



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental



**PLANEJAMENTO DE POVOAMENTOS DE EUCALIPTO COM  
CONDICIONANTES HIDROLÓGICOS:  
UM ESTUDO DE CASO EM ELDORADO DO SUL/RS.**

**ROSANE BARBOSA LOPES CAVALCANTE**

**Orientador:** Carlos André Bulhões Mendes

Porto Alegre, abril de 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**PLANEJAMENTO DE POVOAMENTOS DE EUCALIPTO COM  
CONDICIONANTES HIDROLÓGICOS:  
UM ESTUDO DE CASO EM ELDORADO DO SUL/RS.**

**ROSANE BARBOSA LOPES CAVALCANTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

**Orientador:** Carlos André Bulhões Mendes

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Olavo Correa Pedrollo	IPH/UFRGS
Prof. Dr. Paulo Dabdab Waquil	IPH/UFRGS
Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques	CEFET/MG

Porto Alegre, abril de 2011

'Data! Data! Data!' he cried impatiently. 'I can't make bricks without clay.'  
Sherlock Holmes em 'As Faias Cor de Cobre' de Sir Arthur Doyle.

## **Agradecimentos**

A Deus;

Ao IPH, pela oportunidade de aprofundar meus conhecimentos e pela calorosa acolhida;

Ao professor Carlos André Bulhões Mendes, pela excelência na orientação, pelo apoio e por “cortar minhas asas” quando necessário;

Aos demais professores do IPH pela dedicação e conhecimento transmitido;

À CMPC pelo incentivo à pesquisa e pela disponibilização de dados;

Ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudos;

Aos meus pais, Ruth e Rebert, e minhas irmãs, Rachel e Regina, por serem tão motivadores nos momentos que mais precisei apesar da distância geográfica;

Ao Paulo, por sempre estar ao meu lado;

Aos amigos do IPH, em especial aos da sala de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos, pelo companheirismo diário;

Aos meus amigos e familiares, por todo incentivo e amizade oferecida;

A todos que, mesmo não sendo citados, contribuíram de forma efetiva na construção deste trabalho.

## RESUMO

O presente estudo avalia a inclusão de indicadores hidrológicos em modelos tradicionais de gestão de povoamentos comerciais de eucalipto. As restrições adicionadas referem-se a uma redução máxima da vazão em cada ano do período de análise de 300, 200 e 100mm.ano<sup>-1</sup>. Os valores de vazão foram estimados utilizando um modelo simplificado de balanço hídrico que considera as perdas por interceptação e por evapotranspiração dependentes de fatores ambientais. Funções foram ajustadas a fim de descrever a variação das características da vegetação ao longo de seu crescimento. A área de estudo corresponde a uma microbacia de 0,97km<sup>2</sup> localizada no município de Eldorado do Sul/RS. Foram consideradas 1296 alternativas de regime de manejo para a área, variando a espécie, densidade de plantio, índice de solo, idades de corte e sistema de condução. O índice de área foliar apresentou-se como um importante descritor do dossel florestal, de grande influência sobre o impacto hidrológico das plantações florestais. Os resultados dos modelos de programação linear utilizados demonstraram que quanto maior a restrição hidrológica imposta, mais se altera o plano de manejo da área e o valor do projeto obtido. A utilização do modelo com restrição de 200mm.ano<sup>-1</sup>, comparado ao modelo sem restrição hidrológica, ocasionou um aumento médio na vazão anual de 22% e uma redução no valor esperado de terra de 15%. Para a região de estudo, a utilização de regimes de manejo com diferentes idades e a definição do material genético foram as variáveis de manejo mais afetadas pela imposição das restrições hidrológicas. A consideração da microbacia como unidade de manejo e a adição das restrições hidrológicas aos modelos econômicos mostraram-se ferramentas úteis à integração do planejamento florestal e de recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Planejamento florestal, impacto hidrológico, eucalipto, gestão de recursos hídricos.

## ABSTRACT

This study evaluates the inclusion of hydrological goals in the traditional planning models for commercial stands of eucalyptus. The constraints added to the linear programming model relate to maintaining a minimum flow of 300, 200 and 100mm.ano<sup>-1</sup> in each year of the analysis. The flow values were estimated using a simplified water balance model that considers the interception loss and evapotranspiration dependent on environmental factors. Functions were fitted to describe the variation of the vegetation parameters along its growth. The study area represents a watershed of 0,97km<sup>2</sup> located in Eldorado do Sul (RS, Brazil). It were considered 1296 alternative forest regimes for the area, ranging species, planting density, site index, cutting age and the conduction system. The leaf area index was presented as an important descriptor of the forest canopy with great influence on the hydrological impact of forest plantations. The results showed that the greater the restriction imposed hydrology, the more you change the management plan for the area and the project value obtained. Using the model with constraint 200mm.ano<sup>-1</sup>, compared to the not hydrologically constrained model, causes an increase in average annual flow of 22% and a reduction of 15% in the expected value of the land. For the study area, the definition of the genetic material was the variable that most influenced the results. The consideration of watershed as the management unit and the addition of hydrological constraints in economic models proved to be useful tools in planning the integration of forestry and water resources.

Keywords: Forestry planning, hydrological impact, Eucalyptus, water resources management.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIações .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 RELEVÂNCIA DO ESTUDO .....	2
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 SILVICULTURA NO BRASIL E NO RIO GRANDE DO SUL .....	5
2.2 GESTÃO DE FLORESTAS PLANTADAS .....	7
2.3 ECONOMIA FLORESTAL .....	10
2.3.1 Fluxo de caixa da produção de madeira .....	10
2.3.2 Rotação ótima e critérios de avaliação de projetos.....	11
2.4 IMPACTO HIDROLÓGICO DO FLORESTAMENTO.....	15
2.4.2 Interceptação pelo dossel .....	19
2.4.3 Evapotranspiração.....	22
2.4.4 Redução da vazão de rios.....	25
2.5 MODELAGEM DE OTIMIZAÇÃO .....	28
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
3.1 OBTENÇÃO DOS DADOS .....	33
3.1.1 Dados relacionados à geração dos cenários .....	33
3.1.2 Dados relacionados à análise do impacto hidrológico.....	33
3.1.3 Dados relacionados ao modelo de otimização .....	34
3.2 FORMULAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO .....	34
3.2.1 Função objetivo .....	35
3.2.2 Restrições .....	36
3.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO .....	37
3.3.1 Determinação dos coeficientes da função objetivo e geração das alternativas de manejo.....	37
3.3.2 Determinação das restrições hidrológicas.....	37
3.4 ESTIMATIVA DE IMPACTO HIDROLÓGICO .....	38
3.4.1 Interceptação .....	39
3.4.2 Balanço Hídrico na zona radicular.....	43
3.4.3 Evapotranspiração.....	45
<b>4. ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>47</b>

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MICROBACIA .....	47
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO FLORESTAL .....	52
4.2.1 Regimes de manejo aplicáveis .....	52
4.2.2 Custos e receitas da produção de madeira.....	53
4.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA VEGETAÇÃO.....	55
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>59</b>
5.1 ANÁLISE ECONÔMICA .....	59
5.2 IMPACTO HIDROLÓGICO .....	60
5.3 PLANEJAMENTO COM RESTRIÇÕES HIDROLÓGICAS .....	71
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>76</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	76
6.2 RECOMENDAÇÕES .....	78
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO A – CÓDIGOS FONTE EM MATLAB .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO B – CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR PENMAN-MONTEITH.....</b>	<b>96</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 : Função fictícia do volume, IMA e ICA em função da idade para um hectare de floresta.....	12
Figura 2.2: Esquema conceitual de avaliação do impacto ambiental do empreendimento (Adaptado de Mendes e Lima, 2007). .....	16
Figura 3.1: Fluxograma metodológico.....	32
Figura 3.2: Estrutura conceitual do modelo de balanço hídrico no dossel utilizado (adaptado de Valente <i>et al.</i> , 2007).....	42
Figura 4.1: Localização da área da microbacia de estudo.....	47
Figura 4.2: Área de estudo (Google Earth) com destaque para a delimitação utilizada da microbacia experimental.....	48
Figura 4.3: Dados mensais de radiação, temperatura, precipitação e velocidade do vento de normais climatológicas da estação experimental da UFRGS (Bergamaschi <i>et al.</i> , 2003) e da estação Eldorado do Sul da FEPAGRO (set/1975 a ago/1984).....	49
Figura 4.4: Normal climatológica de Eldorado do Sul (Bergamaschi <i>et al.</i> , 2003) e radiação diária calculada pelo Solar Radiation.....	50
Figura 4.5: Imagem da cobertura vegetal de <i>E. saligna</i> e <i>E. urophylla x maidenii</i> .....	56
Figura 4.6: Variação da estimativa do IAF ao longo da idade da plantação para diferentes regimes de manejo. ....	57
Figura 5.1: Valor Esperado de Terra para a espécie 1, com IS 30, sob diferentes planos de corte e densidade. ....	59
Figura 5.2: Valor esperado de terra para diferentes materiais genéticos, densidades (árvores.ha <sup>-1</sup> ) e IS para o ciclo 7x7 anos com reforma. ....	60
Figura 5.3: Balanço hídrico mensal para a espécie 2 (1666 árvores.ha <sup>-1</sup> , IS 32 e rebrota) de set/1975 a ago/1984. ....	61
Figura 5.4: Balanço hídrico médio mensal para a espécie 2 (1666 árvores.ha <sup>-1</sup> , IS 32 e rebrota) ao longo do período de simulação.....	61
Figura 5.5: Relação entre precipitação e vazão anuais obtida para cada idade da espécie 2 (1666 árvores.ha <sup>-1</sup> , IS 32 e rebrota) em cada ano de análise.....	62

Figura 5.6: Balanço hídrico médio mensal para a espécie 2 (1666 árvores.ha <sup>-1</sup> , IS 32 e rebrota).....	62
Figura 5.7: Balanço hídrico médio mensal para a espécie 2 (1666 árvores.ha <sup>-1</sup> , IS 32 e rebrota).....	63
Figura 5.8: Interceptação média mensal para o pasto (vermelho) e para as rotações com maior (verde) e menor (azul) vazão média anual ao longo da rotação. ....	64
Figura 5.9: Evapotranspiração média mensal para o pasto (vermelho) e para as rotações com maior (verde) e menor (azul) vazão média anual ao longo da rotação. ....	64
Figura 5.10: Vazão média mensal para o pasto (vermelho) e para as rotações com maior (verde) e menor (azul) vazão média anual ao longo da rotação.....	65
Figura 5.11: Vazões anuais obtidas para o material 1 sob diferentes condições de manejo ao longo do período de rotação. ....	67
Figura 5.12: Vazões anuais obtidas para o material 2, IS=30, sob diferentes condições de manejo ao longo do período de rotação. ....	67
Figura 5.13: Vazões anuais obtidas para o material 2, IS=32, sob diferentes condições de manejo ao longo do período de rotação.....	68
Figura 5.14: Vazões anuais obtidas para o material 3, sob diferentes condições de manejo ao longo do período de rotação. ....	68
Figura 5.15: Vazões anuais obtidas para o material 4, sob diferentes condições de manejo ao longo do período de rotação. ....	69
Figura 5.16: Relação entre IAF médio e vazão média (mm.ano <sup>-1</sup> ) ao longo da rotação para cada espécie e tipo de condução adotado.....	70
Figura 5.17: Variação da vazão anual para os manejos 1321, 2122 e os principais regimes de manejo atualmente utilizados na área de estudo.....	70
Figura 5.18: Vazão anual ao longo do período de análise utilizando os planos de manejo resultantes de cada modelo de otimização. ....	74
Figura 5.19: Variação do VET e da vazão média devido à inclusão de condicionante hidrológico no modelo de otimização.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Dados utilizados para análise do impacto hidrológico.....	33
Tabela 4.1: Características do tipo de solo predominante em cada talhão.....	51
Tabela 4.2: Distribuição da área do horto florestal inserido na microbacia de estudo (2009).....	52
Tabela 4.3: Distribuição da área de plantio da microbacia de estudo (2009). ....	52
Tabela 4.4: Parâmetros utilizados para a geração dos regimes de manejo aplicáveis e seus respectivos fluxos de caixa. ....	53
Tabela 4.5: Custos médios de plantio e comercialização de eucalipto em 2010.....	54
Tabela 4.6: Equações estimadas para determinação do volume das espécies observadas na microbacia. ....	54
Tabela 4.7: Fatores de ajuste da produção de madeira para diferentes sistemas de condução. ....	55
Tabela 4.8: Fatores de ajuste da produção de madeira para diferentes densidades de plantio.....	55
Tabela 4.9: Equações estimadas para determinação do IAF (de 1,5 a 6 anos) e manejos onde cada equação será utilizada. ....	56
Tabela 4.10: Equações estimadas de crescimento das espécies do horto florestal. ....	58
Tabela 4.11: Características da pastagem adotadas para o modelo de balanço hídrico...	58
Tabela 5.1: Indicadores das legendas das Figuras 5.12 a 5.14 (abcd).....	65
Tabela 5.2: Regimes de manejo obtidos pelo modelo de otimização sem restrição de impacto hidrológico.....	72
Tabela 5.3: Regimes de manejo obtidos pelo modelo de otimização com restrição de impacto hidrológico inferior a 300mm anuais. ....	72
Tabela 5.4: Regimes de manejo obtidos pelo modelo de otimização com restrição de impacto hidrológico inferior a 200mm anuais. ....	73
Tabela 5.5: Regimes de manejo obtidos pelo modelo de otimização com restrição de impacto hidrológico inferior a 100mm anuais. ....	74

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul
FAO	Organização das Nações unidas para Agricultura e Alimentação
FEPAGRO	Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul
IAF	Índice de Área Foliar
ICA	Incremento Corrente Anual
IMA	Incremento Médio Anual
IS	Índice de Sítio
RM	Regime de Manejo
UBM	Unidade Básica de Manejo
UPN	Unidade Paisagística Natural
ZAS	Zoneamento Ambiental para a atividade de Silvicultura no Rio Grande do Sul

## 1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento do eucalipto, aliado à sua produtividade, grande capacidade de adaptação e aplicação em diversos setores, faz com que seu plantio seja uma atividade bastante promissora. Entretanto, as altas taxas de crescimento dessa e de outras espécies florestais são normalmente acompanhadas de um alto uso dos recursos naturais locais, levantando questões sobre os impactos ecológicos de sua plantação em larga escala e sobre a sustentabilidade da produção de madeira.

Grande parte dessa polêmica diz respeito ao consumo de água do eucalipto. Diversos estudos apontam para a necessidade de considerar a possibilidade real de uma redução da vazão das bacias devido à mudança de cobertura vegetal de pequeno para maior porte (Lima e Zikia, 2006; Bruijnzeel, 1990; Andréassian 2004; Brown *et al.*, 2005; Tucci e Clarke, 1998). Entre os fatores são responsáveis por esta redução no deflúvio, destacam-se o aumento das perdas por transpiração e por evaporação da água interceptada.

Logo, a demanda de água das plantações florestais desperta cada vez mais atenção e estudos. Em primeiro lugar, devido ao total de área plantada, que atinge aproximadamente 50 milhões de hectares nas regiões tropicais do mundo. Com a diminuição dos recursos florestais e aumento da demanda pelos seus produtos, a taxa de novos plantios atinge cerca de três milhões de hectares por ano (Stape *et al.*, 2004), sendo o eucalipto a principal espécie utilizada em programas de florestamento.

Por outro lado, a quantidade de água existente na natureza é finita e sua disponibilidade diminui gradativamente devido ao crescimento populacional, à expansão das fronteiras agrícolas e à degradação do meio ambiente, gerando conflitos de uso. Quando a água é escassa ou exigida por outros setores, cuidado especial deve ser dado ao ajuste da produção de madeira para coincidir com a quantidade de água disponível. Devido à duração das rotações, os impactos devem ser minimizados mesmo onde não há escassez de água, visto que conflitos de uso podem surgir em decorrência de estiagens e de efeitos cumulativos de aumento das demandas.

É importante ressaltar, porém, que o consumo de água do eucalipto dependerá das condições locais, principalmente em termos de solo e da quantidade e do regime da precipitação anual, além de ser fortemente dependente das práticas de manejo (Calder,

1986; Andréassian, 2004; Bruijnzeel, 1990). O manejo pode ter impacto significativo sobre o consumo de água pelas plantações florestais pela modificação no mosaico de espécies, idade e espaçamento das árvores, bem como o tamanho e a localização na bacia da área a ser utilizada. Ao mesmo tempo, a produtividade também é afetada pelas práticas de manejo e pela disponibilidade de água para as plantas. Portanto, as medidas adotadas afetarão significativamente não apenas o rendimento do empreendimento florestal, como também a demanda de água, evidenciando a necessidade de uma gestão eficaz dos recursos produtivos.

Neste contexto, a obtenção do plano de manejo aparece como uma etapa fundamental do gerenciamento florestal. Ele visa apoiar a tomada de decisões sobre o quê e onde plantar, qual o melhor momento para realizar o desbaste por sítio, a rotação economicamente ótima, entre outras decisões de caráter estratégico. Uma ferramenta bastante comum na solução destes problemas é a utilização de técnicas matemáticas de otimização, especialmente a programação linear.

### **1.1 Relevância do estudo**

Os empreendimentos florestais necessitam responder às questões da sociedade quanto ao consumo de água dessas espécies e ajustar seu sistema de gerenciamento para atingir a sustentabilidade e obter credibilidade sócio-ambiental. Dessa forma, conhecer os processos de perda de água e os componentes que atuam de forma efetiva no balanço de água é de suma importância para a compreensão dos impactos hidrológicos dessa atividade.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos neste sentido nas últimas décadas ao redor do mundo, como pode ser visto nas revisões apresentadas por Lima e Zikia (2006), Bruijnzeel (1990), Andréassian (2004) e Calder (2007). Infelizmente, como apontado por uma consulta de especialistas da FAO (1993), muitas dessas contribuições não auxiliaram para que silvicultores e planejadores de uso da terra compreendessem melhor as relações entre os eucaliptos e os recursos hídricos.

Apesar dos avanços significativos na compreensão científica das interações entre solo, água e planta, incertezas e confusão sobre os impactos das plantações florestais persistem. Em parte por causa das dificuldades na transferência de resultados de pesquisas para diferentes países e regiões, em diferentes escalas de bacias hidrográficas,

diferentes tipos de floresta, de espécies e de manejo florestal. Além disso, poucos estudos examinam as mudanças na estrutura e composição florestal e relacionam mudanças ecofisiológicas com a hidrologia da bacia (Sun *et al.*, 2008).

Uma vez que existe uma associação muito forte entre o manejo florestal, a produtividade e a disponibilidade hídrica, estas evidências estão cada vez mais exigindo que o manejo das plantações florestais deva incorporar os objetivos de manutenção e conservação dos recursos hídricos (Lima, 2004). Computar o uso de água por plantações de eucalipto e sua variabilidade ao longo do crescimento da planta é fundamental, tanto na avaliação de seus impactos ambientais quanto na aferição de sua sustentabilidade. A Política Nacional do Meio Ambiente (Lei 6938/1981) já citava como um de seus objetivos a compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico.

A fim de atender a todos os agentes, e assim prover desenvolvimento econômico aliado à preservação ambiental, é imprescindível um planejamento de uso dos recursos hídricos que considere como unidade territorial a bacia hidrográfica em questão (Bandeira, 2006). Também é necessário que se avalie o nível de comprometimento atual da disponibilidade, quer seja pela demanda, quer seja pelo consumo, incluindo as necessidades ecológicas.

Dessa forma, um dos principais desafios enfrentados pelos gestores de uso do solo, florestais e de recursos hídricos é maximizar a gama de benefícios multi-setoriais da floresta sem prejuízo dos recursos hídricos e da função do ecossistema (Calder *et al.*, 2007). Este desafio é estimulado pelo fato de a maioria dos efeitos adversos da silvicultura poder ser minimizados através do planejamento e gestão da planta (FAO, 1993).

Entretanto, ainda prevalecem abordagens tradicionais, nas quais o processo de decisão na gestão de plantações florestais é orientado por modelos que focam apenas na maximização do retorno financeiro e privilegiam indicadores relacionados com questões econômicas e volumétricas (Amaral, 2002). O número de estudos que incorporam indicadores hidrológicos ainda não reflete a importância que merecem no cenário atual, o que motiva o desenvolvimento deste trabalho.

Portanto, é necessário direcionar os esforços para uma melhor compreensão dos impactos hidrológicos potenciais da silvicultura, associando mudanças ecofisiológicas e

regimes de manejo com a hidrologia da bacia. Esta análise deve considerar as particularidades tanto da bacia quanto dos empreendimentos florestais, bem como a disponibilidade de dados para realização da mesma. Questões ecológicas e econômicas devem ser equilibradas. Os resultados devem ser utilizados na busca e adoção de sistemas de gestão mais adequados, incorporando nos modelos de gestão os conhecimentos adquiridos.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo analisar a inclusão de condicionantes hidrológicos na gestão de povoamentos de eucalipto voltados ao abastecimento industrial. Procurou-se definir a melhor forma de utilizar o potencial das espécies de eucalipto de modo a atender diferentes limites de geração de escoamento.

A questão central que este estudo pretende responder é:

A adoção de uma restrição a redução do escoamento anual em uma microbacia é uma ferramenta útil a integração da gestão florestal e de recursos hídricos?

## **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho organiza-se em cinco capítulos. O presente capítulo apresenta uma breve introdução contendo sua justificativa, objetivo e questão de pesquisa. A análise do problema apresentado requer a aplicação de conceitos relacionados ao manejo, à hidrologia e à economia florestal, bem como a utilização de técnicas de otimização, temas estes abordados no capítulo dois. Utilizando os conceitos anteriormente referidos, o capítulo três apresenta a metodologia a ser implementada para atingir o objetivo deste trabalho, incluindo a descrição do modelo de balanço hídrico e do modelo de otimização, bem como dos dados necessários à análise. Esta metodologia será aplicada ao estudo de caso abordado no capítulo quatro. Os capítulos cinco e seis apresentam os resultados obtidos e as conclusões e considerações finais deste estudo.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A discussão desenvolvida neste trabalho estará atrelada a quatro elementos fundamentais: silvicultura, ciclo hidrológico, economia e otimização, no contexto do planejamento de plantações de eucalipto para o abastecimento industrial. A definição do plano de manejo afetará tanto o impacto hidrológico quanto o retorno econômico de um empreendimento silvicultural. Técnicas matemáticas de otimização são utilizadas como auxílio à tomada de decisão a fim de obter o plano de manejo economicamente ótimo, objetivo dos modelos tradicionais de gestão. Indicadores hidrológicos devem, então, ser incorporados nestes modelos, a fim de promover desenvolvimento econômico aliado à preservação ambiental.

### **2.1 Silvicultura no Brasil e no Rio Grande do Sul**

Silvicultura é a atividade que se ocupa do estabelecimento, do desenvolvimento e da reprodução de florestas, visando a múltiplas aplicações, tais como: produção de madeira, carvão, proteção ambiental, entre outros (IBGE, 2009). No Brasil, o crescimento da silvicultura tomou força a partir da década de 60, quando foram criadas instituições e programas com o objetivo principal de promover a silvicultura em larga escala no país. Assim como em outros lugares do mundo, as boas taxas de crescimento do eucalipto e sua adaptação a diferentes ambientes fizeram com que o eucalipto atingisse uma posição de liderança em programas de reflorestamento e arborização. Infelizmente, poucas pessoas perceberam que era necessária uma reforma nas políticas florestais convencionais e nos sistemas de administração e gestão que lidavam com florestas naturais, especialmente quando do plantio de espécies exóticas (FAO, 1993).

Em 2009, a área utilizada para plantações de eucalipto no país já excedia 4,2 milhões de hectares, correspondendo a 64,7% do total de florestas plantadas, com uma taxa média de crescimento anual de 7,4% (ABRAF, 2009). A maior parte da produção destina-se às atividades de papel e celulose (70% da área plantada), siderurgia (21%) e painéis reconstituídos (6%).

Investimentos em pesquisas, melhoramentos genéticos e aplicação de técnicas de manejo específicas aumentaram consideravelmente a produtividade das plantações de eucalipto no Brasil nos últimos 40 anos, destacando o país na produtividade florestal. O

incremento médio anual (IMA), taxa de crescimento médio anual em volume de madeira, aumentou de  $25\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ , na década de 1980, para  $41\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$  em 2008 (ABRAF, 2009). Com tais níveis de produtividade, o tempo médio para produção de madeira em tora reduziu de 8 anos para cerca de 6,5 anos. No Chile, por exemplo, o tempo médio é 11 anos com IMA de  $30\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ; na África do Sul são em média 9 anos e  $20\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$  e na Europa o tempo médio é ainda maior com menor IMA (SBS, 2008).

O estado do Rio Grande do Sul, onde se desenvolveu este trabalho, é atualmente o quarto estado com maior área plantada do país, possuindo cerca de 280 mil ha de plantações de eucalipto. Esta área, entretanto, encontra-se bem abaixo das principais culturas do estado, a exemplo da soja (3,9 milhões de ha), do milho (1,4 milhão de ha) e do arroz (940 mil ha) (IBGE, 2007).

A expansão da silvicultura no estado foi acompanhada de discussões acaloradas sobre seus impactos ambientais, conforme pode ser observado na revisão sobre o tema levantada por Binkowski (2009). Parte da polêmica é causada pela localização dessa atividade, cuja expansão ocorre principalmente na metade sul do estado (Binkowski, 2009; FEE, 2008). Esta área está sobre o domínio do bioma natural pampa e inclui alguns dos municípios com maior produção de arroz do estado, sendo que esta cultura possui reconhecidamente uma alta demanda de água. Este fator aumenta a possibilidade de ocorrer conflitos de uso de água na região, onde a relação entre demanda e disponibilidade hídrica média já está em situação de alerta ou crítica (Rio Grande do Sul/SEMA, 2007).

O estado foi o primeiro a aprovar um Zoneamento Ambiental para a atividade da Silvicultura (ZAS), etapa anterior ao licenciamento ambiental obrigatório no Brasil de acordo com a resolução nº237/1997 do CONAMA. O zoneamento apresenta restrições e recomendações à silvicultura para cada unidade de paisagem e região hidrográfica em que o estado foi dividido (Rio Grande do Sul/SEMA, 2010). Estas restrições são obtidas com base na análise das áreas protegidas, biodiversidade, ocupação do solo, uso do solo, paisagem, arqueologia e paleontologia, comunidades tradicionais e recursos hídricos.

Entre os motivos que levaram ao zoneamento da atividade, a resolução 187/2008 do CONSEMA destaca a necessidade de avaliar a vulnerabilidade dos ambientes frente à implantação da atividade de silvicultura e de promover a adoção de práticas de manejo

ambientalmente adequadas que resultem na proteção dos recursos naturais, entre os quais os recursos hídricos.

## **2.2 Gestão de florestas plantadas**

Um sistema de gestão florestal é aquele que define como deverão ocorrer as intervenções florestais em cada unidade de gestão sob o ponto de vista das consequências para a floresta como um todo (Rodriguez *et al.*, 1997). Portanto, deve considerar todas as estratégias possíveis de condução do estrato florestal. Isso implica no conhecimento prévio dos custos e exigências técnicas de cada unidade de manejo e no prognóstico das prováveis produções de cada estrato florestal em cada regime de manejo implementado (Rodriguez e Moreira, 1989; Fenner, 2006).

A modelagem da produção de madeira requer informações das possibilidades biológicas/físicas do crescimento das árvores, bem como dos objetivos da produção (Wear e Parks, 1994). O volume por unidade de área será dado em função da idade da floresta, do melhoramento genético, do regime de manejo florestal e da qualidade do sítio.

O índice de sítio (IS) é uma variável que procura quantificar a qualidade do sítio por meio de parâmetros dendrométricos (volume de madeira, altura das árvores, área basal, etc.) (Batista e Couto, 1986). Na maioria dos casos, o índice de sítio é apresentado como a altura das árvores dominantes e codominantes de um povoamento numa determinada idade, a qual é chamada de idade base. As curvas de índice de sítio descrevem o crescimento em altura das árvores hipotéticas de índices de sítios específicos. Apesar de algumas limitações apontadas na literatura, Tonini *et al.* (2006) destacam que o índice de sítio ainda é o método mais utilizado para definir a potencialidade dos sítios florestais. Também fornece subsídio para alocação de talhões, definição da densidade de plantio, do ciclo de corte e da rotação, planejamento de colheitas, plano de investimentos e de fluxo de caixa, além de permitir o uso racional da floresta e do solo, evitando a exaustão e a degradação dos atributos físicos (Braga *et al.*, 1999).

A necessidade de obter florestas cada vez mais produtivas e elevar a qualidade do produto final tem levado as empresas brasileiras a investimentos cada vez maiores em programas de melhoramento genético, com a utilização de técnicas como a hibridação e a clonagem (Tonini *et al.*, 2006). O melhoramento genético cria populações mais

eficientes em termos produtivos, ou mais robustas, de modo a prevalecerem em condições edafo-climáticas menos favoráveis para a produção de material lenhoso (Braga *et al.*, 1999). Também pode contribuir para a obtenção de indivíduos qualitativamente superiores no que se refere às características tecnológicas.

Há diversos modelos utilizados para ajuste de curvas de crescimento do eucalipto (Rodríguez, 2005). À medida que as árvores envelhecem, elas ganham volume. O volume total de madeira em uma dada idade é dado pela função de produção. A partir de certa altura, contudo, o volume de madeira deixa de aumentar. Neste ponto, conhecido como capacidade de carga, as árvores atingiram a sua produção máxima potencial para a área que ocupam. Cada novo crescimento é negativamente compensado por perdas relacionadas com o envelhecimento das árvores (Santos, 2009).

As alternativas de gestão começam desde a organização e classificação da área em unidades de gestão até a quantificação de fluxos de bens e serviços que decorrem das intervenções em cada unidade e a determinação de seu momento de ocorrência. A menor unidade de manejo é o talhão, que deve representar uma área contígua de características físicas e produtivas semelhantes.

O período de tempo decorrido entre a brotação e o corte raso da floresta é chamado de rotação. O ciclo florestal, entretanto, só se encerra com o corte raso final da floresta podendo compreender uma ou mais rotações, no caso de se optar pela rebrota. O desbaste corresponde ao corte e remoção parcial das árvores de um povoamento, sendo necessário quando se deseja obter toras de diâmetros elevados ao final da rotação. Outras atividades, como correção do solo, uso de fertilizantes minerais e irrigação, também podem ser utilizadas, objetivando aumento da produtividade florestal.

No Brasil, o sistema silvicultural mais utilizado para a condução de povoamentos de eucaliptos é o de talhadia simples (Stape, 1997). Neste sistema, após o corte das árvores existentes, ou procede-se o replantio ou conduz-se a brotação proveniente dos tocos remanescentes até atingir novamente a idade de corte.

A escolha do número ideal de rotações que compõe um ciclo de talhadias, e as idades ótimas de corte de cada rotação, exige a análise de um grande número de alternativas (Morais-Filho e Rodríguez, 2004).

Alguns fatores importantes devem ser definidos antes do plantio propriamente dito, com destaque para a escolha da espécie, o espaçamento do plantio e suas

características. A escolha da espécie de eucalipto utilizada depende principalmente do clima da região, das características do solo e da finalidade do uso da matéria-prima do eucalipto (EMBRAPA, 2009).

O espaçamento, ou densidade do plantio, influenciará as taxas de crescimento, a qualidade da madeira produzida, a idade de corte, os desbastes, as práticas de manejo e conseqüentemente o rendimento financeiro e os impactos ambientais. Se a densidade for muito baixa, as árvores não aproveitarão todos os recursos, como água, nutrientes e luz disponíveis, e haverá menor produção por unidade de área. Entretanto, em termos físicos, alguns espaçamentos podem ser escolhidos sem afetar a produtividade do povoamento (FAO, 1993). Por outro lado, se a densidade de plantio for muito elevada, tais recursos não serão suficientes para atender à demanda do povoamento, o que também repercutirá no decréscimo de volume e na própria qualidade das árvores.

Além das informações já mencionadas, necessárias ao correto gerenciamento do recurso florestal, empresas madeireiras necessitam melhorar sua compreensão do uso de água pelas plantações de eucalipto para responder às questões do público e ajustar seu sistema de gerenciamento para atingir a sustentabilidade. Para tanto, torna-se necessário o contínuo monitoramento das ações de manejo, tanto para a quantificação dos possíveis impactos, quanto para nortear a busca do manejo sustentável.

Este “Manejo Florestal Sustentável”, como paradigma moderno de desenvolvimento florestal, tem sido definido de diversas maneiras, mas há atualmente consenso de que ele deve estar estruturado em três conjuntos de condições básicas, que implicam em manejo florestal que seja economicamente viável, ecologicamente sadio e socialmente justo. Como ressaltado por Lima e Zikia (2006), esta estratégia incorpora a noção da microbacia hidrográfica, como unidade sistêmica da paisagem e como escala natural dos processos hidrológicos envolvidos no balanço hídrico, na qualidade da água, no regime de vazão e na saúde do ecossistema aquático. Integrar, portanto, os objetivos de manutenção e conservação da água no plano de manejo das florestas plantadas, em termos da hidrologia da microbacia, parece ser a resposta mais adequada (Twery e Hornbeck, 2001).

## 2.3 Economia florestal

Na busca de atingir o manejo sustentável, é necessário introduzir uma abordagem do setor produtivo florestal. Como todo empreendimento, o setor tem antes de tudo uma dimensão econômica, ou seja, o processo de decisão é basicamente orientado por modelos de gestão que levam em conta apenas indicadores econômicos e volumétricos.

### 2.3.1 Fluxo de caixa da produção de madeira

A receita de um povoamento florestal é gerada somente no momento do corte, ou seja, ao final de cada rotação, e é dada pelo produto do preço da madeira e da quantidade de madeira em tora produzida. A curva de crescimento, em volume, do povoamento florestal pode ser genericamente representada por uma função da idade do povoamento florestal. O valor da receita em cada ano  $t$  é, portanto:

$$R_t = \begin{cases} p \cdot V(t), & \text{em anos de corte } (t = n) \\ 0, & \text{nos demais anos} \end{cases} \quad 2.1$$

onde:

$R_t$ : Receita gerada no ano  $t$  [R\$];

$p$ : preço do  $m^3$  de madeira [R\$. $m^{-3}$ ];

$V$ : volume da madeira cortada no ano  $t$  [ $m^3$ ];

$n$ : idade de corte do povoamento [anos];

$t$ : idade do povoamento [anos].

Considerando uma taxa de juros de  $j$  ao ano, o valor presente líquido da receita pode ser representado por:

$$R_0 = \sum_{t=0}^n R_t (1 + j)^{-t} \quad 2.2$$

onde:

$R_0$ : Valor presente das receitas de uma rotação [R\$];

$j$ : taxa de juros [-].

