



LÉO FERNANDES ÁVILA

**BALANÇO HÍDRICO EM UM REMANESCENTE
DE MATA ATLÂNTICA DA SERRA DA
MANTIQUEIRA, MG**

LAVRAS – MG

2011

LÉO FERNANDES ÁVILA

**BALANÇO HÍDRICO EM UM REMANESCENTE DE MATA
ATLÂNTICA DA SERRA DA MANTIQUEIRA, MG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Carlos Rogério de Mello

LAVRAS - MG

2011

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Ávila, Léo Fernandes.

Balanço hídrico em um remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, MG / Léo Fernandes Ávila. – Lavras : UFLA, 2011.
179 p.: il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Carlos Rogério de Mello.

Bibliografia.

1. Variação espaço-temporal dos processos hidrológicos. 2. Hidrologia florestal. 3. Ecossistemas florestais. 4. Gestão de recursos hídricos. 5. Monitoramento de bacias hidrográficas. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 551.483

LÉO FERNANDES ÁVILA

**BALANÇO HÍDRICO EM UM REMANESCENTE DE MATA
ATLÂNTICA DA SERRA DA MANTIQUEIRA, MG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 02 de dezembro de 2011.

| | |
|-------------------------------|------|
| Dr. Antônio Marciano da Silva | UFLA |
| Dr. Felizardo Adenilson Rocha | IFBA |
| Dr. Gilberto Coelho | UFLA |
| Dr. José Márcio de Mello | UFLA |

Dr. Carlos Rogério de Mello
Orientador

LAVRAS - MG

2011

A meus pais José Fernandes de Ávila (in memoriam) e Cleri Maria Ávila, pelo apoio, encorajamento, pelo generoso amor e atenção que me dedicam e pelos ensinamentos que formaram os alicerces de minha história.

Aos meus irmãos, Angélica Aparecida Ávila e Márcio Leandro Ávila, por todo apoio, amor, compreensão e pela atenção ao longo da trajetória que me levou à concretização desta etapa.

Ao grande primo Alex Ávila de Souza (in memoriam), pela amizade incondicional e pelo exemplo de vida que nos deixou.

Aos meus afilhados, Victor Augusto Ávila e Pedro Ávila pela enorme alegria e satisfação devido aos laços que nos unem.

Ao compadre e grande amigo Valério Antônio Ávila, pelos conselhos e orientações na busca de todos os meus sonhos e objetivos.

*A todos meus entes queridos e amigos que passaram dessa para outra vida e sempre fizeram muita falta. Em especial, ao meu pai **José**, que há 13 anos nos deixou. Seja onde estiver, ressalto que foi um dos responsáveis por essa conquista e merece meu reconhecimento.*

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A DEUS pela sabedoria e discernimento e por me amparar nos momentos difíceis e por me auxiliar na superação de todas as dificuldades.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de realização do curso.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudos (Edital 70/2008 – Processo 579178/2008-0) e apoio financeiro ao Projeto “Balanço Hídrico e qualidade de água em microbacia hidrográfica ocupada por Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira, MG” (Processo 471688/2009-6), à FAPEMIG pelo apoio financeiro ao Projeto “Balanço hidrológico e produção de água numa Bacia Hidrográfica no ambiente da Serra da Mantiqueira, MG” (CAG – APQ – 00942-08 e PPM-IV 060/10) e à Cemig/ANEEL, pelos recursos disponibilizados por meio dos Projetos P&D 076 e P&D 176.

Ao Professor Carlos Rogério de Mello, pela valiosa orientação, incentivo, confiança, compreensão e ensinamentos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Antônio Marciano da Silva (DEG/UFLA), Gilberto Coelho (DEG/UFLA), José Márcio de Mello (DCF/UFLA); Felizardo Adenilson Rocha (IFBA) e à Pesquisadora Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi (DEG/UFLA), pelas colaborações no desenvolvimento deste trabalho.

A companhia com os amigos Alysson, Camila Alvarenga, Donizete (Dony), Geovane, Lamartine (Presidente), Leandro Pinto, Lidiane, Lucas (Abacate), Marcelo (Viola), Matheus (Gago), Millena, Otávio (Drops), Rodrigo (Piu), Rosângela.

Enfim, a todos os colegas do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas e professores e a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, ajudaram-me para que este trabalho fosse realizado.

MUITO OBRIGADO

“A Fé é o firme fundamento das coisas que se esperam (...)”

Hebreus 11:1

“Se você acredita que pode ou se acredita
que não pode, você está certo”

Henry Ford

“Nossa maior fraqueza está em desistir.
O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez”

Thomas Edison

“Enfrentar muitas dificuldades aperfeiçoa o ser.
Não enfrentá-las o arruína”

Lao Tsé

“Aquele que conhece o outro é sábio.
Aquele que conhece a si mesmo é iluminado.
Aquele que vence o outro é forte.
Aquele que vence a si mesmo é poderoso.
Aquele que conhece a alegria é rico.
Aquele que conserva o seu caminho tem vontade.

Seja humilde, e permanecerás íntegro.
Curva-te, e permanecerás ereto.
Esvazia-te, e permanecerás repleto.
Gasta-te, e permanecerás novo.

O sábio não se exhibe, e por isso brilha.
Ele não se faz notar, e por isso é notado.
Ele não se elogia, e por isso tem mérito.
E, porque não está competindo,
Ninguém no mundo pode competir com ele.”

Lao Tsé - Tao Te Ching

RESUMO

A Mata Atlântica consiste de um ecossistema ameaçado de extinção no Brasil. Sua distribuição no território brasileiro praticamente se restringe a remanescentes em áreas de montanhas e cabeceiras de bacias hidrográficas, como a serra da Mantiqueira, que corresponde à principal região produtora de água do sudeste do Brasil. Apesar da importância deste bioma no contexto ambiental, são praticamente inexistentes estudos de balanço hídrico no mesmo, principalmente em áreas de montanhas. Neste contexto, a descrição da dinâmica da água e sua interação nas etapas do ciclo hidrológico são essenciais para a determinação do balanço hídrico, devido à sua relevante participação nos processos hidrológicos e à sua variação espaço-temporal em função de fatores edáficos, topográficos, climáticos e de vegetação. Nesse sentido, objetivou-se, neste trabalho, analisar os componentes do balanço hídrico e suas inter-relações numa microbacia hidrográfica inteiramente ocupada por um remanescente de Mata Atlântica (MBMA), localizada na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha (BHRL), na serra da Mantiqueira, com área de 16 ha, ao longo dos anos hidrológicos de 2009/2010 e 2010/2011; analisar a partição da precipitação pluvial, correlacionando-a com a evolução sazonal dos ecossistemas da Mata Atlântica, identificada pela aplicação das diferenças dos índices de vegetação por diferença normalizada (IVDN) e analisar a estabilidade temporal do conteúdo de água na camada superficial do solo (0-0,20 m de profundidade), sob diferentes usos do solo, na BHRL, nos períodos seco e chuvoso, estimando os pontos mais representativos para essa determinação. De acordo com os resultados do balanço hídrico conduzido na MBMA, verificou-se que a evapotranspiração correspondeu, em média, a 47,7% do total precipitado e a interceptação, a 22,7%. O deflúvio total correspondeu a 35% da precipitação, tendo a participação do deflúvio subterrâneo neste sido de 75,82%, porém, com variabilidade intra-anual importante. A variação do armazenamento de água na MBMA foi positiva em ambos os anos hidrológicos, contudo, com destaque para o ano 2010/2011, com um saldo de 1,516 mm/dia, fruto do armazenamento na zona saturada. Os resultados demonstraram que, durante períodos nos quais o regime pluvial está próximo ou é superior às condições normais, a Mata Atlântica desempenha papel fundamental na produção de água, atenuando o escoamento superficial direto e promovendo melhores condições hidrológicas do solo para infiltração. Contudo, há indicativos de que, quando uma situação climática atípica ocorre, com prolongamento do período seco, há um aumento considerável da transpiração das plantas, com consequente redução do deflúvio subterrâneo pela influência destas no estoque de água armazenada na microbacia para suprimento de suas

demandas ecofisiológicas. Com relação à análise da partição da precipitação pluvial na MBMA, constatou-se que não houve correlação positiva entre a capacidade de armazenamento de água do dossel da Mata Atlântica com a regeneração vegetal sinalizada pelas diferenças do índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN). Observou-se também maior percentual da precipitação interna da Mata Atlântica em períodos com menor taxa de precipitação, com maior variabilidade espacial da precipitação interna em períodos com maiores totais precipitados. Além disso, notou-se que a técnica de co-krigagem, utilizando os valores de IVDN como variável secundária, apresentou melhores resultados no estudo da distribuição espacial da precipitação interna na condição de Mata Atlântica. Os resultados do estudo do conteúdo de água superficial do solo mostraram que houve maior estabilidade temporal na área de vegetação de várzea, menor na área ocupada por Mata Atlântica e intermediária na área de pastagem. Os resultados apresentaram variações significativas da diferença relativa média entre os períodos de medição, concluindo-se que as características de cada área devem ser consideradas particularmente para escolha dos pontos. Na área de pastagem, identificou-se apenas um ponto para monitoramento, tanto para o período chuvoso quanto para o seco. Nas áreas de Mata Atlântica e vegetação de várzea foram identificados dois pontos, sendo um especificamente para o período chuvoso e outro para o período de estiagem, sendo recomendada uma análise individual específica para cada estação.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica. Hidrologia Florestal. Balanço Hídrico. Umidade do solo. Mata Atlântica. Serra da Mantiqueira.

ABSTRACT

The Atlantic Forest is a Brazilian ecosystem threatened by extinction. Its area in Brazil is restricted to remnants in mountainous regions and headwaters of basins such as Mantiqueira Range which is part of the main water yield region of Southeastern Brazil. Despite of the environmental importance of this biome there are not existence studies about water balance, especially in mountainous areas. Beyond this, the knowledge of eco-physiological processes dynamic in watersheds is very important because of its biodiversity and complexity and direct relation with the hydrological cycle. Thus, the study of mechanisms that allow the description as well as the inter-connection among water balance elements is fundamental. In this context, this dissertation aimed to analyze the water balance components and their relations at a micro-catchment entirely occupied by an Atlantic Forest remnant (AFMC), located on Lavrinha Creek Watershed (LCW), in Mantiqueira Range region, Southeastern Brazil. AFMC presents 16 ha of drainage area and hydrologic cycle elements were monitored between 2009/2010 and 2010/2011 hydrologic years; to evaluate the partitioning of pluvial precipitation, correlating them with the seasonal evolution of the Atlantic Forest ecosystem which was identified by application of differences of the normalized difference vegetation index (NDVI); and to analyze the temporal stability of soil moisture in layer of 0-0.20 m, under different land-uses, considering the dry and wet seasons, charactering the points of monitoring more representatives, in Lavrinha Creek Watershed (LCW). According to results from water balance, it was verified that the evapotranspiration and interception corresponded, in average, 47.7% and 22.7% of total precipitation, respectively. Discharge corresponded to 35% of precipitation; base flow corresponded, in average, to 75.82% of discharge, however, we verified important intra-annual variability. The water storage in AFMC was positive in both hydrologic years, highlighting the 2010/2011 hydrologic year, with storage of $1.516 \text{ mm day}^{-1}$, due to the greater storage in saturated zone. The results have demonstrated that during periods in which the pluvial regime is close to normal conditions or there is greater precipitation amount than average, the Atlantic Forest play a fundamental role for water yield, reducing the surface runoff and generating better soil hydrologic condition for infiltration. Nevertheless, there are indications that when an atypical climatic situation occurred, like an extended dry period, there was a considerable increase in plant transpiration. This led to a reduction in base flow as these plants drew on the reserve of water stored in the AFMC to satisfy their eco-physiological demands. In relation to the pluvial precipitation partitioning in AFMC, we verified that there was not

positive correlation between soil water storage by Atlantic Forest canopy and NDVI values. Yet, there is greater percentage of internal pluvial precipitation in Atlantic Forest in periods with less rain amount, with greater variability of spatial distribution of it in periods more rainy. About temporal stability of soil moisture in LCW, we verified greater temporal stability in wetland area, lesser in Atlantic Forest area and intermediate in pasture area. Significant variation was also observed in the mean relative difference between the sampling periods, indicating that the characteristics of each site should be particularly considered to choose the points. In the pasture area, only one point could be identified to monitor both periods (rainy and dry). On the other hand, in the Atlantic Fores and wetland areas two points were identified, one specifically for the rainy and the other for the dry season, thus, an individual analysis for each season is recommended.

Keywords: Watershed. Forest Hydrology. Water balance. Soil Moisture. Atlantic Forest. Mantiqueira Range.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 1 Localização geográfica e do instrumental usado no monitoramento dos elementos do balanço hídrico na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG.....51
- Figura 2 Esquema dos elementos de balanço hídrico conduzido na MBMA61
- Figura 3 Mapas de porosidade drenável (A) e microporosidade (b), ambas em porcentagem, para as camadas de 0-20, 20-50 e 50-100 cm na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG.....74

CAPÍTULO 3

- Figura 1 Localização geográfica e do instrumental usado no monitoramento na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG.....105
- Figura 2 Pluviômetro (a) e estação meteorológica (b) empregados para o monitoramento da precipitação incidente e precipitação interna na MBMA107
- Figura 3 Diferenças do índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN) correspondente aos períodos chuvoso e seco, para os anos hidrológicos 09/10 E 10/11124
- Figura 4 Distribuição espacial da precipitação interna mensal, correspondente ao período chuvoso do ano hidrológico de 09/10.....131
- Figura 5 Distribuição espacial da precipitação interna mensal, correspondente ao período seco do ano hidrológico 09/10132
- Figura 6 Distribuição espacial da precipitação interna mensal, correspondente ao período chuvoso do ano hidrológico de 10/11.....133
- Figura 7 Distribuição espacial da precipitação interna mensal, correspondente ao período seco do ano hidrológico 10/11134
- Figura 8 Distribuição espacial da precipitação interna, obtida pela técnica de co-krigagem, para período chuvoso do ano hidrológico 09/10138
- Figura 9 Distribuição espacial da precipitação interna, obtida pela técnica de co-krigagem, para o período seco do ano hidrológico 09/10139

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 10 | Distribuição espacial da precipitação interna, obtidos pela técnica de co-krigagem, para o período chuvoso do ano hidrológico 10/11 | 140 |
| Figura 11 | Distribuição espacial da precipitação interna, obtida pela técnica de co-krigagem, para o período seco do ano hidrológico 10/11 | 141 |

CAPÍTULO 4

| | | |
|----------|---|-----|
| Figura 1 | Distribuição espacial dos solos na bacia hidrográfica experimental do Ribeirão Lavrinha, Serra da Mantiqueira, Minas Gerais | 160 |
| Figura 2 | Distribuição espacial do uso atual do solo e localização dos pontos amostrais e de monitoramento da umidade do solo na bacia hidrográfica experimental do ribeirão Lavrinha, Serra da Mantiqueira, Minas Gerais | 161 |

LISTA DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 2

| | | |
|-----------|---|----|
| Gráfico 1 | Comportamento da precipitação média mensal na BHRL, Serra da Mantiqueira, MG, entre 2006 e 2010 | 54 |
| Gráfico 2 | Comportamento do IAF na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG, entre setembro/2009 e agosto/2011 | 58 |
| Gráfico 3 | Desempenho da equação de Penman-Monteith (equação 1), aplicada com base nos valores de g_s e g_a para Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira e monitoramento do IAF, em relação aos valores de evapotranspiração observados pelo balanço hídrico durante o período seco (equação 3) | 59 |
| Gráfico 4 | Comportamento da precipitação, precipitação interna, armazenamento de água no solo nas camadas de 0-20 cm, 20-50 cm e 50-100 cm e evapotranspiração, no período entre agosto/09 e setembro/11 | 71 |
| Gráfico 5 | Hidrogramas diários de escoamento superficial e precipitação (P) para a MBMA, Serra da Mantiqueira, MG, observados entre agosto de 2009 e setembro de 2011 | 76 |
| Gráfico 6 | Hidrogramas diários de escoamento superficial e precipitação interna (P) para a MBMA, Serra da Mantiqueira, MG, observados entre agosto de 2009 e setembro de 2011 | 77 |
| Gráfico 7 | Comportamento do deflúvio e precipitação mensais ao longo dos anos hidrológicos analisados (Setembro/09 – Agosto/11) .. | 81 |
| Gráfico 8 | Comportamento da variação do armazenamento de água na zona saturada da MBMA, Serra da Mantiqueira, MG, nos anos hidrológicos 2009/2010 e 2010/2011 | 84 |

CAPÍTULO 3

| | | |
|-----------|---|-----|
| Gráfico 1 | Precipitação e precipitação interna mensais, no período de outubro de 2009 a setembro de 2011 | 116 |
| Gráfico 2 | Precipitações incidente e interna acumuladas para os períodos chuvoso e de estiagem e total acumulado para cada ano hidrológico | 118 |
| Gráfico 3 | Modelo linear ajustado aos dados de precipitação incidente e interna considerando todo período monitorado (A), o período úmido (B) e o seco (C), para os dois anos hidrológicos | 120 |

CAPÍTULO 4

| | | |
|-----------|---|-----|
| Gráfico 1 | Diferença relativa média e respectivo desvio padrão da umidade do solo (%) durante o período chuvoso nas áreas de pastagem (A), Mata Atlântica (B) e vegetação de várzea (C) . | 173 |
| Gráfico 2 | Diferença relativa média e respectivo desvio padrão da umidade do solo (%)o no período de estiagem para as áreas de pastagem (A), Mata Atlântica (B) e vegetação de várzea (C)..... | 174 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

| | | |
|----------|---|----|
| Tabela 1 | Características físicas e químicas dos solos da MBMA nas camadas de 0-20 cm, 20-50 cm e 50-100 cm..... | 52 |
| Tabela 2 | Comportamento do parâmetro gs (condutância estomática) para um remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, MG..... | 57 |
| Tabela 3 | Valores totais dos componentes do balanço hídrico monitorados nos anos hidrológicos 2009/2010 e 2010/2011, na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG..... | 65 |
| Tabela 4 | Valores médios diários dos componentes do balanço hídrico monitorados nos anos hidrológicos 2009/2010 e 2010/2011, na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG..... | 68 |
| Tabela 5 | Relação percentual entre os componentes do escoamento e a precipitação externa e entre o escoamento base e o escoamento total..... | 79 |
| Tabela 6 | Comportamento médio da variação de armazenamento de água na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG, nos anos hidrológicos 2009/2010 e 2010/2011 e média no período (2009/2011)..... | 87 |

CAPÍTULO 3

| | | |
|----------|--|-----|
| Tabela 1 | Algumas espécies florestais típicas da região da MBMA..... | 106 |
| Tabela 2 | ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada para o período chuvoso do ano hidrológico 09/10..... | 126 |
| Tabela 3 | ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada para o período seco do ano hidrológico 09/10..... | 127 |
| Tabela 4 | ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada para o período chuvoso do ano hidrológico 10/11..... | 127 |
| Tabela 5 | ER, S _{ER} , EM e TE obtidos por validação cruzada para o período seco do ano hidrológico 10/11..... | 128 |
| Tabela 6 | ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada pela técnica de co-krigagem, para o período chuvoso do ano hidrológico 09/10..... | 136 |
| Tabela 7 | ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada pela técnica de co-krigagem, para o período seco do ano hidrológico 09/10..... | 136 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Tabela 8 | ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada, pela técnica de co-krigagem, para o período de chuvoso do ano hidrológico 10/11 | 136 |
| Tabela 9 | ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada, pela técnica de co-krigagem, para o período de estiagem do ano hidrológico 10/11 | 137 |

CAPÍTULO 4

| | | |
|----------|---|-----|
| Tabela 1 | Estatística do teste de spearman em diferentes datas de amostragem e usos do solo na bacia hidrográfica experimental do ribeirão Lavrinha, Serra da Mantiqueira, Minas Gerais..... | 167 |
| Tabela 2 | Coefficiente de correlação de Spearman (cs) em diferentes datas de amostragem e usos do solo e lâmina de precipitação acumulada (P) durante o respectivo período de monitoramento da umidade do solo na bacia hidrográfica experimental do ribeirão Lavrinha, Serra da Mantiqueira, Minas Gerais..... | 170 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----|
| | CAPÍTULO 1 | 20 |
| 1 | INTRODUÇÃO GERAL | 20 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 23 |
| 2.1 | Mata atlântica | 23 |
| 2.2 | Hidrologia florestal | 26 |
| 2.3 | Balanco hídrico | 28 |
| 2.4 | Umidade do solo | 30 |
| 2.5 | Interpolador geoestatístico | 33 |
| | CONSIDERAÇÕES GERAIS | 36 |
| | REFERÊNCIAS | 38 |
| | CAPÍTULO 2: o papel da mata atlântica no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG | 43 |
| 1 | INTRODUÇÃO | 45 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS | 50 |
| 2.1 | Descrição da área de estudo | 50 |
| 2.2 | Instrumentação da MBMA | 55 |
| 2.3 | Balanco hídrico | 60 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 64 |
| 3.1 | Comportamento geral dos elementos de balanço hídrico monitorados nos anos hidrológicos de 2009/2010 E 2010/2011 ...64 | |
| 3.2 | Comportamento do escoamento na MBMA | 75 |
| 3.3 | Comportamento do armazenamento de água na MBMA | 82 |
| 4 | CONCLUSÕES | 89 |
| | REFERÊNCIAS | 91 |
| | CAPÍTULO 3: Partição da precipitação pluvial em uma microbacia hidrográfica ocupada por Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira, MG | 95 |
| 1 | INTRODUÇÃO | 97 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS | 103 |
| 2.1 | Aspectos gerais da área de estudo | 103 |
| 2.2 | Monitoramento da precipitação incidente (P) e precipitação interna (PI) | 106 |
| 2.3 | Índice de vegetação por diferença normalizada da mata atlântica (IVDN) | 108 |
| 2.4 | Mapeamento da distribuição espacial da precipitação interna na MBMA | 111 |
| 2.5 | Análise do desempenho dos interpoladores geoestatísticos | 112 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 115 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.1 | Padrão da precipitação incidente e da precipitação interna na MBMA | 115 |
| 3.2 | Capacidade de armazenamento de água do dossel vegetativo da Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira, MG | 119 |
| 3.3 | Índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN) para os períodos chuvoso e seco na MBMA | 123 |
| 3.4 | Mapeamento da distribuição espacial da precipitação interna na MBMA por krigagem | 126 |
| 3.5 | Mapeamento da distribuição espacial da precipitação interna na MBMA, com aplicação da técnica de co-krigagem | 135 |
| 4 | CONCLUSÕES | 144 |
| | REFERÊNCIAS | 145 |
| | CAPÍTULO 4: Estabilidade temporal do conteúdo de água em três condições de uso do solo, em uma bacia hidrográfica da região da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais | 154 |
| 1 | INTRODUÇÃO | 156 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS | 159 |
| 2.1 | Características básicas e localização da bacia hidrográfica | 159 |
| 2.2 | Estabilidade temporal da umidade do solo | 162 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 166 |
| 4 | CONCLUSÕES | 176 |
| | REFERÊNCIAS | 177 |

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento econômico e tecnológico gerou diversos desequilíbrios ambientais, os quais se refletem numa série de alterações dos ecossistemas naturais. Atualmente, há grande preocupação mundial com relação à disponibilidade e à preservação dos recursos naturais, visando o seu manejo sustentável. Dentre estes recursos, a água e as florestas são consideradas essenciais para o desenvolvimento sustentável.

Assim, o conhecimento da influência dos ecossistemas florestais sobre os processos hidrológicos é de fundamental importância, no que concerne aos processos integrados do sistema água-solo-planta-atmosfera, os quais atuam concomitantemente no ciclo hidrológico, permitindo o avanço de novas tecnologias para o manejo sustentável dos recursos naturais.

A região da serra da Mantiqueira constitui uma região importante no contexto ambiental, uma vez que abriga parcela remanescente da Mata Atlântica brasileira, considerada um dos biomas mais importantes e ameaçados do país, além de abrigar as nascentes de importantes rios, como os rios Grande, Aiuruoca, Sapucaí e Verde.

As características climáticas da região da serra da Mantiqueira, com balanço hídrico anual positivo devido especialmente ao alto índice pluviométrico provocado pelo efeito orográfico das montanhas, fazem com que a região constitua importante referência geográfica para a produção de água, com elevado potencial para a geração de escoamento base (subterrâneo). Devido a estes aspectos, a sua antropização tem provocado preocupações constantes no tocante à capacidade de manutenção do escoamento e, conseqüentemente, de produção de água.

A manutenção dos ecossistemas naturais é estrategicamente importante para o Brasil. Ressalta-se que o monitoramento hidroclimático da região da serra da Mantiqueira, especialmente no contexto de pequenas e médias bacias e de nascentes, é ainda incipiente, ficando o entendimento da interação entre os processos hidrológicos com a dinâmica dos ecossistemas sem as devidas respostas.

Neste contexto, observa-se que o conhecimento da hidrologia e da climatologia de um ecossistema típico da região é de suma importância, tanto do ponto de vista ambiental quanto do econômico e do social. Ferramentas que possam prever o comportamento do escoamento subterrâneo e, por consequência, a capacidade de geração de água, são bastante significativas para o manejo adequado da bacia hidrográfica, especialmente nas zonas ou áreas de recarga subterrânea. Tais áreas estão sendo submetidas ao uso intensivo do solo, justificando estudos que visem subsidiar ações para minimizar os aspectos negativos das ações antrópicas.

O acompanhamento do balanço hídrico nestas áreas é fundamental para descrever o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas e suas zonas de recarga de água subterrânea, em face dos impactos provocados pelo uso extensivo do solo na região. Neste contexto, o monitoramento das variáveis hidrológicas é vital para o êxito da pesquisa. Além do monitoramento hidroclimático tradicional, a umidade do solo fornece informações que, se adequadamente aplicadas, subsidiarão o entendimento dos processos hidrológicos. Sua variabilidade espacial e temporal é algo que merece ser estudado e correlacionado com outros parâmetros hidrológicos, sendo possível avaliar e modelar o consumo de água pela cobertura vegetal.

Os produtos de um estudo desta natureza encontram forte aplicação no âmbito ambiental e na gestão dos recursos hídricos, uma vez que a

disponibilidade de dados nessas unidades ambientais é muito restrita ou inexistente.

O presente estudo, por tratar de uma região sensível em termos ambientais, sobretudo fundamental para o desenvolvimento da região sudeste do Brasil, por constituir um dos principais ambientes produtores de água do país, fornece expressivas aplicações no contexto de desenvolvimento sustentável da região, possibilitando o conhecimento científico da importância da Mata Atlântica e do uso do solo, no tocante aos recursos hídricos e ao consumo de água pelas espécies nativas.

Nesse sentido, objetivou-se, neste estudo, avaliar o comportamento dos elementos do ciclo hidrológico numa microbacia hidrográfica essencialmente ocupada por Mata Atlântica da serra da Mantiqueira (MBMA), a partir do monitoramento dos mesmos ao longo de dois anos hidrológicos completos e, a partir da análise do balanço hídrico, caracterizar o comportamento do armazenamento de água na microbacia, avaliando se nela existem condições para um saldo positivo do armazenamento ao final dos anos hidrológicos. Além disto, buscou-se analisar a partição da precipitação na respectiva microbacia hidrográfica, correlacionando-a com a evolução sazonal dos ecossistemas em ambiente de Mata Atlântica por meio do índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN). Buscou-se, ainda, com o respectivo estudo, analisar a estabilidade temporal do conteúdo de água no solo em uma bacia hidrográfica experimental, localizada na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha (BHRL), sob diferentes usos do solo, avaliando-se o padrão de estabilidade para os períodos seco e chuvoso, visando à identificação de pontos representativos para implementação do monitoramento contínuo do conteúdo de água no solo, com reduzido esforço amostral e, conseqüentemente, a um custo reduzido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Mata Atlântica

A Mata Atlântica é considerada uma das regiões ecológicas de maior complexidade do planeta, incluindo florestas e outros ecossistemas associados. Devido às suas estruturas e composições florísticas diferenciadas em função da heterogeneidade das características geológicas, geomorfológicas e climáticas existentes na extensa área a qual abrange, é considerada um mosaico diversificado de ecossistemas.

As formações do domínio da Mata Atlântica, definidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em 1992, são: Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Decidual, Floresta Estacional Semidecidual, Mangues, Restingas, Campos de Altitude, Brejo de Altitude e Enclaves Florestais do nordeste.

Em território brasileiro ocupa 1.315.460 km² de área, distribuídos em 17 estados, abrangendo, total ou parcialmente, 3.222 municípios (2.594 totalmente e 628 parcialmente incluídos no bioma). Sua extensão é de cerca de 3.500 km, no sentido norte-sul e 2.500 km, no sentido leste-oeste, com variação de altitude do nível do mar até os 2.890 metros do Pico da Bandeira (LINO; SIMÕES, 2011).

Segundo Lewinsohn (2005), a Mata Atlântica é um dos biomas mais conhecidos, com considerável número dos táxons avaliados de plantas, vertebrados e invertebrados terrestres. Recentemente, listagens, catálogos de espécies, bem como inventários integrados a banco de dados, foram produzidos visando proporcionar o conhecimento, a conservação e o uso sustentável da biodiversidade do Brasil, especialmente do bioma de Mata Atlântica. Dentre estes, destaca-se o estudo de Stehmann et al. (2009), no qual apresenta-se a

listagem completa de 15.782 espécies, distribuídas em 2.257 gêneros e 348 famílias, das quais 6% dos gêneros e 45% de espécies são considerados endêmicas do bioma da Mata Atlântica.

Segundo Judd et al. (2009), este conjunto representa cerca de 5% de toda a flora mundial, estimada em, aproximadamente, 300.000 espécies, entre as quais foram identificadas, na Mata Atlântica, 14.522 plantas vasculares, das quais 48% do total conhecido são consideradas endêmicas deste Bioma.

Apesar das informações consideráveis do bioma da Mata Atlântica, o conhecimento taxonômico ainda é considerado incipiente, devido às novas descobertas de espécies. Sobral e Stehmann (2009) relataram que nas últimas décadas foram descobertas, na Mata Atlântica, 1.000 espécies de angiospermas, representando 42% de angiospermas relatadas no Brasil. De acordo com os mesmos autores, nos últimos três anos foram identificadas 300 espécies, sendo a maioria endêmica ao bioma da Mata Atlântica.

Além destes aspectos, é interessante destacar que estudos indicam significativas alterações das condições deste bioma. Um dos exemplos destas alterações é o possível deslocamento da área de ocorrência de espécies da região sudeste para o sul, o qual está relacionado ao processo de adaptação às mudanças climáticas (COLOMBO, 2007).

Joly (2007), citando os dados de Colombo (2007), num estudo realizado em 38 espécies arbóreas típicas de Mata Atlântica, mostrou que o cenário mais otimista prevê um aumento médio menor que 2 °C na temperatura da região, havendo redução de 30% da área atualmente ocupada por Mata Atlântica. Já o cenário mais pessimista prevê um aumento maior que 4 °C, podendo atingir uma redução de 65% da área geográfica atual. Um fator agravante deste cenário é a redução da área desproporcional para as diferentes florestas que constituem a Mata Atlântica, devido ao maior efeito deletério das mudanças climáticas globais nas regiões nordeste e sul (LINO; SIMÕES, 2011). Na região sudeste,

devido à presença de serras e ao seu efeito orográfico, os quais permitem manter a alta pluviosidade e amenizar alterações da temperatura, este cenário seria menos agravante. Entretanto, mesmo assim, espécies típicas de regiões elevadas e úmidas tenderiam a se extinguir (SALIS; SHEPHERD; JOLY, 1995).

Em relação ao desmatamento, embora esteja apresentando uma queda das taxas desde 1985, os últimos levantamentos realizados pela Fundação SOS Mata Atlântica em conjunto com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2008-2010) sinalizam para a perda de 20,8 mil hectares de desflorestamento de remanescentes florestais, vegetação de restinga e manguezal, no ano de 2008-2009. Essa degradação está associada às ações antrópicas, relacionadas principalmente à expansão urbana e à ocupação humana, resultando na ampliação do processo de fragmentação e no comprometimento da proteção da biodiversidade do bioma. A taxa anual média de desmatamento no bioma apresentou redução de 21% em relação ao período anterior do estudo (2005-2008). Contudo, apresenta relevante desequilíbrio regional e, embora em alguns estados ocorra significativa redução do desmatamento, em outros o acréscimo foi consideravelmente pronunciado (Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina). Dentre os estados que apresentaram acréscimo do percentual de desmatamento, Minas Gerais foi o que apresentou maior índice (com aumento de 15% em relação aos dados de 2005-2008).

Considerando que a complexidade da biodiversidade da Mata Atlântica apresenta estrita relação com a água, sendo essencial à manutenção da biodiversidade deste bioma, as florestas desempenham papel fundamental para a manutenção dos processos hidrológicos.

Diante estes aspectos, constata-se que, apesar da existência de novos avanços importantes no contexto ambiental, como o monitoramento contínuo da cobertura vegetal deste bioma, os quais permitem informações fundamentais para a inovação de estratégias de conservação, ressalta-se que o monitoramento

hidroclimático, especialmente no contexto de pequenas e médias bacias hidrográficas, é escasso.

Neste contexto, observa-se que o conhecimento da hidrologia e da climatologia e as suas interligações com os ecossistemas florestais são de suma importância, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico e social, em face dos impactos provocados pela ação antrópica na região.

2.2 Hidrologia Florestal

O ciclo hidrológico consiste de um fenômeno global de circulação contínua da água em seus estados sólido, líquido e gasoso, entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado pela energia solar, associado à gravidade e à rotação terrestre. Este fenômeno envolve diversos processos físicos (termodinâmicos e climáticos), como condensação, precipitação, evapotranspiração, infiltração e percolação, escoamentos superficial e subterrâneo (KOBAYAMA, 1999).

Por ser um processo dinâmico, é influenciado por ações antrópicas que afetam diretamente o equilíbrio natural do ecossistema. O seu desequilíbrio resulta em alterações dos componentes do ciclo hidrológico, ocasionando mudanças no regime hídrico e afetando o potencial hídrico de uma bacia hidrográfica.

Tradicionalmente, a floresta é vista como eficaz para estabilizar e manter o regime hídrico de uma bacia hidrográfica, uma vez que melhora a estrutura do solo, favorecendo os processos de infiltração, percolação e armazenamento de água, além de atenuar o escoamento superficial direto.

Desse modo, as florestas apresentam estrita relação com o ciclo hidrológico, atuando de forma significativa, uma vez que interferem na distribuição de água que abastece os aquíferos, bem como na parcela de água

que retorna para a atmosfera. No contexto hidrológico, dentre as importâncias que a floresta nativa desempenha, destacam-se: a formação de novas massas atmosféricas úmidas por meio das perdas por interceptação pelo dossel florestal, a qual contribui para o processo de precipitação; a influência positiva sobre a hidrologia do solo proporcionada pela cobertura florestal, melhorando os processos de infiltração, percolação e armazenamento da água e participação da vegetação herbácea e da matéria orgânica que recobre a superfície do solo, atuando na dissipação da energia cinética das gotas das chuvas reduzindo o processo de erosão e atenuando as vazões máximas. Além destes aspectos, a floresta nativa exerce importante papel no contexto ambiental, uma vez que reduz os efeitos prejudiciais ao meio ambiente, como alteração da qualidade da água e eutrofização dos rios, dentre outros (PINTO, 2011).

No contexto hidrológico, a alteração da superfície do solo ocasiona uma série de impactos significativos sobre o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica. Segundo Braga (1999), os principais impactos ocasionados por alterações no uso do solo em bacias hidrográficas são: redução da capacidade de infiltração e da transpiração, aumento do escoamento superficial, assoreamento dos cursos d'água aumento na ocorrência de cheias e inundações.

Refosco e Pinheiro (1999), em estudo sobre o ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica, relatam que mudanças no uso do solo, como a supressão da cobertura natural, o revolvimento e a compactação do solo, desestabilizam todo o regime hidrológico da bacia. A redução do material orgânico (serrapilheira) decorrente do desflorestamento contribui para a redução da capacidade de infiltração e para a degradação da estrutura do solo, devido ao aumento da densidade ou pela desestabilização dos agregados (GONÇALVES; STAKE, 2002).

Normalmente, os solos constituídos por florestas apresentam maior taxa de infiltração em comparação com áreas de pastagens, cultivos agrícolas e

campos, devido à melhor estrutura e porosidade (OLIVEIRA JÚNIOR, 2006). Essas características são em razão da penetração das raízes, do maior número de microrganismos e insetos e da presença de serrapilheira (ROMANOVISK, 2001).

Conforme Johnston (1991), alterações da vegetação, como o reflorestamento e o desmatamento, influenciam fortemente os comportamentos quantitativos e qualitativos da vazão de um curso d'água. Kobiyama (2002) relata que os ecossistemas florestais, constituídos por parte aérea (árvores) e terrestre (solos florestais), desempenham inúmeras funções, tais como mitigação do clima, diminuição de cheias, controle de erosão e melhoramento da qualidade da água, dentre outros. Segundo o autor, estas funções atuam simultaneamente, sendo a maioria em decorrência da atividade biológica da própria floresta. Para Zierl, Bugmann e Tagye (2007), as florestas exercem forte influência no equilíbrio dos ecossistemas hídricos na bacia hidrográfica, principalmente nas estações de estiagem.

