

# 1

## Introdução

O campo de velocidade turbulento governa as trocas de massas entre a superfície da Terra e a atmosfera. Essa transferência turbulenta de massas de ar depende tanto das propriedades da superfície, quanto do estado da atmosfera. Como as florestas cobrem 30 % da superfície continental do planeta, segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2001), o estudo do escoamento turbulento sobre regiões de vegetação representa um importante problema de mecânica dos fluidos relacionado a aspectos ecológicos da vida na floresta.

Na sub-camada rugosa do dossel <sup>1</sup> de florestas e outras superfícies cobertas por vegetação, o escoamento apresenta significativa complexidade quando comparado com aquele de superfícies “lisas” e homogêneas da atmosfera (Raupach et al., 1996; Finnigan, 2000; Kruijt et al., 2000). Isto ocorre devido à extensão vertical da superfície vegetada, da quantidade de biomassa e da rugosidade dos elementos da vegetação. Além disso, tal complexidade se manifesta através da existência de sub-camadas fisicamente distintas dentro e acima do dossel (Marth et al., 2000).

O desmatamento e a conversão de florestas de dosséis fechados em campos de pastagens e de cultivos têm causado impactos negativos na biodiversidade. Além disso, a propagação e a expansão de incêndios florestais são influenciados pela topologia do terreno, tipo de vegetação e direções do vento local.

Diante deste cenário de mudanças do uso da terra, existe um grande interesse em modelar numericamente a hidrodinâmica do escoamento turbulento dentro e acima de florestas, devido a sua importância nos estudos de mudanças climáticas, ciclo do carbono de florestas, dispersão de aerossóis e gases traços, dentre outros.

Considerando a complexidade do escoamento sobre e através de dosséis, muitos modelos numéricos têm sido desenvolvidos visando obter

---

<sup>1</sup>Na estrutura da vegetação, dossel é o estrato superior da formação vegetal. É a camada de folhagem contínua de uma floresta ou arvoredo, composta pelo conjunto das copas das plantas lenhosas mais altas. Aplicável, sobretudo, à vegetação mais fechada.

informações dos campos médio e turbulento (Wilson & Shaw, 1977; Raupach et al., 1986 ; Katul et al., 2004). Esses modelos variam desde simples parametrizações a problemas sofisticados de fechamento das equações de segunda ordem ou maiores. Os primeiros estudos para a descrição do escoamento nestas condições se baseavam na teoria da difusão-gradiente, denominados de modelos K ou de fechamento de primeira ordem (Cowan, 1968). Embora úteis em algumas situações, estes modelos fornecem somente predições do campo de velocidade média.

Com o surgimento dos modelos de fechamento de ordem superior e de difusão Lagrangianos (Wilson & Shaw, 1977; Raupach et al., 1986), tornou-se possível o estudo do campo de velocidade do vento, bem como uma descrição estatística da turbulência sobre dosséis. Dentro deste contexto, o modelo à duas equações  $k - \varepsilon$  padrão é um dos modelos de turbulência mais utilizados para a simulação de escoamento turbulento em regiões de florestas (Svensson & Häggkvist, 1990; Sanz, 2002; Katul et al., 2004). Informações importantes sobre a estrutura dos campos médio e turbulento sobre florestas também podem ser obtidas através de estudos experimentais de túnel de vento e de campo (Raupach et al., 1986; Chen et al., 1995; Novak et al., 2000).

Apesar do considerável progresso na investigação dos processos de trocas turbulentas entre o dossel da vegetação e a atmosfera, a dinâmica de controle e as estruturas turbulentas ainda não estão completamente entendidas (Brunet & Irvine, 2000; Kruijt et al., 2000). Próximo às coberturas vegetais, ocorre um intenso cisalhamento da velocidade vertical do vento, que induz instabilidades hidrodinâmicas e a geração da turbulência (Paw U et al., 1992). Isto está associado a um ponto de inflexão dos perfis verticais do vento na interface vegetação-atmosfera, devido ao arrasto aerodinâmico dos elementos da vegetação (Raupach et al., 1996; Finnigan, 2000). Uma questão particularmente importante e pouco compreendida, diz respeito à analogia entre o escoamento turbulento na camada de mistura e próximo ao topo do dossel, associado inicialmente ao ponto de inflexão no perfil vertical da velocidade do vento (Raupach et al., 1996).