Quanto aos custos no cultivo comercial do eucalipto, Oliveira (2005) divide-os em custos de produção e custos de comercialização, sendo que esse último pode ser subdividido em custo de corte e custo de transporte. Também o custo de produção de eucalipto, pode ser subdividido em custo de plantio ou rebrota, envolvendo tudo que se gasta no primeiro ano da rotação com a lavoura, e custo de manutenção, do segundo ano

até o período que precede a corta dos eucaliptos. O custo de plantio engloba os gastos com mudas, mão-de-obra, adubação, preparo do solo, combate de plantas invasoras, combate de formigas, gastos com insumos etc. Vale ressaltar que estes custos variam variando dependendo da região, da topografia do terreno, do tipo e da situação do solo, do espaçamento entre as mudas, entre outros (Chaul e Tibiriçá, 2006).

Dessa forma, o valor dos custos de uma rotação no instante  $t=0$  é:

$$C_0 = \sum_{t=0}^n C_t(1+j)^{-t} \quad 2.3$$

onde:

$C_t$ : custo no ano  $t$  [R\$];

$C_0$ : valor presente dos custos de uma rotação [R\$];

$n$ : idade de corte final do povoamento [anos];

De maneira análoga podem ser determinados os valores presentes das receitas e dos custos para ciclos de mais de uma rotação.

### **2.3.2 Rotação ótima e critérios de avaliação de projetos**

A escolha das atividades do plano de manejo, especialmente das idades ótimas de corte de cada rotação, exige a análise de um grande número de alternativas. A tarefa envolve a geração de todas as possíveis alternativas de manejo para cada povoamento (Rodriguez, 1991). Entre as principais variáveis envolvidas estão: a espécie de eucalipto, o espaçamento, a área destinada a cada regime de manejo, o mosaico e o tempo de rotação de cada talhão.

O problema da rotação ótima significa escolher a melhor idade para se realizar o corte da floresta. Santos (2009) e Rodriguez (1991) citam três alternativas que devem ser analisadas: o rendimento máximo sustentável, o valor presente líquido (VPL) e o valor esperado de terra (modelo de Faustmann) que o empreendedor tentará maximizar. Estas diferentes metas implicam em diferentes idades ótimas de corte. Para esta análise é considerado que a única meta é maximizar a produção de madeira, apenas alterando a idade de corte, que somente é feito o corte ao final de cada rotação, e que o preço da madeira é constante.

A função objetivo do rendimento máximo sustentável ou incremento médio anual (IMA) é simples e não inclui variáveis monetárias (FOPER, 2009). Utilizando esta

alternativa, deve-se realizar o corte da floresta quando o incremento médio anual (IMA) for máximo, resultando na rotação volumetricamente ótima (Figura 2.1). Denomina-se ICA ao crescimento em volume ocorrido no período de um ano, e IMA ao resultado da divisão do volume pela idade da floresta. Deve ser notado que as duas curvas se cruzam no ponto de máximo IMA. A escolha dessa idade de corte maximiza a produção anual média de uma floresta, contudo não necessariamente maximiza o resultado econômico. Ao se procurar a rotação economicamente ótima, é necessário considerar a taxa de desconto.

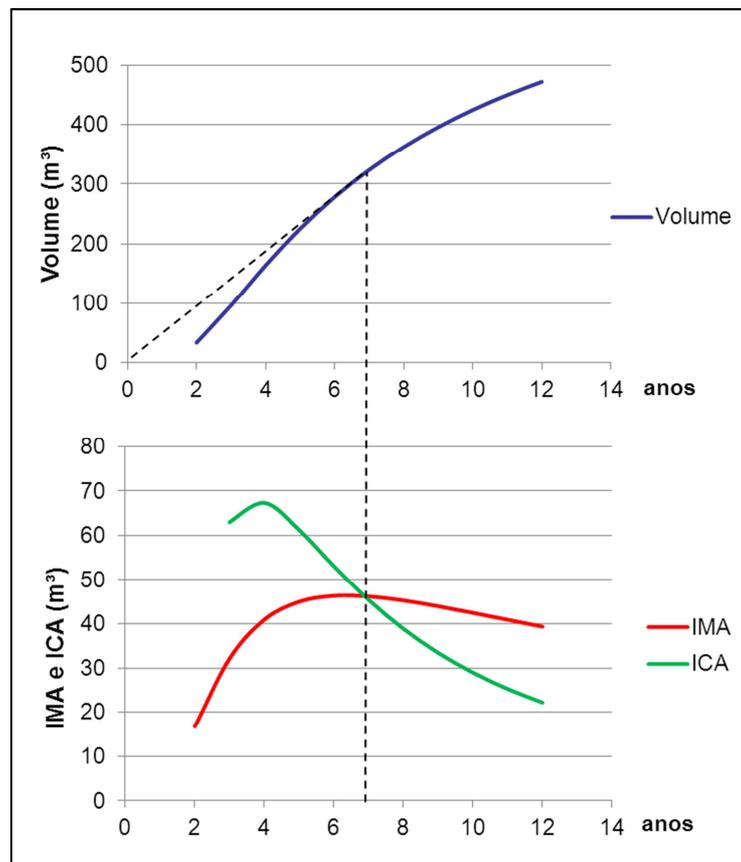


Figura 2.1 : Função fictícia do volume, IMA e ICA em função da idade para um hectare de floresta.

O VPL considera a taxa de desconto, sendo determinado pela diferença entre o valor presente das receitas e o valor presente dos custos (equação 2.4). Este modelo determina a idade de corte quando se atinge a maturidade financeira da produção florestal. Apresenta um momento cujo custo de mantê-la em pé por mais um ano é igual ao benefício econômico da espera.

$$VPL = \sum_{t=0}^n R_t(1+j)^{-t} - \sum_{t=0}^n C_t(1+j)^{-t} \quad 2.4$$

onde:

$t$ : período de ocorrência das receitas e dos custos [anos];

$R_t$ : receitas em reais no período  $t$  [R\$];

$C_t$ : custos em reais no período  $t$  [R\$];

$n$ : idade de corte final do povoamento [anos];

Resta resolver o problema de ocupação do solo, que naturalmente tem o seu custo. O modelo de Faustmann se destaca entre as três alternativas citadas, por considerar um horizonte de análise prolongado, uma vez que as florestas são recursos renováveis. Este modelo é utilizado de forma que o valor da floresta pode ser expresso como a soma do fluxo de caixa presente líquido de um período de tempo infinito e foi incorporado à literatura como Valor Esperado de Terra (VET), dado por:

$$VET = \frac{\sum_{t=0}^n [R_t(1+j)^{-t} - C_t(1+j)^{-t}]}{1 - (1+j)^{-n}} \quad 2.5$$

onde:

$VET$ : valor esperado da terra;

Esta equação apura o VPL de uma série perpétua de ciclos florestais iguais. Este artifício torna os valores presentes comparáveis, mesmo apresentando fluxos de caixa com períodos de duração diferentes. A meta é determinar o ciclo florestal financeiramente maduro e maximizador do valor da ocupação do solo. O VET foi o indicador econômico utilizado neste trabalho de modo a representar o valor de uso da terra.

Também são adotados critérios de avaliação de projetos, que analisam se uma dada alternativa de empreendimento florestal é aceitável, e de comparação entre projetos. Além de apresentar  $VPL > 0$  e  $VET > \text{custo da terra}$ , outros critérios podem ser adotados, por exemplo (Santos, 2009; Rodriguez, 1991):

- Valor Presente Líquido anualizado (VPLa): demonstra o ganho por período, transformando o fluxo de caixa do projeto de investimento em uma série uniforme. Embora as receitas mais expressivas na silvicultura se concentrem ao final do projeto, o

VPLa permite, para efeito de comparação, distribuir esse ganho por ano (Souza *et al.*, 2004). Rodriguez (1991) cita que este critério é útil na comparação de investimentos que produzam retornos periódicos (p. ex., culturas florestais) com investimentos que produzam retornos anuais (p. ex., culturas agrícolas). É também útil na comparação de investimentos com horizontes diferentes.

$$VPL_a = VPL \cdot \left[ \frac{j \cdot (1 + j)^n}{(1 + j)^n - 1} \right] \quad 2.6$$

onde:

$VPL_a$ : valor presente líquido anualizado.

- Taxa interna de retorno (TIR): É definida como a taxa de juros composta que iguala o valor presente das receitas ao valor presente dos custos, ou seja, é a taxa à qual  $VPL = 0$ . Se a TIR do projeto é maior que a taxa de juro onde o gestor pode aplicar o capital, então o projeto é interessante. A essa taxa comparativa dá-se o nome de Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Na escolha entre mais de duas alternativas de investimento opta-se pela de maior TIR.

$$\sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1 + TIR)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1 + TIR)^t} \quad 2.7$$

onde:

$TIR$ : taxa interna de retorno.

Berger (2002) cita que a TMA usualmente utilizada pelas empresas florestais é de 12% ao ano, e no mercado financeiro ao redor de 10% ao ano.

- Índice Benefício/Custo (IBC): É obtido dividindo-se o valor presente das receitas pelo valor presente dos custos. Aceita-se o projeto cujo IBC seja maior do que 1. Na escolha entre mais de duas alternativas escolher a de maior IBC.

$$IBC = \frac{\sum_{t=0}^n R_t / (1 + j)^t}{\sum_{t=0}^n C_t / (1 + j)^t} \quad 2.8$$

onde:

$IBC$ : índice benefício/custo.

De acordo com Souza *et al.* (2004), o IBC visa, em parte, corrigir a deficiência do VPL e do VPLa que é a de expressarem o retorno em valores absolutos. O IBC é um indicador relativo, medindo a expectativa de retorno para cada unidade de capital imobilizada no projeto.

#### **2.4 Impacto hidrológico do florestamento**

A floresta ou plantio florestal e seu manejo têm íntima correlação com o ciclo hidrológico, o que permite concluir que não há como manejar um sem alterar o outro (Lima e Zakia, 2006). A busca de informações e resultados que possibilitem a incorporação das variáveis ambientais nos modelos de gestão é um desafio atual (Lima e Zakia, 2006).

A fim de incorporar uma restrição de caráter hidrológico nos modelos de gestão florestal, é necessário analisar o impacto hidrológico do setor produtivo florestal e sua relação com as práticas de manejo.

O impacto decorrente da formação de plantações florestais reflete-se nos componentes do ciclo hidrológico. Todavia, este impacto tem uma característica interessante do ponto de vista deste trabalho: ele pode ser minimizado através da adoção de práticas ambientalmente sadias de manejo florestal, conforme os preceitos do manejo florestal sustentável (FAO, 1993; Lima, 1996).

Segundo a legislação brasileira, considera-se impacto ambiental "qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais" (Resolução do CONAMA, nº 001/1986). Ou ainda, conforme definido na ISO 14001 (ABNT, 1996), impacto ambiental é "qualquer modificação do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, dos aspectos ambientais da organização". A Figura 2.2 ilustra este conceito.

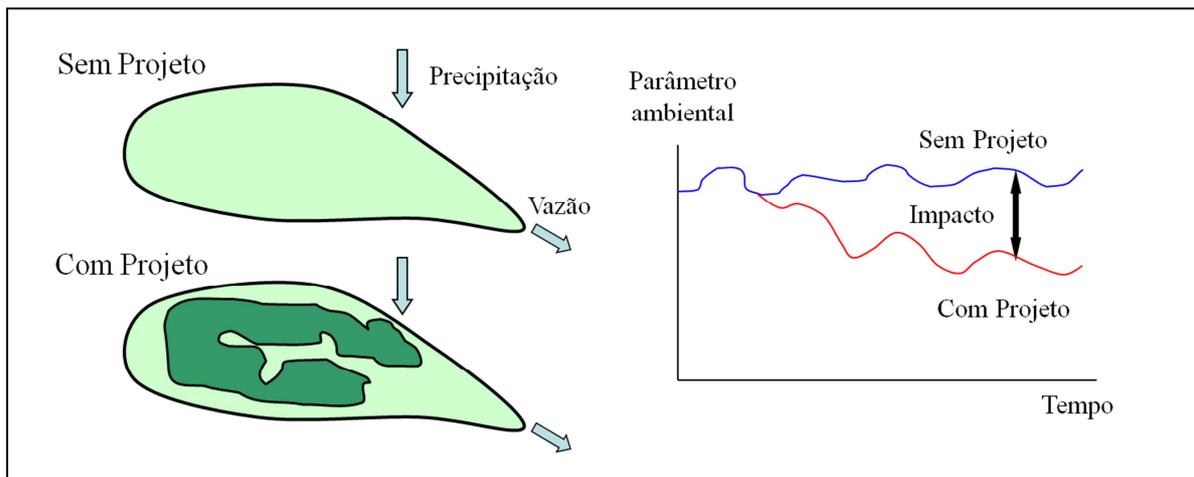


Figura 2.2: Esquema conceitual de avaliação do impacto ambiental do empreendimento (Adaptado de Mendes e Lima, 2007).

No caso dos recursos hídricos, os vários parâmetros ambientais alterados relacionam-se com aspectos quantitativos e qualitativos das águas superficiais no exutório da bacia hidrográfica afetada pelo projeto. Ressalta-se que apenas serão analisadas neste estudo as alterações quantitativas das águas superficiais devido à implantação de plantações florestais em uma microbacia.

De modo geral, a preocupação principal contida na controvérsia sobre o eucalipto diz respeito ao seu consumo de água devido ao fato dessa espécie ser de rápido crescimento. As relações entre as florestas plantadas e seus efeitos sobre a água vêm sendo estudadas em vários países, através de diferentes modalidades e enfoques de pesquisa. Por outro lado, a literatura especializada conta também com alguns trabalhos de revisão sobre o tema.

Uma análise abrangente a respeito dessa controvérsia hidrológica sobre o eucalipto foi publicada por Lima (1993), baseado na revisão exaustiva da literatura sobre o assunto. Bruijnzeel (1990) oferece uma revisão sobre os impactos hidrológicos de (des)florestamento comentando efeitos sobre a vazão de rios com destaque para florestas tropicais, mas contendo também informações de florestas plantadas. O trabalho de Andréassian (2004) apresenta uma perspectiva histórica sobre a controvérsia dos impactos hidrológicos de florestas. O autor sintetiza a evolução histórica das pesquisas com microbacias concluindo que, embora possamos considerar o impacto hidrológico de florestas plantadas como provado, em diferentes bacias, com específicos contextos pedológicos, climatológicos e fisiológicos, o impacto não será o mesmo.

Muitos outros estudos apontam para a ocorrência de alterações no ciclo hidrológico pela substituição de vegetação de menor porte por plantações florestais, com resultados originados de microbacias localizadas em diferentes regiões do globo (Bosch e Hewlett, 1982; Calder, 1998; Zhang *et al.*, 1999).

Ou seja, embora evidências recentes mostrem que é preciso considerar a possibilidade real de uma maior demanda de água decorrente da fase inicial de crescimento rápido de plantações florestais, deve-se levar em conta que este consumo de água depende das características do local, como tipo e profundidade do solo, relevo e regime e quantidade da precipitação anual, e das práticas de manejo (Calder, 1986; Andréassian, 2004; Tucci e Clarke 1998). A análise do ciclo hidrológico em florestas plantadas, portanto, deve levar em conta todas estas interações de forma integrada (Lima, 2007).

As trocas de água no sistema solo-planta-atmosfera são dirigidas por uma série de processos que se inter-relacionam. O balanço hídrico pode dado pela expressão:

$$P - E_d - Q_{sup} - Q_{dre} - \Delta\theta - E_s - E_t = 0 \quad 2.9$$

Onde:

$P$ : precipitação;

$E_d$ : perdas por evaporação da água interceptada no dossel;

$Q_{sup}$ : escoamento superficial;

$Q_{dre}$ : saldo do volume drenado para fora da zona das raízes e ascensão por capilaridade;

$\Delta\theta$ : variação do teor de umidade do solo;

$E_t$ : perdas por evapotranspiração da vegetação.

Com exceção da precipitação, todos estes processos são fortemente influenciados pela idade e população de árvores, estrutura do povoamento e arquitetura da copa, ocasionando uma variação no uso de água de acordo com o manejo adotado. Estes fatores modificam a área da superfície transpirante, radiação líquida, interceptação e padrões de vento afetando as taxas de evapotranspiração de povoamentos florestais (Gomes, 1994; *apud* Neto, 2001). Hubbard *et al.* (2009) cita ainda que tratamentos silviculturais e adição de recursos (irrigação e fertilização) também podem alterar a condutância foliar, área foliar e o gradiente de potencial que existe entre o solo e as folhas e, como resultado, mudar a quantidade de água transpirada.

Entre os diversos aspectos da mudança de uso do solo de vegetação de pequeno porte para florestas, a redução na vazão frequentemente observada deve-se, sobretudo, ao aumento da energia disponível para evapotranspiração, aumento da interceptação e ao fato de que florestas retiram do solo mais umidade do que pastagens (Bruijnzeel, 1990; Lima, 1993). Cada um destes aspectos será analisado mais detalhadamente nos itens a seguir.

#### **2.4.1 Balanço de radiação**

Na ausência de restrições devido à disponibilidade de água na superfície evaporativa, o total de energia radiante capturada na superfície terrestre exerce controle dominante sobre as taxas de evaporação regionais (Shuttleworth, 1994). Logo, um aspecto muito importante ao se comparar o consumo de água entre vegetações de grande porte com vegetação de pequeno porte é que vegetações de grande porte, como as florestas, captam uma maior quantidade de radiação solar.

A quantidade de radiação que efetivamente chega à superfície terrestre, após sofrer dispersão, reflexão e absorção, é chamada de radiação solar ou insolação. Esta é a soma da radiação direta de onda curta do sol e da radiação difusa. Em uma escala global, os gradientes latitudinais da insolação, causados pela geometria da rotação da Terra e da revolução em torno do sol, são bem conhecidos. Em uma escala local, a topografia é o principal fator que altera a distribuição de insolação. Variabilidade de altitude, orientação da superfície e sombras de características topográficas criam fortes gradientes locais de insolação (Fu e Rich, 2000).

Como medições de radiação são muito menos comuns e mais difíceis de medir que outros parâmetros meteorológicos padrões (Rasmusson *et al.*, 1994), modelos espaciais de radiação solar apresentam-se como boas ferramentas para o entendimento das variações sazonais e regionais da insolação.

Uma fração considerável da radiação solar que atinge a superfície terrestre é refletida por ela, sendo chamada de albedo. O albedo é muito variável de acordo com a superfície. As florestas apresentam, em geral, um albedo médio da ordem de 10 a 20 por cento, enquanto a vegetação rasteira, como a pastagem e a maioria das culturas agrícolas, apresenta albedo médio da ordem de 18 a 25 por cento (Neto, 2001).

Dessa forma, o balanço energético depende das características da vegetação e irá determinar quanta energia tem disponível para os processos de evapotranspiração.

#### **2.4.2 Intercepção pelo dossel**

Parte da precipitação incidente sobre uma floresta é redistribuída pela copa da floresta, contribuindo para o incremento de umidade do solo, e parte é perdida por evaporação direta da água interceptada. De acordo com Lima (1993), quando se comparam os efeitos resultantes do florestamento de áreas de vegetação aberta é provável que ocorra uma redução da produção de água pela bacia de até 20 por cento, enquanto as perdas evaporativas poderiam até mesmo duplicar, devido à intercepção da precipitação pela copa da floresta. Ressalta-se que embora este componente seja definido como uma perda, parte do total evaporado da água interceptada corresponde a uma economia de transpiração que ocorreria caso a copa não estivesse molhada. Esta economia pode representar até 25 a 30% da intercepção (Lima,1996; Dingman,2002).

Medição de precipitação interna ainda não é comum e muitos dos experimentos não são estatisticamente adequados (Bruijnzeel, 1990). Modelos de intercepção têm sido desenvolvidos baseados nas características da precipitação e da copa. Grande parte destes modelos são baseados no modelo de Rutter (Rutter *et al.*, 1975) ou de Gash (Gash, 1979). Apesar de alguns bons resultados obtidos, estes modelos tendem a superestimar as perdas por intercepção em vegetações esparsas, a exemplo de plantações de eucalipto. Gash *et al.* (1995) e Valente *et al.* (1997) propuseram, então, reformulações dos modelos originais introduzindo o parâmetro de fração de cobertura do solo. Estes modelos apresentaram estimativas mais precisas da intercepção para vegetação esparsa, sendo testados inclusive em plantações de eucalipto (Valente *et al.*, 1997). A fração de cobertura vegetal é comumente estimada através de análises fotográficas ou a partir da relação entre este parâmetro e o índice de área foliar (IAF) baseada na equação de Beer-Lambert, conforme apresentado por van Dijk and Buijnzeel (2001). O IAF corresponde à razão entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo. É um indicador da estrutura do dossel e mudanças no IAF refletem as condições de luz na floresta.

A parcela da precipitação interceptada varia espacialmente e depende principalmente da estrutura do dossel e das características da precipitação. As perdas por

interceptação devido à parcela interceptada pelos troncos e galhos são relativamente pequenas em relação ao total interceptado (Deguchi *et al.*, 2006).

Como a evaporação da água interceptada só ocorre na condição de copa molhada, o consumo de água pela floresta será maior em regiões onde a copa permanece molhada a maior parte do ano. Se as chuvas forem intensas, essa perda por evaporação ocorrerá predominantemente após a cessação das chuvas e pode ser primariamente determinada pela “capacidade de armazenamento da copa”.

A capacidade de armazenamento do dossel tem sido estimada por diversos autores (van Dijk e Bruijnzeel, 2001; Gash *et al.*, 1995; e Liu, 1997) considerando que a copa pode ser representada como sendo uma única grande folha. Dessa forma, a capacidade de armazenamento da copa por unidade de área equivale ao produto do IAF pela capacidade de armazenamento de uma única folha. Aston (1979) avaliou a interceptação em oito pequenas árvores de espécies diferentes, sendo seis dessas de eucalipto. Através de experimento em simulador de chuvas, observou que a capacidade de armazenamento do dossel se relaciona de forma linear com a área foliar.

FAO (1993) aponta que, entre as espécies utilizadas na silvicultura, as maiores taxas de interceptação ocorrem geralmente em espécies de pinus e casuarina, seguidas em ordem decrescente por gêneros com folhas compostas com folíolos pequenos (ex.: acácia), e só após o eucalipto. A maioria dos valores de precipitação interceptada para eucaliptos estão entre 10 e 25 por cento sob uma ampla variedade de condições. Uma maior interceptação significa uma menor precipitação interna e, portanto, menos água da chuva atingir o solo.

#### **2.4.2.1 Índice de Área Foliar**

Devido à importância do IAF como descritor da estrutura do dossel no balanço de radiação, no modelo de interceptação e evapotranspiração utilizados neste trabalho, cabe aqui uma descrição mais detalhada deste parâmetro.

O IAF corresponde à razão entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo ( $m^2$  de folha /  $m^2$  de solo). Ele é considerado o melhor descritor da estrutura de dosséis vegetais, na escala regional, para definir trocas de calor e de massa na interface com a atmosfera (Running e Coughlan, 1988, *apud* Soares *et al.*, 2001), estando diretamente relacionado com a evapotranspiração. Também é um importante

determinante do crescimento e da produtividade, conforme observado por Dye *et al.* (2004).

O IAF fornece ainda bases sólidas para a comparação de características da interceptação de diferentes tipos de vegetação e diferentes locais (van Dijk e Bruijnzeel, 2001). Deguchi *et al.* (2006) destaca que o uso do IAF na estimativa de parâmetros do modelo reformulado de Gash permitiu que estes refletissem as mudanças sazonais na estrutura da copa tornando mais precisas a estimativa das perdas por interceptação.

Logo, o IAF apresenta-se como uma importante característica da vegetação a ser utilizada em modelos hidrológicos devido a sua mencionada influência nos processos de transpiração e interceptação (Soares e Almeida, 2001; van Dick e Bruijnzeel, 2001; Collischonn *et al.*, 2007). O IAF é também uma das variáveis mais apontadas para explicar a variação na vazão da bacia ao longo do período de rotação devido a sua grande variabilidade com a idade da árvore do povoamento (Cornish e Vertessy, 2001; Almeida *et al.*, 2007). Para um dado cultivo, o IAF varia ao longo do período de crescimento e alcança seu valor máximo normalmente antes da floração, diminuindo um pouco logo após. Este parâmetro também depende da densidade das plantas, variedade do cultivo e outras características do manejo.

O IAF pode ser determinado a partir de medições diretas da área foliar, de imagens hemisféricas e de índices de vegetação calculados com o uso de sensoriamento remoto (Paiva *et al.*, 2009). Xavier *et al.* (2002) apresentou um levantamento da variabilidade temporal do IAF em cinco diferentes clones de plantações de eucalipto (híbridos de *E. grandis*) entre 12 e 84 meses na regional de produção da Aracruz (ES). O IAF apresentou um valor médio de 2,86, variando de 1,7 (aos 60 meses) a 4,3 (aos 24 meses) apresentando diferentes comportamentos com a idade dependendo do clone analisado. Na mesma área e para a mesma espécie, Almeida e Soares (2003) observaram valores máximos de IAF de 3,5 entre 3 e 4 anos de idade, com um declínio sazonal que pode chegar a 35% nos meses de inverno. Para a Mata Atlântica remanescente no local, os valores do IAF ficaram em torno de 7,0. Stape *et al.* (2004) encontrou um valor médio de  $2,8\text{m}^2.\text{m}^{-2}$  para espécies de *E. grandis x urophylla* em Entre Rios (BA), observando relação positiva dessa variável com a precipitação.

### 2.4.3 Evapotranspiração

Além das perdas por evaporação da água interceptada, também ocorrem perdas devido à evaporação do solo e da transpiração das plantas.

Os fatores mais importantes que influenciam a taxa na qual a água é evaporada são o fornecimento de energia e a habilidade de transportar o vapor d'água. Conforme mencionado, vegetações de grande porte como as florestas captam uma maior quantidade de radiação solar. A transferência por difusão turbulenta de vapor d'água representa uma medida da eficiência de remoção do vapor da superfície evaporante e está relacionada à turbulência gerada pela interação do vento com a superfície (Shuttleworth, 1994). A taxa de transferência de vapor para longe do solo por difusão turbulenta é controlada pela resistência aerodinâmica que é inversamente proporcional a velocidade do vento. Logo, a resistência é muito menor em florestas, caracteristicamente rugosas do ponto de vista aerodinâmico, que em superfícies lisas, como a vegetação rasteira.

A transpiração é a evaporação devida à ação fisiológica dos vegetais. As plantas, através de suas raízes, retiram do solo a água para suas atividades vitais. Parte dessa água é cedida à atmosfera, sob a forma de vapor, na superfície das folhas. Este processo é controlado por diversos fatores entre os quais se destacam a demanda climática, a disponibilidade de água no solo e os fatores fisiológicos, próprios da espécie e do estágio de desenvolvimento. Os mecanismos fisiológicos estão relacionados à resposta estomática aos fatores ambientais, à estrutura do dossel, além do IAF e da disponibilidade de água no solo (Calder, 1986). Dessa forma, é de se esperar que a taxa de transpiração varie continuamente e de espécie para espécie.

Por possuir raízes mais profundas, as espécies florestais possuem mais água disponível para transpiração que vegetações de menor porte, podendo sustentar taxas de transpiração mais altas por mais tempo. Algumas espécies de eucalipto são caracteristicamente de sistema radicular superficial, enquanto outras espécies apresentam um sistema radicular dotado de raiz pivotante profunda. A maior parte do sistema radicular concentra-se nas camadas superficiais do solo, embora o crescimento radicular seja altamente variável e dependa das características da espécie e de vários fatores ambientais. Lima (1993) cita algumas pesquisas que fazem referência a raízes de eucalipto que crescem até mais de sete metros de profundidade quando adultas

(Ashton, 1975) e outras onde foram encontraram evidências na Austrália de raízes de *E. marginata* que extraíam água de profundidades maiores que 6 metros.

Os estudos realizados no Brasil parecem apontar para um sistema radicular concentrado nas camadas superficiais de solo durante o período de uma rotação em plantações industriais. Leite *et al.* (1999) em experimento realizado em Santa Bárbara (MG) em povoamentos de *E. grandis* (32 a 38 meses) observaram que as plantas, em nenhuma das situações avaliadas, chegaram a utilizar água do solo que estivesse retida a tensões maiores que 1,5MPa. O crescimento das mesmas pareceu ser mais dependente da água retida na camada de solo compreendida entre 45 e 255cm. Em estudo desenvolvido por Almeida e Soares (2003) numa plantação de eucalipto (*E. grandis*) em Aracruz-ES com remanescentes de Mata Atlântica, a profundidade do sistema radicular da mata nativa encontrada foi bem maior que a do eucalipto, atingindo até 5m ou mais; no eucalipto na área de estudo e no final da rotação (7 anos) a profundidade das raízes chegou a 2,5m. Após 6 anos de medição nesta área, os autores concluíram que as árvores usavam preferencialmente água do primeiro metro do solo (Almeida *et al.*, 2006). Isto foi atribuído ao fato de as raízes finas se concentrarem nos primeiros 60cm de solo. O sistema de raízes observado por escavação para *E. grandis* em variou de 0,8m aos 2 anos a 1,6m aos 7 anos.

Em revisão, Tiwari e Mathur (1983) concluíram não haver evidências de que rotações de eucalipto rebaixem o lençol freático. Na maioria das condições normais de paisagem, o lençol freático situa-se usualmente bem abaixo do alcance do sistema radicular, e praticamente quase a totalidade da transpiração anual é suprida pela água do solo, isto é, a umidade contida na extensa zona de aeração do perfil. Portanto, a possibilidade de uma extração significativa de água do lençol freático somente ocorreria onde este se encontra normalmente próximo à zona das raízes (Bruijnzeel, 1990).

Uma revisão das técnicas utilizadas para estimar a evapotranspiração pode ser encontrada em Shuttleworth (1994). Conforme Dingman (2002) metodologia mais amplamente utilizada e recomendada, caso haja disponibilidade de dados, para estimativa da evapotranspiração é o método de Penman-Monteith (Monteith, 1965). Em 1948, Penman combinou o balanço energético com o método de transferência de massa e derivou uma equação para calcular a evaporação de uma superfície aberta de água a partir de dados climatológicos. Monteith (1965) mostrou como a equação de Penman

poderia ser modificada para representar a taxa de evapotranspiração de uma superfície vegetada por meio da incorporação da resistência da superfície.

Além da resistência aerodinâmica, o processo de transpiração é limitado também pela resistência associada ao controle que as plantas exercem sobre sua perda de água a atmosfera. O movimento do vapor de água de dentro das folhas para o ar fora das mesmas ocorre através de pequenas aberturas na superfície das folhas que são chamadas de estômatos. As plantas controlam a abertura ou fechamento das cavidades estomatais em resposta aos fatores ambientais. Quando se considera apenas este processo, as espécies florestais apresentam um melhor controle que espécies de gramíneas, através do fechamento dos estômatos (Lima, 1993). Este fechamento dos estômatos pode ser entendido como uma estratégia evolutiva de maximizar a eficiência do uso da água.

Vários fatores controlam as interações entre o sistema solo-planta-atmosfera em plantios de eucalipto, dentre os quais se destacam os fatores fisiológicos e as condições ambientais. As principais variáveis ambientais que controlam as trocas gasosas entre o dossel vegetal e a atmosfera são: irradiância solar, disponibilizando energia para o processo de evaporação e transpiração; temperatura do ar, controlando o déficit de pressão de vapor entre a cavidade estomatal e a atmosfera; disponibilidade de água no solo, e que regula a abertura estomática e consequentemente o processo de difusão do vapor de água entre a cavidade estomatal e a atmosfera (Carneiro *et al.*, 2008). Tais fatores operam de forma direta e também através de efeitos iterativos e podem afetar também a produtividade. Uma revisão da regulação fisiológica em florestas de eucaliptos é apresentada por Whitehead e Baedle (2004) que analisaram os principais fatores que controlam a produtividade, o consumo de água e o balanço hídrico nas plantações florestais.

A resistência estomatal de toda a copa, referida como resistência superficial é menor quando mais folhas estão presentes, pois haverá mais estômatos através dos quais o vapor de água transpirado possa se difundir. Dessa forma, a taxa de transpiração varia diretamente com o IAF (Hubbard *et al.*, 2009), sendo explicada em grande parte por este índice e pelo déficit de saturação do ar em condições de boa umidade do solo (Whitehead e Baedle, 2004). Portanto, numa espécie latifoliada como o eucalipto, a transpiração tende a ocorrer em menores taxas que em espécies coníferas, tais como o

pinus, pois estas últimas possuem uma maior área foliar e menor albedo (índice de reflexão da radiação solar), acarretando uma maior superfície evaporativa e uma maior quantidade de energia disponível para a evaporação (Lima, 1993).

Devido ao maior controle da transpiração, é importante ressaltar que a alta taxa de consumo de água do eucalipto é acompanhada por uma alta taxa de crescimento resultando em valores relativamente elevados de eficiência do uso da água, comparativamente a outras espécies florestais e agrícolas (Lima, 1993; Mielke *et al.*, 1999). De acordo com Mielke *et al.* (1999), este índice é utilizado para melhor entender alterações no uso de água e no crescimento com o desenvolvimento do povoamento e para auxiliar na escolha de espécies que melhor se adequem a locais onde o consumo de água deve ser restringido.

#### **2.4.4 Redução da vazão de rios**

Devido ao aumento das perdas por evapotranspiração, o florestamento com espécies de eucaliptos pode produzir uma redução da vazão de rios. Contudo, há uma grande variabilidade da resposta hidrológica das microbacias, que em parte pode ser explicada pela intensidade e regime da precipitação, pela taxa de regeneração da floresta, pela localização das áreas de corte em relação à superfície total da microbacia, pela textura e profundidade do solo e pela idade e densidade da floresta (Hubbard *et al.*, 2009; Leite *et al.*, 1999; Bruijnzeel, 1990, Calder, 1986). Logo, é essencial que a relação entre cobertura vegetal e produção de água seja determinada para cada região em particular.

Como valores médios, podemos citar o trabalho de Bosch e Hewlett (1982, *apud* Brown *et al.*, 2005) que, após a revisão de 94 bacias experimentais localizadas principalmente em zonas temperadas, concluíram que coníferas e eucaliptos causam uma mudança média de aproximadamente 40mm no escoamento superficial anual por 10% de mudança na cobertura florestal das microbacias. Também verificaram que a resposta na produção de água das microbacias ao desmatamento ou implantação de cobertura florestal depende, em ambos os casos, da precipitação média anual da região, e que, em áreas de floresta, a diminuição na produção de água parece ser proporcional à taxa de crescimento do talhão florestal.

