm	0,9059	0,8678	-0,4444	-0,6410	0,0865	0,2320	-0,4679	-0,6499	0,0741	0,2105	-0,7418	-0,8139
0,7-2,5 cm	0,7237	0,6483	-0,3860	-0,4915	0,0282	0,0847	-0,4267	-0,5008	0,0036	0,0580	-0,6204	-0,5759
2,5-7,6 cm	0,8562	0,8411	-0,3933	-0,5427	0,1210	0,3484	-0,4242	-0,5432	0,0973	0,3217	-0,7023	-0,7640

Coeficiente de correlação requerido para significância: a) nível de 95%: 0,433

b) nível de 99%: 0,549

TABELA 3 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E UMIDADE DE MATERIAL COMBUSTÍVEL. POVOAMENTO DE *Pinus taeda*, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), VERÃO 1984.

CLASSE DE MATERIAL	VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS											
	UR		T		TPO		TMV		TRV		DSA	
	MÉDIA	15 h	MÉDIA	15 h	MÉDIA	15 h	MÉDIA	15 h	MÉDIA	15 h	MÉDIA	15 h
ACÍCULAS	0,8151	0,6323	-0,8040	-0,7102	-0,0037	0,3017	-0,7968	-0,6611	0,0223	0,2981	-0,8121	-0,6386
0 - 0,7 cm	0,8423	0,6702	-0,8173	-0,6742	0,0327	0,3444	-0,8164	-0,7011	0,0570	0,3307	-0,8454	-0,6824
0,7-2,5 cm	0,7218	0,5251	-0,6521	-0,5177	0,0690	0,3259	-0,6477	-0,5102	0,1429	0,3303	-0,7130	-0,5274
2,5-7,6 cm	0,7178	0,7289	-0,7590	-0,7771	-0,0794	-0,3435	-0,7493	-0,7630	-0,0903	0,3211	-0,7103	-0,7296

Coeficiente de correlação requerido para significância: a) nível de 95%: 0,433

b) nível de 99%: 0,549

Tanto no inverno como no verão as variáveis TPO e TRV apresentaram correlações muito baixas com todas as classes de material combustível.

A variável UR por ser diretamente relacionada com o conteúdo de umidade, portanto apresenta correlações positivas, enquanto as variáveis T, TMV e DSA, relacionadas inversamente com o conteúdo de umidade, apresentam correlações negativas.

Os dados coletados durante o inverno (TAB. 2) apresentaram as maiores correlações absolutas com a UR média para todas as classes de material combustível. Esses resultados divergem das observações de SIMARD²¹, segundo o qual os combustíveis de resposta rápida (LH-TL) correlacionam melhor com a UR mínima. A UR das 15 horas está muito próxima do valor mínimo. Deve-se considerar entretanto que os valores de UR foram obtidos na estação meteorológica, em local aberto, enquanto que o material combustível foi coletado dentro do povoamento. É possível que no povoamento, ao nível do solo, a UR não tenha atingido os valores mínimos observados na estação meteorológica. A variável DSA apresentou menor correlação do que UR, concordando com os resultados encontrados por PECH¹⁹ que afirma que a UR está mais associada com a variação de umidade do material combustível do que a variável DSA. Em relação a temperatura, o conteúdo de umidade no inverno (TAB. 2) apresentou melhor correlação às 15 horas.

No inverno, o conteúdo de umidade das classes de acículas e material com diâmetro até 0,7 cm respondeu mais rapidamente às variações meteorológicas do que as classes de maior diâmetro, como pode ser verificado pelos maiores coefi-

cientes de correlação obtidos entre as classes de material combustível de 1H-TL e as variáveis UR, T, TMV e DSA. Num estudo sobre a estimativa de umidade do material combustível sob povoamentos de *Pinus ponderosa*, HARRINGTON¹² obteve resultados semelhantes, ou seja, as melhores correlações ocorreram para os materiais combustíveis de menores valores de *timelag*.

Os dados coletados no verão (TAB. 3) também apresentaram melhores coeficientes de correlação para as classes de acículas e material <0,7 cm. O maior coeficiente verificou-se na classe de material combustível com diâmetro até 0,7 cm para a variável DSA ($r = -0,8454$). A diferença entre este coeficiente e o coeficiente obtido para a UR ocorreu apenas a nível de milésimos ($r = 0,8423$), considerando-se correlações absolutas. Ao contrário das correlações obtidas no inverno (TAB. 2), as correlações do verão (TAB. 3) não apresentaram as maiores correlações absolutas para UR média em todas as classes. Somente as classes de acículas e material com diâmetro de 0,7 a 2,5 cm apresentaram este resultado.

No verão, os valores médios das variáveis que apresentaram coeficientes de correlação significativos (UR, T, TMV e DSA) fornecem melhores resultados do que os valores das 15 horas para todas as classes de material combustível, com exceção para a classe de 2,5 a 7,6 cm, na qual os valores das 15 horas apresentou correlações absolutas maiores do que os valores médios.

4.3 DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DAS EQUAÇÕES

4.3.1 Classe de acículas

As TABELAS 4 e 5 apresentam as equações para estimativa da umidade de materiais combustíveis para os períodos de inverno e verão. Observa-se que não foi escolhida a mesma variável para estimar o conteúdo de umidade desta classe nos dois períodos estudados. Para o inverno a variável escolhida foi T-TPO, e para o verão foi TMV (1-UR), para valores médios em ambos os casos. A adição de uma segunda variável em ambas as equações não produziu efeitos significativos. Nos dois casos, grande parte da variação da umidade do material combustível pode ser explicada por uma única variável, combinando umidade relativa e temperatura. SIMARD²¹ obteve boa estimativa do conteúdo de umidade do material combustível, utilizando uma variável combinada de umidade relativa, temperatura e duração do dia.

