

**RESPOSTAS HIDROLÓGICAS DA BACIA DO RIO
SESMARIA, MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL:
SUBSÍDIOS ÀS TRANSFORMAÇÕES INDUZIDAS PELOS
PLANTIOS DE EUCALIPTO**

MARIANA DE ARAUJO ABDALAD

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito à obtenção do título de Mestre em Geografia na Área de Concentração de Planejamento e Gestão Ambiental.

Orientadora: Prof. Dra. Ana Luiza Coelho Netto

Co-Orientador: Prof. Dr. André de Souza Avelar

Rio de Janeiro

2011

Mariana de Araujo Abdalad

RESPOSTAS HIDROLÓGICAS DA BACIA DO RIO SESMARIA,
MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL: SUBSÍDIOS ÀS
TRANSFORMAÇÕES INDUZIDAS PELOS PLANTIOS DE
EUCALIPTO

Dissertação de Mestrado submetida ao
Programa de Pós-graduação em Geografia
da Universidade Federal do Rio de Janeiro
como requisito parcial à obtenção do título
de Mestre em Geografia na Área de
Concentração de Planejamento e Gestão
Ambiental.

Aprovada em ____ / ____ / ____

Orientadora
Dra. Ana Luiza Coelho Netto – (IGEO/URFJ)

Co-Orientador
Dr. André de Souza Avelar – (IGEO/UFRJ)

Dr. Evaristo de Castro Júnior – (IGEO/UFRJ)

Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho – (COPPE/UFRJ)

“Toda vez que uma árvore é cortada aqui na Terra, eu acredito que ela cresça outra vez em outro lugar – em algum outro mundo.

Então, quando eu morrer, este é o lugar para onde eu quero ir.

Onde as florestas vivam em paz”.

Antonio Carlos Jobim

“Tudo quanto fere a terra, fere também os filhos da terra”.

Cacique Seattle (1885)

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico este trabalho, primeiramente, à minha mãe Lígia Maria Nascimento de Araujo, por todo apoio, incentivo e orientação nesta pesquisa e na vida pessoal.

À minha orientadora, Professora Ana Luiza Coelho Netto, pela orientação e apoio desde a graduação, e por todo aprendizado ao longo desses anos.

Ao meu co-orientador, Professor André Avelar, pelo apoio nas etapas fundamentais, de elaboração e instrumentação.

Ao pesquisador, parceiro e amigo Anderson Sato, por todo apoio intelectual, trabalho braçal, incentivo e paciência.

A toda equipe do GEOHECO, em especial: André Negreiros, Ana Paula Araujo, Rogério Uagoda, Daniele Alves, Gabriela Vianna, Leonardo Brum e Maguinho.

Ao pessoal da Hidrologia da CPRM, parceira no Projeto de Pesquisa: de Salvador - Soriano, que participou da visita de reconhecimento, teve papel decisivo na escolha dos locais das estações, orientou a instalação e se preocupou em acompanhar o progresso dos trabalhos; do Rio de Janeiro: Daniel no geoprocessamento, Mariana, Vanessa e Amanda nas coletas de amostras para qualidade de água e Lígia Araujo pelo apoio técnico; de São Paulo: Francisco Eugênio, Benjamim e Natal na instalação das estações e trabalhos de hidrometria, e ao Vasconcellos pelo apoio dado ao trabalho de hidrometria no Projeto (ele que, de São Paulo, sempre liberava o pessoal para as viagens). Ao pessoal da Hidrologia do INEA e da INFOPER: Luis Tarciso, Luizinho e Isaías pelas instruções e acompanhamento do processo na calibração dos sensores automáticos.

Ao apoio financeiro que recebemos para a realização desta pesquisa por parte do MCT/CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) - editais PRONEX, Universal e CT-Hidro e da FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro). À concessão da bolsa CNPq - Edital MCT/CNPq nº 27/2007 Mestrado, que permitiu a minha dedicação exclusiva a esta pesquisa.

Ao leitor de campo Léo.

Ao meu marido e amigo Nicolau Lage e nosso filhote, Francisco, que nasceu ao longo desta jornada.

Ao meu pai, Rogério Abdalad, e à minha família.

À minha sogra, Juliana Prado, e ao meu sogro, Pedro Lage pela ajuda com o meu filho. Aos meus avós, Vilma Prado Teixeira e Romeu Teixeira, por toda ajuda no dia-a-dia. Ao meu irmão, Manoel Lage.

A todos os meus amigos que me acompanharam nesse processo desde o início, em especial: Dedé (André Negreiros), Dudu (Eduardo Bulhões), Kaká (Álvaro Carlos), Stella Mendes, Mel (Melissa Martingil), Lu (Luiza Brettas) e Sol (Paloma Sol).

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGG/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.) em Geografia na área de concentração em planejamento e gestão ambiental.

RESPOSTAS HIDROLÓGICAS DA BACIA DO RIO SESMARIA, MÉDIO VALE
DO RIO PARAÍBA DO SUL: SUBSÍDIOS ÀS TRANSFORMAÇÕES
INDUZIDAS PELO PLANTIO DE EUCALIPTO

Mariana de Araujo Abdalad

Orientadores: Ana Luiza Coelho Netto

André de Souza Avelar

ABDALAD, Mariana de Araujo. (2011): “Respostas hidrológicas da bacia do rio Sesmária, médio vale do rio Paraíba do Sul: subsídios às transformações induzidas pelo plantio de eucalipto”. Dissertação (Mestrado em Geografia na Área de Concentração de Planejamento e Gestão Ambiental) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A virada do século XXI apresentou uma nova mudança no uso das terras rurais no vale do rio Paraíba do Sul, marcada pela entrada de plantações de eucaliptos, ainda em expansão, destinadas à produção de celulose e papel. Acreditando-se que o reconhecimento das respostas hidrológicas de uma bacia de drenagem, com plantios de eucalipto, possa trazer subsídios para uma avaliação futura da propagação dos impactos desta transformação em direção à calha do rio coletor regional (Paraíba do Sul), foram abordadas questões relativas aos efeitos dessa silvicultura sobre o balanço hidrológico. O objetivo deste estudo é avaliar o impacto do plantio de eucalipto em encostas sobre as descargas em canais fluviais e seus efeitos de projeção à jusante no sistema

de drenagem. A pesquisa foi realizada na bacia do rio Sesmaria, tributário do rio Paraíba do Sul, que possui 149 km² abrangendo o município de São José do Barreiro (estado de São Paulo) e o município de Resende (estado do Rio de Janeiro). Na bacia prevalece uma cobertura de gramíneas com pastagem (71% da área total da bacia), com poucos fragmentos de floresta isolados (21%), concentrados, principalmente, no domínio montanhoso, enquanto a área urbana apresenta-se pouco expressiva (2%). As plantações de eucalipto estão concentradas no centro da bacia, no domínio das colinas convexo-côncavas, e representam 6% da área total. A bacia experimental está sendo monitorada por oito estações fluvio-sedimentométricas, sendo quatro dessas referentes a esta dissertação e instaladas para avaliar as condições quali-quantitativas da água nos canais coletores, antes e depois de receberem os afluentes que provêm das áreas com plantios de eucalipto. Elas foram instaladas de forma a possibilitar o controle diário das contribuições das sub-bacias hidrográficas dos formadores Formoso e Feio e do afluente São João, este onde a presença do eucalipto é expressiva, e de seu efeito no Sesmaria. Foram analisados, para as sub-bacias, indicadores hidrológicos regionais (coeficiente de escoamento e vazão específica), balanço hídrico, e vazões mínimas e médias regionalizadas. Os resultados do balanço hídrico anual simplificado, calculado para as sub-bacias São João e Formoso, indicaram diferença de 140,1 mm entre elas. Utilizando os valores do coeficiente de cultura para estimar a evapotranspiração real com o método FAO Penman-Monteith, concluiu-se que a diferença obtida no balanço hídrico simplificado estaria coerente. Os valores das vazões específicas e coeficientes de escoamento contribuem para a conclusão de que há menos precipitação sendo transformada em vazão na bacia do São João. No entanto, foi inconclusiva a influência do eucalipto sobre a diferença no balanço hidrológico porque, na sub-bacia do São João, a área de cobertura somada a de floresta resulta 68%, enquanto na sub-bacia Formoso, floresta e eucalipto somam 50,1%, o que, por si só, poderia explicar a diferença obtida no balanço hídrico, uma vez que, segundo a literatura, a floresta e o eucalipto podem apresentar taxas de evapotranspiração muito semelhantes.

Abstract of Dissertation presented to PPGG/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Geography in Environmental Planning and Management Area of Concentration.

HYDROLOGICAL RESPONSE IN SESMARIA WATERSHED, MEDIUM
VALLEY OF PARAÍBA DO SUL RIVER: SUBSIDIES TO THE
TRANSFORMATIONS INDUCED BY THE PLANTING OF EUCALYPTUS

Mariana de Araujo Abdalad

Supervisors: Ana Luiza Coelho Netto

André de Souza Avelar

ABDALAD, Mariana de Araujo. (2011): "Hydrological Responses in Sesmaria Watershed, medium valley of Paraíba do Sul river: subsidies to the transformations induced by the planting of eucalyptus". Dissertation (Master of Science in Geography in Environmental Planning and Management Area of Concentration) – Geosciences Institute, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The turn of the twenty-first century presented a new change in rural land use within Paraíba do Sul Medium Valley, marked by the still in expansion entrance of Eucalyptus crop in it, oriented to producing paper and cellulose. Believing that identifying hydrologic responses of a river catchment, having Eucalyptus crop, may bring subsidies to a future assessment of the propagation of the impacts of this transformation towards the region's main river channel (Paraíba do Sul), questions related to the effects of this forestry crop on the water balance were approached. The aim of this study is to assess the impact

of Eucalyptus crop along the hillslopes on stream flows and its effects downstream in the drainage system. The research was developed along the watershed of Sesmaria, a tributary of Paraíba do Sul river, which has 149 km² encompassing municipality of São José do Barreiro (São Paulo State) and the municipality of Resende (Rio de Janeiro State). Along the basin prevails a rangeland cover (71% of total catchment area), with few fragments of isolated forest (21%) concentrated, mainly, in mountainous dominium, and the urban area is not expressive (2%). The Eucalyptus crop fields are concentrated at the center of the basin, within the convex-concave hills dominium, and it represents 6% of the total area. The experimental basin is being monitored by eight sediment yield and stream-flow gauging stations, four of them refer to this dissertation and were installed on main streams in order to evaluate their water quali-quantitative aspects, before and after receiving the tributaries which come from areas with Eucalyptus crop fields. The monitoring gages were installed oriented to provide a daily control of the contribution of catchments of the tributaries Formoso, Feio and São João, this where Eucalyptus is expressively present, and its effect on Sesmaria river. Regional hydrologic indicators (runoff coefficient and specific flow rate), water budget, and regional minimum and medium flow rates were analyzed for the watersheds. The simplified annual water budgets, calculated for São João and Formoso catchments, showed a difference of 140.1 mm between them. Using the crop coefficient values to estimate real evapotranspiration rates with FAO Penman-Monteith methodology, it was concluded that the difference between the simplified water budget results might be coherent. The values of specific flow rate and runoff coefficient contribute to the conclusion that there is less amount of rainfall being transformed into runoff in São João watershed. Nevertheless, the influence of Eucalyptus onto the difference between water budget results for the two watersheds is inconclusive, as for São João Eucalyptus and forest areas summed up 68% of the catchment surface and for Formoso they summed up 50.1%, which by it self could explain the difference in water balance results, since, according to literature, Eucalyptus and forest may present very similar evapotranspiration rates.

ÍNDICE

I) INTRODUÇÃO.....	1
II) OBJETIVOS	8
II.1) GERAL.....	8
II.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
III) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
IV) CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
V) METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
V.1) Precipitação	27
V.2) Rede de monitoramento fluviométrico	30
V.2.1) Cota linimétrica.....	32
V.2.2) Vazão.....	34
V.2.3) A relação cota-descarga, curva-chave	36
V.2.4) Sensores automáticos nas estações fluviométricas	37
V.3) Avaliação das alterações de fluxo superficial e subterrâneo	40
V.3.1) Indicadores regionais e balanço hídrico	40
V.3.2) Vazões mínimas e regionalização da vazão	41
VI) RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
VI.1) Precipitação	43
VI.2) Curvas-Chaves	50
VI.3) Sensores automáticos	55
VI.4) Avaliação das alterações de fluxos superficiais e subterrâneos	64
VI.4.1) Balanço hídrico	64
VI.4.2) Indicadores regionais.....	68
VI.4.3) Vazões mínimas e regionalização da vazão	71
VII) CONCLUSÕES.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL	1
FIGURA 2: CICLO HIDROLÓGICO. (HORTON, 1931)	9
FIGURA 3: HIDROGRAMA. (FONTE: TUCCI, 1993).....	13
FIGURA 4: VAZÕES MENSAS EM RESENDE	19
FIGURA 5: LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL. EM DESTAQUE A BACIA DO RIO SESMARIA (EM VERMELHO) E BACIA DO RIO BANANAL (EM PRETO) (UAGODA, 2006)	21
FIGURA 6: PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL NA BACIA DO RIO SESMARIA	22
FIGURA 7: USO E COBERTURA DA BACIA DO RIO SESMARIA (FONTE: VIANNA, 2006)	25
FIGURA 8: MAPA DO IED BACIA DO RIO SESMARIA	26
FIGURA 9: PLUVIÔMETRO “VILLE DE PARIS”	28
FIGURA 10: PLUVIÔMETRO DIGITAL	28
FIGURA 11: PLUVIÔMETROS DE PVC	28
FIGURA 12: DIVISÃO DAS SUB-BACIAS DA BACIA DO RIO SESMARIA	31
FIGURA 13: RÉGUAS LINIMÉTRICAS RIO SESMARIA E RIO FORMOSO.....	33
FIGURA 14: ESQUEMA D FUNCIONAMENTO DA RÉGUA DE MÁXIMO. (FONTE: PINTO <i>ET AL.</i> 2007)	33
FIGURA 15: RÉGUA DE MÁXIMO RIO FEIO	33
FIGURA 17: MICROMOLINETE GLOBAL WATER (FONTE: HTTP://WWW.GLOBALW.COM/PRODUCTS/FLOWPROBE.HTML)	34
FIGURA 17: MEDIÇÃO A VAU NO RIO SESMARIA.....	34
FIGURA 18: ESQUEMA DE CÁLCULO DA MEIA SEÇÃO (FONTE: SANTOS <i>ET AL.</i> , 2001)	35
FIGURA 20: <i>DATALOGGER</i>	38
FIGURA 20: INSTALAÇÃO DOS SENSORES.....	38
FIGURA 21: CAIXA DOS <i>DATALOGGERS</i>	39
FIGURA 22: ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA SESMARIA	39
FIGURA 23: PRECIPITAÇÕES ACUMULADAS NAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS 2008/2209	43
FIGURA 24: ISOIETAS TOTAIS ANUAIS (BRANDÃO <i>ET AL.</i> , 2000)	44
FIGURA 25: PRECIPITAÇÃO TOTAL MENSAL NA ESTAÇÃO MONTE ALEGRE.....	45
FIGURA 26: PRECIPITAÇÃO TOTAL MENSAL NAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS CIDADE DE FORMOSO E MONTE ALEGRE	46
FIGURA 27: HISTÓRICO DE PRECIPITAÇÃO TOTAL ANUAL EM ESTAÇÕES REPRESENTATIVAS DA BACIA DO RIO SESMARIA.....	46
FIGURA 28: PRECIPITAÇÃO MENSAL ACUMULADA NAS SUB-BACIAS 2008/2009	47
FIGURA 29: POLÍGONOS DE THIESSEN NA BACIA DO RIO SESMARIA	48
FIGURA 30: CLASSES DE PRECIPITAÇÃO NAS SUB-BACIAS DO SESMARIA NO PERÍODO DE DEZEMBRO DE 2008 A NOVEMBRO DE 2009	49
FIGURA 31: SEÇÕES TRANSVERSAIS ESTAÇÃO SESMARIA.....	50
FIGURA 32: RELAÇÃO ENTRE NÍVEL D’ÁGUA E PROFUNDIDADE MÉDIA NA ESTAÇÃO SESMARIA	51
FIGURA 33: CURVAS-CHAVES DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS	52
FIGURA 34: FOTO ESTAÇÃO SESMARIA JULHO DE 2008	52
FIGURA 35: FOTO ESTAÇÃO SESMARIA MARÇO DE 2009.....	53
FIGURA 36: VARIAÇÃO DAS VAZÕES COM O NÍVEL D’ÁGUA NA ESTAÇÃO FAZ. BAHIA.....	54

FIGURA 37: VARIAÇÃO DA PROFUNDIDADE MÉDIA COM O NÍVEL D'ÁGUA NA ESTAÇÃO FAZ. BAHIA	54
FIGURA 38: COTAGRAMA DA ESTAÇÃO FAZENDA BAHIA NO RIO SESMARIA	55
FIGURA 39: MEDIÇÕES A CADA QUINZE MINUTOS DE NÍVEL D'ÁGUA (NA), TURBIDEZ E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) NO PERÍODO 24 HORAS NA ESTAÇÃO FORMOSO	58
FIGURA 40: MEDIÇÕES A CADA QUINZE MINUTOS DE NÍVEL D'ÁGUA (NA), TURBIDEZ E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (C.E.) NO PERÍODO DE 24 HORAS NA ESTAÇÃO SESMARIA	58
FIGURA 41: ESTAÇÃO FORMOSO - NÍVEL D'ÁGUA (MÉDIA DIÁRIA) REGISTRADO NOS SENSORES AUTOMÁTICOS E AS LEITURAS DE COTA DO OBSERVADOR E SUA RESPECTIVA VAZÃO	59
FIGURA 42: ESTAÇÃO FORMOSO - MÉDIAS DIÁRIAS DOS SENSORES AUTOMÁTICOS (TURBIDEZ, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E NÍVEL D'ÁGUA), LEITURA DA COTA FEITA PELO OBSERVADOR E SUA RESPECTIVA VAZÃO, E PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA	59
FIGURA 43: ESTAÇÃO FORMOSO - NÍVEL D'ÁGUA (MÉDIA DIÁRIA) REGISTRADO NOS SENSORES AUTOMÁTICOS, LEITURA DA COTA FEITA PELO OBSERVADOR E SUA RESPECTIVA VAZÃO, E PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA	60
FIGURA 44: ESTAÇÃO FORMOSO - MÉDIAS DIÁRIAS DOS SENSORES AUTOMÁTICOS (TURBIDEZ, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E NÍVEL D'ÁGUA), LEITURA DA COTA FEITA PELO OBSERVADOR E SUA RESPECTIVA VAZÃO, E PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA	60
FIGURA 45: ESTAÇÃO SESMARIA - MÉDIAS DIÁRIAS DOS SENSORES AUTOMÁTICOS (TURBIDEZ, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E NÍVEL D'ÁGUA), LEITURA DA COTA FEITA PELO OBSERVADOR E SUA RESPECTIVA VAZÃO, E PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA	61
FIGURA 46: ESTAÇÃO SESMARIA - NÍVEL D'ÁGUA (MÉDIA DIÁRIA) REGISTRADO NOS SENSORES AUTOMÁTICOS, LEITURA DA COTA FEITA PELO OBSERVADOR E SUA RESPECTIVA VAZÃO, E PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA	61
FIGURA 47: ESTAÇÃO SESMARIA - MÉDIAS DIÁRIAS DOS SENSORES AUTOMÁTICOS (TURBIDEZ, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E NÍVEL D'ÁGUA), LEITURA DA COTA FEITA PELO OBSERVADOR E SUA RESPECTIVA VAZÃO, E PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA	62
FIGURA 48: ESTAÇÃO SESMARIA - MÉDIAS DIÁRIAS DOS SENSORES AUTOMÁTICOS (TURBIDEZ E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA), LEITURA DA COTA FEITA PELO OBSERVADOR E SUA RESPECTIVA VAZÃO, E PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA	62
FIGURA 49: ESTAÇÃO FEIO - MÉDIAS DIÁRIAS DOS SENSORES AUTOMÁTICOS (TURBIDEZ E NÍVEL D'ÁGUA), LEITURA DA COTA FEITA PELO OBSERVADOR E SUA RESPECTIVA VAZÃO, E PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA	63
FIGURA 50: ESTAÇÃO FEIO - NÍVEL D'ÁGUA (MÉDIA DIÁRIA) REGISTRADO NOS SENSORES AUTOMÁTICOS, LEITURA DA COTA FEITA PELO OBSERVADOR E SUA RESPECTIVA VAZÃO, E PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA.....	63
FIGURA 51: BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL CLIMATOLÓGICO EM RESENDE/RJ	65
FIGURA 52: PRECIPITAÇÃO X VAZÃO ESPECÍFICA NAS ESTAÇÕES FORMOSO E SÃO JOÃO	69
FIGURA 53: COEFICIENTE DE ESCOAMENTO NAS ESTAÇÕES SÃO JOÃO, FORMOSO E OUTRAS DO MÉDIO PARAÍBA E RIO PIABANHA	70
FIGURA 54: VAZÃO ESPECÍFICA NAS ESTAÇÕES SÃO JOÃO, FORMOSO E OUTRAS DO MÉDIO PARAÍBA E RIO PIABANHA	70
FIGURA 55: VAZÕES MEDIDAS EM CAMPANHAS SIMULTÂNEAS E AS VAZÕES DE REFERÊNCIA CALCULADAS NAS SUB-BACIAS.....	74
FIGURA 56: ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA DAS VAZÕES MEDIDAS NAS ESTAÇÕES DA BACIA DO RIO SESMARIA	75

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: RESULTADO DO BALANÇO HÍDRICO, VAZÃO ESPECÍFICA, COEFICIENTE DE ESCOAMENTO E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NAS QUATRO ESTAÇÕES NO PERÍODO DE ABRIL A NOVEMBRO DE 2009	64
TABELA 2: DISTRIBUIÇÃO DA COBERTURA VEGETAL NAS SUB-BACIAS SÃO JOÃO E FORMOSO	66
TABELA 3: RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO, VAZÃO ESPECÍFICA, COEFICIENTE DE ESCOAMENTO E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA, NAS ESTAÇÕES FORMOSO E SÃO JOÃO, NO PERÍODO DE DEZEMBRO DE 2008 A NOVEMBRO DE 2009.....	69
TABELA 4: EQUAÇÕES VÁLIDAS PARA A REGIÃO HOMOGÊNEA III (CPRM, 2002)	72
TABELA 5: ÍNDICES UTILIZADOS NA REGIONALIZAÇÃO E A PRECIPITAÇÃO ANUAL PARA AS SUB-BACIAS DO SESMARIA	72
TABELA 6: VAZÕES DE REFERÊNCIA CALCULADAS COM A REGIONALIZAÇÃO.....	73

I) INTRODUÇÃO

Historicamente o vale do rio Paraíba do Sul tem sido submetido a sucessivas mudanças ambientais decorrentes de diferentes usos do solo. Após o ciclo cafeeiro, ocorrido entre meados do século XVIII e final do século XIX, deu-se início à pecuária extensiva que se espalhou ao longo do vale até os dias atuais, acentuando alterações nos regimes climáticos e hidrológicos em âmbito regional (Dantas, 1995). A partir da década de 40 (século XX), essa atividade foi acompanhada pela industrialização e expansão urbana. A virada do século XXI apresentou uma nova mudança no uso das terras rurais, marcada pela entrada de plantações de eucaliptos destinadas à produção de celulose e papel (Figura 1). O eucalipto no vale do rio Paraíba do Sul representa uma nova atividade econômica para a região e está causando transformações na paisagem.

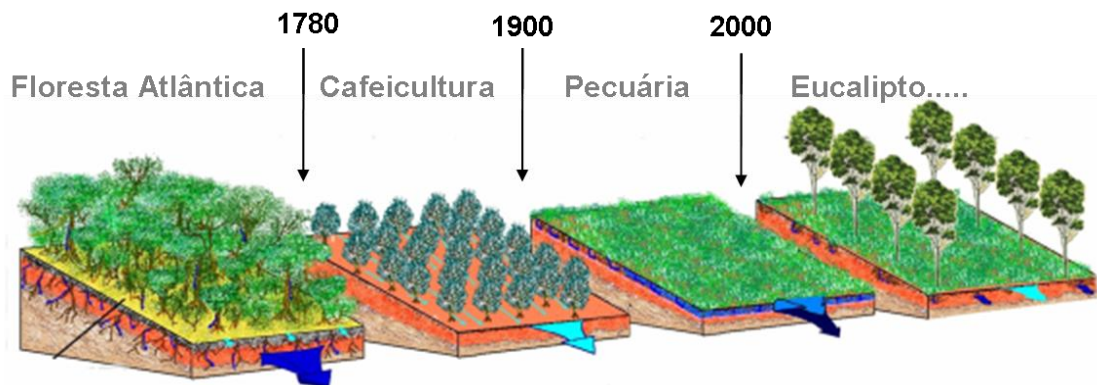


Figura 1: Evolução do uso e ocupação do solo no vale do rio Paraíba do Sul

Em uma primeira observação, Abdalad (2006) constatou que a expansão do eucalipto vem ocorrendo descontinuamente, em manchas, no médio vale do rio Paraíba do Sul (MVRPS). A legislação vigente do Código Florestal Brasileiro permite o plantio industrial em 51% da superfície das propriedades, sendo os 49% restantes destinados à Área de Preservação Permanente (APPs) e ao reflorestamento com espécies nativas. Posteriormente, Vianna *et al.* (2009) constataram que os plantios de eucalipto concentram-se nas sub-bacias do alto, alto-médio e médio do vale do rio Paraíba do Sul, que abrangem

municípios do estado de São Paulo e Rio de Janeiro. Esses autores observaram que os plantios recobrem as médias e altas encostas, e avaliaram que no período de 2000 a 2007, a taxa de expansão dessa atividade foi de 250,77 ha/ano, inserindo-se no domínio de colinas, onde, no vale do rio Paraíba do Sul, prevalece a matriz pastagem.

As plantações de eucalipto existem no Brasil desde o final do século XIX, e esta cultura tem sido apontada como indutora da desertificação em associação com o ressecamento do solo e rebaixamento do lençol freático, desestabilizadora da ciclagem de nutrientes e inibitória do desenvolvimento de outras espécies vegetais por suas substâncias alelopáticas (Jayal, 1985 *apud* Lima, 1996). Por outro lado, existem estudos que comprovam que as espécies plantadas no Brasil possuem resposta estomática à disponibilidade de água (Lima *et al.*, 2003).

A retirada de água do solo depende, primeiramente, da configuração do sistema radicular, isto é, da distribuição e ocupação efetiva do perfil do solo pelas raízes finas (Lima, 1996). O sistema radicular do eucalipto varia muito de acordo com a espécie, algumas apresentam sistema radicular superficial e outras um sistema bastante profundo, podendo alcançar até 30 metros (Jacobs, 1995 *apud* Lima, 1996). A maior parte do sistema radicular das espécies de eucalipto, tanto em florestas naturais quanto em condições de plantações florestais, concentra-se nas camadas superficiais do solo (Ashton, 1975b). As espécies de eucalipto usadas em plantações industriais são geralmente caracterizadas por apresentar um sistema radicular superficial (Lima, 1996).

Segundo Lima (1996), as plantações de eucalipto, com o passar do tempo, estabelecem um significativo controle do escoamento superficial e da erosão. Sharda *et al.* (1998), ao avaliarem as implicações da cobertura de eucaliptos no comportamento hidrológico de pequenas bacias, durante um período de dez anos, em uma região de clima temperado e úmido de montanha ao sul da Índia, concluíram que ocorreu uma redução de 25,4% do escoamento superficial e 27% do fluxo de base fluvial, quando comparados com áreas naturais de gramíneas. Seu estudo apontou também diferenças nessas reduções entre rotações, sendo na primeira rotação do eucalipto verificada uma redução de 16 e 15%, respectivamente, explicadas pela menor densidade do

sistema radicular quando comparada com a segunda rotação. Nessa mesma área de estudo, Sikka *et al.* (2003) encontraram uma redução do fluxo de base nas áreas com eucalipto em 2 vezes na primeira rotação e em 3,5 vezes na segunda.

Zhou *et al.* (2002), no sul da China, comparando três diferentes áreas, terra exposta, floresta mista e floresta de eucalipto, concluíram que os plantios de eucalipto, após um período de seis anos, implicaram uma redução de 80 cm no nível do lençol freático, devida à maior capacidade de absorção de água pelas raízes do eucalipto, reduzindo a recarga do aquífero. Essa redução foi encontrada também na área com floresta mista (30 cm) quando comparada com a de solo exposto. Nesse mesmo estudo, os autores constataram que a taxa de erosão na área com eucalipto foi bastante inferior à de áreas de solo exposto, atingindo em média, no período de dez anos 9,1 e 43,7 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente. No entanto, foi superior à da área de floresta mista (0,3 kg ha⁻¹ mm⁻¹).

Vacca *et al.* (2000), ao compararem dados de campo dos escoamentos superficiais mensurados com a utilização de 18 parcelas em três encostas (seis parcelas em cada uma) com diferentes usos do solo no sudeste da Sardenha (Itália), incluindo: pasto abandonado, mata incendiada e plantação de *Eucalyptus sp*, concluíram que as maiores taxas de escoamento superficial e erosão significativas ocorreram na encosta com eucalipto.

Segundo Cossalter e Pye-Smith (2003), quando uma plantação é estabelecida, há inevitavelmente uma mudança no ciclo hidrológico. No entanto, esta depende de qual tipo de habitat as plantações substituem. Quando as plantações são desenvolvidas em áreas de pastagens, a mudança inicial na hidrologia é muito rápida, tornando-se progressivamente mais intensa na medida em que a plantação se aproxima da maturidade.

Mosca (2003) comparou, utilizando vertedouros, o balanço hídrico de duas sub-bacias sob diferentes usos e cobertura vegetal, uma com *Eucalyptus grandis* e outra com pastagem. As respostas das sub-bacias à precipitação foram bem distintas, indicando maior eficiência da sub-bacia com eucalipto na capacidade de infiltração da água no solo, um padrão mais regularizado da vazão e um consumo de água por evapotranspiração mais elevado, o que pode ser atribuído às diferentes condições de cobertura vegetal. A área de pasto

apresentou maior escoamento superficial direto e maior pico de vazão, onde foram encontrados, para um mesmo evento, valores de 136,86 mm na área com pasto e 3,86 mm na área com eucalipto.

Sato (2008), em sua dissertação de mestrado, realizou estudos hidrológicos em áreas com eucalipto na bacia do rio Sesmaria (MVRPS). Utilizando parcelas de 90 m² verificou que o escoamento superficial no período analisado foi extremamente baixo, sendo expressivo apenas em eventos extremos de chuva. A taxa do escoamento variou em relação à declividade, sendo a média da relação Q (escoamento superficial) / P (precipitação) de 0,1% no divisor da bacia e 0,2% na encosta, atingindo valores máximos de 1,3 e 3,8%, respectivamente. Concluiu-se, também, que a capacidade de retenção hídrica da serrapilheira do eucalipto é semelhante à da floresta ombrófila densa, indicando a possibilidade de ambas regularem semelhantemente a entrada de água no solo. Ao quantificar a interceptação, através de pluviômetros dispostos radialmente, foi comprovado que, devido à estrutura da árvore de eucalipto, a disposição dos galhos favorece a convergência dos fluxos para junto do tronco, provocando uma grande injeção pontual de água na base das árvores (Sato *et al.*, 2011).