Lima (1993) apresenta dados sobre resultados obtidos em bacias hidrográficas experimentais, os quais mostram os efeitos do florestamento sobre a produção de água. O autor observou que estes efeitos variam de acordo com a proporção da área da bacia que é submetida ao corte, ou que foi reflorestado.

Como as perdas por interceptação de eucaliptos são geralmente menores que de outras espécies arbóreas (devido ao menor IAF) de altura e densidade de plantações similares, e as taxas de transpiração do eucalipto são geralmente aproximadamente similares a de outras espécies arbóreas, exceto em situações com aquífero raso, a redução de vazão ocasionada pelo plantio de eucaliptos deve ser similar a de outras espécies florestais (Bruijnzeel, 1990; Lima, 1993). Almeida e Soares (2003) compararam a evapotranspiração e o consumo de água de plantações de eucalipto (*E. grandis*) e remanescentes da Mata Atlântica numa microbacia em Aracruz-ES, obtendo resultados semelhantes para ambas vegetações. Foi observado também que o eucalipto exerce controle estomático eficiente em condições de baixa disponibilidade hídrica do solo. Considerando o ciclo de crescimento como um todo (cerca de 7 anos), os autores concluíram que o eucalipto pode consumir menos água que a vegetação nativa na região estudada.

Um resumo do uso de bacias pareadas para avaliar os impactos das mudanças da vegetação sobre a produção de água e regime de fluxo é apresentado por Brown *et al.* (2005). As mudanças na produção de água nos estudos analisados foram relatadas em escalas temporais referentes às médias anual, sazonal ou mensal. Os autores observaram que o impacto da mudança na vegetação na produção sazonal de água pode ser tão ou mais importante que o impacto na produção anual de água.

Quanto à regulação da vazão, as consequências do florestamento sobre a vazão durante enchentes e no período seco são bastante variáveis. Calder *et al.* (2007), após revisão sobre o tema, observou que o florestamento pode mitigar enchentes pequenas e em um nível local, mas não aparentam influenciar eventos extremos ou na escala de grandes bacias. Além disso, embora seja possível que a infiltração extra associada ao florestamento de microbacias anteriormente degradadas resulte em aumento das vazões nos períodos secos, isto raramente tem sido observado. O autor afirma que o que se tem verificado normalmente é que o florestamento reduz as vazões no período seco tanto quanto ou mais do que provoca redução na produção de água anual. Lima (1993),

entretanto, analisando dados de microbacias experimentais, verificou que a maior parte da redução do deflúvio ocorreu nas estações chuvosas. Azevedo (1995), citado por Oleriano e Dias (2007), ao comparar microbacias cobertas com mata nativa, pastagem e *Eucalyptus grandis*, percebeu que a terceira bacia apresentava saída de água mais lenta, se comparada à bacia coberta somente com pasto, e baixo coeficiente de variação da vazão.

Com base no exposto, verifica-se que desde que a precipitação anual seja suficiente, deve ocorrer mesmo um aumento das perdas por interceptação e transpiração devido à mudança de uma vegetação de menor porte para plantações florestais. Entretanto, estas perdas são semelhantes ao de outras espécies florestais.

Ressalta-se que os resultados apresentados pertencem a bacias relativamente pequenas. Embora forneçam uma figura clara e consistente da redução da vazão após a substituição de uma vegetação baixa por uma alta, os efeitos da conversão podem ser mais difíceis de definir no caso de grandes bacias com variedades de usos do solo e vegetação em vários estágios de regeneração (Bruijnzeel, 1990; Calder *et al.*, 2007). Além disso, conforme salienta Sun *et al.* (2008), poucos estudos examinam as mudanças na estrutura e composição florestal, e associam mudanças ecofisiológicas com a hidrologia da bacia. Os estudos que consideram, utilizam dados de microbacias experimentais que ainda não são disponíveis na maioria dos locais.

Uma forma bastante comum de avaliar seu efeito hidrológico é através do balanço hídrico de microbacias que considere as características edáficas e climáticas do local, as características do uso do solo e da vegetação e disponibilidade de água no solo. Para a quantificação dos impactos associados ao florestamento foram utilizadas bacias experimentais e bacias pareadas (onde apenas uma sofre alteração do tipo de cobertura). Entretanto, o monitoramento das bacias é caro e os dados são demorados de se obter tendo em vista a duração dos ciclos florestais e ainda há poucos estudos deste tipo em diversas regiões.

Logo, a simulação hidrológica aparece como uma ferramenta bastante útil para estimar os impactos do florestamento sobre os recursos hídricos. A forma de retratar os processos hidrológicos varia com a magnitude das bacias, com os objetivos do estudo envolvido, com a disponibilidade de dados e com a precisão desejada (Collischonn, 2001).

É importante lembrar, entretanto, que este efeito hidrológico pode ser minimizado através da adoção de práticas ambientalmente sadias de manejo florestal (FAO, 1993; Lima, 1996), objeto de análise do presente trabalho. Um equilíbrio deve ser estabelecido entre o cultivo de uma grande biomassa rapidamente ou, alternativamente, o crescimento de uma biomassa menor durante um período de tempo maior. O crescimento rápido e elevada produção de biomassa de eucalipto exige o consumo de muita água e esse consumo, apesar de eficiente em termos de biomassa produzida deve ser equilibrado com outras necessidades de abastecimento de água.

## **2.5 Modelagem de otimização**

O grau de complexidade das interações temporais e espaciais sobre a produção assume uma magnitude muito ampla nas organizações florestais. Assim, ao se elaborar um programa de gerenciamento florestal, são muitas as variáveis e informações que devem ser consideradas e frequentemente faz-se uso de técnicas matemáticas de apoio à decisão (Rodriguez e Moreira, 1989; Amaral, 2002).

O problema de como utilizar recursos escassos limitados para maximizar benefícios é bastante comum em vários ramos da ciência florestal. Para atacar este tipo de problema é comum a utilização do conjunto de técnicas da programação matemática (Soares, 1972).

A programação matemática se preocupa com a alocação ótima de recursos escassos entre atividades alternativas fornecendo informações que auxiliam os tomadores de decisão. A programação é principalmente útil na definição de quando, quanto e onde cortar; quando, quanto e onde reformar e que regime de manejo adotar em cada talhão respeitando restrições operacionais e de recursos da empresa e, ao mesmo tempo, maximizando os retornos sobre os investimentos realizados (Rodriguez e Moreira, 1989).

No processo de escolha da alternativa ótima, ao longo dos anos, varias técnicas foram desenvolvidas, sendo as mais conhecidas: a programação linear; a programação dinâmica e a simulação. O número de variações existentes na literatura é bastante extenso (Braga, 1987).

Em geral, o modelo de otimização é constituído por uma função objetivo  $f(x)$ , que se quer maximizar ou minimizar, onde  $x_i$  são as variáveis de decisão do problema. Além

da função objetivo, comparecem também as  $m$  funções de restrição  $g_i(x)$ ,  $i=1...m$ , que determinam a região viável das variáveis de decisão. Assim, pode-se representar o problema de otimização por:

Maximize (ou minimize)  $z = f(x)$

Sujeito a  $g_i(x) \leq b_i$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ .

onde, além das variáveis descritas anteriormente,  $b_i$ ,  $i=1...m$ , são parâmetros do modelo.

Dentre as técnicas de otimização, a programação linear é a que mais se desenvolveu e a que apresenta maior número de aplicações (Braga, 1987). Como o próprio nome diz, essa técnica é um caso particular do modelo geral de otimização quando o conjunto de restrições e a função objetivo são lineares.

A programação linear é aplicada em larga escala em soluções de problemas de gestão de recursos florestais. O modelo linear permite a formalização de alguns objetivos e restrições comuns em recursos florestais e sua solução oferece informações interessantes para a análise de decisão (Falcão e Borges, 1999).

Rodriguez e Borges (1983) apresentam modelos básicos para tratamento desse problema e alterações deste modelo básico para garantir algumas premissas de produção. O modelo matemático básico de programação linear usado para definir o problema de planejamento da colheita florestal consiste na maximização do valor presente líquido total do projeto (função objetivo) sujeito a restrições de:

- área total da unidade de gestão;
- volumes totais mínimos e máximos de produção em cada período e para cada produto;
- capacidade operacional mínima e máxima (colheita, plantio, ...) em cada período; e
- restrições de fluxo de caixa, para que um equilíbrio orçamentário operacional seja sempre alcançado.

As alterações propostas incluem o acréscimo das seguintes restrições:

- exata obtenção de uma cota de produção periódica constante;
- produção de cotas periódicas não decrescentes; e
- a realização de fluxos periódicos que minimizam a soma dos desvios com relação a um certo valor fixo.

Entretanto, a gestão florestal amparada nas técnicas matemáticas de otimização pode ir além da maximização dos retornos como nos modelos tradicionais (Rodríguez e Borges, 1983). É capaz de considerar simultaneamente a meta de se atingir o manejo de uma floresta balanceada, a fase de transição para esta situação, além de questões econômicas, operacionais e ambientais. Whitehead e Baedle (2004) afirmam que a utilização de modelos em florestas nativas e plantadas de eucalipto confirma a utilidade do uso de ferramentas de gerenciamento para prever a produtividade e o consumo de água, considerando as diferenças entre as espécies, os efeitos do clima e as opções para a gestão silviculturais.

Dessa forma, um dos principais desafios enfrentados pelos gestores de uso do solo, florestais e de recursos hídricos é maximizar a gama de benefícios multi-setoriais da floresta sem prejuízo dos recursos hídricos e da função do ecossistema (Calder *et al.*, 2007). Para tanto, disponibilidade de água, práticas de manejo e produtividade devem ser analisados de forma conjunta. Um estudo desenvolvido por Stape *et al.* (2004) em Entre Rios (BA), por exemplo, observou que as florestas mais produtivas foram as que utilizaram mais recursos (água, luz e nitrogênio). Mas esses plantios também foram os que apresentaram maior eficiência no uso dos recursos. Ao concluir os estudos foi observado que era possível manter a mesma produtividade florestal utilizando apenas a metade da área plantada ou consumindo 49% menos de água apenas alterando o manejo da área.

Apesar da reconhecida importância, poucos modelos encontrados na literatura consideram metas de proteção dos recursos hídricos que auxiliam os gestores florestais na escolha de melhores práticas de manejo. O modelo apresentado por Hornbeck e Smith (1997 *apud* Amaral, 2002), baseado no plano de corte da floresta, fornece ao gestor uma previsão dos impactos na qualidade e na quantidade de água, que ocorreriam se aquela prescrição fosse implementada, e ainda, fornece alternativas aproximadas de planejamento que minimizam os impactos sobre os recursos hídricos. Twery e Hornbeck (2001) apresentaram um software de auxílio à decisão, o NED, que possui uma estrutura de análise de alternativas de gestão florestal baseado em metas definidas. Entre os objetivos incluídos há parâmetros de quantidade de água, como aumento da vazão, manutenção da vazão mínima e limitação do pico de vazão.

Rowse e Center (1998) apresentaram um modelo de PL que maximizava o valor presente líquido da produção de madeira considerando, além da madeira, a água como um produto florestal com um valor moderado e outro mais alto. A área de análise situava-se no Canadá e era caracterizada por processos hidrológicos predominantemente determinado pela neve. Nesse contexto local, foi analisado o uso de blocos de corte menores no local, pois esses tendem a reter mais neve produzindo um aumento posterior no escoamento. Porém este tipo de colheita é mais caro. O escoamento de água foi modelado em função dos hectares colhidos, enquanto a maioria dos modelos utilizam a abordagem de prescrições, alterando o regime de manejo adotado. Os valores para o escoamento adotados deixaram o padrão ideal de colheita praticamente inalterado, não cobrindo os custos adicionais de se utilizar blocos de corte menores. Os autores destacam que esse resultado pode ser alterado em função dos preços adotados e da consideração de outros benefícios da utilização de blocos menores

Amaral (2002) comparou o resultado obtido por modelos que maximizavam o valor total do projeto, com restrições de área e de produção de madeira não-decrescente. Dois dos três modelos utilizados incluíam também uma restrição relativa ao indicador hidrológico analisado (deflúvio): deflúvio não crescente e deflúvio máximo permitido, visto que objetivava o controle da erosão. Os resultados mostraram que a inclusão das restrições hidrológicas no modelo afetou o manejo, resultando em valores presentes líquidos globais diferentes para cada modelo. O cálculo do deflúvio utilizado é bastante simplificado, baseado apenas em uma relação simples entre volume de madeira em pé e deflúvio observado.

Desse modo, verifica-se que, embora diversos estudos demonstrem a relação entre alteração da vazão e regime de manejo adotado em uma microbacia com plantações florestais, faltam esforços semelhantes para a utilização dessas informações como parte formal dos modelos de gestão. Sobretudo em locais onde os impactos ambientais da silvicultura geram escassez de recursos naturais, o uso racional desse recurso deve ser priorizado. O objetivo da gestão deveria, então, incluir a redução dos impactos ambientais, a exemplo da redução da vazão devido ao florestamento, além da viabilidade econômica do empreendimento.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia proposta consiste na elaboração de um modelo de otimização da produção de madeira que inclua condicionantes hidrológicos. Para tanto, fez-se necessária a busca de dados que possibilitassem a construção da função do valor total do projeto, das restrições impostas pelas características do empreendimento e da restrição à redução da vazão devido à implantação do empreendimento na bacia hidrográfica.

A partir das opções disponíveis para a área foram definidas as alternativas de regimes de manejo. Para cada uma dessas alternativas foi analisado o impacto hidrológico estimado e o valor do projeto por unidade de área.

Um modelo de balanço hídrico simplificado foi utilizado para estimar a vazão resultante de cada regime de manejo e compará-las à situação anterior ao povoamento de eucalipto (com pastagem ocupando apenas a atual área de produção). Para tanto o modelo deveria ser sensível às características da vegetação e à sua variação ao longo da idade do plantio e de acordo com as práticas de manejo.

A partir desses resultados foram estabelecidos diferentes níveis de restrição à maximização do lucro com base em um indicador hidrológico. Os resultados dos modelos de programação linear utilizados serão analisados comparando-se os diferentes cenários. A Figura 3.1 ilustra a metodologia proposta. Os códigos fonte utilizados encontram-se no anexo A.

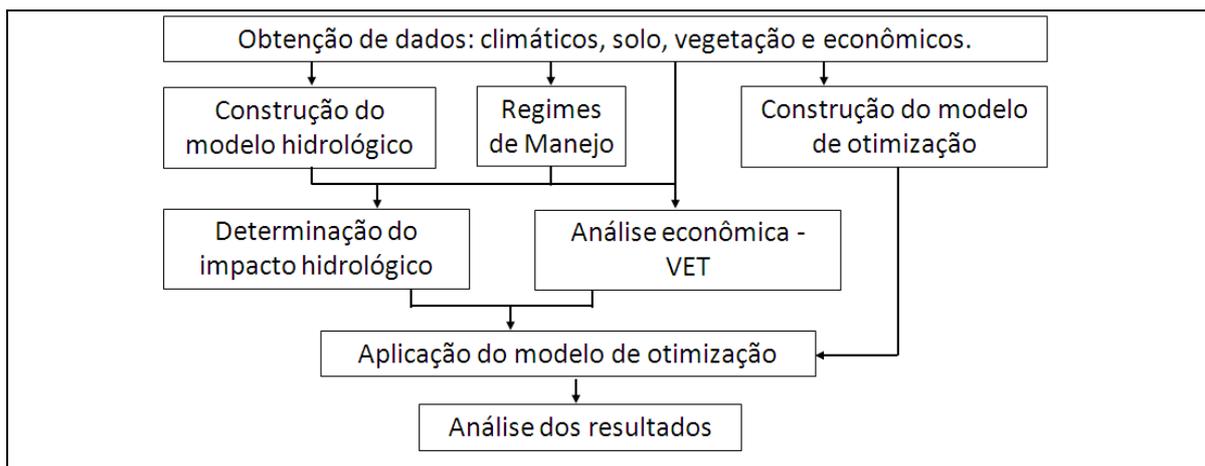


Figura 3.1: Fluxograma metodológico.

### 3.1 Obtenção dos dados

Para a realização deste trabalho necessitou-se de dados da bacia hidrográfica e da plantação de eucalipto (fisiológicos e econômicos). Fontes de dados do local de estudo foram prioritariamente utilizados. Entretanto, devido a não disponibilidade de dados característicos da vegetação suficientes, utilizou-se da literatura específica para situações semelhantes.

#### 3.1.1 Dados relacionados à geração dos cenários

Para a geração dos cenários foi necessário conhecer o conjunto de prescrições de cada uma das alternativas de regime de manejo (RM). Os RM foram gerados a partir dos dados fornecidos pela empresa responsável pela área de estudo de acordo com as características do local e objetivo da produção. Os dados combinados foram: unidade de manejo (definidas pelo índice de sítio), idade mínima e máxima permitidas para o corte em cada rotação, número de rotações mínimo e máximo, densidade do povoamento, material genético e idade da plantação no início do período de análise, de modo a formar o mosaico da plantação.

#### 3.1.2 Dados relacionados à análise do impacto hidrológico

Cada um dos RM analisados foram simulados pelo modelo hidrológico proposto, a fim de se obter a série temporal da vazão de saída da bacia. As variáveis utilizadas encontram-se resumidos na Tabela 3.1. As características da vegetação listadas foram definidas para a situação de pastagem e para cada um dos RM, considerando a variação ao longo do ciclo de plantio.

Tabela 3.1: Variáveis utilizados para análise do impacto hidrológico.

Dados climatológicos		
Precipitação	$P$	mm
Radiação incidente	$Ri$	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
Velocidade do vento	$va$	$\text{m.s}^{-1}$
Umidade do ar	$Uar$	%
Temperatura	$T$	°C
Características dos solos dominantes		
Ponto de murchamento	$U_{pm}$	--
Capacidade de campo	$U_{cc}$	--
Características da vegetação		
Índice de área foliar	$IAF$	$\text{m}^2 \text{folha.m}^{-2} \text{ solo}$
Coeficiente de extinção luminosa	$k$	--
Altura	$z_{veg}$	m
Profundidade do sistema radicular	$z_r$	mm

### **3.1.3 Dados relacionados ao modelo de otimização**

Para a utilização do modelo de otimização proposto, foram considerados os seguintes parâmetros:

- Indicador hidrológico utilizado: redução média anual da vazão para cada regime de manejo em cada unidade básica de manejo (UBM) analisada, obtida pela utilização do modelo de balanço hídrico;
- Área produtiva de cada UBM;
- Preço da madeira;
- Custos de plantio, manutenção e colheita para cada cenário analisado;
- Curvas de produção de cada regime de manejo em cada UBM.

### **3.2 Formulação do modelo de otimização**

O modelo de otimização utilizado maximiza o valor esperado de terra do projeto, considerando que toda a produção será destinada à produção de um único produto. A área de planejamento corresponde à parcela do empreendimento inserida na bacia hidrográfica de análise.

A manutenção da maximização do valor do projeto foi mantida de forma a aproximar esta análise da atual forma de gestão dos empreendimentos florestais. Com o mesmo objetivo, o fator hidrológico não foi internalizado nesta análise, mas sim adicionado como uma restrição no modelo de gerenciamento florestal.

As restrições consideradas dizem respeito à área disponível para plantação em cada unidade básica de manejo e à inclusão de uma restrição relativa à diminuição do impacto hidrológico. Não foram consideradas restrições de caráter econômico, a exemplo de manutenção de uma produção constante ou não decrescente, devido à pequena área da microbacia em comparação ao tamanho do horto florestal.

Uma vez que o parâmetro utilizado para caracterizar as diferenças espaciais dentro da microbacia de estudo foi o índice de sítio (IS), tanto econômica quanto hidrologicamente, as UBMs consideradas correspondem às áreas de mesmo IS. A duração do horizonte de planejamento corresponde ao período do maior ciclo considerado.

### 3.2.1 Função objetivo

A função objetivo foi definida de modo a maximizar o valor total do projeto, ou seja:

$$\text{Max VET} = \sum_{u=1}^U \sum_{m=1}^M (\text{VET}_{um} \cdot A_{um}) \quad 3.1$$

onde:

*VET*: valor total do projeto [R\$];

*m*: número de regimes de manejo ( $m = 1, 2, \dots, M$ );

*u*: número de unidades básicas de manejo ( $u = 1, 2, \dots, U$ );

*VET<sub>mu</sub>*: valor esperado de terra do regime de manejo *m* aplicado numa unidade de área *u* [R\$.m<sup>-2</sup>];

*A<sub>mu</sub>*: Área designada à prescrição *m* na unidade de manejo *u* [m<sup>2</sup>].

Conforme visto anteriormente, o valor esperado de terra para cada regime de manejo em cada unidade de gestão é dado por:

$$\text{VET}_{um} = \frac{\sum_{t=0}^n [R_t(1+j)^{-t} - C_t(1+j)^{-t}]}{1 - (1+j)^{-n}} \quad 3.2$$

onde:

*n*: duração do ciclo florestal;

*t*: período de ocorrência das receitas e dos custos;

*R<sub>t</sub>*: receitas em reais no período *t* [R\$.m<sup>-2</sup>];

*C<sub>t</sub>*: custos em reais no período *t* [R\$.m<sup>-2</sup>];

*j*: taxa de juros.

A receita por unidade de área para cada regime de prescrições em cada unidade é dada pelo produto da quantidade da madeira produzida por área pelo preço de venda do volume de madeira entregue na fábrica e ocorre ao final de cada rotação. Os custos variam conforme a idade do plantio correspondendo a:

- Custos de plantio ou rebrota (primeiro ano de cada rotação);
- Custos de colheita e transporte (último ano de cada rotação); e
- Custos de manutenção (demais anos).

O índice econômico VET foi escolhido por permitir a comparação de projetos com horizontes de planejamento distintos.

### 3.2.2 Restrições

#### a) Restrição de área

A restrição de área indica que a soma das áreas atribuídas às diferentes prescrições em uma UBM não pode superar a área total dessa unidade de gestão:

$$\sum_{m=1}^M A_{um} \leq A_u \quad 3.3$$

onde:

$A_u$ : área da UBM  $u$  [ $m^2$ ].

#### b) Restrição de Impacto Hidrológico

A restrição de impacto hidrológico foi adicionada ao modelo visando a identificação de um planejamento da área que reduza os impactos hidrológicos devido à implantação do empreendimento silvicultural. O indicador hidrológico utilizado foi a vazão anual. Ressalta-se que, conforme destacado por Twery e Hornbeck (2001), não há na literatura um modo consagrado de se avaliar o efeito do florestamento no deflúvio. Uma vez que há uma tendência de relação linear entre a porcentagem da área da bacia que sofre mudança de cobertura vegetal e a mudança na produção de água verificada (Brown *et al.*, 2005), as equações de limite a redução da vazão para todos os anos do período de análise será:

$$\sum_{u=1}^U \left( \sum_{m=1}^M q_{umt} \cdot A_{um} \right) \leq q \cdot A \quad 3.4$$

$$A = \sum_{u=1}^U A_u \quad 3.5$$

onde:

$q_{umt}$  : redução média da vazão anual devido ao regime de manejo  $m$  na unidade de manejo  $u$  referente ao estágio do plantio no período  $t$  [mm];

$q$  : redução máxima da vazão anual permitida [mm];

$A$  : área de planejamento [ $m^2$ ].

Diferentes valores de  $q$  (300, 200 e 100mm.ano<sup>-1</sup>) foram utilizados objetivando avaliar o impacto da inclusão da restrição hidrológica na definição do plano de manejo obtido pelo modelo de otimização. Os valores foram escolhidos em função dos valores de redução da vazão obtidos para os diferentes manejos possíveis para a área, os quais variaram entre 393 a 64mm.ano<sup>-1</sup>. Para a área de estudo (0,81km<sup>2</sup> de plantio de eucalipto), as restrições impostas correspondem a reduções máximas de vazão de 2430000, 1620000 e 81000m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>, respectivamente. Também foi analisado o plano de manejo economicamente ótimo, sem restrição hidrológica.

Os resultados dos modelos são os valores de  $A_{um}$ , isto é, a área de cada regime de manejo em cada UBM, correspondente ao plano de manejo considerado ótimo para o local, e o respectivo VET.

### **3.3 Construção do modelo de otimização**

#### **3.3.1 Determinação dos coeficientes da função objetivo e geração das alternativas de manejo**

Para a determinação dos coeficientes da função objetivo e geração das alternativas de manejo foi desenvolvido um aplicativo em Matlab. As etapas utilizadas foram:

- a) Gerar todas as alternativas de manejo possível para a área considerando: idade mínima e máxima de corte, número mínimo e máximo de rotações por ciclo, espaçamentos possíveis, diferentes características de talhões (índice de sítio) e diferentes idades iniciais no início do período de análise;
- b) Gerar o fluxo de caixa de todos os regimes de manejo possíveis a partir das informações de: tabela de produção, custos e preço da madeira;
- c) Determinação do VET de cada regime de manejo, em cada unidade de manejo, a partir da definição da taxa de juros considerada.

#### **3.3.2 Determinação das restrições hidrológicas**

As restrições hidrológicas foram determinadas utilizando o modelo hidrológico simplificado descrito no item a seguir. Para cada prescrição de manejo em cada UBM, foi

estimado o excedente hídrico (escoamento superficial e drenado para fora da zona radicular) total anual ao longo do ciclo de plantação por unidade de área. Estes valores foram comparados com o estimado no mesmo período para a situação de pastagem. A diferença entre o volume escoado nas situações com pastagem e com eucalipto equivale à redução média da vazão anual utilizada na restrição hidrológica do modelo de otimização.

### **3.4 Estimativa de impacto hidrológico**

Considerando a expectativa de aumento do consumo de água devido às plantações de eucalipto, é apresentado o modelo hidrológico simplificado utilizado neste trabalho para simulação deste possível impacto ambiental, considerando a variação das características da vegetação ao longo do seu ciclo.

O modelo utiliza o balanço hídrico diário na zona radicular para estimar a vazão de saída da microbacia. O balanço de água é realizado para cada unidade de manejo da microbacia, considerando as diferentes prescrições de manejo. Os escoamentos gerados em cada área são então somados, resultando no escoamento final da microbacia. Destaca-se que não é considerada no modelo a interação com o lençol freático e o processo de ascensão capilar, devido à ausência de dados que permitam a incorporação destes processos ao modelo e a proteção da zona ripária onde estes processos seriam mais importantes. Em locais onde esta influência seja significativa é necessário um estudo mais detalhado que considere a água subterrânea.

A determinação do total interceptado foi baseada em Valente *et al.* (1997), com a taxa de evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, conforme metodologia apresentada por FAO (2006). Estes processos são detalhados nos itens a seguir. Valente *et al.* (1997) ressalta que, embora a equação de Penman-Monteith tenha derivado de dosséis fechados, é assumido que também fornece boas estimativas da capacidade de evaporação da atmosfera sobre uma floresta esparsa.

Não é definida a água na vegetação porque ela representa normalmente uma pequena parte do balanço hídrico (Running, 1984, *apud* Running e Coughlan 1988). Também não foi considerado o papel da serrapilheira no aumento das perdas por interceptação e na diminuição da evaporação do solo, sendo o resultado destes processos considerado como desprezível.

Ressalta-se que nas equações apresentadas a seguir os valores de todos os parâmetros correspondem ao mesmo instante de tempo  $t$ , exceto quando houver indicação pelo índice  $t-1$  de que corresponde ao valor no intervalo de tempo anterior.

### 3.4.1 Intercepção

Do total precipitado, parte é interceptada no dossel florestal. A parcela não interceptada (precipitação interna) atinge o solo, apresentando-se como entrada do reservatório do solo.

Para a determinação da intercepção, utilizou-se a reformulação do modelo de Rutter (1975) para áreas com vegetação esparsa proposto por Valente *et al.* (1997), desconsiderando as perdas por intercepção dos troncos. Esta simplificação, entretanto, não deve resultar em erros significativos uma vez que corresponde a uma parcela muito pequena em relação à perda total por intercepção (Valente *et al.*, 1997).

As modificações propostas ao modelo original de Rutter visam restringir a área de evaporação apenas a área do dossel, pois esta é bastante reduzida em vegetações esparsas, de modo a evitar uma superestimativa das perdas por intercepção.

A ideia básica deste modelo é dividir a área total em duas distintas sub-áreas nas quais os cálculos são feitos separadamente: a área descoberta e a área coberta. O parâmetro que ajusta a área na qual os processos de intercepção ocorrem é a fração de cobertura vegetal ( $c$ ). Este parâmetro indica a proporção de área coberta relativamente à área total e pode ser relacionado com outra variável que descreve a densidade do dossel florestal: o índice de área foliar ( $IAF$ ).

Os parâmetros  $IAF$  e  $c$  podem ser relacionados pela equação de Beer-Lambert que descreve a atenuação da radiação (por exemplo a radiação fotossinteticamente ativa) como uma função do  $IAF$ , conforme apresentado por van Dijk e Bruijnzeel (2001). A relação entre estes parâmetros é, então, expressa pela equação:

$$c = 1 - e^{-k \cdot IAF} \quad 3.6$$

onde :

$c$  : fração de cobertura vegetal [-];

$IAF$  : Índice de área foliar [ $m^2 \cdot m^{-2}$ ];

$k$  : coeficiente de extinção luminosa [-].

Dessa forma, a fração de cobertura vegetal e a interceptação variam com o tipo e com o estágio de desenvolvimento da vegetação de acordo com as modificações no IAF.

O coeficiente de extinção luminosa ( $k$ ) para uma radiação de comprimento de onda particular depende da distribuição das folhas e do ângulo de inclinação. Van Dijk e Buijnzeel (2001) citam que os valores de  $k$  encontram-se usualmente no intervalo entre 0,6 e 0,8 em florestas (Ross, 1975), e entre 0,2 e 0,8 para um número de culturas agrícolas (van Heemst, 1988), com valores entre 0,5-0,7 sendo os mais comuns. Degushi *et al.* (2005) relata valores de  $k$  variando entre 0,29 e 0,65 para florestas com espécies latifoliadas e entre 0,28 e 0,62 para espécies coníferas (Jarvis e Leverenz, 1983), sendo mais alto em sistemas culturais (van Dijk e Buijnzeel, 2001).

A Tabela 3.2 exibe alguns valores do coeficiente  $k$  obtidos direta ou indiretamente para plantações de eucalipto. Com base nestes valores, foi assumido neste trabalho  $k=0,45$ .

Tabela 3.2: Valores de  $k$  utilizados para plantações de eucalipto:

Espécie	Coef. de extinção luminosa, $k$	IAF médio	Referência
<i>E. grandis x urophylla</i> Entre Rios (BA)	0,36	2,8	Stape <i>et al.</i> (2004a)
<i>E. grandis x camaldulensi</i> South Africa, 3-7 anos	0,45	1,2-4,2	Dye <i>et al.</i> (2004)
<i>E. grandis</i> Aracruz (ES), 2,5-4 anos	0,5	2,0-3,0	Almeida <i>et al.</i> (2006)
<i>E. grandis x urophylla</i> Entre Rios (BA)	0,4	2,8-3,3	Stape <i>et al.</i> (2004b)
Valor típico	0,5		Esprey <i>et al.</i> (2004)

Com a divisão em sub-áreas, o processo de interceptação apenas ocorre na parcela coberta, sendo a precipitação que atinge o solo na área descoberta dada por:

$$P_d = (1 - c) \cdot P \quad 3.7$$

onde:

$P_d$ : precipitação na área descoberta [mm];

$P$ : precipitação [mm].

Na área coberta, considera-se que toda a precipitação será interceptada pela copa até que esta se encontre saturada, ou seja, até que seja atingida a capacidade de armazenamento do reservatório do dossel em relação à área coberta. Diversos autores

têm determinado a capacidade de armazenamento do dossel como o produto de um valor característico da capacidade de armazenamento por unidade de área foliar pelo *IAF* (van Dijk e Bruijnzeel, 2001; Gash *et al.*, 1995; Liu, 1996). Dessa forma, a capacidade de armazenamento do dossel em relação à área coberta é dada por:

$$C_{ac} = \frac{IAF \cdot iafe}{c} \quad 3.8$$

onde:

$C_{ac}$ : capacidade de armazenamento do dossel na área coberta [mm];

$iafe$ : capacidade de armazenamento do dossel por unidade de área foliar [mm].

Dingman (2002) cita o valor de 0,15mm para o  $iafe$ , enquanto Valente *et al.* (1997) refere-se a valores de 0,2 a 1,0mm. Collischonn *et al.* (2007) adota um valor fixo de 0,2mm em modelo de grandes bacias. Optou-se neste trabalho por utilizar também o valor fixo de 0,2mm.

O excesso de precipitação não interceptada na área coberta drena para a camada superficial do solo. A função da drenagem é, então, dada por:

$$D_c = \begin{cases} P - (C_{ac} - Rf_{t-1}), & \text{se } P > (C_{ac} - Rf_{t-1}) \\ 0, & \text{se } P \leq (C_{ac} - Rf_{t-1}) \end{cases} \quad 3.9$$

onde:

$D_c$ : drenagem da copa [mm];

$Rf_{t-1}$ : quantidade de água armazenada no reservatório do dossel [mm].

O processo de esvaziamento do reservatório do dossel ocorre pela evaporação da água interceptada ( $E_{dc}$ ). O total evaporado é limitado pela disponibilidade de água para evaporar presente no reservatório do dossel e pela evaporação potencial calculada pela equação de Penman-Monteith (anexo B) com a resistência superficial equivalente a zero.

Ou seja,

$$E_{dc} = \text{menor} (Rf_{t-1} + P - D_c; Ep) \quad 3.10$$

onde:

$E_{dc}$ : água evaporada do dossel por unidade de área coberta [mm].

$Ep$ : evaporação potencial [mm];

A dinâmica do nível de água no dossel é, portanto, dada por:

$$R_f = R_{f_{t-1}} + P - D_c - E_{dc} \quad 3.11$$

Os resultados finais para toda a área são dados somando-se os valores de cada subárea, considerando que as perdas por interceptação só ocorrem na área coberta. Ou seja:

$$E_{dt} = E_{dc} \cdot c \quad 3.12$$

e

$$P_i = (1 - c) \cdot P + c \cdot D_c \quad 3.13$$

onde:

$E_{dt}$ : perda por interceptação total [mm];

$P_i$ : precipitação interna total [mm].

A Figura 3.2 ilustra o modelo para cálculo da precipitação interna descrito.