As equações obtidas apresentam razoável afinidade com a equação de umidade de equilíbrio fornecida por ANDERSON *et alii*¹, apresentada a seguir:

$$EMC = 1,651 H^{0,493} + 19,35 e^{((H-100)/10,88)} + 0,056(75-T)$$

onde:

EMC = conteúdo de umidade de equilíbrio (%);

H = umidade relativa (%);

e = base do logaritmo neperiano (2,718);

T = temperatura (°F).

Foram comparados os valores de umidade obtidos através das equações com os valores de umidade de equilíbrio, utilizando-se essa equação.

TABELA 4 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DE ACÍCULAS. POVOAMENTO DE *Pinus taeda*, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), INVERNO 1983.

EQUAÇÃO	R ²	S _{yx}	F
a) entre todas as variáveis $\text{Log}_e Y = 3,214075441 - 0,314308742 \text{Log}_e (T-TPO)$	0,910	0,061503841	182,86
b) introdução de uma segunda variável* $\text{Log}_e Y = 3,159251487 - 0,313689394 \text{Log}_e (T-TPO) + 0,00484182 (TPO)$	0,914	0,0618271	90,88
c) entre as variáveis simples $\text{Log}_e Y = 1,303443078 + 0,019557165 \text{UR}$	0,873	0,073122681	124,10

R² = coeficiente de determinação;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

F = valor calculado do teste F

* F para a segunda variável: NS (não significativo)

TABELA 5 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DE ACÍCULAS. POVOAMENTO DE
Pinus taeda, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), VERÃO 1984.

EQUAÇÃO	R ²	S _{yx}	F
a) entre todas as variáveis			
Log _e Y = 3,491325931 - 0,427138949 Log _e (TMV(1-UR))	0,700	0,150948794	42,09
b) introdução de uma segunda variável*			
Log _e Y = 3,761280371 - 0,322565984 Log _e (TMV(1-UR)) - 0,020065046 (TMV)	0,710	0,152774470	20,83
c) entre as variáveis simples			
Log _e Y = 1,126170916 + 0,0223323 UR	0,664	0,159861176	35,58

R² = coeficiente de determinação;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

F = valor calculado do teste F

* F para a segunda variável: NS (não significativo)

O conteúdo de umidade de equilíbrio (EMC) apresentou valores muito próximos dos valores estimados pelas equações desenvolvidas. O EMC e o conteúdo de umidade das acículas, tanto no inverno como no verão, apresentaram um coeficiente de correlação igual a 0,99.

Na FIGURA 2 observa-se no entanto que as curvas de umidade das acículas durante o verão não apresentaram a mesma tendência da curva de EMC durante todo o seu percurso. À medida que o ambiente se torna mais úmido, aproximadamente a partir de 64% de umidade relativa, o conteúdo de umidade do material combustível apresentou uma tendência distinta do EMC.

Considere-se, entretanto o fato de que o material combustível, para uma mesma condição de umidade relativa e temperatura, apresenta menor EMC se estiver adquirindo umidade do ambiente (adsorção) do que se estiver perdendo umidade (dessorção) (SCHROEDER & BUCK¹⁹).

A equação utilizada para estimar o EMC aplica-se ao caso em que o material está perdendo umidade para o ambiente. Pelo comportamento da curva de umidade das acículas verifica-se que durante o verão houveram ocasiões em que o material combustível estava ganhando umidade do ambiente enquanto que em outras estava perdendo.

Para o período de inverno, entretanto as curvas de EMC e conteúdo de umidade das acículas apresentam uma mesma tendência (FIG. 3).

Os resultados encontrados estão de acordo com os dados da literatura. STOREY afirma que os materiais combustíveis finos (LH-TL) atingem a umidade de equilíbrio rapidamente devido a seu curto tempo de resposta²⁵. SCHROEDER & BUCK consi-

FIGURA 2 - CURVAS DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DA UR PARA AS CLASSES DE ACÍCULAS E DE 0 A 0,7 cm E CURVA DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO NO VERÃO