Nesse sentido, verifica-se que as bacias hidrográficas são vulneráveis às alterações da cobertura vegetal, pois elas interferem nos atributos físicos do solo que, por sua vez, influenciam as condições de infiltração, refletindo no regime dos mananciais hídricos. Assim, nota-se que o entendimento da dinâmica dos processos hidrológicos é de extrema importância no âmbito de bacias hidrográficas, podendo ser empregado no subsídio à gestão dos recursos hídricos, prevenindo alterações predatórias dos mananciais e suas consequências nos recursos naturais.

2.3 Balanço Hídrico

O balanço hídrico consiste de uma análise dos componentes do ciclo da água, tendo-se uma camada de solo como volume de controle. É por meio deste

que se torna possível conhecer o comportamento do consumo de água pelas plantas e sua relação com o tipo de solo, recarga subterrânea e condições climáticas.

Segundo Díaz, Bigelow e Armesto (2007), o balanço hídrico em bacias hidrográficas constituídas por florestas nativas sofre grande influência em função da complexa estrutura das árvores, como porte elevado, densidade do dossel e fisionomia da planta. Entre os componentes do balanço hídrico de bacias hidrográficas constituídas por florestas nativas, a precipitação é considerada o principal elemento de equilíbrio (HERBST et al., 2008).

Mello, Lima e Silva (2004) demonstraram, em seus estudos, que o consumo de água pelas plantas está associado ao comportamento da umidade do solo. Quando este atinge aproximadamente 70% da capacidade de campo, a ET real é praticamente igual à ET potencial.

No entanto, é importante considerar o aspecto fisiológico das plantas, uma vez que ele controla todo o processo de consumo de água e sua transferência vertical para a atmosfera. Soares e Almeida (2001) desenvolveram um modelo de estimativa do consumo de água por plantas de eucalipto, ajustando o modelo de Penman-Monteith às condições fisiológicas desta espécie e compararam os resultados do balanço hídrico final ao comportamento da umidade do solo numa microbacia hidrográfica experimental.

Nesta mesma linha de trabalho, Kosugi e Katsuyama (2007), trabalhando com dados de evapotranspiração estimada pelo modelo de Penman-Monteith e calculada por meio de balanço hídrico, mostraram a importância de se realizar ajustes no modelo matemático original, incluindo parâmetros fundamentais associados ao consumo de água pelas plantas e seu metabolismo.

Wendland, Barreto e Gomes (2007), estudando o balanço hídrico subterrâneo em uma bacia hidrográfica no estado de São Paulo, associada ao aquífero Guarani, caracterizaram uma lâmina de recarga direta correspondendo a

25%, em média, com valores entre 22% e 29% da precipitação anual. Os autores concluíram que a recarga profunda correspondeu, em média, a 3,5% da precipitação anual, concluindo sobre a importância do uso do solo no contexto da dinâmica da água subterrânea.

Tetzlaff, Malcolm e Soulsby (2007) analisaram dados hidrológicos e de qualidade da água, ao longo de 25 anos, de uma microbacia hidrográfica experimental na Escócia, com o objetivo de verificar a influência da floresta neste comportamento hidrológico da microbacia. Os autores observaram que o manejo atual da floresta não tem impactado o comportamento quantitativo do escoamento base, contudo, verificou-se importante alteração no contexto qualitativo, especialmente em termos do pH e nitrogênio da água, com aumento de sua acidez.

Neste contexto, o monitoramento e a modelagem do balanço hídrico em zonas de recarga, especialmente em bacias hidrográficas com alto potencial produtivo de água, são extremamente importantes para o entendimento dos processos hidrológicos.

2.4 Umidade do solo

O entendimento da dinâmica da água em unidades específicas e representativas é de fundamental importância para o planejamento das atividades econômicas de forma sustentável e execução de atividades que visam à manutenção da qualidade ambiental.

A descrição da dinâmica da água e sua interação nas etapas do ciclo hidrológico são fundamentais para a determinação do balanço hídrico, devido à sua relevante participação na separação da precipitação em infiltração e escoamento superficial. Além disso, exerce influência na interação solo-atmosfera, especialmente na evapotranspiração e na interferência dos processos

vinculados à erosão hídrica, sendo, portanto, de grande utilidade para uma extensa faixa de aplicações, visando à conservação do solo e da água (ÁVILA; MELLO; SILVA, 2011).

Segundo Western et al. (2004), a correlação espacial da umidade do solo em pequenas bacias é de fundamental importância para o domínio dos processos hidrológicos de forma espacial. Os autores observaram importante evolução sazonal da umidade com os respectivos eventos hidrológicos, tendo sido constatado que a umidade está associada à topografia local, sendo fundamental para o comportamento do escoamento subsuperficial e altamente controladora dos processos de evapotranspiração nas microbacias. Além disso, os resultados demonstraram que os processos hidrológicos podem ser alterados ao longo do tempo e do espaço, conforme o padrão de umidade do solo nas microbacias. Ávila, Mello e Silva (2010) e Mello (2003) relatam que a umidade do solo é influenciada pela cobertura vegetal do solo e esta, por sua vez, controla a dinâmica da água em bacias hidrográficas, independentemente do porte delas.

No contexto geral de estudos relacionados ao balanço hídrico em bacias hidrográficas, a umidade do solo tem sido considerada, na maioria das aplicações, constante em toda a bacia hidrográfica (VAN DEN ELSEN et al., 2003; WESTERN et al., 2004). No entanto, possui alta variabilidade no espaço e no tempo, em face da influência de diversos fatores estáticos e dinâmicos do solo, além da interferência das mudanças sazonais no regime de chuvas. Neste aspecto, é relativamente complexo descrever os processos ou fatores dominantes que podem influenciar a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo devido à heterogeneidade e à diversidade das condições ambientais envolvidas.

Desta forma, o estudo do balanço hídrico em bacias hidrográficas com diferentes usos do solo deve contemplar não somente a umidade do solo, mas sua distribuição espacial e temporal, utilizando-se ferramentas capazes de realizar o mapeamento desse atributo.

Neste aspecto, o papel da umidade como controladora dos processos de demanda de água pelas plantas e pela atmosfera é fundamental para o embasamento do balanço hídrico, sendo possível promover um melhor entendimento desse processo.

Assim, Mello, Lima e Silva (2004) verificaram que a umidade do solo em profundidade teve efeito substancial no consumo de água pelas plantas, observando que quando esta atingia um valor próximo a 70% da umidade à capacidade de campo na camada mais superficial e de 65% para as camadas inferiores, a evapotranspiração real é praticamente igual à evapotranspiração potencial, mostrando a influência que esta exerce no controle do ciclo hidrológico numa bacia hidrográfica.

Jothiyangkoon et al. (2001) estudaram os processos que controlam o balanço hídrico e sua variabilidade em bacias hidrográficas na Austrália, com o objetivo de estruturar um modelo distribuído com base em geoprocessamento capaz de prever condições adequadas para recarga de aquíferos subterrâneos. Os autores verificaram que o padrão de umidade do solo foi uma variável de substancial importância, caracterizando a importância da mesma no contexto do balanço hídrico diário.

Além dos aspectos relacionados aos modelos hidrológicos e simulação, bem como o balanço hídrico, a umidade do solo exerce função importante no contexto das mudanças climáticas, sendo a compreensão da mesma considerada fator crucial para a predição de cenários futuros em termos do comportamento dos recursos hídricos.

Isto se deve ao fato de que aumentos na temperatura do planeta acarretam aumentos prováveis de evapotranspiração e, por consequência, implicam em alterações no regime de umidade do solo e influenciam diretamente o comportamento do escoamento superficial, especialmente na sua geração.

Além do aspecto climático, deve-se mencionar que as condições antecedentes de umidade do solo alteram o comportamento da susceptibilidade do solo à erosão, conforme verificado em vários trabalhos recentes, como o de Avanzi (2005). Brath e Montanari (2003) estudaram a sensibilidade das vazões de pico, considerando a variabilidade espacial da infiltração e da umidade do solo sob diferentes cenários, numa bacia hidrográfica nas montanhas Apeninos, na Itália e concluíram que a umidade do solo antecedente teve papel fundamental no controle desta vazão de pico, especialmente quando esta se apresentou mais baixa. Mello (2003) também relatou situação semelhante, tendo, em ambos os estudos, faltado um estudo consistente de variabilidade espacial.

2.5 Interpolador Geoestatístico

A técnica geoestatística é utilizada para lidar com problemas de espacialização de variáveis, sendo considerada uma promissora ferramenta para trabalhos em Sistema de Informação Geográfica (OLIVER; WEBSTER, 1990). É uma técnica que envolve um conjunto de procedimentos de análise e inferência dos fenômenos espaciais.

Esses procedimentos utilizam um modelo de autocorrelação espacial, visando representar a variabilidade de um atributo considerado numa superfície contínua. Portanto, são procedimentos que podem ser aplicados a vários fenômenos, como física e química do solo, hidrologia, climatologia e geologia, dentre outros.

A geoestatística é fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, associada aos procedimentos estocásticos por meio do conceito de função aleatória. Neste caso, os valores observados a cada ponto no espaço, em uma determinada região, são compreendidos como uma variável aleatória. O conjunto de variáveis aleatórias é definido como uma função aleatória

caracterizada por sua função de autocorrelação. Assim, a análise da estrutura de dependência espacial das variáveis aleatórias tem relevância na utilização de procedimentos geoestatísticos. Essa análise é denominada análise estrutural ou modelagem de semivariogramas, considerada etapa fundamental em geoestatística, que antecede as inferências em locais não amostrados, realizadas pela krigagem.

A krigagem é um procedimento de interpolação espacial empregado para a previsão da distribuição espacial de uma variável de interesse, enquanto os dados são espacialmente dependentes (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; WEBSTER; OLIVER, 2001).

Inicialmente, o método de krigagem foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, mas seu uso expandiu-se com sucesso no mapeamento pedológico (JUNQUEIRA JÚNIOR et al., 2008), hidrológico (ÁVILA; MELLO; SILVA, 2011; MELLO et al., 2011), climático (ÁVILA; MELLO; VIOLA, 2009; DANFÁ et al., 2010; VIOLA et al., 2010) e outros campos correlacionados.

Apesar de as informações observadas apresentarem correlação espacial, normalmente, o número de informações é insuficiente, podendo induzir a incertezas da estimativa pelo interpolador geoestatístico (krigagem ordinária). Neste contexto, procedimentos geoestatísticos têm sido sugeridos no intuito de melhorar a estimativa, como a utilização de variáveis auxiliares correlacionadas com a variável de interesse (BAXTER; OLIVER, 2005).

Dentre os procedimentos que utilizam as variáveis auxiliares, destaca-se o interpolador geoestatístico denominado co-krigagem. A co-krigagem utiliza a correlação espacial entre uma variável principal e outra secundária, quantificando a autocovariância entre elas, empregando-a para a interpolação geoestatística (WEBSTER; OLIVER, 2001).

Em numerosos estudos foi demonstrada melhor acurácia da predição com a utilização de variáveis auxiliares no processo de interpolação geoestatística (co-krigagem), comparável à krigagem ordinária (HENGL; HEUVELIN; STEIN, 2004; ODEH; MCBRATNEY; CHITTLEBOROUGH, 1995; ODEH; MCBRATNEY, 2000).

A imagem de satélite tem sido amplamente utilizada como variável auxiliar para o processo de interpolação, mostrando bons resultados na predição das estimativas. Mutanga e Rugege (2006), visando o mapeamento da biomassa de uma floresta savana tropical e Georgakarakos e Kitsiou (2008), estudando a distribuição das comunidades em espécies, encontraram bons resultados na utilização da variável auxiliar no processo de interpolação.

Recentemente, estudos têm integrado o modelo digital de elevação e a reflectância espectral derivada de imagens de satélites, visando quantificar as propriedades do solo e as características florestais (GRUNWALD; LAMSAL, 2006; MCBRATNEY et al., 2000; MCBRATNEY; MENDONÇA SANTOS; MINASNY, 2003). Esta integração dos procedimentos geoestatísticos com variáveis derivadas de imagens de satélite foi demonstrada por vários trabalhos (ODEH; MCBRATNEY; CHITTLEBOROUGH, 1995; MARCEAU; HAY, 1999; ODEH; MCBRATNEY, 2000).

O sucesso desta integração ocorre devido à incorporação de informações à variável principal espacialmente explícita nas imagens de satélite, permitindo uma melhor predição das estimativas.

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A região da serra da Mantiqueira é sensível, em termos ambientais, por integrar a Mata Atlântica e abrigar nascentes de importantes rios, constituindo uma região de referência para a produção de água, sendo fundamental para o desenvolvimento da região sudeste do Brasil.

Devido à sua relevância e à degradação devido às ações antrópicas, tem provocado preocupações constantes no tocante à capacidade de manutenção do escoamento e de produção de água e na proteção da biodiversidade do bioma Mata Atlântica.

É interessante destacar que o acompanhamento do balanço hídrico nestas áreas é fundamental para descrever o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas e suas zonas de recarga de água subterrânea, em face dos impactos provocados pelo uso extensivo do solo na região. Isso permite um melhor entendimento dos processos hidrológicos e do papel da Mata Atlântica no contexto hidrológico de bacias hidrográficas de cabeceira.

Este trabalho apresenta-se estruturado da seguinte forma: no primeiro capítulo são apresentadas revisões bibliográficas relacionadas à interligação dos processos hidrológicos com os ecossistemas florestais, bem como técnicas de interpolação geoestatística. No capítulo 2, intitulado O papel da Mata Atlântica no balanço hídrico de uma microbacia hidrográfica da serra da Mantiqueira, Minas Gerais, avaliou-se o comportamento, durante dois anos hidrológicos completos (2009/2010 e 2010/2011), dos elementos do ciclo hidrológico a partir da análise dos componentes do balanço hídrico, avaliando-se o potencial de produção de água da microbacia.

No capítulo 3, Partição da precipitação pluvial em uma microbacia ocupada por Mata Atlântica, na serra da Mantiqueira, Minas Gerais, analisou-se a partição da precipitação durante os anos hidrológicos de 2009/2010 e

2010/2011, correlacionando-a com a evolução sazonal dos ecossistemas por meio do índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN).

No capítulo 4, Estabilidade temporal do conteúdo de água em três condições de uso do solo, em uma bacia hidrográfica da região da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais, analisou-se a estabilidade temporal do conteúdo de água no solo, sob diferentes usos do mesmo, avaliando-se o padrão de estabilidade para os períodos seco e chuvoso, visando à identificação de pontos representativos para implementação do monitoramento contínuo do conteúdo de água no solo, com reduzido esforço amostral e, conseqüentemente, a um custo reduzido.

REFERÊNCIAS

- AVANZI, J. C. **Modelagem do escoamento e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos Tabuleiros Costeiros**. 2005. 65 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Estabilidade temporal do conteúdo de água em três condições de uso do solo, em uma bacia hidrográfica da região da Serra da Mantiqueira, MG. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 2001-2010, 2010.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Padrão espaço-temporal da umidade volumétrica do solo em uma bacia hidrográfica com predominância de latossolos. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, Oct. 2011.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 906-915, 2009.
- BAXTER, S. J.; OLIVER, M. A. The spatial prediction of soil mineral N and potentially available N using Elevation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 128, p. 325–339, 2005.
- BRAGA, R. A. P. A água e a Mata Atlântica. In: SEMINÁRIO NACIONAL DA RESERVA DA BIOSFERA DA MATA ATLÂNTICA, 7, 1999, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: CNRBMA, 1999. p. 1-10.
- BRATH, A.; MONTANARI, A. Sensitivity of the peak flows to the spatial variability of the soil infiltration capacity for different climatic scenarios. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 28, p. 247-254, 2003.
- COLOMBO, A. F. c. 2007. 220 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Instituto de Biologia/UNICAMP, Campinas, 2007.
- DÍAZ, F. M.; BIGELOW, S.; ARMESTO, J. J. Alteration of the hydrologic cycle due to forest clearing and its consequences for rainforest succession. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 244, n. 1/3, p. 32-40, jun. 2007.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA E INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica**: Período 2008–2010. São Paulo, 2011

GEORGAKARAKOS, S.; KITSIOU, D. Mapping abundance distribution of small pelagic species applying hydroacoustics and Co-kriging techniques. **Hydrobiologia**, The Hague, v. 612, p. 155–169, 2008.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. 498 p.

GRUNWALD, S.; LAMSAL, S. Emerging geographic information technologies and soil information systems. In: GRUNWALD, S. (Ed.). **Environmental soil-landscape modeling**: geographic information technologies and pedometrics. New York: CRC, 2006. p. 127–154.

HENGL, T.; HEUVELIN, G. B. M.; STEIN, A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, 75–93, 2004.

HERBST, M. et al. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 1655–1667, 2008.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989.

JOLY, C. A. Biodiversidade e mudanças climáticas: contexto evolutivo, histórico e político. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 10, p. 165-168, 2007.

JUDD, W. S. et al. **Sistemática vegetal**: um enfoque filogenético. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. et al. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 914-922, 2008.

JOHNSTON, R. Aquatic chemistry and the human environment. In: ROSE, J. (Ed.). **Water and the environment**. Philadelphia: Gordon & Breach Science, 1991. p.71-115.

KOBIYAMA, M. et al. Hydrograph recession obtained in a small experimental catchment, General Carneiro municipal, Paraná State. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: CONBEA, 2002. 1 CD ROM.

KOBIYAMA, M. **Manejo de bacias hidrográficas: conceitos básicos. In: CURSO de manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal.** Curitiba: FUPEF, 1999. p. 29-31.

KOSUGI, Y.; KATSUYAMA, M. Evapotranspiration over a Japanese cypress forest: comparison of the eddy covariance and water budget methods. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 334, p. 305–311, 2007.

LEWINSOHN, T. M. (Org.). **Avaliação do estado do conhecimento da diversidade biológica do Brasil.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005.

LINO, C. L.; SIMÕES, L. L. **Avaliação do cumprimento das metas globais e nacionais de biodiversidade 2010 para a Mata Atlântica.** [S. l.: s. n.], 2011.

MARCEAU, D. J.; HAY, G. J. Remote sensing contributions to the scale issue. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v. 25, p. 357–366, 1999.

MCBRATNEY, A. B. et al. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, p. 293–327, 2000.

MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, p. 3–52, 2003.

MELLO, C. R. **Estudo hidrológico em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero.** 2003. 133 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

MELLO, C. R. et al. Spatial distribution of top soil water content in an experimental catchment of Southeast Brazil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, p. 285-294, 2011.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M. Evapotranspiração associada à umidade do solo em microbacia hidrográfica de fluxo efêmero. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 95-102, 2004

MUTANGA, O.; RUGEGE, D. Integrating remote sensing and spatial statisticsto model biomass distribution in a tropical savanna. **International Journal of Remote Sensing**, Dundee, v. 27, p. 3499–3514, 2006.

ODEH, I. O. A.; MCBRATNEY, A. B.; CHITTLEBOROUGH, D. J. Further results on prediction of soils properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v. 67, p. 215–226, 1995.

ODEH, I. O. A.; MCBRATNEY, A. B. Using AVHRR images for spatialprediction of clay content in the lower Namoi Valley of eastern Australia. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, p. 237–254, 2000.

OLIVEIRA JUNIOR, J. C. **Precipitação efetiva em floresta estacional semidecidual na reserva Mata do Paraíso, Viçosa, MG**. 2006. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. Krigging: a method of interpolation for geographical information systems. **International Journal Geography Information Systems**, London, v. 4, p. 313-332, 1990.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (Soi and Water Assessment Tool) para simulação hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG**. 2011.- 225 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

REFOSCO, J. C.; PINHEIRO, A. Impacto do desflorestamento sobre o regime hídrico de uma bacia hidrográfica. **Revista de Estudos Ambientais**, Blumenau, v. 1, n. 2, p. 18-26, 1999.

ROMANOVISK, Z. **Morfologia e aspectos hidrológicos da microbacia Rua Nova, Viçosa, MG**. 2001. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

SALIS, S. M.; SHEPHERD, G. J.; JOLY, C. A. Floristic comparison of mesophytic semideciduous forests of the interior of the state of São Paulo, Southeast Brazil. **Plant Ecology**, Springer Netherlands, v. 119, n. 2, p. 155-164, 1995.

SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucaliptus plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 253, n. 1/4, p. 130-147, 2001.

SOBRAL, M.; STEHMANN, J. R. An analysis of new angiosperm species discoveries in Brazil (1990 - 2006). **Taxon**, Utrecht, v. 58, n. 1, p. 227-232, 2009.

STEHMANN, J. R. et al. **Plantas da Floresta Atlântica**. Rio de Janeiro: Jardim Botânico, 2009.

TETZLAFF, D.; MALCOLM, I. A.; SOULSBY, C. Influence of forestry, environmental change and climatic variability on the hydrology, hydrochemistry and residence times of upland catchments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 346, p. 93-111, 2007.

VAN DEN ELSEN, E. et al. Intensive water content and discharge measurement system in a hillslope gully in China. **Catena**, Amsterdam, v. 54, n. 1, p. 93-115, 2003.

VIOLA, M. R. et al. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, p. 970-978, 2010.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental science**. Toronto: J. Wiley and Sons, 2001.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 342, p. 261-269, 2007.

WESTERN, A. W. et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 286, n. 1, p. 113-134, 2004.

ZIERL, U. B.; BUGMANN, H.; TAGYE, C. L. Water and carbon fluxes of European ecosystems: an evaluation of the ecohydrological model RHESys. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 21, p. 3328-3339, 2007.

CAPÍTULO 2

O papel da Mata Atlântica no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG

RESUMO

A Mata Atlântica consiste de um ecossistema ameaçado de extinção no Brasil. Sua ocupação no território brasileiro praticamente se restringe a remanescentes em áreas de montanhas e cabeceiras de bacias hidrográficas, como a Serra da Mantiqueira, que corresponde a principal região produtora de água do Sudeste do Brasil. Apesar da importância deste bioma no contexto ambiental, são praticamente inexistentes estudos de balanço hídrico no mesmo, principalmente em áreas de montanhas. Assim, objetivou-se neste trabalho analisar os componentes do balanço hídrico e suas inter-relações numa microbacia hidrográfica inteiramente ocupada por um remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira (MBMA), com área de 16 ha, ao longo dos anos hidrológicos de 2009/2010 e 2010/2011. O balanço hídrico foi conduzido a cada 20 dias aproximadamente e o armazenamento de água na MBMA foi decomposto em armazenamento saturado e armazenamento não saturado, sendo o primeiro a variável resposta do balanço hídrico. Os resultados demonstraram que a evapotranspiração correspondeu, em média, a 47,7% do total precipitado e a interceptação, a 22,7%, ambos os resultados em consonância com os poucos resultados disponíveis na literatura. O deflúvio total correspondeu a 35% da precipitação, sendo que a participação do deflúvio subterrâneo neste foi de 75,82%, porém, com variabilidade intra-anual importante. A variação do armazenamento de água na MBMA foi positiva em ambos os anos hidrológicos, contudo, com destaque para o ano 2010/2011, com um saldo de 1,516 mm/dia, fruto do armazenamento da zona saturada. Os resultados demonstraram que durante períodos nos quais o regime pluvial está próximo ou é superior às condições normais, a Mata Atlântica desempenha papel fundamental na produção de água, atenuando o escoamento superficial direto e promovendo melhores condições hidrológicas do solo para infiltração. Contudo, há indicativos de que, quando uma situação climática atípica ocorre, com prolongamento do período seco, há um aumento considerável da transpiração das plantas, com conseqüente redução do deflúvio subterrâneo pela influência destas no estoque de água armazenada na microbacia para suprimento de suas demandas eco-fisiológicas..

Palavras-chave: Hidrologia florestal. Balanço hídrico. Mata Atlântica.

ABSTRACT

The Atlantic Forest is a Brazilian ecosystem threatened by extinction. In Brazil, its area is restricted to remnants in mountainous regions and the headwaters of drainage basins, such as the Mantiqueira Range, which is part of the main water yield region of Southeast Brazil. Despite the environmental significance of this biome, there are not studies on its water balance, especially in mountainous areas. Thus, the objective of this study was to analyze the components of the water balance and their interrelationships in a micro-catchment entirely occupied by a remnant of the Atlantic Forest in the Mantiqueira Range (AFMC), covering an area of 16 ha, during the 2009-2010 and 2010-2011 hydrological years. The water storage in the AFMC was decomposed into saturated storage and unsaturated storage; the former served as the response variable for the water balance. The results demonstrated that evapotranspiration was accounted for, on average, 47.7% of the precipitation and interception represented 22.7%. Both of these results agree with the limited findings available in the literature. The discharge was 35% of the precipitation, and the proportion of the base flow on the total flow was 75.82%. The variation in the water storage in the AFMC was positive in both hydrological years, but the 2010-2011 year stood out with 1.516 mm/day, resulting from storage in the saturated zone. The results demonstrated that during periods when the rainfall pattern was close to or greater than normal, the Atlantic Forest played a fundamental role in water yield, by reducing of the surface runoff and promoting better hydrological soil conditions for infiltration. However, there were indications that when an atypical climatic situation occurred in the form of an extended dry period, there was a considerable increase in plant transpiration. This led to a reduction in base flow as these plants drew on the reserve of water stored in the micro-catchment to satisfy their eco-physiological demands.

Keywords: Forest hydrology. Water balance. Atlantic Forest.

1 INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica brasileira consiste de um bioma ameaçado de extinção. Após mais de 500 anos do descobrimento do Brasil, este ecossistema, que originalmente ocupava 100 milhões de hectares, correspondentes a 16% da área do país e presente em 17 estados brasileiros, ocupa atualmente poucas áreas, sendo, especialmente, as regiões montanhosas do Sul e Sudeste do país e mesmo assim sob forte pressão antrópica (GALINDO-LEAL; CÂMARA, 2003). É constituída por várias espécies florestais e nas regiões montanhosas do Sudeste do Brasil, especialmente nas Serras da Mantiqueira e do Mar, a Mata Atlântica é classificada como Floresta Ombrófila Densa permanentemente úmida (OLIVEIRA FILHO et al., 2006).

As regiões de cabeceira do Sudeste do Brasil, com destaque para a Serra da Mantiqueira, são áreas cujas características geomorfológicas (solos, topografia e clima) as indicam como frágeis do ponto de vista ambiental, com solos rasos a moderadamente profundos, topografia íngreme e bastante chuvosas, sendo susceptíveis aos processos erosivos, afetando sua hidrologia (ARAÚJO, 2006; BESKOW et al., 2009; BRUIJNZEEL et al., 2010; MENEZES, 2011; MENEZES et al., 2009). Segundo Alvarenga et al. (2011) e Menezes et al. (2009), a região da Serra da Mantiqueira consiste de um ambiente extremamente importante do ponto de vista hidrológico, cujo capacidade de escoamento é notada especialmente pela grande quantidade de rios importantes que nascem e drenam destas áreas. Estes aspectos fazem com que a região Sul de Minas de Gerais, que abriga a maior parte da Serra da Mantiqueira, seja estratégica para geração de energia elétrica oriunda de aproveitamentos hidráulicos.

Este potencial hidrelétrico vem sendo explorado desde a década de 50, com a instalação e funcionamento da Usina Hidrelétrica de Furnas. Este é o

principal aproveitamento hidrelétrico do Sudeste do Brasil, tanto em termos de sua capacidade e potencial de geração quanto do ponto de vista hidrológico, uma vez que seu reservatório, com volume de 17 km³, é alimentado pelos rios que nascem na Serra da Mantiqueira e é responsável pela regulação do escoamento ao longo de toda a bacia do rio Grande (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2005; NÓBREGA et al., 2011).

É importante destacar a quase inexistência de análises detalhadas do balanço hídrico em bacias hidrográficas de cabeceira no Brasil (MELLO et al., 2008), especialmente, no contexto do papel hidrológico da Mata Atlântica. Há na literatura poucas investigações a respeito, sendo que o trabalho de Almeida e Soares (2003) é o único até o momento a abordar de forma mais aprofundada os elementos do ciclo hidrológico. No entanto, este trabalho foi conduzido numa microbacia hidrográfica parcialmente ocupada por Mata Atlântica e localizada no litoral centro-norte do estado do Espírito Santo, região esta diferente, em termos geomorfológicos e climáticos, da Serra da Mantiqueira. Outros trabalhos sobre a hidrologia de Mata Atlântica podem ser encontrados, contudo, consistem de análises superficiais sobre um balanço hídrico extremamente simplificado e sem conexão entre seus elementos e as características climáticas e geomorfológicas (MENEZES, 2011). Portanto, apesar da reconhecida importância hidrológica da Mata Atlântica para o Brasil, poucas foram as tentativas de se analisar de forma mais aprofundada o balanço hídrico nestes ambientes, especialmente em regiões de cabeceira, como a Serra da Mantiqueira.

Menezes et al. (2009) avaliaram o comportamento da hidrologia de duas microbacias hidrográficas da Serra da Mantiqueira ocupadas, basicamente, por pastagem extensiva e Mata Atlântica madura e em fase de regeneração. Os autores analisaram o comportamento intermitente das vazões nas duas condições de uso do solo durante o período seco e verificaram que a produção de água sob as condições de Mata Atlântica foi consideravelmente superior, com o

escoamento sendo persistente mesmo na fase aguda do período seco, enquanto que na área sob pastagem, este sofreu forte oscilação negativa. É importante ressaltar que as condições geomorfológicas foram semelhantes (solos, clima e relevo) e houve variação apenas no uso do solo. Este trabalho, portanto, apontou para a hipótese de maior capacidade de produção de água nas áreas de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, contudo, foi elaborado apenas sobre dados de escoamento monitorados de forma intermitente e precipitação, não havendo análise de um balanço hídrico propriamente dito.

Alvarenga et al. (2011), analisando o comportamento da condutividade hidráulica saturada dos solos da bacia hidrográfica do Alto Rio Grande (MG), cuja ocupação é caracterizada por pastagem, cerrado e Mata Atlântica, esta última essencialmente na região de cabeceira da bacia (Serra da Mantiqueira), verificaram que, dentro de sub-bacias hidrográficas localizadas na Serra da Mantiqueira, com o mesmo tipo pedológico e topografia semelhante, há acentuadas diferenças entre os ambientes de Mata Atlântica e de pastagem, onde nos primeiros a condutividade hidráulica pode ser até três vezes superior àquela obtida para pastagem. Nesta mesma linha de investigação, Roa-Garcia et al. (2011), analisando o comportamento da infiltração de água no solo em diferentes situações de uso do solo em bacias de cabeceira na região dos Andes colombianos, verificaram situação semelhante, ou seja, de que no ambiente sob mata de montanha a qualidade hidrológica do solo é muito superior, desenvolvendo-se grande quantidade de macroporos e fluxos preferenciais devido ao grande acúmulo de matéria orgânica no solo. Zimmermann, Elsenbeer e Moraes (2006) analisaram o comportamento da condutividade hidráulica sobre diferentes coberturas vegetais da Amazônia e encontraram diferenças significativas dos ambientes de florestas e cultivos perenes, principalmente, em relação às pastagens, contudo, não encontraram evidências da influência destas diferenças no comportamento do deflúvio.

Existem várias controvérsias a respeito do papel de florestas nativas de regiões montanhosas na hidrologia destas áreas. Muñoz-Villers et al. (2011) citam, dentre outros aspectos, as importantes relações entre os componentes do balanço hídrico, especialmente na interceptação da chuva, a qual permite reduzir os impactos de chuvas intensas sobre o solo, aumentando o tempo de oportunidade para infiltração. Neste sentido, Hümann et al. (2011) avaliaram que solos sobre cobertura de florestas nativas maduras apresentam elevada porosidade com alta capacidade de infiltração, com conseqüente redução do escoamento superficial direto, ou seja, as florestas maduras tendem a promover sensível melhora nos atributos hidrológicos do solo, com melhor estruturação e desenvolvimento de fluxos preferenciais. Numa linha de investigação similar, Fleischbein et al. (2005) e Fleischbein et al. (2006) analisaram o comportamento da interceptação e do balanço hídrico em bacias de cabeceira nos Andes Equatoriais e encontraram papel importante do dossel no contexto de proteção da superfície do solo quanto ao escoamento superficial direto. Além deste aspecto, há de se ressaltar que nestes ambientes há predominância de um regime hídrico com grande participação da precipitação, a qual, em média, corresponde a mais de 2000 mm por ano, além de temperaturas consideravelmente mais baixas, inclusive durante o verão. Segundo Price (2011), esta característica climática, associada a melhores condições de superfície do solo para infiltração, faz com que haja melhores condições para armazenamento de água na zona saturada e posterior geração de escoamento base, ou seja, a capacidade de produção de água destes ambientes está vinculada ao uso do solo associado às características climáticas destes ambientes.

Apesar da importância destes ecossistemas no contexto de produção de água em regiões de cabeceira (BRUIJNZEEL et al., 2010; PRICE, 2011), há uma grande lacuna em termos de estudos e análises entre os componentes do balanço hídrico em áreas de Mata Atlântica no Brasil, especialmente as de

cabeceiras, como a Serra da Mantiqueira. Desta forma, várias conjecturas equivocadas sobre o papel de florestas tropicais e subtropicais em áreas de montanhas têm sido apresentadas, sendo que somente a percepção de um balanço hídrico vertical tem sido considerada, o que tem demonstrado inconsistência com o funcionamento hidrológico destas regiões. Com o intuito de demonstrar como os principais elementos do ciclo hidrológico se comportam e como estes interagem entre si, este estudo trabalha com a hipótese de que, nestes ambientes (Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira), há condições específicas que proporcionam grande potencial para armazenamento de água em bacias hidrográficas.

Assim, objetivou-se neste capítulo, avaliar o comportamento dos elementos do ciclo hidrológico, numa microbacia hidrográfica essencialmente ocupada por Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, a partir do monitoramento dos mesmos ao longo de dois anos hidrológicos completos. Busca-se ainda, a partir da análise do balanço hídrico, caracterizar o comportamento do armazenamento de água na microbacia, avaliando se nesta há condições para um saldo positivo do armazenamento ao final dos anos hidrológicos, significando alto potencial para produção de água, conforme hipótese estruturada anteriormente.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

A área de estudo e de monitoramento do balanço hídrico diz respeito a uma microbacia hidrográfica, localizada numa bacia hidrográfica experimental (Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavrinha - BHRL), cujo uso do solo é caracterizado essencialmente por Mata Atlântica, localizada na Serra da Mantiqueira, no estado de Minas Gerais. Está aproximadamente a 10 km do município de Bocaina de Minas, na divisa com o estado do Rio de Janeiro. Ao longo do trabalho, esta microbacia será referenciada como Microbacia Hidrográfica de Mata Atlântica (MBMA). Na Figura 1 apresenta-se a localização geográfica da referida microbacia, bem como identificação do instrumental utilizado no monitoramento.

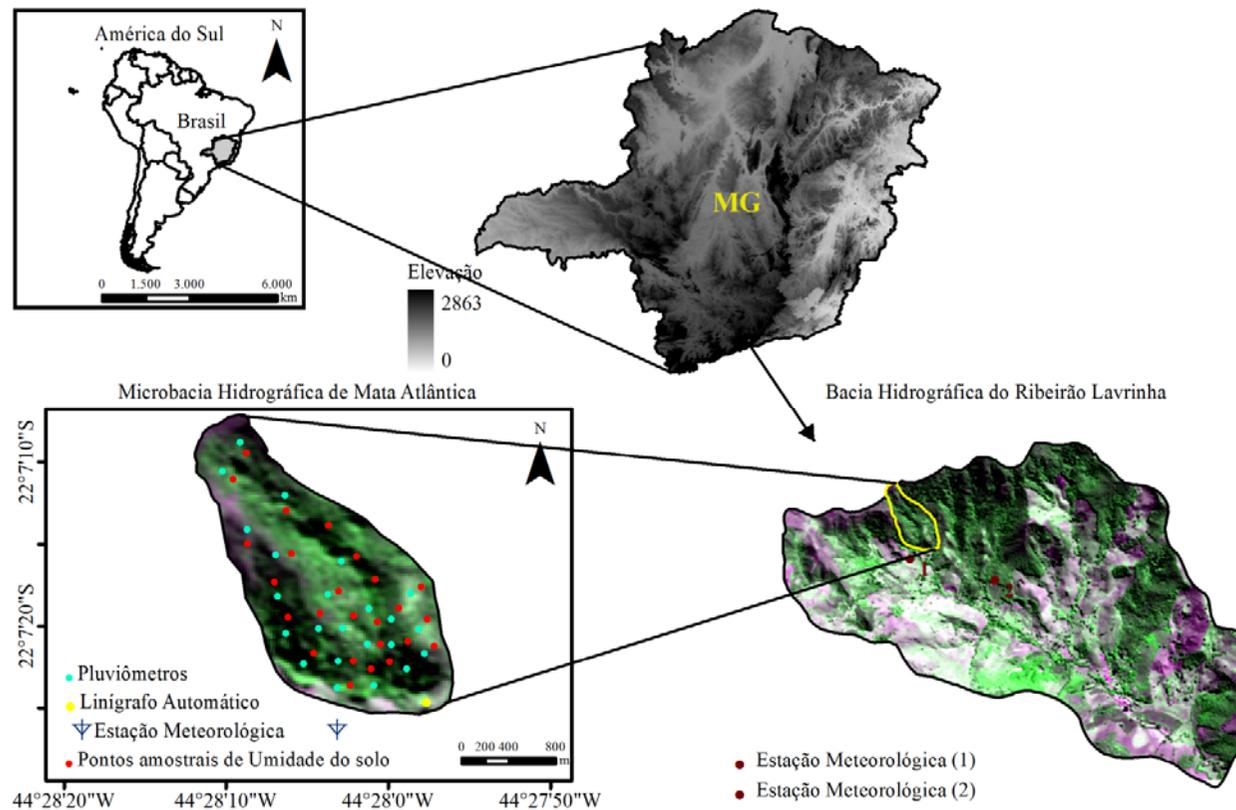


Figura 1 Localização geográfica e do instrumental usado no monitoramento dos elementos do balanço hídrico na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG

A MBMA apresenta área de drenagem de 16 ha e o uso do solo consiste de Floresta Ombrófila Densa permanentemente úmida, sendo esta um típico remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira (OLIVEIRA FILHO et al., 2006). Este remanescente apresenta várias espécies florestais e encontra-se em seu estado maduro de desenvolvimento.