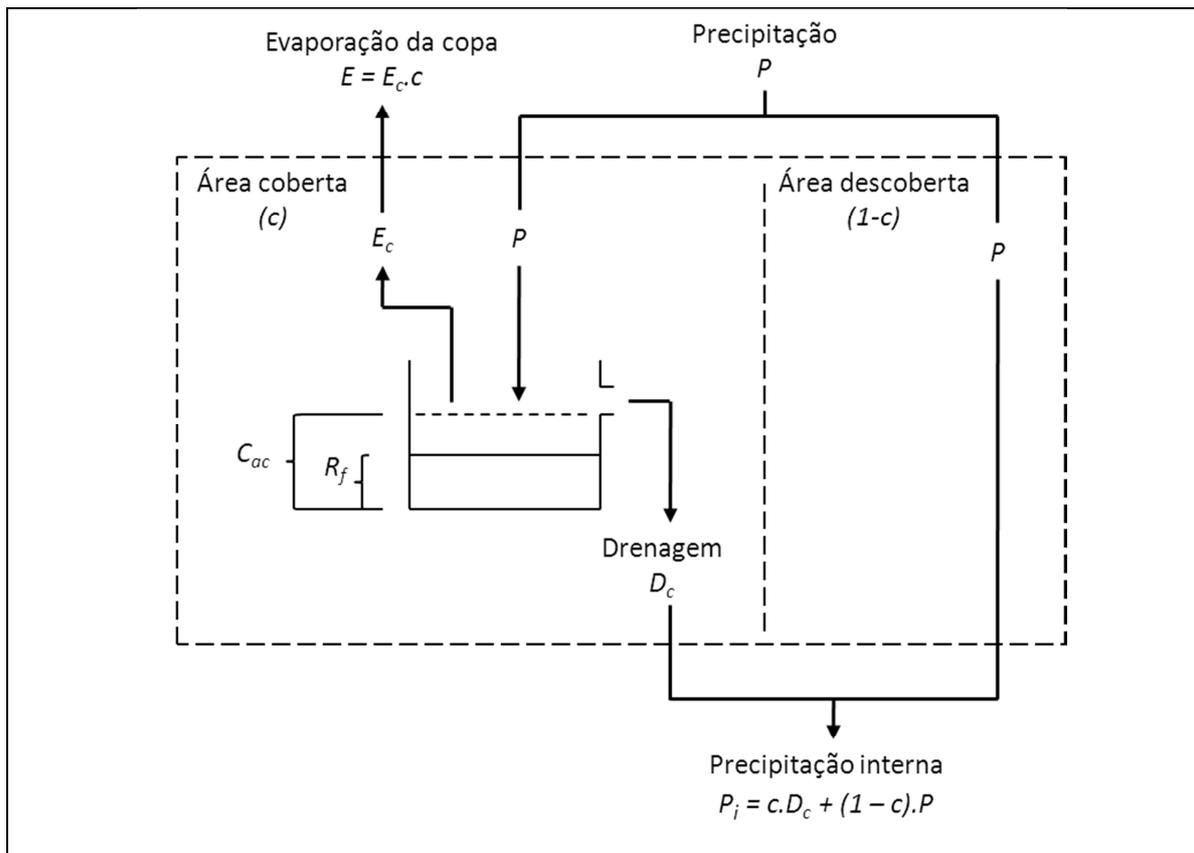


Figura 3.2: Estrutura conceitual do modelo de balanço hídrico no dossel utilizado (adaptado de Valente *et al.*, 2007)

### 3.4.2 Balanço Hídrico na zona radicular

A parcela da precipitação que não é interceptada atinge o solo, considerado como um reservatório capaz de armazenar e ceder água para as plantas. A capacidade deste reservatório é normalmente definida pela capacidade de água disponível (CAD). A CAD representa o limite de água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. O ponto de murcha permanente indica a quantidade de água do solo que não está disponível para as plantas, normalmente retida a tensões superiores a 1500MPa. A umidade do solo na capacidade de campo representa uma quantidade de água que pode ser mantida no solo contra a força da gravidade, sem haver drenagem. Desse limite até o ponto de murcha, a água só pode ser removida por ação direta da evaporação ou evapotranspiração das plantas.

$$CAD = (U_{cc} - U_{pm}) \cdot zr \cdot 1000 \quad 3.14$$

onde:

*CAD*: capacidade de água disponível [mm];

*U<sub>cc</sub>*: umidade volumétrica do solo na capacidade de campo [m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>];

*U<sub>pm</sub>*: umidade volumétrica do solo no ponto de murcha [m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>];

*zr*: profundidade do sistema radicular [m].

Verifica-se que o parâmetro *CAD* depende do tipo de solo e da vegetação, visto que os valores de *U<sub>pm</sub>* e *U<sub>cc</sub>* dependem das características do solo e a profundidade das raízes das plantas determina o quanto de água estará disponível para as mesmas. Dessa forma, vegetações de grande porte que possuem geralmente raízes mais profundas, tendem a possuir mais água disponível para os processos de transpiração que vegetações de menor porte e raízes menos profundas.

Apenas uma parcela da precipitação interna infiltra no solo. A parcela que não infiltra gera escoamento superficial. A separação deste escoamento foi feita utilizando o modelo SCS (Soil Conservation Service), conforme apresentado por Tucci (2004). O solo foi considerado com alta permeabilidade. Para o plantio florestal utilizou-se os valores do CN (curve number) de uma floresta esparsa em crescimento (CN=78 na capacidade de campo). Para a pastagem, considerou-se a situação de pastagem boa (CN=70 na capacidade de campo). Utilizando este modelo, o escoamento superficial é dado por:

$$S_{scs} = \frac{25400}{CN} - 254 \quad 3.15$$

$$Q_{sup} = \begin{cases} \frac{(P_i - 0,2 \cdot S_{scs})^2}{P_i - 0,8 \cdot S_{scs}}, & \text{se } P_i > 0,2 \cdot S_{scs} \\ 0, & \text{se } P_i \leq 0,2 \cdot S_{scs} \end{cases} \quad 3.16$$

onde:

$S_{scs}$  : capacidade máxima da camada superior do solo [-];

$CN$ : curve number [-];

$P_i$ : precipitação interna [mm];

$Q_{sup}$ : escoamento superficial [mm].

Entretanto, o reservatório do solo ( $R_s$ ) apenas consegue manter contra a gravidade e disponível às plantas um valor máximo equivalente a  $CAD$ . Valores de  $R_s$  superiores a  $CAD$  serão então drenados para fora da zona radicular.

$$Q_{dre} = \begin{cases} (Rs_{t-1} + P_i - Q_{sup}) - CAD, & \text{se } CAD < Rs_{t-1} + P_i - Q_{sup} \\ 0, & \text{se } CAD \geq Rs_{t-1} + P_i - Q_{sup} \end{cases} \quad 3.17$$

onde:

$Q_{dre}$ : escoamento drenado para fora da zona radicular [mm];

O esvaziamento do reservatório se dá pelo processo de evapotranspiração (evaporação do solo e transpiração das plantas). Este esvaziamento é limitado pela quantidade de água disponível no solo e pela evapotranspiração potencial. A resistência superficial foi determinada em função do IAF e de fatores ambientais conforme especificado no anexo B.

$$E_t = \text{menor} (Rs_{t-1} + P_i - Q_{sup}; ETp) \quad 3.18$$

onde:

$E_t$  : evapotranspiração [mm];

$ETp$  : evapotranspiração potencial [mm].

O balanço de água na zona radicular é dado pela água armazenada no perfil do solo ao final do tempo  $t$ , sendo dado pelo estoque do período anterior ( $t-1$ ), acrescentado da entrada (precipitação interna,  $P_i$ , ou seja, a precipitação total subtraída da interceptação), e diminuída da saída (evapotranspiração,  $E_t$ , escoamento superficial,  $Q_{sup}$ , e escoamento drenado para fora da zona da raiz,  $Q_{dre}$ ), ou seja:

$$RS_t = RS_{t-1} + P_i - (E_t + Q_{sup} + Q_{dre}) \quad 3.19$$

A diferença entre a vazão total (superficial e drenada) por unidade de área obtida para a situação de pastagem e de eucalipto representa a redução de vazão anual utilizada no modelo de otimização.

### 3.4.3 Evapotranspiração

O modelo utiliza a equação de Penman-Monteith conforme apresentado por FAO (2006). A maioria dos parâmetros podem ser medidos ou podem ser facilmente calculados por dados meteorológicos.

$$E = fc \cdot \left( \frac{\Delta \cdot (R_L - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_w} \quad 3.20$$

onde:

$E$ : taxa de evapotranspiração [ $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ];

$\Delta$ : inclinação da curva de pressão de vapor de saturação [ $\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$R_L$ : radiação líquida [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ];

$G$ : fluxo de calor no solo [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ];

$\rho_a$ : massa específica do ar [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$\rho_w$ : massa específica da água [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$c_p$ : calor específico do ar ( $c_p=1.013 \cdot 10^{-3}$ ) [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$(e_s - e_a)$ : déficit de pressão de vapor no ar [ $\text{kPa}$ ];

$r_a$ : resistência aerodinâmica [ $\text{dia} \cdot \text{m}^{-1}$ ];

$r_s$ : resistência superficial [ $\text{dia} \cdot \text{m}^{-1}$ ];

$\gamma$ : constante psicrométrica ( $\gamma=0.0666 \cdot 10^{-3}$ ) [ $\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$\lambda$ : calor latente de vaporização ( $\lambda=2.45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$fc$ : fator de conversão de unidades ( $fc=1000$ ) [ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$ ].

A evaporação do dossel e a evapotranspiração (evaporação do solo e transpiração da vegetação) são calculadas de modo separado e por etapas. A energia disponível para evapotranspiração é utilizada preferencialmente para o processo de evaporação da água interceptada.

A equação de Penman-Monteith é aplicada diretamente utilizando os valores apropriados de resistência aerodinâmica e resistência superficial. Dessa forma, a resistência superficial é considerada nula para o processo de evaporação da lâmina

interceptada e dependente do IAF e de fatores ambientais para a evapotranspiração. Os detalhes da formulação da equação são apresentados no anexo B.

A radiação global foi determinada utilizando a ferramenta Solar Radiation do ArcGis. Em contraste com o alto custo de construção e manutenção de estações de monitoramento da radiação solar, modelos espaciais de radiação solar fornecem uma eficiente caracterização da insolação (Fu e Rich, 2000). A ferramenta utilizada calcula a radiação global de uma área a partir do modelo digital de elevação e de parâmetros atmosféricos. O modelo digital de elevação do terreno utilizado foi o ASTER GDEM. Este modelo possui resolução espacial de 30m e foi obtido gratuitamente do site da NASA (disponível em <https://wist.echo.nasa.gov/api>). Os parâmetros atmosféricos foram estimados utilizando dados de cobertura de nuvens provenientes da normal climatológica.

Como não foram observadas variações significativas da radiação entre os diferentes usos do solo, foi utilizada a média da radiação global da bacia hidrográfica. Para redução dos efeitos de borda, foi calculada a radiação solar para uma área maior que a bacia hidrográfica.

A radiação líquida disponível para o processo de transpiração e evaporação da água interceptada é calculada por:

$$R_L = R_G \cdot (1 - \alpha) \quad 3.21$$

onde:

$R_G$ : radiação global incidente [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ];

$\alpha$ : albedo [-].

O albedo foi determinado em função da cobertura vegetal, conforme apresentado por van Dijk (2002):

$$\alpha = \alpha_{sol} \cdot (1 - c) + \alpha_{veg} \cdot c \quad 3.22$$

onde:

$\alpha_{sol}$ : albedo do solo exposto (=0,1) [-];

$\alpha_{veg}$ : albedo da área vegetada (= 0,4) [-].

As equações utilizadas para estimativa dos demais parâmetros da equação de Penman-Monteith encontram-se explicitadas no anexo B.

## 4. ESTUDO DE CASO

### 4.1 Caracterização da microbacia

A área de estudo corresponde a uma microbacia inserida num horto florestal pertencente à empresa florestal CMPC Celulose Riograndense (Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones), localizado no município de Eldorado do Sul (RS). A pedido da empresa, a exata localização da microbacia de estudo e o nome das espécies utilizadas foram omitidos neste trabalho.

A microbacia encontra-se inserida na sub-bacia do Arroio dos Ratos, bacia do Baixo Jacuí (bacia G070 na classificação oficial do estado), região hidrográfica do Guaíba (Figura 4.1). A área está compreendida na região fisiográfica Depressão Central e o relevo varia de plano a montanhoso, com altitudes variando de 84 a 184m.

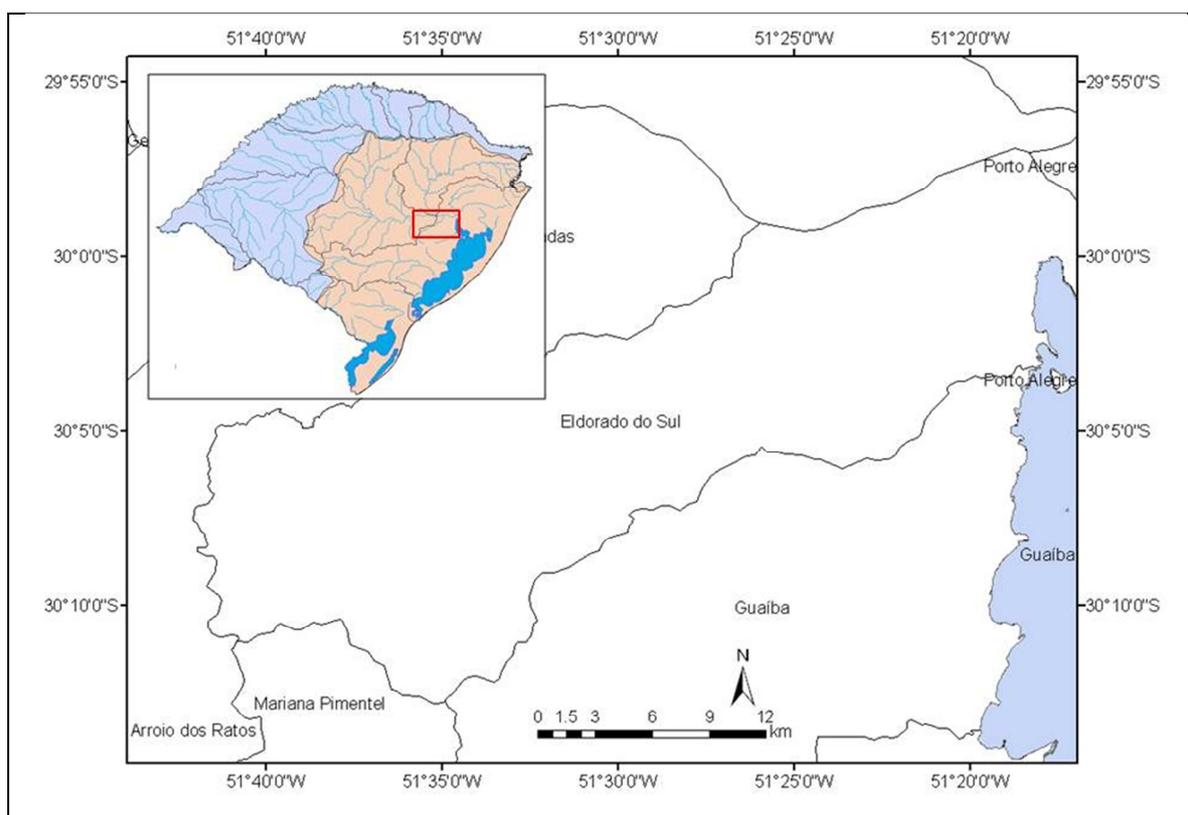


Figura 4.1: Localização da área da microbacia de estudo.

A delimitação da microbacia (Figura 4.2) foi feita a partir de uma correção no contorno definido pela empresa. Para a correção foi utilizada a delimitação da bacia obtida com o uso do software Idrisi e de imagem ASTER com resolução de 30m do local.

O resultado apresentou concordância com as curvas de nível da região disponibilizadas pela empresa.



Figura 4.2: Área de estudo (Google Earth) com destaque para a delimitação utilizada da microbacia experimental.

A microbacia compreende uma área total de 0,97 km<sup>2</sup>, dos quais 84% são cultivados com eucalipto. O restante da área corresponde à vegetação nativa preservada, estradas e outros usos.

No presente trabalho serão utilizados como valores característicos do clima da área de estudo as normais climatológicas da estação experimental da UFRGS em Eldorado do Sul (Bermagaschi *et al.*, 2003). A Figura 4.3 apresenta as normais climatológicas de precipitação, temperatura, umidade e velocidade do vento para cada mês do ano. Também são apresentados os valores médios dessas variáveis climáticas obtidas de setembro de 1975 a agosto de 1983, na estação de Eldorado do Sul da FEPAGRO (-51,673277, -30,095966), que foram utilizados na modelagem do balanço hídrico da bacia.

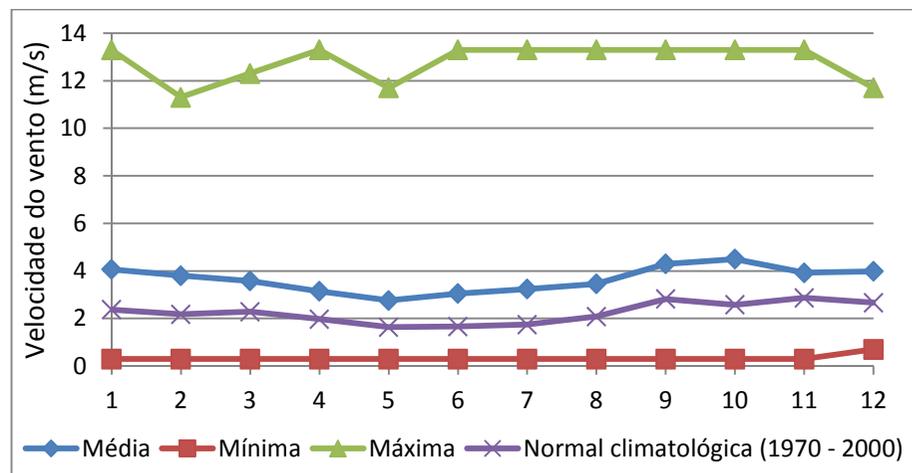
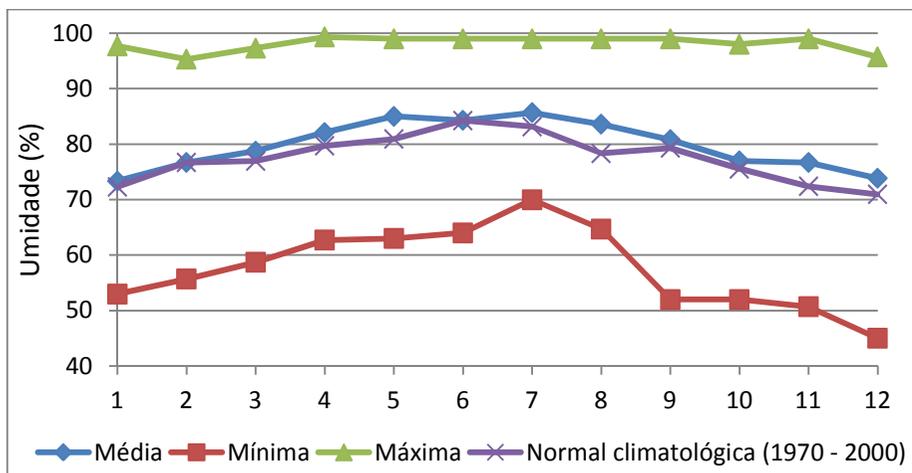
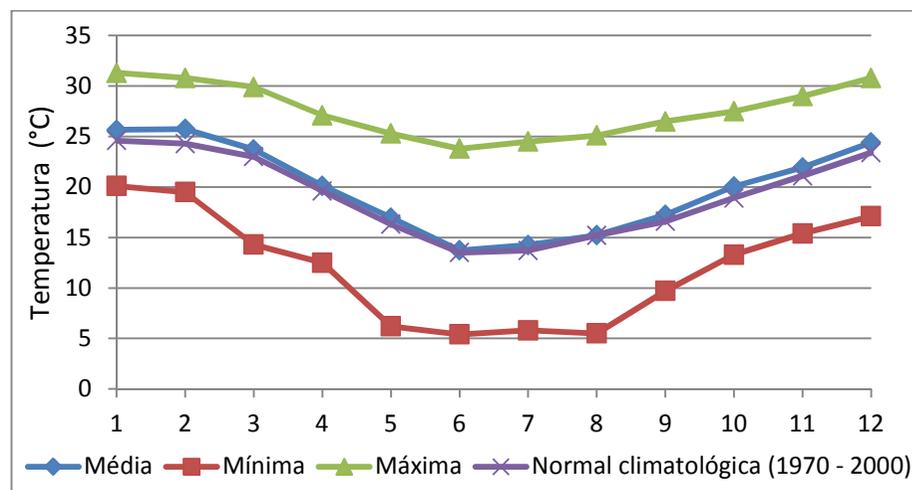
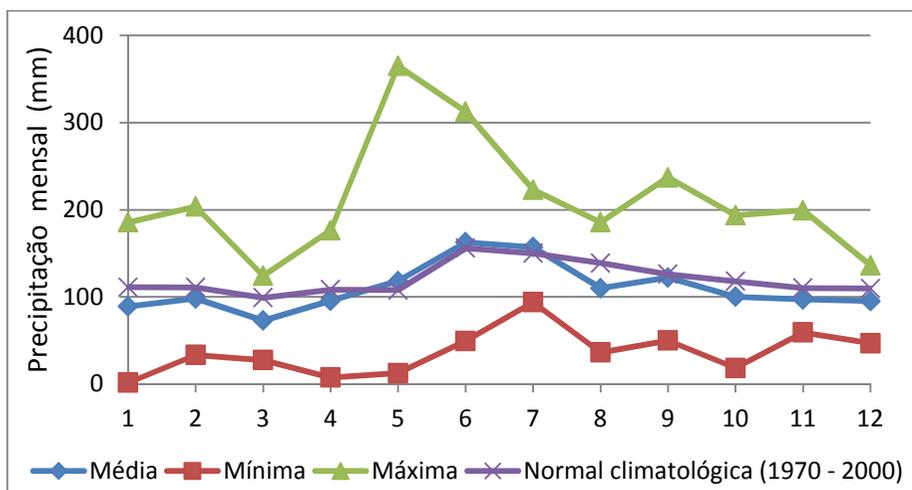


Figura 4.3: Dados mensais de radiação, temperatura, precipitação e velocidade do vento de normais climatológicas da estação experimental da UFRGS (Bermagaschi *et al.*, 2003) e da estação Eldorado do Sul da FEPAGRO (set/1975 a ago/1984).

Verifica-se que a precipitação é normalmente distribuída durante todo o ano, sendo os meses mais chuvosos entre junho e agosto. O total precipitado anual é de aproximadamente 1450mm. A temperatura média apresenta comportamento sazonal, com temperatura média inferior a 14°C no mês mais frio (junho), e superior a 24°C no mês mais quente (janeiro). O período de análise apresentou grande variação anual e valores médios de precipitação, temperatura e umidade semelhantes às normais climatológicas e valores mais elevados de velocidade do vento.

A região possui grande variação intra-anual de temperatura e radiação. A radiação calculada pelo Solar Radiation apresentou valores superiores às normais climatológicas, sobretudo nos meses mais quentes (Figura 4.4). Esta diferença deve ser devido às estimativas dos parâmetros atmosféricos. Entretanto, esta diferença não compromete o uso dos valores calculados visto que o maior controle da evapotranspiração foi exercido pelos processos de transferência do vapor de água.

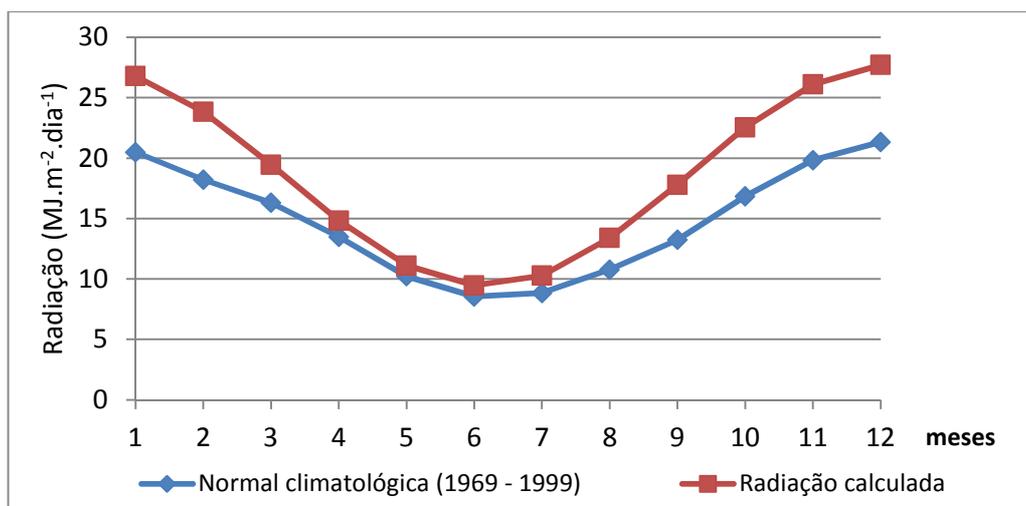


Figura 4.4: Normal climatológica de Eldorado do Sul (Bergamaschi *et al.*, 2003) e radiação diária calculada pelo Solar Radiation.

Na classificação realizada para o Zoneamento Ambiental para a atividade de Silvicultura do Estado do Rio Grande do Sul (ZAS), a região encontra-se inserida na Unidade de Paisagem Natural Depressão Central 5 (UPN DP5). A vegetação primitiva dessa UPN é representada pela vegetação de estepe gramíneo lenhosa com floresta de galeria e presença da floresta estacional decidual (Rio Grande do Sul/SEMA, 2010). O uso do solo é predominantemente de pecuária, orizicultura e culturas agrícolas diversificadas. O documento ressalta ainda que enquanto não estiver estabelecida a

classificação dos estágios de conservação de campos, somente as áreas de campos altamente antropizados poderão ser utilizadas para silvicultura. Os cultivares indicados para o local são o *E. grandis*, *E. saligna* e *E. duninii* com período de plantio de 1 de setembro a 31 de março (Portaria 151/10 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento DOU 18/06/10).

Para este estudo, assim como o índice de sítio e, conseqüentemente, os dados de produtividade, as características do solo também foram assumidas como constantes dentro de cada talhão. Para cada tipo de solo predominante em cada talhão foi obtida a distribuição granulométrica a partir dos dados obtidos no mapeamento de solos realizado por Costa *et al.* (2009). Os solos dominantes encontrados foram Argissolos Vermelhos Alumínicos típicos (PVa) e Argissolos Vermelhos Distróficos típicos (PVd2, PVd3). Os autores indicam ainda que a grande maioria dos solos da microbacia é de baixa fertilidade.

Em seguida, os solos foram classificados em classes texturais de acordo com o sistema americano (USDA). Utilizando esta classificação, os valores das propriedades de retenção de água de cada talhão foram definidos como sendo equivalentes aos valores médios de cada classe textural apresentados por Rawls *et al.* (1993). Os valores encontrados encontram-se resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características do tipo de solo predominante em cada talhão.

Talhão	Solo*	Granulometria (%)*			Retenção de água (mm em 1m)**				
		Argila	Silte	Areia	P total	CC	PMP	CAD	CAS
33, 34 e 50	PVd3	41,33	18,00	40,67	464	318	197	121	267
49 e 60	PVa	54,00	15,33	30,67	475	396	272	124	203
59	PVd2	37,33	17,67	45,00	464	318	197	121	267

Ptotal: porosidade total, CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; CAD: capacidade de água disponível; CAS: capacidade de armazenamento do solo.

Fonte: \*Costa *et al.* (2009); \*\*Rawls *et al.* (1993).

Estes resultados estão de acordo com o índice de sítio (IS) dos talhões florestais, visto que os talhões 49 e 60 possuem o mesmo IS (IS=30); bem como os talhões 33, 34, 50 e 59 (IS=32).

## 4.2 Caracterização do empreendimento florestal

Dos 0,97km<sup>2</sup> da área da bacia, 84% são destinados ao plantio de eucalipto, 13% a áreas de preservação e o restante corresponde a demais usos do solo, conforme verificado na tabela 4.2. Toda a produção é destinada a indústria de papel e celulose.

A tabela 4.3 apresenta os dados do mosaico florestal da área de plantio. A maior parte da área refere-se aos plantios dos clones de *E. urophylla* x *E. maidenii* com espaçamento 3,3x2,7m e dos clones *E. saligna* 39 com espaçamento de 3x3m em primeira rotação.

Tabela 4.2: Distribuição da área do horto florestal inserido na microbacia de estudo (2009).

Usos do solo (área em ha)		
Áreas de Plantio	Plantio Comercial	0,395
	Aguardando reforma	8,802
	Plantio Avançado	5,434
	Pesquisa	62,685
	Plantios GFP	4,742
Área de preservação	Estágio Inicial	0,749
	Estágio Avançado	12,138
Outros	Estrada Secundária	2,197
	Aceiro Externo	0,104
Área CMPC		97,246

Fonte: CMPC,2010.

Tabela 4.3: Distribuição da área de plantio da microbacia de estudo (2009).

Material	Regime	Data plantio	Espaçamento (m x m)	Rotação / Ciclo	Talhão	Área (ha)
Clone <i>E. saligna</i> 49	reforma	10/2005	3 x 2	1 / 2	33	2,100
Clone <i>E. saligna</i> 49	reforma	10/2005	3 x 3	1 / 2	34	2,802
Clone <i>E. saligna</i> 39	reforma	04/2004	3 x 3	1 / 2	60	13,410
Clone <i>E. saligna</i> 39	reforma	04/2004	3 x 3	1 / 2	59	4,570
0	reforma	0	não id	1 / 2	49	8,802
Clone <i>E. urophylla</i> x <i>E. maidenii</i>	reforma	07/2001	3,3 x 2,7	1 / 1	60	37,189
Semente <i>E. grandis</i> 1	rebrotas	08/1990	2,7 x 2	2 / 1	49	4,086
Semente <i>E. saligna</i> 1	rebrotas	08/1990	3 x 2	2 / 1	60	1,475
Clone <i>E. saligna</i> 39	reforma	08/2007	3 x 2,5	1 / 1	49	0,647
Semente <i>E. saligna</i> 0	rebrotas	06/1990	3 x 2	3 / 1	50	0,181
não id	reforma	07/2001	3 x 3	1 / 1	49	1,239
Semente <i>E. saligna</i> 1	reforma	06/1989	3 x 3	1 / 1	49	4,714
Semente <i>E. grandis</i> 3	reforma	06/1989	3 x 3	1 / 1	49	0,028

Fonte: CMPC,2010.

### 4.2.1 Regimes de manejo aplicáveis

Os dados necessários à geração das alternativas de regimes de manejo para a área encontram-se apresentados na Tabela 4.4. Os valores foram fornecidos pela empresa CMPC de modo que reflitam as reais possibilidades de manejo na área. Apesar de ser atualmente utilizada na área de estudo, a espécie *E. grandis* não foi considerada para a geração dos regimes de manejo aplicáveis devido a ausência de dados característicos da espécie para o local de estudo. Os materiais genéticos considerados serão citados como espécies 1, 2, 3 e 4.

A combinação destes parâmetros resultou em 648 opções de manejo para cada UBM da área. Como a microbacia está dividida em duas grandes áreas com diferentes características de sítio (áreas com IS=30 e áreas com IS=32), resulta em 1296 opções de manejo na microbacia.

Tabela 4.4: Parâmetros utilizados para a geração dos regimes de manejo aplicáveis e seus respectivos fluxos de caixa.

Parâmetro	Valor
Idade mínima de corte (anos)	7
Idade máxima de corte (anos)	9
Número de rotações mínimo por ciclo	1
Número de rotações máximo por ciclo	2
Densidades (árvores/ha)	1666, 1333, 1111
Espécies	1, 2, 3 e 4
Idade no início da análise	0, 3, 6 anos

#### 4.2.2 Custos e receitas da produção de madeira

Os custos médios envolvidos nas atividades de plantio para reforma e rebrota realizadas pela empresa estão apresentados na Tabela 4.5. Os custos por hectare de manejo ambiental, preparo do solo, plantio e trato cultural foram especificados de acordo com o sistema de condução adotado (reforma ou rebrota). Os custos de mudas dependem da densidade do plantio e os custos de comercialização variam com o volume de madeira produzido em cada unidade de manejo.

Tabela 4.5: Custos médios de plantio e comercialização de eucalipto em 2010.

Custos de reforma/rebrota (R\$/ha)			Outros (R\$/ha)	
Atividade	Reforma	Rebrota	Administração (anual)	106,00
Manejo Ambiental	53,00	17,10	<b>Comercialização da madeira (R\$/m³)</b>	
Preparo de Solo	2473,90	452,38	Custo de Colheita	19,94
Plantio	1013,43	42,89	Custo de Transporte	13,75
Total	3540,33	512,37	Custo de Carregamento	1,53
<b>Trato Cultural (R\$/ha)</b>			Custo de Movimentação no Pátio	1,22
Trato Cultural	1368,74	1254,00	Custo c/ Estradas	1,27
<b>Custos de mudas (R\$/milheiro)</b>			Custo c/ Administração	0,94
Mudas		375,00	Total	38,65

Fonte: CMPC,2010.

O preço da madeira considerado para determinação das receitas foi de R\$ 35,00 por metro cúbico de madeira e a taxa de retorno de investimento utilizada é de 12%.

O volume de madeira produzido foi obtido a partir das curvas de volume fornecidas pela empresa para os manejos existentes na área de estudo, apresentados na Equação 4.1 e Tabela 4.6. Os dados apresentados refletem a produtividade dos plantios florestais de acordo com o índice de sítio (IS) e idade de corte.

$$Vol = exp(b_0 + b_1/(I \cdot IS)) \quad 4.1$$

onde:

*Vol*: volume produzido [m³];

*I*: idade do plantio [anos];

*IS*: índice de sítio [];

*b*<sub>0</sub> e *b*<sub>1</sub>: parâmetros estimados

Tabela 4.6: Equações estimadas para determinação do volume das espécies observadas na microbacia.

Equação do Volume Estimada	b0	b1	r2
Espécie 1	6,6506	-171,637	0,93
Espécie 2	6,7733	-176,732	0,96
Espécie 3	6,7284	-179,210	0,80
Espécie 4	6,6088	-196,744	0,74

Fonte: CMPC,2010.

Devido à não disponibilização de dados de produção para todas as alternativas de manejo, considerou-se um padrão de variação de volume produzido nas idades de corte

entre as espécies. Assim sendo, foi assumido que a diferença percentual de produção entre reforma e rebrota (Tabela 4.7) é equivalente ao verificado para a espécie *E. grandis* na área, para a qual foi disponibilizado curvas de produção para cada sistema de condução.

Tabela 4.7: Fatores de ajuste da produção de madeira para diferentes sistemas de condução.