Na bacia do rio Bananal (MVRPS), Deus (1991) analisou o escoamento superficial em áreas de gramínea, encontrando valores muito baixos, em uma média de 0,2%, atingindo um máximo de 1%. O autor realizou experimentos com chuva natural e chuva artificial simulando eventos de alta intensidade. Concluiu, também, que o fator declividade influenciou no escoamento superficial, sendo maior nas encostas que nos fundos de vale. A umidade antecedente também foi de fundamental importância para definir o comportamento hidrológico. Quando esta se apresentava elevada, os escoamentos nos fundos de vales foram superiores aos da encosta, atingindo uma média de 3,7 e 2,8%, respectivamente. Em situações de baixa umidade não ocorreu escoamento superficial, toda água infiltrou e, quando a umidade antecedente foi elevada, alcançou valores de escoamento da ordem de 64% do total precipitado.

Lima (1990) concluiu que o escoamento superficial em plantios de eucalipto diminui com o desenvolvimento da vegetação, devido à redução do impacto das gotas sobre o solo. As taxas de escoamento encontradas em seu

estudo foram de 1,7% (plantio com duas aragens) e 2,4% (plantio com uma aragem). Após três anos esses valores caíram para 0,08 e 0,19%, respectivamente. Esses valores se equiparam aos encontrados por Negreiros (2006) na Floresta da Tijuca no Rio de Janeiro, onde o autor quantificou o escoamento superficial utilizando parcelas de 6 m², em áreas de floresta secundária tardia. O autor concluiu que o escoamento superficial foi da ordem de 1,67% e a carga total de sedimentos foi, em média, 78,4 g durante o período analisado.

Na bacia do rio Sesmaria, percebe-se que os inúmeros cortes de estradas de terra para manejo e colheita de eucalipto, que atravessam os divisores de águas, as encostas e os fundos de vales, contribuem para um aumento da erosão (Edel, 2005). Fredriksen (1970) e Versfeld (1981) *apud* Lima (1990) concluíram que o responsável pelas maiores taxas de escoamento superficial e erosão não é a silvicultura em si, estes processos são gerados, principalmente, pelos cortes de estradas e áreas densamente compactadas. Croke *et al.* (1999) concluíram que a maior parte do escoamento superficial em silviculturas de eucalipto relaciona-se com as estradas pela sua baixa capacidade de infiltração, favorecendo o escoamento.

Hopmans *et al.* (2007) avaliaram o impacto da mudança de uso de terra de eucalipto para *Pinus Radiata* na Austrália, analisando a qualidade da água, e a exportação de nutrientes e sedimento em suspensão no período de 1976 a 1982 e, posteriormente, de 1997 a 2003 para avaliar essas mudanças a longo prazo comparando com uma área que permaneceu com eucalipto. Na transição eucalipto-*Pinus*, a turbidez da água passou de 2,0 para 4,3 NTU e, na segunda fase do projeto, os valores encontrados foram 1,2 para eucalipto e 4,3 NTU para *Pinus*. Em um evento extremo de chuva, a turbidez na plantação de *Pinus* aumentou de 4 para 680 NTU, enquanto que, no mesmo evento, na plantação de eucalipto o máximo atingido foi 65 NTU. O autor verificou que o parâmetro turbidez estava fortemente correlacionado com os sólidos em suspensão nas bacias estudadas para valores de turbidez inferiores a 300 NTU. Quanto ao parâmetro condutividade elétrica, na segunda fase do projeto, os valores das áreas permaneceram muito próximos, sendo, em média, 29,2 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ para *Pinus* e 25,7 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ para o eucalipto. Mosca (2003), ao analisar os parâmetros de qualidade da água em duas bacias, uma com pasto e outra com

eucalipto, encontrou valores médios de turbidez de 318 e 42 FTU, respectivamente. Já a condutividade elétrica não apresentou valores tão discrepantes, sendo em média $0,06 \text{ mS}^{\text{c-1}}$ na área de pasto e $0,05 \text{ mS}^{\text{c-1}}$ na área com eucalipto.

Almeida e Soares (2001 e 2003), ao compararem uma plantação de *Eucalyptus grandis* com a floresta nativa em uma região do Espírito Santo (Brasil), concluíram que o eucalipto equipara-se à mata Atlântica quanto à evapotranspiração e ao uso da água no solo, podendo consumir menos água que a floresta nativa. Andréassian (2004) e Bacellar (2005) demonstraram que o corte de plantios, em pequenas bacias, tanto de eucalipto quanto de floresta nativa, eleva o lençol freático devido à redução da evapotranspiração. O efeito inverso também ocorre quando são replantados, nos primeiros anos do plantio, devido ao aumento da evapotranspiração. Lima *et al.* (1990), avaliando a taxa anual em áreas de cerrado, plantios de *Pinus* e plantio de *Eucalyptus grandis*, concluíram que a evapotranspiração anual das três áreas foram de 577, 717, e 922 mm, respectivamente. Almeida *et al.* (2007) estimaram a evapotranspiração em uma plantação de *Eucalyptus grandis*, localizada no Espírito Santo, durante seis anos e concluíram que, em média, essa espécie, no Brasil, utiliza a água de acordo com sua disponibilidade. Os autores encontraram valores de 1.092 mm para a evapotranspiração sendo a precipitação no período de 1.147 mm.

Contrariamente, Zohar e Schiller (1998) compararam o uso da água em áreas com *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus occidentalis* em Israel, através de quatro poços de medição do lençol freático e avaliação da evapotranspiração, no período de novembro de 1994 a setembro de 1996. Os autores observaram valores de transpiração da ordem de 1.882 mm, superiores à precipitação 1.117 mm, que se descontada a interceptação de 15% (168 mm), resultaria 950 mm de precipitação efetiva. A vegetação consumiu 932 mm a mais do que o precipitado, resultando em um rebaixamento de 1,2 m no nível d'água. Marshall *et al.* (1997) estudaram a transpiração de uma plantação de *Eucalyptus camaldulensis*, com nove anos de idade na Austrália, através da técnica de *pulso de calor* (utiliza o calor como um traçador para medir a velocidade da seiva). Os autores afirmaram que a espécie tem um potencial de

baixar o lençol freático, já que consumiu, com a evaporação, 2.032 mm, quando a precipitação anual foi de apenas 432 mm.

Rocha Leão (2005) sugeriu que a reintrodução de uma vegetação florestal nas vertentes e fundos de vale do MVRPS poderia acarretar hipoteticamente duas resultantes hidro-erosivas aparentemente ambivalentes. A primeira seria que o estabelecimento de um sistema radicular mais profundo do que a cobertura de gramínea poderia intensificar a recarga dos aquíferos através dos fluxos d'água preferenciais ao longo das raízes e também nos dutos de raízes mortas, tal como demonstraram experimentalmente os trabalhos de Jansen (2001) e Silveira *et al.* (2005). Neste caso, poderiam intensificar as taxas de erosão nas áreas sob voçorocamento. A segunda estaria associada a mudanças no balanço hidrológico das bacias devidas à alteração na relação entre a estocagem de água e, pela ação mais efetiva do ecossistema florestal, o aumento da evapotranspiração, melhor fixação dos solos pela resistência adicional das raízes e proteção da serapilheira. De Ploey e Cruz (1979) já discutiram essa ambivalência nos estudos sobre escorregamentos da Serra do Mar. Ou seja, as funções da vegetação arbórea, possivelmente poderiam induzir tanto um aumento da atividade erosiva como a estabilização dessa.

Frente ao exposto acima, torna-se relevante apontar algumas questões em relação ao efeito do eucalipto no balanço hidrológico e erosivo, tais como:

- 1) Qual o efeito local dos plantios de eucalipto na produção de água, sedimentos e solúveis das encostas para o canal fluvial?
- 2) Qual o efeito de manchas de eucalipto na bacia de um tributário na dinâmica hidrológica para um coletor regional?

Acredita-se que o reconhecimento das respostas hidrológicas de uma bacia de drenagem submetida ao processo de expansão do plantio do eucalipto possa trazer subsídios para uma avaliação futura da propagação dos impactos desta transformação em direção à calha do rio coletor regional, ou seja, do rio Paraíba do Sul.

II) OBJETIVOS

II.1) GERAL

Este estudo tem como objetivo a análise hidrológica da bacia do rio Sesmaria, buscando-se avaliar o impacto dos plantios de eucalipto em encostas sobre as descargas em canais fluviais. O estudo visa também a contribuir para o entendimento dos efeitos dessa mudança de uso sobre o comportamento hidrológico, constituindo uma contribuição à gestão de recursos hídricos na bacia do rio Paraíba do Sul.

II.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Avaliar a variabilidade espacial das entradas de chuva na bacia.
- 2) Conhecer as descargas líquidas, sólidas e solúveis das sub-bacias do Sesmaria.
- 3) Avaliar as relações entre a precipitação e a descarga fluvial.
- 4) Validar os estudos de regionalização do Paraíba do Sul (CPRM, 2002).

III) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A água no planeta Terra encontra-se constantemente em movimento. Essa dinâmica chama-se ciclo hidrológico (Figura 2), que consiste em um sistema fechado de circulação da água em diferentes estados físicos (sólido, líquido, e gasoso), impulsionado pela energia solar e pela força da gravidade.

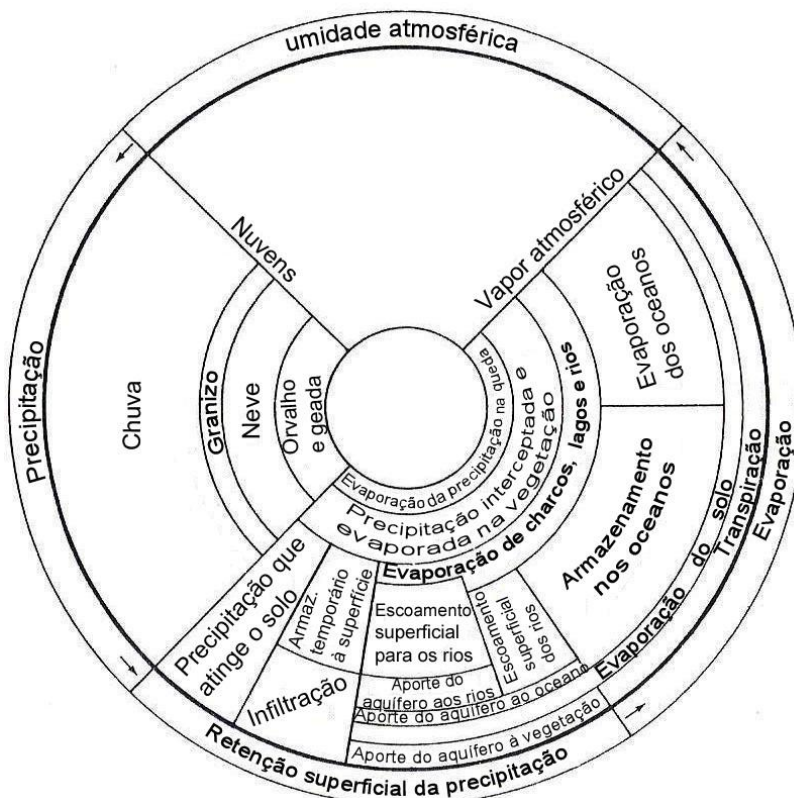


Figura 2: Ciclo hidrológico. (Horton, 1931)

Segundo Bertoni e Tucci (1993), as precipitações podem ser classificadas de acordo com os diferentes processos pelos quais ocorre ascensão da massa de ar. As precipitações convectivas ocorrem quando as massas de ar úmidas sofrem ascensão devida às correntes de ar convectivas. As precipitações frontais (ou ciclônicas) são consequência do encontro de duas massas de ar com temperatura e umidade diferentes ocasionando a ascensão da massa de ar mais quente, que resfria e condensa; as precipitações orográficas ocorrem em regiões onde há obstáculo do relevo, impedindo a passagem de ventos quentes e úmidos, que se elevam e se resfriam

condensando o vapor d'água. As características principais da precipitação são o seu total (altura), a duração, e a distribuição espacial e temporal.

A precipitação, no ciclo hidrológico, é considerada como entrada (*input*) no sistema da bacia de drenagem. A bacia hidrográfica, ou bacia de drenagem, é conceituada como “uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, em um determinado ponto de um canal fluvial” (Coelho Netto, 1994). Ela é considerada “um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado, e a saída (*output*) é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente” (Tucci, 1993). Segundo Strahler (1952) um sistema de drenagem pode ser descrito como um sistema aberto em estado constante, pois possui importação e exportação de componentes, neste caso, troca de materiais e energia.

Ramos *et al.* (1989) definiram evaporação como a taxa de transferência para a atmosfera, da fase líquida para a fase vapor, da água contida em um reservatório natural qualquer. Na evaporação de solos vegetados há que se considerar a soma da evaporação de solo nu mais a transpiração das plantas que compõem a evapotranspiração. A evapotranspiração potencial refere-se à quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, em uma unidade de tempo, de uma superfície extensa e coberta por vegetação de baixo porte e bem suprida de água (Penman, 1956 *apud* Tucci 1993). A evapotranspiração é influenciada pelo clima, albedo, fluxos atmosféricos, intensidade e duração dos eventos chuvosos (Zhang *et.al.* 1999).

A água que se precipita em uma área florestada é parcialmente evaporada e/ou absorvida pelo dossel e pela serrapilheira, antes de atingir a superfície. A essa parcela de água denomina-se intercepção (Dunne e Leopold, 1978), que corresponde à precipitação total menos a precipitação terminal (que alcança o solo). Em áreas florestadas, quando a chuva excede a intercepção, ocorre o fluxo de atravessamento das copas (*throughfall*), correspondendo à precipitação que atravessa o dossel diretamente ou por gotejo de folhas e galhos. A parcela de água que escoia pelos troncos é denominada fluxo de tronco (*stemflow*) (Coelho Netto, 1994). Antes de atingir o solo a água é absorvida pela serrapilheira, caracterizada por uma camada composta por

detritos orgânicos que caem da vegetação (folhas, galhos, sementes e flores). Essa camada favorece a infiltração, distribuindo o fluxo e impedindo o gotejamento direto da chuva, diminuindo a erosão superficial evitando a selagem do topo do solo (Coelho Netto, 1985; Castro Jr., 1992).

Ao atingir o solo, parte da água infiltra e parte escoar pela superfície. A parte que escoar forma os fluxos superficiais hortonianos e superficiais de saturação (Dunne e Leopold, 1978). Ainda para esses autores, o tipo de fluxo varia de acordo com a geologia, clima, topografia, características e uso do solo, vegetação e intensidade e características da chuva. A porção que infiltra, escoar pela matriz do solo formando os fluxos subsuperficiais e subterrâneos, ou é usada pela vegetação após a absorção pelas raízes, retornando à atmosfera por meio da evapotranspiração.

O fluxo hortoniano (Horton, 1933) ocorre quando o excesso de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo. A capacidade de infiltração diminui gradativamente após o início de um evento chuvoso, devido à saturação do perfil do solo e a selagem da superfície que ocorre pelo efeito erosivo do impacto das gotas da chuva (ação por “*splash*” ou salpicamento) (Guerra, 1994). As características desse escoamento são muito influenciadas pelo tipo predominante de solo, devido as diferenças na capacidade de infiltração que ocorrem em função de propriedades físicas dos solos, como dimensões dos grãos, sua união, sua forma e do arranjo das partículas do solo – textura e porosidade. Os solos que contêm material coloidal contraem-se e expandem-se com as modificações do teor de umidade (Wisler e Brater, 1964).

O fluxo hortoniano possui alta velocidade e pode erodir os solos originando um canal erosivo (Coelho Netto, 1994). Já o fluxo superficial de saturação acontece quando o solo satura pela ascensão do lençol freático (fluxo de retorno), impossibilitando a infiltração (Bacellar, 2005). Esse fluxo possui velocidade muito superior ao fluxo subsuperficial e pode abastecer canais gerando fluxos de chuva. Na análise de hidrógrafas (vazão x tempo), ele pode ser responsável pela mudança de perfis com o aumento das vazões de pico e redução do tempo de atraso entre o pico de precipitação e o pico de vazão.

O fluxo subsuperficial ocorre devido à descontinuidade hidráulica do solo, escoando pela zona não-saturada ou abastecendo o aquífero,

contribuindo para os fluxos subterrâneos. O fluxo subsuperficial pode também ser rápido o bastante para gerar picos de vazão no canal fluvial, denominado fluxo de chuva (*stormflow*) ou fluxo rápido (*quickflow*), que são formados pelos fluxos subsuperficiais rasos e superficiais. Esse tipo de fluxo pode ser observado na análise de uma hidrógrafa, por ser gerado logo após o início de um evento chuvoso, aumentando a vazão ao atingir o canal de drenagem.

O fluxo subterrâneo é também chamado de fluxo de base (Dunne e Leopold, 1978) ou fluxo de retardo (*delayedflow*) por ser um fluxo lento, com um período de recessão para chegar ao canal fluvial (Hewlett e Hibbert, 1967). Esse fluxo é responsável pela alimentação do curso de água durante a estiagem (Todd, 1967). A água subterrânea está sempre em movimento, partindo de áreas de recarga em direção a áreas de descarga, desde que não encontre uma barreira impermeável (Ramos *et al.*, 1989), escoando através dos aquíferos, em regime laminar, segundo a lei de Darcy. Não é possível obter uma solução exata da equação que governa o fluxo subterrâneo, porém a sua velocidade, ou velocidade de Darcy, que é um fluxo macroscópico, pode ser definida em um elemento representativo de área total, pelo volume escoado por unidade de área total - grãos e vazios - e por unidade de tempo (Tucci *et al.*, 1993).

As contribuições dos escoamentos superficial e subsuperficial podem ser avaliadas com a análise de hidrogramas fluviais, ou hidrógrafas, observando-se a velocidade de resposta do fluxo. A decomposição das hidrógrafas considera fluxos de chuva e fluxos de base, refletindo, no primeiro caso, as contribuições diretas das chuvas nas flutuações das descargas fluviais e, no segundo, as flutuações sazonais do aquífero subterrâneo, especialmente nos períodos de vazantes, como proposto por Coelho Netto (1985). As flutuações de longo prazo podem ser percebidas em séries temporais relativamente longas, que são mais difíceis de serem obtidas.

A hidrógrafa representa a variação da vazão no tempo, sendo resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico, desde a precipitação à vazão da bacia (Tucci, 1993), ou seja, ela é o resultado do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (Ramos, 1989). Há diversos fatores que são responsáveis pela forma da hidrógrafa. São eles: fatores geológicos, geomorfológicos, pedológicos, distribuição, duração e

intensidade da precipitação, umidade antecedente do solo, cobertura vegetal, tamanho e forma da bacia, altitude, declividade, orientação, tipo de drenagem efetiva, extensão de drenagem indireta; modificações artificiais no rio e urbanização (Wisler e Brater, 1964).

Após o início de um evento chuvoso, existe um tempo de retardo para a chegada dos fluxos ao canal fluvial, que é o tempo de resposta da bacia devido ao deslocamento da água, além de ocorrer perdas por interceptação vegetal, evaporação e evapotranspiração. Este *tempo de retardo* (t_l) é definido como o intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade (cg) da hidrógrafa.

Na hidrógrafa (Figura 3) podem-se identificar ainda outros tempos característicos, como o *tempo de pico* (t_p), que é a duração do início do escoamento superficial até o instante em que este atinge seu máximo valor; o *tempo de concentração* (t_c), que se caracteriza como o tempo para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia chegue ao canal, que é também o tempo decorrido entre fim da precipitação e o fim do escoamento superficial, denominado de ponto de inflexão do hidrograma; *tempo de ascensão* (t_m), caracterizado pelo tempo desde o início da chuva até a ocorrência do pico do hidrograma. A área abaixo dos pontos A, B, C e D na figura do hidrograma representa o fluxo de base, e a área acima desses pontos representa o escoamento superficial e subsuperficial.

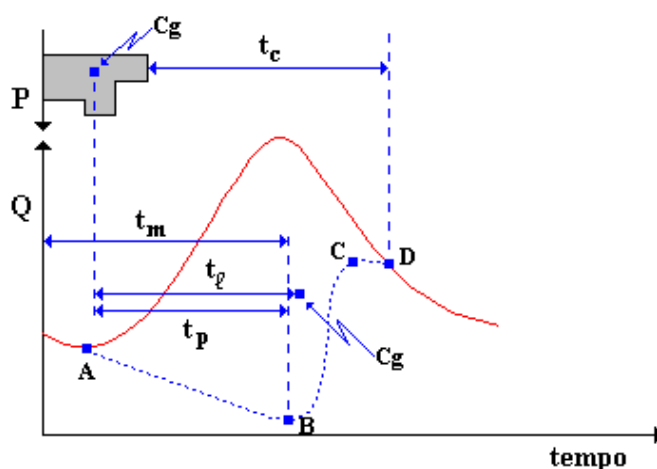


Figura 3: Hidrograma. (Fonte: Tucci, 1993)

No período de estiagem, o escoamento no exutório da bacia é predominantemente formado pelo escoamento do volume armazenado no subsolo da bacia. Tem-se a curva de depleção de ΔV , ou volume armazenado, que funciona como um reservatório linear, cujo comportamento pode ser expresso pela equação:

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \text{ (Eq.1)}$$

onde,

Q_t - vazão em determinado tempo desde o início da recessão (m^3/s)

Q_0 - ponto de inflexão, define a vazão inicial da recessão

t - tempo decorrido desde o início da recessão (dia)

k - constante de recessão da bacia

Este seria o comportamento da curva de recessão do hidrograma, quando cessa totalmente o escoamento superficial, mantendo-se o fluxo de base. A maior dificuldade em se ajustar uma curva aos dados de vazão de estiagem está na fixação do início desta, isto é, a vazão Q_0 e o tempo t_0 . Normalmente, adota-se o ponto de máxima curvatura descendente da hidrógrafa.

Na análise regional das vazões mínimas, deve-se considerar a hidrogeologia da bacia hidrográfica, mas se deve evitar o uso de variáveis independentes que possam introduzir mais incerteza ao processo de estimativa das vazões. Por exemplo, o coeficiente de recessão do escoamento base que, apesar de fortemente relacionado às vazões mínimas, normalmente é estimado de forma muito aproximada através do estabelecimento de um valor médio para toda a bacia (Tucci, 2000).

Fetter (1994) apresenta um método simples de estimativa da recarga anual de um aquífero com base no hidrograma de um curso d'água da região que contenha, no mínimo, dois anos hidrológicos consecutivos com dados observados. O método pressupõe a identificação do fim da recessão do escoamento base em um ano e o início do escoamento base do ano seguinte, vazões que representariam a descarga subterrânea total potencial nos dois instantes de tempo. A diferença entre as vazões identificadas nesses dois pontos constitui o volume armazenado ou recarga do aquífero no período entre as recessões.

A estimativa da quantidade de água que entra, sai e permanece no sistema de uma bacia hidrográfica é possível através do balanço hídrico. A equação do balanço hídrico relaciona as entradas e saídas de água ocorridas em um determinado espaço e período de tempo, com a variação do volume do mesmo líquido no interior deste espaço, durante um determinado intervalo de tempo (Lencastre e Franco, 1984).

Para qualquer sistema é possível equacionar o balanço hídrico identificando e quantificando suas parcelas. Para períodos longos (um ano, por exemplo) a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema hídrico fechado com apenas uma saída, seu exutório, para cuja seção é possível efetuar o balanço hidrológico (Viessman *et al.*, 1977). Tem-se a equação:

$$P = D + EVT + \Delta V \text{ (Eq. 2)}$$

onde,

P - precipitação

D - deflúvio

EVT - evapotranspiração

ΔV - armazenamento

A força de cisalhamento, responsável pelo transporte das partículas, é essencial para iniciar o movimento de partículas pequenas, enquanto a velocidade do fluxo é responsável por carregar partículas maiores. A turbulência e a velocidade do fluxo estão relacionadas com o trabalho que o rio executa, ou seja, influenciam na erosão, no transporte e na deposição dos sedimentos. A velocidade do fluxo depende do gradiente, da profundidade e da rugosidade (Leopold *et al.*, 1964).

Durante um evento chuvoso, parte dos sedimentos das encostas é arrastado pela água e atinge o canal fluvial, constituindo a carga sólida (soma da descarga em suspensão com a descarga do leito). Esta, ao ser deslocada pelo escoamento líquido, dará origem ao transporte sólido. A taxa de sedimentos em uma seção transversal do rio depende da disponibilidade do material na bacia e da capacidade de transporte do fluxo (Einstein, 1964). Enquanto a capacidade de transporte for superior à carga, o escoamento terá capacidade energética para escavar o próprio leito, caso contrário, haverá deposição do material (Lencastre e Franco, 1984).

A mobilidade do fundo do leito difere das margens quanto ao seu comportamento. No fundo do leito, ela é acentuada quando aumentam as velocidades de escoamento e quando os materiais são finos e sem coesão. Essa mobilidade apresenta uma alternância de fases de movimento com escavação (retirada de material) e deposição (assoreamento). O processo que regula estes movimentos é muito complexo e, às vezes, de difícil interpretação: em certas cheias ocorre escavação, em outras deposição e em algumas não há alterações (Jaccon e Cudo, 1989).

O transporte sólido ocorre de duas formas: em suspensão na massa líquida - devido às componentes verticais das forças de turbulência e da força de gravidade - ou por arrastamento no fundo - as partículas deslocam-se rolando ou escorregando sobre as partículas que constituem o leito sem perderem o contato com este. O transporte por arrastamento possui velocidade de deslocamento irregular, com um valor médio muito inferior à velocidade do escoamento. Nos escoamentos sobre fundo móvel não existe uma distinção nítida entre o transporte em suspensão e o transporte sob arrastamento. Considera-se uma forma de transporte de características intermediárias, o transporte por saltação, onde as partículas deslocam-se por saltos, alternando-se as fases de transporte por arrastamento com as fases em suspensão (Lencastre e Franco, 1984).

Ocorrem três tipos de carga no canal fluvial: a dissolvida (processo químico), a carga de sedimento em suspensão - que é a fração mais fina do material sendo mantida em suspensão pela ação de turbulência do fluido - e a do leito do rio. Nos sedimentos em suspensão, a granulometria do material é composta basicamente de silte e argila. Já a carga do leito possui granulometria maior, como cascalho e areia, transportados por saltação, deslizamento ou rolamento da superfície do leito.

Em condições constantes de escoamento, a velocidade das partículas em suspensão não varia sensivelmente, o material em suspensão é carregado na mesma velocidade que a água (Lencastre e Franco, 1984). A concentração de sedimentos aumenta da superfície para o fundo, sendo essa variação dependente da natureza do escoamento. A penetração da luz na água é alterada por partículas em suspensão que provocam a difusão e absorção da luz. A turbidez é a alteração da penetração da luz provocada, por exemplo,

pelo plâncton, bactérias, argilas e silte em suspensão, fontes de poluição que lançam material fino e outros (Porto *et al.*, 1991). A turbidez pode ser considerada como um parâmetro indicador da concentração de sólidos em suspensão na água.

Há uma correlação entre a carga em suspensão e a vazão fluvial. Leopold e Maddock (1953) propuseram uma equação relacionando a carga do sedimento em suspensão com a vazão. A carga em suspensão aumenta em proporções bastante maiores em relação a qualquer outro elemento da geometria hidráulica relacionado com a vazão, devido à carga detrítica não ser proveniente apenas da ação abrasiva do rio sobre o fundo e margens, mas principalmente da lavagem da bacia pelo escoamento superficial (Christofolletti, 1981).

É possível estabelecer uma relação, também, da quantidade de sedimento transportado para eventos de diferentes magnitudes. Conhecendo-se a quantidade de material transportado por fluxos de magnitudes variadas e a frequência dessas magnitudes de fluxo, pode-se calcular a porcentagem do total anual que é transportado por fluxos individuais através da formula proposta por Wolman e Miller (1960, *apud* Christofolletti, 1981), na equação:

$$\%S = 100 * \frac{\sum S_f * f}{S_{anual}} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde,

%S - total de sedimentos carregados por fluxos de diferentes magnitudes

S_f - sedimentos carregados por determinada magnitude de fluxo

f - frequência de determinada magnitude de fluxo

S_{anual} - total dos sedimentos transportados no ano

Com as porcentagens de total de sedimento carregado é possível representar graficamente a relação entre a vazão, a descarga sólida em suspensão (estimada pela turbidez) e dissolvida (estimada pela condutividade elétrica) através de diagramas de frequência e curvas acumulativas de frequência. Nas curvas acumulativas de frequência verifica-se, com mais facilidade, a quantidade de fluxos elevados necessários para transportar 50, 75

ou 90% da carga sólida total no decorrer de um ano (Christofolletti, 1981). Esse mesmo autor demonstra que 50% da carga sedimentar é transportada por fluxos que ocorrem poucas vezes durante o ano, sendo os demais transportados por fluxos baixos e frequentes.

A composição química da água dos rios é determinada por vários fatores, tais como clima, a geologia, a topografia, a vegetação, e o tempo gasto para o escoamento (superficial ou subterrâneo) atingir o canal (Christofolletti, 1981; Porto *et al.*, 1991). Todas as águas subterrâneas contêm sais em dissolução. Os tipos e concentrações dos sais dependem do meio ambiente, do movimento e da fonte de água subterrânea (Todd, 1967). Geralmente, encontram-se maiores proporções de constituintes dissolvidos em águas subterrâneas do que em águas superficiais (Powell, 1964), devido ao maior tempo de exposição dos extratos geológicos solúveis ao contato com a água. Os sais solúveis encontrados nas águas subterrâneas originam-se primordialmente da dissolução de materiais rochosos.

A condutividade elétrica da água é determinada pela presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions. É a capacidade da água de transmitir a corrente elétrica (Porto *et al.*, 1991), ou seja, a condutância depende da concentração de sais minerais ionizados em solução (Powell, 1964).

A condutividade elétrica sofre alterações com a temperatura da água, ela aumentando quando a temperatura se eleva. Hem (1985, *apud* Porto *et al.*, 1991) afirmou que o aumento de 1° C corresponderá a um acréscimo de 2% na condutividade. Para Feitosa *et al.* (1997), o sódio é o principal responsável pelo aumento constante da salinidade das águas subterrâneas, a partir da zona de recarga, em direção às porções mais confinadas ou aos seus exutórios.

Segundo Christofolletti (1981), a quantidade da carga solúvel depende, em grande parte, da contribuição da água subterrânea e do escoamento superficial para o rio, sofrendo variações na escala temporal e espacial. A velocidade da carga dissolvida é a mesma do fluxo d'água, e a acompanha por todo o percurso a não ser que haja saturação, o que ocasionará deposição dos sais. A quantidade de sais varia com o volume de água, ou seja, em épocas chuvosas há uma diminuição da concentração, devida à quantidade de fluxo superficial que chega ao canal, e, em épocas de seca, há uma elevação da

concentração, já que o abastecimento do canal é predominantemente pelo fluxo de base. Nas bacias hidrográficas, os afluentes possuem concentrações diferentes de sólidos dissolvidos, devidas às variações espaciais dos fatores controlantes. Quando dois afluentes se encontram, a vazão aumenta e o material dissolvido representa uma mistura do conjunto de características de ambos. Em cada curso de água, o produto da concentração vezes a vazão fornece o valor da carga total do rio.