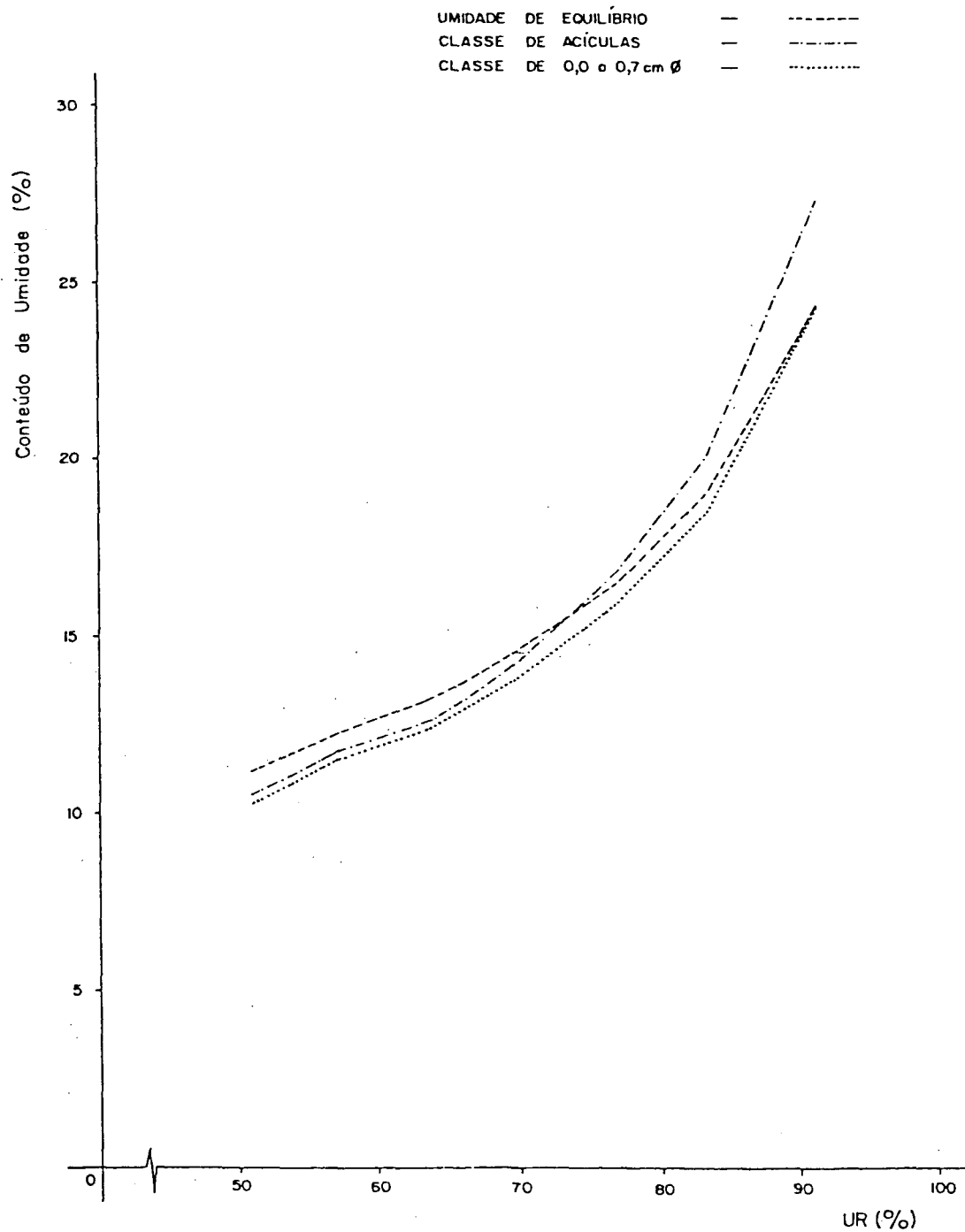
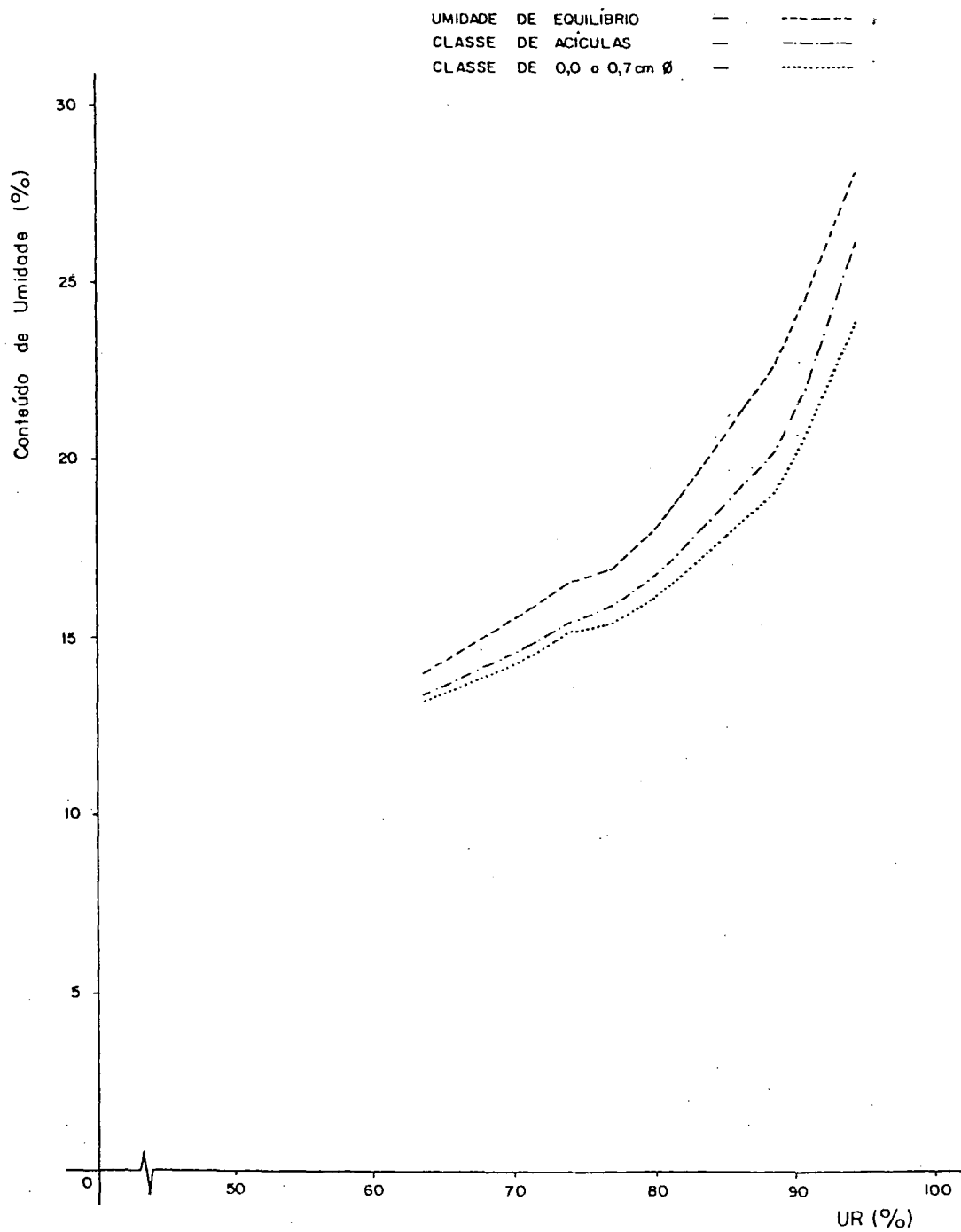