Sistema de condução	Fator de ajuste
Reforma	1,00
Rebrota	0,83

A fim de obter os volumes produzidos sob diferentes densidades de plantio, considerou-se que o comportamento das demais espécies era semelhante a clones de *E. saligna*, para o qual se dispunha de tabelas de produção mestras para diferentes espaçamentos. A produção de madeira para diferentes espaçamentos foi, então, obtida multiplicando os valores obtidos pelas equações de ajuste da Tabela 4.6 pelos fatores de ajuste apresentados na Tabela 4.7 e na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Fatores de ajuste da produção de madeira para diferentes densidades de plantio.

Densidade (árvores/ha)	Espaçamento (m/m)	Fator de ajuste
1111	3,0 x 3,0	0,95
1333	3,5 x 2,15 e 3,0 x 2,5	1,00
1666	3,0 x 2,0	1,04

### 4.3 Determinação dos parâmetros da vegetação

Para a estimativa do impacto hidrológico foram ajustadas funções de variação do *IAF*, da altura da vegetação e da profundidade da raiz ao longo do crescimento de cada espécie.

Como apenas se dispunha de uma medição de *IAF* para cada espécie, foram ajustadas funções para simular a variação do *IAF* com a idade do povoamento, impondo-se as seguintes condições:

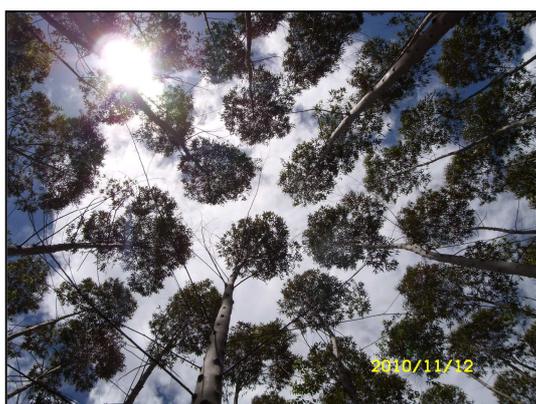
- O *IAF* deve estar entre 0,5 e 1,5 aos 1,5 anos;
- O valor máximo do *IAF* deve ocorrer entre 2,5 e 4 anos, a partir dessa há uma redução no *IAF* com a idade;
- Ocorre mudança de concavidade na curva entre 5 e 6 anos, quando o *IAF* começa a se aproximar do seu valor assumido como constante; e

- Permanece constante após os seis anos.

Estas condições foram estabelecidas baseadas na variação do *IAF* com a idade do povoamento observado em estudos realizados no Brasil (Xavier *et al.*, 2002; Almeida *et al.*, 2007). Baseando-se neste comportamento, foi utilizada uma equação de terceiro grau para ajuste desses dados entre 1,5 e 6 anos de idade do povoamento. Alguns estudos, contudo, apresentam variações distintas do *IAF* com a idade, como mostrado por Xavier *et al.* (2002). A Tabela 4.9 exhibe os parâmetros estimados para cada espécie e os valores médios da única medição de *IAF* disponível para o local realizado em novembro de 2009. A Figura 4.5 apresenta imagens da copa de *E. saligna* e *E. urophylla x maidenii* na área de estudo nas quais é possível analisar a grande variação de *IAF* entre espécies.

Tabela 4.9: Equações estimadas para determinação do *IAF* (de 1,5 a 6 anos) e manejos onde cada equação será utilizada.

Medição em jun/2009			$IAF=At^3+Bt^2+Ct+D$			
Manejo	<i>IAF</i>	Idade (anos)	A	B	C	D
Espécie 3	2,01	8,00	0,1715	-2,3444	9,6985	-8,8183
Espécie 1	2,88	3,34	0,1443	-1,9481	7,7924	-6,7924
Espécie 4	2,88	18,93	0,1310	-1,8281	7,9374	-7,2351
Espécie 2 IS 32	2,82	4,84	0,1793	-2,4661	10,2734	-9,4665
Espécie 2 IS 30	3,01	4,84	0,1475	-2,0550	8,7704	-8,0297



(a) *E. saligna* - 6 anos



(b) *E. urophylla x maidenii* – 9 anos

Figura 4.5: Imagem da cobertura vegetal de *E. saligna* e *E. urophylla x maidenii*.

Na ausência de medições de IAF para diferentes espaçamentos de cada espécie, este foi estimado a partir das curvas de IAF ajustadas, utilizando a equação sugerida por FAO (2006):

$$IAF_{dens1} = IAF_{dens2} \cdot \left(\frac{dens1}{dens2}\right)^{0,5} \quad 4.2$$

onde:

$IAF_{dens1}$  : IAF da vegetação com densidade = dens1;

$IAF_{dens2}$  : IAF da vegetação com densidade = dens2.

É considerado ainda que o IAF varia linearmente do plantio aos 18 meses e que, após atingir o valor máximo, possui um valor mínimo de 1,7. A Figura 4.6 apresenta os resultados obtidos. Recorda-se que do sexto até o final da rotação (de 7 a 9 anos) o valor do IAF permanece constante.

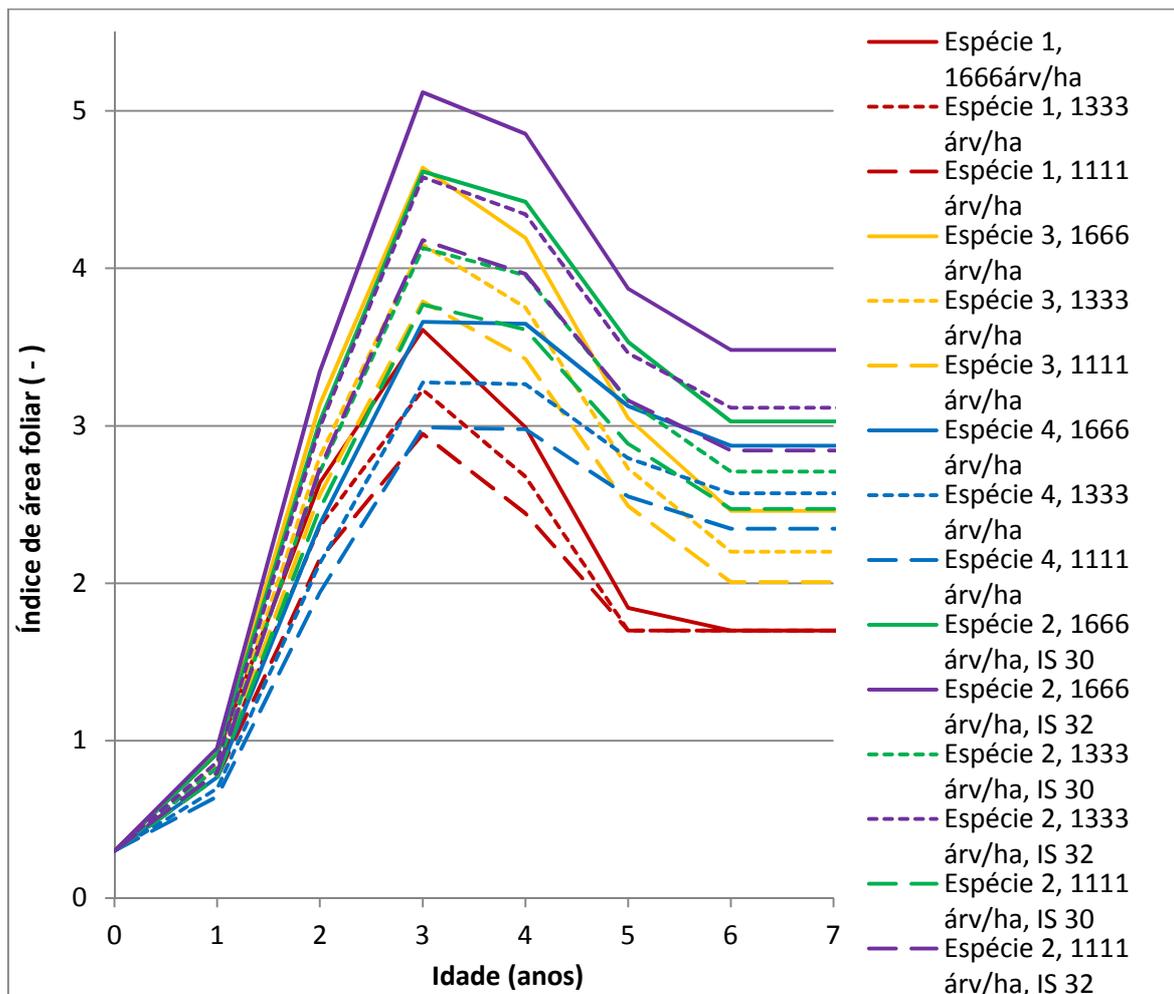


Figura 4.6: Variação da estimativa do IAF ao longo da idade da plantação para diferentes regimes de manejo.

A profundidade do sistema radicular foi definida como variando linearmente entre 0,2m no plantio, 2,5m aos nove anos e 3,5m aos 20 anos.

Para simular o crescimento da vegetação foi ajustado o modelo de crescimento molecular, conforme apresentado na Tabela 4.10. Este modelo é utilizado pela empresa para ajuste de suas tabelas de produção. Para os manejos para os quais não foi possível definir equações de crescimento, foram utilizados os dados do manejo mais semelhante.

Tabela 4.10: Equações estimadas de crescimento das espécies do horto florestal.

Eq. de ajuste: $h_{dom} = A * (1 - \exp(-a_0 * I * 12))$ , onde $A = IS / (1 - \exp(-a_0 * 84))$				
Manejo	Altura (m)	Idade (anos)	IS	$a_0$
Espécie 3	30,28	9,42	30	0,0530
Espécie 1, 3x3	26,28	5,17	32	0,0112
Espécie 4	46,55	20,35	30	0,0109
Espécie 2, 3x3	30,39	6,67	30	0,0400
Espécie 2, 3x3	31,68	6,67	32	0,0315
Espécie 1 3x2	26,86	5,17	32	0,0140
Espécie 2, 3x2.5	17,87	3,34	30	0,0114

As características adotadas para a pastagem encontram-se resumidas na Tabela 4.11. O manejo do pastejo exerce influência sobre o desempenho animal. Pontes *et al.* (2004), ao estudar os fluxos de biomassa foliar em azevém anual manejado em diferentes alturas (5, 10, 15 e 20 cm) no município de Eldorado do Sul (RS), observaram que os melhores ganhos ocorreram quando o pasto foi mantido com altura entre 10 e 15 cm. O IAF foi, então, obtido pela média de valores encontrados na literatura para pastagens com esta altura meta (Fagundes *et al.*, 1999; Kelliher *et al.*, 1993).

Tabela 4.11: Características da pastagem adotadas para o modelo de balanço hídrico.

Característica	Valor	Unidade
Profundidade do sistema radicular	0,30	m
Altura	0,15	m
IAF	0,80	$m^3 \cdot m^{-3}$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise econômica

Os valores esperados de terra (VET) obtidos tiveram grande variação em função do regime de manejo (RM). A variável de manejo que mais influenciou nestes resultados foi o sistema de condução adotado. Ao optar por conduzir a rebrota da plantação, os custos de plantio são bastante reduzidos, aumentando o VET. Este resultado pode ser visualizado na figura 5.1, onde também é mostrada a influência do plano de corte e da densidade no VET, mantendo-se constantes as demais variáveis de manejo. Considerando as opções de corte (de 7 a 9 anos), o aumento de volume anual obtido não compensa os gastos de manutenção. Dessa forma, rotações mais curtas proporcionam maiores VET.

Quanto à variação da densidade, verificou-se que no sistema de rebrota ocorre uma redução do VET com a diminuição da densidade, pois há diminuição do volume colhido. Tal comportamento, entretanto, não se repete no sistema de reforma. Neste sistema, o VET para a densidade de 1333árvores.ha<sup>-1</sup> é menor que para 1111árvores.ha<sup>-1</sup>. Isto ocorre em decorrência do alto valor presente do custo das mudas.

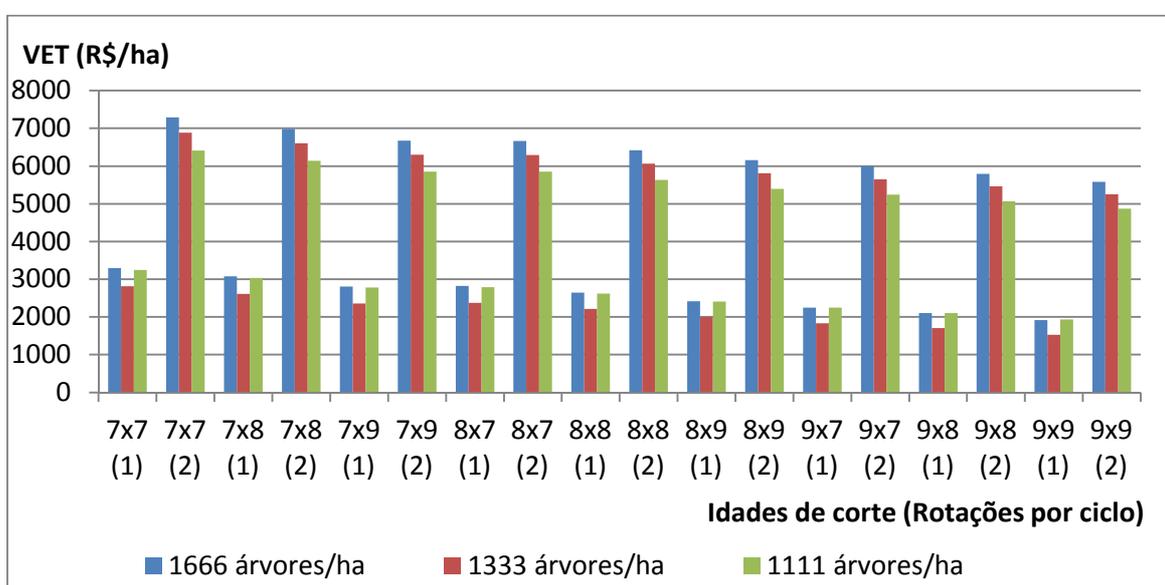


Figura 5.1: Valor Esperado de Terra para a espécie 1, com IS 30, sob diferentes planos de corte e densidade.

A escolha da espécie utilizada também exerce grande influência sobre o índice econômico, pois quanto maior o volume produzido, maior a receita gerada. Dentre os

materiais genéticos considerados nesta análise, a espécie 2 apresentava maior produtividade, seguida da espécie 3 e da espécie 4. A espécie menos produtiva foi a 1. A Figura 5.2 apresenta a variação do índice econômico de acordo com a espécie, densidade de plantio e índice de sítio (IS), mantendo-se constantes as demais variáveis. Salienta-se que uma vez que foi considerada a mesma variação de produtividade com a densidade de plantio e os mesmos custos para todas as espécies, a variação do VET com a densidade foi igual para todas as espécies. A Figura 5.2 permite ainda observar que um maior índice de sítio (IS) implica em um maior VET, como previsto.

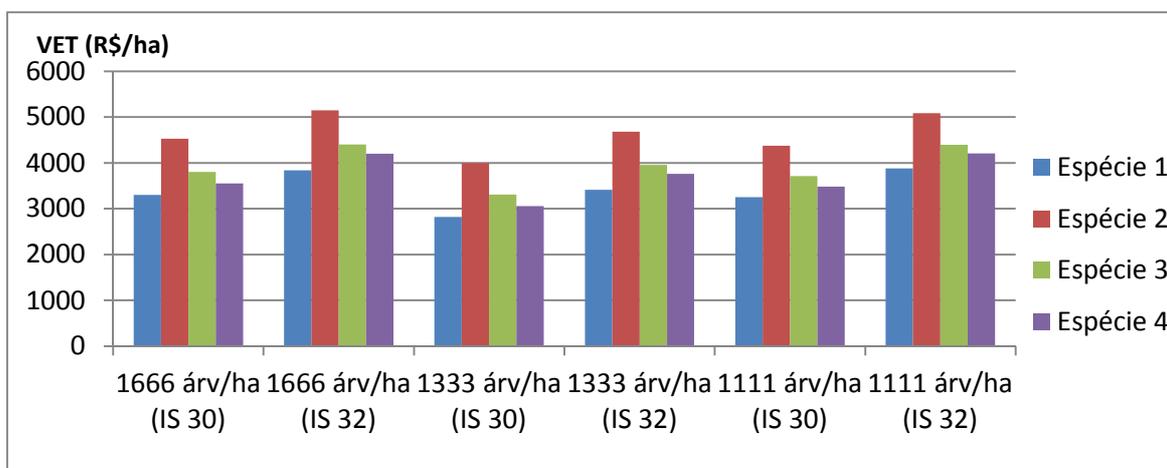


Figura 5.2: Valor esperado de terra para diferentes materiais genéticos, densidades (árvores.ha<sup>-1</sup>) e IS para o ciclo 7x7 anos com reforma.

## 5.2 Impacto hidrológico

O modelo hidrológico foi utilizado para determinar o balanço hídrico de cada rotação e regime de manejo. Como exemplo, a Figura 5.3 exibe o excesso hídrico (escoamento superficial e subterrâneo) e as perdas (interceptação e evapotranspiração) mensais obtidas para a segunda rotação do clone Espécie 2, 1666 árvores.ha<sup>-1</sup>, IS 32 e sistema de rebrota. Esta rotação foi a que apresentou menor média das vazões anuais ao longo do período de simulação (setembro de 1975 a agosto de 1984) entre os regimes de manejo considerados.

Observa-se que as perdas máximas anuais aumentam com a idade do plantio até os seus 3-4 anos, apresentando uma pequena redução após este período. Em alguns períodos as perdas mensais ultrapassaram as precipitações mensais, o que indica uma redução no nível de água no solo. Esta diferença alcançou um máximo de 78,5mm em outubro de 1981 aos 6 anos do plantio.

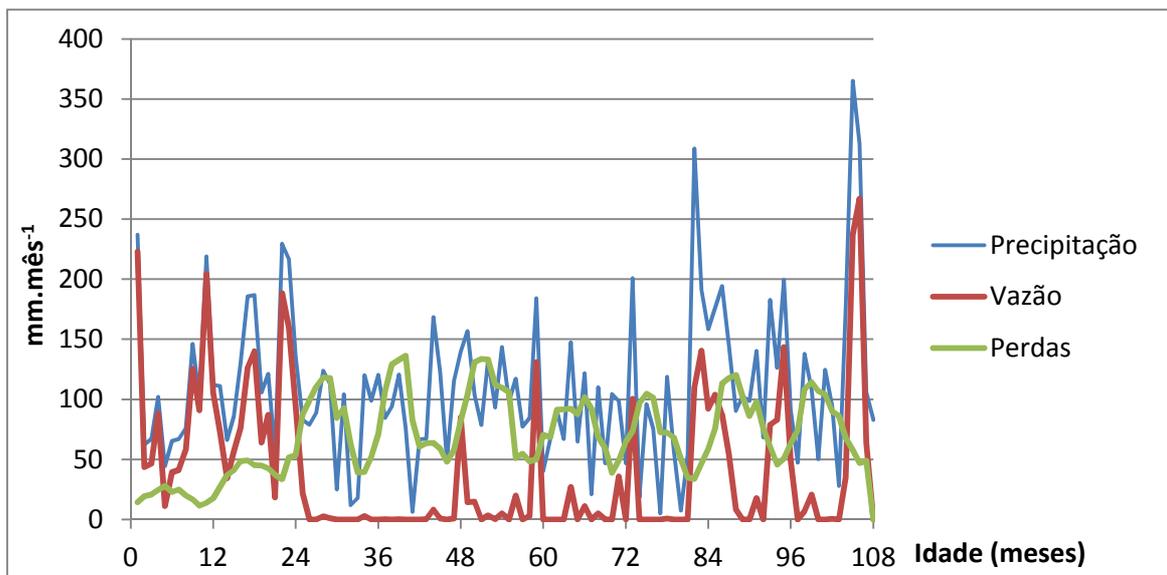


Figura 5.3: Balanço hídrico mensal para a espécie 2 (1666 árvores.ha<sup>-1</sup>, IS 32 e rebrota) de set/1975 a ago/1984.

Considerando a variação intra-anual (Figura 5.4), verifica-se que as perdas são maiores nos meses de outubro a janeiro, devido à maior radiação disponível e quantidade de água no solo ainda elevada, e menores entre maio e julho. A vazão, de modo oposto, assume seus valores máximos entre maio e junho e mínimos entre janeiro e março. Como resultado, a quantidade de água no solo aumenta no período de abril a julho e de agosto a setembro. Nos demais períodos ela é reduzida.

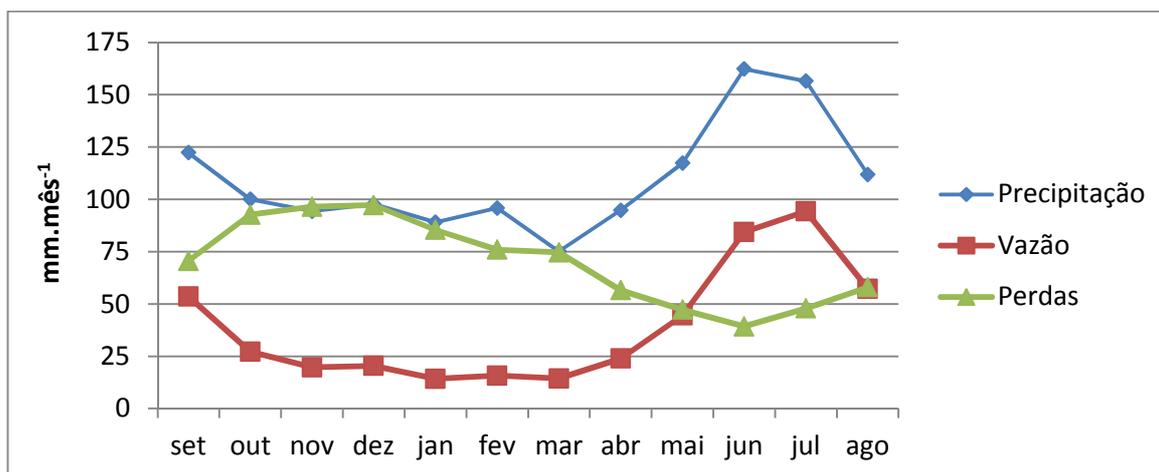


Figura 5.4: Balanço hídrico médio mensal para a espécie 2 (1666 árvores.ha<sup>-1</sup>, IS 32 e rebrota) ao longo do período de simulação.

Os valores de vazão anuais obtidos para um determinado ano de plantio, porém, são bastante influenciados pela precipitação, como pode ser observado na Figura 5.5. A fim de obter valores mais representativos da vazão anual média em cada ano de plantio,

o modelo hidrológico foi utilizado considerando o início do plantio em cada um dos nove anos do período de simulação. Para cada ano de plantio foi, então, calculada a média dos valores obtidos para cada um dos nove anos analisados. A Figura 5.6 apresenta o resultado do balanço hídrico mensal obtido desse modo para a segunda rotação da espécie 2 (1666 árvores.ha<sup>-1</sup>, IS 32 e rebrota).

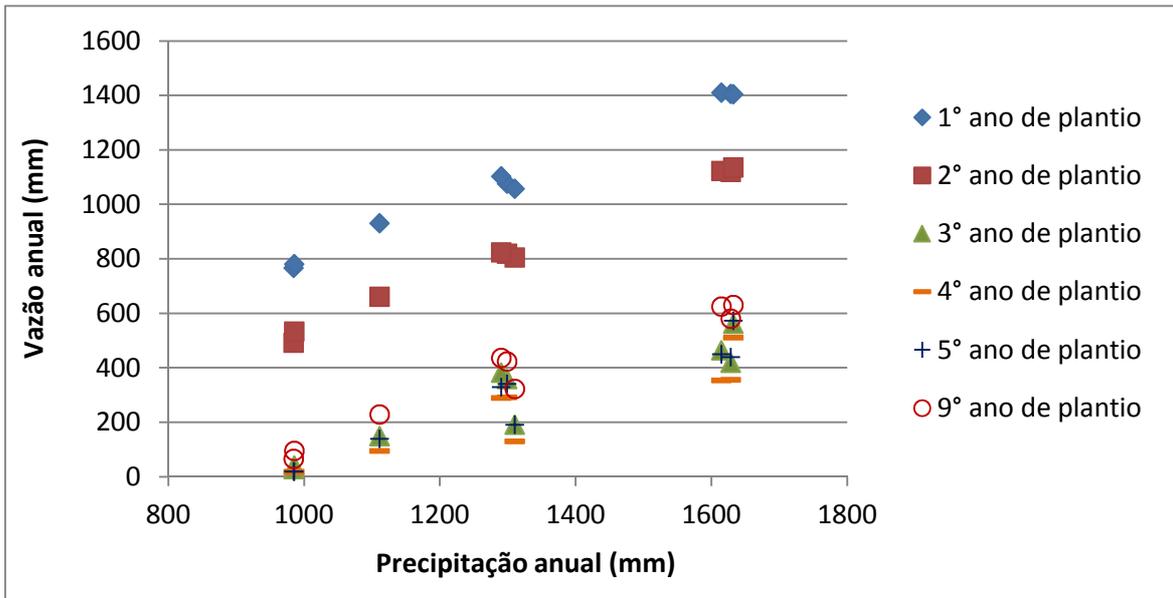


Figura 5.5: Relação entre precipitação e vazão anuais obtida para cada idade da espécie 2 (1666 árvores.ha<sup>-1</sup>, IS 32 e rebrota) em cada ano de análise.

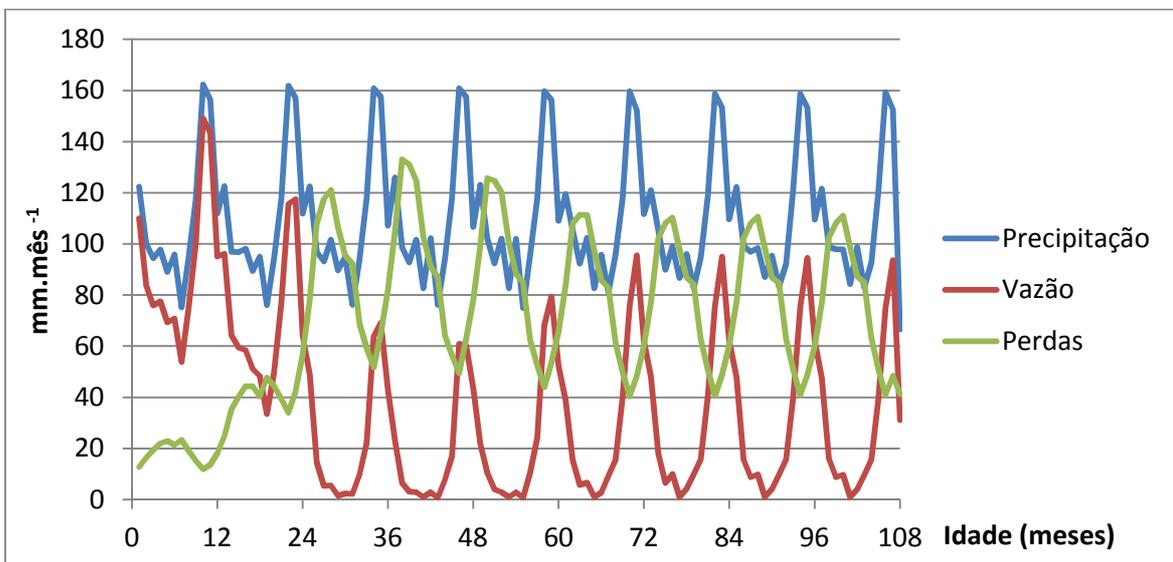


Figura 5.6: Balanço hídrico médio mensal para a espécie 2 (1666 árvores.ha<sup>-1</sup>, IS 32 e rebrota).

Pela análise da Figura 5.6, nota-se que a vazão é bastante reduzida entre o terceiro e quarto ano de plantio, onde ocorrem os maiores valores do IAF. Após este período, a vazão anual aumenta, variando pouco após o sexto ano. A Figura 5.7

apresenta o balanço hídrico anual em termos de porcentagem da precipitação incidente para esta mesma rotação. Observa-se que o volume decorrente da drenagem do excesso de água na zona radicular é bastante superior ao volume escoado superficialmente. O total drenado varia consideravelmente ao longo da rotação, sendo bastante reduzido no quarto ano. A porcentagem da precipitação que escoam superficialmente, entretanto, permanece aproximadamente constante.

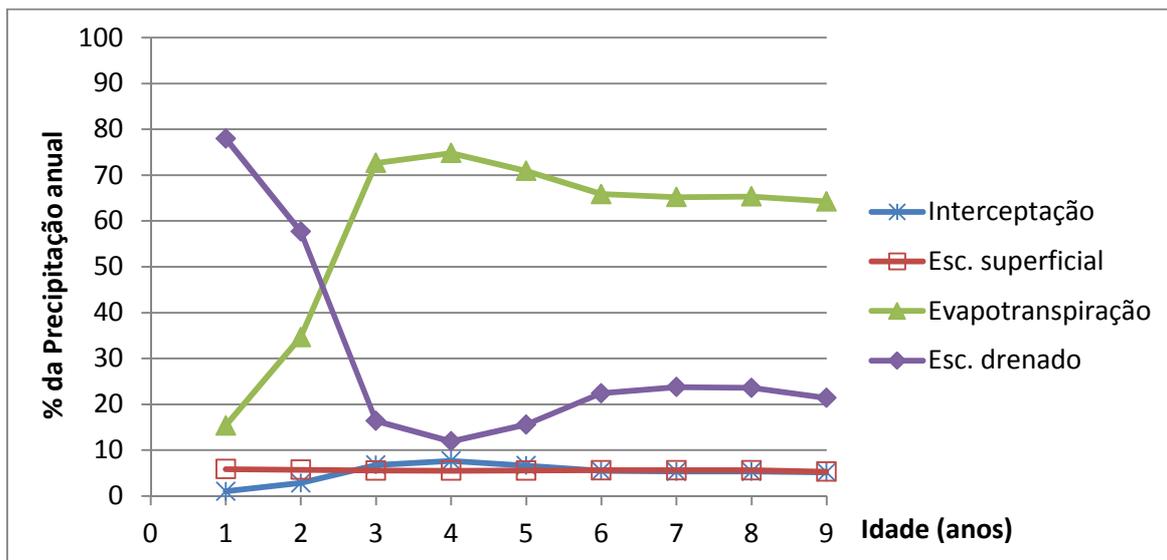


Figura 5.7: Balanço hídrico médio mensal para a espécie 2 (1666 árvores.ha<sup>-1</sup>, IS 32 e rebrota).

As perdas são predominantemente devido à evapotranspiração da vegetação. A porcentagem da precipitação anual interceptada pelo dossel foi máxima durante o quarto ano do material genético 2, 1666 árvores.ha<sup>-1</sup>, IS 32, rebrota. Foi obtido que, em média, 7,9% da precipitação anual foi interceptada nestas condições, enquanto as perdas por evapotranspiração chegaram a 77,3% da precipitação anual. Os 14,8% restantes correspondem à vazão observada. Portanto, as perdas por interceptação estimadas encontram-se abaixo da média apontada na literatura, 11 a 24% da precipitação anual (Lima, 1996). Esse resultado era esperado devido aos baixos valores de IAF observados na área de estudo. Além disso, conforme ressaltado por Lima (1996), levando-se em conta a diversidade de espécies e tipos florestais de eucalipto, os dados experimentais disponíveis não permitem ainda uma avaliação criteriosa desse processo hidrológico, sobretudo em diferentes condições climáticas.

O mesmo procedimento foi adotado para todas as alternativas de regime de manejo da área e para a pastagem. Embora os resultados tenham sido apresentados para

a segunda rotação do regime de manejo que apresentou menor média das vazões anuais, conclusões semelhantes foram obtidas para os demais regimes de manejo. As figuras a seguir ilustram o impacto hidrológico da mudança de cobertura florestal (de pastagem para plantações de eucalipto) ao longo de uma rotação. São apresentadas as parcelas das perdas (interceptação e evapotranspiração) e do excedente hídrico para a pastagem e para as rotações que apresentaram maior e menor média de vazão anual ao longo da rotação. Observa-se também que a redução da vazão obtida para os períodos secos foi tão significativa quanto à redução na estação chuvosa sendo este um período crítico onde ocorre aumento diminuição da vazão disponível e aumento da demanda. Este comportamento também foi observado em revisão feita por Calder *et al.* (2007).

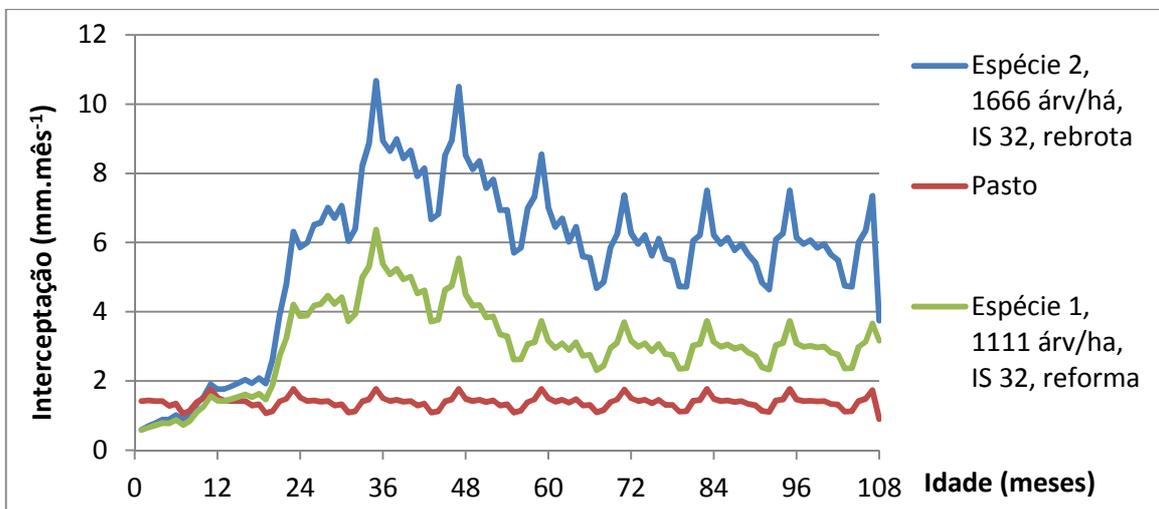


Figura 5.8: Interceptação média mensal para o pasto (vermelho) e para as rotações com maior (verde) e menor (azul) vazão média anual ao longo da rotação.