Cambissolos Háplicos, de acordo com Menezes et al. (2009), são os solos dominantes na MBMA. Essencialmente, são solos cuja profundidade, incluindo o horizonte C, varia de 0,70 a 1,20 m e cujo material de origem consiste de gnaiss-granito. As características físicas e químicas destes solos estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 Características físicas e químicas dos solos da MBMA nas camadas de 0-20 cm, 20-50 cm e 50-100 cm

| Camada | Argila | Areia | Silte | Ca | Mg | DS | VTP | MO | pH |
|--------|--------|-------|-------|-------------------------|------|-----------------------|-------|----------|--------------------|
| | (%) | | | (cmol/dm ³) | | (kg/dm ³) | (%) | (dag/kg) | (H ₂ O) |
| 0-20 | 27,46 | 55,46 | 17,0 | 0,24 | 0,15 | 0,81 | 65,88 | 6,08 | 4,53 |
| 20-50 | 29,92 | 51,67 | 18,4 | 0,14 | 0,11 | 0,96 | 61,63 | 4,58 | 4,73 |
| 50-100 | 30,96 | 51,46 | 17,5 | 0,13 | 0,10 | 1,19 | 55,81 | 3,43 | 4,87 |

A MBMA apresenta declividade média de 45% e altitude variando de 1450 a 1800 m acima do nível do mar. Suas características geomorfológicas são típicas da região da Serra da Mantiqueira, ou seja, solos pouco a moderadamente profundos, caracterizados por alta concentração de matéria orgânica e relevo variando de ondulado a forte ondulado e montanhoso (JUNQUEIRA JUNIOR et al., 2008; MENEZES, 2011).

O monitoramento hidrológico e climático da BHRL vem sendo conduzido desde 2006, dentro do escopo dos projetos de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D 076 e 176), cujo objetivo primordial foi identificar o potencial de recarga de água subterrânea na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, tendo sido apoiado pela CEMIG/ANEEL (SILVA; MELLO, 2011).

Este monitoramento contempla as características climáticas e hidrológicas da BHRL, a qual é ocupada por remanescentes de Mata Atlântica madura (41,5%), regeneração natural de espécies da Mata Atlântica (13,2%), pastagens extensivas nas encostas (40,4%) e vegetação típica de várzea (4,9%). É importante destacar a inexistência de dados hidro-meteorológicos na região da Serra da Mantiqueira, sendo este monitoramento um dos pioneiros. Yanagi e Mello (2011) classificaram o clima da BHRL com base em duas metodologias (Köppen e Thorntwaite) e verificaram que a mesma apresenta, respectivamente, Cwb e Superúmido A. A temperatura média anual é de 16,0°C, com a média das mínimas de 10°C e a média das máximas de 23°C. Os totais médios anuais verificados variaram de 1841 a 2756 mm, com concentração média de 88,3% do total precipitado entre setembro e março. Há um período seco característico, cujo início ocorre em abril e é finalizado em agosto, em condições normais (Gráfico 1). Devido a este aspecto, o ano hidrológico neste estudo foi considerado como o período entre setembro de um ano e agosto do ano seguinte, de forma a captar a influência de ambos os períodos na condição hidrológica da MBMA.

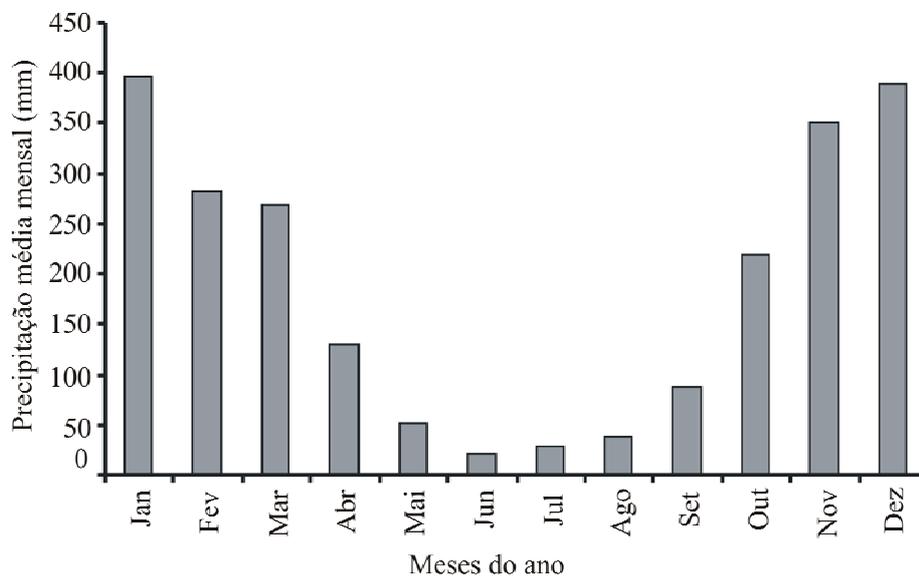


Gráfico 1 Comportamento da precipitação média mensal na BHRL, Serra da Mantiqueira, MG, entre 2006 e 2010

Segundo Reboita et al. (2010), na região da Serra da Mantiqueira, assim como no Sudeste do Brasil, os eventos de precipitação estão associados à atuação de sistemas frontais (frentes frias) ao longo de todo o ano, produzindo totais significativos de chuvas, especialmente entre Dezembro e Março. Além das frentes frias, pode haver atuação de convergências de umidade oriundas da região amazônica, formando a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a qual consiste de um canal de umidade que se forma entre a região Norte, passando pelo Centro-Oeste e atingindo o Sudeste. Normalmente, a ZCAS atua com maior intensidade entre dezembro e fevereiro. Além disto, durante o verão, há também a atuação de eventos de chuvas associados à atividade convectiva, devido às temperaturas mais altas deste período e umidade atmosférica. No inverno, a região é afetada por temperaturas muito baixas, com geadas frequentes ao longo desta estação e pela atuação de frentes frias. Além disto, há atuação do Anticiclone do Atlântico Sul (ACAS), o qual consiste de uma zona

de alta pressão atmosférica que dificulta a atuação de frentes frias e formação de nuvens, fazendo com que ocorra um período seco característico durante o inverno.

2.2 Instrumentação da MBMA

A MBMA vem sendo monitorada desde junho de 2009. Este monitoramento envolve os elementos climáticos temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e pluviometria por uma estação meteorológica automática instalada externamente à microbacia, com os dados coletados a cada 30 minutos. Abaixo do dossel da MBMA estão instalados 25 pluviômetros do tipo “Ville de Paris”, de forma cobrir toda a área da MBMA, cujas leituras foram feitas diariamente reduzindo-se efeitos acumulativos e de sobreposição de eventos de chuva (Figura 1).

Próximo a cada pluviômetro, há um medidor de umidade do solo do tipo “Profile Probe”, previamente calibrado conforme Mello et al. (2011), o qual monitora a umidade até 1,0 m de profundidade, cobrindo todo o perfil da zona não saturada e de transmissão de água (Figura 1). As leituras nestes pontos de umidade são feitas periodicamente a cada 20 dias, aproximadamente, e é este intervalo de tempo aplicado ao balanço hídrico bem como na análise do comportamento de cada componente deste. Para cada ponto de monitoramento de umidade no perfil do solo foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-20 cm, 20-50 cm e 50-100 cm para caracterizações físicas e químicas em laboratório (Tabela 1) e também de atributos hidrológicos relacionados à curva característica de umidade, a partir da qual, obteve-se o armazenamento máximo de água no solo, a porosidade drenável, porosidade total e microporosidade, considerando-se a umidade à capacidade de campo correspondente ao potencial matricial de 0,06 atm (MELLO et al., 2002).

Na seção de controle da MBMA o escoamento é monitorado por uma calha Parshall associada a um linógrafo automático com “data logger”, o qual fornece valores a cada 60 minutos, permitindo caracterizar de forma contínua o comportamento temporal do escoamento.

Para o cálculo da transpiração diária aplicou-se a seguinte metodologia, conforme Almeida e Soares (2003) e Pereira et al. (2010), ambos para as condições de Mata Atlântica:

$$T = \frac{\Delta \cdot Rn + \rho \cdot cp \cdot (es - e) \cdot ga}{\lambda \cdot \left(\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \left(\frac{ga}{gc} \right) \right) \right)} \quad (1)$$

em que T refere-se à transpiração estimada pelo modelo de Penman-Monteith, Δ refere-se à declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), Rn refere-se ao saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2}\text{h}^{-1}$), ρ é a densidade do ar úmido (kg m^{-3}), cp é o calor específico à pressão constante, es é a pressão de vapor de saturação à temperatura do ar (kPa), e é a pressão de vapor (kPa), ga é a condutância aerodinâmica (ms^{-1}), gc é a condutância do vapor d’água no dossel (m s^{-1}) e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

A condutância do vapor d’água no dossel foi obtida por:

$$g_c = g_s \cdot \text{IAF} \quad (2)$$

em que gs refere-se à condutância estomática e IAF ao índice de área foliar. Para este cálculo, foram aplicados os resultados obtidos por Pereira et al. (2010) para a mesma condição de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, em pesquisa anterior, ao longo do ano hidrológico e apresentados na Tabela 2. Os valores de ga considerados nos cálculos foram os obtidos pelo referido autor, variando de

0,0921 a 0,1000 (média de 0,0993 m.s^{-1}). Segundo os autores Almeida e Soares (2003), os valores de g_a apresentam pequena variação ao longo do ano, produzindo pequeno efeito sobre a transpiração das plantas, ou seja, a sensibilidade da evapotranspiração a este parâmetro é muito pequena.

Tabela 2 Comportamento do parâmetro g_s (condutância estomática) para um remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, MG

| Período do ano | g_s (m.s^{-1}) |
|-------------------|-----------------------------|
| Setembro | 0,0025 |
| Outubro | 0,0030 |
| Novembro/Dezembro | 0,0035 |
| Janeiro/Fevereiro | 0,0038 |
| Março | 0,0035 |
| Abril | 0,0030 |
| Maio | 0,0025 |
| Junho/Julho | 0,0023 |

Fonte: Adaptada de Pereira et al. (2010)

O monitoramento do IAF foi conduzido com o equipamento LAI2000 Plant Canopy Analyser - LICOR, utilizando um sensor com ângulo de visada de 180 graus. Primeiramente, foi feita uma leitura a céu claro que foi usada como referência. Em seguida, mais 10 leituras espaçadas de aproximadamente 10 m dentro da mata, em uma área de 20 x 90 m, obedecendo a um caminhamento em linha reta pelo centro da área para evitar efeitos de bordadura. Esse procedimento foi repetido duas vezes, em caminhamento de ida e volta, totalizando 20 leituras, obtendo-se um valor médio para o IAF num intervalo de tempo mensal. No Gráfico 2 apresentam-se os valores monitorados do IAF ao longo dos anos hidrológicos monitorados.

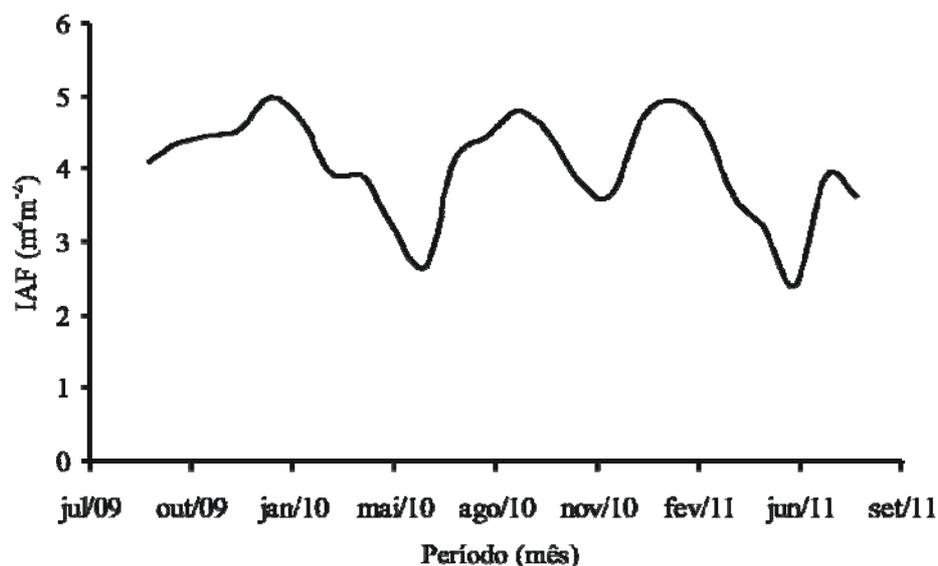


Gráfico 2 Comportamento do IAF na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG, entre setembro/2009 e agosto/2011

Para validar esta proposição, foi feita uma comparação entre os valores de evapotranspiração obtidos por balanço hídrico durante os primeiros meses do período seco do ano (de abril a agosto de 2010 e de 2011), com ausência de precipitação significativa, ou seja, a parcela dos eventos de chuva que atingiu o solo contribuiu apenas com o aumento do armazenamento de água no perfil do solo e não produziu fluxo em direção à zona saturada. Nesta condição, aplicou-se a seguinte equação de balanço hídrico, considerando-se a camada de 1,0 m para o controle deste:

$$ET_{(\Delta t)} = P_{(\Delta t)} - \Delta A_{ZNS_{(\Delta t)}} - D_{SD_{(\Delta t)}} \quad (3)$$

Nesta equação, ET diz respeito basicamente à transpiração uma vez que praticamente não há molhamento do dossel; P, ΔA e DS referem-se, respectivamente, à precipitação, variação de armazenamento de água no perfil do solo e deflúvio superficial direto, no intervalo de tempo Δt . Desta forma, o desempenho da equação 1 foi comparado aos dados obtidos pela equação 3, obtendo-se a relação estatística do Gráfico 3, a qual demonstra boa precisão, validando a metodologia aplicada.

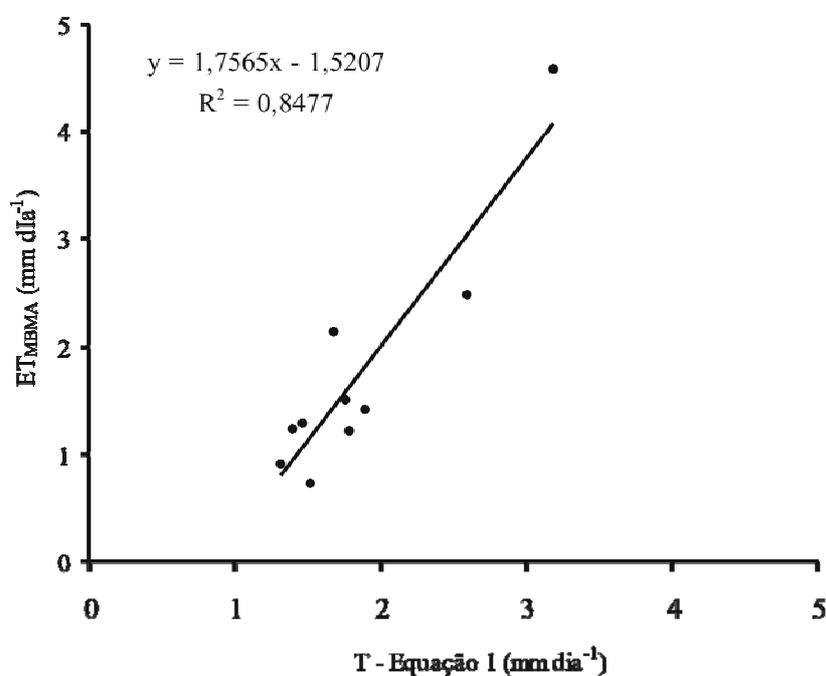


Gráfico 3 Desempenho da equação de Penman-Monteith (equação 1), aplicada com base nos valores de g_s e g_a para Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira e monitoramento do IAF, em relação aos valores de evapotranspiração observados pelo balanço hídrico durante o período seco (equação 3)

Para estimativa da evaporação do dossel, o modelo P-M para condições de ET potencial foi aplicado, conforme Cuartas et al. (2007), fazendo uma correção do mesmo pela relação entre a lâmina interceptada pelo dossel e a sua capacidade máxima de armazenamento (S), a qual, segundo Ávila, Mello e Silva (2011), é igual a 1,58 mm. Assim, tem-se:

$$\begin{cases} ET_{BH} = ETp & \text{Se } C \geq Sc \\ ET_{BH} = ETp \cdot \left(\frac{C}{Sc}\right) + T \cdot \left(1 - \frac{C}{Sc}\right) & \text{Se } C \leq Sc \end{cases}$$

2.3 Balanço Hídrico

A aplicação do balanço hídrico foi conduzida com base no esquema da Figura 2, o que resulta numa formulação matemática da seguinte forma:

$$\Delta A_{BH}(\Delta t) = \Delta A_{ZNS}(\Delta t) + \Delta A_{ZS}(\Delta t) = P(\Delta t) - ET_{BH}(\Delta t) - (D_{sub} + D_{SD})(\Delta t) \quad (4)$$



Figura 2 Esquema dos elementos de balanço hídrico conduzido na MBMA

A variável dependente do balanço hídrico foi a variação do armazenamento na zona saturada ($\Delta A_{ZS(\Delta t)}$). Este procedimento foi aplicado com o intuito de se avaliar a capacidade de armazenamento de água na MBMA como função dos demais elementos do balanço hídrico, os quais foram precisamente monitorados ao longo do tempo e se justifica pela proximidade entre as zonas saturada e não saturada haja vista que a profundidade máxima dos solos é de 1,20 m e o monitoramento da umidade dos mesmos na zona não saturada ter sido conduzido até a profundidade de 1,0 m, ou seja, praticamente todo o perfil do solo e em vários pontos no espaço da microbacia. Procedimento semelhante foi aplicado por Tomasella et al. (2008) para análise dos componentes do balanço hídrico numa microbacia hidrográfica da região amazônica, porém, como os solos da referida microbacia são profundos (mais de 4,0 m de perfil), os autores analisaram, como variável resposta do balanço

hídrico, a variação de armazenamento na zona de transmissão de fluxo, a qual se localiza entre as zonas saturada e não saturada.

Trabalhou-se com esta situação devido a dois aspectos básicos:

- a) o monitoramento da zona saturada propriamente dita implica em alguns problemas de precisão e representatividade, uma vez que são necessários vários pontos de observação do lençol (de forma semelhante ao aplicado para armazenamento de água no perfil do solo) devido à elevada variabilidade espacial deste; ainda, as leituras normalmente são manuais e há grande dificuldade prática em se explorar toda a espessura da zona saturada devido à grande profundidade de perfuração necessária especialmente nas cotas mais elevadas, tendo sido detectada a presença de rochas em profundidades pouco superiores a 1,0 m. Todo este processo está associado a um custo extremamente alto para uma leitura que não apresentaria o mesmo grau de precisão das demais, podendo conduzir a resultados pouco representativos (MUÑOZ-VILLERS et al., 2011);
- b) a segunda situação está associada à estimativa do armazenamento de água na zona saturada com base nas leituras dos poços. Existem algumas metodologias, como a aplicada por Tomasella et al. (2008), o qual considera um armazenamento médio calculado com base na distância dos poços à rede de drenagem, e o método “Water Table Fluctuation (WTF)”, que consiste em se considerar as oscilações de profundidade do lençol por meio de extrapolação gráfica do linigrama de profundidade obtido por observação. Para que haja consistência da primeira metodologia, são necessários vários poços de observação para um mapeamento representativo deste uma vez

que se trata de um processo aproximado da zona de influência de aquífero, que tem na distância à rede de drenagem sua referência. Por se tratar de uma microbacia hidrográfica com apenas 16 ha de área este procedimento não teria êxito suficiente devido à pequena representatividade desta informação. No segundo procedimento, Oliveira (2011) o aplicou para caracterizar o balanço hídrico subterrâneo de nascentes e avaliou que este procedimento pode produzir erros de estimativa consideráveis devido ao grau de subjetividade deste processo. Muñoz-Villers et al. (2011) aplicou uma terceira metodologia considerando a vazão de escoamento base entre o primeiro e últimos 10 dias do balanço hídrico dividido pelo coeficiente de depleção do escoamento base (α), consistindo de uma metodologia muito simplificada e pouco representativa. Os próprios autores consideraram a possibilidade de 100% de erro nesta estimativa. Todas as metodologias consideram uma série de aproximações, sendo que os pesquisadores as reconhecem como falhas e que não produzem a mesma precisão que os demais elementos do balanço hídrico, podendo conduzir a erros importantes de interpretação quando os objetivos estão associados à capacidade de produção de água destes ambientes.

Diante da situação exposta, a forma de análise conduzida neste trabalho permite avaliar a capacidade de armazenamento de água da microbacia vinculada a uma variável resposta fisicamente associada aos elementos do balanço hídrico, para os quais o monitoramento é representativo e com pequena margem de erro devido à qualidade instrumental aplicada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comportamento geral dos elementos de balanço hídrico monitorados nos anos hidrológicos de 2009/2010 e 2010/2011

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de precipitação, interceptação, deflúvios total, subterrâneo e direto e evapotranspiração, observados nos anos hidrológicos 2009/2010 e 2010/2011 e a média dos dois anos. No contexto dos componentes verticais do balanço hídrico (P e ET), os totais precipitados estão acima da média histórica da região, que é de aproximadamente 2050 mm para anos hidrológicos, conforme Yanagi e Mello (2011). No ano hidrológico 2010/2011, este valor ficou muito acima da média e, neste período, apenas no mês de janeiro, ocorreu 872 mm, valor este histórico cuja origem está associada a fenômenos atmosféricos normais que controlam o regime pluvial do Sudeste do Brasil, especificamente uma ZCAS combinada com sistemas frontais (INFOCLIMA, 2011a). Esta condição atmosférica produziu 21 dias chuvosos apenas em janeiro (dias com no mínimo 3 mm de precipitação). Em função desta concentração de chuvas em apenas um mês, o deflúvio direto, neste ano hidrológico, foi mais de duas vezes superior ao obtido para o ano hidrológico 2009/2010, contudo, proporcionalmente inferior ao monitorado para a BHRL, a qual apresenta uso do solo por pastagem em mais de 40% de sua área. Esta diferença demonstra a capacidade da Mata Atlântica em atenuar chuvas intensas as quais produziram impactos extremamente danosos em áreas pouco florestadas neste período (SILVA; MELLO, 2011). Ainda, é possível observar que o deflúvio subterrâneo teve maior contribuição no ano hidrológico 2009/2010 apesar do menor total precipitado, contudo, com boa distribuição da chuva ao longo do verão, possibilitando melhores condições para infiltração de água no solo.

Tabela 3 Valores totais dos componentes do balanço hídrico monitorados nos anos hidrológicos 2009/2010 e 2010/2011, na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG

| Ano Hidrológico | P | I | DT | DD | DB | ET |
|--------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 2009-2010 | 2249,5 | 523,6 | 832,9 | 138,7 | 694,2 | 1260,0 |
| 2010-2011 | 2755,9 | 609,0 | 921,0 | 285,4 | 635,6 | 1126,2 |
| Média | 2502,7 | 566,9 | 877,0 | 212,1 | 664,9 | 1193,1 |

P, I, DT, DD, DB e ET são, respectivamente, precipitação, interceptação, deflúvio total, deflúvio direto, deflúvio subterrâneo e evapotranspiração, em mm

O ano hidrológico 2009/2010 apresentou evapotranspiração superior ao ano 2010/2011, mas ambos os valores são compatíveis com Floresta Ombrófila (Mata Atlântica). Almeida e Soares (2003), monitorando um remanescente de Mata Atlântica na região litorânea do estado do Espírito Santo, obtiveram valores médios de ET, aplicando metodologia similar a deste estudo, da ordem de 1350 mm/ano, concluindo sobre a natural alta demanda por água nestes ambientes. O total de precipitação anual média obtido pelos autores foi de 1375 mm, ou seja, a evapotranspiração é muito próxima da precipitação, resultando numa participação do deflúvio de apenas 2% no balanço hídrico. Esta situação é característica de uma bacia hidrografia com baixa capacidade de armazenamento e, conseqüentemente, de produção de água. O valor médio de ET obtido neste estudo para a Serra da Mantiqueira foi de 1193,1 mm, próximo ao obtido por Almeida e Soares (2003). No entanto, a média anual de chuva monitorada nos dois anos hidrológicos deste estudo foi de 2502,7 mm, muito superior, portanto, ao obtido na região trabalhada pelos citados autores (litoral centro-norte do Espírito Santo).

É importante ressaltar que o trabalho de Almeida e Soares (2003) foi conduzido numa condição climática muito distinta da verificada na região da Serra da Mantiqueira, o que torna o presente estudo muito peculiar. Nesta última

região, de acordo com Yanagi e Mello (2011), as condições climáticas são típicas de regiões subtropicais, com temperatura média anual oscilando entre 14 e 16°C, com invernos frios e verões amenos (temperatura média nesta estação em torno de 23°C) e totais precipitados muito superiores aos da região do litoral centro-norte do Espírito Santo. Portanto, o impacto da componente evapotranspiração, no balanço hídrico da MBMA é substancialmente inferior. Ainda no contexto da evapotranspiração, Kumagai et al. (2005), analisando dados de 2 anos de monitoramento do balanço hídrico numa floresta tropical na Malásia, encontraram valores de evapotranspiração anual variando de 1310 a 1500 mm. Apesar das diferenças climáticas entre as regiões, estes dados demonstram o peso que as espécies florestais de grande porte apresentam do balanço vertical de água numa bacia hidrográfica, e como ficou demonstrado por Almeida e Soares (2003), se não houver um regime pluvial que proporcione excedentes hídricos, estas regiões não terão condições hidrológicas para armazenamento e produção de água.

No tocante à interceptação, os resultados obtidos no presente estudo apresentaram uma variabilidade muito baixa de um ano hidrológico para outro, para a condição de Floresta Ombrófila Densa. Shuttleworth (1988) e Tomasella et al. (2008), ambos estudando o balanço hídrico em bacias hidrográficas da região amazônica, concluíram a mesma situação, apesar do valor médio de interceptação ter sido inferior (em média, 12% do total de chuva). Foram obtidos 23,3% para o ano 2009/2010 e 22,1% para o ano 2010/2011, sendo o último ligeiramente inferior devido à acentuada concentração das chuvas no verão, saturando de forma mais rápida o dossel. No estudo de Almeida e Soares (2003), após 7 anos de monitoramento, a interceptação média obtida foi de 23,9%, ou seja, muito próxima do que foi obtido para a região da Serra da Mantiqueira, demonstrando coerência entre os dois balanços hídricos também para esta componente. Desta forma, observa-se que a participação da interceptação no

balanço hídrico em ambientes de Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa) pode ser substancial e precisa ser devidamente incorporada e analisada dentro do contexto do papel destas áreas na capacidade de produção de água destas bacias hidrográficas.

Em termos do comportamento médio diário dos componentes deflúvio, evapotranspiração, precipitação e interceptação (Tabela 4), observa-se que a média diária de precipitação ao longo dos dois anos hidrológicos monitorados, é superior à soma dos elementos deflúvio e ET do ciclo. No entanto, apenas a ET correspondeu a 47,7% deste valor, sendo o componente do ciclo hidrológico com maior peso. Tomasella et al. (2008), monitorando uma microbacia hidrográfica da região amazônica, encontraram, a partir de 3 anos de monitoramento, uma relação entre evapotranspiração e precipitação da ordem de 53,8% para condição de floresta tropical amazônica. No entanto, a precipitação média monitorada pelos citados autores foi superior à obtida para a Serra da Mantiqueira (7,18 mm/dia contra 6,86 mm/dia). Como a interceptação obtida no presente estudo foi superior ao obtido por Tomasella et al. (2008) e a evapotranspiração foi próxima (3,27 mm/dia contra 3,68 mm/dia), a demanda transpirativa das plantas é inferior para a condição de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, o que é explicado pelas condições climáticas subtropicais da região em contraste com as equatoriais, de temperaturas muito altas ao longo de todo o ano.

Tabela 4 Valores médios diários dos componentes do balanço hídrico monitorados nos anos hidrológicos 2009/2010 e 2010/2011, na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG

| Ano Hidrológico | Deflúvio médio (mm/dia) | ET média (mm/dia) | Interceptação média (mm/dia) | Precipitação média (mm/dia) |
|-----------------|-------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 2009-2010 | 2,28 | 3,45 | 1,43 | 6,16 |
| 2010-2011 | 2,52 | 3,09 | 1,67 | 7,55 |
| Média | 2,40 | 3,27 | 1,55 | 6,86 |

O deflúvio total representou, em média, 35% do total precipitado, variando de 33,4 a 37%. Somando-se a evapotranspiração ao deflúvio, chega-se a 82,7% do total precipitado, demonstrando que excedentes hídricos importantes na MBMA. Com base nos dados da Tabela 3, observa-se que o deflúvio subterrâneo na MBMA tem peso médio de 75,8% no deflúvio total, o que reforça o potencial de armazenamento de água na mesma na zona saturada. Além destas evidências, as quais foram obtidas com base em monitoramento, como os solos da MBMA são rasos a moderadamente profundos (MENEZES et al., 2009), sua zona não saturada se confunde com a zona de transmissão de água no perfil do solo, caracterizando uma capacidade de armazenamento limitada. Com isto, o fluxo para a zona saturada ocorre de forma bastante rápida, aumentando o potencial de armazenamento da zona saturada, ou seja, consiste de um forte indicativo da ocorrência de recarga subterrânea (PRICE, 2011). No trabalho de Tomasella et al. (2008) para a região amazônica, foi observado que a participação do deflúvio no total precipitado correspondeu a 44,3%, variando de 41,5 a 47,8%. Esta maior participação do deflúvio em relação ao obtido para a MBMA se deve ao regime pluvial da região amazônica, cujos totais anuais são, em média, superiores ao da Serra da Mantiqueira, e como é sabido, bacias com alta capacidade de produção de água.

Muñoz-Villers et al. (2011), estudando o balanço hídrico em duas microbacias hidrográficas florestais, sendo uma delas com vegetação nativa madura e outra em regeneração, na região central do México, com altitude superior a 2000 m e com características climáticas similares à Serra da Mantiqueira (clima Cwb e Superúmido A, com chuvas concentradas no verão), verificaram, após 2 anos de monitoramento, que o deflúvio correspondeu a 44% da precipitação na primeira microbacia e 39% na segunda. As diferenças em relação ao presente estudo estão associadas às diferenças no comportamento da evapotranspiração, a qual foi semelhante em ambas as microbacias estudadas pelos autores e em torno de 850 mm, e também devido à menor interceptação, próxima de 18% para a floresta madura. Assim, é possível verificar que bacias hidrográficas de cabeceira, ocupadas por florestas nativas, apresentam alto potencial para produção de água, uma vez que os resultados de balanço hídrico em diferentes condições geomorfológicas destes biomas apontam para esta característica.

No Gráfico 4 estão apresentados os comportamentos da precipitação, precipitação interna, do armazenamento de água no solo por camadas (média de 25 medidores – Figura 1) e da evapotranspiração ao longo dos dois anos hidrológicos monitorados, com intervalo entre leituras aproximadamente de 20 dias. A primeira observação consiste das diferenças entre os regimes pluviais de cada ano hidrológico, caracterizando uma importante variabilidade intra-anual, a qual é comum nas regiões tropicais e subtropicais (TOMASELLA et al., 2008). As precipitações no segundo ano hidrológico são de magnitudes muito superiores, especialmente entre novembro/2010 e março/2011. É importante destacar que entre 09/01/2011 e 11/02/2011 houve um total precipitado de 629 mm, correspondendo a uma média de 26,3 mm/dia, o que produziu uma elevação substancial da umidade do solo em todas as camadas. No contexto da evapotranspiração, observa-se um comportamento que oscila de forma

importante durante os períodos chuvosos e uma redução acentuada e constante durante o período de inverno. Há algumas tendências de aumento da ET coincidindo com ocorrência das precipitações durante o verão, significando condições atmosféricas favoráveis à demanda transpirativa das plantas, mas também à evaporação da parcela da chuva interceptada pelo dossel. É importante destacar que, segundo Shuttleworth (1992), a participação da transpiração das plantas é maior na condição de um dossel seco ou úmido e que sob condição saturada, a transpiração é praticamente nula, com total predomínio da evaporação.

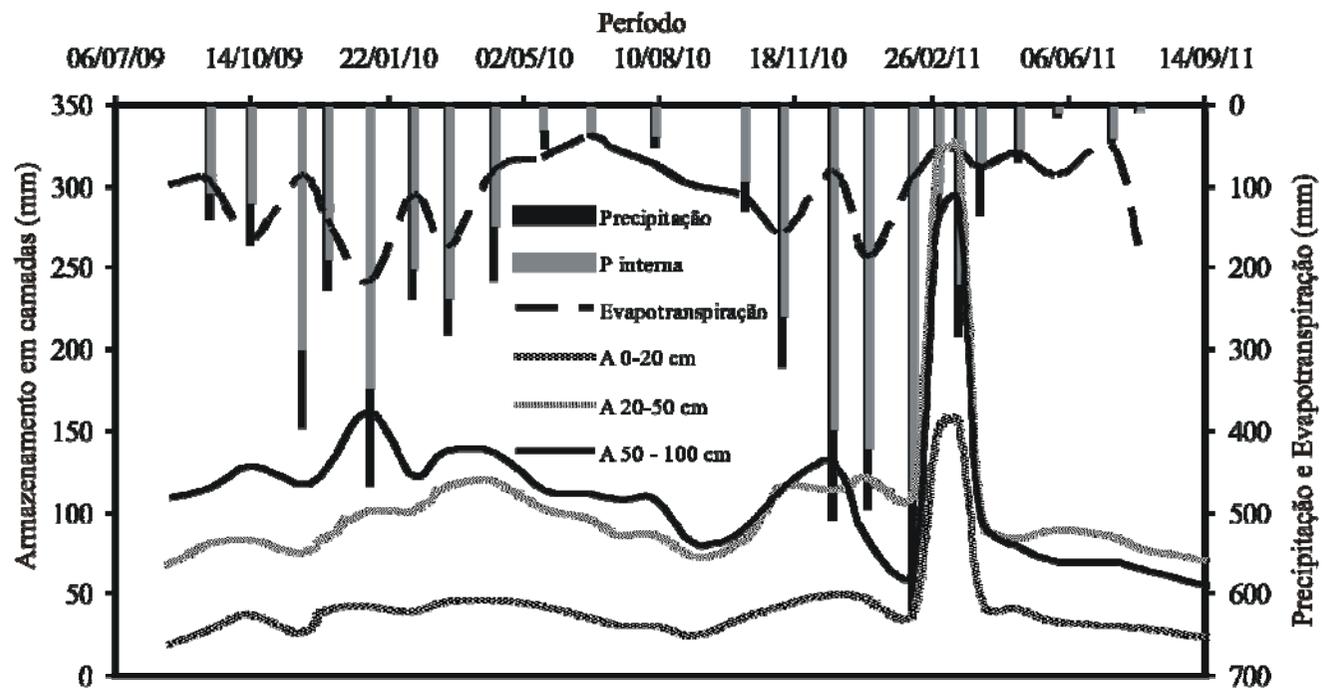


Gráfico 4 Comportamento da precipitação, precipitação interna, armazenamento de água no solo nas camadas de 0-20 cm, 20-50 cm e 50-100 cm e evapotranspiração, no período entre agosto/09 e setembro/11

No contexto do armazenamento de água no solo, observa-se no Gráfico 4, que há grande diferença de armazenamento entre a camada de 0-20 cm e as mais profundas (20-50 cm; 50-100 cm), mostrando que há um rápido movimento vertical de água em profundidade a partir desta camada para as demais, especialmente na camada de 20-50 cm, onde os valores foram superiores na maior parte do tempo, demonstrando que este ambiente é altamente conservador de umidade. Esta condição facilita o fornecimento de água para os processos associados à transpiração das plantas, uma vez que o sistema radicular destas espécies pode atingir estas profundidades (ALMEIDA; SOARES, 2003). Desta forma, é plausível estudar o comportamento do armazenamento de água na MBMA, dividindo-o em duas zonas específicas (saturada e não saturada), uma vez que o armazenamento de água na zona não saturada está sendo devidamente monitorado até a profundidade máxima dos solos da microbacia.

Para comprovar o comportamento do armazenamento descrito anteriormente, na Figura 3a estão apresentados mapas de porosidade drenável, obtidos por krigagem, para as camadas de 0-20 cm, 20-50 cm e 50-100 cm. Observa-se que a porosidade drenável diminui com a profundidade, sendo que na camada superficial, grande parte da microbacia apresenta valores variando de 22 a 37%, que é um valor consideravelmente alto, especialmente para Cambissolos. Observa-se redução da porosidade drenável para a camada de 20-50 cm, onde menos de 40% da área apresenta valores superiores a 22%. Na camada mais profunda, praticamente 100% da microbacia apresenta porosidade drenável inferior a 22%, uma vez que, como os solos são rasos ou moderadamente profundos, a presença de material associado à rocha de origem é comum nestas profundidades, alterando a estrutura do solo. Estes mapas demonstram que a MBMA possui elevado potencial para o fluxo vertical de água a partir da camada superficial em direção à zona de saturação, auxiliando

na explicação do processo de recarga observado nos períodos de chuva mais concentrada.