FIGURA 3 - CURVAS DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DA UR PARA AS CLASSES DE ACÍCULAS E DE 0 A 0,7 cm E CURVA DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO NO INVERNO



deram que os materiais combustíveis finos podem estar próximos do equilíbrio com seu ambiente²⁰. Na metodologia utilizada pelo *National Fire Danger Rating System* (NFDRS) dos Estados Unidos da América, o conteúdo de umidade dos materiais combustíveis é calculado basicamente pela umidade de equilíbrio, usando a temperatura e umidade relativa do ar (FOSBERG & DEEMING¹⁰).

Considerando-se que as variáveis utilizadas para estimar o conteúdo de umidade da classe de acículas foram obtidas pela combinação de formas alternativas destas duas variáveis, as equações desenvolvidas devem ser similares àquelas empregadas para estimar a umidade de equilíbrio, pois utilizam fundamentalmente as mesmas variáveis.

Utilizando-se apenas as variáveis independentes simples a melhor estimativa foi obtida com a UR, valores médios, tanto no inverno como no verão. Embora os melhores resultados tenham-se verificado para as variáveis combinadas, observa-se que a UR é a variável que mais afeta o conteúdo de umidade das acículas.

STEEN estudando a relação entre o conteúdo de umidade de combustíveis finos e umidade relativa concluiu também que a variação diária da UR afetou consistentemente o conteúdo de umidade dos combustíveis testados, entre os quais acículas de *Pinus*. De acordo com o mesmo autor, pode-se estimar o conteúdo de umidade de combustíveis finos utilizando-se a UR²⁴.

4.3.2 Classe < 0,7 cm de diâmetro

As equações para estimar o conteúdo de umidade desta classe utilizando uma e duas variáveis estão demonstradas nas

TABELAS 6 e 7. No inverno a primeira variável escolhida foi a combinação T-TPO (valores médios), apresentando um coeficiente de determinação igual a 0,8808. A adição de uma segunda variável ao modelo inicial não produziu efeitos significativos. Com duas variáveis o valor do coeficiente de determinação passou para 0,8864, não demonstrando significância para o valor F. Para o conjunto de dados do período de verão a variável escolhida foi TMV(1-UR), com $R^2 = 0,732$. Adicionando uma segunda variável, não se obteve significância para o segundo coeficiente.

De acordo com a literatura consultada os conteúdos de umidade desta classe e a de acículas apresentam comportamento semelhante. DEEMING *et alii* estabeleceram que o conteúdo de umidade dos materiais combustíveis de 1H-TL, calculado pelo NFDRS corresponde ao conteúdo de umidade dos materiais combustíveis cilíndricos lenhosos menores do que 0,7 cm de diâmetro e de camada de acículas com espessura menor do que 0,7 cm.⁵

Comparando-se os conteúdos de umidade estimados para as duas classes de material combustível (FIG. 2 e 3) verifica-se que tanto no inverno como no verão, a camada de acículas apresenta conteúdo de umidade maior do que os materiais combustíveis lenhosos da classe de 0 a 0,7 cm de diâmetro.

VAN WAGNER* citado em ANDERSON *et alii*¹ observou que camadas de folhas ou acículas de diversas espécies florestais

* VAN WAGNER, C.E. Equilibrium moisture contents of some fire forest fuels in eastern Canada. Petawawa For. Exp. Stn., Inform. Rep. PS-X-36, 1972. 11 p.

TABELA 6 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS
 < 0,7 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE *Pinus taeda*, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), IN-
 Verno 1983.

EQUAÇÃO	R ²	S _{yx}	F
a) entre todas as variáveis			
Log _e Y = 3,132391445 - 0,278666114 Log _e (T-TPO)	0,881	0,063922097	133,07
b) introdução de uma segunda variável*			
Log _e Y = 3,83037437 - 0,38983759 Log _e (T-TPO) - 0,0072013 (UR)	0,886	0,064221823	66,33
c) entre as variáveis simples			
Log _e Y = 1,4573601 + 0,0170942 UR	0,821	0,0783524	82,58

R² = coeficiente de determinação;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

F = valor calculado do teste F.

* F para a segunda variável: NS (não significativo)

TABELA 7 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS < 10,7 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE *Pinus taeda*, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), VE-RÃO 1984.