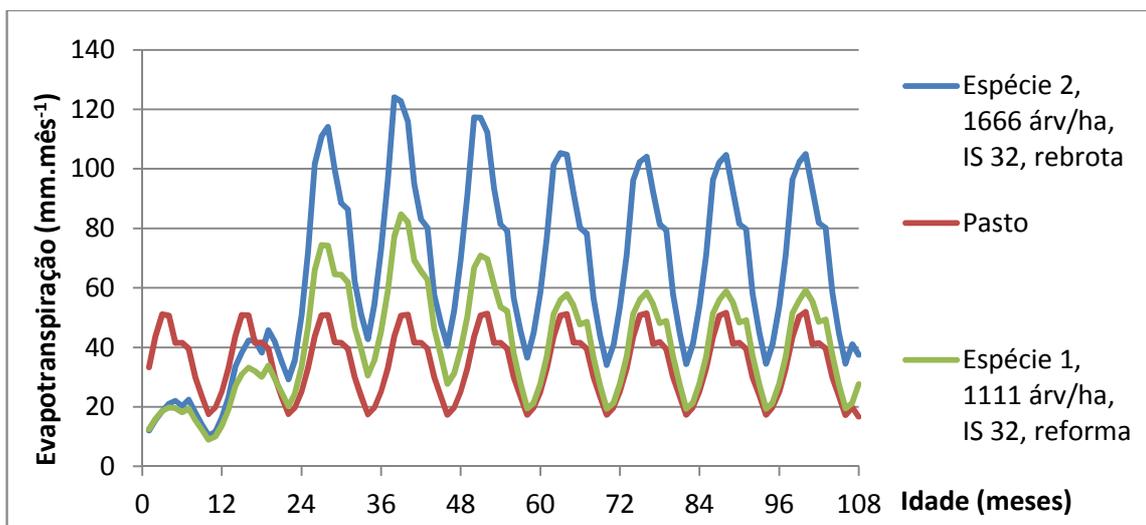


Figura 5.9: Evapotranspiração média mensal para o pasto (vermelho) e para as rotações com maior (verde) e menor (azul) vazão média anual ao longo da rotação.

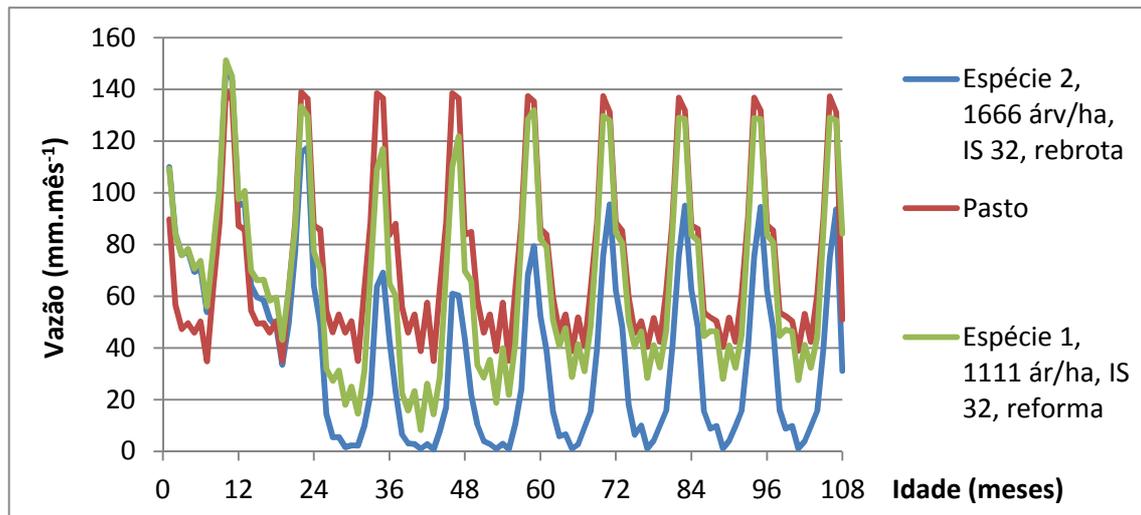


Figura 5.10: Vazão média mensal para o pasto (vermelho) e para as rotações com maior (verde) e menor (azul) vazão média anual ao longo da rotação.

A grande diferença dos resultados obtidos demonstra como a definição dos regimes de manejo de uma bacia pode influenciar significativamente no impacto hidrológico de uma plantação de eucalipto. Observa-se também que, uma vez que a menor vazão anual ocorre no quarto ano e que após o sexto ano esta vazão varia muito pouco, rotações mais longas ocasionarão uma atenuação do impacto quando comparadas a rotações mais curtas.

As Figuras 5.11 a 5.15 apresentam os resultados da vazão média anual ao longo da rotação para cada regime de manejo. Os números presentes nas legendas, no formato abcd, representam a espécie, densidade de plantio, índice de sítio e sistema de condução, respectivamente, conforme indicado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Indicadores das legendas das Figuras 5.11 a 5.15 (abcd).

Parâmetro (abcd)	Identificador	Característica
a (espécie)	1	Material genético 1
	2	Material genético 2
	3	Material genético 3
	4	Material genético 4
b (densidade)	1	1666 árvores.ha-1
	2	1333 árvores.ha-1
	3	1111 árvores.ha-1
c (índice de sítio)	1	IS = 30
	2	IS = 32
d (sistema de condução)	1	Reforma
	2	Rebrota

Apenas para o material genético 2 a diferença entre regimes de manejo em diferentes IS foi significativa. Por esta razão os resultados para esta espécie foram divididos nas Figuras 12 (IS=30) e 13 (IS=32). Isto ocorre porque apenas para esta espécie foi possível ajustar diferentes curvas de IAF para cada IS. Para as demais espécies, ocorre apenas uma pequena variação da altura da vegetação com o IS. Para estas espécies, os resultados para IS=30 são apresentados (Figuras 5.11, 5.14 e 5.15), sendo os resultados para IS=32 bastante semelhantes.

Como esperado, verificou-se que o consumo de água para as plantações de eucalipto pode ser reduzido aumentando o espaçamento entre as árvores, por conta da consequente diminuição do IAF.

Verifica-se também que, mantendo-se as demais variáveis de manejo constantes, a vazão é menor nas áreas de rebrota que nas áreas de reforma. Esta diferença é maior quanto maior o IAF. Isto ocorre em decorrência da maior profundidade do sistema radicular da planta sob o regime de rebrota. Com mais água disponível, as perdas por evapotranspiração são maiores neste sistema, tornando a vazão menor.

A escolha da espécie aparece como o principal fator determinante do impacto hidrológico. Dentre as espécies, a que apresentou menor redução de vazão média foi o material genético 1, com coeficientes de vazão anual ( $cq = Q/P$ ) variando entre 0,55 e 0,60. Em seguida aparecem os materiais 3 e 4, com  $c$  variando de 0,44 a 0,54. A menor vazão média ao longo da rotação ocorre para o material 2 que apresenta coeficiente de vazão entre 0,36 e 0,50.

O ano de menor vazão durante a rotação foi o quarto ano para todos os regimes de manejo considerados, indicando que esta se trata de uma idade crítica a ser considerada no planejamento dos povoamentos de eucalipto. A vazão máxima obtida neste ano foi de  $570,63\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$  no regime de manejo 1321. A vazão mínima neste ano foi obtida para o regime 2122 e correspondeu a  $229,49\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$  (cerca de 40% menor que a máxima), ou seja,  $654,24\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$  a menos que para a situação de pastagem.

Outro valor importante a ser analisado é a vazão a partir do sexto ano de idade e a sua diferença em relação à vazão mínima, visto que a vazão anual pouco varia neste período. Em um RM onde ocorre um significativo aumento de vazão anual do quarto ao sexto ano, a importância de se adotar rotações mais longas a fim de se reduzir o impacto hidrológico total é ainda maior. Dentre os RM analisados, os que apresentaram maior

vazão anual neste período foram os da espécie 1 (entre 780 e 790mm.ano<sup>-1</sup>). O que apresentou menor vazão foi o 2122 com aproximadamente 370mm.ano<sup>-1</sup> (47% menor que a máxima).

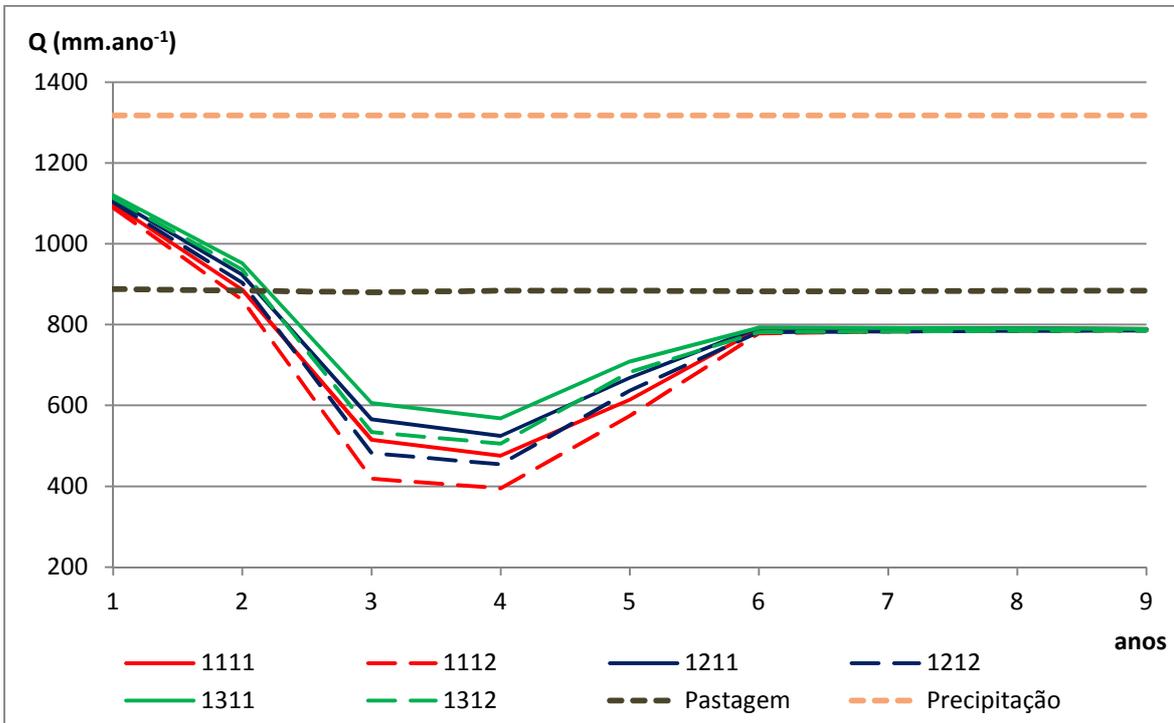


Figura 5.11: Vazões anuais obtidas para o material 1 sob diferentes condições de manejo ao longo do período de rotação.

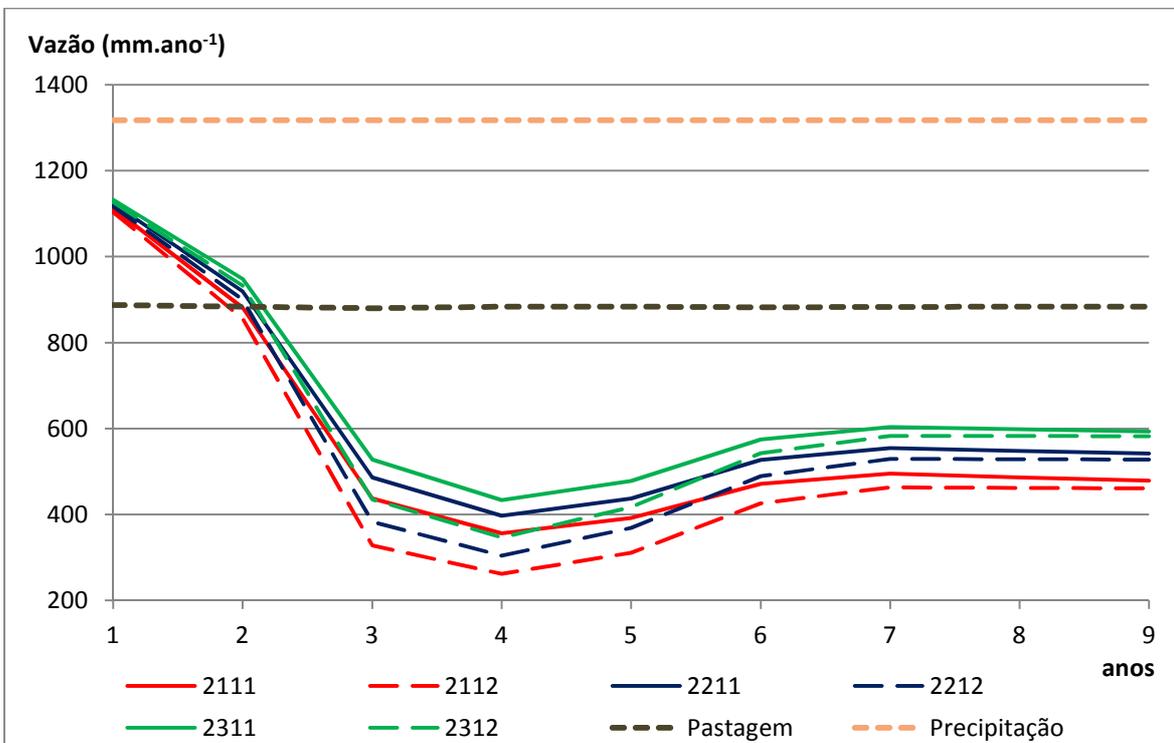


Figura 5.12: Vazões anuais obtidas para o material 2, IS=30, sob diferentes condições de manejo ao longo do período de rotação.

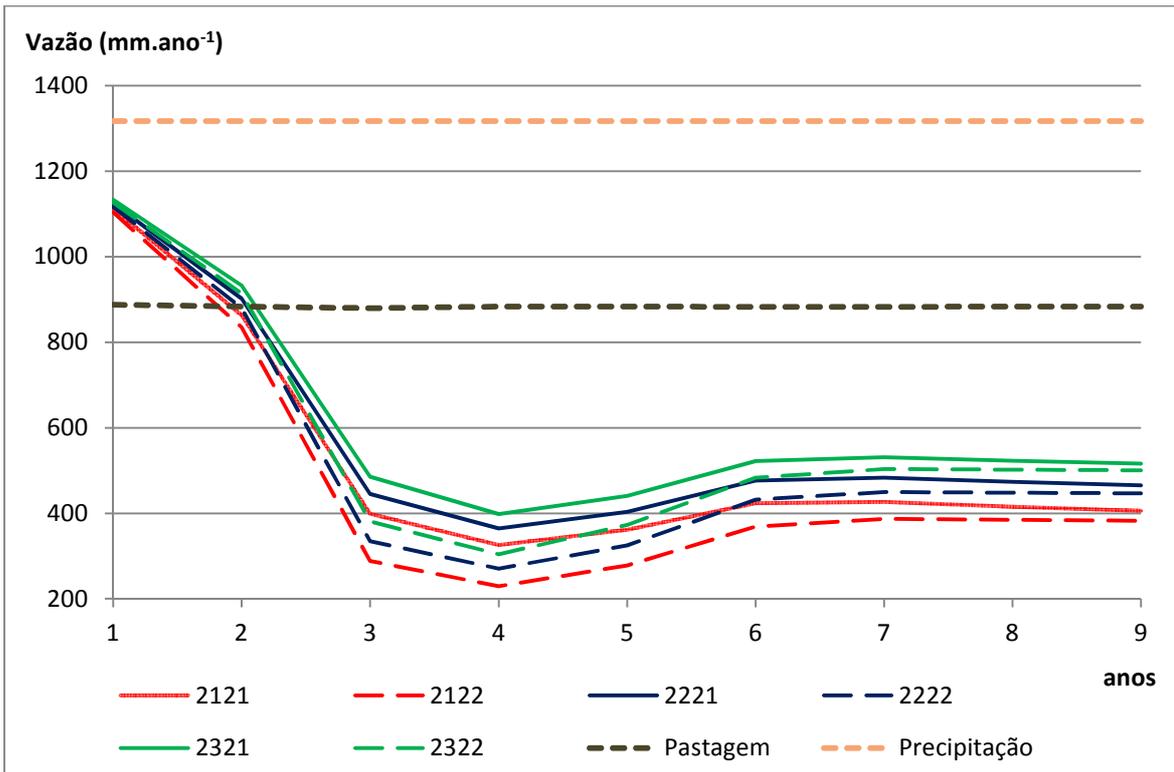


Figura 5.13: Vazões anuais obtidas para o material 2, IS=32, sob diferentes condições de manejo ao longo do período de rotação.

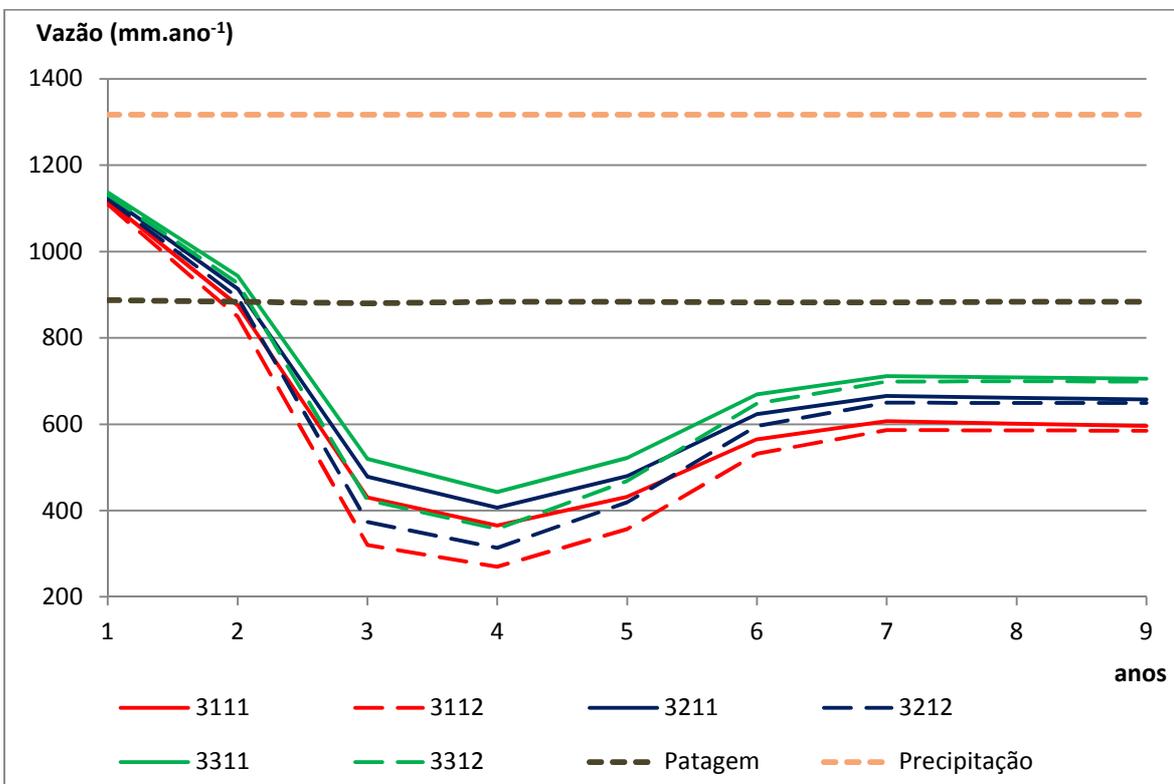


Figura 5.14: Vazões anuais obtidas para o material 3, sob diferentes condições de manejo ao longo do período de rotação.

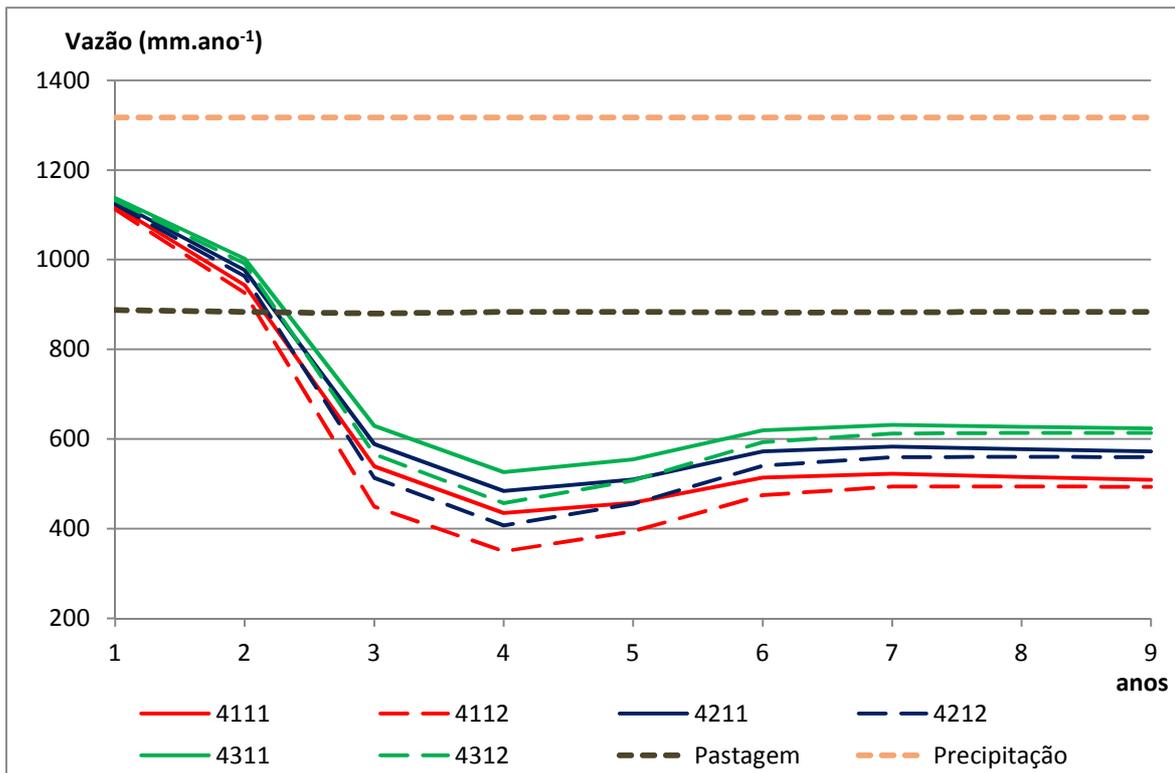


Figura 5.15: Vazões anuais obtidas para o material 4, sob diferentes condições de manejo ao longo do período de rotação.

Observa-se que os resultados obtidos para a vazão anual refletem bem o comportamento do IAF estimado para cada regime de manejo. A Figura 5.16 apresenta esta relação, onde fica evidente a importância do IAF como descritor do dossel florestal no modelo utilizado. Para fins de comparação, para a pastagem foi definido um IAF de 0,8 e obtida uma vazão estimada de cerca de 883mm.ano<sup>-1</sup>. Verifica-se também que, conforme comentado, mantendo-se as demais variáveis de manejo constantes, a vazão é menor nas áreas de rebrota que nas áreas de reforma.

O estudo do ZAS estimou uma redução de vazão para a DP5 G070 de 0,0767L.s<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup>, ou seja, 242mm.ano<sup>-1</sup>. Nota-se que, para todas as rotações analisadas que apresentaram IAF médio superior a 2,5, a média da redução da vazão estimada foi superior à indicada no zoneamento. Isto se deve, em parte, às características adotadas para a pastagem, que considera uma situação de degradação por pastejo.

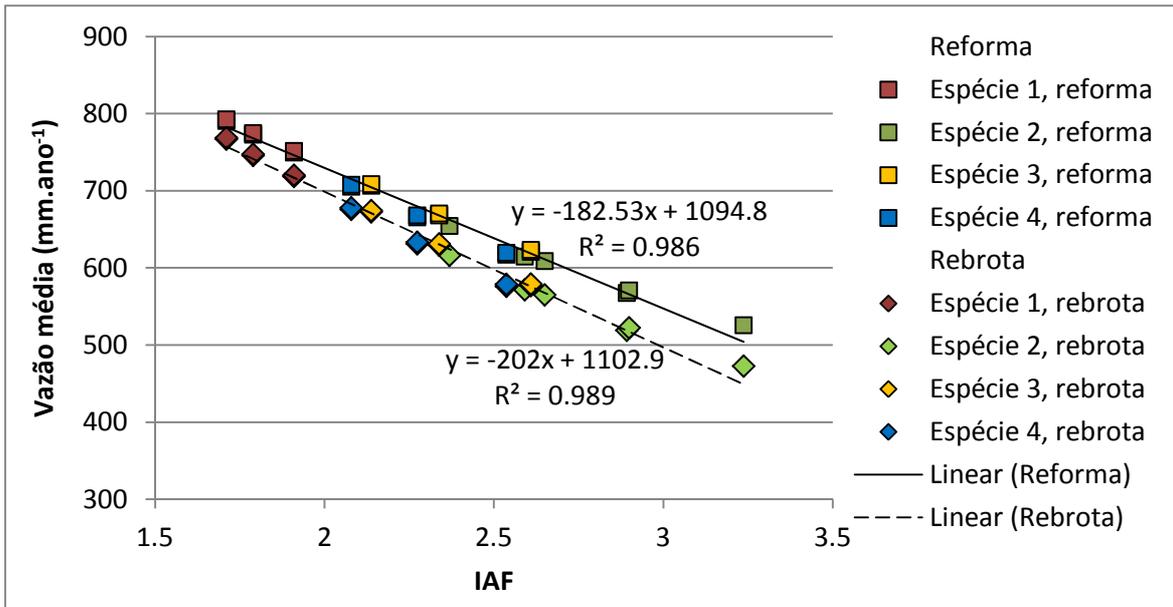


Figura 5.16: Relação entre IAF médio e vazão média (mm.ano<sup>-1</sup>) ao longo da rotação para cada espécie e tipo de condução adotado.

Os resultados apresentados evidenciam a grande variação no impacto ambiental estimado de uma rotação de eucalipto dependendo do regime de manejo adotado na área. A Figura 5.17 apresenta os regimes de manejo identificados com maior e menor redução na vazão média ao longo da rotação (1321 e 2122) e os semelhantes aos com maior área plantada atualmente na área de estudo. Observa-se que, mesmo utilizando a menor densidade considerada neste trabalho, seria possível reduzir ainda mais o impacto hidrológico na microbacia em caso de necessidade, principalmente alterando-se a espécie utilizada.

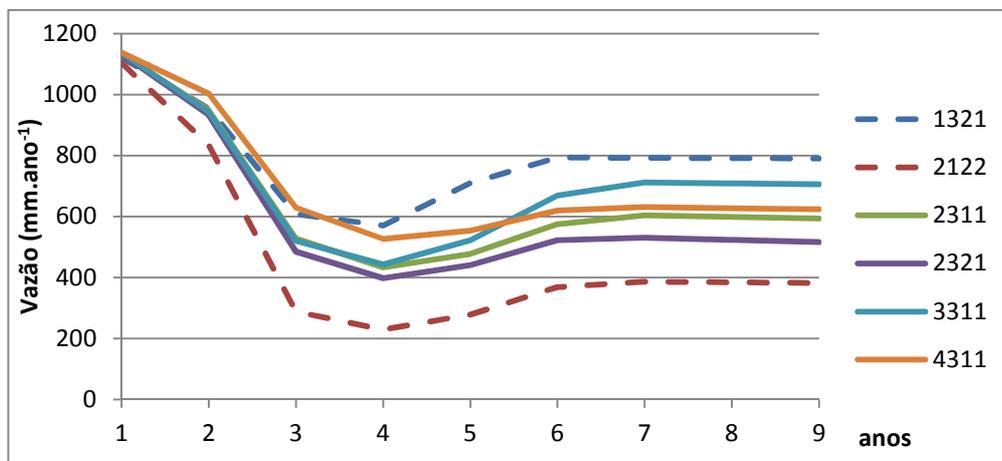


Figura 5.17: Variação da vazão anual para os manejos 1321, 2122 e os principais regimes de manejo atualmente utilizados na área de estudo.

### 5.3 Planejamento com restrições hidrológicas

A grande variação de vazão anual, obtida para os diferentes planos de corte, enfatiza a necessidade da integração do gerenciamento dos recursos florestais com os recursos hídricos. Para tanto, a microbacia hidrográfica deve ser adotada como unidade de planejamento. Conforme observado, o planejamento deve iniciar com a escolha do local mais adequado para o plantio, pois as características climáticas, em especial o regime pluviométrico, e do solo exercem grande influência no consumo de água. O monitoramento dos aspectos hidrológicos deve ser realizado a fim de ajustar as práticas de manejo considerando a permanência dos recursos hídricos. Medições da profundidade do sistema radicular e do IAF poderiam ser adicionados aos inventários florestais a fim de melhor analisar o impacto hidrológico.

Com base nas estimativas de vazão calculadas, nesta etapa são definidos os planos de corte que maximizem o valor total do projeto, atendendo-se as restrições de área e as diferentes restrições hidrológicas. Os modelos de otimização foram executados no software Matlab utilizando o algoritmo simplex com o auxílio da função linprog. As restrições consideradas foram:

- Sem restrição hidrológica;
- Diferença de vazão máxima entre a situação de pastagem e de plantio de eucalipto de  $300\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ ;
- Diferença de vazão máxima entre a situação de pastagem e de plantio de eucalipto de  $200\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ ;
- Diferença de vazão máxima entre a situação de pastagem e de plantio de eucalipto de  $100\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ .

A vazão estimada para a situação de pastagem utilizada como referência para a determinação do impacto hidrológico corresponde a  $883\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ .

A Tabela 5.2 apresenta o plano de manejo obtido para o modelo sem restrição hidrológica. Foram obtidos apenas dois planos de corte para a área, que correspondem aos planos que apresentaram maior VET para cada IS, e toda a área disponível foi utilizada. Estes planos de corte também são responsáveis pelos maiores impactos hidrológicos. O VET foi de R\$ 680.310,00 e a vazão variou de 258 a  $1112\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ . Ressalta-se que este não é o manejo atualmente utilizado na área visto que a unidade de planejamento e restrições utilizadas são diferentes. Além disso, muitos manejos

atualmente adotados atualmente não são mais considerados pela empresa como adequados para a área e não foram considerados como opções de regime de manejo nesta análise.

Tabela 5.2: Regimes de manejo obtidos pelo modelo de otimização sem restrição de impacto hidrológico.

Espécie	Densidade (ár.v.ha <sup>-1</sup> )	Índice de sítio	Idades de corte	Sistema de Condução	Idade inicial (anos)	Área (m <sup>2</sup> )
2	1666	30	7 x 7	Rebrota	0	717710
2	1666	32	7 x 7	Rebrota	0	94720

A Tabela 5.3 apresenta o plano de manejo obtido para o modelo com restrição hidrológica de 300mm.ano<sup>-1</sup>. Foram obtidos dez planos de corte e toda a área disponível foi utilizada. Observa-se que, a fim de atender ao limite de redução da vazão em todos os anos do período de análise, foram utilizados RM com diferentes idades iniciais. A principal alteração foi a utilização, em combinação com o material genético 2, do material 1, que apresenta menor impacto que as demais espécies consideradas. Estas espécies foram as que apresentaram maior eficiência no uso de água. Manteve-se, entretanto, a preferência por rotações mais curtas, com maiores densidades e sistema de rebrota, o que resulta em maior impacto hidrológico, mas maior VET. O VET foi de R\$ 624.220,00 (apresentando uma redução de 8,2% quando comparado ao modelo sem restrição hidrológica) e a vazão variou de 583 a 793mm.ano<sup>-1</sup>.

Tabela 5.3: Regimes de manejo obtidos pelo modelo de otimização com restrição de impacto hidrológico inferior a 300mm anuais.

Espécie	Densidade (ár.v.ha <sup>-1</sup> )	Índice de sítio	Idades de corte	Sistema de Condução	Idade inicial (anos)	Área (m <sup>2</sup> )
1	1666	30	7 x 7	Rebrota	3	71997
1	1666	30	7 x 8	Rebrota	6	32822
1	1666	30	8 x 7	Rebrota	3	92251
1	1666	32	7 x 7	Rebrota	3	94720
1	1666	30	7 x 7	Rebrota	0	201280
2	1666	30	7 x 7	Rebrota	6	46868
2	1666	30	7 x 8	Rebrota	6	7431.1
2	1666	30	8 x 7	Rebrota	3	170720
2	1666	30	8 x 7	Rebrota	6	65592
2	1666	30	8 x 8	Rebrota	6	28755

A Tabela 5.4 apresenta o plano de manejo obtido para o modelo com restrição hidrológica de 200mm.ano<sup>-1</sup>. Foram obtidos nove planos de corte e toda a área disponível foi utilizada. Também foram utilizados RM com diferentes idades iniciais. A área com plantio da espécie 1 aumentou. Manteve-se, entretanto, a preferência por rotações mais curtas, com maiores densidades e sistema de rebrota. O VET foi de R\$ 576.300,00 (representando uma redução de 15,3% quando comparado ao modelo sem restrição hidrológica) e a vazão variou de 683 a 770mm.ano<sup>-1</sup>.

Tabela 5.4: Regimes de manejo obtidos pelo modelo de otimização com restrição de impacto hidrológico inferior a 200mm anuais.

Espécie	Densidade (árv.ha <sup>-1</sup> )	Índice de sítio	Idades de corte	Sistema de Condução	Idade inicial (anos)	Área (m <sup>2</sup> )
1	1666	30	7 x 7	Rebrota	0	151970
1	1666	30	7 x 7	Rebrota	3	157210
1	1666	30	7 x 8	Rebrota	6	16510
1	1666	30	8 x 7	Rebrota	3	212800
1	1666	30	8 x 7	Rebrota	6	144760
2	1666	32	7 x 7	Rebrota	0	23818
2	1666	32	7 x 7	Rebrota	6	70902
2	1666	30	7 x 7	Rebrota	0	24908
2	1666	30	8 x 8	Rebrota	6	9551.4

O plano de manejo obtido para o modelo com a maior restrição hidrológica, redução na vazão anual de até 100mm.ano<sup>-1</sup>, encontra-se apresentado na Tabela 5.5. Foram obtidos treze planos de corte e apenas 90% da área disponível foi utilizada para o plantio comercial. A área que deixou de ser plantada possui o menor índice de sítio (IS=30). Foram utilizados RM com diferentes idades iniciais, mas todos com a espécie 1 e com a menor densidade disponível, que possuem menor impacto hidrológico. Diferentes idades de corte foram utilizadas. Manteve-se, entretanto, a preferência pelo sistema de rebrota. O VET foi de R\$ 430.220,00 (representando uma redução de 36,8% quando comparado ao modelo sem restrição hidrológica) e a vazão variou de 780 a 830mm.ano<sup>-1</sup>.

Tabela 5.5: Regimes de manejo obtidos pelo modelo de otimização com restrição de impacto hidrológico inferior a 100mm anuais.