Na Figura 3b estão apresentados mapas de microporosidade, a qual é um reflexo do potencial para armazenamento de água no perfil de solo da microbacia. Nestes, observa-se um aumento do potencial de armazenamento de água no solo à medida que a profundidade aumenta, onde praticamente 100% da microbacia apresenta microporosidade superior a 30% na camada mais profunda (50-100 cm), enquanto que na camada superficial, 70% da área apresenta microporosidade inferior a 30%. Ambas as Figuras permitem caracterizar um ambiente conservador de umidade em profundidade bem como maior potencial para o fluxo de água da superfície para as camadas mais profundas, as quais conservam umidade por mais tempo, aumentando o tempo de oportunidade para o fluxo em direção à zona saturada.

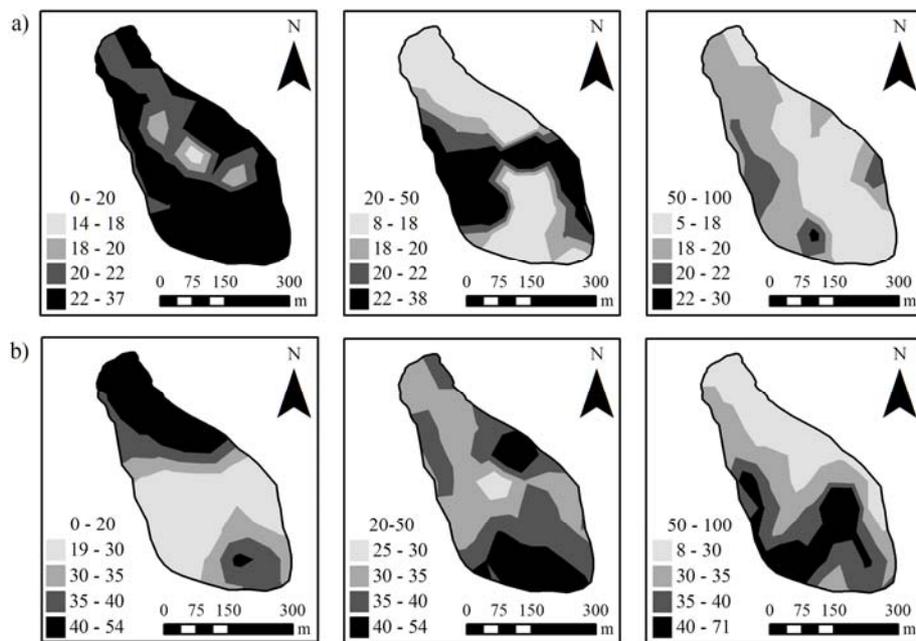


Figura 3 Mapas de porosidade drenável (a) e microporosidade (b), ambas em porcentagem, para as camadas de 0-20, 20-50 e 50-100 cm na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG

3.2 Comportamento do escoamento na MBMA

No Gráfico 5 estão apresentados os hidrogramas diários associados ao escoamento superficial total, ao escoamento base e à distribuição temporal da precipitação ao longo dos anos hidrológicos (01/09/2009-31/08/2011). É possível observar a variabilidade intra-anual do escoamento como reflexo do comportamento do regime pluvial, conforme mencionado anteriormente. A vazão máxima média diária observada no 1º ano hidrológico foi de $16,51 \text{ L s}^{-1}$, enquanto que para o 2º ano, esta foi de $44,03 \text{ L s}^{-1}$, fruto das intensas precipitações ocorridas no mês de janeiro. Observa-se que entre 18/11/2010 e 26/02/2011 ocorreram vários dias consecutivos com precipitação diária superior a 50 mm, o que caracteriza a ocorrência de chuvas de alta intensidade (MELLO et al., 2008). Mesmo sob efeito de interceptação pelo dossel (Gráfico 6) tais valores continuaram altos, com elevada capacidade de gerar escoamento superficial direto, especialmente num solo cuja capacidade de armazenamento encontrava-se no seu limite (Gráfico 4). Esta condição proporcionou a geração de escoamento superficial direto de grandes magnitudes na MBMA e na região da Serra da Mantiqueira de forma geral, produzindo transbordamento de rios e vários registros de deslizamentos de encostas.

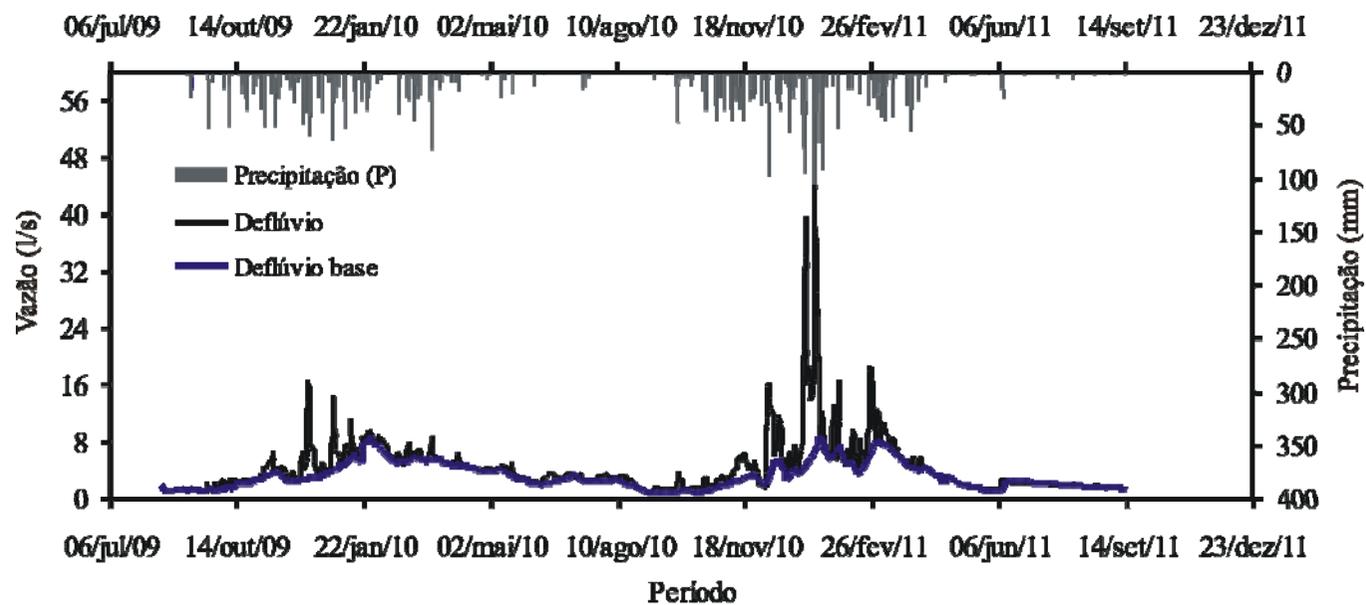


Gráfico 5 Hidrogramas diários de escoamento superficial e precipitação (P) para a MBMA, Serra da Mantiqueira, MG, observados entre agosto de 2009 e setembro de 2011

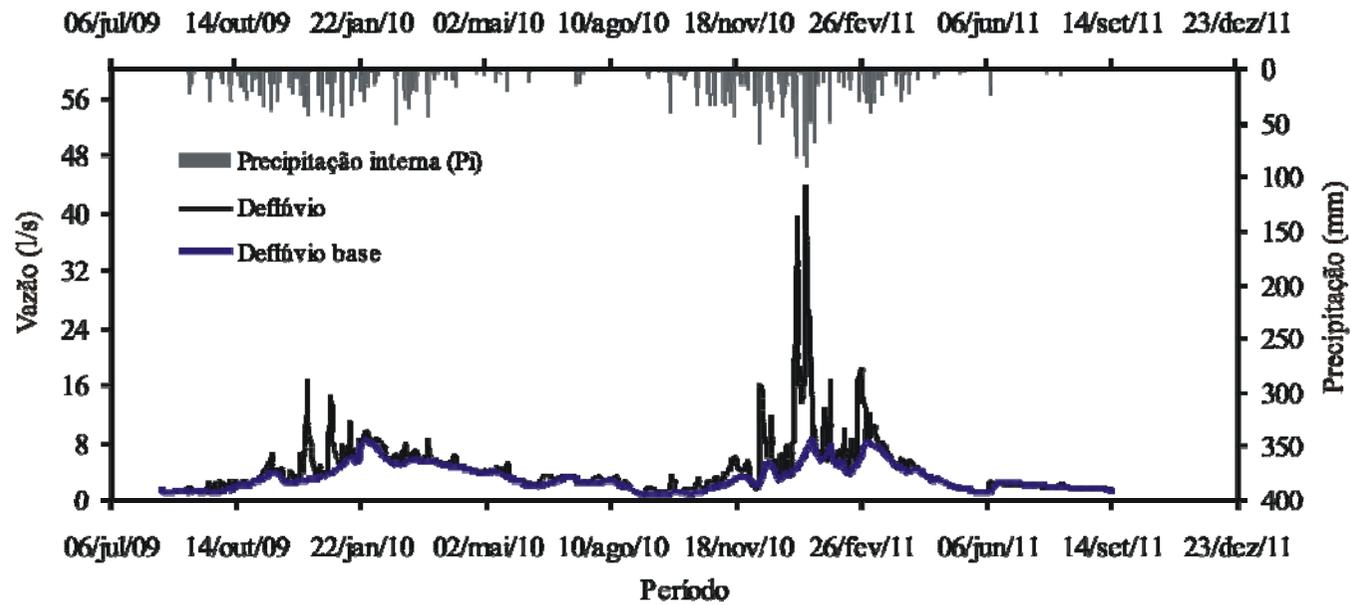


Gráfico 6 Hidrogramas diários de escoamento superficial e precipitação interna (P) para a MBMA, Serra da Mantiqueira, MG, observados entre agosto de 2009 e setembro de 2011

Na Tabela 5 estão apresentadas relações percentuais entre o escoamento total (EST), escoamento superficial direto (ESD) e escoamento subterrâneo (ESB) e a precipitação (P) bem como relação entre ESB e EST. Os dados desta Tabela demonstram que a participação do escoamento base no escoamento total variou de 69,02% a 83,34%, com valor médio de 75,82%, sendo, portanto, reflexo da variabilidade do regime pluvial. No entanto, a participação do escoamento superficial direto aumenta de forma expressiva no ano hidrológico 2010/2011, significando que 10,35% do total precipitado foi convertido em deflúvio superficial direto contra 6,17% do ano hidrológico 2009/2010. A relação entre o escoamento subterrâneo e a precipitação externa consiste de um indicador importante associado à produção de água, sendo que no 1º ano hidrológico, 30,86% do total precipitado foi convertido em escoamento subterrâneo, significando que parcela importante da precipitação promove recarga da zona de saturação. Tanto a relação ESD/P quanto a relação ESB/P são indicadores hidrológicos fundamentais para se inferir sobre a capacidade de produção de água de uma bacia hidrográfica (MENEZES, 2011; PRICE, 2011). Em média, a parcela da precipitação que é convertida em escoamento subterrâneo é, aproximadamente, 3,14 vezes superior à parcela que é convertida em ESD, sinalizando para um ambiente com elevado potencial para armazenamento de água. No entanto, é importante realçar a variabilidade intra-anual do regime pluvial haja vista as diferenças importantes encontradas entre os anos hidrológicos avaliados, especialmente no tocante ao ESD.

Tabela 5 Relação percentual entre os componentes do escoamento e a precipitação externa e entre o escoamento base e o escoamento total

| Ano Hidrológico | EST/P (%) | ESD/P (%) | ESB/P (%) | ESB/EST(%) |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 2009-2010 | 37,03 | 6,17 | 30,86 | 83,34 |
| 2010-2011 | 33,42 | 10,35 | 23,06 | 69,02 |
| Média | 35,04 | 8,47 | 26,57 | 75,82 |

No trabalho de Muñoz-Villers et al. (2011), mencionado anteriormente, foi observado que a participação do escoamento base no escoamento total variou de 88 a 90% e, portanto, o escoamento superficial direto participa com, no máximo, 12% do total, contra 16,6% obtidos neste estudo. Estes resultados podem ser considerados como diferentes devido ao comportamento da evapotranspiração e interceptação, as quais foram inferiores aos obtidos para a MBMA, conforme comentado, mas também devido às características dos solos da região estudada por Muñoz-Villers et al. (2011), os quais são de origem vulcânica, com profundidade de até 2,5 m, com alta porosidade e capacidade de armazenamento de água, o que promove um processo mais favorável ao fluxo e armazenamento de água que no ambiente pedológico da Serra da Mantiqueira, com predominância de solos mais jovens e mais rasos e com menor capacidade de armazenamento. Além disto, no trabalho mencionado, há alguns problemas de estimativa do armazenamento de água da zona saturada, onde os autores trabalharam com erros de 100% nesta estimativa devido à metodologia aplicada, o que provavelmente produziu superestimativa da recarga direta, com redução do grau de confiabilidade dos resultados.

No Gráfico 7 está apresentado o comportamento do deflúvio mensal e das precipitações mensais durante os anos hidrológicos avaliados (Setembro/09 – Agosto/2011), permitindo melhor visualização do comportamento deste em relação às condições climáticas predominantes. No ano hidrológico 2009/2010 percebe-se menor concentração de chuvas e, portanto, maior tempo de

oportunidade para que haja recarga da zona saturada, cujo reflexo pode ser analisado no comportamento do deflúvio subterrâneo. Por sua vez, no ano 2010/2011, devido à muito alta concentração da precipitação durante o verão, verificou-se uma rápida saturação do perfil do solo (Gráfico 4) e a drenagem natural deste excesso de água ainda propiciou deflúvio substancial em fevereiro, mesmo com a menor precipitação deste mês. É possível ainda observar diferenças significativas entre os anos hidrológicos, sendo que em 2009/2010 a depleção do escoamento subterrâneo ocorre de forma mais lenta, com valor do coeficiente de depleção (α) igual a 0,173, enquanto que para o ano 2010/2011, observa-se um fluxo consideravelmente mais rápido, com um coeficiente igual a 0,253 o que configura uma diferença importante entre os anos hidrológicos em termos do escoamento subterrâneo.

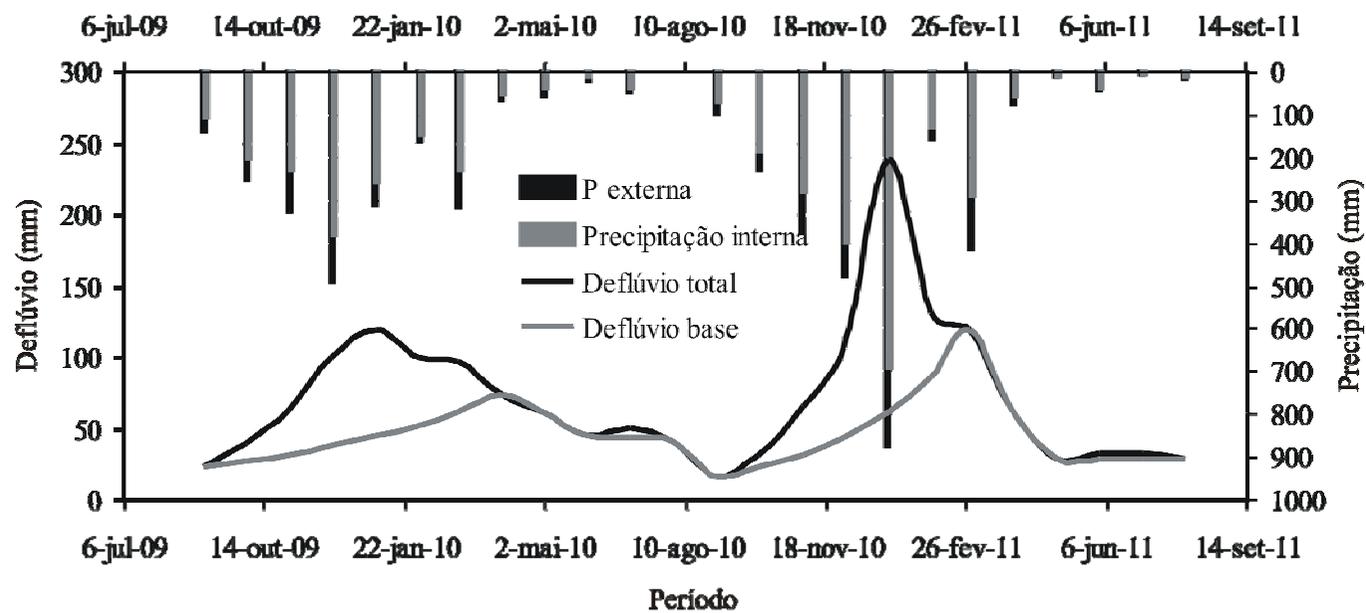


Gráfico 7 Comportamento do deflúvio e precipitação mensais ao longo dos anos hidrológicos analisados (Setembro/09 – Agosto/11)

Estes resultados permitem avaliar sobre o papel que a Mata Atlântica exerce no comportamento do escoamento na região da Serra da Mantiqueira. As explicações para este comportamento estão vinculadas à influência desta cobertura vegetal no contexto da interceptação, amenizando impactos diretos de chuvas muito intensas sobre o solo e, especialmente, às melhores condições associadas à hidrologia do solo, especialmente aqueles atributos associados ao fluxo de água no perfil do solo, como a porosidade drenável, a qual está diretamente associada à condutividade hidráulica saturada. Neste ambiente, há condições propícias para formação de macroporos mais efetivos devido ao acúmulo de matéria orgânica. Segundo Bonell et al. (2010) e Roa-Garcia et al. (2011), em ambientes tropicais, o papel hidrológico de matas associado às condições de superfície do solo, são tão ou mais importantes que a alta demanda evapotranspirativa dentro do contexto do ciclo hidrológico, proporcionando condições físicas adequadas para infiltração e posteriormente, aumento do armazenamento da zona saturada.

3.3 Comportamento do armazenamento de água na MBMA

No Gráfico 8 está apresentado a variação do armazenamento de água na zona saturada da MBMA, como resultado da aplicação do balanço hídrico (equação 4). De acordo com Tomasella et al. (2008), este comportamento permite inferir sobre as condições hidrológicas da MBMA no contexto de acúmulo ou de perda de água e, conseqüentemente, sobre suas reais condições de produção de água. Observa-se que as variações positivas correspondem a valores superiores às variações negativas, indicando capacidade de armazenamento de água. No ano hidrológico 2009/2010 é possível constatar menor armazenamento, em termos de lâmina total, do que no ano 2010/2011, devido à menor precipitação ocorrida neste período e à maior evapotranspiração

(Tabelas 3 e 4). No entanto, no início do período seco do ano hidrológico 2009/2010, observa-se que a variação de armazenamento se mantém aproximadamente constante, significando depleção do aquífero de forma mais controlada pelo sistema de drenagem da MBMA e maior capacidade de manutenção do escoamento base neste período.

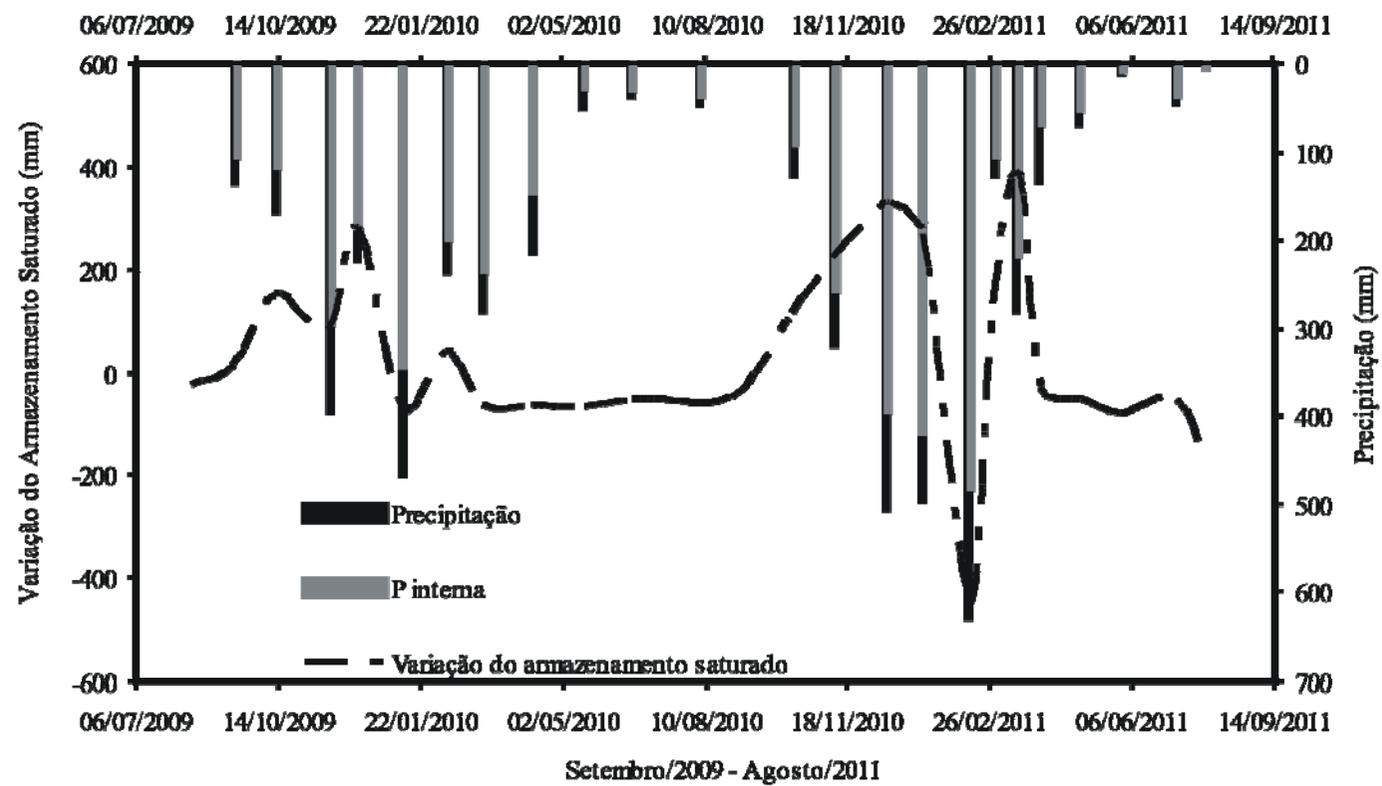


Gráfico 8 Comportamento da variação do armazenamento de água na zona saturada da MBMA, Serra da Mantiqueira, MG, nos anos hidrológicos 2009/2010 e 2010/2011

No entanto, no ano hidrológico 2010/2011, apesar da maior lâmina armazenada, basicamente devido à alta concentração de chuvas no verão, observa-se uma rápida depleção do armazenamento ao final do mês de janeiro e início de fevereiro. Este comportamento ocorreu devido à forte alteração no armazenamento saturado, como consequência do aumento de armazenamento de água no perfil do solo, levando-o próximo à sua saturação e, por conseguinte rápido fluxo de água em direção à zona saturada. No mês de março/2011 houve novamente aumento significativo do volume de água na zona saturada como resposta à alta umidade no perfil do solo neste período (Gráfico 4) devido à ocorrência de 280 mm de chuva entre 17/03/11 e 02/04/11 (16,5 mm/dia). A partir deste intervalo de tempo, inicia-se um processo de depleção do armazenamento saturado de forma semelhante ao ano 2009/2010. No entanto, a partir de Julho/2011, há uma forte redução do volume de água armazenado, como resultado da intensificação do período seco. É importante relatar que o final do ano hidrológico 2010/2011 foi caracterizado pela acentuação do período seco, com forte demanda atmosférica e praticamente sem eventos de chuva. A explicação para esta situação está na intensificação do fenômeno La-Niña, uma vez que a Temperatura na Superfície do Mar (TSM), correspondente ao Niño 3.4 (DE PAULA et al., 2010), tem oscilado negativamente no ano de 2011, configurando-se uma nova fase de atuação do fenômeno La-Niña (INFOCLIMA, 2011b). Assim, os dados apontam para uma provável atuação da cobertura vegetal na zona saturada a fim de compensar a baixa disponibilidade de água no perfil do solo até 1,0 m, uma vez que seu sistema radicular pode atingir 2,0 m ou mais de profundidade. No Gráfico 4 verifica-se exatamente esta situação, traduzida pelo aumento significativo de ET. Um exame mais detalhado dos dados permitiu verificar que houve uma oscilação de 25 mm a 116,3 mm de evapotranspiração em 46 dias, ou seja, uma demanda diária de 1,98 mm, e sem ocorrência de precipitação. Esta análise é reforçada pela variação negativa de

armazenamento de água no perfil do solo de apenas 22,7 mm (0,49 mm/dia) no mesmo período, ou seja, não havia disponibilidade hídrica suficiente para as demandas associadas à transpiração das plantas no perfil do solo, fazendo com que a zona saturada fosse afetada pelas mesmas.

Ainda com base no Gráfico 8, observa-se que o processo de recarga da zona saturada iniciou-se ao final do mês de setembro e início do mês de outubro de 2009, cujo total precipitado entre 15/08 e 12/10 foi de 304 mm e bem distribuídos ao longo do período. Esta consiste da situação esperada hidrológicamente. Contudo, no ano hidrológico subsequente, este processo foi iniciado entre meados de outubro e início de novembro, devido ao menor total precipitado antecedente (de 127 mm entre 06/08 e 11/10), produzindo um ligeiro atraso no início do ano hidrológico 2010/2011 em relação a 2009/2010, demonstrando que este último hidrológico iniciou-se fora do padrão normal esperado. Situação semelhante vem ocorrendo com ano o início do ano hidrológico 2011/2012.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores de variação dos armazenamentos saturado, não saturado e da microbacia hidrográfica, em mm/dia, para cada ano hidrológico e a média no período. Estes dados permitem avaliar se há acúmulo ou perda de água na MBMA ao final de cada ano hidrológico. Observa-se que ambos os anos hidrológicos geraram saldo positivo na MBMA, ou seja, após as saídas de água por deflúvio e evapotranspiração, verifica-se que houve aumento no seu estoque de água devido ao acúmulo na zona saturada. A variação negativa do armazenamento na zona não saturada está associada às demandas transpirativas numa situação de solos rasos e moderadamente profundos e, portanto, com menor disponibilidade hídrica para as plantas.

Tabela 6 Comportamento médio da variação de armazenamento de água na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG, nos anos hidrológicos 2009/2010 e 2010/2011 e média no período (2009/2011)

| Ano | $\Delta A_{\text{Saturado}}$ | $\Delta A_{\text{não saturado}}$ | $\Delta A_{\text{microbacia}}$ | P – ET |
|-------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------|
| Hidrológico | (mm/dia) | (mm/dia) | (mm/dia) | (mm/dia) |
| 2009/2010 | 0,687 | -0,258 | 0,429 | 2,89 |
| 2010/2011 | 2,006 | -0,064 | 1,942 | 4,41 |
| Média | 1,346 | -0,161 | 1,185 | 3,65 |

No ano hidrológico 2010/2011, apesar da substancial maior participação do deflúvio direto, conforme discutido anteriormente, como houve menor ET e maior P, o saldo vertical do balanço hídrico foi 74,1% superior ao saldo do ano 2009/2010, havendo condições para um aumento apreciável do estoque de água na MBMA. No ano hidrológico 2009/2010 foi possível detectar uma variação negativa de armazenamento de água no perfil do solo muito superior ao ano 2010/2011, demonstrando maior peso da evapotranspiração no primeiro ano. A menor taxa de evapotranspiração no ano 2010/2011 está associada ao grande número de dias chuvosos no período entre novembro e março, com saturação do dossel, o que reduziu o peso da transpiração na ET em relação a períodos com menor número de dias chuvosos (KUMAGAI et al., 2005; SHUTTLEWORTH, 1992). Numa análise detalhada dos registros de precipitação, foi possível verificar que, no período mencionado, ocorreram 2462,5 mm, ou seja, 89,4% do total do ano hidrológico 2010/2011 e dos 151 dias do período mencionado, 92 puderam ser caracterizados como chuvosos (60,9% do total), contra apenas 67 do ano 2009/2010 (44,4%) para o mesmo período.

Os dados da Tabela 6 e sua interpretação permitem verificar que o balanço hídrico neste ambiente da Serra da Mantiqueira é fortemente influenciado pelas condições climáticas bem como pela Mata Atlântica. Como esta variabilidade está vinculada a fenômenos globais, como El-Niño e La-Niña,

e também fenômenos atmosféricos específicos, do tipo ZCAS e ciclones tropicais e extratropicais e sistemas frontais, o do saldo do balanço hídrico na MBMA, como resultado da interação entre os diferentes elementos deste sob a condição de Mata Atlântica, estará vinculado a estes fenômenos. Desta forma, entende-se que em anos cujo comportamento do clima esteja dentro dos padrões normais ou que haja precipitação acima da média, a Mata Atlântica exercerá papel fundamental no controle da produção de água, conduzindo a um estoque positivo de água na microbacia. Os dados demonstram que, nesta condição, a Mata Atlântica exerceu papel relevante, especialmente atuando na interceptação e conseqüentemente, amenizando o escoamento superficial direto. Almeida e Soares (2003) mencionam que uma Floresta Ombrófila Densa pode demandar até 400 mm de água armazenada no solo nas condições atmosféricas predominantemente tropicais do litoral do estado do Espírito Santo. No presente monitoramento, foi observado um armazenamento médio de 271 mm no perfil do solo ao longo dos anos hidrológicos, sendo que este valor pode ser suficiente para manutenção das demandas transpirativas das plantas sob as condições climáticas da Serra da Mantiqueira, sem que a zona saturada seja significativamente afetada. No entanto, durante períodos de seca pronunciada, como no final do ano hidrológico 2010/2011, cujo armazenamento foi de apenas 160 mm na zona não saturada, há indicativos de que a Mata Atlântica passe a exercer um papel negativo no contexto de produção de água, sendo que as plantas tendem a gerar maior transpiração, afetando o estoque de água da microbacia, para manutenção de seu equilíbrio eco-fisiológico.

4 CONCLUSÕES

- a) a evapotranspiração correspondeu, em média, a 47,7% do total precipitado no ano hidrológico, enquanto a parcela interceptada foi de 22,7%, com pequena diferença entre os dois anos hidrológicos;
- b) o deflúvio total (subterrâneo + superficial direto) foi responsável, em média, por 35,04% da precipitação total, com participação do deflúvio subterrâneo de 75,82%, demonstrando predominância deste componente, sendo um importante indicativo do potencial de produção de água da MBMA;
- c) a variação de armazenamento da zona saturada na MBMA foi positiva em ambos os anos hidrológicos, sendo que no ano 2009/2010 houve um saldo positivo médio de apenas 0,687 mm/dia, próximo do equilíbrio, e no ano 2010/2011 foi verificado um saldo positivo de 2,006 mm/dia, demonstrando a elevada capacidade deste ambiente em termos de produção de água;
- d) foi verificado que o estoque de água na zona saturada está também vinculado às condições climáticas dominantes no período; o ano hidrológico 2009/2010 foi um período próximo às condições normais do regime pluvial da Serra da Mantiqueira, sem anomalias associadas ao El- Niño Oscilação Sul (ENSO); no entanto, o ano de 2010/2011 pode ser considerado como um ano atípico, com total anual de chuva muito superior à média e com elevada concentração de chuvas; nesta condição a Mata Atlântica desempenhou papel relevante na redução do impacto de chuvas intensas pela interceptação, com aumento do tempo de oportunidade para infiltração e aumento do armazenamento;

- e) o final do ano hidrológico 2010/2011 foi marcado por influência importante do fenômeno La-Niña, com um período seco prolongado, com elevada demanda atmosférica e redução substancial do deflúvio, apontando para uma situação na qual a presença da Mata Atlântica pode afetar negativamente o armazenamento de água na MBMA devido ao aumento de transpiração das plantas, as quais podem afetar o estoque de água armazenada na microbacia.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, 2005.

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. **Revista Árvore**, viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.

ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1745-1757, 2011.

ARAÚJO, A. R. **Solos da Bacia do Alto Rio Grande (MG)**: base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola. 2006. 345 p. Tese (Doutorado em solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Padrão espaço-temporal da umidade volumétrica do solo em uma bacia hidrográfica com predominância de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, Oct. 2011.

BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, Amsterdam, v. 79, p. 49-59, 2009.

BONELL, M. et al. The impact of forest use and reforestation on soil hydraulic conductivity in the Western Ghats of India: implications for surface and sub-surface hydrology. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 391, p. 47-62, 2010.

BRUIJNZEEL, L. A. et al. Tropical montane cloud forests: state of knowledge and sustainability perspectives in a changing world. In: BRUIJNZEEL, L. A.; SCATENA, F. N.; HAMILTON, L. S. (Ed.). **Tropical montane cloud forests: science for conservation and management**. Cambridge : Cambridge University, 2010. p. 691-700.

DE PAULA, G. M. et al. Influência do fenômeno El-Niño na erosividade das chuvas na região de Santa Maria (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 1315-1323, 2010.

FLEISCHBEIN, K. et al. Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, p. 1355-1371, 2005.

FLEISCHBEIN, K. et al. Water budgets of three small catchments under montane forest in Ecuador: experimental and modeling approach. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 20, p. 2491-2507, 2006.

GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I. G. Atlantic forest hotspot status: an overview. In: GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I. G. (Ed.). **The atlantic forest of South America**. Washington: Center for Applied Biodiversity Science, 2003. p. 3-11.

HÜMANN, M. et al. Identification of runoff processes – the impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 409, p. 637-649, 2011.

INFOCLIMA. 2011a. Disponível em: <www.cptec.inpe.br/infoclima>. Acesso em: 21 out. 2011.

INFOCLIMA. 2011b. Disponível em: <www.cptec.inpe.br/infoclima>. Acesso em 21 out. 2011.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. et al. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 914-922, 2008.

KUMAGAI, T. et al. Annual water balance and seasonality of evapotranspiration in a Bornean tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 128, p. 81-92, 2005.

MELLO, C. R. et al. Continuidade espacial de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 532-539, 2008.

MELLO, C. R. et al. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, Amsterdam, v. 75, p. 235-247, 2008.

MELLO, C. R. et al. Estimativa da capacidade de campo baseado no ponto de inflexão da curva característica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, p. 837-841, 2002.

MELLO, C. R. et al. Spatial distribution of top soil water content in an experimental catchment of Southeast Brazil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, p. 285-294, 2011.

MENEZES, M. D. et al. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha – Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 82, v. 37, p. 175-184, 2009.

MENEZES, M. D. **Levantamento pedológico de hortos florestais e mapeamento digital de atributos físicos do solo para estudos hidrológicos**. 2011. 190 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

MUÑOZ-VILLERS, L. E. et al. Water balance of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, 2011. Disponível em: <<http://www.mendeley.com/research/water-balances-oldgrowth-regenerating-montane-cloud-forests-central-veracruz-mexico/>>. Acesso em: 22 set. 2011.

NÓBREGA, M. T. et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 15, p. 585-595, 2011.

OLIVEIRA, A. S. **Dinâmica do escoamento em nascentes na região do Alto Rio Grande, MG**. 2011. 130 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

OLIVEIRA FILHO, A. T. et al. Definição e delimitação de domínios e subdomínios das paisagens naturais do estado de Minas Gerais. In: SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T. (Ed.). **Mapeamento e inventário da flora e dos reflorestamentos de Minas Gerais**. Lavras: UFLA, 2006. cap. 1, p. 21-35.

PEREIRA, D. R. et al. Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of Atlantic Forest in Mantiqueira Range Region, MG. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 32-40, 2010.

PRICE, K. Effects of watershed topography, soils, land use and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review. **Progress in Physical Geography**, 2011. Disponível em: <<http://ppg.sagepub.com/content/35/4/465.abstract>>. Acesso em: 11 out. 2011.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 25, p. 185-204, 2010.

ROA-GARCIA, M. C. et al. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. **Water Resources Research**, Washington, v. 47, p. 12, 2011.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation from Amazonian Forest. **Proceedings of the Royal Society**, Edinburgh, v. 233, p. 321-346, 1988.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: MAIDMENT, D. R. (Ed.). **Handbook of Hydrology**. New York: McGraw-Hill Inc, 1992. cap.4, p.1-53, 1992.

SILVA, A. M.; MELLO, C. R. **Pesquisa sobre as interações entre o regime pluvial e o regime de escoamento das sub-bacias de drenagem para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG**. 2011. 350 p. Relatório Final de Atividades do Projeto de P&D 176. Não publicado.

TOMASELLA, J. et al. The droughts of 1996-1997 and 2004-2005 in Amazonia: hydrological response in the river main-stem. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 25, p. 1228-1242, 2011.

TOMASELLA, J. et al. The water balance of an Amazonian micro-catchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behavior. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 22, p. 2133-2147, 2008.

ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H.; MORAES, J.M. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 222, p. 29-38, 2006

YANAGI, S. N. M.; MELLO, C. R. **Aplicação de séries temporais para identificação de tendências climáticas em regiões do sul de Minas Gerais**. 2011. 51p. Relatório Final de Pesquisa - FAPEMIG. Não publicado.