EQUAÇÃO	R ²	S _{yx}	F
a) entre todas as variáveis			
Log _e Y = 3,34589842 - 0,369364051 Log _e (TMV(1-UR))	0,732	0,120707243	49,22
b) introdução de uma segunda variável*			
Log _e Y = 3,588361387 - 0,275440891 Log _e (TMV(1-UR)) - 0,018021673 (TMV)	0,743	0,1216281	24,60
c) entre as variáveis simples			
Log _e Y = 3,1096963 - 0,06334402 DSA	0,715	0,1245503	45,11

R²=coeficiente de determinação;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

F = valor calculado do teste F.

* F para a segunda variável: NS (não significativo)

apresentam conteúdo de umidade de equilíbrio cerca de 3% mais alto que os materiais combustíveis lenhosos. Os valores obtidos no presente trabalho mostram que o conteúdo de umidade das classes, nos dois períodos, aumentava à medida que o ambiente se tornava mais úmido. No verão, a diferença observada no dia mais seco foi de 0,1%, atingindo 3% no dia mais úmido. No inverno a diferença foi de aproximadamente 0,2% para o dia mais seco e cerca de 2% para o dia mais úmido.

Os dados estimados através das equações desenvolvidas para o inverno e o verão foram também comparados com a umidade de equilíbrio (EMC). Uma forte correlação foi obtida entre a umidade do material combustível estimada e o EMC. Nos dois períodos obteve-se um coeficiente de correlação de 0,99.

Verificou-se, também, que a classe de $< 0,7$ cm apresenta o mesmo comportamento da classe de acículas em relação à curva de EMC (FIG. 2 e 3). Assim, para as duas classes de material combustível de LH-TL pode-se obter uma estimativa bastante precisa do conteúdo de umidade, utilizando-se a umidade de equilíbrio. Porém é necessário que se determine, em condições controladas de umidade relativa e temperatura, o conteúdo de umidade de equilíbrio para as fases de adsorção e dessorção.

No inverno, entre as variáveis simples, a UR (valores médios) foi escolhida para estimar o conteúdo de umidade da classe $< 0,7$ cm de diâmetro. Verifica-se como no caso da classe de acículas, que pode-se obter uma estimativa razoável do conteúdo de umidade utilizando apenas a variável UR, embora inferior à estimativa fornecida pela variável combinada T-TPO.

No verão a variável simples escolhida foi DSA. Observou-se neste caso que os valores de R^2 e S_{yx} foram semelhantes aos da equação obtida com a variável combinada TMV(1-UR).

4.3.3 Classe de 0,7 a 2,5 cm de diâmetro

As TABELAS 8 e 9 apresentam as equações estimativas do conteúdo de umidade dos materiais combustíveis com diâmetro entre 0,7 e 2,5 cm. Para o inverno (TAB. 8) a variável selecionada, T-TPO (valores médios) fornece um coeficiente de determinação igual a 0,6434. A adição da segunda variável aumentou o coeficiente para 0,7475 sem no entanto apresentar significância para o valor de F.

A variável simples escolhida para estimar o conteúdo de umidade da classe de 0,7 a 2,5 cm no inverno foi a UR, apresentando uma estimativa inferior ao modelo que utiliza a variável combinada T-TPO. Uma melhor alternativa é a utilização destas duas variáveis, T-TPO e UR, num mesmo modelo (TAB. 8, item b).

Para esta classe, como nas classes anteriores, a melhor estimativa de umidade foi obtida com a variável combinada T-TPO. O coeficiente de determinação obtido entretanto é menor do que para as outras classes. Estes resultados eram esperados em vista das correlações simples mais fracas obtidas entre o conteúdo de umidade e as variáveis meteorológicas. Este fato também foi comprovado por HARRINGTON¹² quando estimou a umidade de materiais combustíveis utilizando valores do NEDRS, obtendo melhores estimativas para as classes de menor diâmetro.

TABELA 8 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS DE 0,7 A 2,5 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE *Pinus taeda*, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), INVERNO 1983.

EQUAÇÃO	R ²	S _{yx}	F
a) entre todas as variáveis			
Log _e Y = 3,29031611 - 0,240962991 Log _e (T-TPO)	0,643	0,111976718	32,48
b) introdução de uma segunda variável*			
Log _e Y = 6,34699817 - 0,72781712 Log _e (T-TPO) - 0,031536730 (UR)	0,748	0,096856534	25,18
c) entre as variáveis simples			
Log _e Y = 1,9177997 - 0,0138083 UR	0,523	0,1293421	19,77

R² = coeficiente de determinação;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

F = valor calculado do teste F.

* F para a segunda variável: NS (não significativo)

TABELA 9 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS DE 0,7 A 2,5 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE *Pinus taeda*, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), VERÃO 1984.

EQUAÇÃO	R ²	S _{yx}	F
a) entre todas as variáveis Log _e Y = 1,662097746 + 0,019104682(UR)	0,521	0,184474946	19,57
b) introdução de uma segunda variável* Log _e Y = -0,71221674 + 0,041896041(UR) + 0,461024764 Log _e (T-TPO)	0,528	0,177319406	11,83
c) entre as variáveis simples ver item a			

R² = coeficiente de determinação;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

F = valor calculado do teste F.