O regime hidrológico fluvial é resultado de diversos processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica, como infiltração, evapotranspiração, escoamentos superficial e subterrâneo, cada um com sua escala temporal, a partir dos eventos de precipitação. Nas bacias hidrográficas, as zonas de produção de escoamento superficial estão condicionadas às características fisiográficas locais e às condições antecedentes de umidade e, portanto, podem variar muito de uma bacia para outra (Whipkey e Kirkby, 1978). Para avaliar as contribuições de cada escoamento para a vazão fluvial é necessário monitorar as variáveis hidrológicas segundo diversas discretizações no tempo: durante eventos de chuva, e em escala diária, mensal e anual, preferencialmente, ao longo de um ano hidrológico. Na bacia do rio Paraíba do Sul, o ano hidrológico pode ser considerado de setembro a agosto (Figura 4), como apresentado em CPRM (2002).

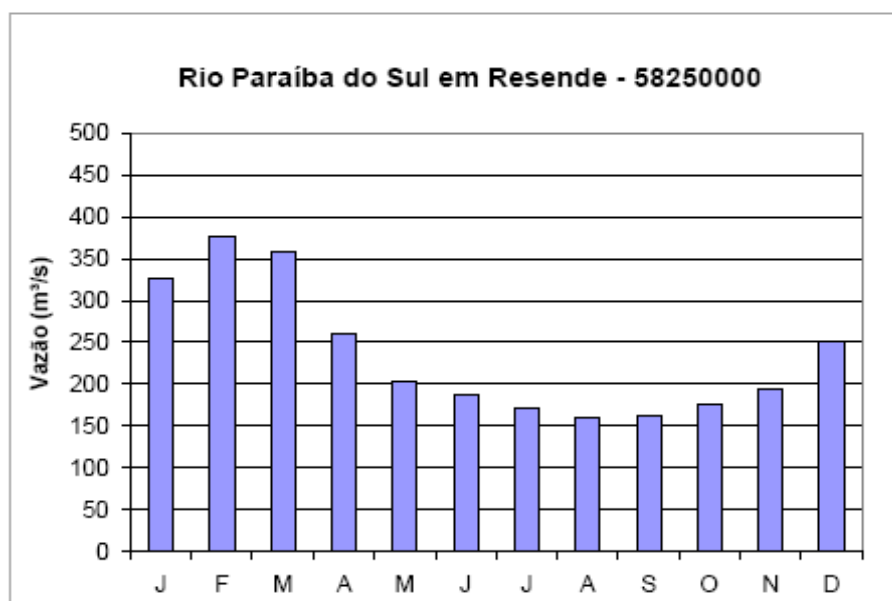


Figura 4: Vazões mensais em Resende

IV) CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região do MVRPS insere-se no planalto sudeste brasileiro, na porção central da faixa móvel Ribeira, ao sul do cráton de São Francisco. Compreende quatro compartimentos tectônicos com orientação dominante NE-SW: um de materiais de origem autóctone, e três de materiais alóctone (Heilbron, 1995). O ciclo orogênico Brasileiro (Neo-Proterozóico e Cambro-Ordoviciano) é marcado por forças compressivas e dúcteis responsáveis pela formação do cinturão móvel; dois ciclos marcados por forças extensivas e rúpteis, relacionados à abertura Atlântica das margens passivas (iniciada no Jurássico) e o “*rifting*” continental de idades neocretácea e paleogênica (Coelho Netto, 2003).

Os compartimentos tectônicos descritos incluem três grupos litológicos: o embasamento, de idade anterior aos 1,8 G.a.; as rochas supra-crustais posteriores aos 1,8 G.a e as rochas granitóides pós-tectônica Brasileiro e colisionais. A principal estrutura tectônica mais antiga é a megasinformal do Paraíba do Sul. A tectônica cretácea-paleogênica foi responsável pelo sistema de rifteamento do sudeste brasileiro, caracterizado por uma série de falhamentos rúpteis e subverticais. Falhas normais com orientação E-NE e mergulhos para SE definem o limite dos blocos norte das bacias sedimentares Cenozóica (bacias de Resende e Volta Redonda). As falhas transcorrentes são orientadas no sentido NW-NNW; a zona transtensional de Volta Redonda, orientada no sentido NW-S é uma feição regional marcante e relativa a esses eventos. Trata-se de uma zona de transferência que conectou os “*rifts*” do Paraíba e da Guanabara, deslocando o eixo da megasinformal do Paraíba.

Estes eventos também foram responsáveis pela propagação regional de dois conjuntos principais de fraturas sub-verticais orientadas para NE-SW e NW-SE. As falhas normais promoveram soerguimentos e subsidências diferenciadas, assim como a exumação de blocos crustais. Desde então, a renovação do relevo, marcada pelo rebaixamento regional dos níveis de base e suas estruturas subjacentes, tem influenciado a evolução do sistema regional de drenagem (Coelho Netto, 2003). O curso médio do rio Paraíba do Sul corre, em sua maior parte, ao longo do “*graben*” da principal falha normal (E-NE), mudando o seu curso para NW-SE, entre Floriano e Barra Mansa, onde corre sobre a zona transtensional de Volta Redonda. A bacia do rio Sesmaria, como

as bacias vizinhas do rio Bananal e Barreiro de Baixo, segue orientação das estruturas geológicas herdadas da última fase orogênica do Cenozóico: drena para NE no reverso da escarpa Atlântica, chamada localmente de Serra da Bocaina.

A bacia experimental do rio Sesmaria, que possui 149 km², abrange os municípios de São José do Barreiro (Estado de São Paulo) e Resende (Estado do Rio de Janeiro). A bacia drena parte do MVRPS, próximo ao paralelo 23° S, entre as cidades de Formoso, Barreiro de Baixo e Resende (Figura 5). Localiza-se próximo à bacia do rio Bananal, onde o GEOHECO possui uma área-laboratório de campo desde 1982, para estudos hidrológicos, erosivos e de evolução de cabeceiras de drenagem, a qual oferece uma vasta base de informações científicas, como sumarizado no trabalho de Coelho Netto (2003).

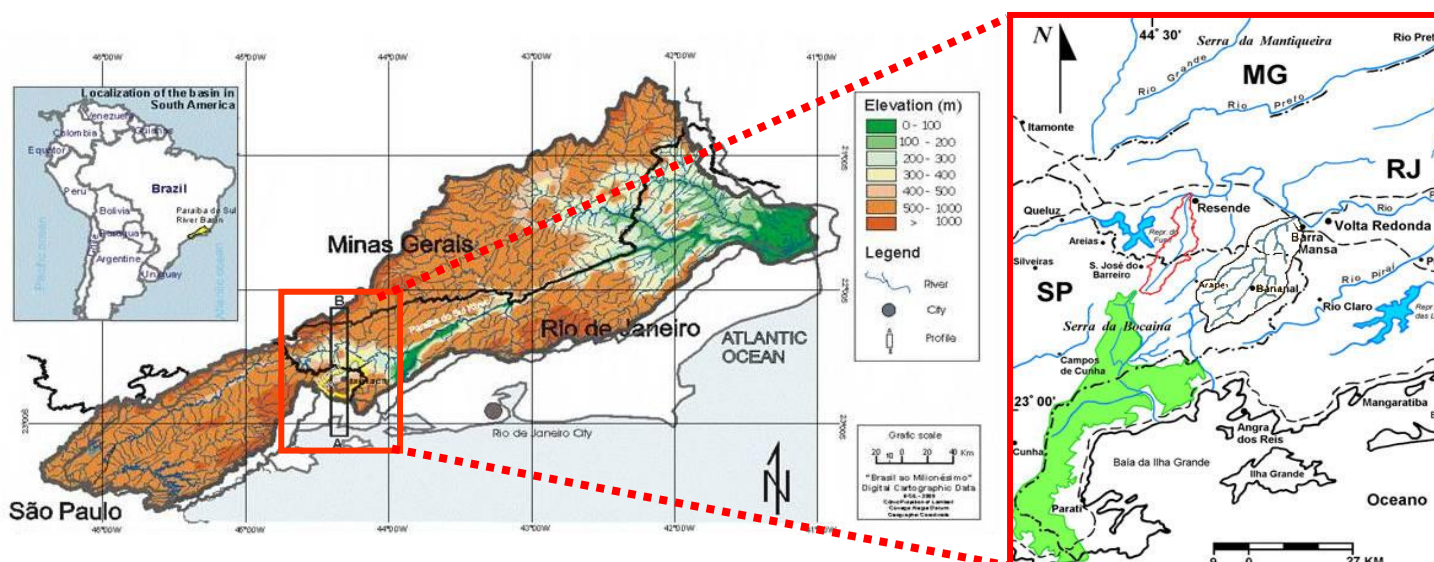


Figura 5: Localização da bacia do rio Paraíba do Sul. Em destaque a bacia do rio Sesmaria (em vermelho) e bacia do rio Bananal (em preto) (Uagoda, 2006)

Na região, há uma predominância do clima mesotérmico do tipo Cwa de Köppen, apresentando temperatura média anual em torno de 20 °C e as temperaturas médias anuais variam de 16 °C em julho a 23 °C em fevereiro. Originalmente recoberto pela Floresta Latifoliada Tropical (Mata Atlântica), a região é influenciada pela atuação da Massa Tropical Atlântica e pela Massa Polar. O choque entre esses dois sistemas atmosféricos de alta pressão é responsável pelas frentes frias que tendem a se concentrar nos meses de

verão, sendo responsáveis pelas variações na pluviosidade média anual (Rocha Leão, 2005). Segundo Sato (2008) a pluviosidade média na região é de 1.700 mm, com maiores índices nas áreas montanhosas, com chuvas concentradas de outubro a março (Figura 6). A precipitação média anual no período de 1970–1995 registrada na estação pluviométrica Arapeí (7 km de distância da área de estudo) é de 1.588 mm, com cerca de 70% das chuvas ocorrendo no período de novembro a março.

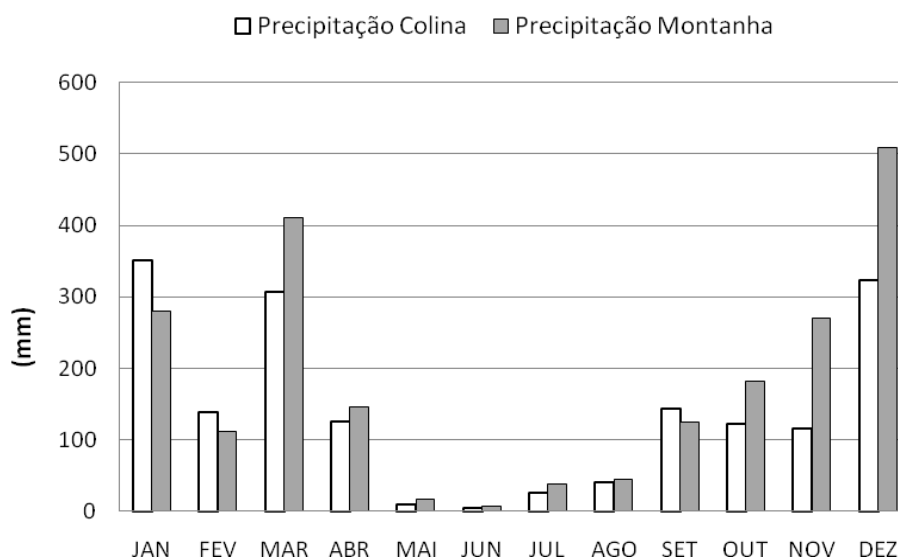


Figura 6: Precipitação média mensal na bacia do rio Sesmária

A bacia apresenta dois compartimentos topográficos principais, com desnivelamento topográfico de 1.680 m (de 2.080 a 400 m), semelhantes à bacia do rio Bananal: um montanhoso e outro de colinas convexo-côncavas com ocorrência de espessos pacotes sedimentares da transição do Pleistoceno-Holoceno (Coelho Netto, 2003). Os latossolos desta região são espessos, muito lixiviados e pobres em nutrientes, principalmente após a erosão do horizonte A com o desmatamento da floresta Atlântica provocado pela atividade cafeeira no século XVIII. Mello (1992) em sua dissertação de mestrado realizou levantamentos estratigráficos e caracterização dos depósitos sedimentares em uma cabeceira de drenagem em anfiteatro entulhado de grandes dimensões, tributária do rio Sesmária. O autor documenta uma sequência deposicional que classifica como Aloformação Manso e ressalta que o coletor fluvial principal desta bacia encontra-se confinado em um vale estreito

e alongado em direção NE-SW: as cabeceiras de drenagem entulhadas, tributárias do coletor principal, distribuem-se ortogonalmente nesta direção.

As transformações da cobertura vegetal resultaram de um processo histórico de mudanças de uso. A primeira grande devastação da floresta Atlântica original, decorrente da expansão da cafeicultura por todo o vale do rio Paraíba, promoveu alterações nos regimes climáticos e hidrológicos em âmbito regional (Dantas, 1995). Além disto, promoveram modificações nas relações biota-água-solo o que teve como consequência a retomada da dissecação do relevo por reativação de altas taxas de erosão nos depósitos quaternários dos fundos de vales, preenchidos por sedimentação aluvial e coluvial Quaternária (Coelho Netto, 1998).

Os processos erosivos na bacia do rio Bananal estão relacionados à exfiltração da água subterrânea sob descargas críticas (*seepage erosion*) tal como propõe o modelo de Dunne (1970 e 1980) e originam canais incisos, do tipo voçorocas (Coelho Netto *et al.*, 1988; Coelho Netto e Fernandes, 1990; Avelar e Coelho Netto, 1992; Coelho Netto, 2003; Rocha Leão, 2005). Estes autores concluíram que o avanço regressivo das voçorocas sobre as encostas mais íngremes pode catalisar a ocorrência de deslizamentos, os quais, junto com a erosão subsequente nas cicatrizes erosivas, promoveriam o aumento da carga de sedimentos que convergem para os canais fluviais durante os períodos de chuvas. Segundo Avelar e Coelho Netto (1992), a formação dessas voçorocas e, conseqüentemente, das concavidades na bacia do rio Bananal, está relacionada com o controle lito-estrutural das fraturas sub-verticais, que permitem a exfiltração da água subterrânea, podendo, em alguns casos, ter ascensão artesiana.

Nos estudos conduzidos por Deus (1991) em Bananal, em uma cabeceira de drenagem com processo de voçorocamento com grande presença de formigas saúvas do gênero *Atta*, o autor concluiu que as escavações das formigas saúvas são importantes vias de entrada de água no solo, sendo responsável pela redução do escoamento superficial. Na bacia do rio Sesmaria verifica-se a presença das formigas saúvas, as quais são combatidas com altas quantidades de formicida.

Na bacia do rio Sesmaria (Figura 7), prevalece uma cobertura de gramíneas com pastagem (71% da área total da bacia), com poucos

fragmentos de floresta isolados (21%), concentrados principalmente no domínio montanhoso, e a área urbana apresenta-se pouco expressiva (2%). As plantações de eucalipto estão concentradas no centro da bacia no domínio das colinas convexo-côncavas e representam 6% da área total (Sato, 2008). Elas estão localizadas nos divisores de drenagem e nas encostas laterais das colinas, enquanto os fundos de vales apresentam vegetação nativa (Floresta Atlântica) em diferentes estágios sucessionais. Os plantios são compostos por clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* (1ª rotação) iniciado em 2004, com espaçamento regular de 3x2 m em três fazendas (Independência, Monte Alegre e São Pedro III) e espaçamento de 3x1,5 m na fazenda Caximonan.

A bacia experimental do rio Sesmaria está sendo monitorada por oito estações fluvio-sedimentométricas. Quatro dessas estações estão instaladas para avaliar as condições quali-quantitativas da água nos canais coletores, antes e depois de receberem os afluentes que provêm das áreas com plantios de eucalipto, e seus dados foram utilizados nesta dissertação. As outras quatro estão em cabeceiras de drenagem, nas quais se pretende comparar as alterações hidrológicas e erosivas de diferentes tipos de manejo nos plantios, como espaçamento e rebrota (tese de doutorado do pesquisador Anderson Mululo Sato). As oito estações possuem equipamentos automáticos de nível d'água, turbidez e condutividade elétrica. A bacia contém também nove pontos com medições diárias de chuva, sendo quatro localizadas junto às quatro estações fluviométricas dos rios principais, duas (automáticas) nas estações fluviométricas de cabeceira, a sétima em uma fazenda junto às plantações de eucalipto, a oitava próxima ao ponto mais elevado da bacia do Sesmaria e a nona na cidade de Formoso - que pertence a FURNAS e é por ela monitorada.

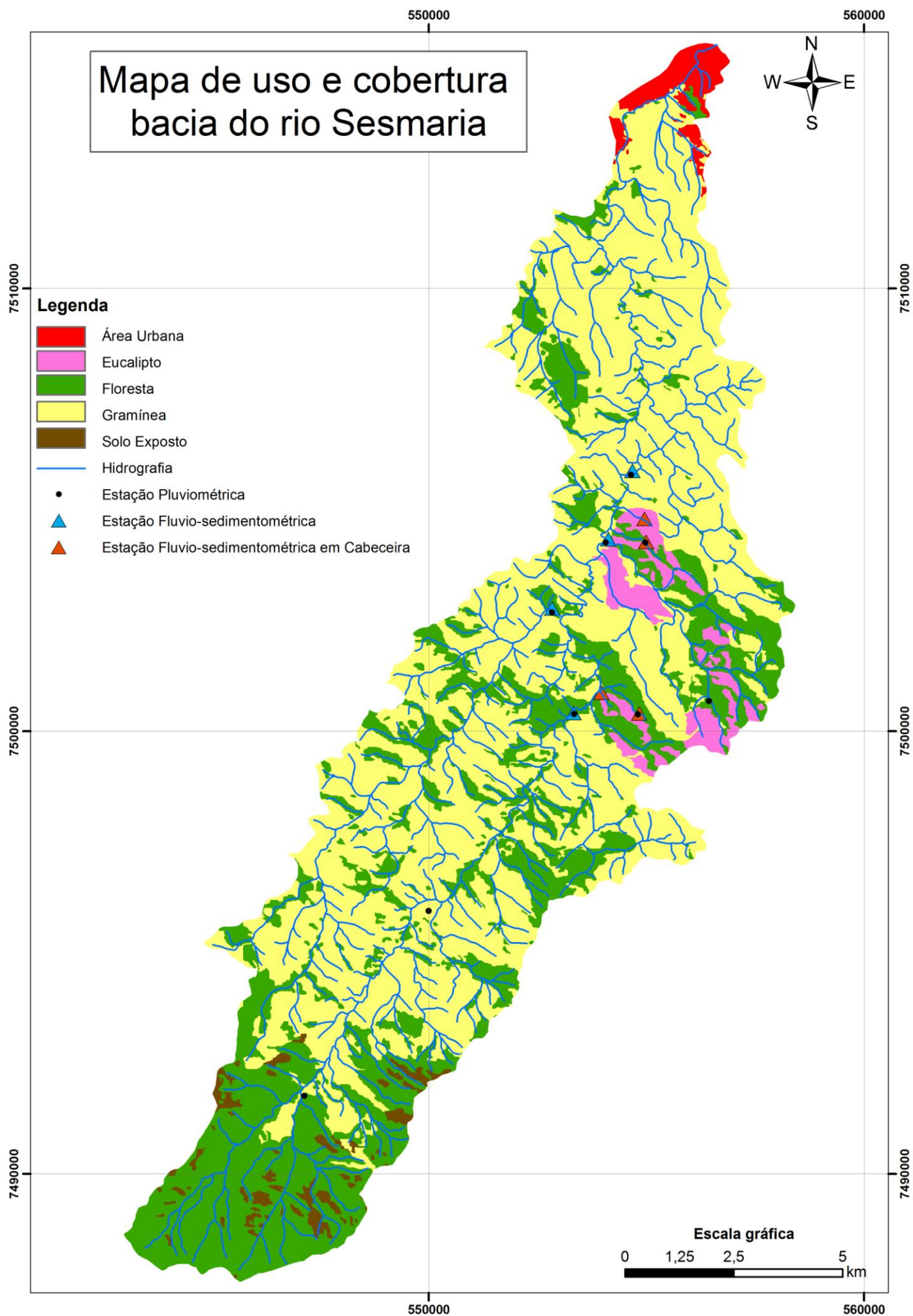


Figura 7: Uso e cobertura da bacia do rio Sesmaria (Fonte: Vianna, 2006)

A bacia do rio Sesmaria apresenta uma maior eficiência de drenagem em sua cabeceira, na sub-bacia do rio Formoso, como mostra o mapa de IED - índice de eficiência de drenagem (Figura 8). O IED indica as possíveis saídas de fluxos no exutório da bacia e, também, as possibilidades de infiltração advindas de eventos chuvosos (Relatório ZEE/RJ, 2008), revelando a importância de alguns parâmetros geomorfológicos que influenciam o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. O IED é definido como o valor resultante do produto do gradiente da bacia pela densidade de canais de drenagem (Coelho Netto *et al.*, 2007), ou seja,

$$\text{IED} = G \cdot Dd \text{ (Eq. 4)}$$

onde,

G - Dn/Ccp - Desnívelamento (m)/Comprimento do eixo côncavo principal (m).

Dd - Cd/A - Comprimento total de canais de drenagem (m)/ Área total (ha).

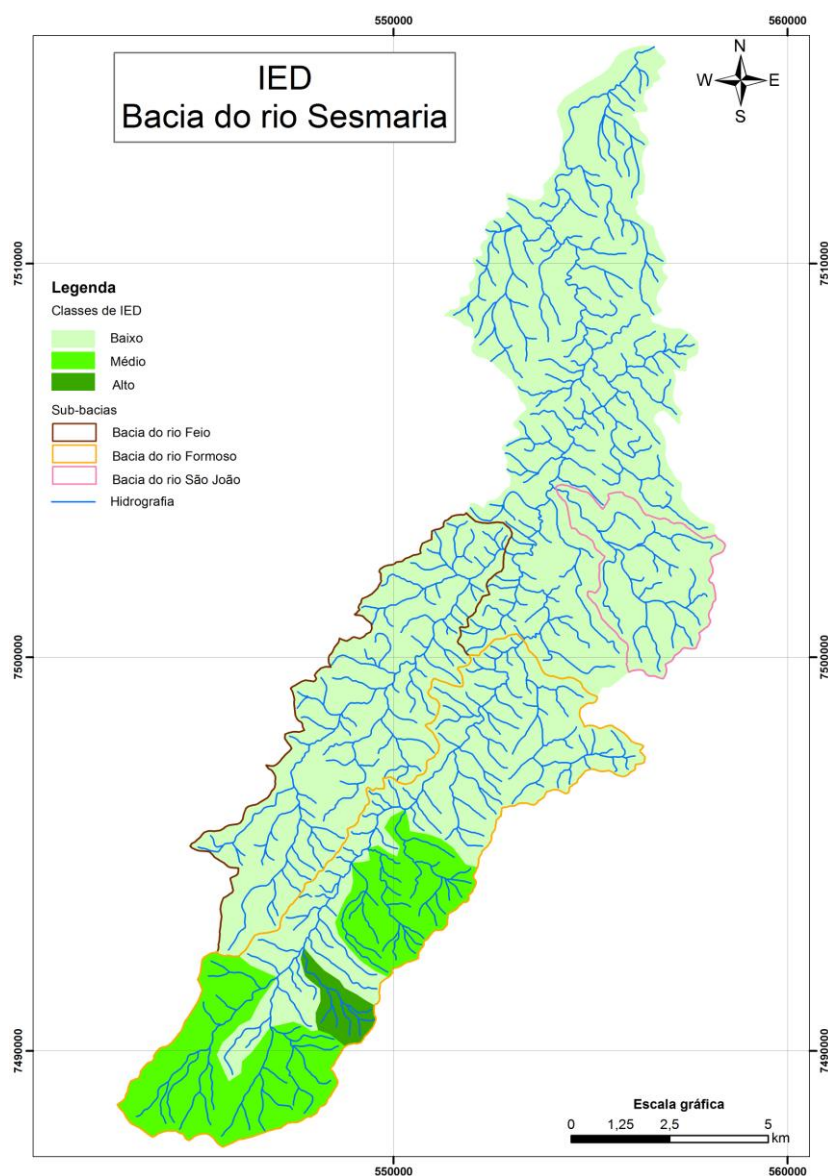


Figura 8: Mapa do IED Bacia do rio Sesmaria

V) METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS

V.1) Precipitação

O monitoramento da precipitação na bacia foi realizado em oito diferentes pontos. Na cabeceira de drenagem foi instalado em junho de 2009 um pluviômetro convencional do tipo “Ville de Paris” (Figura 9); em duas estações fluviométricas em cabeceiras de drenagem foram instalados dois pluviômetros digitais (Figura 10), previamente calibrados em laboratório, associados a um armazenador de dados (*data logger*) com registro de chuva a cada cinco minutos. Em outubro de 2008 foram instalados três pluviômetros de PVC (Figura 11) em cada estação fluviométrica (quatro estações) e em uma fazenda localizada no centro da bacia. Há, portanto, oito estações pluviométricas, duas delas com um pluviômetro digital e cinco com pluviômetros de PVC, e outra com um “Ville de Paris”. Na cidade de Formoso existe uma estação pluviométrica de FURNAS da qual se obtém acesso aos dados diários todos os meses.

Os pluviômetros de PVC são feitos com tubos de 100 mm de diâmetro de abertura, com funis feitos de garrafa PET na área de entrada do coletor e uma bola de pingue-pongue de plástico, para evitar a evaporação da água acumulada e a entrada de folhas e galhos. As leituras do total de chuva diária são realizadas às 7:00 h por um leitor de campo, previamente treinado, com a utilização de provetas graduadas. Os pluviômetros ficam suspensos a 1,5 m do solo por estacas de madeira.

Os dados de volume foram convertidos em altura (mm) utilizando-se a equação:

$$h(mm) = \frac{V}{A} = \frac{V}{\pi \times R^2} = \frac{V \times 1000}{\pi \times 2500} = \frac{V \times 1000}{7850} \text{ (Eq. 4)}$$

Onde “h” é a altura de chuva em mm, “A” é a área de captação do pluviômetro, “V” é o volume em mL, “1000” é o fator de conversão de mL para

mm^3 , “ π ” tem valor aproximado para 3,14. A área de captação do pluviômetro é 7.850mm^2 .

A instalação de três pluviômetros em cada ponto foi feita por motivos de segurança, criando-se uma redundância para o caso de haver algum problema, como entupimento. Com mais de um pluviômetro não se perderia o dado diário, que é calculado como a média das leituras dos três.



Figura 9: Pluviômetro “Ville de Paris”



Figura 10: Pluviômetro digital



Figura 11: Pluviômetros de PVC

Para obtenção da precipitação média nas bacias, utilizou-se o método dos polígonos de Thiessen. Segundo Tucci (1993), se aceita a precipitação média como sendo uma lâmina de água de altura uniforme sobre toda a área considerada, associada a um período de tempo dado.

A metodologia baseia-se nas seguintes etapas:

- 1) Ligar os postos pluviométricos por segmentos de reta;
- 2) Traçar linhas perpendiculares aos segmentos retilíneos passando pelo meio da linha que liga os postos (a mediatriz);
- 3) Prolongar as linhas perpendiculares até o encontro de outra. O polígono é formado pela interseção das linhas e destas com o divisor da bacia, correspondendo à área de influência de cada posto;
- 4) A precipitação média é calculada pela equação:

$$P_m = 1/A \cdot \sum A_i P_i \text{ (Eq. 5)}$$

onde,

A - área total da bacia

A_i - área de influência do posto

P_i - a precipitação registrada no posto i

O método de Thiessen considera a não uniformidade da distribuição espacial dos postos, mas não leva em conta o relevo da bacia. Optou-se por esse método pelo fato de a bacia estar sendo bem monitorada com um número considerável de estações pluviométricas e pela facilidade da obtenção dos resultados através do programa ArcMap utilizando a ferramenta “create Thiessen polygons”. Com o método de Thiessen, obtêm-se as áreas de influência de cada estação, que serão sempre as mesmas, independente do evento chuvoso. Uma vez estabelecida a rede, as áreas de influência permanecerão constantes, facilitando o cálculo da precipitação média diária da bacia, pois, para cada dia, variam somente as precipitações (Tucci, 1993).

V.2) Rede de monitoramento fluviométrico

Foram selecionados quatro pontos da bacia para a instalação das estações fluviométricas. Os pontos de monitoramento escolhidos foram em dois rios que se localizam a montante das plantações de eucalipto na bacia, o rio Feio e o rio Formoso, que ao se encontrarem formam o rio principal (rio Sesmaria), uma estação em um afluente (rio São João) que passa no interior das plantações e uma a jusante das plantações, no rio principal.

As estações fluviométricas controlam os fluxos nas sub-bacias referentes a cada rio, como pode ser visualizado na Figura 12. As vazões medidas nesses pontos foram analisadas comparativamente.

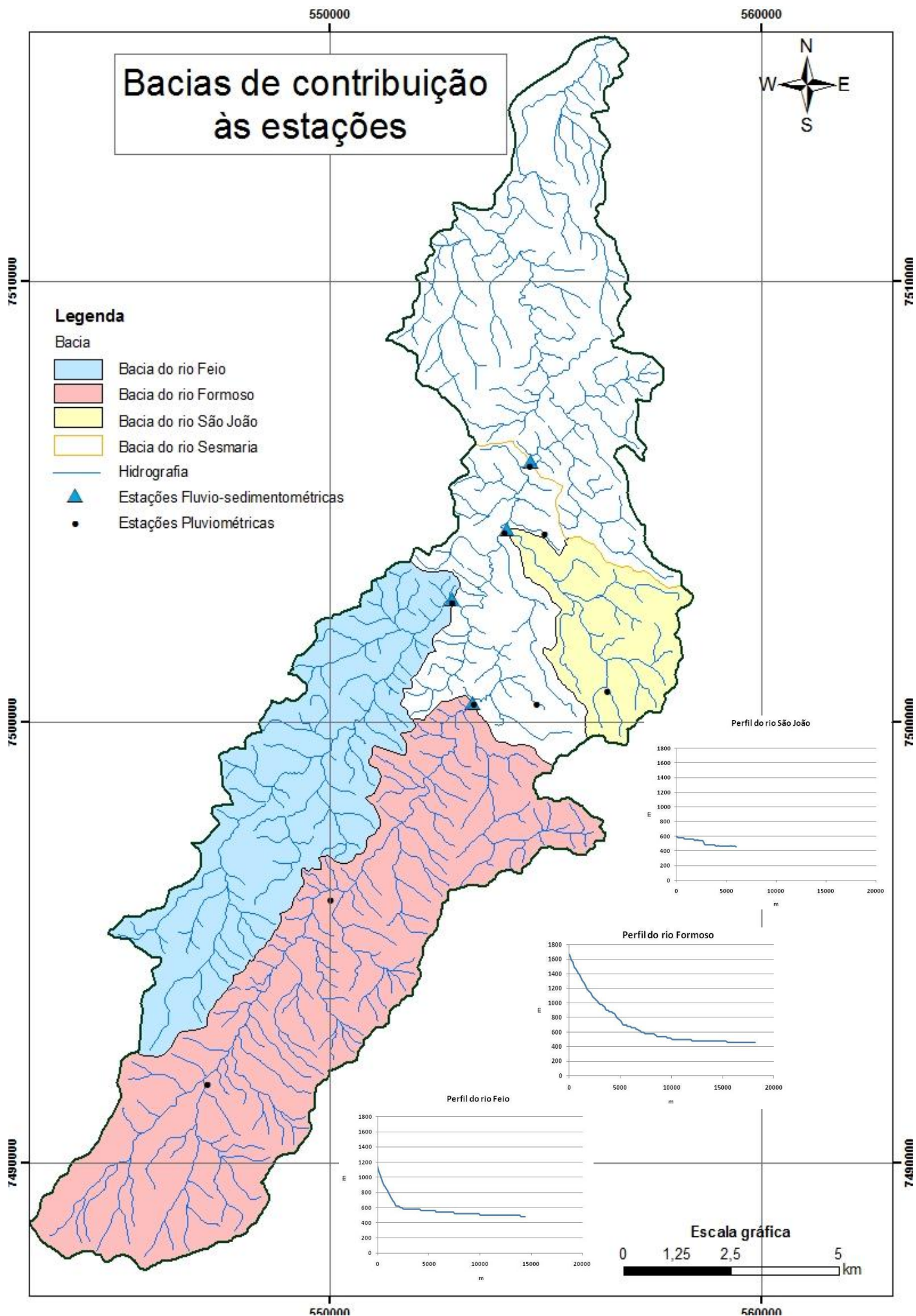


Figura 12: Divisão das sub-bacias da bacia do rio Sesmaria

V.2.1) Cota linimétrica

A instalação das réguas linimétricas foi realizada em julho de 2008, com a ajuda de técnicos da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Primeiramente, construiu-se uma referência de nível (RN), permitindo a reinstalação de réguas na mesma cota, caso as réguas fossem destruídas por eventos extremos ou vandalismo. O primeiro lance de régua foi instalado com o “zero da régua” abaixo do fundo do rio, para evitar leituras negativas em períodos de estiagem caso ocorresse o desassoreamento do fundo do canal. A quantidade de lances que foram instalados foi definida a partir da provável cota no evento máximo.