CAPÍTULO 3

Partição da precipitação pluvial em uma microbacia hidrográfica ocupada por Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira, MG

RESUMO

O conhecimento da dinâmica dos processos eco-fisiológicos da Mata Atlântica no contexto de bacias hidrográficas é extremamente importante devido à sua biodiversidade e complexidade, além da relação direta com o ciclo hidrológico. Devido à sua heterogeneidade, aliada à variabilidade espaço-temporal da precipitação, tornam-se fundamentais mecanismos que permitam a descrição bem como a interligação dos componentes do balanço hídrico nesse ambiente. Nesse sentido, este estudo foi realizado com o objetivo de analisar a partição da precipitação pluvial em uma microbacia hidrográfica inteiramente ocupada por um remanescente de Mata Atlântica, durante os anos hidrológicos de 2009-2010 e de 2010-2011, correlacionando-a com a evolução sazonal dos ecossistemas, identificada pela aplicação das diferenças dos índices de vegetação por diferença normalizada (IVDN). Constatou-se que não houve correlação positiva entre a capacidade de armazenamento de água do dossel da Mata Atlântica com a regeneração vegetal sinalizada pelo IVDN. Observou-se também maior percentual da precipitação interna da Mata Atlântica em períodos de menor índice pluviométrico, com maior variabilidade espacial da precipitação interna em períodos com maiores totais precipitados. Pode-se também concluir que a técnica de , utilizando os valores de IVDN como variável secundária, apresentou melhores resultados no estudo da distribuição espacial da precipitação interna na condição de Mata Atlântica.

Palavras-chave: IVDN. Interceptação. Precipitação pluvial. Krigagem. Mata Atlântica. Dossel.

ABSTRACT

The knowledge of the Atlantic Forest eco-physiologic processes dynamic, in the context of watersheds is fundamental because of its biodiversity and complexity beyond direct relation with the hydrological cycle. Due to heterogeneity of Atlantic Forest the temporal and spatial variability of pluvial precipitation regime, the study of mechanisms that allow describing and linking the hydrological cycle elements are very important. This way, the objective of this study was to analyze the partitioning of pluvial precipitation at a micro-catchment entirely occupied by Atlantic Forest remnant during the 2009/2010 and 2010/2011 hydrologic years, relating it with the seasonal evolution of this ecosystem which was monitored by application of normalized difference vegetation indexes (NDVI). It was verified that there was not positive correlation between the canopy storage capacity of Atlantic Forest with vegetative regeneration which was taken from the NDVI values. We also observed greater percentage of internal pluvial precipitation of the Atlantic Forest during the periods with less rainfall, however, greater spatial distribution was observed in rainy periods. We can conclude that the co-kriging technique, using NDVI values as the secondary variable, presented better results in the study of spatial distribution of internal pluvial precipitation under Atlantic Forest of Mantiqueira features.

Keywords: NDVI. Interception. Pluvial precipitation. Kriging. Atlantic Forest. Canopy.

1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas florestais atuam de forma significativa no ciclo hidrológico, uma vez que interferem diretamente na redistribuição da precipitação, intervindo na parcela de água que contribui para a recarga dos aquíferos bem como na parcela que retorna para a atmosfera.

Dentre os ecossistemas florestais, a floresta nativa é o que atua de forma mais expressiva no balanço hídrico devido à sua biodiversidade, complexidade do sistema e a própria dinâmica das comunidades dos fragmentos. Estes fatores desempenham significativa importância, principalmente na interação com o ciclo hidrológico.

Segundo Grip, Fritsch e Bruijnzeel (2004), estudos visando analisar os efeitos ocasionados pela conversão de florestas nativas por pastagem revelaram importantes mudanças no ciclo hidrológico. As principais mudanças constatadas foram alteração da magnitude dos valores da parcela interceptada e da evapotranspiração da superfície florestal (DIETZ et al., 2006). De acordo com Díaz e Armesto (2007), alterações na floresta nativa podem ocasionar mudanças nas características climáticas locais, alterando o processo de transferência de água para atmosfera. Li et al. (2009), estudando a sensibilidade hidrológica do solo em uma região no Oeste da África, observaram que o desmatamento total da área com florestas tropicais aumentou a taxa de escoamento superficial de 0,15% a 0,44%.

No contexto hidrológico, dentre as importâncias que a floresta nativa desempenha, destacam-se: a formação de novas massas atmosféricas úmidas através das perdas por interceptação pelo dossel florestal, a qual contribui para o processo de precipitação; a influência positiva sobre a hidrologia do solo, proporcionada pela cobertura florestal, melhorando os processos de infiltração, percolação e armazenamento da água; participação da vegetação herbácea e da

matéria orgânica que recobre a superfície do solo, atuando na dissipação da energia cinética das gotas das chuvas, com redução do processo de erosivo e atenuação das vazões máximas. Além destes aspectos, a floresta nativa exerce importante papel no contexto ambiental, uma vez que reduz os efeitos prejudiciais ao meio ambiente, como alteração da qualidade da água e eutrofização dos rios, dentre outros (PINTO, 2011).

Segundo Díaz, Bigelow e Armesto (2007), o balanço hídrico em bacias hidrográficas constituídas por florestas nativas sofre grande influência em função da complexa estrutura das árvores, como porte elevado, densidade do dossel e fisionomia da planta. Entre os componentes do balanço hídrico de bacias hidrográficas constituídas por florestas nativas, a precipitação é considerada o principal elemento de equilíbrio (HERBST et al., 2006).

Neste contexto, do total precipitado em florestas nativas, uma parcela significativa é interceptada pelo dossel florestal e, posteriormente, devolvida à atmosfera por evaporação (HOLDER, 2004). Outra parcela atinge a superfície do solo, a qual é denominada de precipitação efetiva (DÍAZ; ARMESTO, 2007).

A precipitação efetiva corresponde ao somatório da precipitação interna e do escoamento no tronco. A precipitação interna refere-se à chuva que atinge o piso florestal, incluindo a chuva que passa diretamente sobre os interstícios das copas das árvores, bem como a chuva que é liberada pelo dossel florestal. Já o escoamento pelo tronco corresponde à parcela da chuva que é retida temporariamente pelo dossel florestal somada à parcela que atinge e escoo diretamente pelos troncos das árvores (ARCOVA; CICCO; ROCHA, 2003).

Assim, o conhecimento da partição da precipitação, ou seja, da magnitude dos valores de interceptação, precipitação interna e escoamento pelo tronco é imprescindível para a determinação do balanço hídrico em bacias hidrográficas constituídas por florestas nativas.

O particionamento da precipitação em florestas nativas tem sido amplamente estudado (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; DIETZ et al., 2006; HERBST et al., 2007; LEVIA; FROST, 2006; STAELENS et al., 2006, 2008). Entretanto, devido a heterogeneidade dos ecossistemas florestais, a comparação dos aspectos relacionados à influência da estrutura do dossel florestal sobre o partição da precipitação é relativamente complexa (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; GERRITS; PFISTER; SAVENIJE, 2010; ROBSON et al., 1994; WHELAN et al., 1998). De modo geral, os fatores que influenciam na partição da precipitação em ecossistemas florestais estão relacionados às condições meteorológicas e biológicas (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000).

As condições meteorológicas correspondem ao volume, à intensidade e à duração das chuvas, à taxa de evaporação, à velocidade do vento e ao intervalo entre os eventos (AUSSENAC, 1970; CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; GASH, 1979). As condições biológicas referem-se a todas as características relacionadas às florestas, como arquitetura das plantas, estrutura e densidade do dossel, composição e heterogeneidade da comunidade das espécies, entre outros.

Estudos revelaram que as características das chuvas (volume, intensidade e duração), bem como a velocidade e a direção do vento, podem influenciar tanto na escala espacial quanto na escala temporal na variabilidade da partição da precipitação nas florestas (LLORENS; OLIVERAS; POYATO, 2003; STAELENS et al., 2008; VRUGT; DEKKER; BOUTEN, 2003), devido especialmente, à variabilidade espaço-temporal das precipitações.

Do mesmo modo, as características das florestas influenciam na partição da precipitação devido à evolução sazonal do dossel florestal oriundo da resposta aos padrões espaço-temporal da precipitação, além da própria heterogeneidade das comunidades das espécies.

Neste aspecto, a densidade do dossel e a área foliar são considerados os principais fatores envolvidos na capacidade de armazenamento de água no dossel das florestas (GASH; LLOYD; LACHAUD, 1995; HERWITZ, 1987), o que conseqüentemente, influencia diretamente na partição da precipitação e que por sua vez, é influenciada pela variabilidade espaço-temporal das precipitações. Além destes fatores, a altura das plantas, associada à rugosidade do dossel das florestas, pode influenciar na transferência de água para a atmosfera, interferindo no processo de interceptação (CHAPPELL; BIDIN; TYCH, 2001; HÖLSCHER et al., 2004). Nesta mesma linha, a densidade e estruturas das hastes e das copas das árvores bem como a rugosidade da casca do tronco, são elementos importantes de interferência na geração de escoamento de água pelo tronco (HOISCHER et al., 2004).

Além destes aspectos mencionados, os fatores experimentais, como a distribuição dos pluviômetros, o intervalo entre as coletas e a densidade amostral, influenciam indiretamente na partição da precipitação, dificultando a análise comparativa entre os diferentes locais pesquisados (CASTRO et al., 1983). Alguns autores destacam a necessidade de um elevado do número de pluviômetros, entretanto, não existe um estudo que estabeleça uma metodologia suficientemente adequada para o monitoramento destas variáveis. Holwerda, Scatena e Bruijnzeel (2006) concluíram que são necessários cem pluviômetros fixos para se obter resultado similar ao obtido com trinta pluviômetros móveis, com nível de confiança de 95%.

Devido à relevância da dinâmica da distribuição espaço-temporal da vegetação, aliada à variabilidade espaço-temporal da precipitação, são fundamentais mecanismos que possibilitam o entendimento desses processos. Dessa forma, uma ferramenta que tem sido muito aplicada para tal finalidade é o índice de vegetação por diferença normalizada - IVDN (TUCHER, 1979), o qual

possibilita a distinção de diferentes características sazonais na fenologia da cobertura vegetal (WANG et al., 2004).

Este índice tem sido considerado como um importante método para a classificação e monitoramento da vegetação (KOGAN, 1995; LIU et al., 1994), mostrando correlação plausível com a precipitação (AL-BAKRI; SULEIMAN, 2004; NEZLIN; KOSTIANOY; LI, 2005) e com fenômenos climáticos em escala global (GURGEL; FERREIRA, 2003). Em muitos estudos tem sido utilizada esta ferramenta, correlacionando-a a variáveis hidrológicas, em especial a precipitação (AL-BAKRI; SULEIMAN, 2004; NEZLIN; KOSTIANOY; LI, 2005). Gurgel et al. (2003), estudando variabilidade anual e interanual de regiões brasileiras e o tempo de resposta do IVDN à precipitação, observaram resposta satisfatória deste índice à ocorrência de chuvas, apresentando um padrão bem definido do IVDN em relação aos períodos chuvoso e de estiagem.

O IVDN permite a correlação entre as características das florestas com a resposta espectral registrada em imagens provenientes de sensores remotos. Dessa forma, as imagens oriundas são transformadas em índices de vegetação e, posteriormente, transformadas em mapas, possibilitando a correlação a outros parâmetros físicos (como a precipitação), servindo de importantes ferramentas para a inferência de processos interligados a ecossistemas florestais.

Devido à alta diversidade dos ecossistemas do Brasil, especialmente em ambiente de Mata Atlântica, assim como a significativa variabilidade da magnitude dos valores da partição da precipitação, estudos visando o entendimento dos processos da partição da precipitação em ecossistemas florestais são extremamente relevantes no contexto do gerenciamento e monitoramento dos recursos hídricos.

Assim, o presente capítulo foi realizado com o objetivo de analisar a partição da precipitação em uma microbacia hidrográfica inteiramente ocupada

por um remanescente de Mata Atlântica, durante os anos hidrológicos de 2009-2010 e de 2010-2011, correlacionando-a com a evolução sazonal dos ecossistemas em ambiente de Mata Atlântica por meio do IVDN.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Aspectos gerais da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavrinha (BHRL) corresponde a uma área experimental que se encontra sob monitoramento hidrológico e climático desde o ano de 2006. Está inserida no Bioma de Mata Atlântica e se localiza na região sudeste do estado de Minas Gerais, na Serra da Mantiqueira, próxima à divisa com o estado do Rio de Janeiro. Situa-se entre as coordenadas 22°07'S e 22°09'S de Latitude e 44°26'W e 44°29'W de Longitude, com altitude entre 1.144 m e 1.800 m, com área de drenagem de aproximadamente 690 ha e declividade média de 35%. Segundo Yanagi e Mello (2011), seu clima com base em duas metodologias (Köppen e Thorntwaite) são, respectivamente, Cwb e Superúmido A. A temperatura média anual é de 16,0°C, com a média das mínimas de 10°C e a média das máximas de 23°C. Os totais médios anuais verificados variaram de 1.841 a 2.756 mm, com concentração média de 88,3% do total precipitado entre setembro e março. Há um período seco característico, cujo início ocorre em abril e é finalizado em agosto, em condições normais

No interior da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavrinha se encontra uma microbacia hidrográfica inteiramente ocupada por um remanescente de Mata Atlântica, a qual será referida como Microbacia Hidrográfica de Mata Atlântica (MBMA), com área aproximada de 16 ha (Figura 1). A MBMA possui altitudes variando entre 1.450 a 1.800 m e declividade média de 45%. Seus solos predominantes são os Cambissolos Háplicos, segundo Menezes et al. (2009), cuja profundidade varia de 0,70 a 1,20 m e cujo material de origem consiste de gnaisse-granito. Suas características geomorfológicas são típicas da região da Serra da Mantiqueira, ou seja, solos pouco a moderadamente profundos, caracterizados por alta concentração de matéria orgânica e relevo variando de

ondulado a forte ondulado e montanhoso (JUNQUEIRA JÚNIOR et al., 2008; MENEZES, 2011).

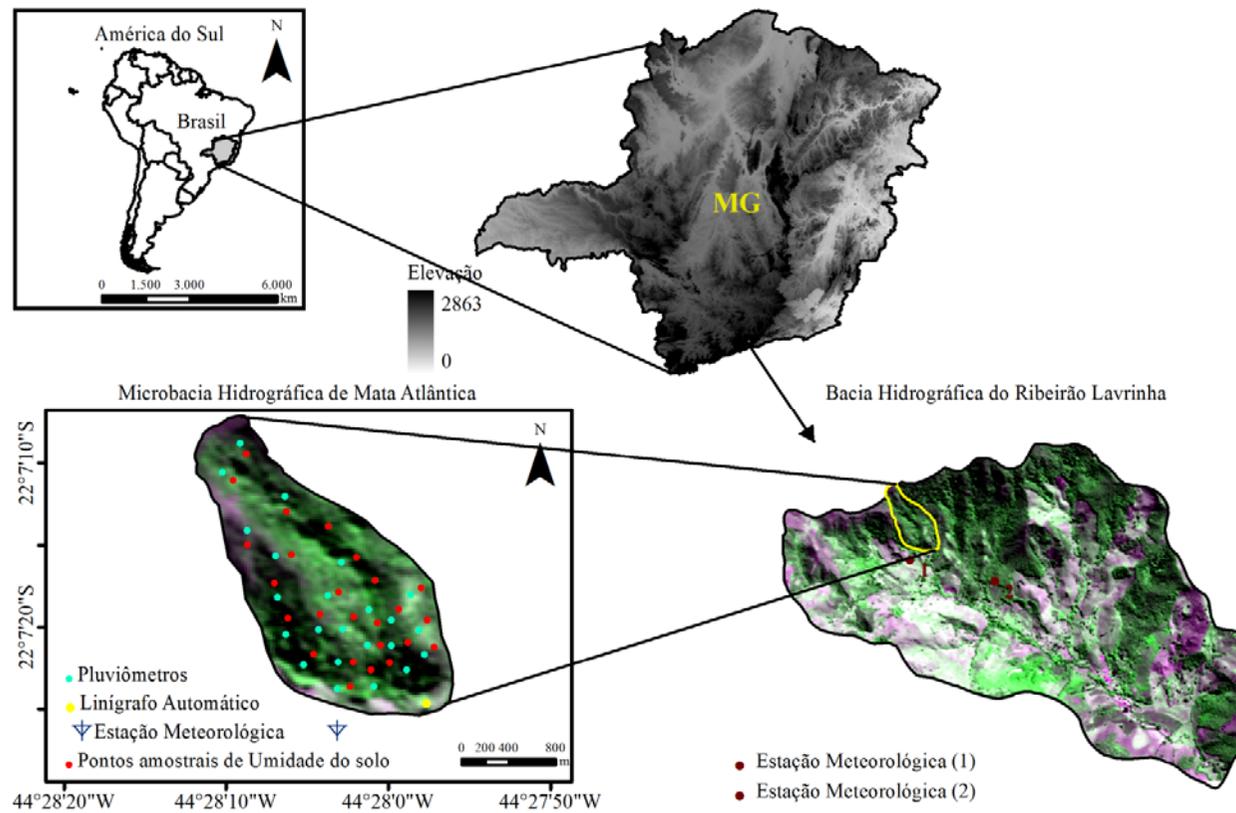


Figura 1 Localização geográfica e do instrumental usado no monitoramento na MBMA, Serra da Mantiqueira, MG

Esta microbacia se encontra recoberta por vegetação remanescente de Mata Atlântica, a qual apresenta um estrato arbóreo denso, formando um dossel que atinge em média 8,75 m de altura e diâmetro médio a 1,3 m do solo (DAP) de 9,83 cm.

A fitofisionomia predominante na área é a Floresta Ombrófila Densa, sendo esta um típico de remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira (OLIVEIRA FILHO et al., 2006), a qual é caracterizada por árvores de folhas largas, sempre verdes, de duração relativamente longa e mecanismos adaptados para resistir a períodos de elevadas temperaturas.

Na porção mais elevada e de maior declividade, encontram-se fragmentos de árvores remanescentes da vegetação primitiva, que podem alcançar mais de 10 m de altura. No restante, encontram-se fragmentos de árvores secundárias, com menor porte e com indícios de impactos antrópicos. Algumas espécies típicas da região estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 Algumas espécies florestais típicas da região da MBMA

| Nome científico | Nome popular |
|---|--------------------------|
| <i>Tibouchina fothergillae</i> (DC.) Cogn | Quaresmeira |
| <i>Myrsine umbellata</i> Mart. | Capororoca, pororoca |
| <i>Psychotria vellosiana</i> Benth. | Café-do-mato |
| <i>Clethra scabra</i> Pers. | Carne de vaca, Vassourão |
| <i>Guapira opposita</i> (Vell.) Reitz | Maria-mole, Louro-branco |
| <i>Myrcia splendens</i> (Sw.) DC. | Guamirim, Guamirim-miúdo |
| <i>Eremanthus erythropappus</i> (DC.) <i>MacLeisch</i> | Candeia |

2.2 Monitoramento da precipitação incidente (P) e precipitação interna (Pi)

Para quantificar a precipitação que atravessa o dossel vegetativo e atinge a superfície do solo (precipitação interna), foram instalados 25 pluviômetros do tipo Ville de Paris, os quais foram distribuídos no interior da Mata Atlântica, nivelados e colocados a uma altura de 1,50 m do solo (CUARTAS et al., 2007;

DIETZ et al., 2006; PYPKER et al., 2005), com distância média em torno de 50 m (Figura 2a). O período de monitoramento foi de julho de 2009 a setembro de 2011. A precipitação interna foi monitorada no início do dia subsequente de cada evento de chuva.

A precipitação que atinge o dossel da mata (precipitação incidente) foi monitorada por meio de uma estação meteorológica (Figura 2b) programada para coletar dados com intervalo de 1 hora. A estação meteorológica foi instalada nas proximidades da MBMA, à distância de 30 m da área experimental.



Figura 2 Pluviômetro (a) e estação meteorológica (b) empregados para o monitoramento da precipitação incidente e precipitação interna na MBMA

Apesar de o escoamento pelo tronco apresentar relativa importância no ciclo hidrológico como forma eficiente de água no solo, este elemento não foi considerado neste estudo, uma vez que o objetivo foi o de analisar a interação entre as precipitações incidente e interna, considerando as variações sazonais da precipitação no ano hidrológico.

Para analisar a capacidade de armazenamento de água do dossel florestal, procedeu-se à individualização dos eventos isolados, admitindo um

intervalo entre eles de, no mínimo, 24 horas (DAVID et al., 2002) e precipitação incidente de 1,5 a 20 mm. Dessa forma, garante-se que o dossel florestal encontrava-se relativamente seco e próximo à sua capacidade máxima de armazenamento (ROGERSON, 1967; VALENTE, 1999; VALENTE; DAVID; GASH, 1997). Após a individualização das precipitações, ajustou-se uma regressão linear simples entre a precipitação incidente (P) e a precipitação interna (P_i), considerando-se os eventos obtidos nos dois anos hidrológicos monitorados, bem como a variação sazonal em cada um destes anos. A capacidade máxima de armazenamento do dossel consiste no valor de P, quando P_i for igual a zero (CUARTAS, 2008).

2.3 Índice de vegetação por diferença normalizada da Mata Atlântica (IVDN)

Visando analisar as variações sazonais da vegetação de Mata Atlântica em resposta à variabilidade espaço-temporal da precipitação, o índice de vegetação por diferença normalizada foi utilizado, considerando os períodos seco e chuvoso para os dois anos hidrológicos monitorados.

O IVDN é um indicador básico de alterações na vegetação ao longo do espaço e do tempo (MENG et al. 2009) e tem sido amplamente empregado para descrição do índice de área foliar (TUCKER, 1979), quantificação da biomassa da floresta (SELLERS, 1993), dentre outros. Portanto, o IVDN indica as mudanças da fenologia da vegetação oriundas das variações sazonais da precipitação. Dessa maneira, durante períodos de regeneração vegetal, são registrados maiores valores de IVDN. Em contrapartida, períodos de perda vegetal apresentam menores valores de IVDN (CHAPIN; MATSON; MOONEY, 2002; HUXMAN et al., 2004; SCHUUR, 2003). Este comportamento ocorre devido à sensibilidade do IVDN à presença da vegetação,

pois a vegetação sadia reduz a resposta no vermelho, devido à absorção por clorofila e aumenta a resposta no infravermelho próximo, devido ao espalhamento pelos tecidos da folha (TUCKER; SELLERS, 1986). Dessa forma, alvos diferentes de vegetação (água, solo exposto, etc.) são facilmente distinguíveis devido às suas assinaturas espectrais características. Segundo Baret e Guyot (1991), o IVDN aumenta o contraste entre solo e vegetação e minimiza os efeitos das condições de iluminação, no entanto, é sensível às propriedades ópticas do solo.

Os valores de IVDN podem variar entre -1 e +1. Assim, em superfícies com vegetação existente, o IVDN varia de 0 (escassez de vegetação) a 1 (totalmente ou parcialmente vegetada). Para água e nuvens, o IVDN é menor que zero.

Para esta análise foram utilizadas imagens disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2011). O sensor utilizado foi o TM (Thematic Map) do satélite LANDSAT 5. Neste sensor as bandas de número 4 e 3 correspondem respectivamente ao espectro infravermelho próximo e vermelho. A cena que abrange a MBMA é a 218/75.

Foram utilizadas 6 imagens de satélite correspondentes às seguintes épocas: 24/04/09, 30/08/09, 27/04/10, 01/08/10, 14/04/11 e 04/08/11. Para escolha das épocas das imagens, considerou-se a ausência de nuvens e a inexistência de sombra. Além disso, procurou-se adquirir imagens de períodos próximos à mesma época do ano, uma vez que períodos chuvosos e de estiagem alteram sensivelmente o IVDN da cobertura vegetal.

Assim, após a aquisição das imagens, foi realizado o recorte na região de interesse, delimitando a MBMA. Em seguida, fez-se a transformação do número digital do pixel em radiância espectral. Para tanto, se utilizou a equação a seguir, proposta por Chander e Markham (2007):

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{MAX_{\lambda}} - L_{MIN_{\lambda}}}{255} \right) \times Q_{cal} + L_{MIN_{\lambda}} \quad (1)$$

em que L_{λ} = radiância espectral na banda, em $W/(m2.sr.\mu m)$; L_{MAX} = radiância espectral máxima na banda, em $W/(m2.sr.\mu m)$; L_{MIN} = radiância espectral mínima na banda, em $W/(m2.sr.\mu m)$ e Q_{cal} = intensidade do pixel, adimensional. Os resultados de L_{MAX} e L_{MIN} são fornecidos por Chander e Markham (2007).

A partir da reflectância espectral, calculou-se a reflectância aparente, a qual corresponde à taxa de radiação que foi captada pelo satélite em relação à radiação incidida no topo da troposfera, a partir da equação 1, adaptada por Chander e Markham (2003) e Folhes (2007).

Em seguida, calculou-se o IVDN por meio da razão entre a diferença da reflectância do infravermelho próximo (ρ_4) e a do vermelho (ρ_3), normalizada pela soma de ambas (ALLEN et al., 2002), para as 6 imagens adquiridas:

$$IVDN = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (2)$$

em que ρ_4 e ρ_3 correspondem, respectivamente, às reflectâncias das bandas 4 e 3 do sensor TM Landsat 5.

Após determinação do IVDN, calculou-se a variação de IVDN, pixel a pixel, das imagens, considerando o período seco e o chuvoso dois anos hidrológicos. Assim, para a variação de IVDN para o ano hidrológico 09/10 foi considerado: período chuvoso, diferença entre as imagens de 27/04/10 e 24/04/09 e período seco, diferença entre as imagens de 01/08/10 e 30/08/09. Do mesmo modo, para o ano hidrológico 10/11, consideraram-se: período chuvoso, diferença entre 14/04/11 e 27/04/10 e período seco, diferença entre 04/08/11 e

01/08/10. Assim, os produtos desta análise resultaram em quatro imagens, correspondendo aos períodos chuvoso e seco de cada ano hidrológico.

Para análise da variação de IDVN, as imagens foram classificadas em função da média e desvio padrão dos valores da diferença de IDVN, visando obter um índice que sinalize a perda e a regeneração vegetal. Assim, dividiram-se em três classes, tendo a classe inferior correspondido à média subtraída do desvio padrão da diferença de IDVN, a qual sinaliza uma possível perda vegetal. A classe superior correspondeu à média somada ao desvio padrão, sinalizando, por sua vez, uma possível regeneração da vegetação.

Neste aspecto, a classe inferior, a qual indica sensível perda vegetal, foi simbolizada com tonalidade de vermelho, enquanto a classe superior, indicando sensível regeneração, com tonalidade verde.

2.4 Mapeamento da distribuição espacial da precipitação interna na MBMA

Visando analisar a distribuição espacial da precipitação interna na MBMA, procedeu-se à totalização dos dados mensais e, posteriormente, à geração dos mapas de precipitação interna para os dois anos hidrológicos, por meio do interpolador geoestatístico (krigagem).

O modelo de semivariograma escolhido para a interpolação foi o modelo exponencial, o qual tem apresentado bom desempenho para estudos da distribuição espacial da precipitação (ÁVILA; MELLO; VIOLA, 2009; BUYTAERT et al., 2006; DANFA et al., 2010; MELLO et al., 2008).

No intuito de melhorar a precisão da estimativa e as interações da distribuição da precipitação interna com a dinâmica dos processos ecofisiológicos dos ecossistemas, utilizou-se o interpolador geoestatístico co-krigagem, considerando-se como variável primária a precipitação interna e, como secundária, as diferenças de IDVN. A co-krigagem difere da krigagem

ordinária por aplicar informações auxiliares para a estimativa de uma ou mais variáveis de interesse, utilizando informações de diversas variáveis, incorporando no processo de interpolação tanto a correlação espacial quanto a correlação entre as variáveis. Assim, ambas as variáveis são espacialmente correlacionadas para estimativa da variável de interesse (WEBSTER; OLIVER, 2001), visando à acurácia da previsão.

Esse procedimento de combinação de variáveis auxiliares tem sido sugerido para a melhoria da acurácia da estimativa (WEBSTER; OLIVER, 2001), especialmente no contexto de ecossistemas florestais. Nesse sentido, Mutanga e Rugege (2006) obtiveram sucesso no mapeamento da biomassa florestal. Sales et al. (2007), correlacionando o modelo digital de elevação, os mapas do tipo e textura do solo, observaram melhoria na precisão da estimativa da biomassa florestal, enquanto Hernández-Stefanoni, Dupuy e Castillo-Santiago (2009) avaliaram a distribuição espacial da densidade e a composição das espécies e notaram resultados favoráveis.

Para a geração dos mapas de precipitação interna com base em ambos os interpoladores geoestatísticos, bem como a análise das diferenças do índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN), utilizaram-se os aplicativos ArcMap, ArcCatalog e ArcToolbox, do software ArcGIS Desktop 9.2 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI, 2004).

2.5 Análise do desempenho dos interpoladores geoestatísticos

O desempenho dos diferentes métodos de interpolação (krigagem e) foi avaliado por meio da validação cruzada (Isaaks e Srivastava, 1989). Esse procedimento consiste na retirada temporária de uma observação do conjunto de dados. Esta observação é estimada pelo restante das informações, produzindo um conjunto de dados contendo valores observados e estimados pelos

interpoladores geoestatísticos, possibilitando, assim, a comparação entre o valor estimado e o real e, conseqüentemente, o erro produzido pelo interpolador.

Assim, a comparação do desempenho dos interpoladores ficou condicionada ao erro médio reduzido (ER) e ao desvio padrão do erro reduzido (S_{ER}), considerando-se o melhor interpolador aquele que apresentou menor ER e S_{ER} mais próximo de 1 (CRESSIE, 1993; MELLO, 2004). De acordo com Cressie (1993) e McBratney e Webster (1986), o ER é definido como:

$$ER = \frac{1}{n} \times \frac{\left(Z_{xi} - \hat{Z}_{xi} \right)}{\hat{\sigma}(Z_{xi})} \quad (3)$$

em que n é o número de dados, Z_{xi} é o valor observado no ponto i ; \hat{Z}_{xi} é o valor predito por krigagem no ponto i e $\hat{\sigma}(Z_{xi})$ é o desvio padrão da krigagem no ponto i , ambos sem considerar a observação $Z(x_i)$.

O desvio padrão do erro reduzido foi obtido por meio da seguinte expressão:

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\left| Z_{xi} - \hat{Z}_{xi} \right|}{\hat{\sigma}(Z_{xi})}} \quad (4)$$

A magnitude do erro de estimativa produzido pelo interpolador foi quantificada por meio do erro médio (EM), o qual pode ser expresso como:

$$EM(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z_{xi} - \hat{Z}_{xi}|}{Z_{xi}} \times 100 \quad (5)$$

Objetivando avaliar a propensão da estimativa, foi determinada a tendência do estimador (TE), sendo esse parâmetro um indicativo da predição e $TE > 0$: tendência de superestimativa da predição e $TE < 0$: tendência de subestimativa da predição. A tendência do estimador é expressa por:

$$TE(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{Z}_{xi} - Z_{xi})}{Z_{xi}} \times 100 \quad (6)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Padrão da precipitação incidente e da precipitação interna na MBMA

Ao longo do período monitorado (outubro de 2009 a setembro de 2011), foram registrados 4.949 mm de precipitação. O total registrado foi distribuído em 285 eventos, com grande amplitude de variação, sem nenhuma ocorrência no mês de agosto de 2010 e um total mensal de 928 mm, em janeiro de 2011.

A precipitação interna total no respectivo período foi de 3.923 mm, correspondendo a 79% da precipitação incidente total. Segundo Oliveira et al. (2008), para florestas tropicais, as variações da precipitação interna estão entre 75% e 96% da precipitação total incidente acima do dossel. Oliveira Júnior e Dias (2005), avaliando a precipitação em um fragmento secundário de Mata Atlântica, constataram que o percentual de precipitação interna foi de 80% da precipitação incidente. Cardoso et al. (2002), trabalhando na mesma área, porém com uma menor densidade amostral, verificaram que a precipitação interna foi de 78%. Ferreira, Luizão e Dallarosa (2005) obtiveram valores entre 74,2% a 87,1%.

Como o processo de redistribuição da chuva pela floresta é influenciado pelas condições das precipitações, os dados foram analisados considerando o padrão sazonal das precipitações. Dessa forma, os mesmos foram comparados considerando o período chuvoso (outubro a março) e o de estiagem (abril a setembro) dos anos hidrológicos 09/10 (período entre o mês de outubro de 2009 a setembro de 2010) e 10/11 (período entre o mês de outubro de 2010 a setembro de 2011).

No Gráfico 1 apresenta-se a distribuição mensal da precipitação incidente e da precipitação interna, durante os anos hidrológicos 09/10 e 10/11. Observou-se elevada sazonalidade dos eventos, com um percentual médio de

91% para o período chuvoso (outubro a março) e 9% para o período seco (abril a setembro) da precipitação total anual referente aos dois anos hidrológicos.

Percebe-se também semelhança no padrão do comportamento da precipitação incidente e da precipitação interna, mostrando um crescimento proporcional nos meses que caracterizam a estação chuvosa. Contudo, no período chuvoso do ano hidrológico 10/11, não houve o mesmo padrão de comportamento da precipitação interna, especialmente no início do período chuvoso (outubro de 2010) e no mês de fevereiro de 2011, quando se verifica que a parcela da precipitação interna foi significativamente maior, comparada aos respectivos meses do ano hidrológico 09/10.

Observa-se também maior magnitude nos valores de precipitação interna no período de estiagem dos dois anos hidrológicos, mostrando-se um aumento expressivo da parcela da chuva que atravessa o dossel vegetativo e atinge a superfície do solo em épocas com menor índice pluviométrico.

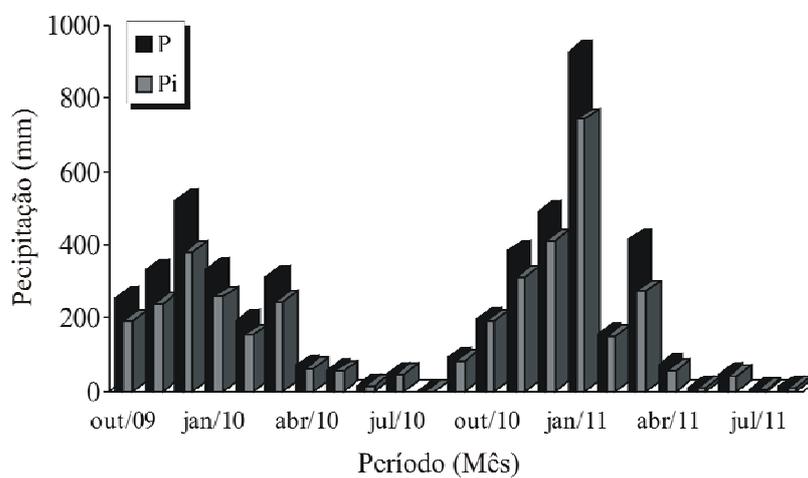


Gráfico 1 Precipitação e precipitação interna mensais, no período de outubro de 2009 a setembro de 2011

O Gráfico 2 refere-se aos valores acumulados de precipitação incidente e interna para os períodos chuvoso e seco e o total acumulado para os dois anos hidrológicos. No ano hidrológico 09/10 foi registrado um total de 2.220 mm, sendo que, deste total, 1.940 mm (87%) ocorreram no período chuvoso e 280 mm no período seco (13%). O mês de maior ocorrência foi dezembro de 2009, com 521 mm (23,5%) e o único mês em que não houve registro de precipitação, considerando todo o período monitorado, foi agosto de 2010.

A precipitação total incidente do ano hidrológico 10/11 superou em 22% ao total de 09/10, totalizando 2.728 mm. No período chuvoso, o total precipitado correspondeu a 95% do ano 10/11, com 2.568 mm. Neste aspecto, constata-se que houve maior concentração de chuvas no período chuvoso deste ano hidrológico comparado ao ano 09/10 (87%).

Vale ressaltar que o mês janeiro de 2011 foi atípico, tendo sido registrados 928 mm (34% do total precipitado no ano hidrológico 10/11), contribuindo significativamente para a concentração de chuvas neste período. Este valor está associado à atuação de fenômenos atmosféricos que controlam o regime pluvial do sudeste do Brasil, especificamente da Zona de Convergência do Atlântico Sul (INFOCLIMA, 2011). No período seco, o total precipitado foi de 160 mm (5% da precipitação incidente) e o mês com menor ocorrência foi agosto (6 mm).

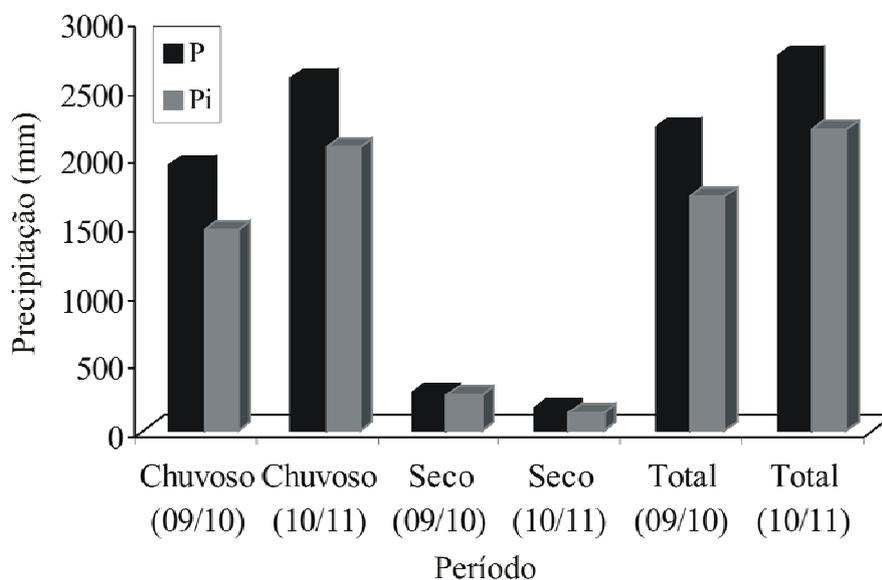


Gráfico 2 Precipitações incidente e interna acumuladas para os períodos chuvoso e de estiagem e total acumulado para cada ano hidrológico

De acordo com os dados analisados, constata-se que, no ano hidrológico de 09/10, a precipitação incidente total foi distribuída em 87% no período chuvoso e 13% no período de estiagem. Do percentual concentrado nos períodos chuvoso e seco, 75% e 91%, respectivamente, foram convertidos em precipitação interna. Do mesmo modo, no ano hidrológico de 10/11, dos 95% e 5% distribuídos nos períodos chuvoso e seco, 81% e 79% se converteram em precipitação interna, respectivamente.