* F para a segunda variável: NS (não significativo)

No verão (TABELA 9) a estimativa do conteúdo de umidade foi obtida com a variável UR (valores médios). A adição da segunda variável não apresentou contribuição significativa. Neste período, esta foi a única classe em que a melhor estimativa foi obtida com a variável simples UR. Em todas as outras classes a melhor estimativa foi obtida com a variável combinada, TMV (1-UR). Verificou-se, também, no verão, que a equação estimativa de umidade desta classe, com $R^2 = 0,521$, é mais fraca que as determinadas para as classes anteriores, devido às menores correlações entre o conteúdo de umidade desta classe e as variáveis meteorológicas. Contudo o efeito residual do conteúdo de umidade inicial pode explicar, em parte, este fato.

É possível que a utilização apenas das variáveis meteorológicas para estimar a umidade dos materiais combustíveis de maiores dimensões não seja suficiente. FOSBERG & DEEMING¹⁰ e FOSBERG⁸ ao desenvolver estimativas de umidade para materiais combustíveis de 10H-TL adotaram uma metodologia que fornece a umidade do material combustível, utilizando juntamente com a umidade de equilíbrio e o valor de *timelag*, o conteúdo de umidade inicial, ou seja, para se conhecer o conteúdo de umidade do material combustível num determinado dia é necessário, conhecer além das condições ambientais, o conteúdo de umidade do dia anterior. Em muitos casos, quando o conteúdo de umidade num determinado dia está abaixo do ponto de saturação das fibras (30%), o conteúdo de umidade no dia seguinte não será influenciado pela umidade do período anterior e, neste caso, a variação de umidade de um dia para o outro será explicada quase que na sua totalidade pela variação ambiental.

4.3.4 Classe de 2,5 a 7,6 cm de diâmetro

A variável escolhida para estimar a umidade desta classe no período do inverno (TABELA 10) foi UR (valores médios). A segunda variável escolhida para compor o modelo não produziu efeitos significativos. O coeficiente de determinação para o modelo com uma variável foi de 0,733. A estimativa de umidade desta classe foi melhor que a classe anterior de 0,7 a 2,5 cm, embora ainda inferior às estimativas obtidas para as classes de LH-TL. Este fato é um tanto contraditório, considerando-se que à medida que aumentam as dimensões do material combustível, maior é a influência do conteúdo de umidade inicial. É conveniente ressaltar, no entanto, que a umidade do material combustível coletado neste período excedeu o ponto de saturação das fibras, apenas em algumas amostras. Deste modo pode-se concluir que o conteúdo de umidade inicial teve pouca influência na estimativa diária do conteúdo de umidade do material combustível.

Para o período do verão (TABELA 11) a melhor equação foi obtida com a variável TMV(1-UR) (valores 15 horas), apresentando $R^2 = 0,608$. A adição de uma segunda variável aumentou o valor do coeficiente de determinação, sem no entanto ser constatada contribuição significativa. Neste período a variável simples escolhida foi T, valores das 15 horas. A equação obtida (TAB. 11, item c) apresenta os valores de R^2 e S_{yx} muito próximos da equação com a variável combinada TMV(1-UR).

TABELA 10 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS DE 2,5 A 7,6 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE *Pinus taeda*, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), INVERNO 1983.

EQUAÇÃO	R ²	S _{yx}	F
a) entre todas as variáveis			
Log _e Y = 2,210493926 + 0,014064048 (UR)	0,733	0,083307588	49,44
b) introdução de uma segunda variável*			
Log _e Y = 2,028941046 + 0,01522839(UR) + 0,0060037(T)	0,744	0,083943375	24,71
c) entre as variáveis simples			
ver item a			

R² = coeficiente de determinação;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

F = valor calculado do teste F.

* F para a segunda variável: NS (não significativo)

TABELA 11 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS DE 2,5 A 7,6 cm DE DIÂMETRO. POVOAMENTO DE *Pinus taeda*, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR), VERÃO 1984.

EQUAÇÃO	R ²	S _{yx}	F
a) entre todas as variáveis			
$\text{Log}_e Y = 3,7995803 - 0,2407313 \text{ Log}_e (\text{TMV}(1-\text{UR}))$	0,608	0,1167608	27,89
b) introdução de uma segunda variável*			
$\text{Log}_e Y = 4,11950073 - 0,274334248 \text{ Log}_e (\text{TMV}(1-\text{UR})) - 0,022090837 (\text{TPO})$	0,630	0,11478137	14,46
c) entre as variáveis simples			
$\text{Log}_e Y = 4,4560747 - 0,0449415 T$	0,604	0,1172296	27,53

R² = coeficiente de determinação;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

F = valor calculado do teste F.

* F para a segunda variável: NS (não significativo)

4.4 DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DAS EQUAÇÕES UTILIZANDO INDICADORES DE UMIDADE

As equações para a determinação do conteúdo de umidade para as quatro classes de material combustível, utilizando-se o peso úmido dos seus respectivos indicadores são apresentadas na TABELA 12.

Pelos valores dos coeficientes de determinação pode-se concluir que muito pouco da variação na umidade dos materiais combustíveis esteve associado com a variação de umidade dos indicadores. A melhor estimativa foi obtida para a classe < 0,7 cm, embora, menos de 40% da variação do conteúdo de umidade do material fosse associada ao peso úmido do indicador.