Define-se como seção transversal de uma estação fluviométrica o plano essencialmente perpendicular às linhas de corrente correspondentes ao local onde são efetuadas as medições diretas de vazão (Santos *et al.*, 2001). O levantamento das seções transversais é composto de duas etapas: o levantamento batimétrico e o levantamento da parte seca (margens). Este levantamento topobatimétrico deve ser realizado uma vez por ano com o objetivo de detectar alterações na geometria da seção, auxiliar na extrapolação da curva de descarga e permitir o uso de modelos hidráulicos de propagação de vazões e níveis (Santos *et al.*, 2001).

As leituras das réguas linimétricas (Figuras 13) das quatro estações são realizadas por um leitor de campo às 7:00 e as 17:00 h, todos os dias. Posteriormente, foram instaladas réguas de máximo (Figura 14), para registrar o nível máximo alcançado pelo rio. Esse equipamento foi instalado pelo fato de os sensores de nível, até então, não terem sido instalados nas estações e para que, após as instalações destes, fosse possível uma comparação para detecção de eventuais falhas dos sensores. A régua de máximo consiste em uma estrutura de tubo de PVC presa à régua linimétrica, onde dentro do tubo e ao longo deste, há uma peça de madeira sem acabamento (Figura 15). Na extremidade da peça de madeira é afixado um recipiente perfurado para armazenar cortiça ralada. O cano possui furos na parte inferior para que a água entre no cano, quando isso acontece, a cortiça sobe e prende-se à madeira no

nível em que a água alcançou. O leitor de campo realiza também a leitura deste equipamento diariamente.



Figura 13: Réguas linimétricas rio Sesmaria e rio Formoso



Figura 15: Régua de máximo rio Feio

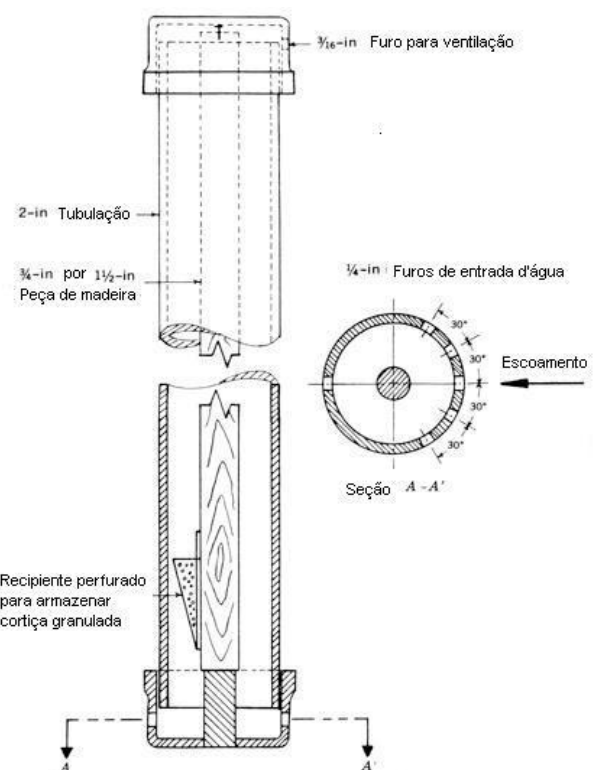


Figura 14: Esquema d funcionamento da régua de máximo. (Fonte: Pinto *et al.* 2007)

V.2.2) Vazão

A vazão ou descarga de um rio é o volume de água que passa através de uma seção transversal na unidade de tempo (Santos *et al.*, 2001; Leopold *et al.*, 1964). A medição de descarga foi realizada uma vez por mês com a utilização de um micromolinete digital da marca Global Water, modelo FP201 (Figura 16), com a metodologia a vau (Figura 17). Na instalação das réguas linimétricas, durante o levantamento da seção transversal, foram fixados dois pontos próximos à margem, um ponto inicial (PI) e um ponto final (PF), materializados com uma estaca de madeira para que as medições de vazão na estação fossem sempre realizadas na mesma seção. Utiliza-se uma trena presa ao PI e ao PF, ao longo da qual é feita a batimetria, a cada 30 cm próximo às margens e de 50 em 50 cm, próximo ao eixo do canal. No rio São João, que possui uma vazão menor, detalham-se mais as medições com espaçamento de 20 cm próximo às margens e 30 cm no eixo do canal. O maior detalhamento próximo as margens é feito para diminuir o erro no cálculo da vazão (Souza, 1979). Nos pontos onde é realizada a batimetria (denominada vertical), mede-se a velocidade com o micromolinete em um ponto a 60% de profundidade quando esta é inferior a 0,6 m e em dois pontos, a 20 e 80%, quando a profundidade for superior a 0,6 m. Hoyt e Grover (*apud* Santos *et al.*, 2001) indicaram que o erro cometido pelo processo de dois pontos em relação ao da medição detalhada é inferior a 3%. Souza (1979) relatou que o erro é da ordem de 5%.

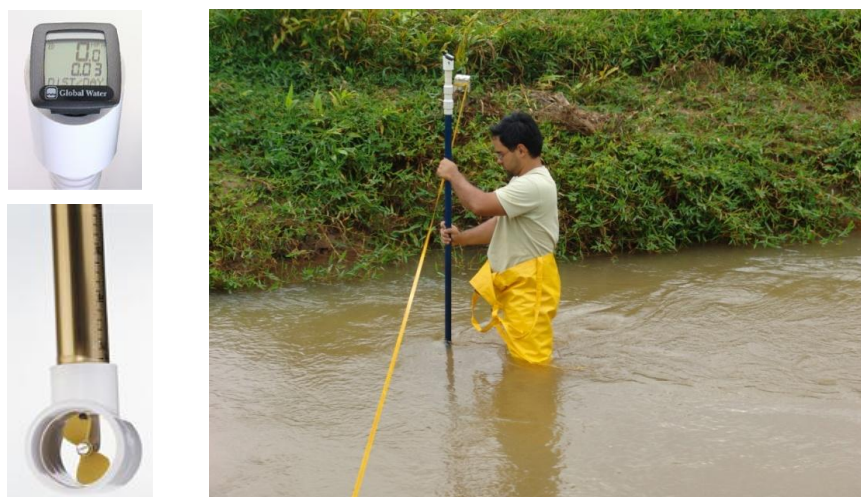


Figura 17: Micromolinete Global Water (Fonte: <http://www.globalw.com/products/flowprobe.html>)

Figura 17: Medição a vau no rio Sesmaria

O cálculo da vazão foi realizado segundo o método da meia seção. Segundo Santos *et al.* (2001) este é o método mais utilizado, onde as vazões são calculadas multiplicando-se a velocidade média na vertical pela profundidade na vertical, multiplicada pela soma das semi-distâncias às verticais adjacentes (Figura 18).

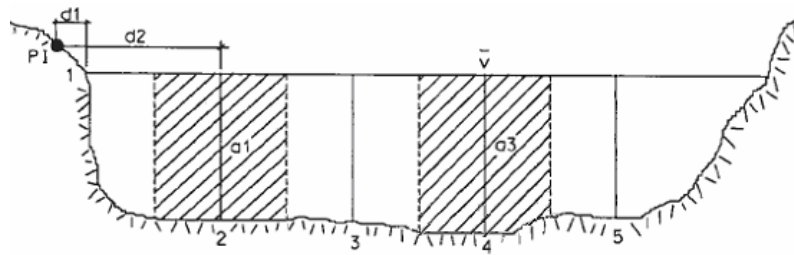


Figura 18: Esquema de cálculo da meia seção (Fonte: Santos *et al.*, 2001)

- a) Cálculo das larguras dos segmentos: $l_2 = (d_3 - d_1)/2$ $l_3 = (d_4 - d_2)/2$
- b) Cálculo das áreas dos segmentos: $a_2 = l_2 * p_2$ $a_3 = l_3 * p_3$
- c) Cálculo das vazões nos segmentos: $q_{a2} = \bar{v}_2 * a_2$ $q_{a3} = \bar{v}_3 * a_3$
- d) Cálculo da vazão total: $Q = \sum q_i$
- e) Cálculo da área total: $A = \sum a_i$
- f) Cálculo da velocidade média: $\bar{V} = Q / A$
- g) Cálculo da largura do rio: $L = d_n - d_1$
- h) Cálculo da profundidade média do rio: $P = A / L$

V.2.3) A relação cota-descarga, curva-chave

A relação cota-descarga de uma seção permite calcular a descarga que corresponde a uma dada altura de água, considerando-se a curva-chave uma função não-linear unívoca entre nível e vazão. Ela pode ser determinada de acordo com o número de pontos e sua representatividade. A medição de descarga foi realizada uma vez por mês, abrangendo todas as épocas do ano.

Na calibração da curva-chave, utilizou-se a expressão matemática potencial: $Q = a (h-h_0)^m$ (Eq. 6). Para definir os parâmetros a , m e h_0 faz-se a anamorfose logarítmica da equação para a reta. Para que a equação tenha significado físico é importante observar o valor resultante para o expoente m , o qual não deve se afastar muito de 5/3, que seria o expoente da profundidade média (h) na equação de Manning (fazendo-se: área = base média x altura; e altura = raio hidráulico). Expoentes próximos de 2 ou 3 são aceitáveis, admitindo-se que a curva-chave possa ser uma parábola de 2º ou 3º grau (COPPE/UFRJ, 1995). Ao definir as equações da curva, torna-se necessária sua extrapolação, pelo fato de haver poucas medições em situações extremas quando ocorrem as cotas mais altas. O processo de ajuste não é simples, pela relação entre as duas variáveis não ser perfeitamente unívoca, sofrendo modificações ao longo do tempo, que podem ser avaliadas através da análise das medições de vazão.

Em estações instáveis opta-se pelo método das calibrações unívocas transitórias, que consiste em traçar tantas curvas de calibragem quanto sejam os períodos homogêneos, quaisquer que sejam suas durações. A cada uma destas curvas é associado um período de validade. O problema da transformação da cronologia das cotas em descarga só pode ser resolvido desta forma, se cada uma das curvas for unívoca e se a passagem de uma curva a outra for muito rápida (instabilidade de caráter descontínuo). Uma descalibragem natural é, quase sempre, devida a uma cheia que não é, necessariamente, grande ou excepcional (Jaccob e Cudo, 1989).

V.2.4) Sensores automáticos nas estações fluviométricas

Anteriormente à instalação dos sensores nas estações fluviométricas, foi realizada a calibração dos equipamentos em laboratório. Para os transdutores de pressão, utilizou-se uma coluna de água de 4 m para determinar a amperagem do equipamento para 0 mca (metro de coluna de água) e 4 mca, possibilitando a calibração dos respectivos *dataloggers*. Os transdutores utilizados não eram apropriados para ficarem submersos na água e não faziam compensação barométrica. A solução encontrada foi revesti-los com uma mangueira impermeabilizando o equipamento, deixando a parte onde é feita a leitura para fora. Para solucionar a questão da compensação barométrica, foi desatarraxada a borracha da parte traseira do equipamento, sendo feita a compensação através da mangueira.

Os sensores de turbidez, da marca Global Water modelo WQ710, foram calibrados com soluções padrões de 1000 NTU (unidade nefelométrica de turbidez), 40 NTU e água destilada, utilizando um multímetro para determinar a sensibilidade de cada aparelho. Após saber as respectivas amperagens, calibraram-se novamente os sensores utilizando os *dataloggers*.

Os sensores de condutividade elétrica, da marca Global Water modelo WQ301, foram calibrados com água destilada, para determinar as amperagens à 0 μS (microsiemens), e com solução padrão de condutividade de 5000 μS , que é a leitura máxima registrável pelo sensor.

Os *dataloggers* utilizados foram *dataloggers* USB da marca Measurement Computing Corporation, modelo USB – 500 Data Logger Version 2.0 (Figura 19).

Após todos os equipamentos previamente calibrados, montou-se a estrutura física nas estações. Os sensores e os *dataloggers* tiveram que ser enterrados para evitar possíveis furtos e vandalismo (Figura 20). Para cada sensor enterrou-se um tubo de PVC, de forma que os sensores ficassem submersos e os tubos alcançassem a caixa de concreto onde se encontram os *dataloggers* e baterias (Figura 21).

As caixas dos *dataloggers* são impermeáveis e contêm: três *dataloggers* para leituras a cada 15 minutos, uma bateria (12 V, 7 Am e 12 V, 12 Am), e um

regulador de voltagem para controlar a energia provinda do painel solar de 12 V que alimenta a bateria.

A estrutura física e os sensores são os mesmos para as quatro estações (Figura 22). A retirada dos dados dos *dataloggers* foi realizada uma vez por mês, junto com a realização das medições de vazão. Nas visitas às estações, também se realizou a manutenção dos equipamentos.



Figura 20: *Datalogger*



Figura 20: Instalação dos sensores

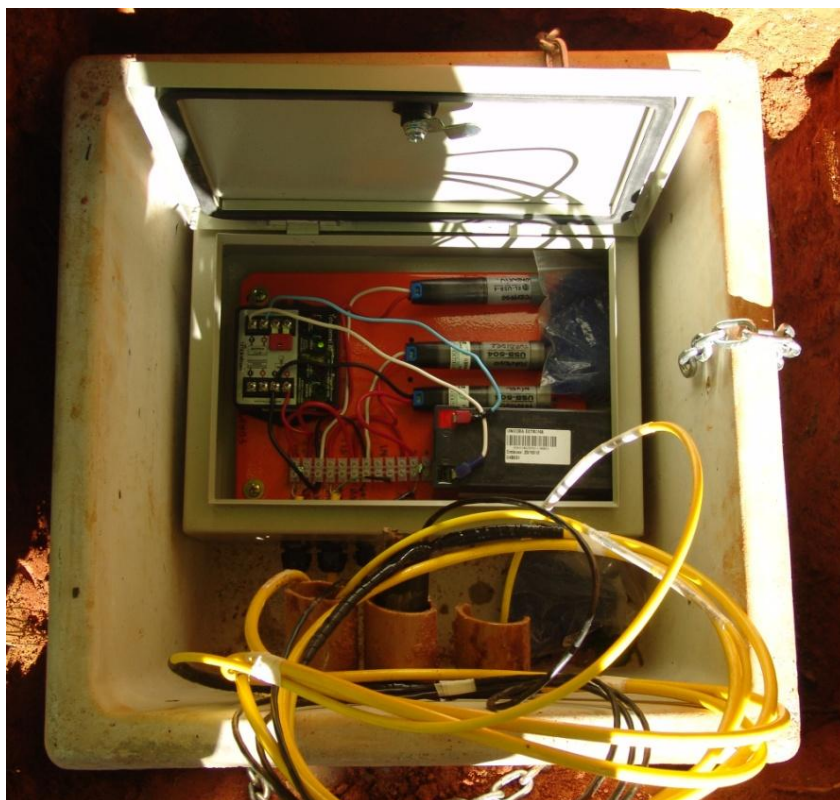


Figura 21: Caixa dos *dataloggers*



Figura 22: Estação fluviométrica Sesmaria

V.3) Avaliação das alterações de fluxo superficial e subterrâneo

Considerando a disponibilidade de dados para a bacia do rio Sesmaria oferecida pelo monitoramento, no âmbito do presente trabalho, foram escolhidas três possibilidades de avaliação quantitativa da influência do eucalipto plantado em determinadas áreas da bacia – cálculo do balanço hidrológico; a determinação de indicadores regionais e a comparação dos valores de vazão observados com valores de referência estimados por regionalização hidrológica.

V.3.1) Indicadores regionais e balanço hídrico

Os indicadores regionais são valores característicos de variáveis hidrológicas que podem ser facilmente determinados para cada bacia ou região de uma mesma bacia. Eles permitem a comparação do comportamento hidrológico em diferentes locais e são úteis na verificação de resultados obtidos de medições ou estudos específicos para se saber se estão dentro da ordem de grandeza esperada para a região, caso os indicadores regionais sejam conhecidos (Tucci e Clarke, 2001).

Dois indicadores foram adotados neste estudo: o *coeficiente de escoamento*, que é a razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado $C = Q/P$ (Eq. 7), sendo Q e P expressos em milímetros anuais (CPRM, 2002), e a *vazão específica*, $q = Q/A$ (Eq. 8) ($L/s.km^2$), definida pela razão entre a vazão que flui em um determinado ponto do canal fluvial e sua respectiva área de drenagem.

O coeficiente de escoamento e a vazão específica foram determinados como indicadores para as sub-bacias dos rios Feio, Formoso, São João e Sesmaria e foram comparados aos resultados de outras bacias da região do MVRPS. O coeficiente de escoamento deve decrescer com o aumento da área de drenagem, pois em geral há mais escoamento superficial nas áreas de cabeceiras dos rios, devido às maiores declividades, os valores de IED são

maiores. Da mesma forma, deve decrescer a vazão específica com a área de drenagem, pois, em geral, chove mais nas áreas de cabeceira dos rios. A vazão específica pode apresentar pequena variação para iguais tamanhos de bacia quando as isoietas apresentam pequena variação espacial (Tucci e Clarke, 2001). Diante disso, espera-se que a bacia do rio São João apresente um coeficiente de escoamento maior que os demais, caso contrário pode ser que o eucalipto esteja influenciando a hidrologia da bacia consumindo mais água que as áreas sem o cultivo.

Para o cálculo do balanço hídrico utilizou-se a equação simplificada: $EVT = P - Q$ (Eq. 9), na qual se pressupõem que não houve nem recarga nem rebaixamento no lençol freático no período estudado. O balanço foi realizado para as quatro sub-bacias com objetivo de comparação entre elas.

V.3.2) Vazões mínimas e regionalização da vazão

Segundo Tucci (2002), a regionalização tem como objetivo a obtenção da informação hidrológica em locais sem dados ou com poucos dados. O princípio da regionalização se baseia na similaridade espacial de algumas funções, variáveis e parâmetros que permitem a transferência de informação de um lugar para outro carente de dados. Trata-se de uma variedade de métodos que utilizam informações regionais para sintetizar dados de vazão.

Nos estudos de regionalização de vazões da bacia do Paraíba do Sul (CPRM, 2002), foram estabelecidas funções regionais para vazões mínimas de referência válidas para a região do MVRPS, vazão de permanência 95% (Q_{95}) e vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência ($Q_{7,10}$), ambas características do comportamento de estiagem.

A curva de permanência é obtida da frequência de ocorrência das vazões ou níveis de uma determinada estação. Ela retrata a parcela do tempo em que uma determinada vazão é igualada ou superada durante o período analisado e depende muito das características de regularização natural do rio.

No estudo, reuniram-se as estações de afluentes das vertentes das Serras da Mantiqueira e da Bocaina, até Barra do Piraí para o estudo de

correlação e estabelecimento das equações de regressão. Esta equação ajusta a relação que pode existir entre duas ou mais variáveis, sendo uma delas considerada a variável dependente e as demais independentes. No caso desse estudo as variáveis foram: a vazão média com área de drenagem e, vazão média com área de drenagem e precipitação, ou vazão mínima ($Q_{7,10}$ ou Q_{95}) com área de drenagem ou, vazão mínima ($Q_{7,10}$ ou Q_{95}) com área de drenagem e precipitação. Resultaram equações válidas para os afluentes e curso principal a jusante da Barragem de Funil até montante da barragem de Santa Cecília em Barra do Piraí.

Os dados de vazão disponíveis (período de 1979 a 1982) da única estação no rio Sesmaria, Fazenda Bahia (125 km² de área de drenagem), não apresentaram comportamento semelhante aos dados das demais estações do grupo. A estação teve que ser excluída do conjunto para que melhorasse o coeficiente de correlação e diminuíssem os desvios entre os valores estimados pela regionalização e os valores observados obtidos das séries históricas das demais estações.

Uma explicação para o não ajuste da bacia do rio Sesmaria ao conjunto do Médio Paraíba pode ser o curto período de dados de vazão e possíveis problemas de inconsistência nas vazões menores, influenciando nas vazões mínimas de referência calculadas.

Nesta dissertação, as equações definidas para a região do MVRPS foram utilizadas para estimar as vazões mínimas de referência e a vazão média para as sub-bacias do rio Feio, Formoso, São João e Sesmaria, para comparação com as vazões medidas nas diversas campanhas simultâneas realizadas nas estações. Esta comparação poderia evidenciar valores inesperados para alguma sub-bacia que poderiam ser explicados pelos diferentes usos do solo e cobertura.

VI) RESULTADOS E DISCUSSÕES

VI.1) Precipitação

Na bacia do rio Sesmaria a pluviosidade diária varia bastante de uma estação para a outra, o que também ocorre com os totais mensais, porém não existe um padrão dessas diferenças, como pode ser observado na Figura 23. No entanto, a pluviosidade anual não apresenta variabilidade espacial significativa, o que pode ser verificado nas isoietas totais anuais (Brandão *et al.*, 2000) da região (Figura 24). Sato (2008) concluiu que as chuvas no Vale do Paraíba do Sul são bastante localizadas, com grande variabilidade espacial, mesmo se tratando de pequenas distâncias, considerando que o autor encontrou diferenças entre pluviômetros com apenas 442 m de distância e desnível de 45 m.

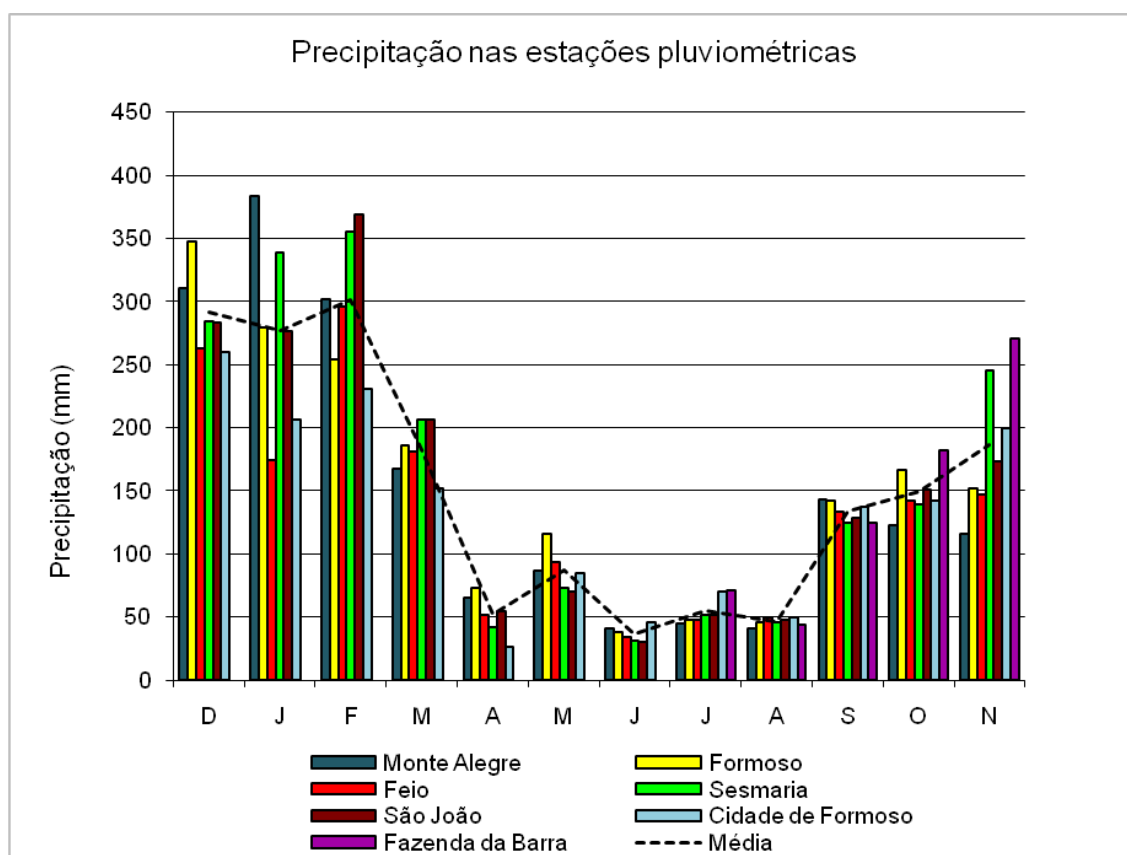


Figura 23: Precipitações acumuladas nas estações pluviométricas 2008/2209

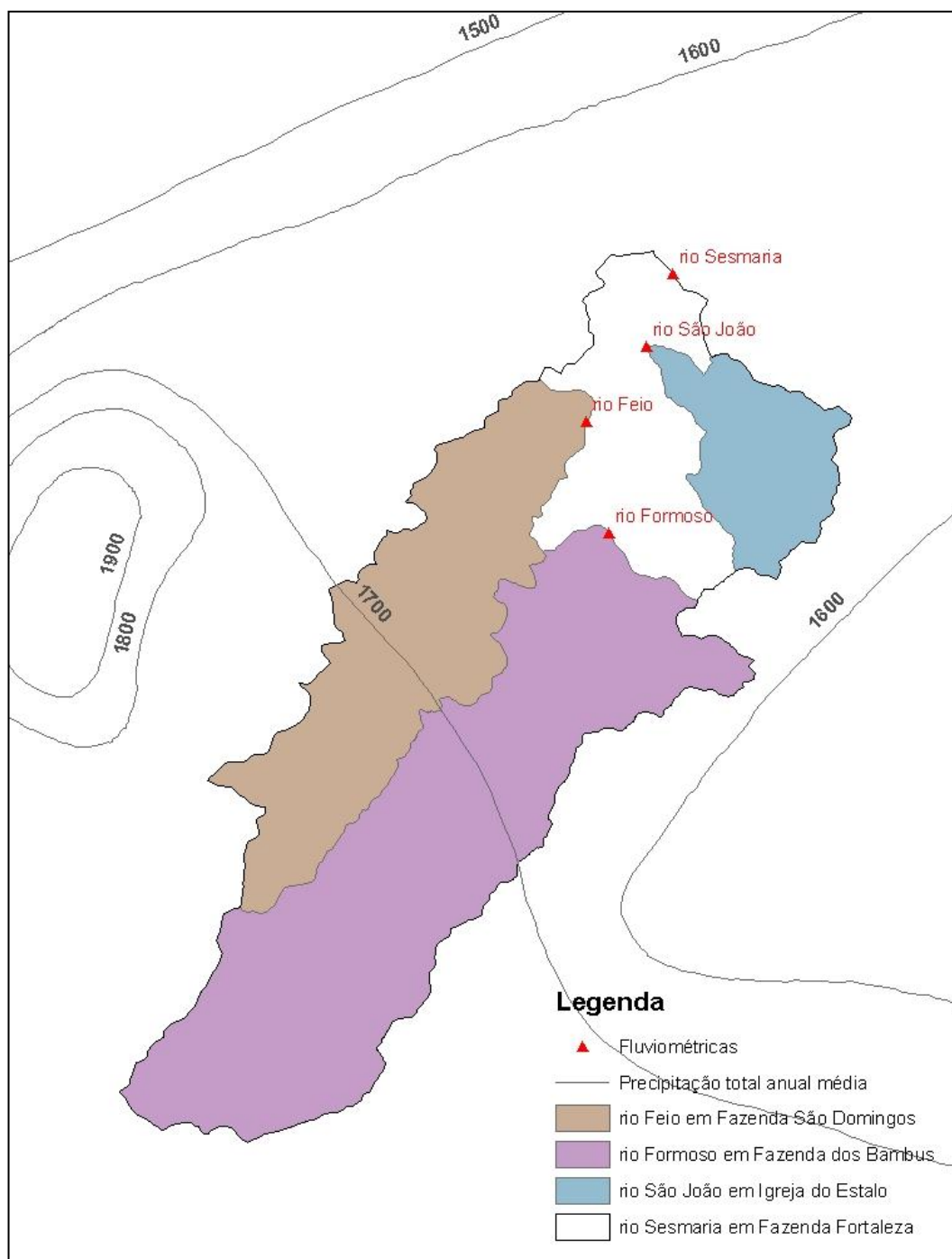


Figura 24: Isoietas totais anuais (Brandão *et al.*, 2000)

Sato (2008) também constatou que o ano de 2007 foi excepcionalmente seco, com decréscimo da precipitação acumulada em torno de 35%, quando analisadas as séries históricas da região. A Figura 25 apresenta dados da precipitação acumulada mensal de três anos distintos na mesma estação

pluviométrica (Monte Alegre) localizada na sub-bacia do rio São João, na qual se verifica que os três períodos analisados tiveram comportamentos distintos, não somente na quantidade de precipitação, mas também no regime das chuvas. No primeiro período quantificou-se a precipitação total anual em 1.108 mm, no segundo 1.683 mm e no terceiro 1.836 mm. A diferença entre o ano de 2007 e 2009 atingiu 728 mm.