Nesse sentido, constata-se que o total de precipitação incidente no período seco (280 mm) do ano hidrológico de 09/10 foi consideravelmente maior que o total no período seco (160 mm) do ano hidrológico de 10/11, com diferença em torno de 75%. Verifica-se também maior parcela convertida da

precipitação incidente no período seco do ano hidrológico 09/10, comparado ao ano hidrológico 10/11, em torno de 12%.

No período chuvoso, verificou-se menor diferença entre os valores totais de precipitação incidente entre os dois anos hidrológicos em relação ao período seco, com 1.940 mm e 2.568 mm, nos anos hidrológicos 09/10 e 10/11, respectivamente, com uma diferença de aproximadamente 32%. Além disso, nota-se que a parcela convertida da precipitação incidente no período chuvoso do ano hidrológico 10/11 foi consideravelmente menor (6%) que a do mesmo período do ano hidrológico 09/10.

De acordo com os resultados, observa-se maior variabilidade da parcela de precipitação incidente convertida em precipitação interna no período seco comparada ao período chuvoso, entre os dois anos hidrológicos. Este comportamento sinaliza a ocorrência de maior variabilidade da magnitude dos valores de precipitação interna na estação seca. Nesse sentido, constata-se que houve diferenças significativas no padrão da precipitação interna em relação ao regime sazonal das precipitações, em termos de dimensão da parcela convertida em precipitação interna e em função da dispersão da magnitude dos valores.

3.2 Capacidade de armazenamento de água do dossel vegetativo da Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira, MG

No Gráfico 3 estão apresentados os modelos lineares ajustados aos totais mensais de precipitação incidente e interna, considerando todo período monitorado (ano hidrológico 09/10 e 10/11) e, considerando os totais mensais correspondentes ao períodos chuvoso e seco dos dois anos hidrológicos em conjunto. O ajuste dos modelos apresentou alta correlação entre a precipitação incidente e a precipitação interna, podendo-se inferir que a precipitação interna pode ser explicada pela precipitação incidente. Assim, com base nas regressões

ajustadas, obteve-se a capacidade de armazenamento de água pelo dossel florestal, isto é, a quantidade de água armazenada pelo dossel antes de atingir a saturação.

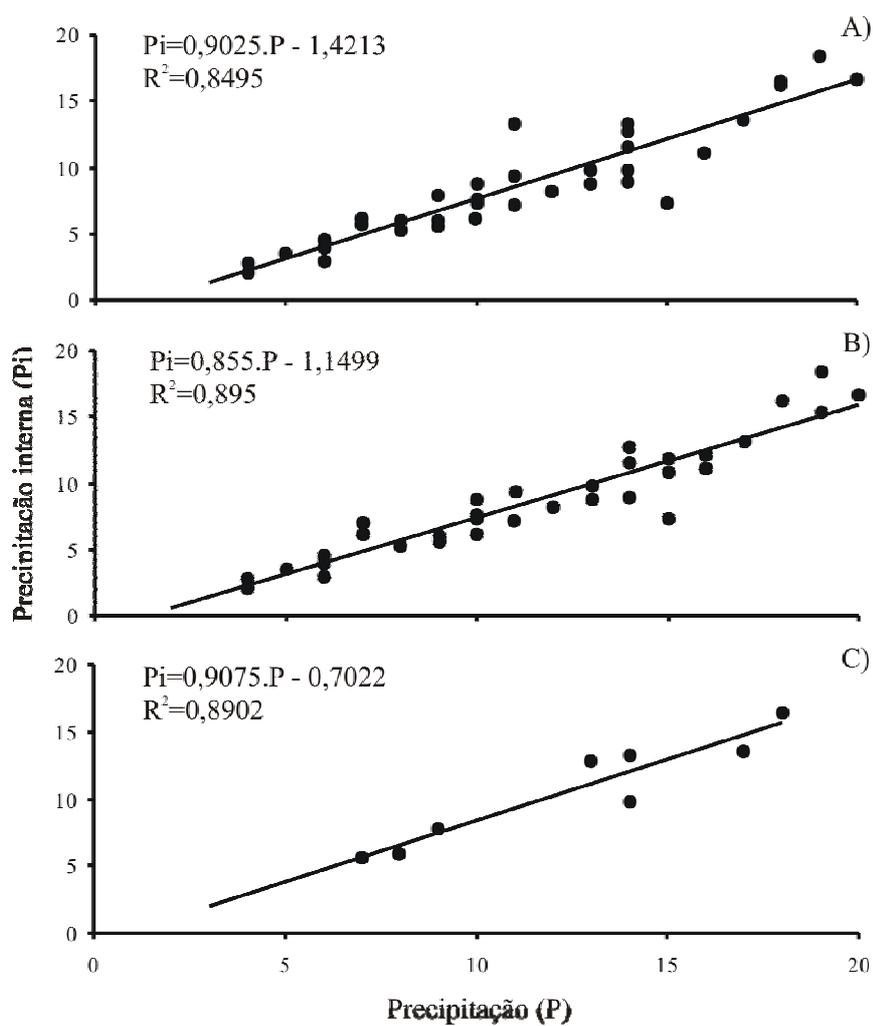


Gráfico 3 Modelo linear ajustado aos dados de precipitação incidente e interna considerando todo período monitorado (A), o período úmido (B) e o período seco (C), para os dois anos hidrológicos

Com base na equação linear apresentada no Gráfico 3a, correspondente ao ajuste dos dados de precipitação incidente e interna de toda série histórica monitorada, constatou-se que precipitações inferiores a 1,58 mm são totalmente interceptadas pelo dossel da floresta e, posteriormente, transferidos para a atmosfera por evaporação. Oliveira Júnior e Dias (2005) verificaram que a capacidade de retenção de água das copas de um fragmento secundário de Mata Atlântica foi de 1,3 mm. Lima e Leopoldo (2000) encontram valores de 1,4 mm para matas ciliares, enquanto Oliveira et al. (2008) estimaram valores de 1,6 mm para uma floresta tropical da Amazônia.

Por outro lado, quando se ajustou os dados separadamente em função do período chuvoso (b) e seco (c), para os anos hidrológicos em conjunto (Gráfico 3b e 3c), observaram-se alterações significativas da quantidade de água armazenada pelo dossel vegetativo. Assim, nos períodos chuvoso e seco, a capacidade de armazenamento do dossel foi de 1,35 (Gráfico 3b) e 0,77 mm no período seco (Gráfico 3c), respectivamente.

Nota-se que a capacidade de armazenamento de água do dossel no período úmido foi significativamente maior. Esta variação do armazenamento de água do dossel em relação à estação chuvosa e seca pode estar associada aos processos ecofisiológicos da planta.

Lima (2008) relata que a capacidade de armazenamento do dossel é influenciada pela espécie e pela parte aérea da biomassa. Segundo o autor, a folha apresenta baixa capacidade de retenção de água em sua superfície, sendo, portanto, sua capacidade de armazenamento influenciada pelo seu tamanho, sua configuração e composição e pela viscosidade e pressões externas reinantes (precipitação, ventos, etc.) sobre a superfície foliar. Assim, estes fatores em conjunto provocam uma tensão superficial entre a superfície foliar e a água existente na folha, sendo, então, a retenção de água na superfície foliar regida pelo equilíbrio entre a tensão superficial e a força de gravidade. Segundo Park e

Cameron (2008), a capacidade de armazenamento de água pelo dossel é especialmente relacionada à área de superfície da folha e às variáveis similares, tais como o índice de área foliar (IAF).

Estringana et al. (2010) relatam que a capacidade de armazenamento de água da maioria das plantas deve ser determinada por variáveis que são de complexa caracterização, tais como variáveis dendrométricas, pubescência e rugosidade das folhas e ângulo de orientação do pecíolo. Em algumas espécies, a pubescência é considerada a variável que apresenta maior influência no processo da capacidade de armazenamento de água pelo dossel (LEVIA; FROST, 2006; MONSON et al., 1992; THUROW; HESTER, 1997).

Em um estudo detalhado visando à determinação da capacidade de armazenamento de água pelo dossel de nove espécies de arbustos do Mediterrâneo com diferentes características anatômicas e morfológicas, Estringana et al. (2010) observaram que os arbustos que armazenaram maior conteúdo de água por unidade de biomassa foram as espécies que apresentaram maior pubescência das folhas e dos caules. Em contrapartida, as espécies que armazenaram menor quantidade de água foram as que apresentaram menores níveis de pubescência. Além disso, os mesmos autores perceberam que as espécies que apresentaram menor capacidade de armazenamento de água foram influenciadas pela orientação das folhas. No mesmo estudo, também se constatou que a espécie que apresentou menor capacidade de armazenamento de água do dossel foi a que apresentou maior IAF.

De acordo com estas inferências, constata-se que, apesar de a capacidade de armazenamento de água do dossel da MBMA apresentar correlação com a regeneração vegetal no período úmido, as inferências apontam que a variabilidade sazonal da capacidade de armazenamento de água na Mata Atlântica pode estar associada às características fisiológicas e morfológicas da floresta não avaliadas neste estudo.

Nesse sentido, observa-se que a capacidade de armazenamento de água em ambiente de Mata Atlântica é um assunto relativamente complexo. Esta complexidade ocorre devido à interação dos processos relacionados à morfologia e à fisiologia da floresta, associados à variabilidade sazonal das precipitações. Neste aspecto, é importante destacar a relevância de estudos nesta linha de pesquisa, uma vez que permite melhor descrição e entendimento dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas constituídas por ecossistemas florestais.

3.3 Índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN) para os períodos chuvoso e seco na MBMA

Na Figura 3 estão apresentados os mapas das diferenças de IVDN reclassificados, correspondentes aos períodos chuvoso e seco de cada ano hidrológico. Assim, as classes simbolizadas em vermelho e em verde sinalizam uma possível perda e regeneração vegetal, respectivamente.

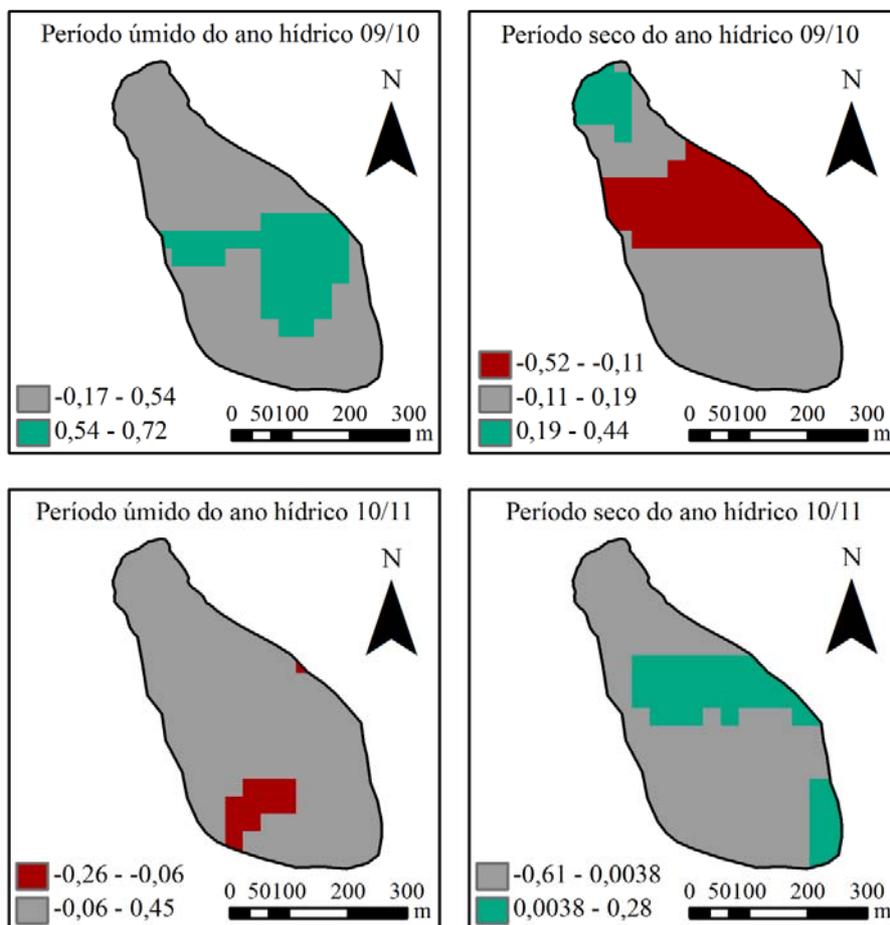


Figura 3 Diferenças do índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN) correspondente aos períodos chuvoso e seco, para os anos hidrológicos 09/10 e 10/11

Analisando-se a referida Figura, observa-se que, no período úmido do ano hidrológico de 09/10, as diferenças do IVDN sinalizaram regeneração vegetal em praticamente 15% da área, com diferenças de IVDN entre 0,54 e 0,72. No período seco há indicação de perda de vegetação (-0,52 a -0,11) em, aproximadamente, 20% na região central da MBMA e uma leve regeneração vegetal (0,19 a 0,44), em torno de 5% na face norte da bacia.

No ano hidrológico 10/11, notou-se comportamento inverso, ou seja, no período chuvoso, houve ligeira perda de vegetação (-0,26 a 0,06) numa pequena parcela da MBMA (em torno de 5%) e, no período seco, apresentou ligeira regeneração (0,0038 a 0,28) em, aproximadamente, 10% da área da floresta. Além disso, nota-se que as diferenças de IVDN atuaram de forma mais representativa no ano hidrológico de 09/10, abrangendo maior área geográfica, com maior magnitude das diferenças de IVDN. Desse modo, observa-se maior variabilidade do padrão da dinâmica temporal dos processos ecofisiológicos da floresta no ano hidrológico de 09/10. Além disso, em função das diferenças dos valores de IVDN, observam-se variações sazonais e intra-anuais dos processos ecofisiológicos da Mata Atlântica.

Correlacionando-se os dados de precipitação interna acumulados para os períodos chuvoso e seco (Gráfico 2) com as diferenças do IVDN (Figura 3), considerando-se a estação seca e úmida para ambos os anos hidrológicos, constatou-se correlação plausível entre os dados. Para os períodos nos quais as diferenças de IVDN sinalizaram maior perda da vegetação (período seco do ano hidrológico 09/10), tanto na magnitude do índice quanto na porcentagem da área florestada, o percentual de precipitação interna foi consideravelmente maior.

Este fato mostra que a parcela de precipitação incidente que é convertida em precipitação interna apresenta estritas relações com os processos ecofisiológicos responsáveis pelo crescimento da floresta. De acordo com Sprintsin et al. (2007), um dos principais fatores relacionados a esses processos é o índice de área foliar, o qual está diretamente relacionado à parcela interceptada pelo dossel, à fotossíntese da planta e à diminuição da serrapilheira.

Em função destes resultados, é possível inferir que a tendência de maior percentual de precipitação interna no período de estiagem dos dois anos hidrológicos na MBMA pode estar associada à formação florestal semidecidual da mata, caracterizada por quedas das folhas nas estações secas. As quedas das

folhas provoca a redução da área do dossel vegetativo, contribuindo para o aumento do percentual da precipitação interna.

Nesse sentido, observa-se que as diferenças de IVDN apresentaram relações diretas com os processos responsáveis pelas mudanças nos ecossistemas, mostrando o comportamento da dinâmica espacial e temporal do dossel vegetativo da Mata Atlântica ao longo dos dois anos hidrológicos monitorados.

3.4 Mapeamento da distribuição espacial da precipitação interna na MBMA por krigagem

Nas Tabelas 2 a 5 estão apresentados os resultados do erro médio reduzido (ER), desvio padrão do erro reduzido (S_{ER}), erro médio (EM) e tendência do estimar (TE), obtidos com base na validação cruzada, para a distribuição espacial da precipitação interna.

Tabela 2 ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada para o período chuvoso do ano hidrológico 09/10

| Mês | ER | S_{ER} | EM | TE (%) |
|-------|--------|----------|--------|--------|
| 10/09 | 0,037 | 0,94 | 27,05 | 7,14 |
| 11/09 | -0,006 | 0,94 | 20,64 | 5,18 |
| 12/09 | 0,006 | 0,92 | 27,77 | 9,11 |
| 01/10 | -0,027 | 0,90 | 23,60 | 7,90 |
| 02/10 | -0,050 | 1,01 | 37,06 | 15,79 |
| 03/10 | -0,061 | 1,01 | 28,24 | 10,09 |
| Média | -0,017 | 0,951 | 27,393 | 9,201 |

Tabela 3 ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada para o período seco do ano hidrológico 09/10

| Mês | ER | S _{ER} | EM | TE (%) |
|-------|--------|-----------------|--------|--------|
| 04/10 | -0,055 | 1,03 | 28,10 | 9,53 |
| 05/10 | -0,022 | 1,07 | 24,92 | 6,28 |
| 06/10 | -0,022 | 0,88 | 31,48 | 12,85 |
| 07/10 | -0,054 | 1,03 | 19,45 | 5,01 |
| 09/10 | -0,101 | 0,94 | 20,06 | 7,43 |
| Média | -0,051 | 0,990 | 24,801 | 8,220 |

No ano hidrológico 09/10, notam-se valores próximos de ER e S_{ER} nos período chuvoso e seco, com ER mais próximo de zero no período chuvoso (média de -0,017) e S_{ER} mais próximo de 1 (0,990) no período seco. Observam-se também valores médios ligeiramente inferiores de EM (27,39 mm) e TE (8,22%) no período de estiagem.

Tabela 4 ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada para o período chuvoso do ano hidrológico 10/11

| Mês | ER | S _{ER} | EM | TE (%) |
|-------|--------|-----------------|--------|--------|
| 10/10 | -0,129 | 0,96 | 13,01 | 4,06 |
| 11/10 | -0,070 | 0,94 | 11,32 | 2,60 |
| 12/10 | -0,035 | 0,93 | 16,23 | 3,71 |
| 01/11 | -0,010 | 0,97 | 20,20 | 5,16 |
| 02/11 | -0,008 | 1,05 | 28,32 | 8,86 |
| 03/11 | 0,020 | 1,00 | 27,73 | 7,89 |
| Média | -0,039 | 0,975 | 19,469 | 5,380 |

Tabela 5 ER, S_{ER} , EM e TE obtidos por validação cruzada para o período seco do ano hidrológico 10/11

| Mês | ER | S_{ER} | EM | TE (%) |
|-------|--------|----------|--------|--------|
| 04/11 | -0,001 | 0,99 | 23,89 | 5,88 |
| 05/11 | -0,003 | 0,86 | 24,17 | 7,39 |
| 06/11 | 0,019 | 0,98 | 16,11 | 2,47 |
| 07/11 | -0,040 | 0,89 | 32,74 | 13,34 |
| 08/11 | -0,030 | 0,89 | 30,27 | 10,13 |
| 09/11 | -0,042 | 0,88 | 31,59 | 11,97 |
| Média | -0,030 | 0,958 | 24,447 | 7,791 |

No ano hidrológico 10/11, observou-se comportamento oposto ao dos índices que indicam menor erro do interpolador, ou seja, valores de ER mais próximos de zero no período seco (-0,030), S_{ER} (0,975) mais próximo de 1, menores EM (19,47) e TE (5,38%) no período chuvoso.

Analisando-se os índices obtidos por validação cruzada para distribuição espacial da precipitação interna na MBMA, observa-se que o interpolador geostatístico (krigagem ordinária) produziu erros relativamente baixos. As médias máximas encontradas de EM e TE foram 27,4 mm e 9,20%. Isso permite verificar que este interpolador, uma vez aplicado no mapeamento da precipitação interna, tende a superestimar, em média, os valores observados de precipitação interna, na ordem de 9,20%.

Nas Figuras 4 a 7 apresentam-se os mapas de precipitação pluvial interna mensal correspondentes aos anos hidrológicos 09/10 e 10/11, respectivamente. Observa-se considerável distribuição espacial da precipitação interna na MBMA no ano hidrológico 09/10. Verifica-se também tendência de ocorrência de maiores valores de precipitação interna na face leste e menores na face sudeste em direção à região central da microbacia.

No período chuvoso do ano hidrológico 09/10, nota-se semelhança no padrão da distribuição da precipitação interna, com tendência de maiores

concentrações na região periférica da microbacia. No início do período chuvoso (outubro de 2009), observam-se pequenos indícios desta tendência de concentração da precipitação interna na periferia. Na medida em que ocorre intensificação da precipitação, nota-se maior evidência desta tendência, especialmente nos meses com maior ocorrência pluviométrica (dezembro, janeiro e março).

No início do período seco deste mesmo ano hidrológico (abril/10), nota-se que o padrão foi semelhante ao caracterizado no período chuvoso. A partir do mês de maio, observa-se alteração do padrão da distribuição, sendo que, no período seco, as maiores concentrações tenderam a ocorrer na direção leste - sudoeste da MBMA.

Nos primeiros meses do ano hidrológico de 10/11 (outubro e novembro), o padrão da distribuição da precipitação interna foi similar ao período seco do ano hidrológico 09/10. Os demais meses do período chuvoso do respectivo ano mostraram padrão distinto, com tendência de maiores ocorrências de precipitação interna na face norte em direção à sudeste da MBMA, especialmente os meses de maior ocorrência de precipitação (dezembro e janeiro).

No período seco do citado ano hidrológico, o padrão da distribuição espacial da precipitação pluvial interna foi similar ao período seco do ano hidrológico 09/10. Entretanto, os mapas, neste período, caracterizaram a região com maiores valores de precipitação com maior definição, resultando em mapas mais homogêneos. Os meses de abril e junho, nos quais ocorreram maior total precipitado, os resultados mostraram maior heterogeneidade da distribuição da precipitação interna. Observa-se também que, neste período (período seco 10/11), o total precipitado foi consideravelmente menor que o monitorado durante o período seco 09/10. Neste aspecto, constata-se que, nos meses com menor precipitação pluvial, os mapas resultaram em regiões mais definidas,

evidenciando com maior expressividade o comportamento da distribuição da precipitação interna na MBMA.

Em face das análises dos mapas, observa-se maior variabilidade da distribuição espacial da precipitação interna na MBMA em períodos com maior total de precipitação pluvial. Observam-se também variações sazonais e intra- anuais do padrão da distribuição espacial da precipitação interna, sendo influenciado pelas estações úmidas e secas de cada ano hidrológico.

Além destes aspectos, é importante destacar que, no período de estiagem do ano 10/11 (Figura 3), o qual apresentou mapas com regiões mais definidas e homogêneas, as diferenças de IVDN sinalizaram considerável regeneração vegetal (em torno de 10% da área, com índices entre 0,0038 a 0,28). Este fato pode apresentar alguma influência na distribuição da precipitação interna, em função da correlação positiva identificada entre a precipitação interna e as diferenças de IVDN, conforme discutido anteriormente.

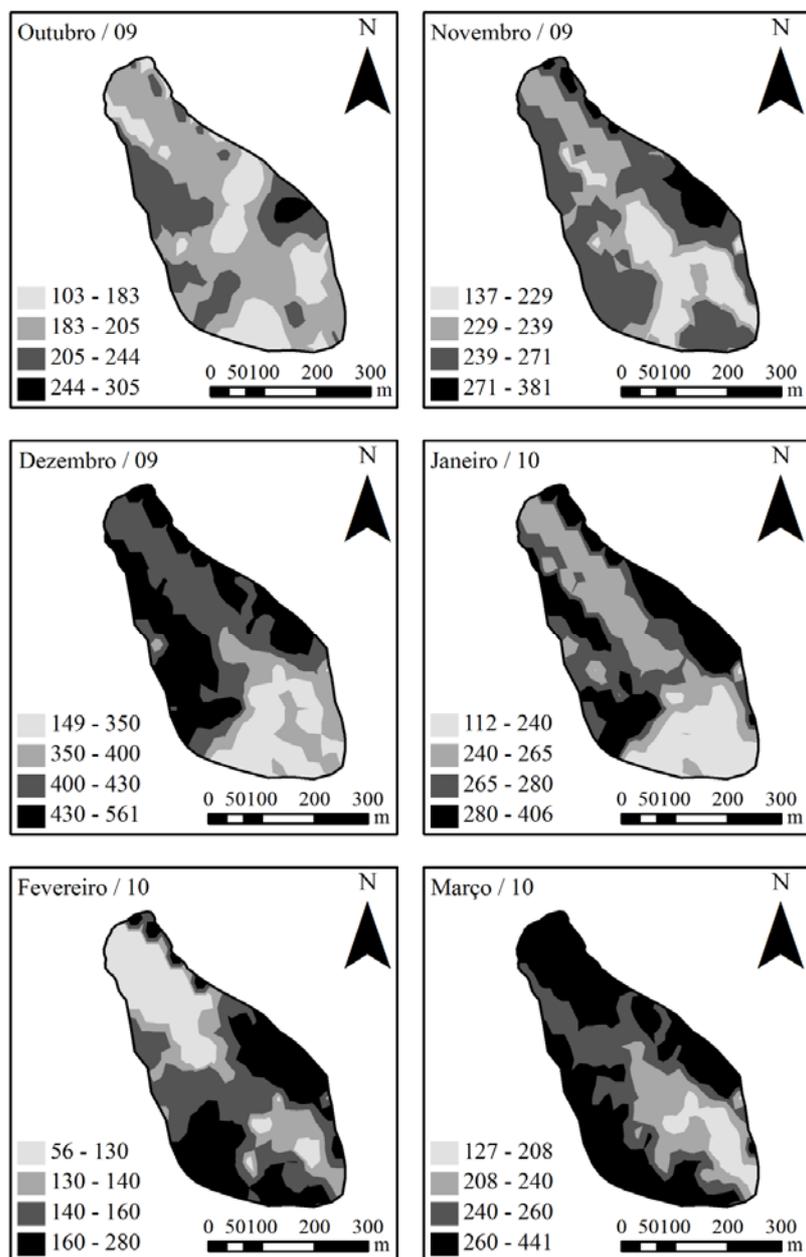


Figura 4 Distribuição espacial da precipitação interna mensal, correspondente ao período chuvoso do ano hidrológico de 09/10

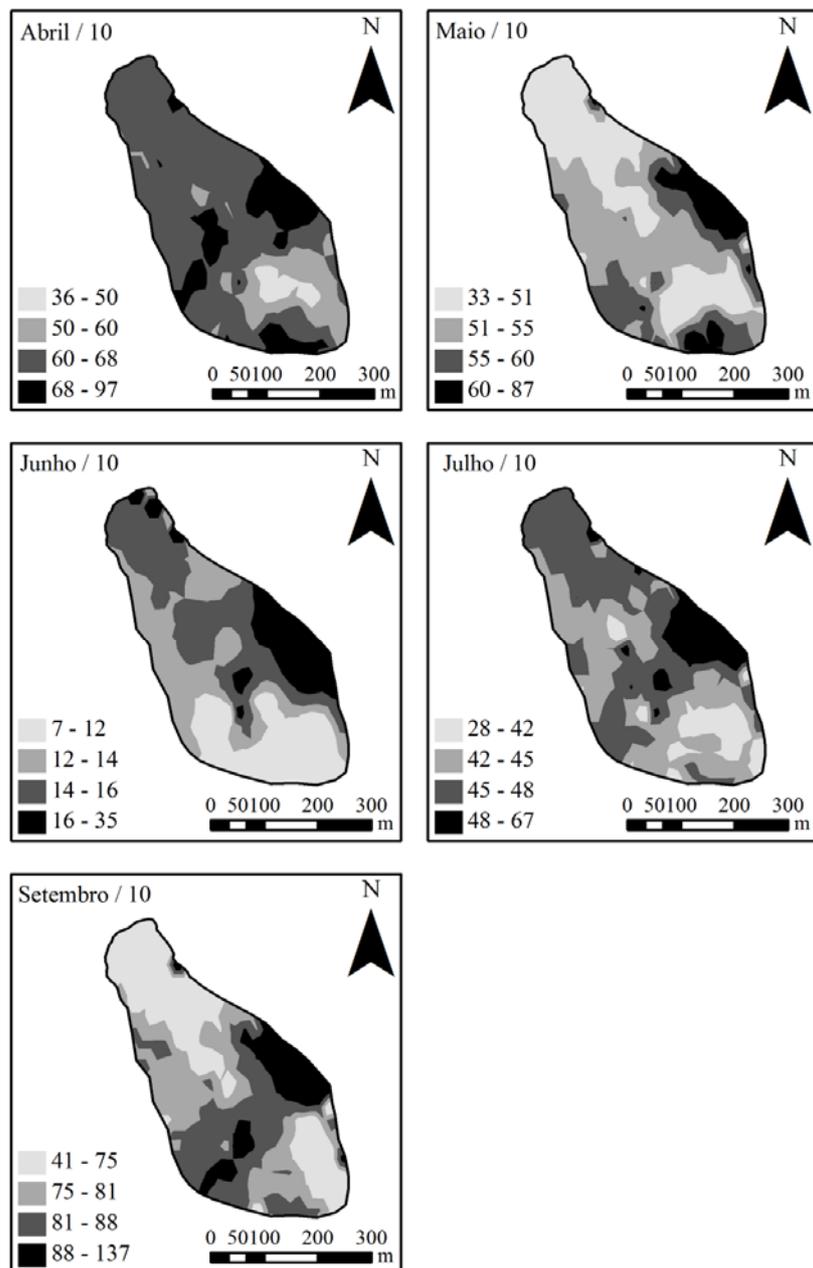


Figura 5 Distribuição espacial da precipitação interna mensal, correspondente ao período seco do ano hidrológico 09/10

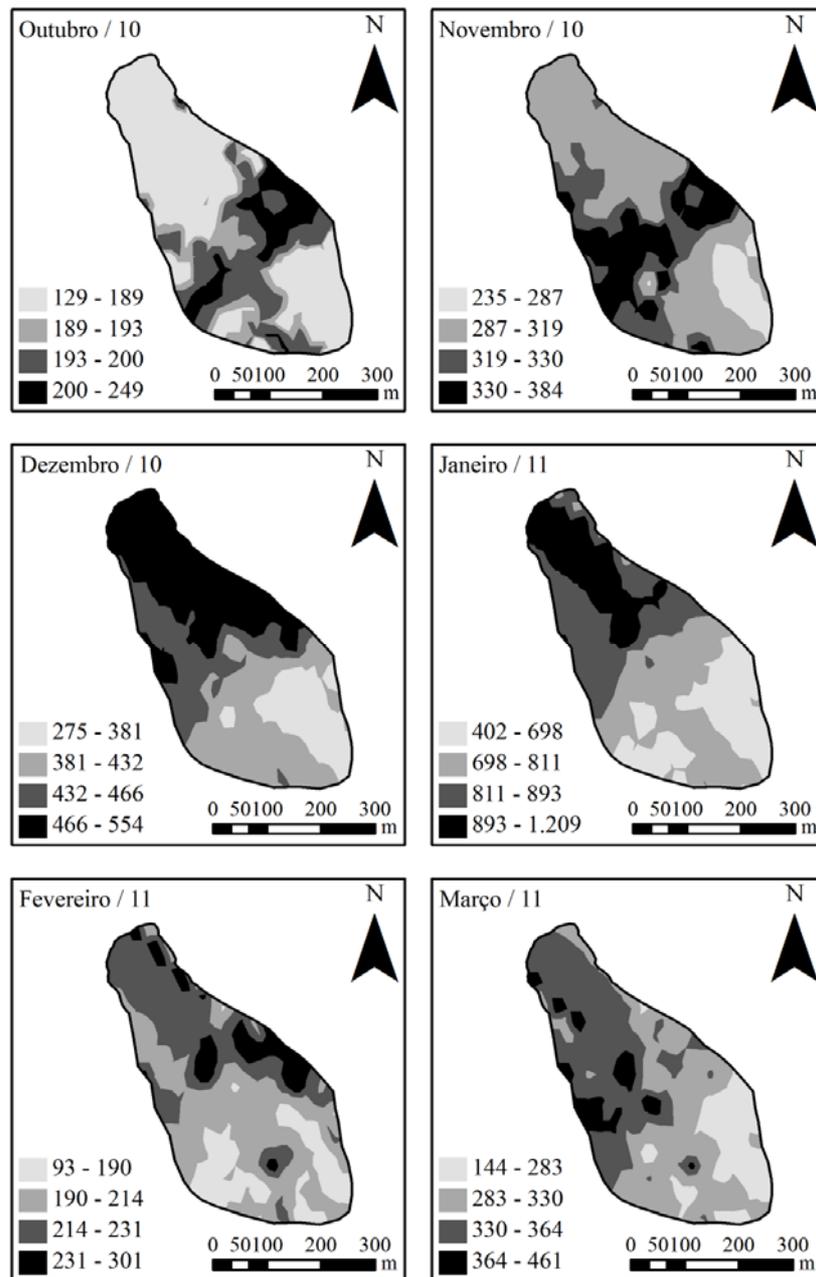


Figura 6 Distribuição espacial da precipitação interna mensal, correspondente ao período chuvoso do ano hidrológico de 10/11

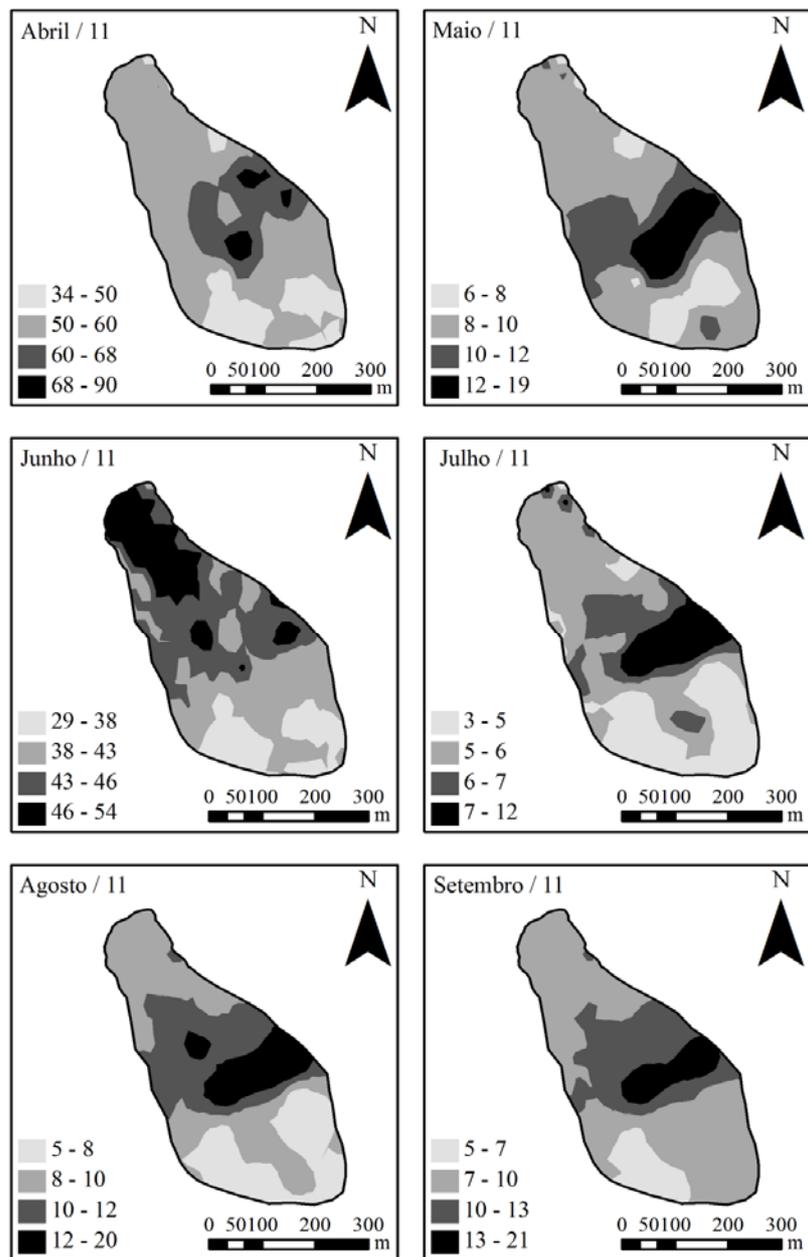


Figura 7 Distribuição espacial da precipitação interna mensal, correspondente ao período seco do ano hidrológico 10/11

3.5 Mapeamento da distribuição espacial da precipitação interna na MBMA, com aplicação da técnica de co-krigagem

Nas Tabelas 6 a 9 estão apresentados os resultados do erro médio reduzido (ER), desvio padrão do erro reduzido (S_{ER}), erro médio (EM) e tendência do estimador (TE), obtidos pela validação cruzada com base em dados de precipitação interna e com aplicação da co-krigagem, utilizando-se as diferenças de IVDN como variável secundária.

Analisando-se os dados das respectivas Tabelas, nota-se que, da mesma forma que na aplicação da krigagem ordinária, os índices obtidos por validação cruzada utilizando-se interpolador geoestatístico co-krigagem, apresentaram erros relativamente baixos, com valores de ER médio próximo de zero e S_{ER} próximo de 1, nos dois anos hidrológicos. As médias máximas observadas de EM e TE foram 30,99 mm e 8,99%. De acordo com estes valores, nota-se que a técnica de interpolação apresentou EM médio máximo ligeiramente superior. No entanto, há tendência de superestimativa uma vez que o TE médio máximo foi inferior.