Espécie	Densidade (ár.v.ha <sup>-1</sup> )	Índice de sítio	Idades de corte	Sistema de Condução	Idade inicial (anos)	Área (m <sup>2</sup> )
1	1111	30	7 x 7	Rebrota	0	11811
1	1111	30	7 x 7	Rebrota	3	93188
1	1111	30	7 x 8	Rebrota	6	37807
1	1111	30	8 x 7	Rebrota	0	78904
1	1111	30	8 x 7	Rebrota	3	90827
1	1111	30	8 x 7	Rebrota	6	72212
1	1111	30	8 x 8	Rebrota	0	26103
1	1111	30	8 x 8	Rebrota	6	31398
1	1111	30	9 x 7	Rebrota	3	103620
1	1111	30	9 x 7	Rebrota	6	83267
1	1111	30	9 x 8	Rebrota	6	4024,3
1	1111	32	7 x 7	Rebrota	0	87206
1	1111	32	7 x 7	Rebrota	6	7514,1

A vazão anual ao longo do período de análise para o planejamento florestal obtido em cada modelo de otimização encontra-se apresentada na Figura 5.18.

O modelo sem restrição hidrológica enfatiza o ganho econômico e apresenta grande variação da vazão durante o período de análise. Esta variação não é interessante do ponto de vista da gestão dos recursos hídricos e diminui conforme se restringe mais o impacto hidrológico.

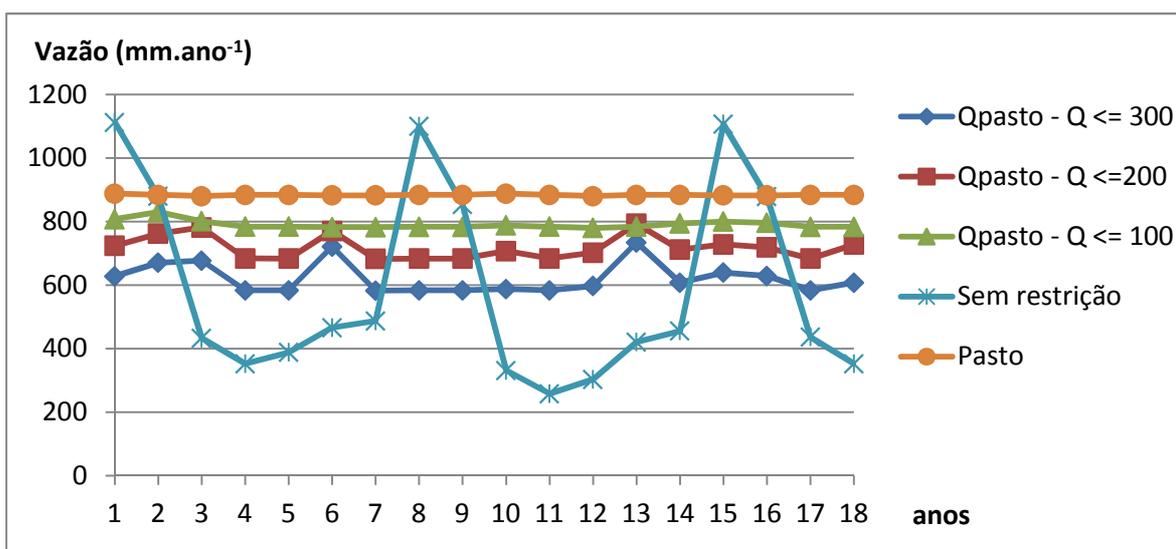


Figura 5.18: Vazão anual ao longo do período de análise utilizando os planos de manejo resultantes de cada modelo de otimização.

A comparação entre o ganho de vazão e a perda de valor para cada modelo de planejamento florestal encontra-se apresentada na Figura 5.19. Observa-se que, conforme se aumenta a restrição hidrológica, a vazão anual aumenta e o VET diminui. Maiores restrições correspondem também a uma maior redução do VET por unidade de restrição adicionada. O melhor resultado comparativo foi obtido utilizando-se a restrição de 200mm.ano<sup>-1</sup>, pois possibilitou um aumento de 22% na vazão anual com uma redução de 15% no VET. O valor máximo de redução da vazão a ser considerado, entretanto, deve ser definido a partir da análise conjunta da disponibilidade hídrica na área e de demais fatores econômicos.

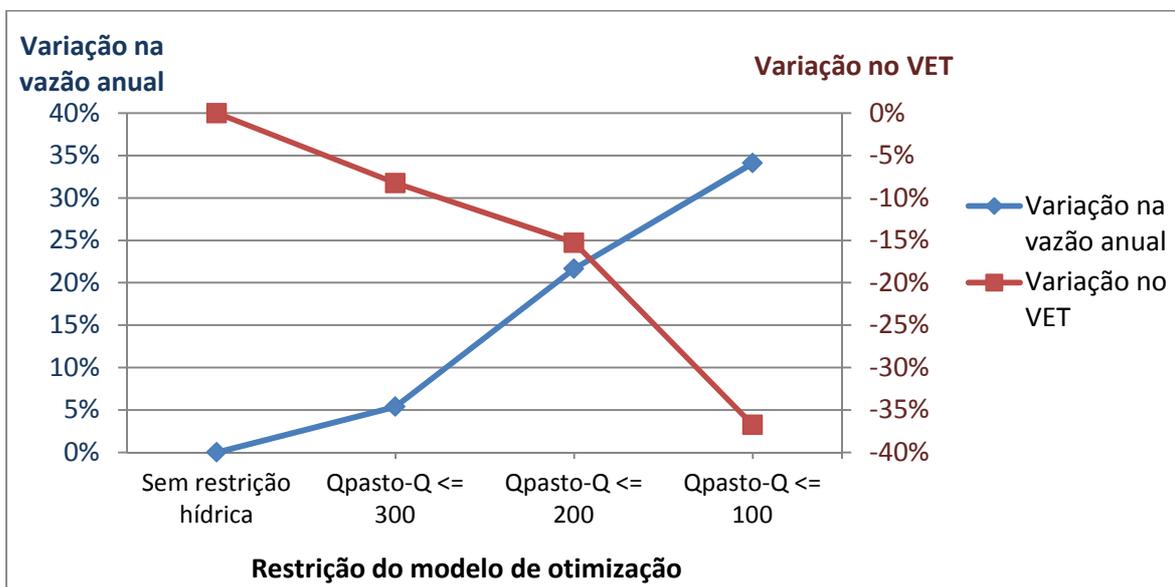


Figura 5.19: Variação do VET e da vazão média devido à inclusão de condicionante hidrológico no modelo de otimização.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Conclusões

Neste trabalho, foram desenvolvidos modelos de programação linear para maximização do valor do projeto de um povoamento florestal com diferentes restrições hidrológicas. O indicador hidrológico adotado foi a redução da produção de vazão anual na área quando comparada à situação anterior ao plantio (situação de pastagem). Ressalta-se que, embora as questões ambientais sejam decisórias e inerentes a atividade, elas foram incorporadas aos modelos tradicionais de gestão florestal como restrições a maximização do lucro de modo a refletir a visão empresarial ainda vigente.

Devido à ausência de dados do local, destaca-se que os valores obtidos pelo modelo hidrológico são apenas estimativos da vazão. As perdas por interceptação foram pequenas e a redução na vazão foi principalmente ocasionada pela maior taxa de evapotranspiração potencial e mais água disponível para as plantações florestais, quando comparadas a pastagem.

Ao término deste estudo coteja-se a questão norteadora do trabalho, ou seja: *A adoção de uma restrição à redução do escoamento anual em uma microbacia é uma ferramenta útil à integração da gestão florestal e de recursos hídricos?* A resposta encontrada foi positiva, uma vez que a utilização do modelo de otimização permitiu atender às três metas de manutenção da vazão anual estabelecidas: redução máxima da vazão equivalente a 300, 200 e 100mm.ano<sup>-1</sup>. Entretanto, quanto maior a produção de água a ser mantida, menor o Valor Esperado de Terra (VET) obtido em comparação ao VET do modelo sem restrição hidrológica. Portanto, o valor máximo de redução da vazão a ser considerado deve ser definido a partir da análise da oferta e demanda de água na região, considerando os usos ecológicos e as reservas estratégicas.

Os resultados apresentados mostraram que é possível obter grande redução do impacto hidrológico apenas melhorando as práticas de manejo. Conforme se diminuiu a máxima redução da vazão anual permitida, mais alterações surgiram entre os regimes de manejo. A espécie utilizada e a adoção de diferentes idades de plantio foram as principais alterações observadas. Apenas para o modelo com a restrição hidrológica mais severa observou-se a não utilização de toda a área para o plantio e o uso de densidades mais baixas. Embora o sistema de condução de rebrota apresente menor impacto sobre a

vazão que o de reforma, a grande diferença de valor de projeto foi determinante para manter o uso de rebrota em todos os modelos, visto que se manteve o objetivo de maximizar o valor do projeto.

A diferença entre o VET obtido com o modelo sem restrição hidrológica e os com restrições hidrológicas representa o custo de se adotar planos de manejo que aumentem a produção de vazão da bacia. Por exemplo, um aumento na vazão anual média ao longo do período de análise de 590 (sem restrição) a 791mm.ano<sup>-1</sup> (redução de vazão anual máxima de 100mm), causa uma redução de R\$ 250.088,00. Portanto, cada caso deve ser analisado individualmente, e a determinação da restrição hidrológica a ser utilizada depende das necessidades locais, devendo considerar os demais usos de água.

Entre os aspectos que deveriam ser incorporados à gestão florestal, a utilização de bacias hidrográficas como unidades de planejamento se faz necessária a fim de integrá-la a gestão de uso do solo e dos recursos hídricos. O IAF apresentou-se como um importante descritor do dossel florestal, estando diretamente relacionado com a produção de água pela microbacia. Sua medição poderia, então, ser adicionada aos inventários florestais a fim de melhor analisar o impacto hidrológico. Medições de profundidade do sistema radicular também são importantes, por definirem a quantidade de água disponível às plantas. Logo, as perdas verificadas foram maiores no sistema de rebrota que no de reforma.

Os resultados apontaram ainda uma grande influência do material genético a ser utilizado no impacto hidrológico causado pelas plantações florestais. Como esperado, devido às considerações adotadas para as variáveis descritoras da vegetação, obteve-se que o consumo de água poderia ser reduzido com a diminuição da densidade de plantio.

A dificuldade de transferência de dados torna indispensável o monitoramento de bacias sob diferentes regimes de manejo e em diferentes regiões. Os dados obtidos devem ser reincorporados ao planejamento florestal a fim de auxiliar a tomada de decisões na busca de um manejo sustentável.

Embora o consumo de água pelas plantações florestais de rápido crescimento já esteja provado, várias lacunas ainda existem no conhecimento sobre a boa gestão dos plantios de eucalipto. Esse fato evidencia a necessidade de reestruturação do planejamento convencional do manejo. A metodologia apresentada neste trabalho,

utilizando um indicador hidrológico no modelo de programação linear, contribui para a obtenção de planos de manejo com menores impactos hidrológicos.

## **6.2 Recomendações**

O estudo de caso do presente trabalho localizou-se numa microbacia em Eldorado do Sul/RS e os resultados não devem ser extrapolados para diferentes circunstâncias.

Entre os aspectos que devem ser considerados em trabalhos futuros, cita-se a incorporação do papel das áreas ripárias, da manutenção da serrapilheira, do sub-bosque, das práticas de manejo (a exemplo da mecanização), da variação sazonal das características da vegetação e da interação com o lençol freático no balanço hídrico. A resposta estomática a fatores ambientais deve ser definida para as diferentes espécies.

Além da redução da vazão anual utilizada neste trabalho, outros indicadores hidrológicos poderiam ser adicionados, como a vazão mínima, erosão ou critérios de qualidade da água. A maximização de diferentes indicadores econômicos e inclusão de restrições de produção (fluxo de produção não decrescente, atendimento de uma produção mínima, etc.) também poderiam ser testadas. Esta última sugestão é especialmente útil no planejamento de áreas maiores, de um ou mais hortos florestais, com diferentes microbacias. Uma vez que as rotações levam de sete a nove anos, no caso de reforma de plantações já existentes, o período de transição da situação atual para os planos de manejo obtidos pelos modelos de otimização também poderia ser analisado.

Cenários de cobrança pelo uso da água pelas plantações florestais deveriam ser avaliados a fim de analisar seus impactos no valor presente e nos regimes de manejo.

Embora não tenha sido possível a validação do modelo hidrológico utilizado no presente trabalho, a microbacia de estudo começou a ser monitorada recentemente, o que deve permitir uma análise futura das estimativas de balanço hídrico realizadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, NBR **ISO 14001- Sistemas de gestão ambiental**- Especificação e diretrizes para uso. Rio de Janeiro, out. 1996.
- ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Floresta Plantada. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2008/ABRAF**. – Brasília, 2009. [online] Disponível em: <[www.abraflor.org.br/estatisticas.asp](http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp)>. Acesso em 20/12/09.
- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V.; LANDSBERG, J. L.; REZENDE, G. D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, v. 251, p. 10-21. 2007.
- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V.; LANDSBERG, J. L.; REZENDE, G. D. Water use and yields of *Eucalyptus grandis* hybrids plantations in Brazil during a rotation for pulp production. INPE ePrint: [sid.inpe.br/ePrint@80/2006/07.25.19.29](http://sid.inpe.br/ePrint@80/2006/07.25.19.29), 2006.
- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.2, p.159-170, 2003.
- AMARAL, T. M. **Inclusão do controle de deflúvio em modelos de gestão florestal: um estudo no vale do Paraíba – SP**. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP. Piracicaba, 64 p., 2002.
- ANDRÉASSIAN, V. Water and Forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, v. 291, p. 1-27, 2004.
- ASTON, A. R. Rainfall interception by eight small trees. **Journal of Hydrology**, v. 42, pp. 383-396, 1979.
- AZEVEDO, E. C. **Vazão e características físicas e químicas do deflúvio de microbacias hidrográficas cobertas com mata nativa, pastagem e *Eucalyptus grandis***. 91 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, MG, 1995.
- BANDEIRA, A. P. F. **Custos ambientais na análise de viabilidade econômica de projetos de mineração: aplicação em área carbonífera do estado de Santa Catarina**. Dissertação (mestrado) Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. Porto Alegre, 2006.

- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. do. Escolha dos modelos matemáticos para a construção de curvas de índice de sítio para florestas implantadas de eucalyptus sp no estado de São Paulo. **IPEF**, n.32, p.33-42, abr.1986.
- BERGER, R., LACOWICZ, P.G., SANTOS, A.J., TIMOFEICZYK, R.J., BRASIL, A. A. Avaliação financeira do shiitake (*Lentinula edodes*) com a taxa mínima de atratividade do setor florestal. **Floresta**. Curitiba, PR, Set, 2002 - Edição Especial. 33.
- BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M. R.; CARDOSO, L. S.; SILVA, M. I. G. da. **Clima da Estação Experimental da UFRGS (e Região de Abrangência)** - Porto Alegre: UFRGS, 2003.
- BINKOWSKI, P. **Conflitos ambientais e significados sociais em torno da expansão da silvicultura do eucalipto na “metade sul” do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) PGDR/UFRGS. Porto Alegre, 2009.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchments experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology** 55 (1/4), p. 3-33, 1982.
- BRAGA, B. P. F. Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In BARTH, F. T. [et al.] **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel: ABRH, 1987.
- BRAGA, F. A.; BARROS, N. F.; SOUZA, A. L.; COSTA, L. M. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **R. Bras. Ci. Solo**, 23, p. 291-298, 1999.
- BRASIL. Conselho Nacional do meio Ambiente (CONAMA). **Resolução do CONAMA nº 001**, de 23 de janeiro de 1986.
- BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria 151/10 do DOU 18/06/10.
- BROWN, A. E.; ZHANG, L.; MCMAHON, T. A.; WESTERN, A. W.; VERTESSY, R. A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. **Journal of Hydrology** 310, p. 28-61, 2005.

- BRUIJNZEEL, L. A. **Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review**. Free university. Amsterdam, 1990.
- CALDER, I. D. Water use of eucalyptus – a review with special reference to south Índia. **Agricultural Water Management**. 11, p. 333-342, 1986.
- CALDER, I.; HOFER, T.; VERMONT, S.; WARREN, P. **Towards a new understanding of forests and water**. Unasyuva, v. 58, 2007.
- CARNEIRO, R. L. C.; RIBEIRO, A.; HUAMAN, C. A. M.; LEITE, F. P.; SEDIYAMA, G. C.; BASTOS, N. F. Consumo de água em plantios de eucalipto: Parte 1. Determinação da condutância estomática em tratamentos irrigado e não irrigado. **R. Árvore**, Viçosa – MG, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2008.
- CHAUL, T. N.; TIBIRIÇÁ, L. G. **Viabilidade econômica de florestas de eucalipto no estado de Goiás**. Goiânia, 2006.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental IPH/UFRGS, 2001.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Journal des Sciences Hydrologiques**, 52 (5), October 2007.
- CONSEMA. Conselho estadual do meio ambiente do Rio Grande do Sul. **Resolução nº 187/2008**. Aprova o Zoneamento Ambiental para a Atividade de Silvicultura no Estado do Rio Grande do Sul. 2008.
- CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº237. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. 1997.
- CORNISH, P.M., VERTESSY, R.A. Forest age-induced changes in evapotranspiration and water yield in a eucalypt forest. **Journal of Hydrology** 242, p. 43–63. 2001.
- COSTA, A. M. da; CURI, N.; MENEZES, M. D.; ARAÚJO, E. F. de; MARQUES, J. J. Levantamento detalhado de solos da microbacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura (RS) e considerações sobre escalas de mapeamento. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1272-1279, set./out., 2009

- DEGUCHI, A.; HATTORI, S.; PARK, H. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. **Journal of Hydrology**. 318, p.80–102, 2006.
- van DIJK, A. I. J. M.; BRUIJNZEEL, L. A. Modelling interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. **Journal of Hydrology**. v. 247, p. 230-238. 2001.
- van DIJK, A. I. J. M. **Water and sediment dynamics in Bench-terraced agricultural steplands in west Java, Indonesia**. PhD Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, 2002.
- DINGMAN, S. L. **Physical hydrology**, Second Edition. (2nd ed.). Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall. 568 pp. 2002.
- DYE, P. J.; JACOBS, S.; DREW, D. Verification of 3-PG growth and water use predictions in twelve Eucalyptus plantation stands in Zululand, South Africa. **Forest Ecology and management**. v.193, p. 197-218, 2004.
- EMBRAPA Florestas. **Sistemas de produção, 4**. Versão eletrônica. [online] Disponível em <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/Cultivo doEucalipto/index.htm>>. Acesso em 12/11/2009.
- ESPREY, L. J.; SANDS, P. J.; e SMITH, C. W. Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. **Forest Ecology and management**, v. 193, p. 235-250. 2004.
- FAGUNDES, J.L.; DA SILVA, S.C.; PEDREIRA, C.G.S.; SBRISSIA, A.F.; CARNEVALLI, R.A.; CARVALHO, C.A.B.; PINTO, L.F.M. Índice de área foliar, interceptação luminosa e acúmulo de forragem em pastagens de *Cynodon spp.* sob diferentes intensidades de pastejo. **Scientia Agricola**, v.56, n.4, p.1141-1150, 1999.
- FALCÃO, A.; BORGES, J. G. Programação linear e gestão estratégica em recursos florestais. **Revista Florestal**, v.12, n.12, pp.93-98, 1999.
- FAO. **Regional expert consultation on Eucalyptus**. Bangkok, 4-8 Outubro 1993. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/005/ac777e/ac777e01.htm#TopOfPage>>. Acesso em: 30/03/2010.
- FAO. **Evapotranspiración del cultivo: guías para La determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Roma, 2006.
- FEE - FUNDAÇÃO ECONOMIA E ESTATÍSTICA. **Impactos dos Investimentos na Cadeia Florestal sobre a Economia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2008. Disponível

em: <[http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/publicacoes/pg\\_impactos\\_dos\\_in\\_vestimentos.php](http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/publicacoes/pg_impactos_dos_in_vestimentos.php)>. Acesso em: 30/03/2009.

FENNER, M. I. **O fator tributário no planejamento estratégico para povoamentos de Pinus taeda**. Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Florestal, UFPA - Curitiba, 2006.

FOPER - Forest Policy and Economics Education and Research. **Introduction to forestry, forest policy and economics**. [on line] Disponível em: <[http://foper.unu.edu/course/?page\\_id=116](http://foper.unu.edu/course/?page_id=116)>. Acesso em: 10/11/2009.

FU, P.; RICH, P. M. **The Solar Analyst 1.0 – User Manual**. HEMI, 2000.

GASH, J. H. C. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quart. J. R. Met. Soc.*, v. 105, p. 43-55, 1979.

GASH, J. H. C.; LLOYD, C.R. e LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, v.170, p.79-86, 1995.

GOMES, R. T. **Efeito do espaçamento no crescimento e nas relações hídricas de Eucalyptus spp.** Na região de cerrado de Minas Gerais. Viçosa-MG, UFV. 1994. 85p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 1994.

HORNBECK, J. W.; SMITH, R. B. A water resources decision model for forest managers. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 84, p. 83-88, 1997.

HUBBARD, R. M.; STAPE, J.; RYAN, M. G.; ALMEIDA, A. C.; ROJAS, J. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*. (2009), doi:10.1016/j.foreco.2009.10.028.

IBGE - Instituto Brasileiro de geografia e estatística. **Produção agrícola municipal**, 2007. Disponível: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em novembro de 2010.

IBGE. Comunicação Social: **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2008**. 19 de novembro de 2009. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_impresao.php?id\\_noticia=1498](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_impresao.php?id_noticia=1498)>. Acesso em: dezembro de 2010.

KASTEN, F.; CZEPLAK, G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, v. 24, p. 177-189, 1980.

KELLIHER, F. M., LENNING, R., SCHYLZE, E. D. Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grass-lands. *Oecologia*, v.95, p.153-163, 1993.

- LEITE, F. P.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SANS, L. M. A.; FABRES, A. S. Relações hídricas em povoamentos de eucalipto com diferentes densidades populacionais. **R. Bras. Ci. Solo**, 23, p. 9-16, 1999.
- LIMA, W. P. Impacto ambiental do eucalipto. Edusp, São Paulo, 301 p., 1993.
- LIMA, W. P. O Eucalipto seca o Solo? **Sociedade Brasileira de Ciências do Solo**: v.29, n.1 – janeiro/abril, 2004.
- LIMA, W. P. Ciclo hidrológico em florestas plantadas. **XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Gramado-RS, 2007.
- LIMA, W. P.; ZIKIA, M. J. B. (org). **As florestas plantadas e a água** – implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento – São Carlos: RiMa, 226 p. 2006.
- LIU, S. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. **Ecological Modelling**, v.99, p. 151-159, 1997.
- MENDES, C. A. B.; LIMA, W. O. Análise de impactos ambientais de florestas plantadas, no contexto de bacias hidrográficas: princípios norteadores. **Anais I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico**, Taubaté, Brasil, 07-09 novembro 2007, IPABHi, p. 263-270.
- MIELKE, M. S.; OLIVA, M. A.; BARROS, N. F.; PENCHEL, R. M.; MARTINEZ, C. A.; ALMEIDA, A. C. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal *Eucalyptus grandis* plantation. **Trees** v. 13, p. 152-160, 1999.
- MORAIS Filho, A. D.; RODRIGUEZ, L. C. E. **Plantações de eucaliptos – análise do fluxo de caixa de pequenos produtores do Alto Tietê, estado de São Paulo, Brasil**. 2004.
- NETO, O. B. S. **Balanço hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente – MG**. Tese (Magister Scientiae) Programa de Pós-Graduação em meteorologia agrícola / UFV, 2001.
- OLERIANO, E. S.; DIAS, H. C. T. A dinâmica da água em microbacias hidrográficas reflorestadas com eucalipto. **In: Anais I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico**, Taubaté, Brasil, 07-09 novembro 2007, IPHABHi, p. 215-222, 2007.
- OLIVEIRA, A. D.. SCOLFORO, J. R. S..SILVEIRA,V. P. Análise econômica de um sistema agro-silvo pastoril com eucalipto implantado em região de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.10, n.1, p.1-19 1; 2005. Disponível em:

<[http://www.ufsm.br/cienciaflorestal /artigos/v10n1/art1v10n1.pdf](http://www.ufsm.br/cienciaflorestal/artigos/v10n1/art1v10n1.pdf)>. Acesso em: março de 2006.

- PAIVA, Y. G.; RIBEIRO, A.; ALMEIDA, A. Q.; GLERIANE, J. M.; PEZZOPANE, J. E. M. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) através de fotografias hemisféricas e índices de vegetação em plantios clonais de eucalipto. In XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009. **Anais...** INPE, p. 2873-2880.
- PONTES, L.S.; CARVALHO, P.C.F. ; NABINGER, C. *et al.* Fluxo de biomassa em pastagem de Azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.) manejada em diferentes alturas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, n.3, p.529-537, 2004.
- RASMUSSEN, E. M.; DICKINSON, R. E.; KUTZBACH, J. E.; CLEVELAND, M. K. Climatology. In MAIDEMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**: Chapter 2. McGraw-Hill, 1994.
- RAWLS, W. J.; AHULA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. In: Maidment, D. **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, 1993.
- RIO GRANDE DO SUL – Secretaria estadual do Meio Ambiente. **Zoneamento ambiental da silvicultura**: Diretrizes da Silvicultura por Unidade de Paisagem e Bacia Hidrográfica. Porto Alegre, 2010. Acesso em: novembro de 2010.
- \_\_\_\_\_. SEMA/CRHRS/ DRH, **Relatório anual sobre situação dos recursos hídricos no Estado do Rio Grande do Sul**, 2007.
- RODRIGUEZ, L. C. E. **Tópicos de Economia Florestal**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” / USP. Documentos Florestais – Piracicaba 12, p. 1-49, fev. 1991.
- RODRIGUEZ, L. C. E.; MOREIRA, R. M. Gerenciamento de florestas de Eucalyptus com modelos de programação linear. **Série técnica – IPEF**. Piracicaba, v. 6, n. 19, p. 1-15, 1989.
- RODRIGUEZ, L. C. E.; BORGES, J. G. Técnicas matemáticas de determinação de níveis sustentáveis de produção florestal – um exemplo num eucaliptal. **Revista floresta**, v. 12, jan-dez. 1983.
- RODRIGUEZ, L. C. E.; BUENO, A. R. S.; RODRIGUEZ, F. Rotações de eucaliptos mais longas: análise volumétrica e econômica. **Scientia Forestalis**, n.51, pp.15-28, jun. 1997.
- RODRIGUEZ, L. C. E. Técnicas Quantitativas para a gestão de florestas plantadas. **Apostila da disciplina de Manejo Florestal Avançado** ESALQUE/ USP. Piracicaba, 2005. Disponível em: <[http://lmq.esalq.usp.br/~lcer/lcf586/LCF586\\_Apostila.pdf](http://lmq.esalq.usp.br/~lcer/lcf586/LCF586_Apostila.pdf)>. Acesso em: janeiro de 2010.

- ROWSE, J. e CENTER, C. J. Forest harvesting to optimize timber production and water runoff. **Socio-Econ. Plann.** v. 32, n. 4, p. 277-293, 1998.
- RUNNING, S.W.; COUGHLAN, J.C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. hidrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. **Ecological Modelling**, v.42, p.125-154, 1988.
- SANTOS, J. C. S. M. **Economia Ambiental: Introdução à economia da gestão florestal:** Notas de aula. ESAPL/IPVC. Disponível em: <http://www.ci.esapl.pt/jcms/materiais/Econ%20Ambiental/Florestas.pdf>. Acesso em: dezembro de 2009.
- SBS - Sociedade Brasileira de Silvicultura. **Fatos e Números do Brasil Florestal.** Dezembro de 2008. Disponível em: <[www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf](http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf)>. Acesso em: 21/12/2009.
- SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In MAIDEMENT, D. R. **Handbook of Hydrology** Chapter 4. McGraw-Hill, 1994.
- SOARES, J. V., ALMEIDA, A.C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast-growing Eucalyptus plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, v.253, p.130–147. 2001.
- SOARES, J. V.; XAVIER, A. C.; ALMEIDA; A.C. Balanço de água em Eucaliptos com a caracterização do dossel por técnicas de Sensoriamento Remoto. In Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR: INPE, 2001. p. 139-147.
- SOARES, R. V. Aplicações do modelo de programação linear na solução de problemas florestais. **Revista Floresta.** v. 4, n.2. 1972.
- SOUZA, A. KREUZ, C. L.; MOTTA, C. S. Análise de empreendimentos florestais (pinus) como alternativa de renda para o produtor rural na região dos Campos de Palmas. **Revista de Administração da UFLA**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 8-21. 2004.
- STAPE, J.L. Planejamento global e normalização de procedimentos operacionais da talhadia simples em Eucalyptus. **Série Técnica IPEF**, v.11, n.30, pp.51-62. 1997.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management** v.193. p.17-31. 2004a.

- STAPE, J. L.; RYAN, M. G; BINKLEY, D.. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis x urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, v. 193, pp. 219-234. 2004b.
- SUN, G.; ZHUO, C.; LIU, M.; MCNULTY, S. G.; VOSE, J. M. Watershed evapotranspiration increased due to changes in vegetation composition and structure under a subtropical climate. **Journal of the American Water Resources Association**. v.44, n. 5. Outubro, 2008.
- TIWARI, K.M.; MATHUR, R.S. Water consumption and nutrient uptake by eucalypts. **Indian forester**, v. 109, pp. 851-860. 1983.
- TONINI, H.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G. Curvas de índice de sítio para povoamentos clonais de *Eucalyptus saligna Smith* para a depressão central e serra do sudeste, Rio grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 1, 2006.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *In: Anais I Fórum Geo-Bio-Hidrologia: estudo em vertentes e microbacias hidrográficas*. Curitiba, 1998.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. -3.ed. – Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2004.
- TWERY, M. J.; HORNBECK, J. W. Incorporating water goals into forest management decisions at a local level. **Forest Ecology and Management**, v. 143, p. 87-93, 2001.
- VALENTE, F.; DAVID, J. S.; GASH, J. H. C. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. **Journal of Hydrology**, v. 190(1-2), p. 141-162, 1997.
- WEAR, D. N.; PARKS, P. J. The economics of timber supply: an analytical synthesis of modeling approaches. **Natural Resource Modeling**. v. 8, n. 3, 1994.
- WHITEHEAD, D.; BEADLE, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 113-140, 2004.
- XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, julho-agosto, v.36, n. 4, p. 421-427. Viçosa, 2002.