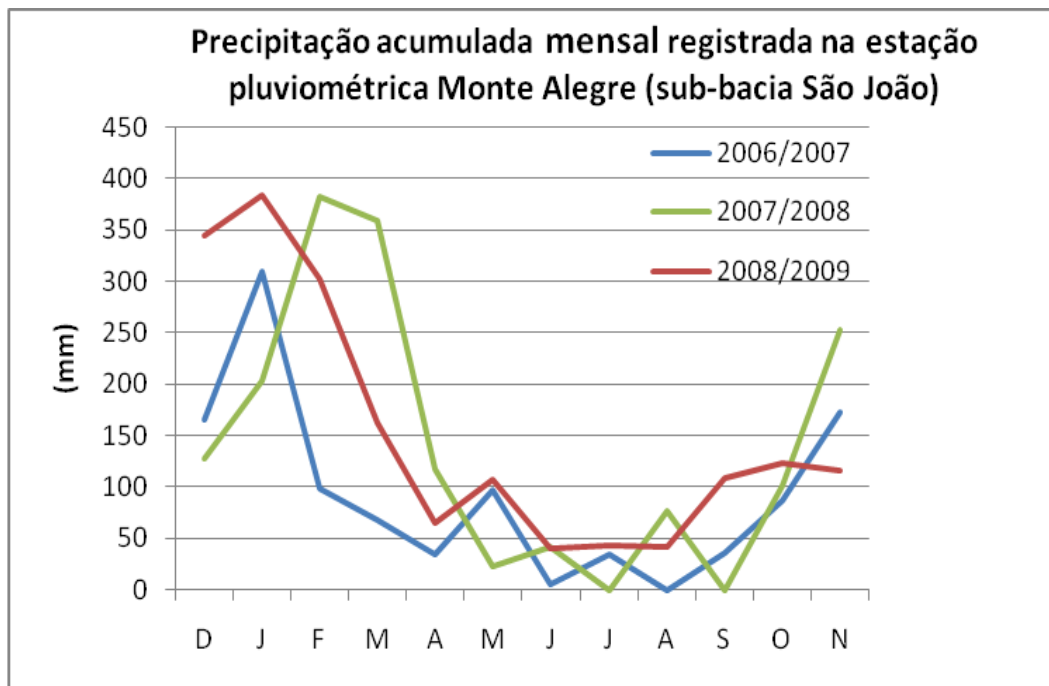


Figura 25: Precipitação total mensal na estação Monte Alegre

Na Figura 26 encontram-se dados das estações Monte Alegre – período de 2007 a 2009 - e da estação Cidade de Formoso (FURNAS) – período de 1998 a 2001. Pode-se constatar que o ano de 2009 foi um dos mais chuvosos. Ao analisar a precipitação anual, no mesmo período, em estações pluviométricas de bacias vizinhas, como São José do Barreiro (1.952 mm) e Bananal (1.552 mm), verifica-se que esta foi uma tendência regional (Figura 27).

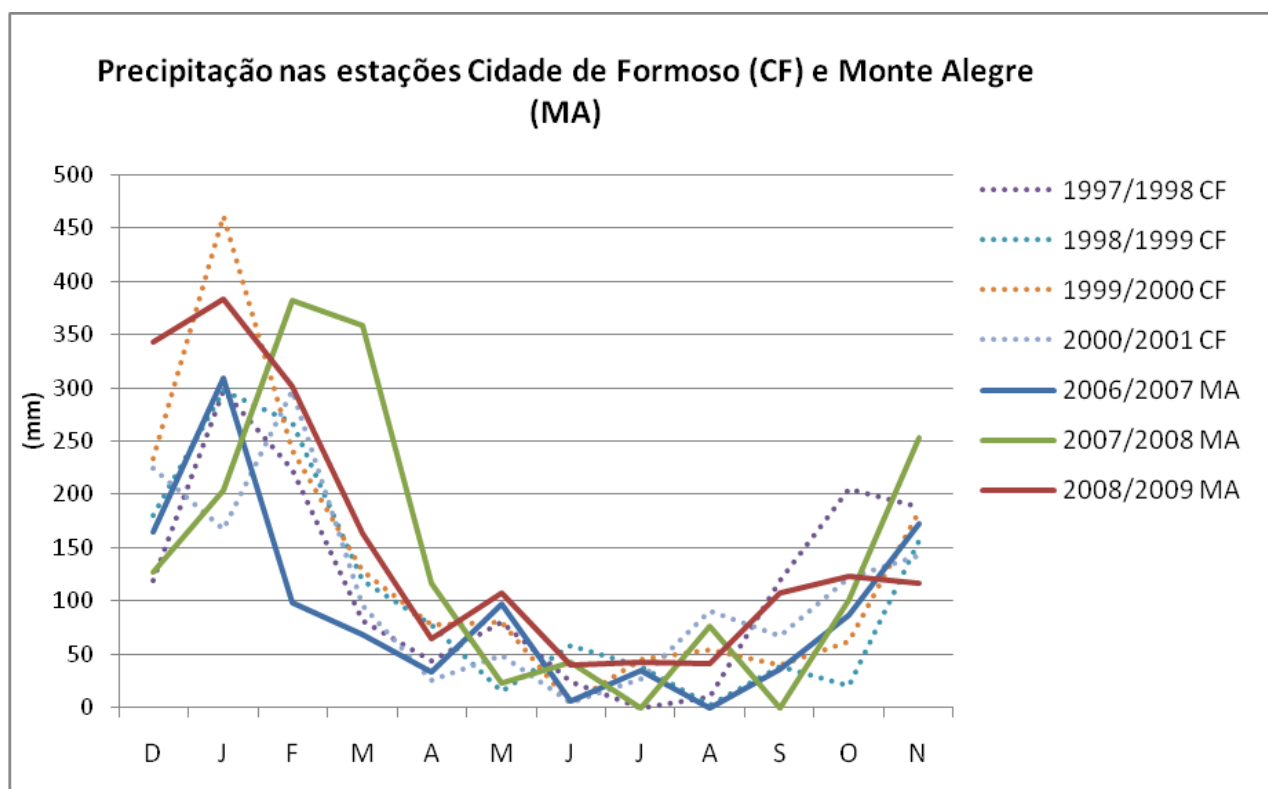


Figura 26: Precipitação total mensal nas estações pluviométricas Cidade de Formoso e Monte Alegre

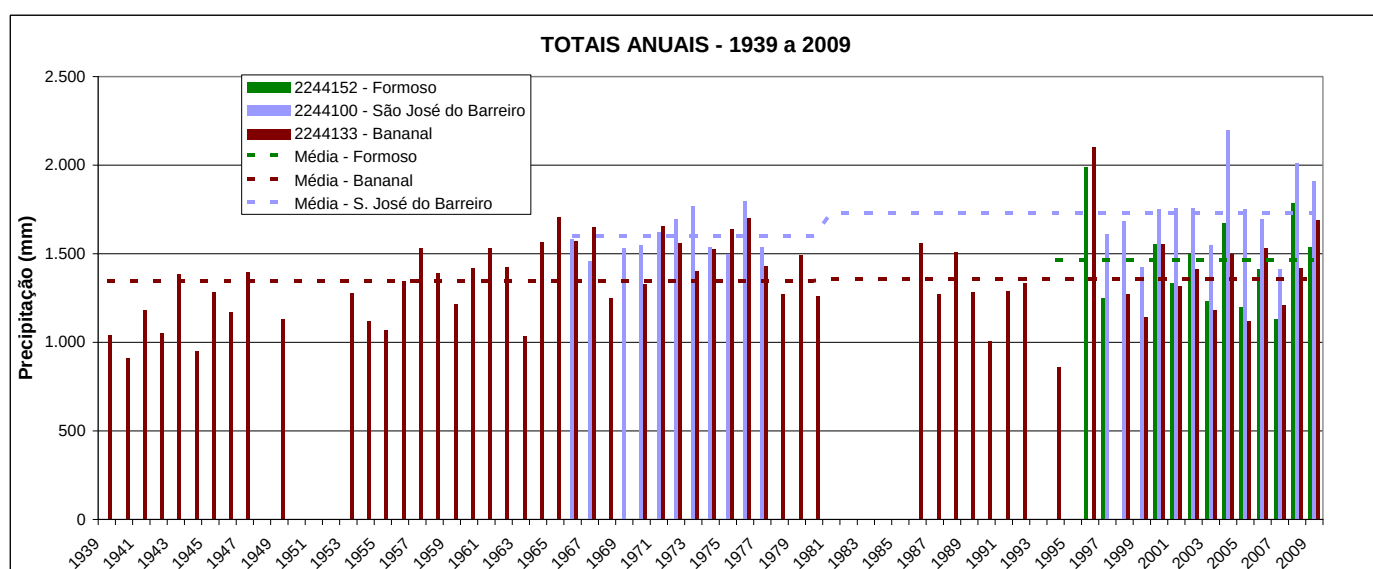


Figura 27: Histórico de precipitação total anual em estações representativas da bacia do rio Sesmaria

Para o cálculo da precipitação média nas sub-bacias do rio Sesmaria foram utilizados os polígonos de Thiessen considerando as seguintes estações pluviométricas: São João, Sesmaria, Formoso, Feio, Monte Alegre, Fazenda da Barra, Cidade de Formoso e São José do Barreiro (operado por FURNAS) (Figura 29). A precipitação total mensal média nas sub-bacias é apresentada na Figura 28.

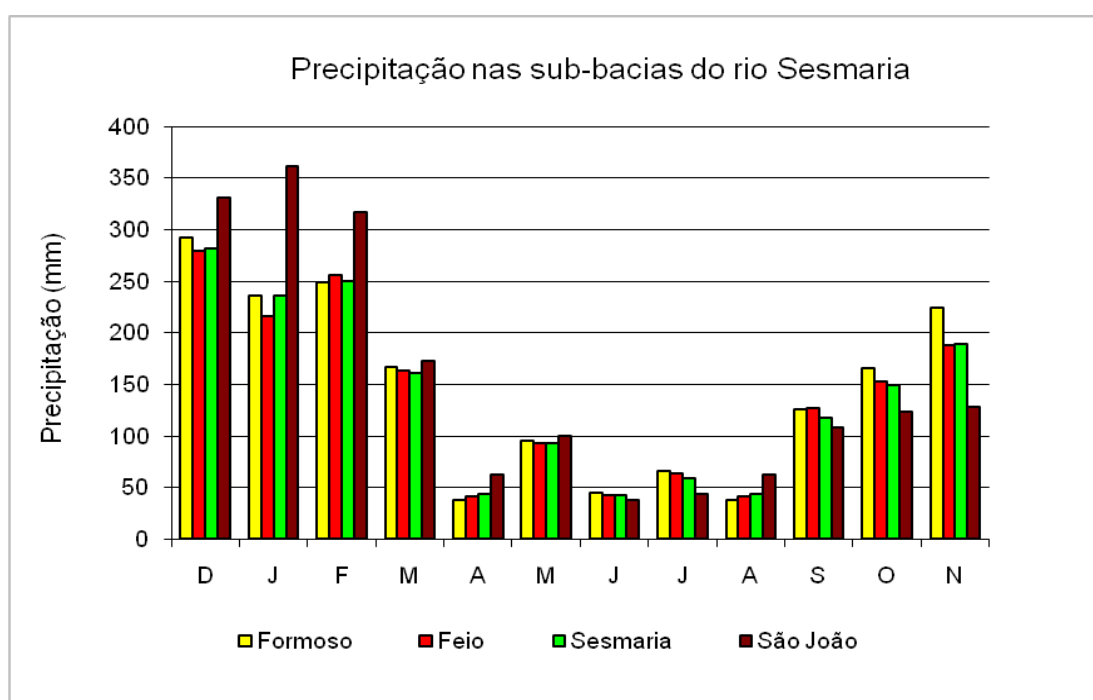


Figura 28: Precipitação mensal acumulada nas sub-bacias 2008/2009

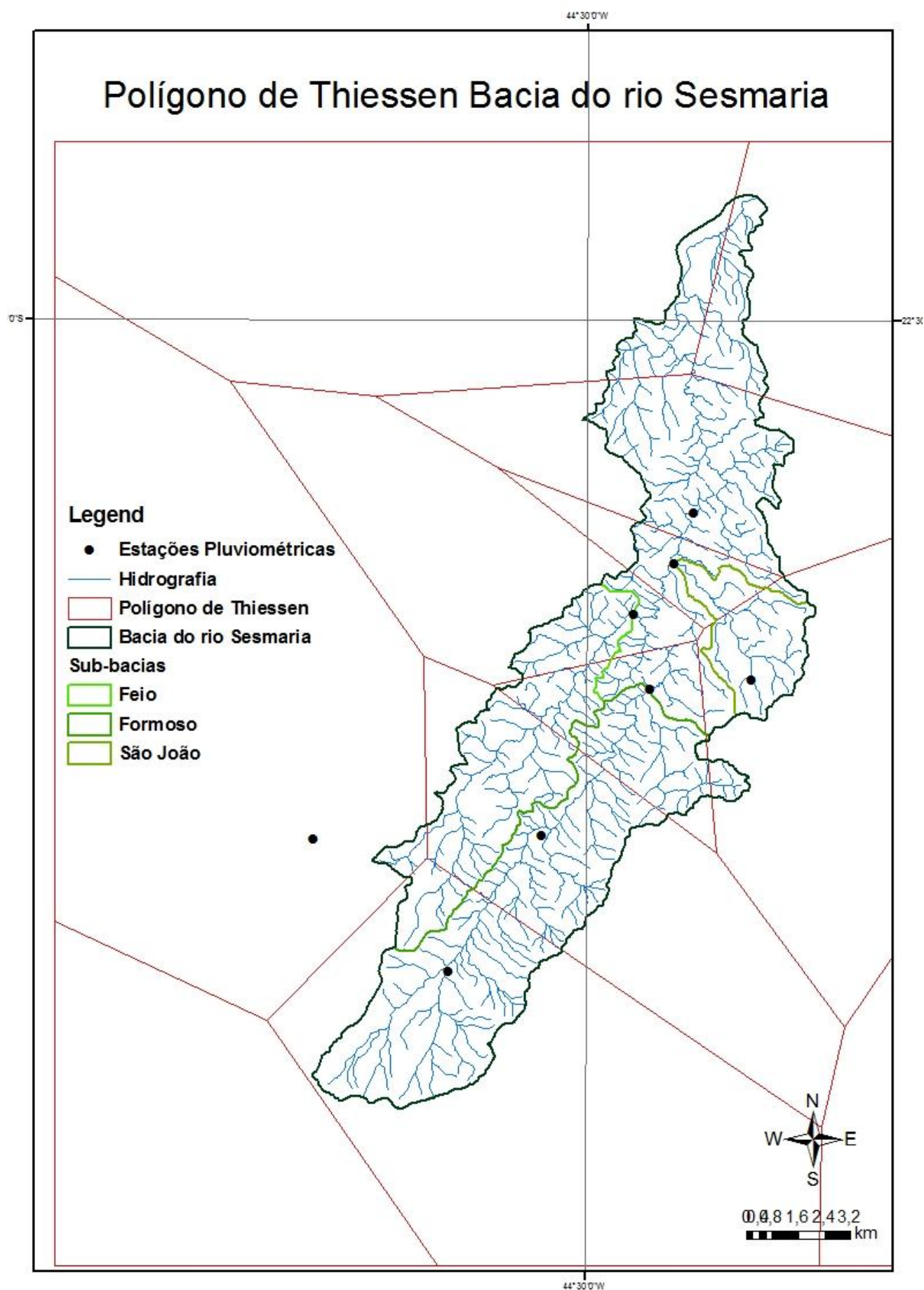


Figura 29: Polígonos de Thiessen na bacia do rio Sesmaria

Objetivando a análise das chuvas nas sub-bacias, as precipitações foram separadas em cinco classes: de 0,1 a 5,0 mm, 5,1 a 10 mm, 11 a 20 mm, 21 a 50 mm, e precipitações superiores a 51 mm (Figura 30). Pôde-se observar que, na sub-bacia do São João, há menos ocorrências de precipitações de 0,1 a 5 mm, esse comportamento era esperado considerando a altitude das sub-bacias: São João – 820 a 480 m; Formoso – 2.080 a 460 m; Feio – 1.300 a 480 m.

Os números de dias sem chuvas no São João foram maiores que nas demais sub-bacias no período analisado, atingindo 208 dias dos 365. No Formoso, Feio e Sesmaria os valores foram 181, 180 e 169, respectivamente. No entanto, na sub-bacia do São João ocorrem com mais frequência precipitações mais intensas do que nas demais.

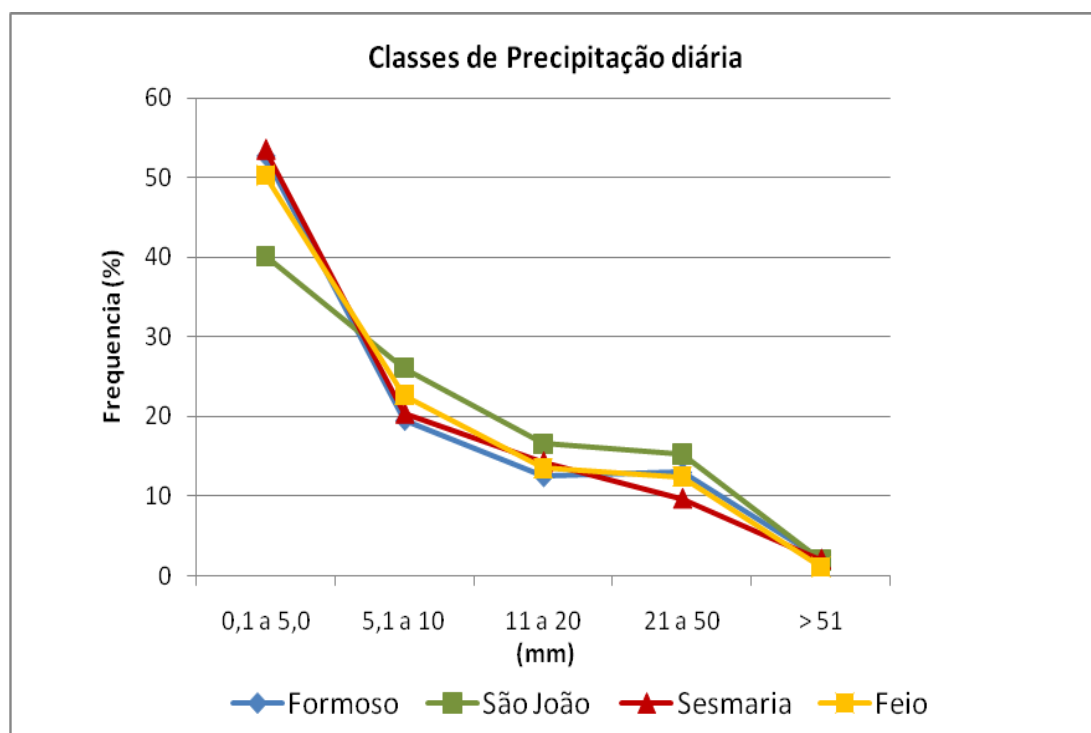


Figura 30: Classes de precipitação nas sub-bacias do Sesmaria no período de dezembro de 2008 a novembro de 2009

VI.2) Curvas-Chaves

Na estação Sesmaria ocorreu desassoreamento de quase 1 metro no período de cheia de 2008/2009. Em meados de abril de 2009 ocorreu o assoreamento do canal novamente. A Figura 31 mostra as seções levantadas na estação Sesmaria, de outubro de 2008 a novembro de 2009, na qual se observa a grande mobilidade do leito. Verificou-se na medição do dia 09/12/2008 que o canal havia aprofundado abruptamente em relação às medições anteriores, padrão que se seguiu na medição do dia 22/12/2008. No dia 10/01/2009 não foi possível realizar a medição porque o canal estava com profundidade superior a 1,50 m, no entanto, a cota na régua linimétrica estava em 1,35 cm. As demais medições realizadas com a cota de 1,35 cm não atingiram 0,5 m de profundidade (Figura 32), alertando para o fato de que a relação cota-descarga neste período não estava sendo representativa, já que a cota permaneceu a mesma para diferentes valores de vazão. No dia 08/03/2009 também não foi possível realizar a medição devido à profundidade do canal (cota 1,49 cm). As medições puderam ser realizadas novamente no dia 17/03/2009, quando o canal começou a assorear novamente.

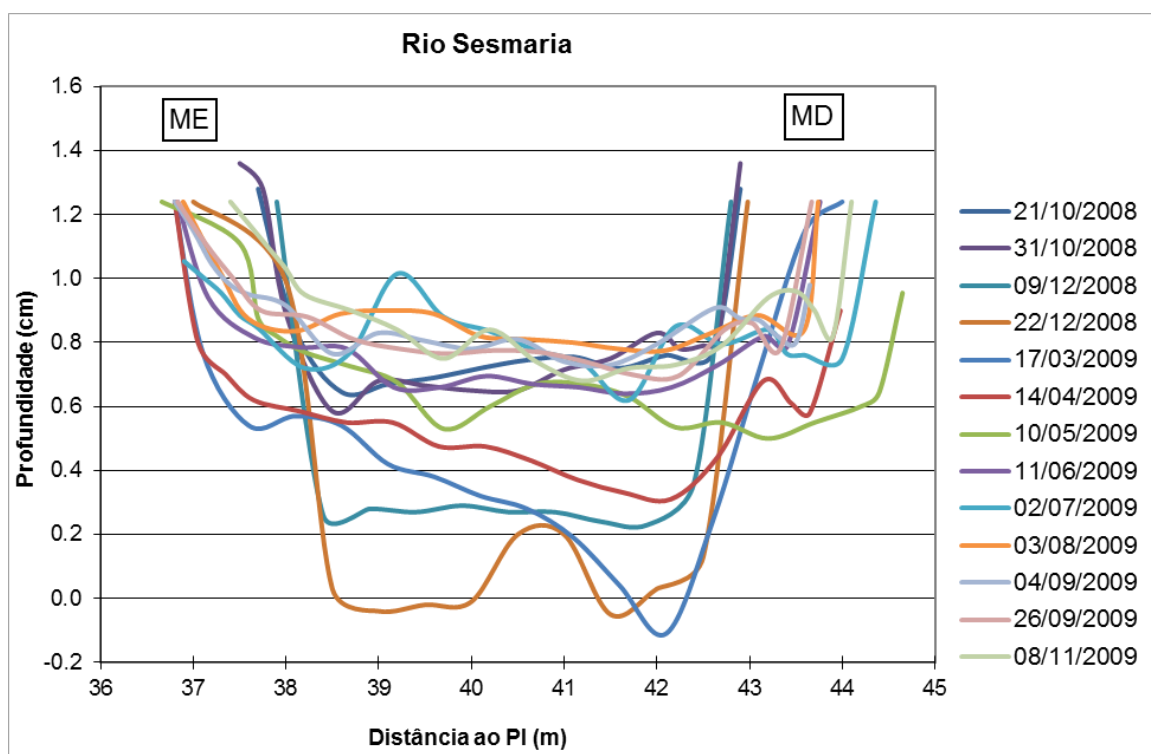


Figura 31: Seções transversais estação Sesmaria

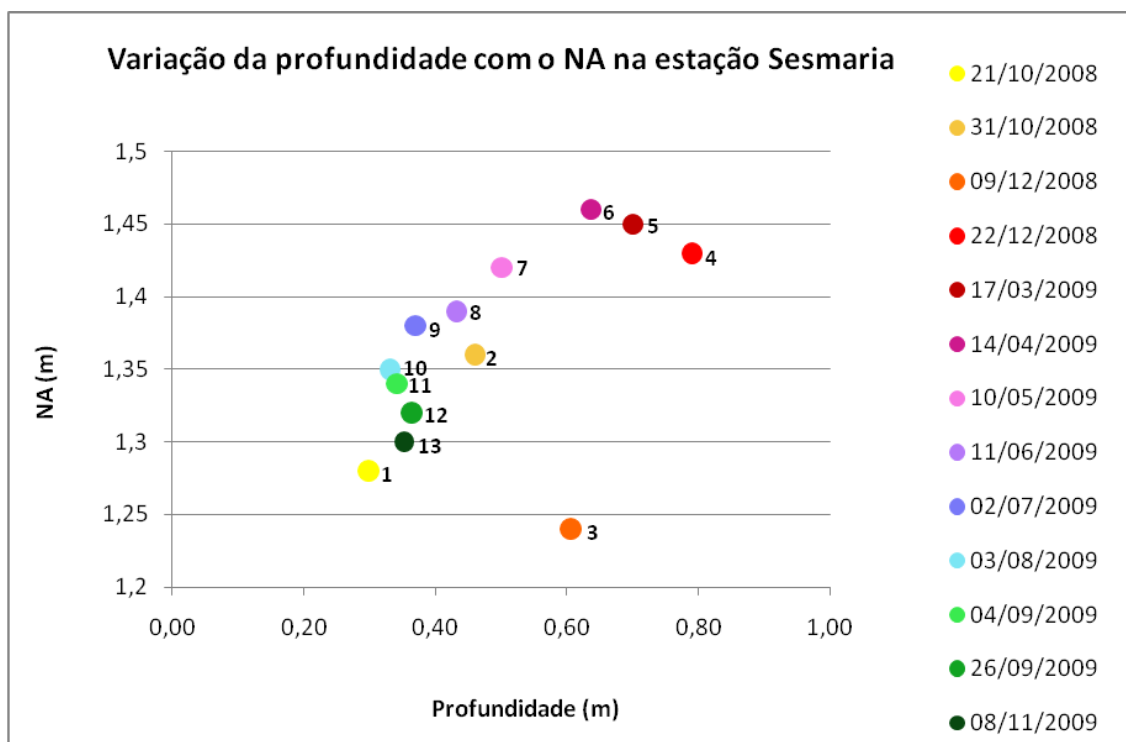


Figura 32: Relação entre nível d'água e profundidade média na estação Sesmaria

A mobilidade do leito também ocorreu na estação Formoso, onde grande quantidade de sedimento assoreou o rio, modificando a relação cota-descarga. No entanto, nesta estação não houve novas modificações significativas após a mudança da estação climática, permanecendo assoreada. Nas quatro estações foram necessárias duas curvas-chaves distintas no período de um ano (Figura 33), devidas às grandes mudanças nas sessões dos rios após o verão de 2008. A segunda curva-chave, nas quatro estações, foi necessária a partir do dia 08/03/2009, indicando assoreamento em todas elas. A mobilidade do leito é um fenômeno muito frequente e pode ser muito intenso, afetando seriamente a calibragem da curva-chave (Jacon e Cudo, 1989). Na estação Sesmaria houve também mobilidade das margens laterais, que solaparam nos períodos de cheia, modificando totalmente a seção transversal (Figuras 34 e 35). Segundo Jacob e Cudo (1989), em locais com instabilidade grande e descontínua (grandes cheias, limpeza do leito, barragem móvel), a superfície de calibragem é composta de várias curvas unívocas. Em diversos eventos de chuva, as réguas linimétricas das estações Feio e Sesmaria foram carregadas pelos respectivos rios, o que acarretou em falhas com períodos sem dados.

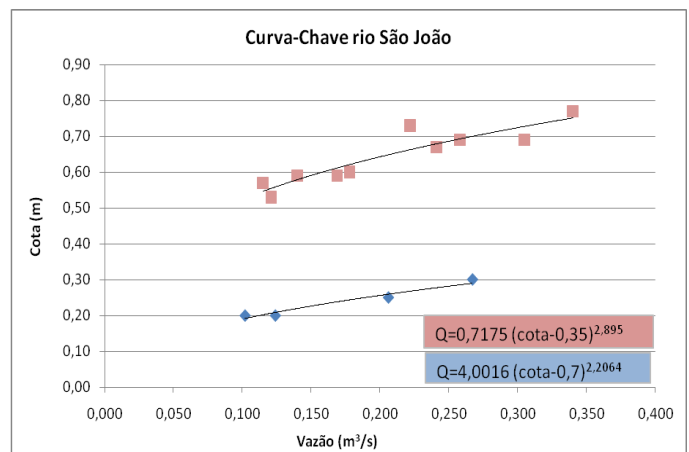
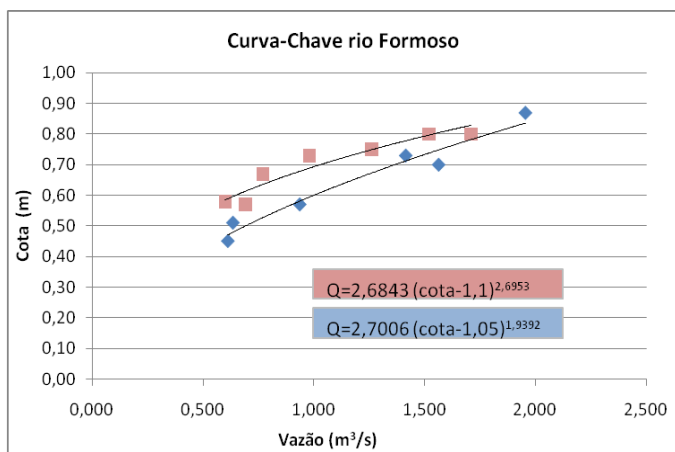
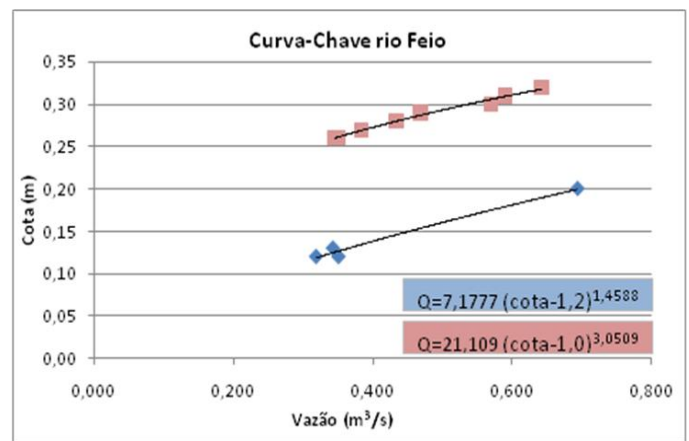
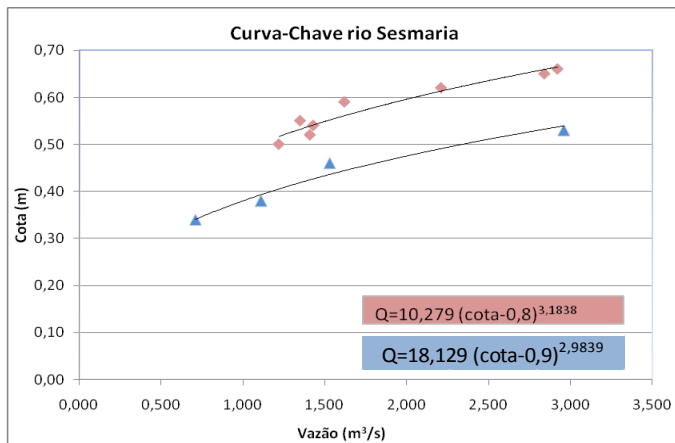


Figura 33: Curvas-chaves das estações fluviométricas



Figura 34: Foto estação Sesmaria julho de 2008



Figura 35: Foto estação Sesmaria março de 2009

A mobilidade do leito no rio Sesmaria pode ser verificada nos dados da extinta estação Fazenda Bahia, de responsabilidade do DNAEE e operada pela CPRM, que esteve ativa no período de fevereiro de 1968 a dezembro de 1982. A estação localizava-se mais a jusante da estação Sesmaria com 125 km² de área de drenagem. No sítio eletrônico Hidroweb, encontram-se dados de níveis d'água e resumo de medições de vazão para todo o período de operação da estação. Porém, são encontrados dados de vazões somente para o período de 1979 a 1982, possivelmente, pela dificuldade em se estabelecer a curva-chave da estação. Não há seções transversais levantadas, mas as evidências da mobilidade do leito e, possivelmente também, do desmoronamento das margens podem ser avaliadas nos gráficos de vazões x níveis d'água e profundidade x níveis d'água (Figuras 36 e 37) que mostram a mudança de tendência dessas relações ao longo do tempo. Uma determinada tendência pode retornar algum tempo depois, passados alguns períodos de cheia e estiagem.

A evolução das tendências pode ser comparada com a alternância entre anos de cheias mais acentuadas e outras mais suaves no cotograma da estação (Figura 38).