Comparando-se os valores médios destas estatísticas de precisão para os dois anos hidrológicos e para as duas técnicas de interpolação (krigagem ordinária e), verifica-se que o maior número de estatísticas de precisão que apresentaram melhores resultados foi obtido para a co-krigagem. Os indicadores de precisão que apresentaram os melhores resultados foram: ER (média de -0,002), S_{ER} (média de 0,996) e TE (média 4,97%) para a co-krigagem e EM (média de 19,47 mm) para a krigagem ordinária.

Neste aspecto, conclui-se que, apesar dos valores médios aparentemente semelhantes das estatísticas de precisão, com pequena tendência da variação da magnitude dos valores, constata-se que os menores erros foram produzidos pela técnica de .

Tabela 6 ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada pela técnica de co-krigagem, para o período chuvoso do ano hidrológico 09/10

| Mês | ER | S _{ER} | EM | TE (%) |
|-------|--------|-----------------|--------|--------|
| 10/09 | 0,068 | 0,97 | 28,64 | 6,33 |
| 11/09 | 0,027 | 0,98 | 22,25 | 4,38 |
| 12/09 | 0,008 | 0,99 | 31,67 | 9,04 |
| 01/10 | 0,001 | 0,99 | 27,73 | 7,29 |
| 02/10 | -0,050 | 1,09 | 42,81 | 16,25 |
| 03/10 | -0,065 | 1,09 | 32,85 | 10,64 |
| Média | -0,002 | 1,017 | 30,992 | 8,988 |

Tabela 7 ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada pela técnica de co-krigagem, para o período seco do ano hidrológico 09/10

| Mês | ER | S _{ER} | EM | TE (%) |
|-------|--------|-----------------|--------|--------|
| 04/10 | -0,053 | 1,08 | 31,10 | 10,21 |
| 05/10 | -0,021 | 1,07 | 24,89 | 6,26 |
| 06/10 | -0,004 | 0,89 | 32,01 | 11,57 |
| 07/10 | -0,027 | 1,06 | 20,37 | 4,72 |
| 09/10 | -0,035 | 0,99 | 22,18 | 6,28 |
| Média | -0,028 | 1,017 | 26,108 | 7,809 |

Tabela 8 ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada, pela técnica de co-krigagem, para o período de chuvoso do ano hidrológico 10/11

| Mês | ER | S _{ER} | EM | TE (%) |
|-------|--------|-----------------|--------|--------|
| 10/10 | -0,023 | 1,07 | 16,06 | 2,88 |
| 11/10 | -0,024 | 0,99 | 12,49 | 2,10 |
| 12/10 | 0,010 | 1,00 | 18,58 | 3,13 |
| 01/11 | 0,017 | 1,07 | 24,45 | 5,09 |
| 02/11 | 0,007 | 1,04 | 28,03 | 8,63 |
| 03/11 | 0,002 | 0,98 | 27,06 | 7,97 |
| Média | -0,002 | 1,028 | 21,113 | 4,967 |

Tabela 9 ER, SER, EM e TE obtidos por validação cruzada, pela técnica de co-krigagem, para o período de estiagem do ano hidrológico 10/11

| Mês | ER | S _{ER} | EM | TE (%) |
|-------|--------|-----------------|--------|--------|
| 04/11 | 0,029 | 0,97 | 23,01 | 4,80 |
| 05/11 | 0,010 | 0,86 | 24,07 | 6,69 |
| 06/11 | 0,017 | 0,98 | 16,00 | 2,45 |
| 07/11 | -0,023 | 0,90 | 32,33 | 11,67 |
| 08/11 | -0,026 | 0,89 | 30,24 | 9,70 |
| 09/11 | -0,035 | 0,88 | 31,45 | 11,32 |
| Média | -0,009 | 0,996 | 26,096 | 7,352 |

Analisando-se os mapas de precipitação interna gerados a partir da técnica de (Figuras 8 a 11), utilizando-se as diferenças de IVDN como variável secundária, para os períodos chuvoso e seco, observou-se distinção do padrão da distribuição espacial da precipitação interna, em todos os meses monitorados.

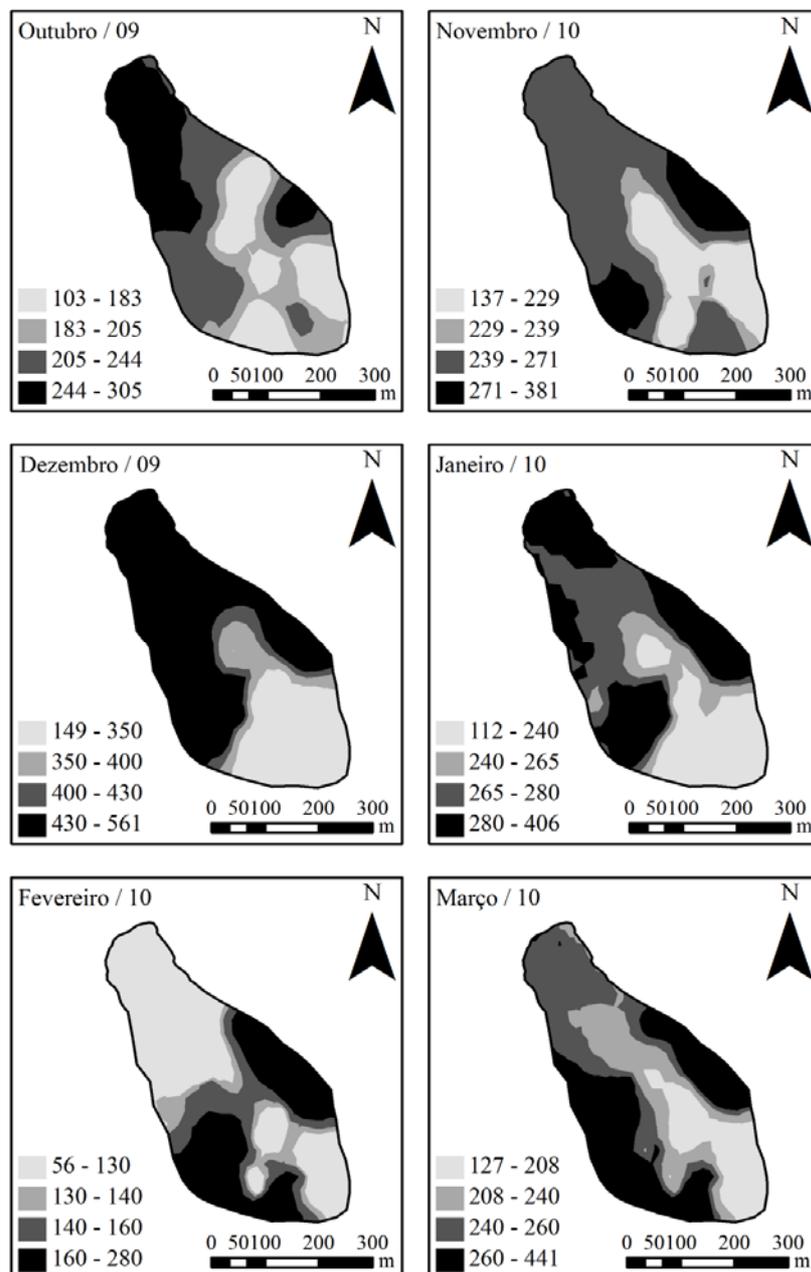


Figura 8 Distribuição espacial da precipitação interna, obtida pela técnica de co-krigagem, para período chuvoso do ano hidrológico 09/10

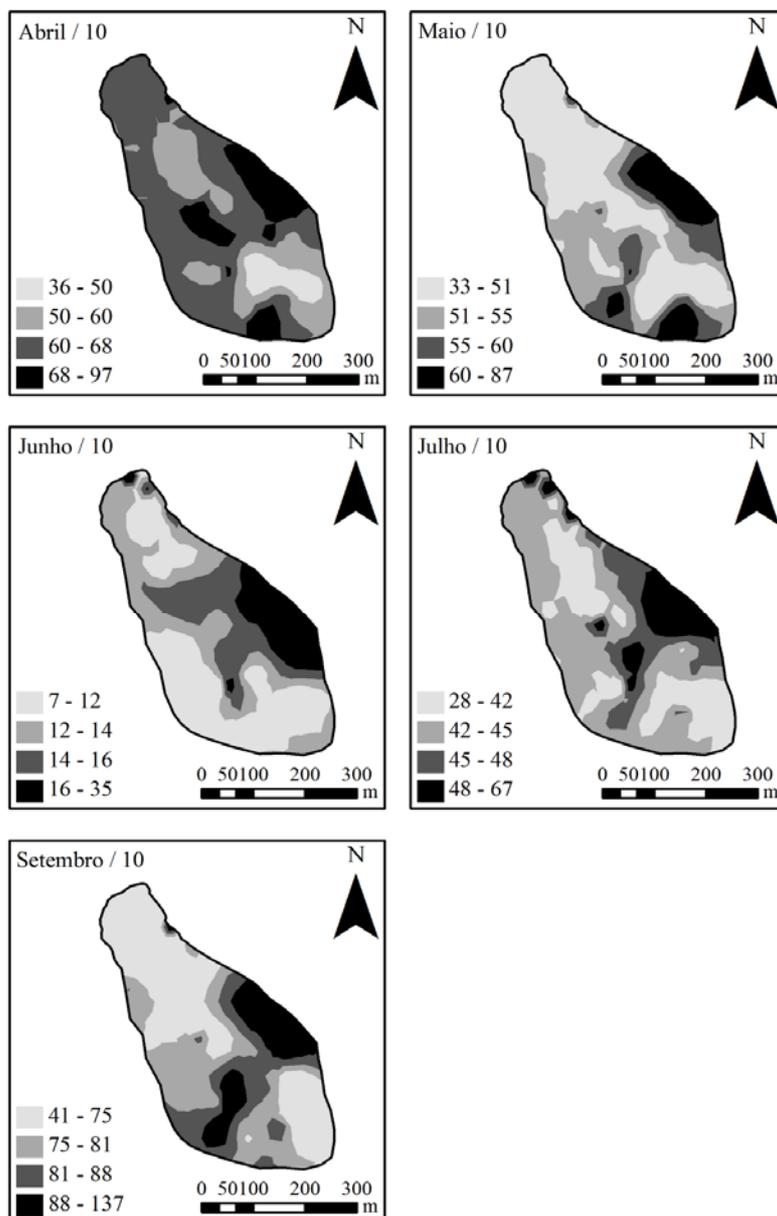


Figura 9 Distribuição espacial da precipitação interna, obtida pela técnica de co-krigagem, para o período seco do ano hidrológico 09/10

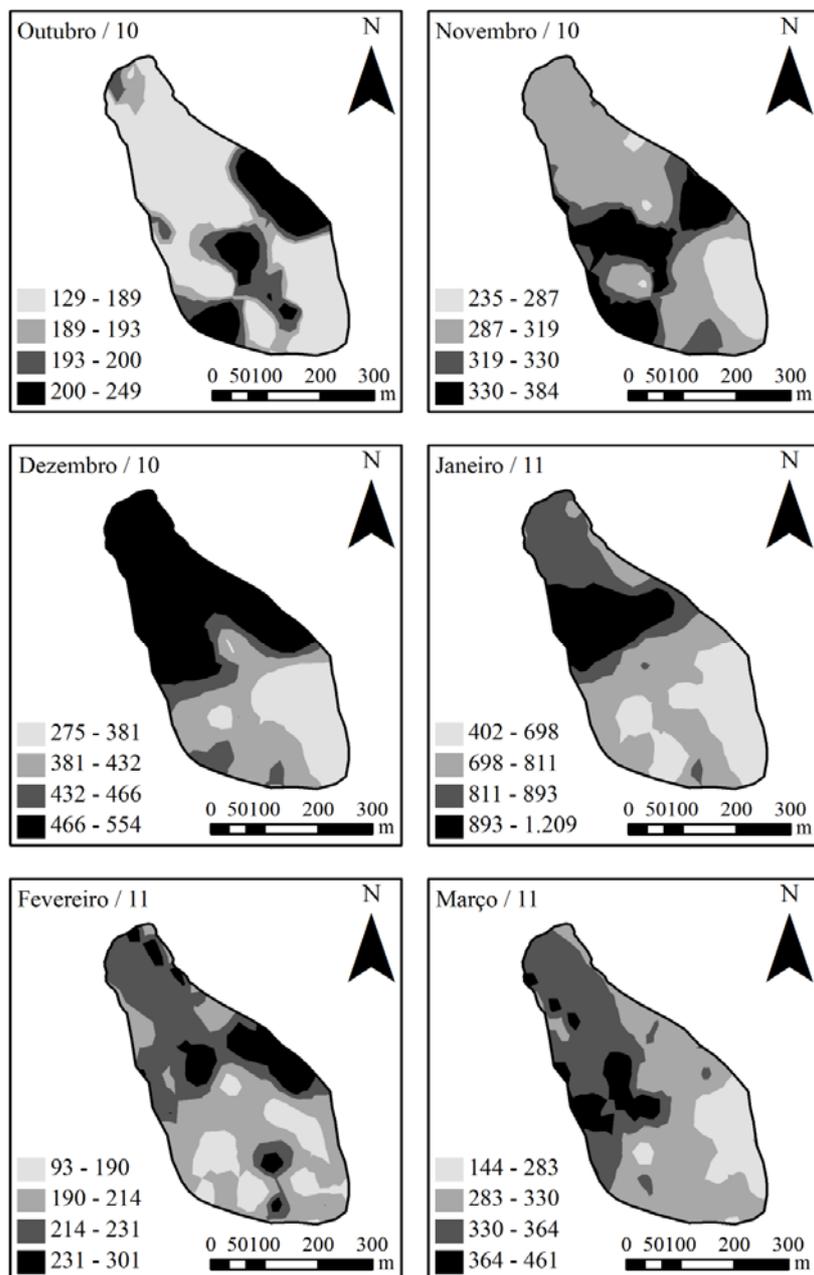


Figura 10 Distribuição espacial da precipitação interna, obtidos pela técnica de co-krigagem, para o período chuvoso do ano hidrológico 10/11

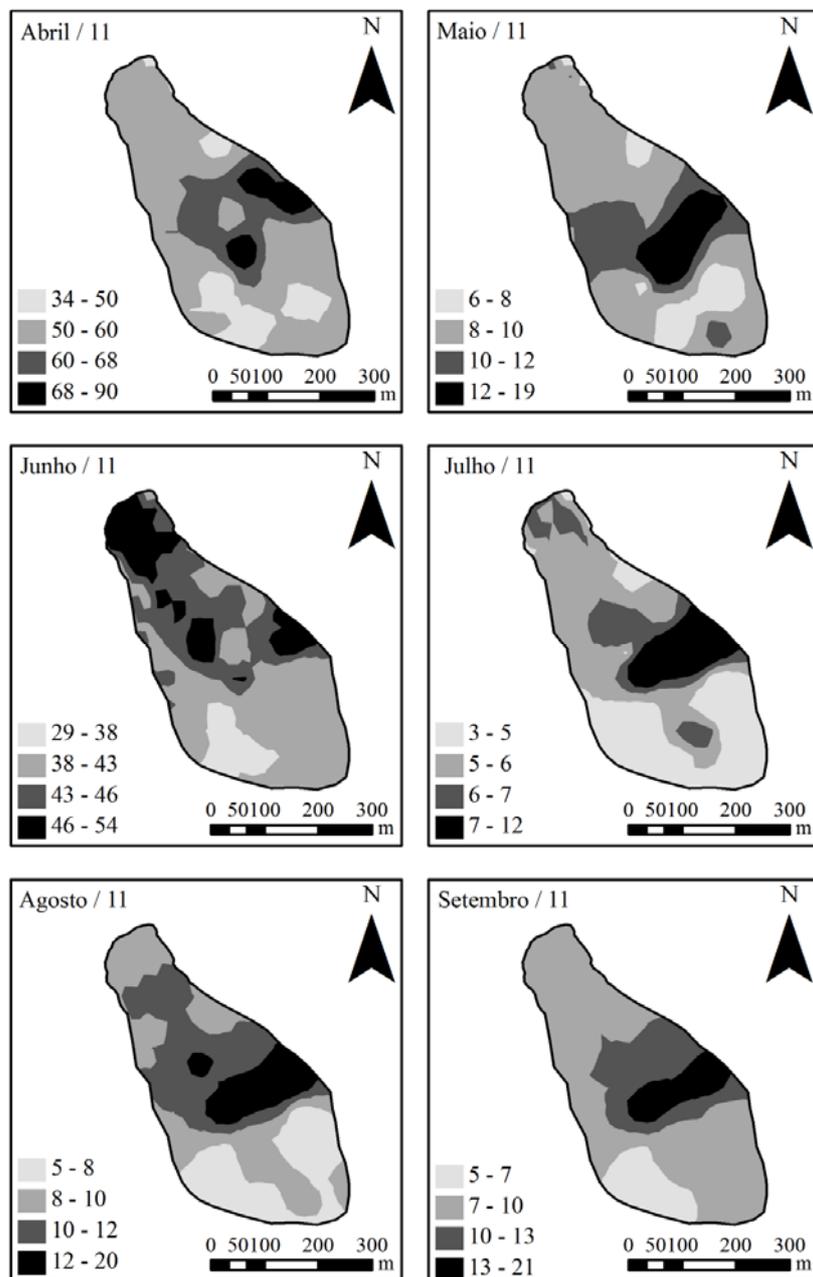


Figura 11 Distribuição espacial da precipitação interna, obtida pela técnica de co-krigagem, para o período seco do ano hidrológico 10/11

No período chuvoso do ano hidrológico 09/10, verifica-se que os mapas de co-krigagem foram similares aos mapas gerados por krigagem (Figuras 4 e 8). Entretanto, nos meses que caracterizam o início (outubro) e o final (março) deste período, nota-se desigualdade do padrão da distribuição da precipitação interna. Observa-se que em outubro há uma região na porção norte da bacia apresentando maiores concentrações (Classe de 244 a 305 mm) de precipitação interna obtido por co-krigagem, o que não foi verificado no mapa obtido por krigagem. Em março, nesta mesma região, houve uma redução da classe correspondente aos maiores valores de precipitação interna (260 a 441 mm) para a classe subsequente (240 a 260 mm), com o mapa de krigagem apresentando uma extensa faixa na classe superior para a região norte da MBMA, algo não obtido pela krigagem.

Nos demais meses, observa-se deslocamento das faixas de transição que compõem o mapa, com maior aglomeração entre elas e com as divisas mais atenuadas entre as classes. No mês de maior ocorrência (dezembro), observou-se maior aglomeração da classe dos maiores valores (430 a 561 mm) de precipitação interna na porção superior da MBMA, correspondendo ao mapa com a maior homogeneidade da distribuição espacial da precipitação pluvial interna.

No período seco, o padrão da distribuição espacial da precipitação interna, gerado por co-krigagem, foi semelhante aos mapas de krigagem em todos os meses. Do mesmo modo, no período chuvoso, observaram-se ligeiros deslocamentos das faixas de transição e aglomeração entre elas.

No ano hidrológico de 10/11, os mapas de co-krigagem apresentaram comportamento análogo a dos mapas de krigagem em praticamente todos os meses. Os únicos meses que apresentaram diferenças na distribuição espacial foram os meses de maior ocorrência de chuvas (dezembro e janeiro), os quais apresentaram comportamento similar ao de dezembro de 09/10, com maior

aglomeração da classe dos maiores valores (dezembro, 466 mm a 554 mm; janeiro, 402 mm a 1.209 mm).

De acordo com os resultados, observou-se que nos meses referentes aos maiores totais de chuva houve maior deslocamento das faixas de transição e aglomeração das classes correspondentes aos maiores valores de precipitação.

Verificou-se também que, apesar de o padrão ter sido semelhante aos mapas gerados por krigagem, a produziu mapas suavizados. Isto é, observou-se que as regiões que compõem os mapas apresentaram-se mais homogêneas, resultado da aglomeração das classes de precipitação interna, resultando na geração de mapas mais suavizados e definidos.

Nesse sentido, conclui-se que o emprego da técnica de utilizando-se as diferenças de IVDN para estudos da distribuição espacial da precipitação interna consiste em uma ferramenta promissora, a qual apresenta tendência de produzir menores erros dos valores observados e a geração de mapas com regiões mais homogêneas e definidas.

4 CONCLUSÕES

- a) a capacidade de armazenamento de água do dossel vegetativo da Mata Atlântica não apresentou correlação positiva com a regeneração vegetal obtida pelas diferenças do índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN), sinalizando que a variabilidade sazonal da capacidade de armazenamento de água em biomas de Mata Atlântica pode estar associadas às características fisiológicas das espécies florestais;
- b) a parcela de água que atravessa o dossel vegetativo da Mata Atlântica e efetivamente atinge a superfície do solo, contribuindo para o abastecimento dos aquíferos, é proporcionalmente maior em períodos com menores índices pluviométricos, podendo-se associar tal comportamento às características florestais da Mata Atlântica;
- c) em períodos com maiores totais precipitados houve maior variabilidade da distribuição espacial da precipitação interna na MBMA, identificando-se variações sazonais e intra-anuais do padrão da distribuição da precipitação interna;
- d) a técnica de , utilizando-se os IVDN como variável secundária, apresentou resultados promissores, com menor erro estimado pelo interpolador, associado à geração de mapas com regiões mais homogêneas e definidas, resultando numa melhor acurácia do mapeamento da precipitação interna em ecossistemas de Mata Atlântica.

REFERÊNCIAS

- AL-BAKRI, J. T.; SULEIMAN, A. S. NDVI response to rainfall in different ecological zones in Jordan. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, n. 25, v. 19, p. 3897-3912, 2004.
- ALLEN, R. G. et al. Surface Energy Balance Algorithm for Land: advanced training and users manual. Idaho: [s. n.], 2002. 98 p.
- ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V.; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha-SP. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 257-262, 2003.
- AUSSENAC, G. Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations. **Annales des Sciences Forestiers**, Champenoux, v. 27, n. 4, p. 383-399, 1970.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 906-915, 2009.
- BARET, F. ; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, p. 161-173, 1991.
- BUYTAERT, W. et al. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: a case study from the South Ecuadorian Andes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 329, p. 413-421, 2006.
- CARDOSO, C. A. et. al. Precipitação interna de um fragmento de mata atlântica no município de Viçosa-MG. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 1., 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. 1 CD ROM.
- CASTRO, P. S. et al. Interceptação da chuva por mata natural secundária na região de Viçosa, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 7, n. 1, p. 76-89, 1983.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L. Revised Landsat-5 thematic mapper radiometric calibration. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Society**, Ann Arbor, v. 4, n. 3, July 2007.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L. "Revised Landsat-5 5 thematic mapper radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges," **IEEE Geoscience and Remote Sensing Society**, Ann Arbor, v. 41, n. 11, p. 2674–2677, Nov. 2003.

CHAPIN, F. S.; MATSON, P.; MOONEY, H. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. New York: Springer Verlag, 2002.

CHAPPELL, N. A.; BIDIN, K.; TYCH, W. Modelling rainfall and canopy controls on net-precipitation beneath selectively-logged tropical forest. **Plant Ecology**, Dordrecht, v. 153, p. 215–229, 2001.

CRESSIE, N. R. **Statistics for spatial data**. New York: Wiley-Interscience, 1993.

CROCKFORD, R. H.; RICHARDSON, D. P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 14, p. 2903–2920, 2000.

CUARTAS, L. A. **Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma micro-bacia em floresta não perturbada na Amazônia Central**. São José dos Campos: INPE, 2008.

CUARTAS, L.A. et al. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: marked differences between normal and dry years. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 145, p. 69–83, 2007.

DANFA, S. et al. Distribuição espacial de valores prováveis de precipitação pluvial para períodos quinzenais, em Guiné-Bissau. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, p. 67-74, 2010.

DAVID, T. S. et al. Intercepção da precipitação em árvores isoladas de *Quercus rotundifolia* Lam. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 10, n.1, p. 1-15, 2002.

DÍAZ, M. F.; ARMESTO, J. J. Limitantes físicos y bióticos de la regeneración arbórea en matorrales sucesionales de la Isla Grande de Chiloe', Chile. **Revista Chilena de Historia Natural**, Santiago, v. 80, p. 13–26, 2007.

- DÍAZ, F. M.; BIGELOW, S.; ARMESTO, J. J. Alteration of the hydrologic cycle due to forest clearing and its consequences for rainforest succession. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 244, n. 1/3, p. 32-40, jun. 2007.
- DIETZ, J. et al. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 237, p. 170–178, 2006.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS 9.2: getting started with ArcGIS**. Redlands, 2004. 265 p.
- ESTRINGANA, P. G.; BLAZQUEZ, N. A.; ALEGRE, J. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 389, p. 363–372, 2010.
- FERREIRA, S. J. F.; LUIZÃO, F. J.; DALLAROSA, R. L. G. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração seletiva de madeira na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 35, n. 1, p. 55-62, nov. 2005.
- FOLHES, M. T. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros de irrigação com base em sensores remotos**. 2007. 180 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.
- GASH, J.H. C. An analytical model of rainfall interception by forests. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 105, p. 43–55, 1979.
- GASH, J. H. C.; LLOYD, C. R.; LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. **Journal Hydrology**, Amsterdam, v. 170, n. 1/4, p. 79–86, 1995.
- GERRITS, A. M. J.; PFISTER, L.; SAVENIJE, H. H. G. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 24, p. 3011–3025, 2010.
- GRIP, H.; FRITSCH, J. M.; BRUIJNZEEL, L. A. Soil and water impacts during forest conversion and stabilisation of new land use. In: BONNELL, M.; BRUIJNZEEL, L. A. (Ed.). **Forests, water and people in the humid tropics**. Cambridge: Cambridge University, 2004. p. 561–589.

GURGEL, H. C.; FERREIRA, N. J. Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 24, n. 18, 3595-3609, 2003.

HERBST, M. et al. Edge effects and forest water use: a field study in a mixed deciduous woodland. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 250, n. 3, p. 176–186, 2007.

HERBST, M. et al. Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 141, p. 244–256, 2006.

HERNÁNDEZ-STEFANONI, J. L.; DUPUY, J. M.; CASTILLO-SANTIAGO, M. A. Assessing species density and abundance of tropical trees from remotely sensed data and geostatistics. **Applied Vegetation Science**, Lania, v. 12, p. 398–414, 2009.

HERWITZ, S. R. Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation. **Earth surface processes and landforms**, Sussex, v. 12, p. 425–432, 1987.

HOLDER, C. D. Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 190, p. 373–384, 2004.

HÖLSCHER, D. et al. The importance of epiphytes to total rainfall interception by a tropical montane rainforest in Costa Rica. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 292, p. 308–322, 2004.

HOLWERDA, F.; SCATENA, F. N.; BRUIJNZEEL, L. A. Throughfall in a Puerto Rican lower montane rainforest: a comparison of sampling strategies. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 327, p. 592–602, 2006.

HUXMAN, T. et al. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. **Nature**, London, v. 429, p. 651-654, 2004.

INFOCLIMA. 2011. Disponível em: <www.cptec.inpe.br/infoclima>. Acesso em: 22 out. 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR>>. Acesso em: 21 ago. 2011.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. et al. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 914-922, 2008.

KOGAN, F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. **Advanced Spa Research**, [S. l.], v. 15, n. 11, 91-100, 1995.

LEVIA, D. F.; FROST, E. E. Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems. **Progress in Physical Geography**, London, v. 30, n. 5, p. 605–632, 2006.

LI, S. et al. Water quality in the upper Han River basin, China: the impacts of land use/land cover in riparian buffer zone. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 165, p. 317–324, 2009.

LIMA, P. R. A.; LEOPOLDO, P. L. Quantificação de componentes hidrológico de uma mata ciliar, através do modelo e balanço de massas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 24, n. 3, p. 241-252, 2000.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ, 2008.

LIU, W. T. H.; MASSAMBANI, O.; NOBRE, C. A. Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 14, p. 343-354, 1994.

LLORENS, P.; OLIVERAS, I.; POYATOS, R. Temporal variability of water fluxes in a *Pinus sylvestris* forest patch in Mediterranean mountain conditions. In: Servat, E. et al. (Ed.). **Hydrology in mediterranean and semi-arid regions**. Wallingford: IAHS, 2003. p. 101–105. Publications, 278.

MELLO, C. R. et al. Continuidade espacial de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 532-539, 2008.

MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 110 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

MENEZES, M. D. **Levantamento pedológico de hortos florestais e mapeamento digital de atributos físicos do solo para estudos hidrológicos**. 2011. 190 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

MONSON, R. K. et al. Morphological causes for the retention of precipitation in the crown of alpine plants. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 32, p. 319–327, 1992.

MUTANGA, O.; RUGEGE, D. Integrating remote sensing and spatial statistics to model biomass distribution in a tropical savanna. **International Journal of Remote Sensing**, Dundee, v. 27, p. 3499–3514, 2006.

NEZLIN, N. P.; KOSTIANOY, A. G.; LI, B. Inter-annual variability and interaction of remote-sensed vegetation index and atmospheric precipitation in the Aral Sea region. **Journal of Arid Environments**, London, v. 62, n. 4, p. 677- 700, 2005.

OLIVEIRA FILHO, A. T. et al. Definição e delimitação de domínios e subdomínios das paisagens naturais do estado de Minas Gerais. In: SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T. (Ed.). **Mapeamento e Inventário da Flora e dos Reflorestamentos de Minas Gerais**. Lavras: UFLA, 2006. cap. 1, p. 21-35.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C.; DIAS, H. C. T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da mata atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 9-15, 2005.

OLIVEIRA, L. L. et al. Modelagem da interceptação na floresta nacional de caxiuanã, no leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 318-326, 2008.

PARK, A.; CAMERON, J. L. The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 1915–1925, 2008.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para simulação hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG**. 2011. – 225 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

PYPKER, T. G. et al. The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 130, p. 113–129, 2005.

ROBSON, A. J. et al. Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 158, p. 107–122, 1994.

ROGERSON, T. L. Throughfall in pole-sized loblolly pine as affected by stand density. In: SOPPER, w. e.; LULL, E H.W. (Ed.). **International Symposium on Forest Hydrology**. Oxford: Pergamon, 1967. p. 187-190, 1967.

SALES, M. H. et al. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: a case study for Rondonia, Brazil. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 205, p. 221–230, 2007.

SCHUUR, E. A. Productivity and global climate revisited: the sensitivity of tropical forest growth to precipitation. **Ecology**, Washington, v. 84, p. 165-1170, 2003.

SELLERS, P. J.; SCHIMMEL, D. Remote sensing of the land biosphere and biochemistry in the EOS era: science priorities, methods and implementation-EOS land biosphere and biochemical panels. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 7, p. 279-297, 1993.

SPRINTSIN, M. et al. The effect of spatial resolution on the accuracy of leaf area index estimation for a forest planted in the desert transition zone. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 109, p. 416–428, 2007.

STAELENS, J. et al. Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 330, p. 651–662, 2006.

STAELENS, J. et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliage, rain event characteristics, and meteorology. **Hydrological Processes**. 22, 33–45, 2008.

THUROW, T. L.; HESTER, J. W. 1997. **How an increase or reduction in Juniper cover alters rangeland hydrology**. Disponível em: <<http://texnat.tamu.edu/library/symposia/juniper-ecology-and-management/how-an-increase-or-reduction-in-juniper-cover-alters-rangeland-hydrology/>>. Acesso em: 21 set. 2011.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation . **Remote Sensing Environment**, St. Paul, v. 8. p. 127–150, 1979.

TUCKER, C. J.; SELLERS, P. J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**, Dundee, v. 7, n. 11, p. 1395-1416, 1986.

VALENTE, F.; DAVID, J. S.; GASH, J. H. C. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forest in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 190, p. 141-162, 1997.

VALENTE, F. M. R. T. **Intercepção da precipitação em povoamentos florestais esparsos**: modelação do processo e características aerodinâmicas dos cobertos molhados. 1999. 172 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1999.

VRUGT, J. A.; DEKKER, S. C.; BOUTEN, W. Identification of rainfall interception model parameters from measurements of throughfall and forest canopy storage. **Water Resources Research**, Washington, v. 39, n. 9, p. 1251, 2003.

WANG, Q. et al. Similarities in ground and satellitebased NDVI time series and their relationship to physiological activity of a Scots pine forest in Finland. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 93, n. 2, p. 225-237, 2004.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental science**. Toronto: J. Wiley and Sons, 2001.

WHELAN, M. J. et al. Spatial patterns of throughfall and mineral ion deposition in a lowland Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 32, p. 3493–3501, 1998.

YANAGI, S. N. M.; MELLO, C. R. **Aplicação de séries temporais para identificação de tendências climáticas em regiões do sul de Minas Gerais.** 2011. 51 p. Relatório Final de Pesquisa - FAPEMIG. Não publicado.

CAPÍTULO 4

Estabilidade temporal do conteúdo de água em três condições de uso do solo, em uma bacia hidrográfica da região da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais

RESUMO

A descrição de processos hidrológicos é relativamente complexa, principalmente da variação do conteúdo de água no solo, devido à influência de fatores edáficos, topográficos, climáticos e de vegetação. Em condições de campo a estimativa do conteúdo de água no solo requer um plano de amostragem adequado, considerando as variações no tempo e no espaço. Visando representar adequadamente o conteúdo de água no solo com reduzido esforço amostral e custo, o conceito de estabilidade temporal tem sido muitas vezes empregado. Este estudo foi realizado com o objetivo de analisar a estabilidade temporal do conteúdo de água na camada superficial do solo (0-0,20 m de profundidade), sob diferentes usos do solo, em uma bacia hidrográfica experimental da região da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais, nos períodos de estiagem e chuvoso, estimando os pontos mais representativos para essa determinação. Houve maior estabilidade temporal do conteúdo de água no solo na área de vegetação de várzea, menor na área ocupada por Mata Atlântica e intermediária na área de pastagem. Ocorreram, também, variações significativas da diferença relativa média entre os períodos de medição, concluindo-se que as características de cada área devem ser consideradas particularmente para escolha dos pontos. Na área de pastagem, foi possível identificar apenas um ponto para monitoramento tanto para o período chuvoso como de estiagem. Por outro lado, nas áreas de Mata Atlântica e vegetação de várzea foram identificados dois pontos, sendo um especificamente para o período chuvoso e outro para o período de estiagem, sendo recomendada uma análise individual específica para cada estação.

Palavras-chave: Variabilidade temporal. Monitoramento de bacias hidrográficas. Diferença relativa.

ABSTRACT

The description of the hydrological processes is relatively complex, especially for the soil moisture, due to the influence of edaphic, topographic, climatic and vegetation factors. Under field conditions, the soil moisture estimating requires an adequate sampling strategy, considering variations in time and space. Aiming to represent adequately the soil moisture with reduced sampling effort and cost, the concept of temporal stability has often been applied. This study was carried out with the objective of analyzing the temporal stability of the surface soil moisture (0-0.20 m depth) in three land use conditions at a experimental catchment located in Mantiqueira Range region, Minas Gerais, during the dry and rainy seasons, identifying points which can be representative for monitoring implementation. There was observed greater temporal stability under wetland site, lesser under Atlantic Forest site and intermediate in grassland site. There was, also, a significant variation in the mean relative difference among the periods of measuring, concluding that the characteristics of each site should be considered to choice of points. In the grassland site, it was possible to identify only one point for monitoring for both periods (rainy and dry). On the other hand, in Atlantic Forest and wetland sites it was necessary select one point to the rainy season and another to the dry season, been recommended an individual analyze for each season

Keywords: Temporal variability. Watershed monitoring. Relative difference.

1 INTRODUÇÃO

O uso de monitoramentos hidrológicos e sedimentológicos têm se intensificado em diversos países, buscando-se a caracterização de vários processos, destacando-se o estudo da dinâmica da água no solo. É relativamente complexo estimar o valor representativo de variáveis relacionadas a esses processos naturais devido a sua heterogeneidade, a qual é função da ação de diversos fatores extrínsecos e intrínsecos do solo, no caso da variação do conteúdo de água no solo, caracterizando sua variabilidade espacial e temporal.

Visando representar adequadamente o conteúdo de água no solo com reduzido esforço amostral, Vachaud et al. (1985) introduziram o conceito de estabilidade temporal. Tal conceito pode ser definido como sendo a associação constante entre a localização espacial e as medidas estatísticas que caracterizam uma determinada propriedade do solo ao longo do tempo (VAN WESENBEECK; KACHANOSKI, 1988).

A estabilidade temporal possibilita a identificação de pontos no campo que refletem o comportamento médio de uma variável, ou seja, pontos que apresentam valores semelhantes ao valor médio. A identificação destes é fundamental no planejamento de programas de monitoramento de variáveis hidrológicas, pois permite a redução de custos relacionados à mensuração de dados de campo.

Schneider et al. (2008) mencionam que esta metodologia foi aplicada em estudos relacionados ao conteúdo de água no solo em diversos países, em regiões com climas diferenciados e com amostras de diversos tamanhos. Como exemplo, tem-se os trabalhos de Grayson e Western (1998), os quais determinaram a estabilidade temporal do conteúdo de água no solo em três bacias hidrográficas localizadas na Austrália e nos Estados Unidos, e Gómez-Plaza, Alvarez-Rogel e Albaladejo (2000) que estudaram os fatores que

influenciam na estabilidade temporal do conteúdo de água no solo em uma região de clima semi-árido da Espanha.