Dois fatores basicamente concorreram para produzir estes resultados. Primeiramente, o conteúdo de umidade dos materiais combustíveis florestais varia não somente com as dimensões mas também com a espécie de que são constituídos os materiais combustíveis. É possível que a utilização de um indicador construído com a madeira da mesma espécie dos materiais combustíveis estudados (*Pinus taeda*) apresente resultados mais promissores. O segundo fator que contribuiu sobremaneira para a fraca associação entre as variáveis foi o período de tempo que o indicador permaneceu junto ao material combustível. De acordo com a metodologia empregada, os indicadores eram colocados na amostra 24 horas antes de se efetuar a coleta do material combustível. Considerando-se que os indicadores eram secos em estufa antes de serem colocados na amostra, o período de 24 horas, mesmo para os indicadores de menor dimensão, foi muito curto para que eles atingissem um

TABELA 12 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL ATRAVÉS DE INDICADORES DE UMIDADE. POVOAMENTO DE *Pinus taeda*, 18 ANOS, PIRAQUARA (PR) INVERNO 1983.

EQUAÇÃO	R ²	S _{yx}	F
a) classe de material combustível: acículas Y = -47,7041 + 9,7 X	0,358	3,0009662	10,02
b) classe de material combustível: 0 a 0,7 cm Y = -41,10242 + 8,7392732 X	0,386	2,5430302	11,32
c) classe de material combustível: 0,7 a 2,5 cm Y = -92,22022 + 2,0862212 X	0,267	3,5732798	6,55
d) classe de material combustível: 2,5 a 7,6 cm Y = -229,70387 + 0,5331069 X	0,282	3,7657863	7,08

R² = coeficiente de determinação;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

F = valor calculado do teste F;

X = peso úmido do indicador;

Y = umidade do material combustível.

equilíbrio com o ambiente e desta forma apresentassem um conteúdo de umidade melhor relacionado aos materiais combustíveis.

A forma mais segura de se obter o conteúdo de umidade das diversas classes de material combustível, utilizando indicadores de umidade seria, possivelmente, determinando o peso seco do indicador apenas no início do período a ser estudado. A primeira determinação do peso úmido deveria ser feita após vários dias de permanência do indicador junto ao material combustível. Depois disso poderia se determinar apenas o peso úmido do indicador diariamente. Uma aferição do peso seco do indicador deveria ser feita apenas no final do período em que se estivesse estimando o conteúdo de umidade do material combustível.

5 CONCLUSÕES

1 Independente do tipo (acículas, material lenhoso) ou da dimensão do material combustível, a UR é a variável meteorológica que mais se correlaciona com o conteúdo de umidade desse material. Apenas para as classes de material $< 0,7$ cm e de 2,5 a 7,6 cm, no verão, é que a maior correlação se deu com a DSA e a T, respectivamente.

2 De modo geral, as variáveis meteorológicas apresentam melhores correlações com o conteúdo de umidade das classes de menor diâmetro, acículas e classe $< 0,7$ cm, do que as classes maiores.

3 A melhor estimativa de umidade do material combustível, utilizando-se variáveis meteorológicas foi para todas as classes obtidas através de uma única variável.

4 No inverno, a melhor estimativa do conteúdo de umidade do material combustível é feita através da variável combinada T-TPO, exceto para a classe de 2,5 a 7,6 cm, correspondente a 100H-TL, onde a utilização do valor da UR apresenta melhor vantagem.

5 No verão, a melhor estimativa do conteúdo de umidade do material combustível é feita, utilizando-se a variável

TMV(1-UR), exceto para a classe de 0,7 a 2,5 cm, correspondente a 10H-TL, que é melhor estimada através da UR.

6 Dentre as variáveis simples, a UR pode ser usada para estimar o conteúdo de umidade do material combustível, exceto para as classes < 0,7 cm e 2,5 a 7,6 cm no verão.

7 A utilização dos indicadores de umidade não forneceu estimativas confiáveis do conteúdo de umidade das classes dos materiais combustíveis estudados, provavelmente devido ao tipo de madeira usado e a falta de climatização preliminar dos indicadores.

SUMMARY

The objectives of this research were to determine the correlation among meteorological parameters and moisture content of dead forest fuels, to develop prediction equations for the forest fuel moisture based on meteorological data, and to estimate the moisture content through the use of standard sticks. The data were collected in a stand of *Pinus taeda* and in a meteorological station, both located in the Canguiri Experiment Station, of the Federal University of Paraná. Forest fuels were collected in summer and winter and separated in four categories: i) needles; ii) woody material up to 0.7 cm diameter; iii) woody material from 0.7 to 2.5 cm diameter; iv) woody material from 2.5 to 7.6 cm diameter. Three different sizes of sticks, build from brazilian pine (*Araucaria angustifolia*), were used. One for estimating the moisture from needles and material up to 0.7 cm, and the others for each remaining fuel size class. The meteorological variables considered in the research were relative humidity (UR), air temperature (T), dew point (TPO), maximum vapor pressure (TMV), actual vapor pressure (TRV), saturation deficit of the air (DSA). The combined variables $(T-TPO)$ and $|(1-UR)TMV|$ were also considered in the prediction equations. Results showed that in the winter relative humidity presented the higher correlation coefficients in relation to the four fuel categories. In the summer, this tendency was not observed. For each fuel class a different variable presented higher correlation coefficient. In the winter, the variable that better estimated forest fuel moisture content for needles and woody material from the diameter classes 0 to 0.7 and 0.7 to 2.5 cm was temperature minus dew point $(T-TPO)$. Relative humidity (UR) was the first choice for estimating the moisture content from woody material from the diameter class 2.5 to 7.6 cm. In the summer, the combined variable $|(1-UR)TMV|$ was the best for estimating forest fuel moisture content of needles and woody material from de diameter classes 0 to 0.7 cm and 2,5 to 7.6 cm. For the diameter class 0.7 to 2.5 cm, relative humidity was the best variable. The standard sticks did not present good predictions for the moisture content of the forest fuels, under the studied conditions.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANDERSON, H.E.; SCHUETTE, R.D & MUTCH, R.W. Timelag and equilibrium moisture content of Ponderosa pine needles. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-202, 1978. 28 p.