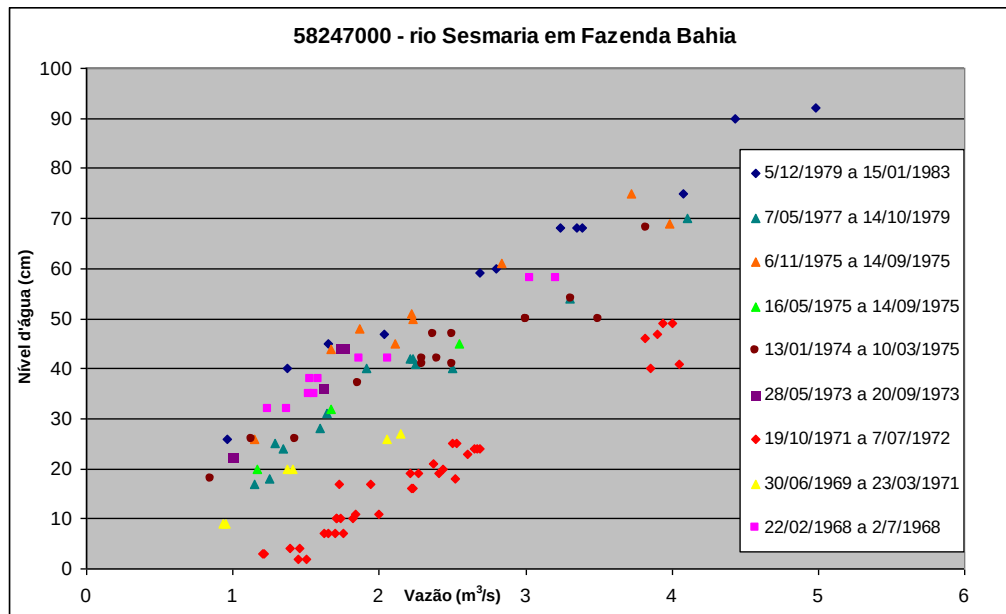


Figura 36: Variação das vazões com o nível d'água na Estação Faz. Bahia

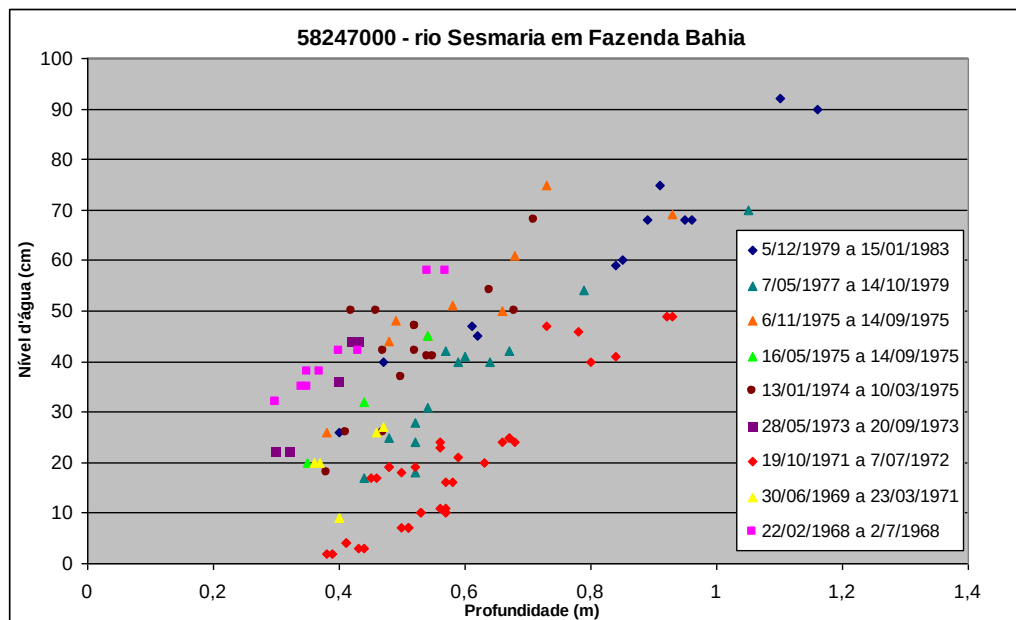


Figura 37: Variação da profundidade média com o nível d'água na Estação Faz. Bahia

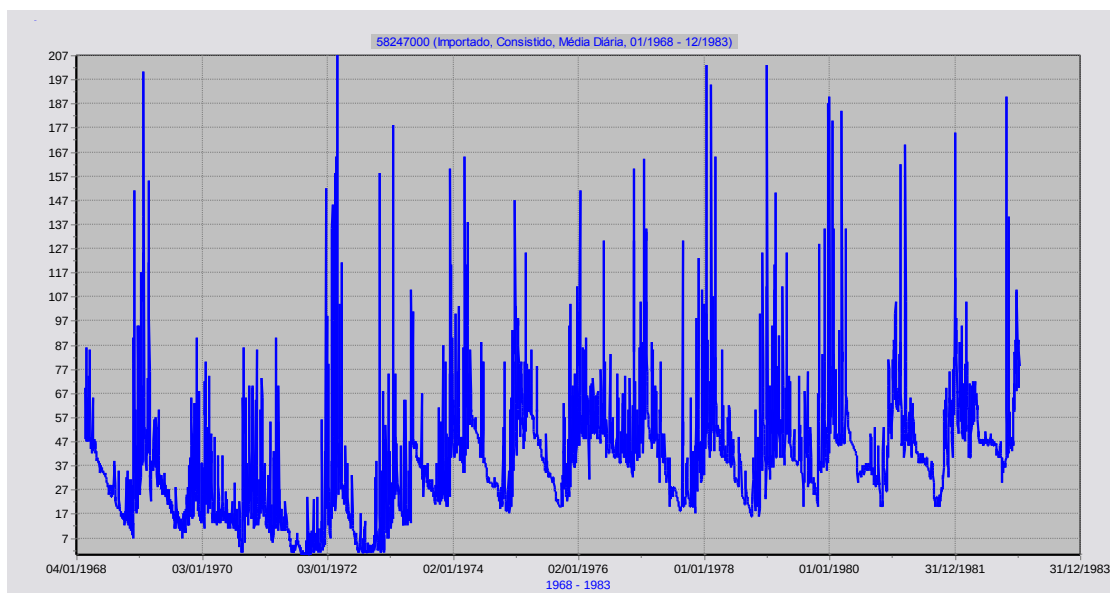


Figura 38: Cotograma da estação Fazenda Bahia no rio Sesmaria

VI.3) Sensores automáticos

Duas semanas após as instalações dos sensores automáticos, a estação São João foi depredada, os *dataloggers*, baterias e sensores foram furtados. A reinstalação da estação só pôde ser realizada no final de setembro de 2009, devido ao tempo para aquisição de recursos financeiros, novos equipamentos, calibração dos sensores e construção da infra-estrutura física.

Após o tratamento dos dados retirados dos *dataloggers* das estações constataram-se grandes incoerências dos valores registrados. Esta inconsistência dos dados deu-se devido ao mau funcionamento das baterias. Após as visitas nas estações, quando era efetuada a troca das baterias, as estações funcionavam bem por pouco tempo, em média dez dias. Após este período acontecia, em todas elas, de os sensores desligarem à noite por falta de energia, pois os painéis solares não captavam energia suficiente para reabastecer as baterias, assim como em dias nublados. O sistema só voltava a funcionar quando a bateria atingia 12 V, devido ao regulador de voltagem que era necessário para quando houvesse o excesso de energia proveniente do sol, os equipamentos não queimassem. Testou-se resolver o problema de energia utilizando duas baterias para cada estação, o que não funcionou

porque o sistema só reiniciava quando as duas estivessem carregadas, o que às vezes levava semanas para ocorrer.

Apesar do carregamento das baterias durante o dia, ela não sustentava a noite os equipamentos porque, os *dataloggers* utilizados nesta pesquisa, diferentemente de outros modelos, não desligam os sensores quando não estão captando os dados, ou seja, os demais se programados a registrarem a cada quinze minutos, hibernam neste intervalo, consumindo menos energia.

Mesmo quando os *dataloggers* estavam registrando dados, estes se apresentaram duvidosos. A justificativa para isso é que devida à grande oscilação de energia, os sensores não funcionavam corretamente, já que eles medem pulsos elétricos, necessitando de alimentação constante e estável de energia. Um exemplo de inconsistência dos dados pode ser constatado na Figura 39, que apresenta o gráfico dos registros a cada 15 minutos da estação Formoso no período de 24 horas. O sensor de turbidez não estava com energia suficiente para permanecer funcionando, o que torna duvidosos os dados dos demais sensores.

Além do problema com a energia, cada estação apresentou problemas específicos ou incidentes. Na estação Feio minava água por baixo da caixa onde estavam os *dataloggers*, o que conseqüentemente oxidava os contatos dos fios que ligavam os sensores. Na estação Sesmaria, com o solapamento das margens do rio, os canos onde estavam os sensores oscilavam batendo uns nos outros com o fluxo d'água e às vezes ficavam assoreados. A estação Formoso foi onde houve maior problema com o painel solar, pois não havia posição para sua instalação onde ocorresse incidência solar direta e, na localização da estação, há uma plantação de bananeiras, o que acarretava acúmulo de folhas e galhos nos sensores, impossibilitando leitura dos mesmos. No rio São João, após o furto, foi reinstalada a estação a montante da primeira, em um local onde havia escassez de luz solar, dificultando a recarga da bateria.

No final do ano de 2009, ocorreu um grande evento chuvoso que danificou todas as estações automáticas e carregou as réguas linimétricas. Todos os *dataloggers* ficaram submersos, mesmo na estação São João, onde os sensores estavam suspensos a uma altura, aproximada, de 1,5 m do chão e distante da margem do rio.

As Figuras 39 a 50 apresentam os gráficos gerados com os dados extraídos dos *dataloggers*: nível d'água (NA), turbidez e condutividade elétrica (CE). Em alguns casos acrescentou-se a precipitação, a cota (diária lida pelo observador) e a vazão gerada a partir das cotas para análise da consistência dos registros. Vale ressaltar que os dados do sensor de turbidez quando atingem 1.000 NTU, permanecendo constante, indicam que o equipamento estava com deficiência de energia, o que o impossibilitava de ler os pulsos corretamente.

Devido a todos os problemas ocorridos com as estações automáticas e às inconsistências e incertezas dos dados obtidos, optou-se por não utilizá-los nas análises, já que foi constatado que os dados fluviométricos obtidos através do leitor de campo foram mais fidedignos que os automáticos. Algum tempo depois da desativação das estações, consequência de eventos extremos de chuva, o GEOHECO instalou outras estações na bacia do Sesmaria (em cabeceiras de drenagem), com equipamentos semelhantes aos utilizados neste estudo, e constatou-se que o problema de alimentação das baterias teria sido resolvido se fossem ligados no máximo dois sensores para uma bateria, ao invés de três como havia sido feito.

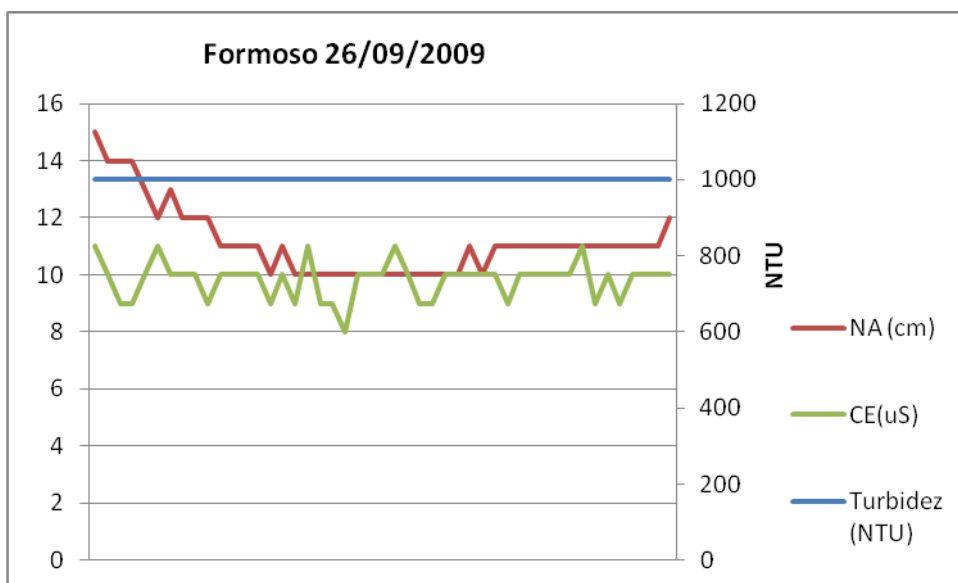


Figura 39: Medições a cada quinze minutos de nível d'água (NA), Turbidez e Condutividade elétrica (CE) no período 24 horas na estação Formoso

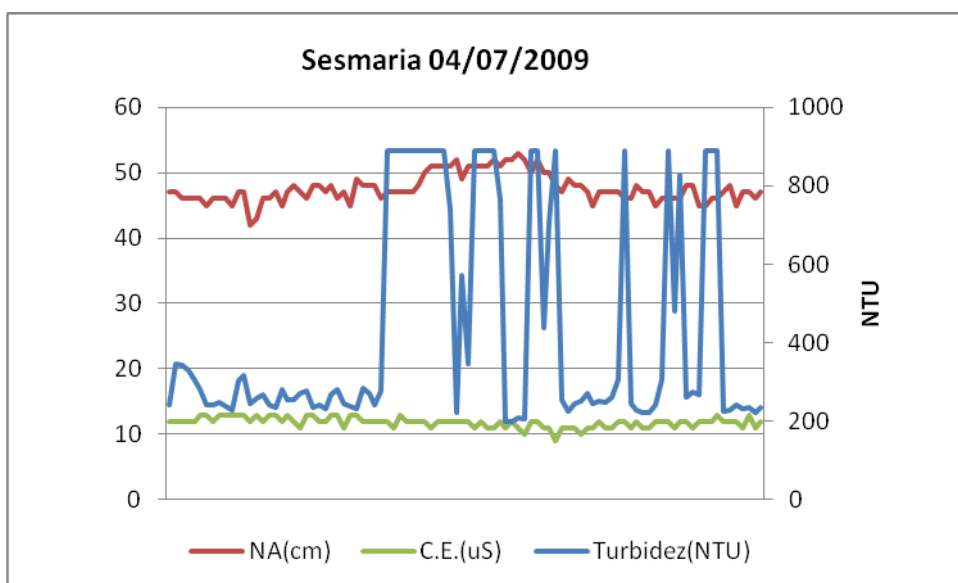


Figura 40: Medições a cada quinze minutos de nível d'água (NA), Turbidez e Condutividade elétrica (C.E.) no período de 24 horas na estação Sesmaria

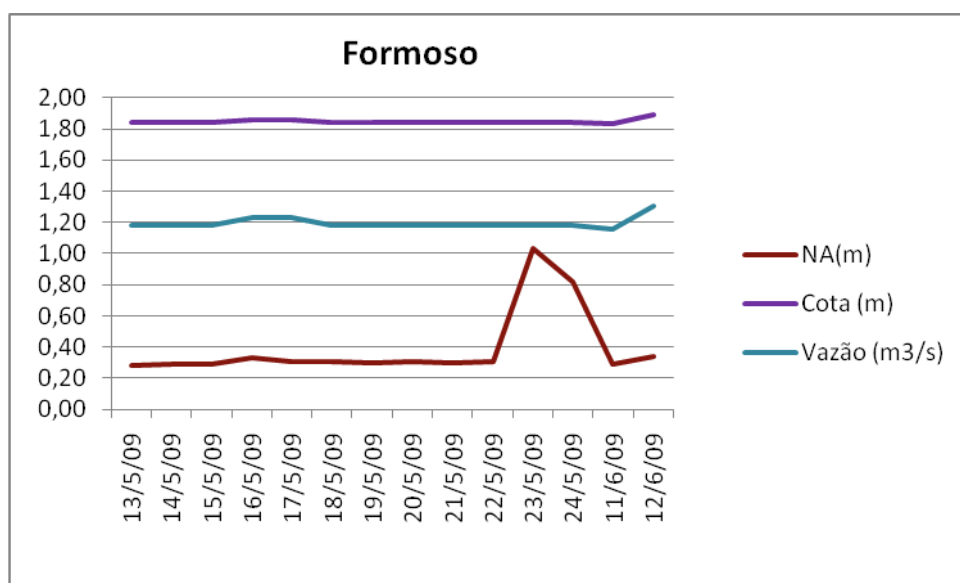


Figura 41: Estação Formoso - nível d'água (média diária) registrado nos sensores automáticos e as leituras de cota do observador e sua respectiva vazão

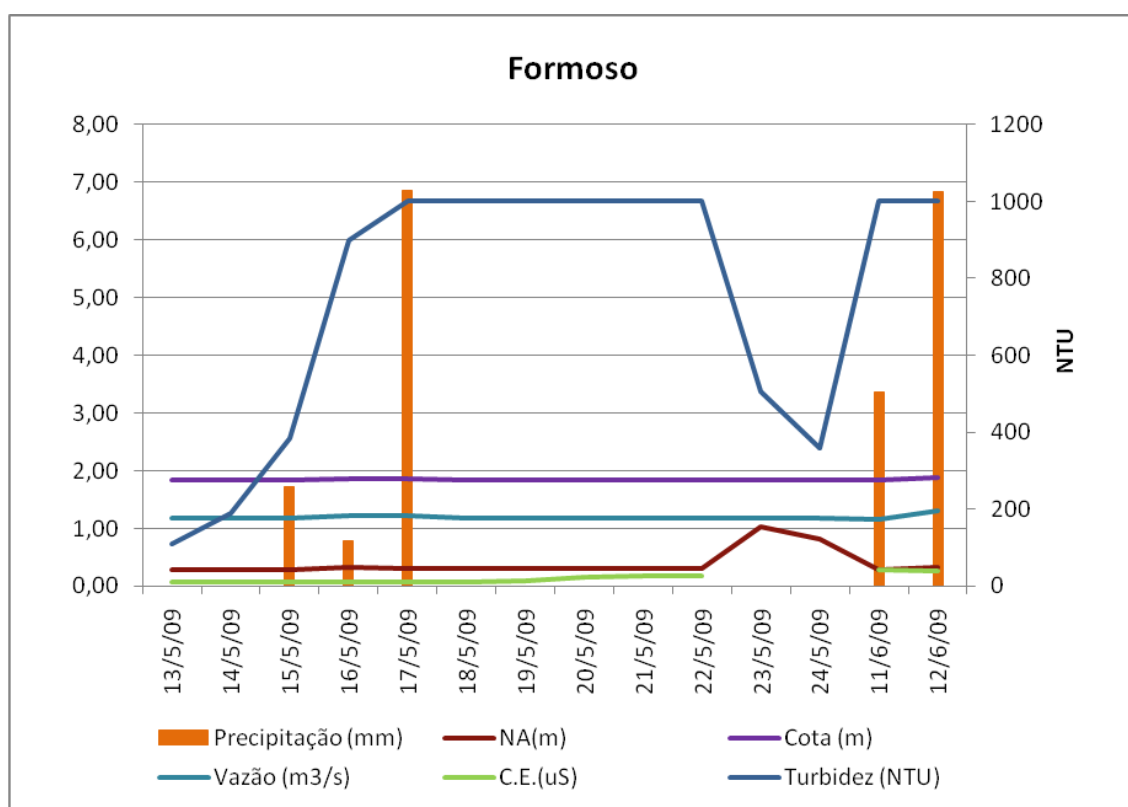


Figura 42: Estação Formoso - médias diárias dos sensores automáticos (turbidez, condutividade elétrica e nível d'água), leitura da cota feita pelo observador e sua respectiva vazão, e precipitação diária acumulada

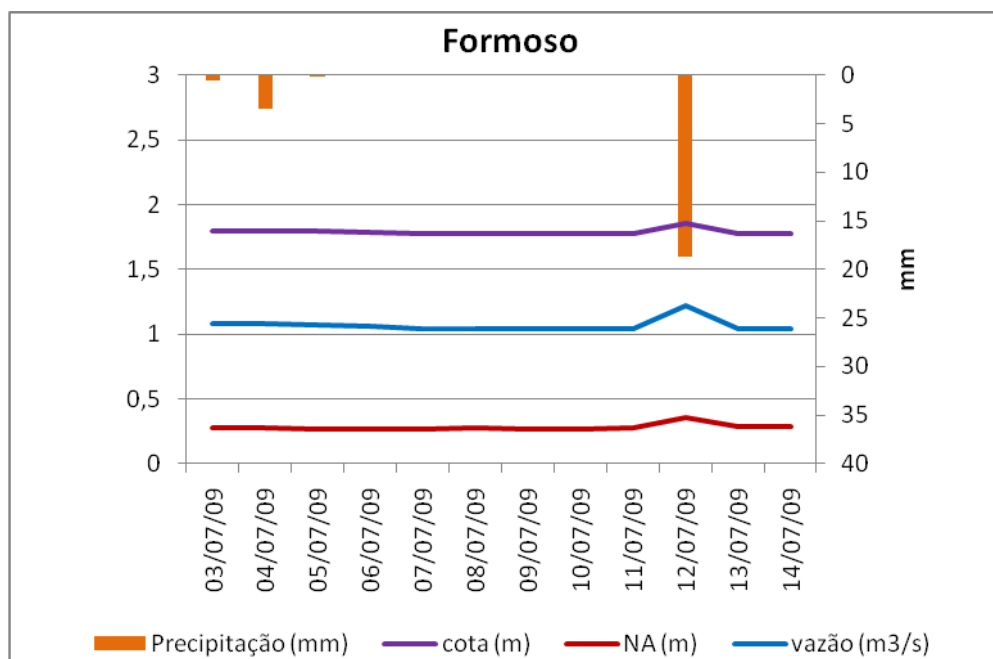


Figura 43: Estação Formoso - nível d'água (média diária) registrado nos sensores automáticos, leitura da cota feita pelo observador e sua respectiva vazão, e precipitação diária acumulada

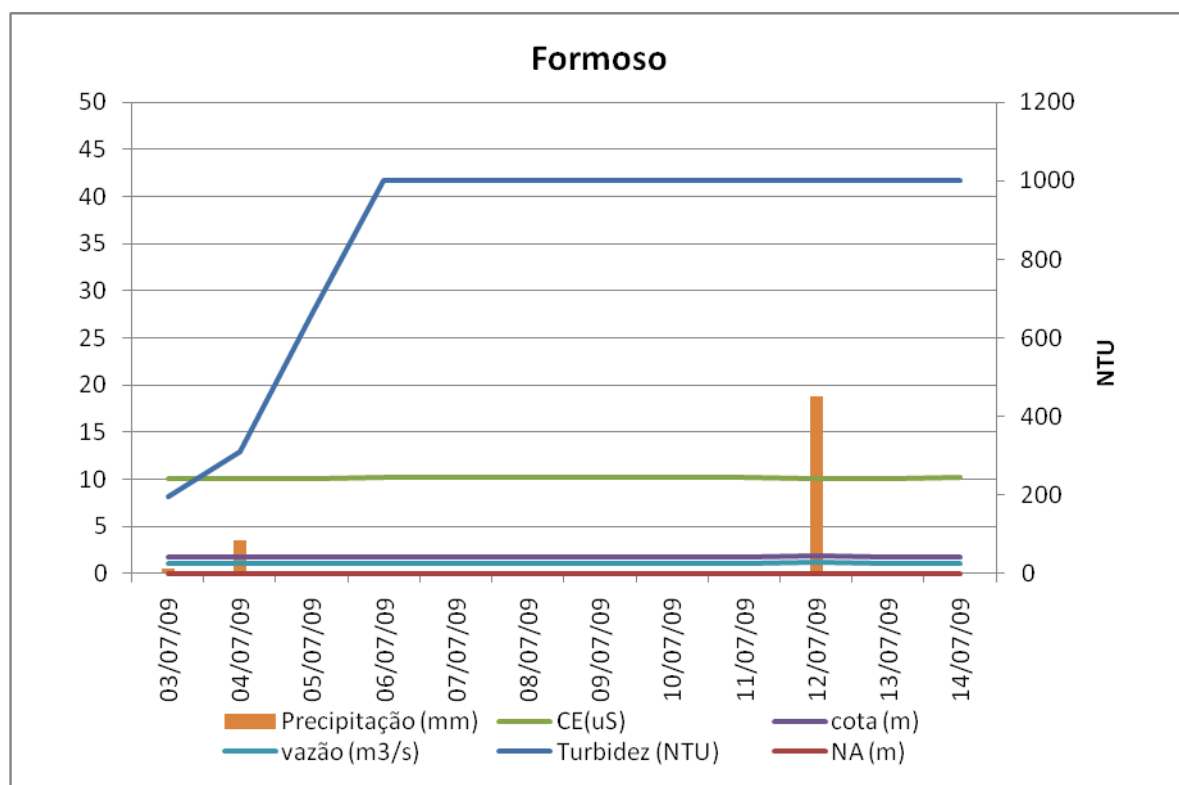


Figura 44: Estação Formoso - médias diárias dos sensores automáticos (turbidez, condutividade elétrica e nível d'água), leitura da cota feita pelo observador e sua respectiva vazão, e precipitação diária acumulada

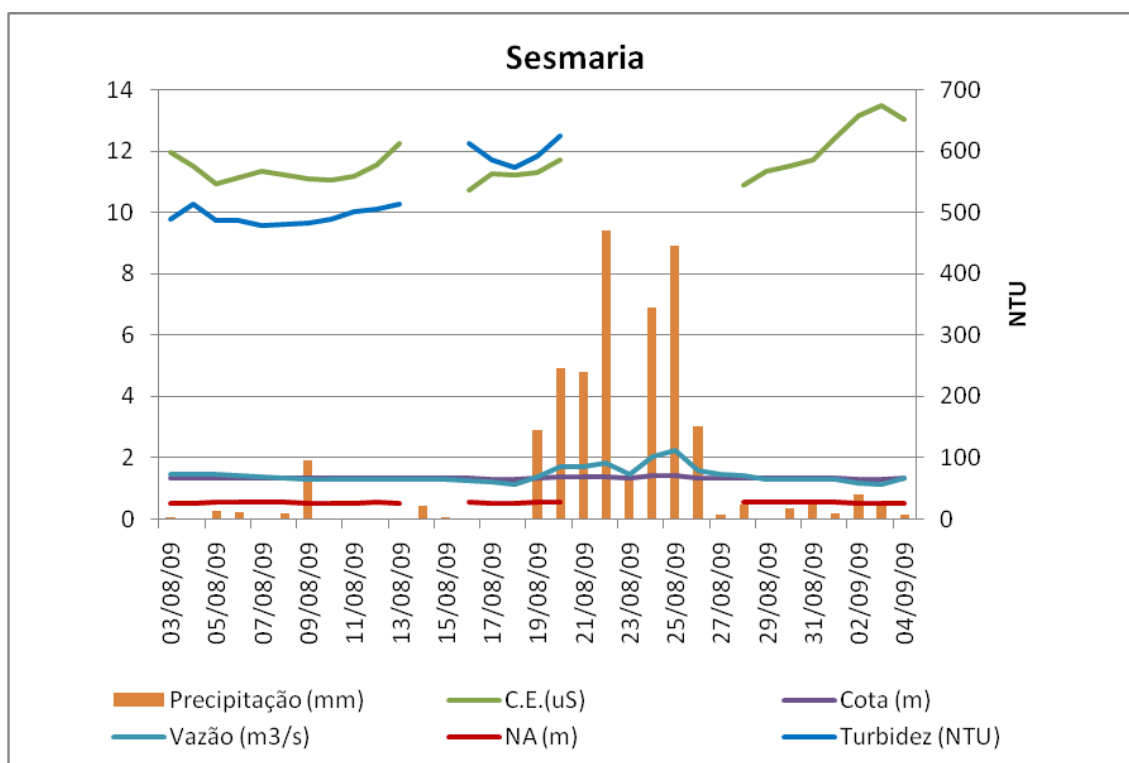


Figura 45: Estação Sesmaria - médias diárias dos sensores automáticos (turbidez, condutividade elétrica e nível d'água), leitura da cota feita pelo observador e sua respectiva vazão, e precipitação diária acumulada

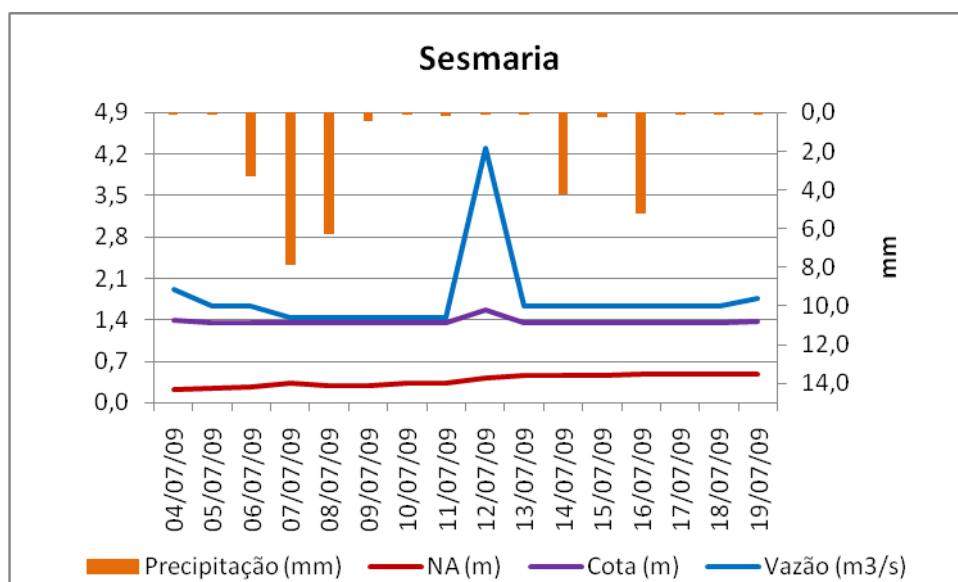


Figura 46: Estação Sesmaria - nível d'água (média diária) registrado nos sensores automáticos, leitura da cota feita pelo observador e sua respectiva vazão, e precipitação diária acumulada

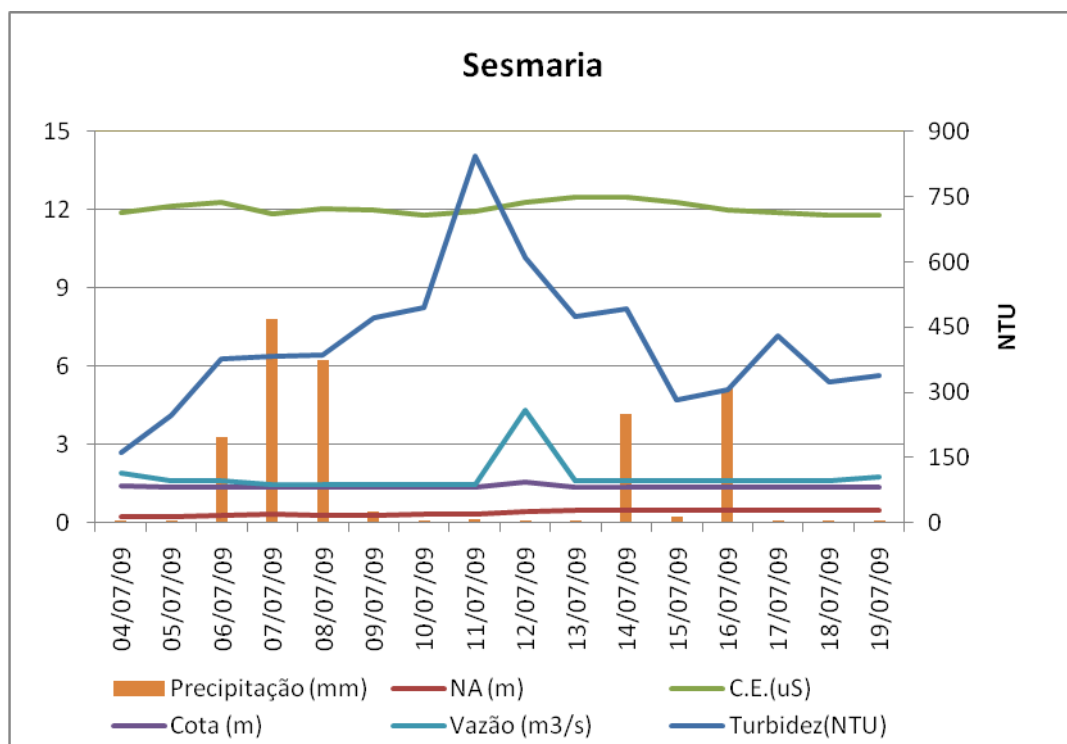


Figura 47: Estação Sesmaria - médias diárias dos sensores automáticos (turbidez, condutividade elétrica e nível d'água), leitura da cota feita pelo observador e sua respectiva vazão, e precipitação diária acumulada