Apesar de vários autores utilizarem a técnica de estabilidade temporal, sua comparação não é adequada devido à diversidade das condições das regiões analisadas, como a extensão da área, o plano de amostragem, a profundidade monitorada e o período de monitoramento (BOSH et al., 2006; COSH et al., 2004; FERNANDEZ; CEBALLOS, 2003; FERNANDEZ; CEBALLOS, 2005; PACHEPSKY; GUBER; JACQUES, 2005; STARKS et al., 2006; TEULING et al., 2006; THIERDEFELDER et al., 2003). Além disso, a persistência temporal do padrão do conteúdo de água no solo pode ser influenciada pela vegetação, pelas propriedades do solo, pelas condições climáticas e pela topografia (SCHNEIDER et al., 2008).

Comparando a estabilidade temporal do conteúdo de água no solo numa área vegetada e outra sem cobertura vegetal, Gómez-Plaza, Alvarez-Rogel e Albaladejo (2000) constataram menor estabilidade temporal na área vegetada. Segundo os autores, este comportamento está associado à distribuição da cobertura vegetal e das raízes que, ocasionalmente, causaram maior variabilidade da demanda de água pela planta durante o cultivo. Fernandez e Ceballos (2003) observaram maior estabilidade temporal no período de estiagem em comparação ao período de reumedecimento do solo por ocasião do início da estação chuvosa, concluindo que este último foi o período mais crítico para a estabilidade temporal.

Desta forma, observa-se que o estudo da estabilidade temporal pode ser utilizado para equacionar uma diversidade de questões relacionadas ao monitoramento da dinâmica da água no solo, especialmente na redução de custos associados à medição do conteúdo de água no solo em escala de bacias hidrográficas, gerando informações científicas que poderão ser aplicadas com maior grau de confiabilidade a um custo reduzido.

Diante disso, objetiva-se neste capítulo analisar a estabilidade temporal do conteúdo de água no solo em uma bacia hidrográfica experimental da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais, sob diferentes usos do solo, avaliando-se o padrão de estabilidade para os períodos de estiagem e chuvoso, visando a identificação de pontos representativos para implementação do monitoramento contínuo do conteúdo de água no solo, com reduzido esforço amostral e conseqüentemente, a um custo reduzido.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Características básicas e localização da bacia hidrográfica

A área monitorada, denominada bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, localiza-se na Serra da Mantiqueira, município de Bocaina de Minas (MG), e deságua diretamente no Rio Grande. A bacia se situa entre as coordenadas 22°07'S e 22°09'S de Latitude e 44°26'W e 44°29'W de Longitude, com altitude entre 1.144 m e 1.739 m, área de drenagem de 6,90 km² e declividade média de 35%, localizando-se na Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos GD01 da Bacia Hidrográfica do Rio Grande. A precipitação anual média é de 2.150 mm, com concentração das chuvas no período de outubro a abril. A evapotranspiração potencial é de 1.060 mm, com temperaturas médias de 11°C para o mês mais frio e 19°C para o mais quente, típicas do clima Cwb (BESKOW et al., 2009; MELLO et al., 2008).

As unidades pedológicas desta bacia hidrográfica, conforme Menezes et al. (2009), são: Neossolo Flúvico e Gleissolo Háplico, ambos localizados na porção inferior da bacia e ocupando, respectivamente, 7,1 e 0,9% da área, e Cambissolo Háplico, localizado principalmente nas regiões de maior altitude e declive mais acentuado, ocorrendo em 92% da área (Figura 1). Na Figura 2 é apresentado o mapa de uso atual do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha, o qual é constituído por aproximadamente 41% de Mata Atlântica, 14% de regeneração natural em fase de desenvolvimento médio e avançado, 40% de pastagem e 5% de vegetação de várzea. Além disto, apresentam-se os pontos de monitoramento da umidade do solo conduzidos durante o trabalho, apresentados também na forma de croqui com as respectivas localizações geográficas (coordenadas UTM) e distâncias, as quais podem ser obtidas diretamente pela escala gráfica do mesmo.

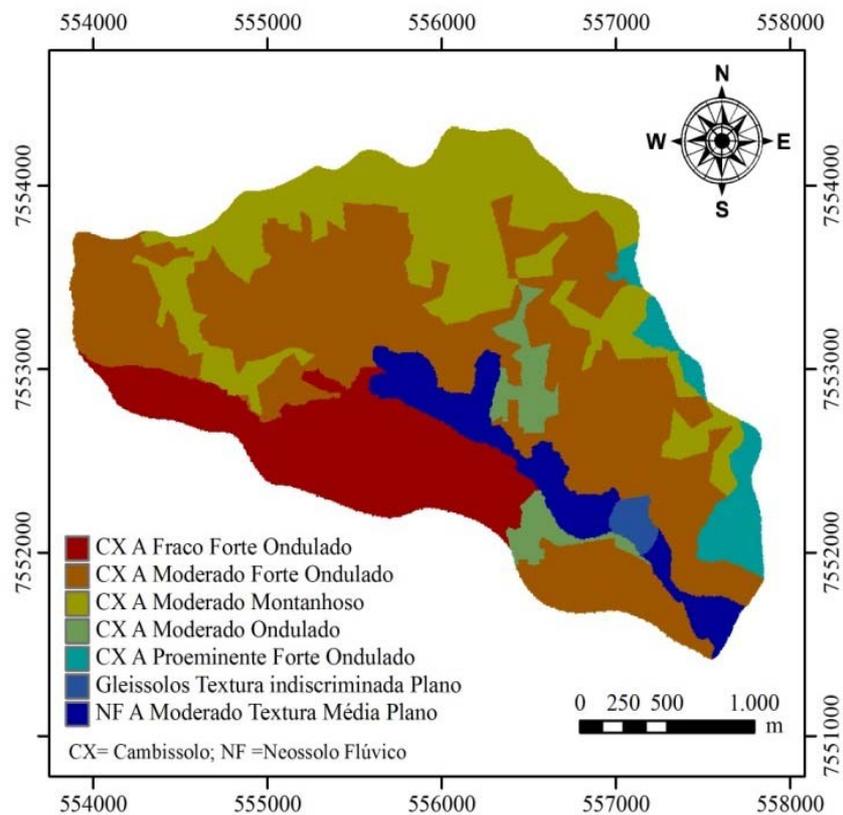


Figura 1 Distribuição espacial dos solos na bacia hidrográfica experimental do ribeirão Lavrinha, Serra da Mantiqueira, Minas Gerais
Fonte: Adaptado de Menezes et al. (2009)

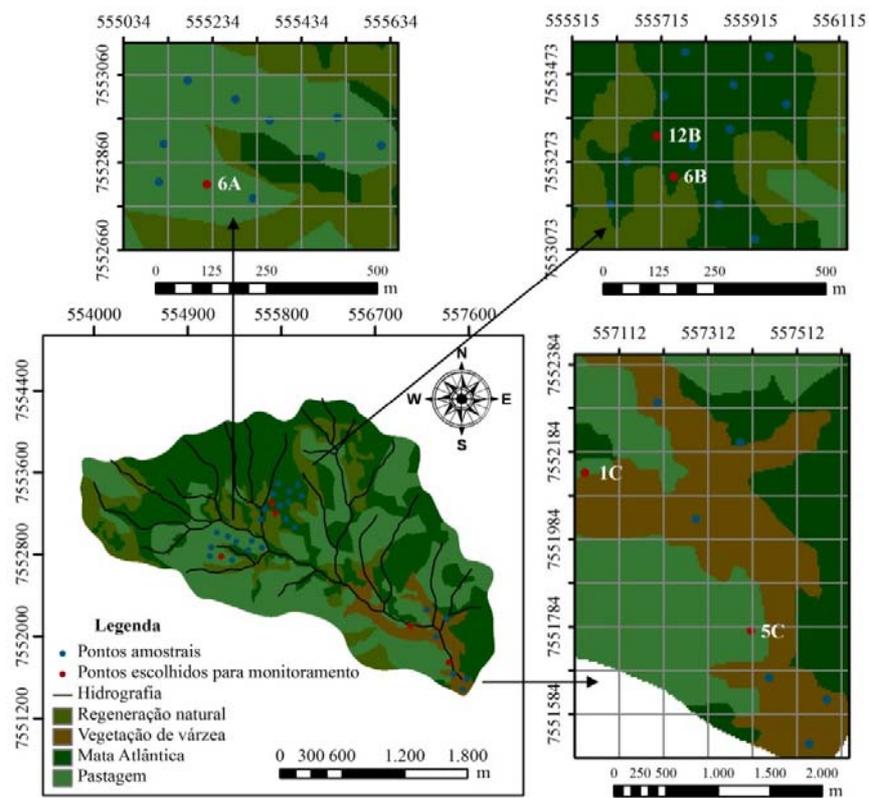


Figura 2 Distribuição espacial do uso atual do solo e localização dos pontos amostrais e de monitoramento da umidade do solo na bacia hidrográfica experimental do ribeirão Lavrinha, Serra da Mantiqueira, Minas Gerais

2.2 Estabilidade temporal da umidade do solo

Os pontos para monitoramento da umidade do solo foram locados por meio de um aparelho GPS, marca Magellan, modelo Promark3, trabalhando-se com precisão submétrica ($< 1\text{m}$), partindo-se de um esquema georreferenciado prévio, os quais foram estratificados considerando as classes de uso atual do solo. Os pontos de monitoramento ficaram assim distribuídos: 13 na área de Mata Atlântica, 10 na área de pastagem e 8 na área de vegetação de várzea (Figura 2). O monitoramento foi conduzido na camada superficial do solo (0-0,20 m), entre maio de 2007 e maio de 2008, com periodicidade de leitura quinzenal, utilizando-se um equipamento portátil do tipo “Time Domain Reflectometry” (TDR), fabricado pela IMKO, modelo TRIME – FM, com hastes de 0,20 m de comprimento, o qual fornece leitura do conteúdo de água no solo com base em volume (m^3m^{-3}).

A calibração do TDR foi conduzida de forma semelhante à adotada por van den Elsen et al. (2003), os quais trabalharam com equipamento semelhante. Para isto, foram ajustados e analisados 6 modelos matemáticos (linear, logarítmico, polinomial de 2º grau, potencial, exponencial e média móvel) aos dados mensurados do conteúdo de água no solo pelo equipamento TDR, associados aos valores observados do conteúdo de água no solo, consistindo, portanto, numa calibração específica para as condições pedológicas e de uso do solo do presente estudo. Os valores observados de umidade do solo foram obtidos, primeiramente, pelo método gravimétrico, após coleta de amostras indeformadas com amostrador de Uhland, as quais foram acondicionadas em filmes plásticos e parafinadas, com o objetivo de preservar sua umidade, e conduzidas ao laboratório. Os valores de umidade foram então corrigidos para umidade volumétrica com base na densidade do solo, a qual foi avaliada para cada ponto amostral de umidade, em cada condição de uso do solo, conforme

Ferreira et al. (2003). Após análise dos ajustes matemáticos dos modelos adotados, verificou-se que o modelo polinomial de 2º grau apresentou os melhores ajustes, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,91 para Mata Atlântica e pastagem e 0,86 para vegetação de várzea.

Para análise da estabilidade temporal foram aplicadas duas técnicas da estatística não-paramétrica (VACHAUD et al., 1985): diferença relativa, que faz uma análise dos desvios entre os valores observados individualmente e a média dos mesmos, e; o teste não-paramétrico de Spearman, o qual é utilizado como ferramenta estatística para indicar o grau de concordância da variabilidade espacial obtida em diferentes tempos. A técnica das diferenças relativas, que permite verificar a estabilidade relacionada ao tempo da variabilidade espacial dos processos, foi aplicada na identificação de pontos para o monitoramento com reduzido esforço amostral. As diferenças relativas médias, expressas em termos percentuais, associadas ao respectivo desvio-padrão no tempo e ordenadas em ordem crescente, permitiu detectar as posições que representam a média geral do conteúdo de água no solo, com determinado nível de confiabilidade. A diferença relativa média pode ser calculada pela expressão:

$$\bar{\delta}_{ij} = \frac{\theta_{ij} - \bar{\theta}_j}{\bar{\theta}_j} \quad (1)$$

em que $\bar{\delta}_{ij}$ é a diferença relativa média na posição i no tempo j ; θ_{ij} é o valor do conteúdo de água no solo na posição i e no tempo j ; $\bar{\theta}_j$ é a média do conteúdo de água no solo, em todas as posições, no tempo j . Conforme Vachaud et al. (1985), um valor constante ou uma pequena variação de $\bar{\delta}_{ij}$ ao longo do tempo, para cada posição j , é indicação de estabilidade temporal.

Posteriormente, as diferenças relativas médias foram plotadas com seus respectivos desvios-padrão para cada uso do solo (Mata Atlântica, pastagem natural e vegetação de várzea), para identificar os pontos de maior precisão para estimativa da média geral do conteúdo de água no solo no período de estiagem (abril a setembro) e período chuvoso (outubro a março). Valores próximos de zero da diferença relativa média indicam maior estabilidade temporal do processo, enquanto menor desvio padrão representa menor variabilidade ou dispersão do conteúdo de água no solo em torno da média e, conseqüentemente, maior confiabilidade da medição do ponto escolhido para estimativa da média geral do conteúdo de água no solo. Neste sentido, o ponto a ser escolhido como representativo foi aquele que apresentou, simultaneamente, valores próximos de zero da diferença relativa média e menor desvio-padrão (GONÇALVES; FOLEGATTI; SILVA, 1999; VACHAUD et al., 1985).

Posteriormente se aplicou o teste de Spearman, com o intuito de analisar a existência de tendências temporais na série histórica dos dados do conteúdo de água no solo. As tendências temporais podem ocorrer devido a possíveis mudanças graduais do uso do solo, bem como à própria alteração de seu comportamento, ocasionados eventualmente pelo manejo do solo, podendo produzir alterações de estacionaridade da série histórica. A estatística do teste de Spearman (T) pode ser obtida por:

$$T = \frac{cs}{\sqrt{\text{var}(cs)}} \quad (2)$$

onde cs é o coeficiente de correlação de Spearman e $\text{var}(cs)$ é a variância do coeficiente de correlação de Spearman. Considerando um nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$), pela Tabela de Z obtém-se $Z_{0,975}=1,96$. Assim, se $|T| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$, rejeita-se a hipótese H_0 de que as observações não apresentam tendência

temporal. O coeficiente de correlação de Spearman (cs) e a variância do coeficiente de correlação são obtidos, respectivamente, por:

$$cs = 1 - \frac{6 \times \sum_{i=1}^N (F_i - f_i)^2}{N^3 - N} \quad (3)$$

em que f_i corresponde à posição temporal da série histórica e F_i à posição em que as observações associadas a f_i ocupam com a série histórica ordenada em ordem crescente e N corresponde ao número de dados da série.

$$\text{var}(cs) = \frac{1}{N-1} \quad (4)$$

O coeficiente de correlação de Spearman (cs) foi empregado para avaliar o grau de correlação da variável espacial conteúdo de água no solo nos diferentes tempos de amostragem. Um valor de cs igual à unidade corresponderá à posições idênticas em todos os pontos de medição, ou seja, estabilidade perfeita entre dois tempos. Neste sentido, quando mais próximo de 1 for cs, mais estável será o processo (CAMPOS, 1983; VACHAUD et al., 1985).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os valores da estatística do teste de Spearman para os usos do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha ao longo do período monitorado. Considerando o nível de significância de 5%, observa-se que as séries de dados do conteúdo de água no solo para pastagem não apresentaram significância pelo Teste de Spearman ($|T| < Z_{0,975}$), ou seja, deve-se aceitar a hipótese H_0 de que os dados não apresentam tendência temporal. A área de várzea apresentou apenas dois eventos com significância estatística do teste (em 20/12/07 e 01/05/08), ou seja, a este nível de probabilidade, deve-se rejeitar a hipótese H_0 , uma vez que os dados, nestas datas, apresentam tendência temporal. Na área de Mata Atlântica foi constatada maior quantidade de eventos nos quais a hipótese de nulidade pôde ser rejeitada (em 5 dos 20 grupos avaliados), ou seja, com os dados apresentando alguma tendência temporal.

Tabela 1 Estatística do teste de Spearman em diferentes datas de amostragem e usos do solo na bacia hidrográfica experimental do ribeirão Lavrinha, Serra da Mantiqueira, Minas Gerais

| Data | Uso do solo | | |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Pastagem | Mata Atlântica | Vegetação de várzea |
| 23/06/07 | 0,24 ^{ns} | 0,19 ^{ns} | 0,71 ^{ns} |
| 24/07/07 | 0,82 ^{ns} | 0,17 ^{ns} | 1,01 ^{ns} |
| 11/08/07 | 0,26 ^{ns} | -0,89 ^{ns} | 0,70 ^{ns} |
| 25/08/07 | 1,76 ^{ns} | -0,80 ^{ns} | 0,94 ^{ns} |
| 16/09/07 | 0,78 ^{ns} | -1,03 ^{ns} | 0,31 ^{ns} |
| 28/09/07 | 1,84 ^{ns} | -0,10 ^{ns} | 1,51 ^{ns} |
| 12/10/07 | 0,71 ^{ns} | -1,71 ^{ns} | 1,83 ^{ns} |
| 26/10/07 | 0,27 ^{ns} | -2,74* | 0,88 ^{ns} |
| 10/11/07 | 1,62 ^{ns} | -2,15* | 1,70 ^{ns} |
| 23/11/07 | 0,38 ^{ns} | -2,06* | 1,84 ^{ns} |
| 08/12/07 | 1,29 ^{ns} | -1,53 ^{ns} | 1,66 ^{ns} |
| 20/12/07 | 0,53 ^{ns} | -2,61* | 2,02* |
| 25/01/08 | 0,25 ^{ns} | -0,32 ^{ns} | 0,45 ^{ns} |
| 08/02/08 | 0,09 ^{ns} | 0,40 ^{ns} | 0,60 ^{ns} |
| 22/02/08 | 1,25 ^{ns} | -0,07 ^{ns} | 0,01 ^{ns} |
| 08/03/08 | 0,82 ^{ns} | 1,04 ^{ns} | 1,05 ^{ns} |
| 20/03/08 | 0,47 ^{ns} | 0,95 ^{ns} | 1,40 ^{ns} |
| 05/04/08 | -0,75 ^{ns} | 0,09 ^{ns} | 0,26 ^{ns} |
| 18/04/08 | -0,75 ^{ns} | 0,11 ^{ns} | 1,75 ^{ns} |
| 01/05/08 | -1,09 ^{ns} | 2,05* | 2,55* |

ns= não significativo; * significativo a 5% de probabilidade

Os coeficientes de correlação de Spearman (cs) calculados para os diferentes usos do solo, com as lâminas de precipitação pluvial acumulada (mm) entre uma leitura consecutiva e uma imediatamente anterior do conteúdo de água no solo, obtidas pela estação meteorológica local, para o período monitorado estão apresentados na Tabela 2. Observa-se uma variação significativa dos valores de cs em relação ao tempo, com maiores valores para a área representada

por vegetação de várzea, indicando maior estabilidade do processo nessa posição da paisagem (FERNANDEZ; CEBALLOS, 2003). Este comportamento pode ser atribuído às propriedades do solo (menor condutividade hidráulica saturada), do relevo (plano) e da cobertura vegetal mais homogênea que ocorre na área de várzea que, associado à presença do lençol freático próximo à superfície, torna o ambiente mais estável e conserva o conteúdo de água no solo com menores oscilações ao longo do ano. Além disso, o processo de redução do conteúdo de água no solo na várzea é retardado no tempo devido o recebimento dos fluxos provenientes de cotas superiores e da ocorrência da ascensão capilar de água do lençol freático, resultando num solo mais provido de água.

Por outro lado, na área de Mata Atlântica, que apresenta relevo de forte ondulado a escarpado, encosta íngreme, posicionada nas áreas mais acidentadas da bacia hidrográfica, o padrão do conteúdo de água é afetado por fluxos laterais de água. Não obstante as características edáficas e topográficas do solo, a biodiversidade da Mata Atlântica e a complexidade do sistema, como a presença de deficiência estacional de água de aproximadamente 6 meses, pode influenciar também no padrão do conteúdo de água no solo pela maior taxa de evapotranspiração. Os diversos fatores mencionados influem na biodiversidade da mata, resultando em um ambiente mais heterogêneo em termos de variabilidade temporal (WESTERN et al., 2003).

Com base nos dados da Tabela 2 é possível inferir sobre o efeito destes fatores na área constituída por Mata Atlântica, onde podem ser verificados valores de r baixos e, na maioria dos casos, negativos, indicando baixa correlação do conteúdo de água no solo na escala temporal. Este comportamento está em consonância com o relatado por Mohanty e Skaggs (2001), ou seja, a variação do coeficiente de correlação depende das características fisiográficas de cada área, sendo, portanto, consideravelmente influenciada pelas condições

topográficas da Serra da Mantiqueira bem como pelo uso do solo sob floresta nativa.

Na área coberta por pastagem os valores de c_s apresentaram valores intermediários entre a várzea e a Mata Atlântica. Este resultado está relacionado à homogeneidade da cobertura vegetal da área em função do pastejo, associado à menor declividade se comparado à Mata Atlântica e, portanto, com menor influência de fluxos laterais. No entanto, observa-se que os valores de c_s diminuem ao longo do período chuvoso, o que está associado às alterações fisiográficas devido ao crescimento vegetativo da pastagem durante este período, o que determina maior taxa de evapotranspiração. Gómez-Plaza, Alvarez-Rogel e Albaladejo (2000), estudando os fatores que controlam a estabilidade temporal do conteúdo de água no solo, relataram que alterações da cobertura vegetal durante o período vegetativo influenciam no padrão de estabilidade temporal, sendo esta característica típica das pastagens de cada região.

Tabela 2 Coeficiente de correlação de Spearman (cs) em diferentes datas de amostragem e usos do solo e lâmina de precipitação acumulada (P) durante o respectivo período de monitoramento da umidade do solo na bacia hidrográfica experimental do ribeirão Lavrinha, Serra da Mantiqueira, Minas Gerais

| Data | P (mm) | Uso do solo | | |
|----------|--------|-------------|----------------|---------------------|
| | | Pastagem | Mata Atlântica | Vegetação de várzea |
| 23/06/07 | 9 | 0,08 | 0,07 | 0,50 |
| 24/07/07 | 26 | 0,27 | 0,05 | 0,38 |
| 11/08/07 | 11 | 0,32 | -0,30 | 0,29 |
| 25/08/07 | 0 | 0,59 | -0,28 | 0,36 |
| 16/09/07 | 0 | 0,26 | -0,30 | 0,12 |
| 28/09/07 | 30 | 0,61 | -0,03 | 0,57 |
| 12/10/07 | 1 | 0,24 | -0,49 | 0,69 |
| 26/10/07 | 126 | 0,09 | -0,79 | 0,33 |
| 10/11/07 | 208 | 0,54 | -0,62 | 0,64 |
| 23/11/07 | 83 | 0,13 | -0,62 | 0,75 |
| 08/12/07 | 49 | 0,43 | -0,46 | 0,68 |
| 20/12/07 | 178 | 0,18 | -0,75 | 0,76 |
| 25/01/08 | 206 | 0,10 | -0,10 | 0,20 |
| 08/02/08 | 386 | 0,03 | 0,12 | 0,30 |
| 22/02/08 | 116 | 0,42 | -0,02 | 0,00 |
| 08/03/08 | 164 | 0,27 | 0,31 | 0,43 |
| 20/03/08 | 173 | 0,17 | 0,29 | 0,57 |
| 05/04/08 | 105 | -0,25 | 0,03 | 0,11 |
| 18/04/08 | 176 | -0,25 | 0,04 | 0,71 |
| 01/05/08 | 59 | -0,49 | 0,68 | 0,96 |

Nos Gráficos 1 e 2 estão apresentadas as diferenças relativas médias, associadas aos respectivos desvios padrão para os diferentes usos do solo, durante os períodos chuvoso e estiagem, respectivamente. Verificam-se percentuais menores que 12% nos valores da diferença relativa média para a área de pastagem no período chuvoso, com redução para valores próximos a 5% no período de estiagem. Na área de Mata Atlântica, esse percentual foi superior ao de pastagem em ambos os períodos, enquanto a área de vegetação de várzea foi a que apresentou maior percentual, atingindo valores superiores a 30% durante o período de estiagem. Para as áreas de pastagem e Mata Atlântica os valores foram semelhantes aos encontrados por Comegna e Basile (1997) e Gonçalves, Folegatti e Silva (1999), com percentuais menores que 15%. No caso da área de vegetação de várzea e Mata Atlântica, apesar dos valores serem relativamente maiores em ambos os períodos, estes foram inferiores aos encontrados por Gómez-Plaza, Alvarez-Rogel e Albaladejo (2000), que obtiveram diferenças relativas superiores a 60% em ambiente semi-árido com alta participação da evapotranspiração no comportamento do conteúdo de água no solo.

Analisando-se os valores do desvio padrão, observa-se diminuição significativa da variabilidade da diferença relativa média no período de estiagem nas áreas de pastagem e de Mata Atlântica. No entanto, na área de vegetação de várzea, nota-se aumento da variabilidade nesse período. Este fato mostra que, apesar do período de estiagem apresentar tendência de menor variabilidade da diferença relativa, este pode apresentar comportamento distinto dependendo das características do ambiente da área estudada, especialmente das condições de uso e cobertura do solo e de aspectos ligados à topografia local.

Com isso é possível avaliar que as características do ambiente de cada área também devem ser consideradas para escolha dos pontos, de forma que esses sejam significativos tanto na escala espacial quanto temporal. Observa-se, também, que os maiores valores do desvio padrão ocorreram na área de

vegetação de várzea, o que indica maior variabilidade da diferença relativa na mesma. Este comportamento está associado às características deste ambiente, o qual apresenta valores relativamente elevados do conteúdo de água no solo ao longo do ano. Neste aspecto, constata-se alta sensibilidade da variação da diferença relativa em ambientes com elevado conteúdo de água no solo devido à influência pronunciada da condutividade hidráulica, que por sua vez é sensivelmente reduzida com pequenas diminuições do conteúdo de água no solo. Outro aspecto importante está associado às características pedológicas dos solos de várzea, onde predominam Neossolos Flúvicos com alta variabilidade natural tanto em superfície quanto em profundidade, devido a aspectos de seu processo de formação o qual ocorre em função da deposição de sedimentos durante os períodos de inundação (alúvio). Assim, para uma estimativa mais precisa é recomendada uma amostragem mais detalhada nesses ambientes.

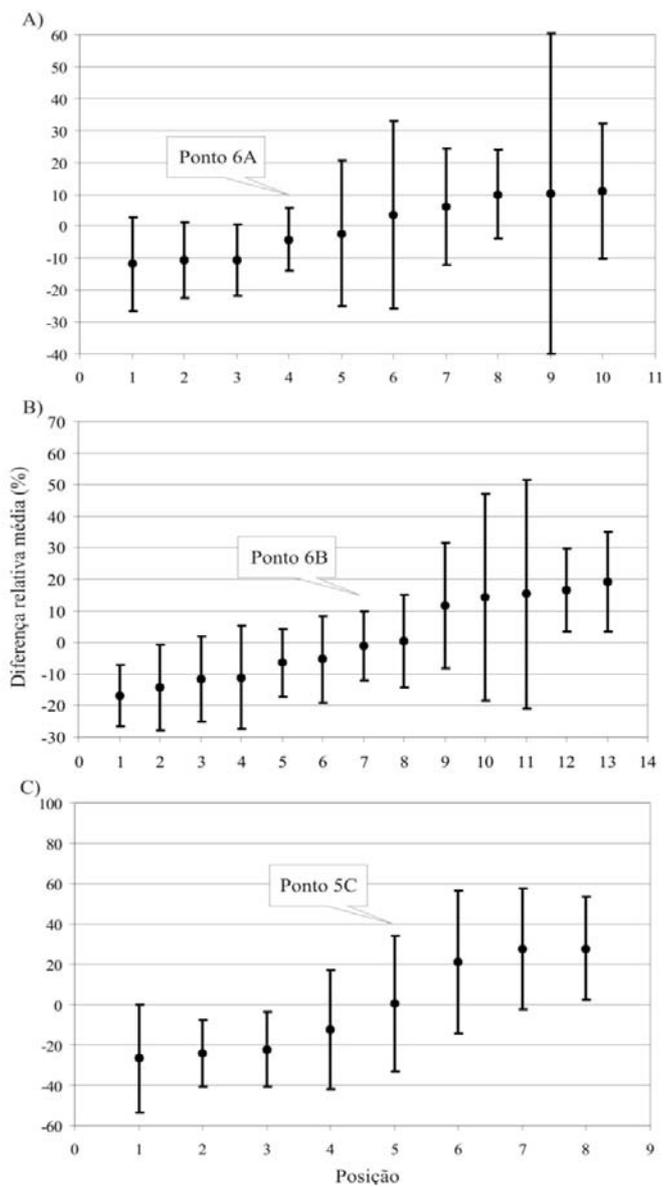


Gráfico 1 Diferença relativa média e respectivo desvio padrão da umidade do solo (%) durante o período chuvoso nas áreas de pastagem (A), Mata Atlântica (B) e vegetação de várzea (C)

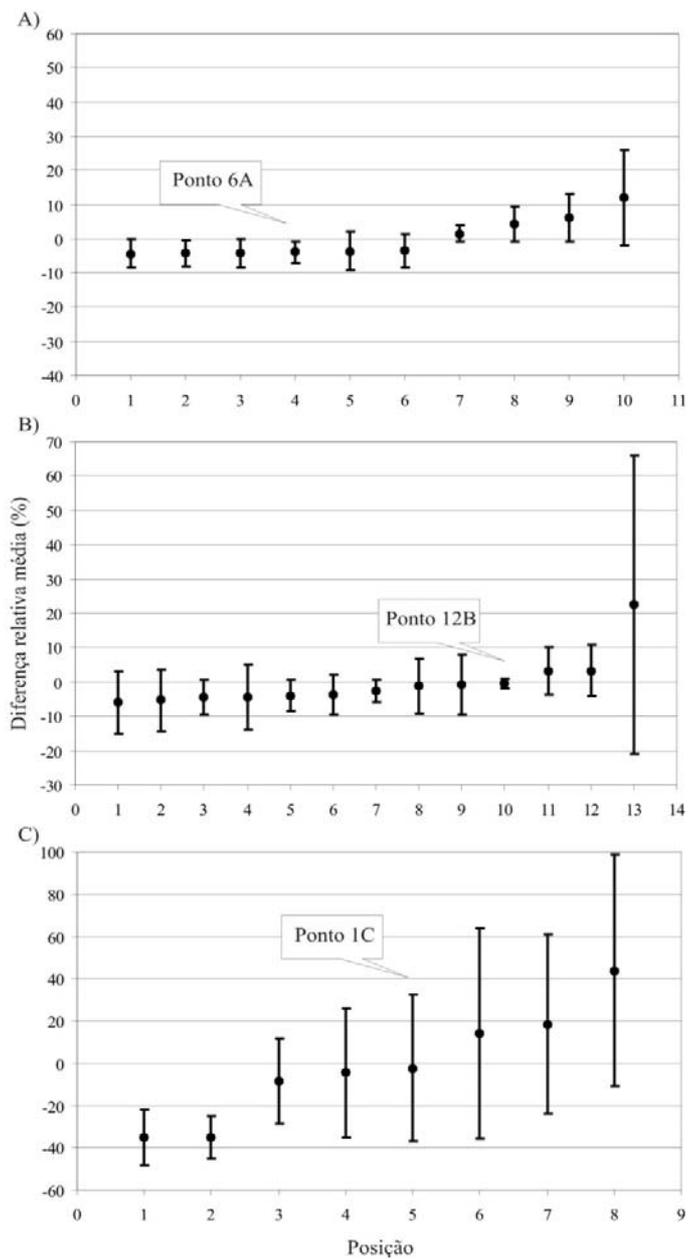


Gráfico 2 Diferença relativa média e respectivo desvio padrão da umidade do solo (%) no período de estiagem para as áreas de pastagem (A), Mata Atlântica (B) e vegetação de várzea (C)

Para a área de pastagem foi escolhido o ponto 6A (Figura 2) como o mais representativo, o qual está situado em área de Cambissolo e apresentou a menor diferença relativa média associada ao menor desvio padrão para os períodos analisados, com valores da diferença relativa em torno de 4 e do desvio padrão em torno de 10% para os períodos correspondentes. Na área de Mata Atlântica, o ponto 6B apresentou maior precisão para o período chuvoso, com valores da diferença relativa próximos de 1 e do desvio padrão próximo de 10%, o qual está associado ao Cambissolo, porém, em condição de relevo forte ondulado. Para o período de estiagem, o ponto 12B foi o mais preciso, com diferença relativa igual a 0 e desvio padrão próximo de 1%, localizado em Cambissolo em relevo menos movimentado que aquele do ponto 6B. Finalmente, na área de vegetação de várzea, o ponto 5C se sobressaiu para o período chuvoso, com valor da diferença relativa próximo de 0 e desvio padrão em torno de 30%, ocorrendo sob condições de Neossolo Flúvico. No período de estiagem, escolheu-se o ponto 1C, com diferença relativa e desvio padrão iguais a 2 e 34%, respectivamente, sendo um ponto também em condição de Neossolo Flúvico.

De acordo com os resultados, verifica-se que os pontos escolhidos para monitoramento no período de estiagem para as áreas de Mata Atlântica e vegetação de várzea se diferiram dos demais períodos, sendo assim recomendado o monitoramento em pontos diferentes durante o período chuvoso e de estiagem para estas áreas na bacia hidrográfica. Adotando-se esse procedimento é possível reduzir os níveis de incerteza da predição, especialmente na área de várzea, cujos pontos escolhidos apresentaram elevados desvios padrão em relação aos outros usos do solo. Em termos práticos, estas observações têm expressivas implicações na estratégia de amostragem do conteúdo de água no solo, sendo subsídio importante na mensuração de dados em nível de campo para tornar o processo mais eficaz a um custo reduzido.

4 CONCLUSÕES

- a) a estabilidade temporal do conteúdo de água no solo é maior na área de vegetação de várzea, menor na área ocupada por Mata Atlântica e intermediária na área de pastagem;
- b) há diminuição significativa da variabilidade da diferença relativa média no período de estiagem para as áreas de pastagem e de Mata Atlântica, enquanto que na área de vegetação de várzea ocorre um ligeiro aumento;
- c) os pontos escolhidos para monitoramento no período de estiagem para as áreas de Mata Atlântica e vegetação de várzea diferiram em relação ao período chuvoso, sendo recomendado que o monitoramento seja conduzido em pontos específicos considerando essa variação.

REFERÊNCIAS

- BESKOW, S. et al. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 169-178, 2009.
- BOSCH, D. D. et al. Large scale measurements of soil moisture for validation of remotely sensed data: Georgia soil moisture experiment of 2003. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 323, p. 120-137, 2006.
- CAMPOS, H. **Estatística experimental não-paramétrica**. 4. ed. Piracicaba: ESALQ/FEALQ, 1983. 349 p.
- COMEGNA, V.; BASILE, A. Temporal stability of spatial patterns of soil water storage in a cultivated Vesuvian soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, p. 299–310, 1997.
- COSH, M. H. et al. Watershed scale temporal and spatial stability of soil moisture and its role in validating satellite estimates. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 92, p. 427-435, 2004.
- FERNANDEZ, J. M.; CEBALLOS, A. Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 312, p. 28–38, 2005.
- FERNANDEZ, J. M.; CEBALLOS, A. Temporal stability of soil moisture in a large- field experiment in Spain. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 1647–1656, 2003.
- FERREIRA, M. M. et al. **Física do solo**. Lavras: UFLA, 2003. 79 p.
- GÓMEZ-PLAZA, A.; ALVAREZ-ROGEL, J.; ALBALADEJO, J. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 14, p. 1261–1277, 2000.
- GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. ; SILVA, A. P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô-central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 1555-1564, 1999.

GRAYSON, R. B.; WESTERN, A. W. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: time and space persistence of mean response. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 207, p. 68–82, 1998.

MELLO, C. R. et al. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, Amsterdam, v. 75, p. 235–247, 2008.

MENEZES, M. D. et al. **Solos da Bacia do Alto Rio Grande (MG): base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola.** 2006. 345 p. Tese (Doutorado em solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

MOHANTY, B. P.; SKAGGS, T. H. Spatio-temporal evolution and time-stable characteristics of soil moisture within remote sensing footprints with varying soil, slope, and vegetation. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 24, p. 1054–1057, 2001.

PACHEPSKY, Y.; GUBER, A.; JACQUES, D. Temporal persistence in vertical distributions of soil moisture contents. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 69, p. 347-352, 2005.

SCHNEIDER, K. et al. Temporal stability of soil moisture in various semi-arid steppe ecosystems and its application in remote sensing. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 359, p. 16– 29, 2008.

STARKS, P. et al. Temporal stability of soil moisture profile. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 324, p. 400-411, 2006.

TEULING, A. J. et al. Estimating spatial mean root-zone soil moisture from point-scale observations. **Journal Hydrology and Earth System Sciences**, Delft, v. 10, p. 755-767, 2006.

THIERDEFELDER, T. K. et al. Inferring the location of catchment characteristics soil moisture monitoring sites, Covariance structure in the temporal domain. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 280, p. 13-32, 2003.

VACHAUD, G. et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 822-827, 1985.

VAN DEN ELSEN, E. et al. Intensive water content and discharge measurement system in a hillslope gully in China. **Catena**, Amsterdam, v. 54, p. 93-115, 2003.

WESTERN, A. W. et al. Spatial variability of soil moisture and its implications for scaling. In: PACHEPSKY, Y. A.; RADCLIFFE, D. E.; SELIM, H. M. (Ed.). **Scaling methods in soil physics**. Boca Raton: CRC, 2003. p. 119–142.