- 2 BLACKMARR, W.H. Equilibrium moisture content of common fine fuels found in Southeastern forests. USDA For. Serv. Res. Pap. SE-74, 1971. 9 p.

- 3 BROWN, A.A. & DAVIS, K.P. Forest fire: control and use. 2.ed. New York, McGraw Hill, 1973. 686 p.

- 4 COUNTRYMAN, C.M. Radiation effects on moisture variation in Ponderosa pine litter. USDA For. Serv. Res. Pap. PSW -126, 1977. 23 p.

- 5 DEEMING, J.E.; LANCASTER, J.W.; FOSBERG, M.A.; FURMAN, R.W.; SCHROEDER, M.J. The National fire-danger Rating System. USDA For. Serv. Res. Pap. RM-84, 1972. 165 p.

- 6 FISCHER, W.C. & HARDY, C.E. Fire-weather observers' handbook. USDA For. Serv. INT-1972. 152 p.

- 7 FOSBERG, M.A. Forecasting the 10-hour timelag fuel moisture. USDA For. Serv. Res. Pap. RM-187, 1977. 10 p.

- 8 _____. Moisture content calculations for the 100-hour timelag fuel in fire danger rating. USDA For. Serv. Res. Note RM-199, 1971. 7 p.

- 9 _____. Prediction of dead fuel moisture for fire danger rating. Separata "National Conference on the Forest, Weather and Associated Environment, Society of American Foresters and American Meteorological Society, Atlantic, Georgia". (Resumo)

- 10 FOSBERG, M.A. & DEEMING, J.E. Derivation of the 1 and 10-hour timelag fuel moisture calculations for fire-danger rating. USDA For. Serv. Res. Norte RM-207, 1971. 8 p.
- 11 _____.; ROTHERMEL, R.C. & ANDREWS, P.I. Moisture content calculations for 1000-hour timelag fuels. For. Sci., 27(1): 19-26, 1981.
- 12 HARRINGTON, M.G. Estimating ponderosa pine fuel moisture using National Fire-Danger Rating Moisture values. USDA For. Serv. Res. Pap. RM-233, 1982. 7 p.
- 13 JEMISON, G.M.; LINDENMUTH, A.W. & KEETCH, J.J. Forest fire-danger measurement in the Eastern United States USDA For. Serv. Agric. Handbook, 1, 1949. 68 p.
- 14 KING, A.R. & LINTON, M. Moisture variation in forest fuels: the rate of response to climate changes. Aust. J. Appl. Sci., 14(1): 38-49, 1963.
- 15 LANCASTER, J.W. Timelag useful in fire danger rating. Fire Control Notes, 31(3): 6-9, 1970.
- 16 MAACK, R. Geografia física do Estado do Paraná. Curitiba, CODEPAR, 1968. 350 p.
- 17 MATTEWS, D.N. Experience with Hazard Indicator Sticks J. For., 33: 392-7, 1935.
- 18 NELSON JR., R.M. Some factors affecting the moisture timelags of woody materials. USDA For. Serv. Res. Pap. SE-44, 1969. 16 p.
- 19 PÉCH, G. The association between atmospheric humidity and fuel moisture. In: IUFRO CONGRESS, 14., Munich, 1967. Proceedings. Munich, IUFRO, 1967. p. 866-888.
- 20 SCHROEDER, M.J. & BUCK, C.C. Fire weather and fuel moisture. A guide for application of meteorological to forest fire control operations. USDA Agric. Handbook, 360, 1970. 229 p.

- 21 SIMARD, A.J. The moisture of forest fuels: I. A review of the basic concepts. II. Comparison of moisture content variations above the fibre saturation point between a number of fuel types. III. Moisture content variations below the fibre saturation point. For. Fire. Res. Inst. Inform. Rep. FF-X-14, 15, 16, 1968. (Resumo)
- 22 _____. & MAIN, W.A. Comparing methods of predicting Jack pine slash moisture. USDA For. Serv. North Central Forest Experiment Station, 1982. 10 p.
- 23 SOARES, R.V. Prevenção e controle de incêndios florestais. Curitiba, FUPPEF, 1982. 69 p.
- 24 STEEN, H.K. Relation between moisture content of fine fuels and relative humidity. USDA For. Serv. Res. Note PNW-4, 1963. 6 p.
- 25 STOREY, T.G. Estimating the fuel moisture content of indicator sticks from selected weather variables. USDA For. Serv. Res. Pap. PSW-26, 1965. 14 p.
- 26 VAN WAGNER, C.E. A laboratory study of weather effects on the drying rate of Jack pine litter. Can. J. For. Res., 9(2): 267-75, 1979.
- 27 _____. Drying rates of some fine forest fuels. Fire Management Notes, 30: 5, 7, 12, 1969.
- 28 _____. Initial moisture content and the exponential drying process: Can. J. For. Res., 12(1): 90-92, 1982.