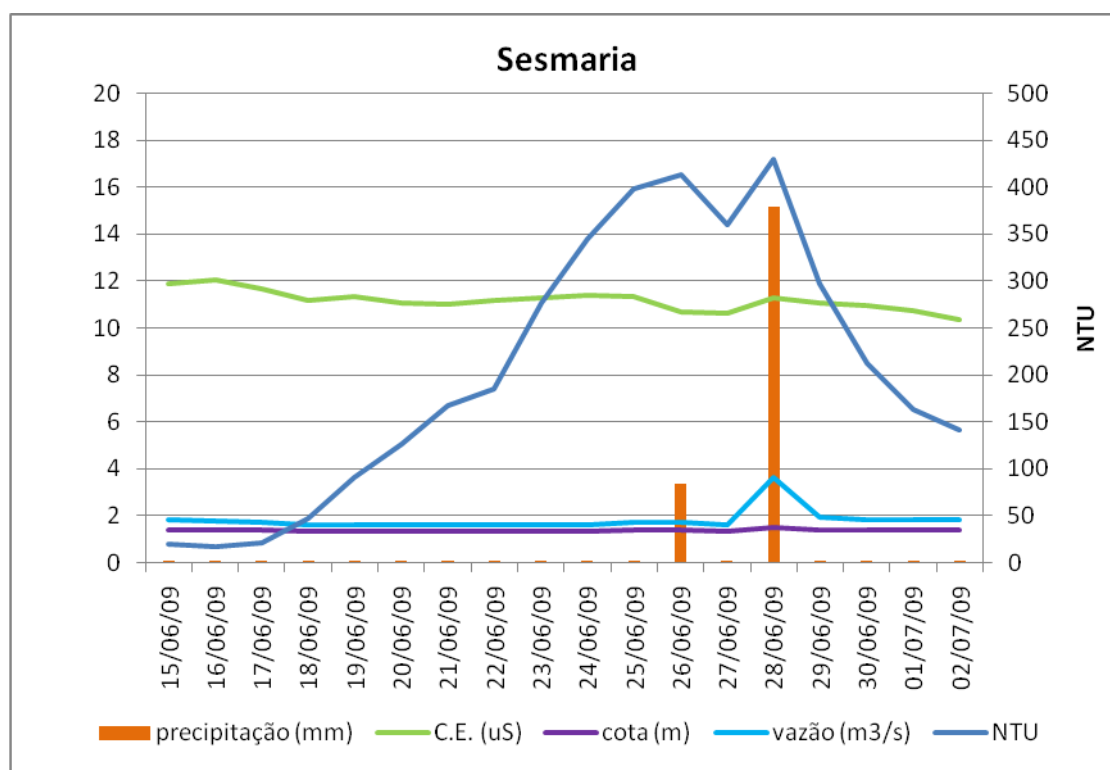


Figura 48: Estação Sesmaria - médias diárias dos sensores automáticos (turbidez e condutividade elétrica), leitura da cota feita pelo observador e sua respectiva vazão, e precipitação diária acumulada

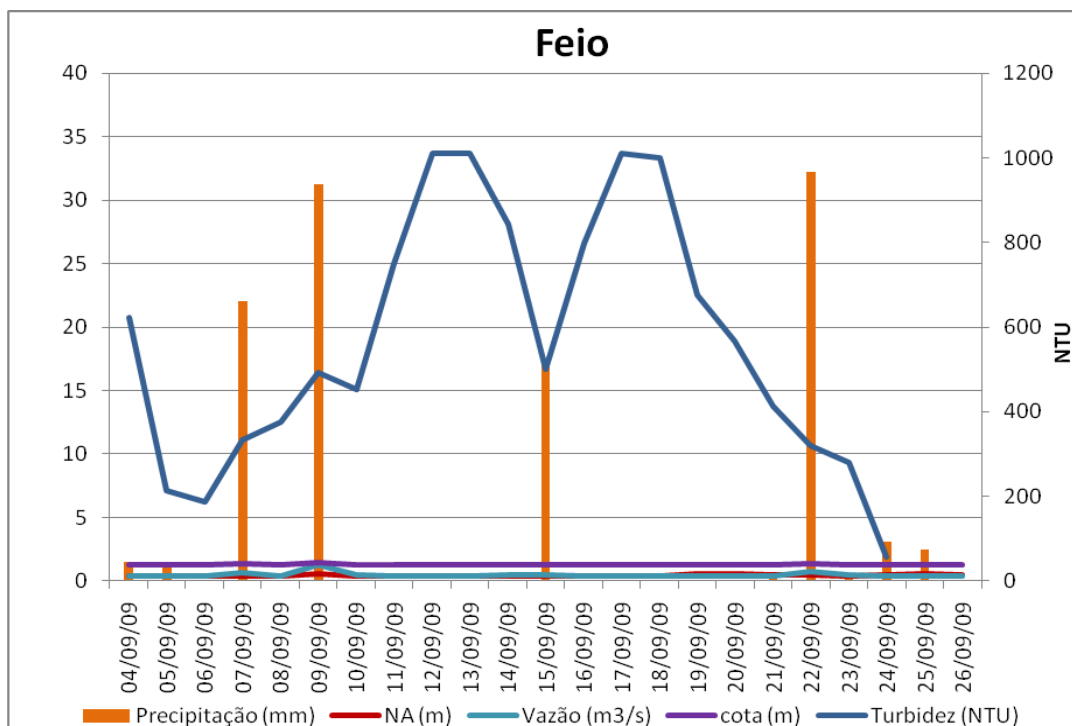


Figura 49: Estação Feio - médias diárias dos sensores automáticos (turbidez e nível d'água), leitura da cota feita pelo observador e sua respectiva vazão, e precipitação diária acumulada

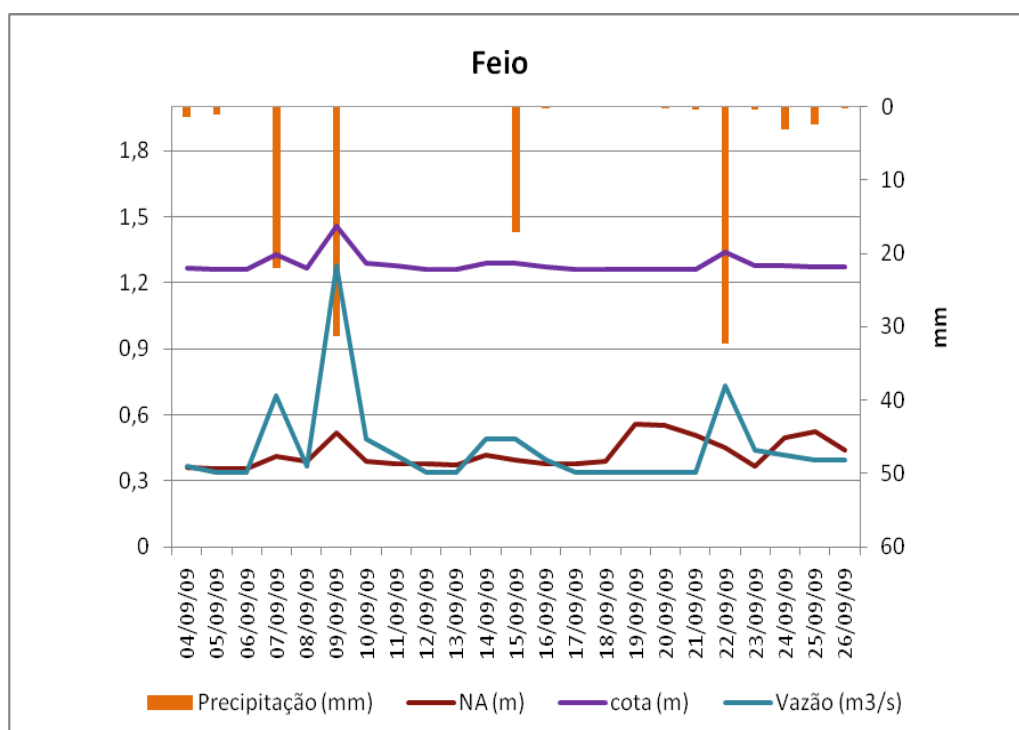


Figura 50: Estação Feio - nível d'água (média diária) registrado nos sensores automáticos, leitura da cota feita pelo observador e sua respectiva vazão, e precipitação diária acumulada

VI.4) Avaliação das alterações de fluxos superficiais e subterrâneos

VI.4.1) Balanço hídrico

Primeiramente, foi calculado o balanço hídrico simplificado ($EVT = P - Q$) nas quatro sub-bacias para o período de abril a novembro de 2009 (Tabela 1), devido a períodos sem dados nas estações Sesmaria e Feio, decorrentes de fortes chuvas no verão de 2008/2009 durante as quais as réguas limimétricas foram carregadas pelo rio e as cotas estavam inconsistentes, como já relatado anteriormente.

Tabela 1: Resultado do balanço hídrico, vazão específica, coeficiente de escoamento e precipitação acumulada nas quatro estações no período de abril a novembro de 2009

Período: abril a novembro (2009)	Formoso	São João	Sesmaria	Feio
Balanço hídrico (mm)	433,517	308,288	387,176	426,989
Vazão específica (L/s.km ²)	17,649	16,112	16,807	15,665
Coeficiente de escoamento	0,462	0,524	0,478	0,436
Precipitação (mm)	805,589	647,952	741,491	757,228

O problema do cálculo do balanço hídrico excluindo os meses de maior quantidade de chuva é que a evapotranspiração varia com a estação do ano, apresentando valores maiores no período chuvoso, conforme se pode constatar no balanço hídrico sequencial climatológico de Thornthwaite e Mather (Figura 51) com os dados da estação meteorológica de Resende (INMET), que pode ser representativa do clima da região (Araujo *et al.*, 2010). O balanço hídrico sequencial climatológico é uma estimativa da condição hídrica de uma localidade, com base em dados meteorológicos. Seu resultado pode ser usado para a classificação climática, por exemplo, segundo o tipo climático de Thornthwaite e Mather (1955), que no caso das estações Resende e Sesmaria seriam o Tipo A superúmido, sendo os meses maio, junho, julho e agosto com déficit hídrico na região.

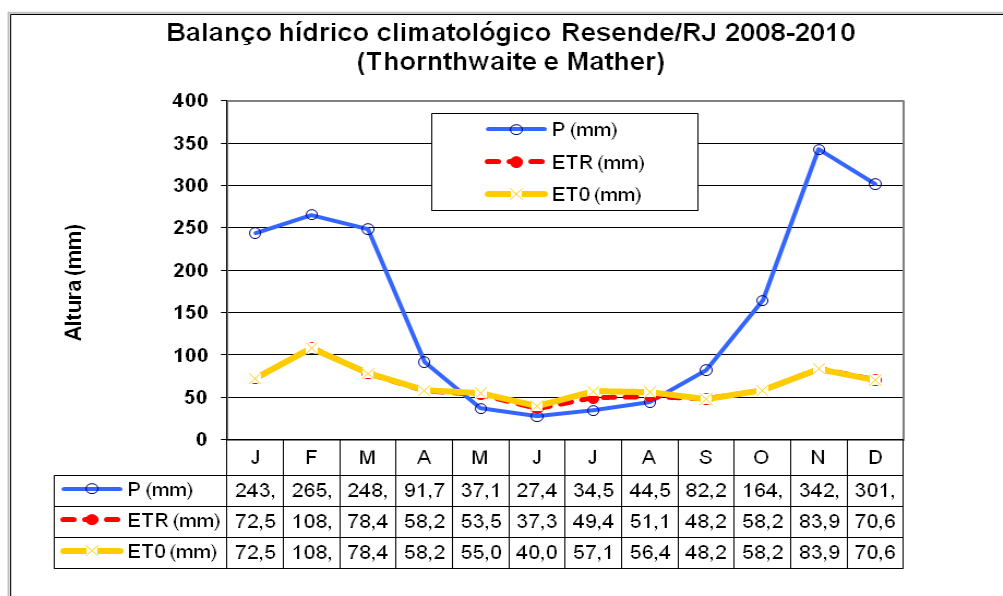


Figura 51: Balanço hídrico sequencial climatológico em Resende/RJ

Optou-se, então, pela análise de um ano completo (dezembro de 2008 a novembro de 2009) das sub-bacias onde havia dados para esse período: Formoso e São João.

O saldo do balanço hídrico simplificado, no período de um ano, foi de 1.178,6 mm para a bacia do rio São João e 1.038,5 mm para a bacia do rio Formoso. Esse saldo pode ser interpretado como equivalente à evapotranspiração real total anual ocorrida nas sub-bacias. A diferença entre as sub-bacias é de 140,1 mm, o que representa 11,8% para o São João e 13,5% para o Formoso, valores percentuais superiores a 10% que corresponderiam à faixa de incerteza da mensuração dos parâmetros hidrometeorológicos envolvidos nesta análise. Assim, a diferença entre os saldos nas bacias poderia ser considerada indicadora de alguma diferença na taxa de evapotranspiração nas sub-bacias em função do uso do solo.

Do mapa de uso do solo da bacia (Figura 7), apresentado anteriormente, verifica-se a distribuição da cobertura vegetal conforme a Tabela 2, para as sub-bacias dos rios São João e Formoso.

Tabela 2: Distribuição da cobertura vegetal nas sub-bacias São João e Formoso

Classe de Uso	São João		Formoso	
	Área (km ²)	Área %	Área (km ²)	Área %
Eucalipto	2,45	22,1	0,05	0,09
Floresta	5,04	45,5	26,61	50,2
Graminea	3,58	32,4	24,13	45,5
Solo exposto			2,27	4,3
Total	11,07	100	53,06	100

Verifica-se que nas duas bacias a floresta ainda é o uso predominante. A presença do eucalipto é mais expressiva na bacia do rio São João, cuja área de cobertura somada à de floresta resulta 68%. Na bacia do Formoso, floresta e eucalipto somam 50,1% da área.

É possível comparar-se o resultado do balanço hídrico simplificado com a evapotranspiração real total anual que poderia ser obtida com o método preconizado pela FAO (Allen *et al.*, 1998), com base em dados meteorológicos e coeficiente de cultura.

No balanço hidroclimatológico apresentado, a evapotranspiração potencial (ET₀) foi calculada pelo método FAO Penman-Monteith, que é um aprimoramento do método de Penman, que em 1948 combinou o balanço de energia com o método de transferência de massa e derivou uma equação para computar a evaporação de superfície de água livre, usando registros climatológicos padrão de insolação, temperatura, umidade e velocidade do vento. Este método combinado foi posteriormente aprimorado por vários pesquisadores, que estenderam sua aplicação a superfícies cultivadas com a introdução de fatores de resistência aerodinâmica e de superfície, ou à liberação de água pelos estômatos dos vegetais.

Para o eucalipto, na fase do ciclo na bacia do rio São João, considerou-se o coeficiente de cultura (K_c) = 1. Almeida e Soares (2001) estimaram o valor K_c do eucalipto em torno de 1, que poderia ser adotado também para a floresta nativa. Alves (2009), em sua tese de doutorado estimou o K_c do eucalipto em 0,82 na fase de desenvolvimento avançado. No entanto, a autora concluiu que o valor obtido em sua pesquisa não deveria ser considerado definitivo.

Para gramíneas do tipo pasto extensivo, encontrado nas duas sub-bacias, em estágio médio ou final de seu ciclo de vida, pode-se adotar $K_c = 0,70$. Para solo exposto, o K_c pode variar de 0,1 (solo seco) a 1,05 (solo permanentemente úmido). Para fins do cálculo, neste trabalho, foram considerados os meses chuvosos (com total mensal $> 100\text{mm}$), do período de setembro a março (212 dias), com solo permanentemente úmido, e o período restante, de abril a agosto (153 dias), com solo seco. Da ponderação no tempo resultou, para o solo exposto, o $K_c = 0,65$.

Considerando-se todas as culturas como permanentes e que a evapotranspiração potencial nas duas sub-bacias é a mesma, pois as condições climáticas também são as mesmas, representadas pelos índices observados na estação meteorológica de Resende, o que faria a diferença na evapotranspiração real é a cobertura vegetal, podendo ser traduzida pelo efeito dos coeficientes de cultura sobre a área plantada com cada cultura.

A ponderação de K_c em função dos usos nas duas sub-bacias resulta nos valores: $K_c = 0,90$ para a bacia do rio São João e $K_c = 0,85$ para a bacia do rio Formoso. Sendo $ETR_{S. João} = 0,90 \times ET_0$; e $ETR_{Formoso} = 0,85 \times ET_0$.

Considerando os diferentes coeficientes de cultura, a evapotranspiração real na bacia do rio Formoso seria então 94% ($0,85/0,90$) da evapotranspiração real na bacia do rio São João. A mesma relação com os valores de evapotranspiração real obtidos do balanço hídrico simplificado resulta em 88% ($1.038,5/1.178,7$). Podendo-se aproximar os dois valores para 90%, conclui-se que estariam coerentes os valores de evapotranspiração real calculados com o balanço hídrico simplificado.

A evapotranspiração potencial (ET_0), calculada pelo método FAO Penman-Monteith, conforme o balanço hídrico climatológico resultou menor que o esperado para a região, e levaria a valores de evapotranspiração real menores que os calculados pelo balanço hídrico simplificado para as duas bacias. Os valores obtidos do balanço hídrico simplificado, por sua vez, contêm, na realidade, a parcela de variação do volume armazenado no subsolo como água subterrânea, que foi considerada desprezível. Não foi possível estimar a recarga do aquífero com os dados disponíveis, ainda que com o método simplificado apresentado por Fetter (1994), uma vez que este exige no

mínimo dois anos hidrológicos completos de vazões diárias, e só havia um ano completo.

A análise dos coeficientes de cultura, embora confirmem as diferenças entre as taxas anuais de evapotranspiração real nas sub-bacias, não traz informação sobre a influência do eucalipto na bacia do rio São João, uma vez que o coeficiente de cultura para a floresta seria igual ao do eucalipto (=1).

VI.4.2) Indicadores regionais

Calculou-se a vazão específica e o coeficiente de escoamento para o mesmo período para as duas bacias. Na bacia do São João, a vazão específica encontrada foi de 20,6 L/s.km², o coeficiente de escoamento 0,355, com precipitação acumulada na ordem de 1.828,6 mm. Os valores para o Formoso foram, respectivamente, de: 22,5 L/s.km²; 0,406 e 1.750,3 mm.

Esperava-se que a bacia do São João apresentasse uma vazão específica maior que a do Formoso, devido à sua área de drenagem ser menor e considerando-se desprezível a diferença entre as precipitações das bacias (Tabela 3). Como isso não ocorreu, o resultado demonstrou que a produção de água no São João é inferior à do Formoso (Figura 52), o que pode ser observado também através do coeficiente de escoamento.

A bacia do Formoso possui altitudes maiores que as da bacia do São João, amplitudes de 1.680 m a 460 m e 820 m a 460 m, respectivamente. Considerando que a evapotranspiração varia com a altitude e a temperatura, podendo apresentar valores menores em áreas mais elevadas, a diferença no balanço hídrico entre as duas bacias poderia ser assim justificada. No entanto, os valores das vazões específicas e coeficientes de escoamento contribuem para a conclusão de que há menos precipitação sendo transformada em vazão na bacia do São João.

Tabela 3: Resultados do balanço hídrico, vazão específica, coeficiente de escoamento e precipitação acumulada, nas estações Formoso e São João, no período de dezembro de 2008 a novembro de 2009

Período: dezembro (2008) a novembro (2009)	Formoso	São João
Balanço hídrico (mm)	1038,5	1178,6
Vazão específica (L/s.km2)	22,573	20,611
Coeficiente de escoamento	0,407	0,355
Precipitação (mm)	1750,3	1828,6

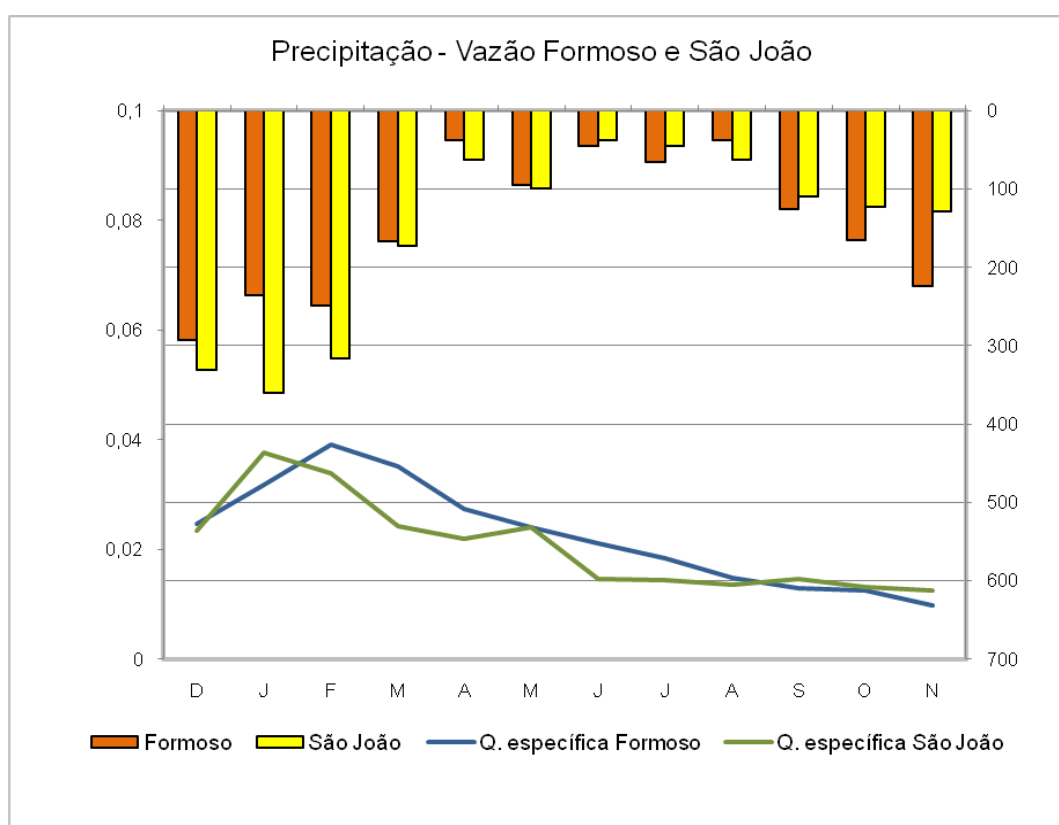


Figura 52: Precipitação x Vazão Específica nas estações Formoso e São João

As Figuras 53 e 54 apresentam os gráficos de coeficiente de escoamento e vazão específica, com dados do período de dezembro (2008) a novembro (2009) das sub-bacias do Sesmária (São João e Formoso) e dados de períodos anteriores de outras bacias de drenagem do MVRPS, em diferentes estações. Neles, pode-se verificar que a vazão específica e o coeficiente de escoamento do rio São João são os mais baixos para a faixa de área de drenagem da bacia. O valor mais elevado do coeficiente de

escoamento do rio Formoso é coerente o com seu, também elevado, IED (Figura 8).

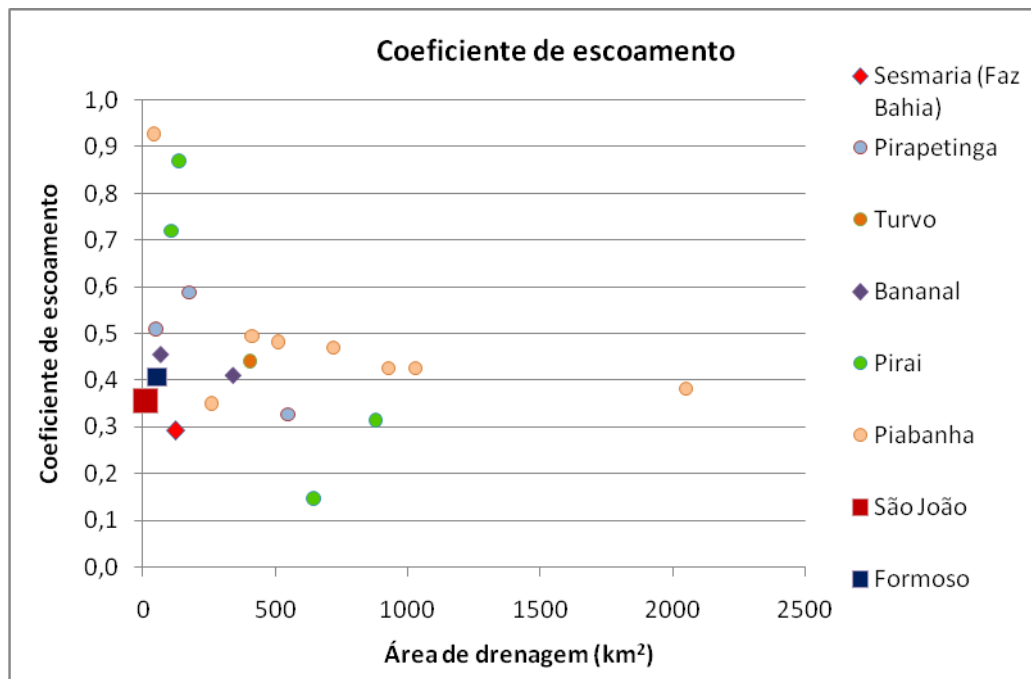


Figura 53: Coeficiente de escoamento nas estações São João, Formoso e outras do Médio Paraíba e rio Piabanha

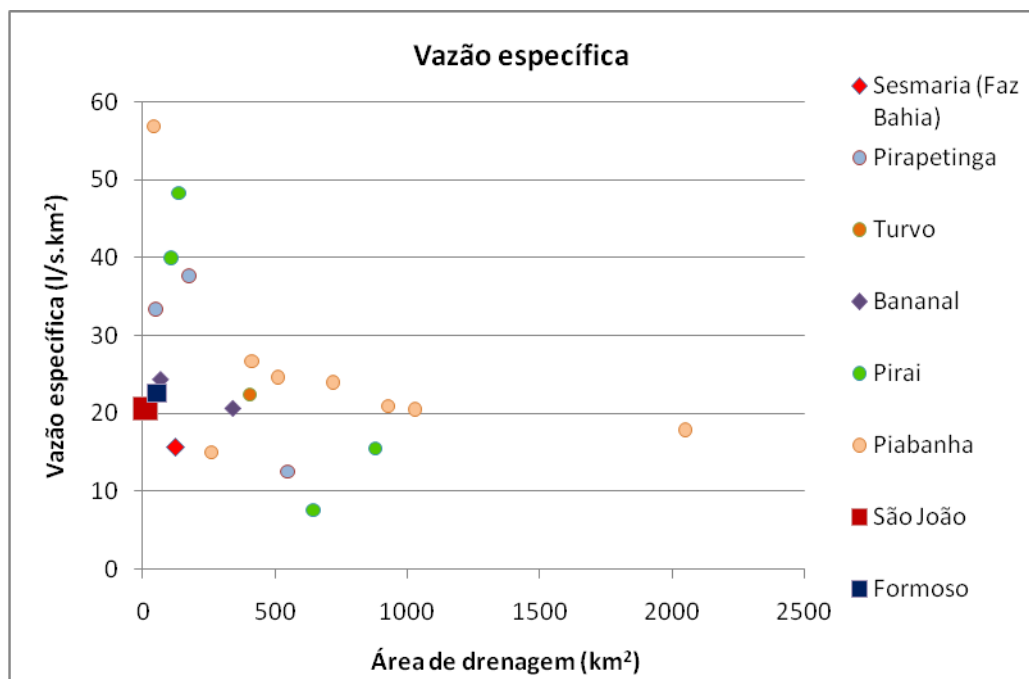


Figura 54: Vazão específica nas estações São João, Formoso e outras do Médio Paraíba e rio Piabanha

VI.4.3) Vazões mínimas e regionalização da vazão

Conforme mencionado anteriormente, nos estudos de regionalização de vazões da bacia do rio Paraíba do Sul (CPRM, 2002), a estação Fazenda Bahia, única na bacia do rio Sesmária na ocasião, não apresentou comportamento compatível com as demais estações da região do médio Paraíba, sendo, portanto, excluída da análise de regressão na obtenção das equações regionais.

Considerando-se a hipótese de que o problema da estação Fazenda Bahia era inconsistência nas vazões devida à dificuldade de ajuste da curva-chave, e não à possibilidade de o rio Sesmária não pertencer à Região Homogênea III – curso principal, de Funil até Santa Cecília, e afluentes do trecho da margem direita e esquerda –, estimaram-se as vazões de referência com a regionalização para comparação com as vazões medidas em campanhas simultâneas, realizadas neste trabalho, de modo a validar o emprego da regionalização e ao mesmo tempo avaliar a consistência das medições de vazão.

As vazões medidas foram comparadas com as vazões de estiagem $Q_{7,10}$ – vazão média mínima de sete dias de duração e 10 anos de recorrência ou 10% de probabilidade de ocorrência, Q_{95} – vazão com 95% de permanência no tempo – vazão diária cujo valor é superado em 95% do tempo do histórico de vazões; com a Q_{MLT} - vazão média de longo termo ou de longo período (vazão média anual considerado todo o histórico de dados); Q_{50} – vazão com 50% de permanência no tempo – vazão diária cujo valor é superado em 50% do tempo do histórico de vazões; e com a Q_{MC} - vazão média de cheia – que é a média de longo período das vazões máximas anuais. A Tabela 4 apresenta as equações válidas para a Região Homogênea III (CPRM, 2002).