No sentido de contribuir para o entendimento da estrutura do escoamento sobre dosséis, um dos objetivos deste trabalho foi realizar a confrontação de resultados numéricos de três diferentes métodos com dados obtidos em experimentos de túnel de vento. Assim, pretende-se estabelecer uma perspectiva sobre as vantagens e desvantagens inerentes a cada um deles. Os métodos foram denominados por: modelagem por termos fontes, modelagem por meio poroso e modelagem por elementos rugosos.

A primeira metodologia envolveu simulações numéricas 2-D, no qual termos fontes foram introduzidos nas equações de transporte de quantidade de movimento, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação. A influência da vegetação foi modelada através da influência da força de arrasto causada pelos elementos da vegetação.

Na segunda realizadas simulações numéricas 2-D, na qual a floresta foi considerada um meio poroso homogêneo. Assim, um termo de sumidouro foi introduzido na equação de quantidade de movimento, através dos termos de Darcy-Forchheimer. E na terceira abordagem foram construídos dois modelos de florestas 3-D, formando um conjunto de árvores com diferentes densidades de árvores por  $m^2$ , consideradas como elementos rugosos.

Muito esforço também tem sido despendido para compreender o mecanismo de transferência de quantidade de movimento entre a atmosfera e coberturas vegetais. Uma revisão da literatura sugere que a maior parte do conhecimento sobre as características do escoamento turbulento e das trocas de massas entre o sistema vegetação-atmosfera é proveniente dos estudos realizados sobre florestas densas (Green et al., 1995).

A fim de contribuir para o preenchimento desta lacuna, também foi objeto de estudo investigar o escoamento, em condições de estabilidade neutra, dentro e acima de três modelos de florestas artificiais. Esta foram caracterizados por diferentes densidades e índices de área foliar, denominadas de florestas densa, intermediária e esparsa. Portanto, este estudo pretende contribuir para uma melhor compreensão desses processos físicos. Pela sua ampla aplicação e aceitação, nas simulações numéricas do escoamento dentro e sobre dosséis, a modelagem da turbulência foi realizada através do modelo de turbulência  $k - \epsilon$  padrão (Katul et al., 2004).

## 1.1 Objetivos

No presente trabalho realiza-se simulações numéricas da velocidade do vento médio e características turbulentas, sobre e através de modelos de florestas artificiais em escala de túnel de vento. O interesse nestes estudos é motivado por várias aplicações nas áreas da engenharia, como por exemplo, Meteorologia e Ambiental. Neste cenário, este estudo tem os seguintes objetivos:

- (I) Investigar as características dos campos de escoamento médio e turbulento dentro e acima de florestas, a fim de se obter informações sobre a

dinâmica da transferência de massa e do transporte de quantidade de movimento entre o sistema vegetação-atmosfera em escala reduzida.

- (II) Avaliar o desempenho da aplicação do modelo  $k - \epsilon$  padrão no escoamento sobre dosséis, através de uma detalhada comparação entre predições numéricas do campo de velocidade média e estatísticas de segunda ordem com dados de experimentos de túnel de vento;
- (III) Utilizar diferentes modelos de florestas artificiais para verificar se a camada do dossel apresenta características de uma camada de mistura.

## 1.2

### Roteiro da Tese

O presente trabalho está organizado em seis Capítulos, cujo conteúdo é apresentado da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o escoamento dentro e acima de superfícies vegetadas, com a finalidade de demonstrar a relevância do tema investigado.

No Capítulo 3 discutem-se os processos físicos relevantes no problema do escoamento turbulento no interior e acima de regiões de florestas.

No Capítulo 4 são apresentados os detalhes dos experimentos de túnel de vento realizados por Novak et al. (2000) e Novak et al. (2001), estes foram utilizados para validar os resultados do presente trabalho. Na sequência são descritos os métodos numéricos e condições de contorno.

O Capítulo 5 apresenta os resultados das simulações numéricas dos campos médios e turbulentos do escoamento sobre os modelos de florestas.

Finalizando este trabalho, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas com este estudo e algumas recomendações para trabalhos futuros.