## ANEXO A – Códigos fonte em Matlab

### A.1 Função de balanço hídrico

```
1 function [IAF,P,Epot,Ed,Esup,Es,Tpot,Et,Ebas,Sol]= balancoPM_eucalipto
2 (especie,densidade,IS,Refreb,EscreveDados,id_ano)
3
4 %PASTAGEM: function [IAF,P,Epot,Ed,Esup,Es,Tpot,Et,Ebas,Sol]=
5 balancoPM_pastagem (IS,EscreveDados, id_ano)
6
7 %DADOS CLIMÁTICOS
8 P = dlmread('prec.txt'); %precipitação
9 T = dlmread('tmed.txt');%temperatura
10 va = dlmread('vmed.txt');%velocidade do vento
11 Wa = dlmread('umed.txt');%umidade relativa atmosférica
12 Wa = Wa/100;
13 if id_ano ~= 1
14     P=[P(id_ano:3287);P(1:(id_ano-1))];
15     T=[T(id_ano:3287);T(1:(id_ano-1))];
16     va=[va(id_ano:3287);va(1:(id_ano-1))];
17     Wa=[Wa(id_ano:3287);Wa(1:(id_ano-1))];
18 end
19 cp = 0.0666; %constante psicrométrica
20 da = 1.220; %densidade do ar
21 dw = 1000; %densidade da água
22 ca = 1.013*10^(-3); %capacidade calorífica do ar
23
24 %DADOS DO REGIME DE MANEJO
25 switch especie
26     case 1 %SAL_49
27         A_iaf=0.1443; B_iaf=-1.9481; C_iaf=7.7924; D_iaf=-6.7924;
28     dens_iaf=1111; a0_hdom=0.0112;
29     case 2 %SAL_39
30         if IS==1
31             A_iaf=0.1476; B_iaf=-2.0551; C_iaf=8.7704; D_iaf=-8.0297;
32         dens_iaf=1111; a0_hdom=0.0315;
33         else %IS==2
34             A_iaf=0.1793; B_iaf=-2.4661; C_iaf=10.2734; D_iaf=-9.4665;
35         dens_iaf=1111; a0_hdom=0.0400;
36         end
37     case 3 %URO
38         A_iaf=0.1715; B_iaf=-2.3444; C_iaf=9.6985; D_iaf=-8.8183;
39     dens_iaf=1122; a0_hdom=0.053;
40     case 4 %SAS
41         A_iaf=0.1310; B_iaf=-1.8281; C_iaf=7.9374; D_iaf=-7.2351;
42     dens_iaf=1666; a0_hdom=0.0109;
43 end
44
45 %DADOS DO SOLO
46 if IS==1 %IS=30
47     Upm = 0.272; %Ponto de Murcha Permanente (m³ água/m³ solo)
48     Ucc = 0.396; %Capacidade de Campo (m³ água/m³ solo)
49     Uma = 0.475; %Capacidade máxima de armazenamento (=porosidade total)
50     IS=30;
51 else %IS=32
52     Upm = 0.197;
53     Ucc = 0.318;
54     Uma = 0.464;
55     IS=32;
```

```

56 end
57
58 %Parâmetros SCS: Solo C, floresta esparsa
59 CN2=78; %capacidade de campo
60 CN1=60; %correção de CN para umidade antecedente AMC1
61 CN3=90; %correção de CN para umidade antecedente AMC3
62 crescimento=1; %condição de crescimento
63 %PASTAGEM: CN2=70; CN1=51; CN3=85; crescimento=0;
64
65 %DADOS DE SIMULAÇÃO
66 tinicial = 1; %Início do período de simulação (dia)
67 tfinal = size(P,1); %Final do período de simulação (dia)
68 dt = 1; %Intervalo de tempo (dia)
69 Dos0 = 0; %Condição inicial de reservatório do dossel vazio (mm)
70 USol0 = Ucc;%Condição inicial da umidade do solo (mm)
71
72 %RADIAÇÃO - escreve o vetor coluna da radiação
73 dia=244; %dia inicial = 1 de setembro
74 Ri=ones(tfinal,1);
75 for cont=tinicial:dt:tfinal
76 Ri(cont,1)=(5162.0305+2501.0218*cos(0.017214*dia)-466.3771*
77 sin(0.017214*dia))*3.6/1000;
78 if (dia==365); dia=0; end
79 dia=dia+1;
80 end
81
82 %DADOS DA VEGETAÇÃO
83 iafe = 0.2; %Capacidade de armazenamento do dossel por unidade de área
84 foliar mm/(m²/m²)
85 fs = 0.5; %fator de sombreamento
86 Cleafmax = 0.01*24*3600; % máx condutância da folha (m/dia)
87 a_veg = 0.1; %albedo da área vegetada
88 a_solo = 0.4; %albedo do solo exposto
89 k = 0.45; %Coeficiente de extinção luminosa;
90 t=tinicial:dt:tfinal;
91 %Índice de área foliar [m² folha / m² solo] e altura da vegetação [m]
92 IAF18m=(A_iaf*(1.5^3)+B_iaf*(1.5^2)+C_iaf*1.5+D_iaf)*((densidade/dens_ia
93 f)^0.5);
94 IAF=ones(tfinal,1); zveg=ones(tfinal,1);
95 for t1=tinicial:dt:tfinal
96 if t1<=(1.5*365)
97 IAF(t1,1)=0.3+(IAF18m-0.3)*t1/(1.5*365);
98 if IAF(t1,1)<0.2
99 IAF(t1,1)=0.2;
100 end
101 elseif t1>=(6*365)
102 IAF(t1,1)=(A_iaf*6^3+B_iaf*6^2+C_iaf*6+D_iaf)
103 *((densidade/dens_iaf)^0.5);
104 else
105 IAF(t1,1) = (A_iaf*(t1/365).^3+B_iaf*(t1/365).^2+
106 C_iaf*(t1/365)+D_iaf)*((densidade/dens_iaf)^0.5);
107 end
108 if (t1>=(3*365)) && (IAF(t1,1)<1.7)
109 IAF(t1,1)=1.7;
110 end
111 zveg = 0.3+((IS/(1-exp(-a0_hdom*84)))*(1-exp(-
112 a0_hdom*(t/365)*12)))'; end
113 % comprimento da raiz [m]
114 if Refreb==1 %(reforma)
115 zr = 0.2+2.3*(t/365)/9;
116 else %Refreb==2 (rebrotar)

```

```

117     zr = 2.5+1*(t/365)/12;
118 end
119 c = 1-exp(-k*IAF); %fração de cobertura vegetal
120 a = (c*a_veg+(1-c)*a_solo); % albedo
121 Cac = iafe*IAF./c; %capacidade de armazenamento do dossel por
122     % unidade de área coberta(mm)
123 %PASTAGEM: k=0.4; IAF=0.8; zveg=0.15; zr=0.3;
124
125 %EVAPOTRANSPIRAÇÃO
126 Tant=T(1:(size(T,1)-1)); Tatual=T(2:size(T,1)); %Diferença de
127 temperatura
128 G= 0.38*[0; Tatual-Tant]; %Fluxo de calor do solo
129 R = Ri.*(1-a); %Radiação líquida incidente
130 Rt = Ri.*(c.*exp(-k*IAF)+(1-c))*(1-a_solo); %Radiação transmitida
131 Delta = 2508.3 ./ ((T+237.3).^2) .* exp(17.3*T./ (T+237.3)); %Relação
132     %entre Psat e
133 temperatura
134 Cat = va./(6.25*(log((zveg+2-0.7*zveg)/(0.1*zveg))).^2); %condutância
135 atmosférica
136 Catd = Cat*3600*24;
137 eas = 0.611* exp(17.3*(T)./ ((T)+237.3)); %Pressão de vapor do ar
138 saturado
139 Cv = 2.5-2.36*10^(-3)*T; %Calor latente de vaporização
140 parteE = (Delta.*(R+G) + da*ca*Catd.*eas.*(1-Wa)) ./ (dw*Cv);
141 Epot = parteE ./ (Delta+ cp) * 1000; %Evapotranspiração potencial (mm)
142 %Fatores ambientais de abertura estomática
143 dea = 10*eas.*(1-Wa); %déficit de pressão de vapor
144 dua = (217*dea./(T+273))/1000; %déficit de umidade absoluta
145 fpt = (dua<=0.01152).*(1-66.6*dua)+(dua>0.01152)*0.233;
146 fp = min(max(fpt,0),1); %Fator de déficit de umidade absoluta
147 fk = min(max(12.78*Ri ./ (11.57*Ri+104.4),0),1); %Fator de radiação
148 ft = min(max(T.*(40-T).^1.18 / 691,0),1); % Fator de temperatura
149
150 %Parâmetros do solo
151 Sol0 = USol0*zr(1)*1000; %Umidade inicial (mm)
152 Wpm = Upm*zr*1000; %Ponto de murcha permanente
153 Wcc = Ucc*zr*1000; %Capacidade de campo
154
155 %Pré-alocação
156 Ed=zeros(1,tfinal); Dos=zeros(1,tfinal); Pi=zeros(1,tfinal);
157 CN=zeros(1,tfinal); Esup=zeros(1,tfinal); fu=zeros(1,tfinal);
158 Ccan=zeros(1,tfinal); coefT=zeros(1,tfinal); Tpot=zeros(1,tfinal);
159 Et=zeros(1,tfinal); Es=zeros(1,tfinal); Ebas=zeros(1,tfinal);
160 Sol=zeros(1,tfinal); Drenagem=zeros(1,tfinal); Dost2=zeros(1,tfinal);
161 Edt=zeros(1,tfinal);
162
163 %Simulação diária
164 for t=tinicial:dt:tfinal
165     %RESERVATÓRIO DO DOSSEL
166     if (t==tinicial) %Determinação da parcela interceptada
167         Dost = Dos0 + P(t); %Armazenamento temporário
168     else
169         Dost = Dos(t-1) + P(t);
170     end
171     Drenagem(t) = max(Dost - Cac(t),0); %Drenagem por unidade de área
172     coberta
173     Dost2(t) = Dost - Drenagem(t);
174     Edt(t) = min (Epot(t), Dost2(t));
175     Ed(t) = Edt(t)*c(t); %Evaporação na área coberta
176     Dos(t) = Dost2(t) - Edt(t); %Armazenamento no dossel final

```

```

177     Pi(t) = (1-c(t))*P(t) + c(t)*Drenagem(t); %Precipitação interna
178 total
179
180     %BALANÇO HÍDRICO NO SOLO
181     %Conteúdo de água no solo no tempo anterior
182     if (t==tinicial) Want = Sol0;
183     else Want = USol(t-1)*zr(t); end
184
185     if (t<(tinicial+5)) CN(t)=CN2;
186     else
187         P5ant=P(t-1)+P(t-2)+P(t-3)+P(t-4)+P(t-5);
188         if (crescimento==0)
189             if (P5ant<13) CN(t)=CN1;
190             elseif (P5ant>28) CN(t)=CN3;
191             else CN(t)=CN2; end
192         else
193             if (P5ant<36) CN(t)=CN1;
194             elseif (P5ant>53) CN(t)=CN3;
195             else CN(t)=CN2; end
196         end
197     end
198     Sscs=25400/CN(t)-254;
199     if (Pi(t) > (0.2*Sscs)) Qscs=((Pi(t)-0.2*Sscs)^2)/(Pi(t)+0.8*Sscs);
200     else Qscs=0; end
201
202     Esup(t) = Qscs; %Escoamento superficial
203     W = Want + Pi(t) - Esup(t); %armazenamento temporário
204
205     %Transpiração
206     fu(t)= min(max((W-Wpm(t))/(Wcc(t)-Wpm(t)),0),1); %Fator de umidade
207     Ccan(t) = fs*IAF(t)*Cleafmax*fk(t)*ft(t)*fu(t)*fp(t); %Condutância
208 da copa [m/s]
209     coefT(t) = (1-Dos(t)/Cac(t)); %limita a transpiração se a copa
210 estiver molhada
211     Tpot(t) = parteE(t)/(Delta(t)+cp*(1+Catd(t)/Ccan(t)))*1000*coefT(t);
212 %Transpiração potencial[mm]
213     Et(t) = max(0, min(Tpot(t), min(Epot(t)-Ed(t),W-Wpm(t))));
214 %Transpiração
215     W = W - Et(t);
216
217     Ebas(t) = max(W - Wcc(t), 0);
218     W = W - Ebas(t);
219     Sol(t) = W; %Conteúdo de água no solo final
220     USol(t)=Sol(t)/zr(t);
221 end
222
223 dlmwrite(EscreveDados,[P, Ri,
224 c,Catd,parteRad,J,Epot,Dos',Ed',Pi',fp,fk,ft,fu',Ccan',Esup',
225 Csolo',Espot',Es',Rt,coefT',Tpot',Et',Ebas',Sol',USol'],'delimiter',
226 '\t');
227 end

```

## A.2 Rodar modelo de balanço hídrico para cada alternativa de manejo

```

1 function rodar_modelo
2 for i=1:1:9 %anos de simulação
3     switch i
4         case 1 id_ano=1;     case 2 id_ano=366;   case 3 id_ano=732;
5         case 4 id_ano=1097; case 5 id_ano=1462; case 6 id_ano=1827;
6         case 7 id_ano=2193; case 8 id_ano=2558; case 9 id_ano=2923;

```

```

7     end
8
9     cont=0;
10    for especie=1:1:4
11        for densidade=1:1:3
12            switch densidade
13                case 1 dens=1666; case 2 dens=1333; case 3 dens=1111;
14            end
15            for IS=1:1:2
16                for Refreb=1:1:2
17                    EscreveDados=sprintf('Sim_e%.0f_d%.0f_i%.0f_r%.0f
18 _ano%.0f', especie, densidade, IS, Refreb, i); %Nome do arquivo de saída
19
20 [IAF,P,Epot,Ed,Esup,Es,Tpot,Etran,Ebas,Sol]=balancoPM_eucalipto(especie,
21 dens, IS, Refreb, EscreveDados, id_ano);
22     fim_mes=[30 61 91 122 153 181 212 242 273 303 334 365];
23     dia_ano=0; mes=0; ano=0;%contadores de dias, mês e ano
24     %Inicializando os valores
25     P_t=0; Epot_t=0; Ed_t=0; Esup_t=0; Es_t=0; Tpot_t=0;
26 Etran_t=0; Ebas_t=0; Sol_t=0; P_ta=0; Epot_ta=0; Ed_ta=0; Esup_ta=0;
27 Es_ta=0; Tpot_ta=0; Etran_ta=0; Ebas_ta=0; Sol_ta=0;
28     %Pré-allocando P_m=zeros(1,12*11); Epot_m=zeros(1,12*11);
29 Ed_m=zeros(1,12*11); Esup_m=zeros(1,12*11); Es_m=zeros(1,12*11);
30 Tpot_m=zeros(1,12*11); Etran_m=zeros(1,12*11); Ebas_m=zeros(1,12*11);
31 Sol_m=zeros(1,12*11); P_a=zeros(1,11); Epot_a=zeros(1,11);
32 Ed_a=zeros(1,11); Esup_a=zeros(1,11); Es_a=zeros(1,11);
33 Tpot_a=zeros(1,11); Etran_a=zeros(1,11); Ebas_a=zeros(1,11);
34 Sol_a=zeros(1,11); IAF_a=zeros(1,11);
35
36     for t=1:1:numel(P)
37         dia_ano=dia_ano+1;
38         %acumula valores mensais:
39         P_t=P_t+P(t); Epot_t=Epot_t+Epot(t);
40 Ed_t=Ed_t+Ed(t); Esup_t=Esup_t+Esup(t); Es_t=Es_t+Es(t);
41 Tpot_t=Tpot_t+Tpot(t); Etran_t=Etran_t+Etran(t);
42 Ebas_t=Ebas_t+Ebas(t); Sol_t=Sol_t+Sol(t);
43         %acumula valores anuais:
44         P_ta=P_ta+P(t); Epot_ta=Epot_ta+Epot(t);
45 Ed_ta=Ed_ta+Ed(t); Esup_ta=Esup_ta+Esup(t);
46 Es_ta=Es_ta+Es(t); Tpot_ta=Tpot_ta+Tpot(t);
47 Etran_ta=Etran_ta+Etran(t); Ebas_ta=Ebas_ta+Ebas(t);
48 Sol_ta=Sol_ta+Sol(t);
49         %guarda os valores mensais:
50         IsEndOfAMonth=sum(dia_ano==fim_mes);
51         if IsEndOfAMonth
52             mes=mes+1; P_m(mes)=P_t; Epot_m(mes)=Epot_t;
53 Ed_m(mes)=Ed_t; Esup_m(mes)=Esup_t; Es_m(mes)=Es_t; Tpot_m(mes)=Tpot_t;
54 Etran_m(mes)=Etran_t; Ebas_m(mes)=Ebas_t; Sol_m(mes)=Sol_t;
55             P_t=0; Epot_t=0; Ed_t=0; Esup_t=0; Es_t=0;
56 Tpot_t=0; Etran_t=0; Ebas_t=0; Sol_t=0;
57         end
58         if (dia_ano==365)
59             dia_ano=0; ano=ano+1;
60             P_a(ano)=P_ta; Epot_a(ano)=Epot_ta;
61 Ed_a(ano)=Ed_ta; Esup_a(ano)=Esup_ta; Es_a(ano)=Es_ta;
62 Tpot_a(ano)=Tpot_ta; IAF_a(ano)=IAF(t); Etran_a(ano)=Etran_ta;
63 Ebas_a(ano)=Ebas_ta; Sol_a(ano)=Sol_ta;
64             P_ta=0; Epot_ta=0; Ed_ta=0; Esup_ta=0; Es_ta=0;
65 Tpot_ta=0; Etran_ta=0; Ebas_ta=0; Sol_ta=0;
66         end
67     end

```

```

68         %escreve arquivos com valores mensais
69
70     EscreveDadosM=sprintf('Sim_e%.0f_d%.0f_i%.0f_r%.0f_mensal
71     _ano%.0f', especie, densidade, IS, Refreb, i); %Nome do arquivo de saída
72
73     dlmwrite(EscreveDadosM, [P_m', Epot_m', Ed_m', Esup_m', Es_m', Tpot_m', Etran_m
74     ', Ebas_m', Sol_m'], 'delimiter', '\t');
75
76         Vazao = Esup_a+Ebas_a;
77         Perdas=(Es_a + Ed_a + Etran_a)./P_a;
78         cont=cont+1;
79         Perdas1(cont,:)= [especie densidade IS Refreb Perdas];
80         Vazaol(cont,:)= [especie densidade IS Refreb Vazao];
81         IAF1(cont,:)= [especie densidade IS Refreb IAF_a];
82         Mmediol(cont,:)= [especie densidade IS Refreb mean(P_m)
83     mean(Epot_m) mean(Ed_m) mean(Esup_m) mean(Es_m) mean(Tpot_m)
84     mean(Etran_m) mean(Ebas_m) mean(Sol_m)];
85     end
86     end
87     end
88     end
89     %Arquivos de saída
90     EscreveDadosA=sprintf('EscreveDadosA_IAFannual_ano%.0f', i);
91     dlmwrite(EscreveDadosA, IAF1, 'delimiter', '\t');
92     EscreveDadosMmedio=sprintf('EscreveDadosA_Mmedio_ano%.0f', i);
93     dlmwrite(EscreveDadosMmedio, Mmediol, 'delimiter', '\t');
94     EscreveDadosA=sprintf('EscreveDadosA_Perdas_ano%.0f', i);
95     dlmwrite(EscreveDadosA, Perdas1, 'delimiter', '\t');
96     EscreveDadosA_Q=sprintf('EscreveDadosA_Vazao_ano%.0f', i);
97     dlmwrite(EscreveDadosA_Q, Vazaol, 'delimiter', '\t');
98     end
99     end

```

### A.3 Gerar VET para cada alternativa de manejo

```

1     function vet
2     %função que calcula o VET para todas as alternativas de manejo
3     [NUM]=xlsread('VPL');
4     %Dados iniciais
5     juros=0.12; preco=35; %preço da madeira em pé [m³.ha]
6     %Espécies:
7     esp(:,1)=NUM(:,1)==1; esp(:,2)=NUM(:,1)==2; esp(:,3)=NUM(:,1)==3;
8     esp(:,4)=NUM(:,1)==4;
9     %Rotação: 1=reforma; 2=rebrota
10    rot(:,1)=NUM(:,2)==1; rot(:,2)=NUM(:,2)==2;
11    %Densidades
12    den(:,1)=NUM(:,3)==1666; den(:,2)=NUM(:,3)==1333;
13    den(:,3)=NUM(:,3)==1111;
14    %Pré-alocar
15    Cmudas=ones(4,2,4); Cinicial=ones(4,2,4); Canual=ones(4,2,4);
16    Ccomercial=ones(4,2,4); V=ones(4,2,4,9,2);
17    %Custos e Volumes
18    for esp1=1:1:4 for rot1=1:1:2 for den1=1:1:3
19        %Custos
20        Cmudas(esp1,rot1,den1)=sum(NUM(:,4).*den(:,den1).*rot(:,rot1).*esp(:,esp
21        1));
22        Cinicial(esp1,rot1,den1)=sum(NUM(:,5).*den(:,den1).*rot(:,rot1).*esp(:,e
23        sp1));
24        Canual(esp1,rot1,den1)=sum(NUM(:,6).*den(:,den1).*rot(:,rot1).*esp(:,esp
25        1))/6;

```

```

26 Ccomercial(esp1,rot1,den1)=sum(NUM(:,7).*den(:,den1).*rot(:,rot1).*esp(:
27 ,esp1));
28         %Volume
29         for il=7:1:9
30             for is1=1:1:2 %IS: 1=IS30 e 2=IS32
31 V(esp1,rot1,den1,il,is1)=sum(NUM(:,7+(il-6)+(is1-
32 1)*3).*den(:,den1).*rot(:,rot1).*esp(:,esp1));
33             end
34         end
35     end end end
36
37     linha=1;
38     %Gerar Fluxo de caixa
39     for esp1=1:1:4 for den1=1:1:3 for is1=1:1:2 for il=7:1:9 for i2=7:1:9
40         for rot1=1:1:2
41             Caixa=zeros(il+i2,1);
42             for t=1:1:(il+i2) %tempo em anos
43                 if (t==il)
44 Caixa(t)=V(esp1,rot1,den1,t,is1)*preco-Ccomercial(esp1,rot1,den1);
45                 elseif (t==i2+il) %Colheita
46 Caixa(t)=V(esp1,rot1,den1,i2,is1)*preco-Ccomercial(esp1,rot1,den1);
47                 elseif ((t==1) || (t==il+1)) %Plantio
48                     Caixa(t)=-Cinicial(esp1,rot1,den1);
49                 else %Manutenção
50                     Caixa(t)=-Canual(esp1,rot1,den1);
51                 end
52             end
53             temp2=[Caixa;Caixa];
54             for i_inil=1:1:3
55                 switch i_inil
56                     case 1 i_ini=0+1;
57                     case 2 i_ini=3+1;
58                     case 3 i_ini=6+1;
59                 end
60                 i_fim=i_ini+17;
61                 temp=temp2(i_ini:i_fim);
62                 Cx(linha,:)=temp';
63 Dados(linha,:)=[esp1,den1,is1,il,i2,rot1,i_inil,temp'];
64                 VPL(linha)=0;VET(linha)=0;
65                 for ano=1:1:il+i2
66                     t=ano-1;
67                     VPL(linha)=VPL(linha)+Caixa(ano)*(1+juros)^(-t); %Valor Presente líquido
68                     VET(linha)=VPL(linha)/(1-(1+juros)^(-t));
69                 end
70                 linha=linha+1;
71             end
72         end
73     end end end end end
74
75     %Escrever Arquivo com Fluxo de Caixa
76     dlmwrite('FluxoCaixa_iini_certo',Dados,'delimiter','\t');
77     %Escrever Arquivo com Índices Econômicos
78     DadosVPL=[VPL',VET'];
79     dlmwrite('ValoresVPL_iini_certo',DadosVPL,'delimiter','\t');
80     end

```

#### A.4 Regime de manejo ótimo

```
1 function [x,fval,exitflag,output,lambda] = planejamento
2 f=-dlmread('VET.txt');
3 lb=zeros(1296,1);
4 ub=Inf;
5 MaxIter_Data=1000;
6 TolFun_Data=10^(-5);
7 % Start with the default options
8 options = optimset;
9 % Modify options setting
10 options = optimset(options,'Display', 'iter');
11 options = optimset(options,'MaxIter', MaxIter_Data);
12 options = optimset(options,'TolFun', TolFun_Data);
13 options = optimset(options,'Diagnostics', 'on');
14 %Simplex
15 options = optimset(options,'LargeScale', 'off');
16 options = optimset(options,'Simplex', 'on');
17 %Com restrição hidrológica de 200mm
18 Aineq1=-dlmread('DifQ.txt');
19 bineq1=ones(18,1)*200*(71.771+9.472)*10000;
20 Aineq2=dlmread('IS30.txt');
21 bineq2=71.771*10000;
22 Aineq3=dlmread('IS32.txt');
23 bineq3=9.472*10000;
24 Aineq=[Aineq1;Aineq2;Aineq3];
25 bineq=[bineq1;bineq2;bineq3];
26 [x,fval,exitflag,output,lambda] = ...
27 linprog(f,Aineq,bineq,[],[],lb,ub,[],options);
28 %Arquivo de saída
29 arquivo=sprintf('X_FVAL_EXITFLAG_linprog_sem_certo');
30 dlmwrite(arquivo,[x',fval',exitflag'],'delimiter','\t');
31 end
```

## ANEXO B – Cálculo da evapotranspiração por Penman-Monteith

O modelo utiliza a equação de Penman-Monteith conforme apresentado por FAO (2006). Os parâmetros podem ser medidos ou facilmente calculados por dados meteorológicos.

$$E = fc \cdot \left( \frac{\Delta \cdot (R_L - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_w} \quad \text{B1}$$

onde:

$E$ : taxa de evapotranspiração [ $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ];

$\Delta$ : inclinação da curva de pressão de vapor de saturação [ $\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$R_L$ : radiação líquida [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ];

$G$ : fluxo de calor no solo [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ];

$\rho_a$ : massa específica do ar [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$\rho_w$ : massa específica da água [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$c_p$ : calor específico do ar ( $c_p = 1,013 \cdot 10^{-3}$ ) [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$(e_s - e_a)$ : déficit de pressão de vapor no ar [ $\text{kPa}$ ];

$r_a$ : resistência aerodinâmica [ $\text{dia} \cdot \text{m}^{-1}$ ];

$r_s$ : resistência superficial [ $\text{dia} \cdot \text{m}^{-1}$ ];

$\gamma$ : constante psicrométrica ( $\gamma = 0,0666 \cdot 10^{-3}$ ) [ $\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$\lambda$ : calor latente de vaporização ( $\lambda = 2,45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$fc$ : fator de conversão de unidades ( $fc = 1000$ ) [ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$ ].

Algumas equações foram desenvolvidas para estimativa dos parâmetros da equação de Penman-Monteith a partir de variáveis meteorológicas mais facilmente obtidas:

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp \left[ \frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3} \right] \quad \text{B2}$$

$$\Delta = \frac{4098 \cdot [0,6108(17,27 \cdot T)]}{(T + 237,3)^2} \quad \text{B3}$$

$$e_a = e_s \cdot \frac{W_a}{100} \quad \text{B4}$$

$$G = 0,38 \cdot (T_t - T_{t-1})$$

B5

Onde:

$e_s$ : pressão de saturação de vapor a temperatura do ar [kPa];

$e_a$ : pressão de vapor real [kPa];

$T$ : temperatura média do ar [°C];

$T_t$ : temperatura média do ar no tempo  $i$  [°C];

$T_{t-1}$ : temperatura média do ar no tempo  $i-1$  [°C];

$W_a$ : umidade relativa do ar [%].

### A.1 Determinação da radiação líquida

A radiação solar incidente (insolação) é o principal condutor dos processos físicos e biológicos do nosso planeta. A radiação que atinge o topo da atmosfera terrestre é chamada de constante solar, e tem um valor aproximado de  $0,082 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ . Em uma escala global, os gradientes latitudinais da insolação, causada pela geometria da rotação da Terra e da revolução em torno do Sol, são bem conhecidos. Em uma escala de paisagem, a topografia é o principal fator que altera a distribuição de insolação. Variabilidade de altitude, orientação da superfície e sombras de características topográficas criam fortes gradientes locais de insolação (Fu e Rich, 2000). Isto leva a heterogeneidade espacial e temporal elevada em locais de energia e balanço hídrico, que determina fatores microambientais como a evapotranspiração.

Em contraste com o alto custo de construção e manutenção de estações de monitoramento da radiação solar, modelos espaciais de radiação solar fornecem uma eficiente caracterização da insolação, tanto sob o ponto de vista espaço-temporal quanto sob o ponto de vista econômico (Fu e Rich, 2000). Estes modelos são melhor utilizados quando desenvolvidos dentro de uma plataforma de sistema de informações geográficas (SIG), onde os mapas de insolação podem ser convenientemente gerados ou relacionados a outros mapas digitais.

Neste trabalho, a radiação foi determinada utilizando a ferramenta Area Solar Radiation da extensão Solar Analyst do ArcGis. A ferramenta necessita apenas do modelo digital de elevação da área e características atmosféricas para o cálculo da radiação global. A partir destes dados, pode calcular a insolação integrada para cada período de tempo. Ele considera a latitude e elevação do local, orientação da superfície, sombreamento produzido pela topografia circundante, variações diárias e sazonais no

ângulo solar e atenuação atmosférica. A seguir é feito um resumo da metodologia utilizada neste modelo. O algoritmo completo pode ser encontrado em Fu e Rich (2000).

Para cada local do modelo digital de elevação são geradas três representações: visibilidade da abóbada celeste, mapa solar e mapa celeste, representadas na Figura 1. A visibilidade da abóbada representam as parcelas do céu visíveis ou obstruídas pela topografia circunvizinha, com base no modelo digital de elevação (MDE). O mapa solar representa a posição solar e como ela varia ao longo do dia e do ano. O mapa celeste está relacionado apenas com a radiação difusa, que é originada de todos os setores do céu definidos por azimutes e zênites.

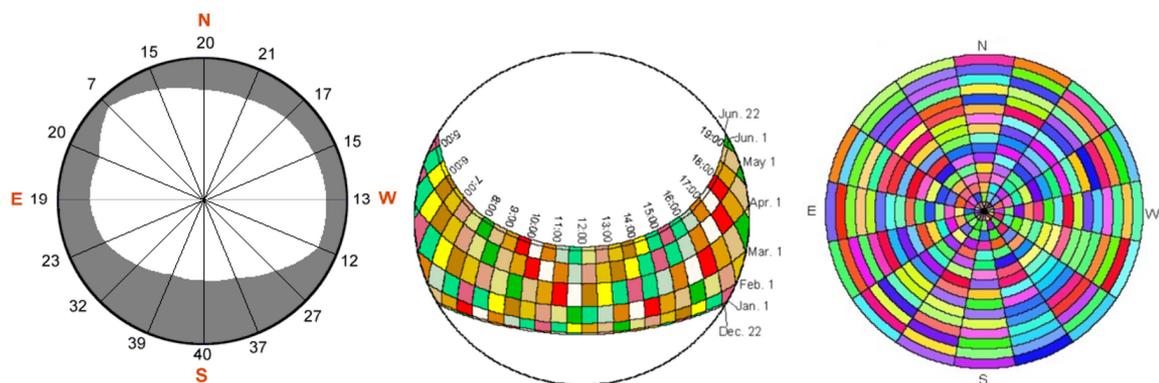


Figura 1 – Visibilidade da abóbada, mapa solar e mapa celeste. (Fu e Rich, 1999).

As radiações direta e difusa são calculadas, então, utilizando a sobreposição dos mapas (solar e celeste) com a representação de visibilidade da abóbada. A radiação direta total que atinge a superfície é a soma das radiações diretas de cada setor do mapa solar em cada período de tempo. A radiação difusa pode ser calculada por diferentes algoritmos, tendo sido utilizado neste trabalho o modelo de céu uniformemente nublado, isto é, considerou-se que todos os setores da abóbada celeste emitem radiação difusa de mesma intensidade. A radiação global é calculada com a soma das radiações difusa e direta para cada localização sobre a superfície topográfica, produzindo mapas de insolação para toda uma área geográfica.

A fim de considerar a variabilidade da transmissividade e a difusividade atmosférica, estas podem ser relacionadas à nebulosidade pelas equações A6 e A7. Estas equações foram adaptadas de Kasten and Czeplak (1980) de acordo com os valores para condições de céu claro sugeridos por Fu e Rich (1999):

$$\tau_{atm} = 1 - 0,75(n)^{3,4} \quad B6$$

$$Dif = 0,2 + 0,7(n)^2 \quad B7$$

onde:

$\tau_{atm}$ : transmissividade atmosférica [-];

$n$ : fração de cobertura de nuvens [-];

$Dif$ : difusividade atmosférica [-].

A radiação líquida disponível para o processo de transpiração e evaporação da água interceptada é calculada por:

$$R_L = R_G \cdot (1 - \alpha) \quad B8$$

onde:

$R_G$ : radiação global incidente [ $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ ];

$\alpha$ : albedo [-].

A radiação líquida disponível ao processo de evaporação do solo, entretanto, é reduzida de acordo com a equação de Beer-Lambert, que descreve a extinção da luz através da copa, conforme apresentado por:

$$R_L = R_G \cdot (1 - \alpha) \cdot e^{-k \cdot IAF} \quad B9$$

onde:

$k$ : coeficiente de extinção luminosa [-];

$IAF$ : índice de área foliar [-].

## A.2 Determinação da resistência aerodinâmica

A dificuldade de transferência de calor e de vapor de água da superfície transpirante até o ar que se encontra sobre a planta está determinada pela resistência aerodinâmica. Na proximidade da vegetação o ar tende a ficar mais úmido, dificultando o fluxo de evaporação. A velocidade do vento e turbulência contribuem para reduzir a resistência aerodinâmica, trocando o ar úmido próximo a superfície que está fornecendo vapor, como as folhas das plantas, solo ou as superfícies líquidas, pelo ar seco de níveis mais elevados da atmosfera. Dessa forma, a resistência aerodinâmica é inversamente proporcional à altura dos obstáculos enfrentados pelo vento. No caso de plantios, estes obstáculos são representados pela altura da vegetação.

A resistência aerodinâmica é calculada por:

$$r_a = \frac{\ln \left[ \frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \cdot \ln \left[ \frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 \cdot u_z} \quad \text{B10}$$

onde:

$z_m$ : altura de medição do vento [m];

$z_{om}$ : comprimento da rugosidade que rege a transferência de momento [m];

$z_h$ : altura de medição da umidade [m];

$z_{oh}$ : comprimento da rugosidade que rege a transferência de calor e vapor de água [m];

$d$ : plano de altura de deslocamento zero [m];

$k$ : constante de Von Karman, 0,41 [-];

$u_z$ : velocidade do vento na altura  $z$  [m.s<sup>-1</sup>].

Para uma ampla gama de cultivos, as variáveis  $d$ ,  $z_{om}$  e  $z_{oh}$  podem ser estimadas pela altura do cultivo,  $h$  [m], por meio das seguintes equações:

$$d = 2/3 h \quad \text{B11}$$

$$z_{om} = 0,123 h \quad \text{B12}$$

$$z_{oh} = 0,1 z_{om} \quad \text{B13}$$

### A.3 Determinação da resistência superficial

A resistência superficial descreve a resistência do fluxo de vapor através da vegetação transpirante e da superfície evaporante do solo. Para a vegetação transpirante, a resistência superficial foi calculada conforme apresentado por Dingman (2002). A resistência superficial do dossel é dada considerando que o mesmo pode ser representado como uma “grande folha” onde a condutância total é proporcional a soma da condutância de todas as folhas. Ou seja:

$$C_s = f_s \cdot IAF \cdot C_{folha} \quad \text{B14}$$

$$r_s = 1/C_{can} \quad \text{B15}$$

Onde:

$C_s$ : condutância superficial do dossel [m.s<sup>-1</sup>];

$C_{folha}$ : condutância foliar [m.s<sup>-1</sup>];

$f_s$ : fator de sombreamento[-];

$r_s$ : resistência superficial do dossel [s.m<sup>-1</sup>].

O parâmetro  $f_s$  indica a porcentagem de área foliar que efetivamente contribui para a transferência superficial de calor e de vapor. Isto representa geralmente a parte

superior iluminada de um cultivo denso. Valores de  $f_s$  variam de 0,5 a 1 e diminuem com o aumento do IAF. FAO (2006) sugere o valor  $f_s=0,5$  que considera que normalmente somente a metade superior das folhas está contribuindo ativamente. Almeida e Soares (2003) salientam que a atenuação da radiação a partir do topo da copa para as partes inferiores do dossel torna a condutância global do dossel de diferentes espécies florestais muito próximas para valores de IAF superiores a 3,0.

A resistência de uma folha individual é específica para cada cultivo e difere entre suas variedades e manejo. É determinada pelo número de estômatos por unidade de área e pelo tamanho da abertura dos estômatos. Há, entretanto, uma carência de informações sólidas sobre as variações dessa resistência. A informação disponível na literatura se orienta sobretudo de estudos fisiológicos e ecofisiológicos.

A resistência estomática é influenciada pelo clima e pela disponibilidade de água, sendo que esta influência varia de acordo com o controle que cada espécie exerce sobre a abertura dos estômatos. Por exemplo, a resistência aumenta quando o cultivo se encontra limitado pela disponibilidade de água no solo e, conseqüentemente, a transpiração do cultivo é limitada. Os fatores ambientais devem ser então incorporados no modelo de transpiração, sendo que diferentes equações empíricas foram propostas. Neste trabalho foram utilizadas as equações desenvolvidas e testadas por Stewart (1988, citado por Dingman 2002).

$$C_{\text{folha}} = C_{\text{folha}}^* \cdot f_R(R_G) \cdot f_\rho(\rho_v) \cdot f_T(T) \cdot f_W(\Delta W) \quad \text{B16}$$

$$f_R = \frac{12,78 \cdot R_G}{11,57 \cdot R_G + 104,4} \quad \text{B17}$$

$$f_\rho = 1 - 66,6 \cdot \Delta\rho_v; \quad 0 \leq \Delta\rho_v \leq 0,01152 \quad \text{B18}$$

$$f_\rho = 0,233; \quad 0,01152 \leq \Delta\rho_v \quad \text{B18}$$

$$\Delta\rho_v = 2,17 \cdot \frac{(e_s - e_a)}{T} \quad \text{B19}$$

$$f_T = \frac{T \cdot (40 - T)^{1,18}}{691}; \quad 0 \leq T \leq 40 \quad \text{B20}$$

$$f_W = 1 - 0,00119 \cdot \exp(0,81 \cdot \Delta W); \quad 0 \leq \Delta W \leq 8,4 \quad \text{B21}$$

onde:

$C_{\text{folha}}^*$ : condutância foliar máxima [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$\Delta\rho_v$ : déficit de umidade do ar [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$\Delta W$ : déficit de água no solo [cm].

Dingman (2002) cita valores da condutância foliar máxima em torno de  $5,3\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  para florestas coníferas e latifoliadas,  $8\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  para pradaria e  $11\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  para culturas típicas. Para a evaporação da água interceptada é assumido uma resistência superficial igual a zero.