Tabela 4: Equações válidas para a Região Homogênea III (CPRM, 2002)

Equações de regionalização (CPRM, 2002)		
$Q_{min,d} = 0,00016 \times A^{1,1905} \times P^{6,1195} \times d^{0,0723}$ sendo $d = 7$ dias para $Q_{7,10}$		
para o curso principal: $Q_{min,d} = 0,0105 \times A^{1,0058} \times d^{0,0723}$		
limites de utilização: $67 \text{ km}^2 < A < 15.991 \text{ km}^2$	Para TR = 10 anos multiplicar por	0,727
$Q_{50} = 0,0005 \times A^{1,1238} \times P^{5,6175}$ – para o curso principal: $Q_{50} = 0,0173 \times A^{0,9902}$		
$Q_{95} = 0,0006 \times A^{1,1496} \times P^{3,9122}$ – para o curso principal: $Q_{95} = 0,007 \times A^{1,0565}$		
limites de utilização: $67 \text{ km}^2 < A < 15.991 \text{ km}^2$		
$Q_{MLT} = 0,0009 \times A^{1,0808} \times P^{5,5909}$ – para o curso principal: $Q_{MLT} = 0,0303 \times A^{0,9478}$		
limites de utilização: $67 \text{ km}^2 < A < 15.991 \text{ km}^2$		
$Q_{MC} = 0,0069 \times A^{0,8934} \times P^{7,6683}$ – para o curso principal: $Q_{MC} = 0,8349 \times A^{0,7068}$		
limites de utilização: $67 \text{ km}^2 < A < 15.991 \text{ km}^2$		

As equações têm como parâmetros a área de contribuição e a precipitação média a serem definidas para cada sub-bacia. Para o cálculo da precipitação média, devem ser adotadas as isoietas totais anuais médias (Brandão *et al.*, 2000). Na Tabela 5, são apresentados os índices de precipitação e as porções de cada sub-bacia, assim como o resultado da precipitação média calculada.

Tabela 5: índices utilizados na regionalização e a precipitação anual para as sub-bacias do Sesmaria

Q regionalizada	Coeficientes	Expoente		
		d	Área (km²)	P (m)
$Q_{7,10}$	0,00016	0,0723	1,1905	6,1195
Q_{95}	0,0006		1,1496	3,9122
Q_{50}	0,0005		1,1238	5,6175
$Q_{média}$	0,0009		1,0808	5,5909
Q_{MC}	0,0069		0,8934	7,6683
P isoietas (m)	Formoso	Feio	S. João	Sesmaria
1,75	60%	45%		45%
1,65	40%	55%		55%
1,625			100%	
Pmedia (m)	1,710	1,695	1,625	1,695

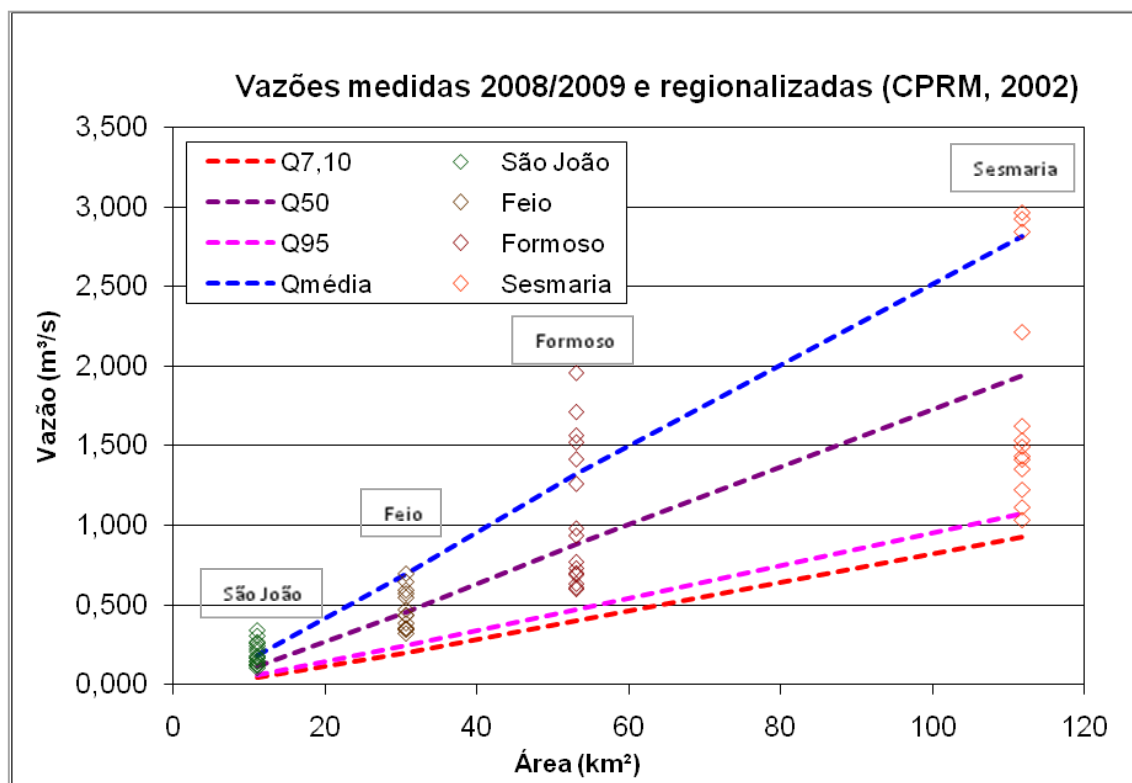
As vazões de referência calculadas com a regionalização são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Vazões de referência calculadas com a regionalização

rio	Área (km²)	P(m)	Q regionalizada (m³/s)				
			Q _{7,10}	Q ₉₅	Q ₅₀	Q _{média}	Q _{MC}
São João	11,1	1,625	0,046	0,064	0,114	0,183	2,446
Feio	30,7	1,695	0,199	0,242	0,454	0,696	8,407
Formoso	53,1	1,71	0,404	0,470	0,883	1,321	14,671
Sesmaria	111,8	1,695	0,982	1,070	1,942	2,814	26,681

A Figura 55 mostra as vazões medidas em cada sub-bacia em campanhas simultâneas e as vazões de referência calculadas. Verifica-se que praticamente todas as vazões medidas resultaram maiores que a correspondente vazão de 95% de permanência. Nos rios São João, Formoso e Sesmaria, 44%, 33% e 23% das medições, respectivamente, foram maiores que a vazão média de longo período, o que parece estar coerente, pois 2008 e 2009 foram anos úmidos acima da média.

Cerca de 50% das medições realizadas nos rios Feio e Formoso resultaram acima das vazões de 50% de permanência. No rio Sesmaria 30% das vazões medidas foram superiores à vazão de 50% de permanência e no rio São João 94%. Deve-se ressaltar que as estações dos rios Feio e São João, esta em especial, têm áreas de drenagem fora da faixa de validade das equações. No entanto, é possível concluir que, na ausência de metodologia mais precisa, as equações de regionalização dos estudos CPRM (2002) poderiam ser adotadas para estimar vazões da bacia do rio Sesmaria. As vazões mínimas requerem mais atenção na definição da curva-chave em seu ramo inferior, em especial para uma bacia como a do rio Sesmaria, onde o assoreamento e a erosão do leito são marcantes, sendo, portanto, necessárias medições mais freqüentes, na realidade em todas as faixas de nível d'água, pois as margens também se modificam.



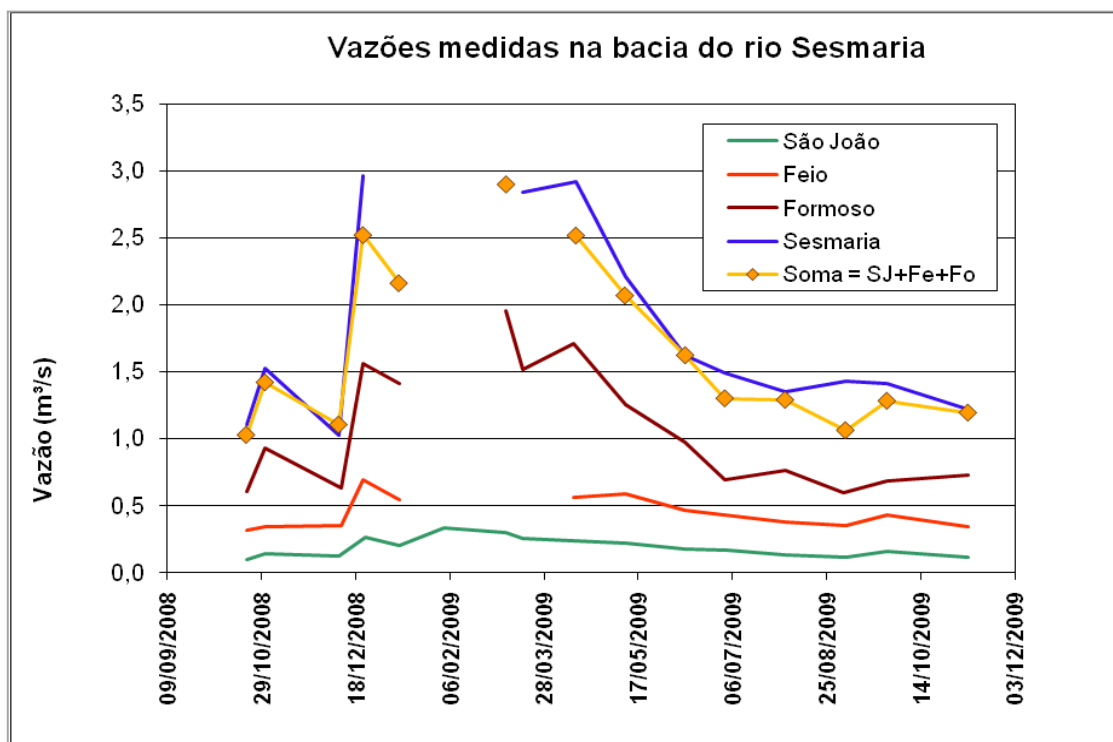


Figura 56: Análise de consistência das vazões medidas nas estações da bacia do rio Sesmaria

A comparação da soma das vazões nos três afluentes com as vazões medidas no rio Sesmaria deveria mostrar valores ligeiramente superiores no rio Sesmaria. Esse comportamento confirmou-se em nove das 12 medições simultâneas realizadas. Em duas datas, a vazão incremental resultou negativa, mas dentro da faixa de precisão das medições, isto é, com diferenças inferiores a 10% em módulo. No dia 4/09/2009, as vazões medidas no rio Sesmaria foram muito superiores à soma dos afluentes (25%), mas tal diferença pôde ser explicada por forte precipitação ocorrida de forma localizada na área da bacia incremental.

Assim, conclui-se que as medições realizadas são consistentes, até mesmo aquelas que tiveram que ser descartadas no traçado da curva-chave. As medições foram descartadas porque não foi possível confirmar para elas uma tendência distinta por falta de outras medições em datas próximas nas estações. O problema de definição das vazões na bacia do rio Sesmaria e seus afluentes é a grande mobilidade do leito, com erosão e assoreamento frequentes a cada evento chuvoso mais expressivo, configurando diferentes tendências para a relação cota x descarga líquida (curva-chave).

VII) CONCLUSÕES

O balanço hídrico simplificado calculado nas sub-bacias São João e Formoso apresentou diferença de 140,1 mm, com valores de 1.178,6 e 1.038,5 mm, respectivamente. Utilizando o coeficiente de cultura para calcular a evapotranspiração real com o método FAO Penman-Monteith, concluiu-se que a diferença obtida no balanço hídrico simplificado estaria coerente. Os valores das vazões específicas e coeficientes de escoamento contribuem para a conclusão de que há menos precipitação sendo transformada em vazão na bacia do São João.

No entanto, deve-se considerar que, nas duas bacias, a floresta ainda é o uso predominante. A presença do eucalipto é mais expressiva na bacia do rio São João, cuja área de cobertura somada à de floresta resulta 68%, e na bacia do Formoso, floresta e eucalipto somam 50,1% da área, o que poderia justificar a diferença obtida no balanço hídrico. Ainda que a estimativa da evapotranspiração fosse mais precisa, não seria possível separar os volumes evapotranspirados pela floresta e pelo eucalipto, que segundo a literatura, apresentam taxas muito semelhantes.

A bacia do rio Sesmaria apresenta um sistema bastante dinâmico quanto à erosão e à deposição fluvial, tornando-se necessárias medições de vazão frequentes, para validação da relação cota-descarga em estações fluviométricas.

Analizando as estações fluviométricas implementadas para esta dissertação, verificou-se que a região da bacia do rio Sesmaria pode ter comportamento semelhante ao das demais estações da Região Homogênea III do MVRPS CPRM (2002), pois as equações de regionalização estimam vazões compatíveis com as medições realizadas no campo. Na comparação percebe-se, por um lado, que as medições são consistentes e, por outro, que as equações poderiam ser usadas, na falta de metodologia mais precisa, para estimar vazões de referência para a bacia do rio Sesmaria.

Devido ao funcionamento deficiente das estações automáticas e dos imprevistos causados por fortes chuvas e vandalismo, não foi possível a análise das cargas sólida e solúvel no canal fluvial. Considerando o número de

estradas de terra utilizadas para manejo e colheita do eucalipto, que contribuem para aumento da erosão, tornam-se necessários estudos para avaliar e quantificar o impacto referente à carga de sedimentos transportados para o canal fluvial e, também, seu impacto após o corte e colheita do eucalipto. A continuação do monitoramento permitirá, também, a continuidade da pesquisa, dos efeitos da mudança no uso do solo sobre os fluxos superficiais e subterrâneos com dados mais adequados.

Sugere-se a reativação da estação Fazenda Bahia, com medições de vazão frequentes e constante manutenção, considerando a importância do monitoramento no exutório da bacia do rio Sesmaria, tendo em vista que, nos anos de 2009 e 2010 foram registrados casos de enchentes na cidade de Resende devido à quantidade de fluxos provenientes da bacia do rio Sesmaria, cuja foz no Paraíba do Sul está localizada no centro da cidade de Resende.

Diante da grande demanda mundial por papel e celulose, tornam-se necessários investimentos em pesquisas referentes aos diferentes estágios de preparo do solo, plantio e colheita da silvicultura do eucalipto, com o objetivo de atenuar os impactos ambientais, sociais e econômicos decorrentes de extensas áreas plantadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALAD, M. A. (2006): **“Reconhecimento da entrada do eucalipto no Vale do Rio Paraíba do Sul”**. Monografia de Graduação. Departamento de Geografia da UFRJ.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. e SMUTH, M. (1998): **“Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements”**. Rome: FAO. 301p.
- ALMEIDA, A. C. e SOARES, J. V. (2001): **“Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil.”** Journal of Hydrology 253(1-4): 130-147p.
- ALMEIDA, A. C. e SOARES, J. V. (2003): **“Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e Floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil”**. Revista Árvore v. 27, nº.2 Viçosa Mar/Abr.
- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V.; LANDSBERG, J. J. e REZENDE G.D. (2007): **“Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrids plantations in Brazil during a rotation for pulp production”**. Forest Ecology and Management 251 (1-2): pp. 10-21 (Doi:10.1016/j.foreco.2007.06.009. 2007).
- ALVES, M. E. B.(2009): **“Disponibilidade de demanda hídrica na produtividade da cultura do eucalipto”**. Tese de doutorado submetida à Universidade Federal de Viçosa, MG.
- ANDREASSIAN, V. (2004): **“Waters and forests: from historical controversy to scientific debate.”** Journal of Hydrology 291(1-2): 1-27.
- ARAUJO, L. M. N., MOREIRA, D. M., FIRMO, T. (2010): **“Balanço Hídrico Climatológico”**. Trabalho desenvolvido para a disciplina CPC 721 - Interações de água solo e atmosfera - COPPE/UFRJ.
- ASHTON, D. H. (1975)b: **“The roots and shoots development of *Eucalyptus Regnans*. F. Muell”** Australian Journal of Botany 23: 867-887p.

- AVELAR, A. S. e COELHO NETTO, A. L. (1992): **“Fraturas e desenvolvimento de unidades geomorfológicas côncavas no médio vale do rio Paraíba do Sul.”** Revista Brasileira de Geociências 22(2): 222-227p.
- BACELLAR, L. D. P. (2005): **“O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas.”** Geo.br 1: 1-39 – Departamento de Geologia/Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. ISSN 1519-5708.
- BERTONI, J. C. e TUCCI, C. E. M. (1993): **“Hidrologia: ciência e aplicação”**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 943p.
- BRANDÃO, A. M. P. M.; SILVEIRA JUNIOR, D. R.; TAVARES, J. C. e DANTAS, M. E. (2000): **“Mapa de Isoietas do Estado do Rio de Janeiro”**. In: “Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro”. Brasília, CPRM-DEGET.
- CASTRO Jr., E. (1992): **“O papel da fauna endopodônica na estruturação física dos solos e o seu significado para a hidrologia de superfície”**. Dissertação de Mestrado submetido ao Programa de Pós Graduação em Geografia. UFRJ, 150p.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1981): **“Geomorfologia Fluvial”**. E. Blucher, SP, 313p.
- COELHO NETTO, A. L. (1985): **“Surface hydrology and soil erosion in a tropical mountainous rainforest drainage basin, Rio de Janeiro”**. Tese de Doutorado. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 181p.
- COELHO NETTO, A. L. (1994): **“Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia”**, In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (orgs): “Geomorfologia; uma atualização de bases e conceitos” Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, 93-148p.
- COELHO NETTO, A. L. (1998): **“Diagnósticos de erosão para o planejamento regional: subsídios metodológicos sob enfoque geo-hidroecológicos”**. VI Simpósio Nacional de Controle da Erosão, Presidente Prudentes, SP.
- COELHO NETTO, A. L. (2003): **“Evolução de cabeceiras de drenagem no médio vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): bases para um modelo de formação e crescimento da rede de canais sob controle estrutural”**. Revista Brasileira de Geomorfologia, MG-Brasil, v. 4, nº. 2, 69-100p.

- COELHO NETTO, A. L. e FERNANDES, N. F. (1990): **“Hillslope erosion sedimentation and relief inversion in: Bananal, SP”**. IAHS Publication, nº 192, Proceedings of the Intern. Symp. In: "Research Needs and Applications to Reduce Erosion e Sedimentation in Tropical Steeplands". Suva,Fiji, nº 192
- COELHO NETTO, A. L.; AVELAR, A. S.; FERNANDES, M. C. e LACERDA, W. A. (2007): **“Landslide susceptibility in a mountainous geoecosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: the role of morphometric subsivision of the terrain”**. Geomorphology (Amstrerdam), Estados Unidos, v. 87, 120-131p.
- COELHO NETTO, A. L.; FERNANDES, N. F. e DEUS, C. E. (1988): **“Gulling in the Southeastern Brazilian Plateau Banana, SP”**. Sediment Budgets, edited by M.R. Bordas e D.E. walling; IAHS Publication no.174: 35-42p.
- COPPE/UFRJ (1995): **“Sistema GRAFCHAV para definição de curvas cota x vazão de uma estação fluviométrica”**. Laboratório de Hidrologia da COPPE/UFRJ. Colaboração CPRM
- COSSALTER, C. e PYE-SMITH (2003): **“Fast-wood forestry. Myths and realities”** Jakarta: forest Perspectives. CIFOR, 50p.
- CPRM (2002): **“Regionalização de vazões da sub-bacia 58 – rio Paraíba do Sul”**. Relatório Final. CPRM/ANEEL. 163p.
- CROKE, J.; HAIRSINE, P. e FOGARTY, P. (1999): **“Runoff generation and redistribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Austrália.”** Journal of Hydrology 216(1-2): 56-77.
- DANTAS, M. E. (1995): **“Controles naturais e antropogênicos da estocagem diferencial de sedimentos fluviais: Bacia do Rio Bananal (SP/RJ), médio vale do Rio Paraíba do Sul”**. Dissertação de Mestrado. PPGG/IGEO/UFRJ. 142p.
- DE PLOEY, J. e CRUZ, O. (1979): **“Landslides in the Serra do Mar, Brazil”**, Catena, nº.6.
- DEUS, E. (1991): **“O papel da escavação das formigas do gênero Atta na hidrologia de encostas e áreas de pastagem – Bananal (SP)”**. Dissertação (Mestrado). PPGG/IGEO/UFRJ. 135p.
- DUNNE, T. (1970): **“Runoff production in a humid area”**. US Department of Agriculture Report ARS 41-160

- DUNNE, T. (1980): **“Formation and controls of channel networks”**. Prog. in Phys. Geogr. 4: 221-239p.
- DUNNE, T. e LEOPOLD, L. B. (1978): **“Water in Environmental Planning”**. W.H. Freeman and Company, New York.
- EDEL, T. (2005): **“Resultantes geo-hidroecológicas da expansão do eucalipto em áreas de pastagens degradadas: médio vale do rio Paraíba do Sul, São Paulo.”** XXVII Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural da UFRJ _CT e CCMN: 291-292.
- EINSTEIN, H. A. (1964): **“Sedimentation Part II. River Sedimentation”** In: CHOW, V. T. (1964): **“Handbook of Applied Hydrology – A compendium of water-resources technology”** New York, McGraw-Hill. 1V. Section 17-II.
- FEITOSA, F, A, C.; MANOEL FILHO, J. e SILVA, A. B. (1997): **“Hidrogeologia: conceitos e aplicações”**. CPRM, Fortaleza. 389p.
- FETTER, C. W. (1994): **“Determining ground-water recharge from baseflow”**. In: Applied Hydrogeology. Ed. Prentice Hall, New Jersey.
- GUERRA, A. J. T. (1994): **“Processos erosivos nas encostas”**, In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (orgs): **“Geomorfologia; uma atualização de bases e conceitos”** Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, 149-199p.
- HEILBRON, M. (1995): **“O Segmento Central da Faixa Ribeira: síntese geológica e ensaio de evolução geotécnica”**. Tese de Livre Docência. DGEL/UERJ, Rio de Janeiro, RJ – Brasil
- HEWLETT, J. D. e HIBBERT, A. E. (1967): **“Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas”**. International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon Press: 275-290.
- HIDROWEB – www.hidroweb.ana.gov.br
- HOPMANS, P. e BREN, L. J. (2007): **“Long-term changes in water quality and solute export in headwater stream of intensively managed radiate pine and natural eucalypt forest catchments in south-eastern Australia”**. Forest Ecology and Management, 253. 244-261p.
- HORTON, R. E. (1933): **“The role of infiltration on the hydrologic cycle.”** Trans. Am. Geophys. Union 145: 446-460.

- HORTON, R.E. (1931): **“The Field, scope, and status of the science of hydrology”**. In: Trans. AGU, Reports and Papers, Hydrology. National Research Council, Washington, D.C., p.189-202
- JACCON, G. e CUDO, K. J. (1989): **“Hidrologia curva-chave: análise e traçado”** Ministerio de minas e energia – departamento nacional de águas e energia elétrica DNAEE.
- JANSEN, R. C. (2001): **“Distribuição dos sistemas radiculares em encostas florestadas e sua influência sobre a infiltração”** Dissertação de Mestrado. PPGG/IGEO/UFRJ. 118p
- LENCASTRE, A. e FRANCO, F. M. (1984): **“Lições de Hidrologia”** Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia. 451p.
- LEOPOLD, L. B. e MADDOCK, T. Jr. (1953): **“Relation of Suspended Sediment Concentration to Channel Scour and Fill”**. In: Fifth Iowa Hydraulic Conference Proceedings, Iowa University Studies Engineering Bulletin 34, p.159-178.
- LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G. e MILLER, J. P. (1964): **“Fluvial processes in geomorphology”**. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- LIMA, W. P. (1990): **“Overland flow and soil and nutrient losses from Eucalyptus plantations.”** IPEF International 1:35-44p.
- LIMA, W. P. (1996): In: **“Impacto Ambiental do Eucalipto”**. São Paulo: EDUSP (2^a ed.), 301p.
- LIMA, W. P.; JARVIS, P. e RHIZOPOULOU, S. (2003): **“Stomatal responses of Eucalyptus species to elevated CO₂ concentration and drought stress.”** Scientia Agricola 60(2): 231-238p.
- LIMA, W. P.; ZÁKIA, M. J. B.; LIBARDI, P. L. e SOUZA FILHO, A. P (1990): **“Comparative evapotranspiration of *Eucalyptus grandis*, pine and natural “cerrado” vegetation measure by the soil water balance method.”** IPEF Internacional (1): 5-11p.
- MARSHALL, J. K.; MORGAN, A. L.; AKILAN, K.; FARRELL, R. C. C. e BELL, D. T. (1997): **“Water uptake by two river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) clones in a discharge site plantation in the Western Australian wheat belt”**. Journal of Hydrology, n^o. 200: 136-148p.

- MELLO, C. L. (1992): **“Fácies sedimentares, arquitetura deposicional e relações morfoestratigráficas em um sistema de leques aluviais Holocênicos: Aloformação Manso – médio vale do rio Paraíba do Sul”**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. IGEO/UFRJ. 188p.
- MOSCA, A. A. O. (2003): **“Caracterização hidrológica de duas microbacias visando à identificação de indicadores hidrológicos para monitoramento ambiental do manejo de florestas plantadas”**. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 88p.
- NEGREROS, A. B. (2006): **“Respostas hidrológicas em clareira de deslizamento em uma encosta florestada: alto rio dos Macacos, Floresta da Tijuca (RJ)”**. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.
- PAIVA, J. B. D. e PAIVA, E. M. C. D. (2001): **“Hidrologia Aplicada à Gestão de pequenas bacias hidrográficas”**. Universidade de Santa Maria. ABRH
- PINTO, E. J. A.; CASTILHO, A. S. e PALMIER, L. R. (2007): **“Uso de réguas de máximos (crest stage) em bacias de rio intermitentes do médio Jequitinhonha”**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo.
- PORTO, R. L. L.; BRANCO, S. M.; CLEARY, R. W.; COIMBRA, R. M.; EIGER, S.; LUZA, S. J.; NOGUEIRA, V. P. Q. e PORTO, M. F. A. (1991): **“Hidrologia Ambiental”**. Coleção ABRH de Recursos Hídricos v.3. ABRH Editora EdUSP, São Paulo.
- POWELL, S. T. (1964): **“Quality of water”**. In: CHOW, V.T. (1964): “Handbook of Applied Hydrology – A compendium of water-resources technology”, McGraw-Hill, New York, 1V. Section 19.
- RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; NOVA, N. A. V.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C. e CLEARY, R. W. (1989): **“Engenharia Hidrológica”**. Coleção ABRH de Recursos Hídricos v.2. ABRH Editora da UFRJ, Rio de Janeiro.
- RELATÓRIO ZEE/RJ (2008): Projeto de análise e qualificação sócio-ambiental do estado do rio de janeiro (escala 1:100.000) – subsídio ao ZEE. Relatório etapa V fase 1. Secretaria do Estado do Meio Ambiente

- ROCHA LEÃO, O. M. (2005): **“Evolução regressiva da rede de canais por fluxos de água subterrânea em cabeceiras de drenagem: bases geo-hidroecológicas para recuperação de áreas degradadas com controle de erosão”**. Tese de Doutorado. PPGG/IGEO/UFRJ. 247p.
- SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E. e LAUTERT, L. F. (2001): **“Hidrometria Aplicada”**. CEHPAR, Curitiba. 372p.
- SATO, A. M. (2008): **“Respostas geo-hidroecológicas à substituição de pastagens por plantações de eucalipto no médio vale do rio Paraíba do Sul”**. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.
- SATO, A. M.; AVELAR, A. S. e COELHO NETTO, A. L. (2011): **“Spatial variability and temporal stability of throughfall in a eucalyptus plantation in the hilly lowlands of southeastern Brazil”**. Hydrological Process - DOI: 10.1002/hyp.7947
- SATO, A. M.; EDEL, T. e ABDALAD, M. A. (2005): **“Estudo geo-hidroecológico da introdução de monoculturas de eucalipto no médio vale do rio Paraíba do Sul”**. In: Anais do VII Congresso de Ecologia do Brasil, Caxambu - MG.
- SHARDA, V. N.; SAMRAJ, P.; SAMRA, J. S. e LAKSHMANAN, V. (1998): **“Hydrological behavior of first generation coppiced bluegum plantations in the Nilgiri sub-watersheds.”** Journal of Hydrology 211: 50–60p.
- SIKKA, A. K.; SAMRA, J. S.; SHARDA, V. N., SAMRAJ, P. e LAKASHMANAN, V. (2003): **“Low Flow and high flow responses to convert natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globules*) in Nilgiris watersheds of South India”**. Journal of Hydrology, 270 (1-2): 12-26p.
- SILVEIRA, C. S.; BARBOSA, M. C. e COELHO NETTO, A. L. (2005). **“A tracer experiment as an alternative methodology to understand infiltration pathway in a tropical rainforest soil”**. Solos e Rochas Revista Latino-americana de Geotecnia, v. 28, nº. 3: 261-270p.
- SOUZA, J. P. R. (1979): **“Hidrotécnica I – Hidrologia, reservatório de estiagem”**. Apostila da escola de engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- STRAHLER, A. N. (1952): **“Dynamic basis of Geomorphology”**. Geol.Soc. American Bulletin, 63: 923-938p.

- TODD, D. K. (1967): **“Hidrologia de águas subterrâneas”**. Agência Norte-Americana para o Desenvolvimento Internacional _ USAID. cap. 6, 319p.
- TUCCI, C. E. M. (2002): **“Regionalização de vazões”** Ed. Universidade – UFRGS, 256p.
- TUCCI, C. E. M. e CLARKE, R. T. (2001): **“Regionalização hidrológica”**. In: PAIVA, J. B. D. e PAIVA, E. M. C. D. “Hidrologia Aplicada à Gestão de pequenas bacias hidrográficas” Universidade de Santa Maria. ABRH, 169-221p.
- UAGODA, R. E. S. (2006): **“Reconhecimento geomorfológico de relevo cárstico em rochas quartzíticas: bacia hidrográfica do ribeirão Santana, médio vale do rio Paraíba do Sul.”** Dissertação de mestrado submetida ao Programa de pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
- VACCA, A.; LODDO, S.; OLLESCH, G.; PUDDU, R.; SERRA, G.; TOMASI, D. e ARU, A. (2000): **“Measurement of runoff and soil erosion in three areas under different land use in Sardinia (Italy)”**. Catena 40: 60-92p
- VIANNA, L. G. G. (2006): **“Mapeamento de uso e cobertura do solo da bacia do rio Sesmaria – médio vale do rio Paraíba do Sul.”** Anais da XXVII Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, artística e Cultural da UFRJ – CT e CCMN
- VIANNA, L. G. G.; SATO, A. M. e COELHO NETTO, A. L. (2009): **“Expansão do eucalipto no Vale do Rio Paraíba do Sul: subsídios: aos estudos hidrológicos de bacias”**. In: Anais do XIII SBGFA - Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Viçosa - MG.
- VISSMAN, W.; KNAPP, J. W.; LEWIS, G. L. e HARBAUGH, T. E. (1977): **“Introduction to Hydrology”**. Harper e Row publishers, New York.
- WHIPKEY, R. Z. e KIRKBY, M. J. (1978): **“Flow within the soil”**. In: Hillslope Hydrology. John Wiley e Sons editor.
- WISLER, C. O. e BRATER, E. F. (1964): **“Hidrologia”**. Centro de publicações técnicas da aliança missão Norte-Americana de cooperação econômica e técnica do Brasil – USAID. Translation from English language edition published by John Wiley & Sons, Inc, New York 1959.

- ZHANG, L., DAWES, W. R. e WALKER, G. R. (1999): **“Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance”**. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Technical report 99/12. Australia, 42p.
- ZHOU, G. Y.; MORRIS, J. D.; YAN, J. H.; YU, Z. Y. e PENG, S. L. (2002): **“Hydrological impacts of reforestation with eucalypts and indigenous species: a case study in southern China.”** Forest Ecology and Management 67 (1-3): 209-222p.
- ZOHAR, Y. e SCHILLER, G. (1998): **“Growth and water use by selected seed sources of eucalyptus under high water table and saline conditions”**. Agriculture, Ecosystems and Environment, 69: 265-277p.