

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**PLANTIO DE EUCALIPTO E REATIVAÇÃO EROSIVA EM VALES  
DE CABECEIRAS DE DRENAGEM: BACIA DO RIO SESMARIAS,  
MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL**

**ANA CAROLINA FACADIO CAMPELLO**



**Área de Concentração: Planejamento e Gestão Ambiental**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Luiza Coelho Netto  
Co-orientador: Anderson Mululo Sato**

UFRJ  
Rio de Janeiro  
Fevereiro 2016



UFRJ

**Ana Carolina Facadio Campello**

**PLANTIO DE EUCALIPTO E REATIVAÇÃO EROSIVA EM VALES DE CABECEIRAS DE DRENAGEM: BACIA DO RIO SESMARIAS, MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL.**

**Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Geografia.**

**Área de concentração:  
Planejamento e Gestão Ambiental**

**Orientadora:  
Ana Luiza Coelho Netto – Departamento de Geografia - IGEO/UFRJ**

Ana Carolina Facadio Campello

Plantio de eucalipto e reativação erosiva em vales de cabeceiras de drenagem: bacia do rio Sesmarias, médio vale do rio Paraíba do Sul.

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Geografia

**Área de concentração:**

Planejamento e Gestão Ambiental

**Orientadora:**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Luiza Coelho Netto –  
Departamento de Geografia - IGEO/UFRJ

Aprovada em: 26/ 02 / 2016

Por:

---

Prof. Dr. André de Sousa Avelar, PPGG – UFRJ

---

Prof Dr. Anderson Mululo Sato, UFF – Angra dos Reis

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ana Luiza Coelho Netto – PPGG - UFRJ

## RESUMO

O presente estudo objetivou investigar a reativação de canais incisos do tipo voçorocas em vales de cabeceira de drenagem no domínio de colinas em resposta a mudanças de uso da terra decorrente da introdução de plantios de eucalipto em antigas áreas de pastagem. O processo de voçorocamento está relacionado com a exfiltração da água subterrânea e também pode ser responsável por mobilizar grande quantidade de sedimentos para os canais coletores, trazendo como consequências o assoreamento destes canais, a redução da qualidade da água e a potencialização de enchentes. A avaliação da dinâmica da paisagem na região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul aponta para um processo de implantação de manchas de plantios de eucalipto sob antigas áreas de pastagens degradadas. No domínio de colinas desta região ocorrem centenas de voçorocas e abre-se a hipótese de que a reativação de algumas destas erosões esteja relacionada com a introdução de eucaliptos. O monitoramento de duas voçorocas presentes em vales de cabeceira adjacente a uma fazenda de eucalipto na bacia do Rio Sesmaria consistiu no levantamento do histórico evolutivo destas erosões a partir da aquisição de imagens orbitais, fotografias aéreas e levantamentos em campo. Os resultados apontam taxas de crescimento de até 12 m/ ano. Foi realizado também o monitoramento de sucção do solo em três estações: 1) dentro do plantio de eucalipto; 2) em gramínea na vertente oposta ao plantio; 3) na gramínea sem influência do eucalipto; com intuito de compreender como se dava a percolação da água dentro no solo comparativamente entre as três estações. Os resultados deste monitoramento da zona não-saturada em profundidade (até 3,00m) subsidiaram o entendimento influência local dos plantios em relação a dinâmica regional do aquífero e também para o entendimento da relação entre a introdução dos plantios com a reativação e desenvolvimento de voçorocas em vertentes vizinhas.

**Palavras-chave:** Voçorocas, Eucalipto, Reativação erosiva, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

## **ABSTRACT**

This study aims to assess the reactivation of gullies in drainage bedside valleys in the hills area in response to land use changes resulting from the introduction of eucalyptus plantations on former grazing areas. The gully process is related to the exfiltration of groundwater and can also be responsible for mobilizing large amounts of sediment to the collector channels, bringing as consequences silting of these channels, the reduction of water quality and the potentiation of flooding. The evaluation of landscape dynamics in Middle Paraíba do Sul River Valley points to a deployment process of eucalyptus plantations spots under old degraded pastures. In the hills domain occurs hundreds of gullies and opens up the possibility that the reactivation of some of these erosions are related to the introduction of eucalyptus. Monitoring two gullies present in bedside valleys adjacent to a eucalyptus farm in Sesmaria River basin consisted of lifting the evolutionary history of these erosions from the acquisition of satellite images, aerial photographs and field surveys. The results indicate growth rates of up to 12 m / year. It was also conducted soil suction monitoring at three stations: 1) within the eucalyptus plantation; 2) grass on the opposite side to planting; 3) in the grass without influence of eucalyptus; seeks to understand how was the percolation of water into the soil compared between the three stations. The results of this monitoring of the unsaturated zone at depth (up to 3,00m) subsidized the local influence understanding of the plantations in relation to regional aquifer dynamics and also to the understanding of the relationship between the introduction of eucalyptus with the reactivation and development of gullies in neighboring valleys.

**Keywords: Gullies, Eucalyptus, Middle Paraíba do Sul River Valley**

## SUMÁRIO

<b>1) INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2) OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
<b>3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
3.1 – Hidrologia de encostas e hidrologia subterrânea .....	<b>12</b>
3.2 - Formação e desenvolvimento de rede de canais.....	<b>16</b>
3.3 - Erosão por voçorocamento.....	<b>22</b>
3.4 – Distribuição da água dentro dos plantios de eucalipto .....	<b>29</b>
3.5 - Voçorocas eucalipto.....	<b>32</b>
<b>4) ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>35</b>
4.1 - Médio vale do rio Paraíba do Sul.....	<b>35</b>
4.2 - Bacia do rio Sesmaria .....	<b>42</b>
<b>5) PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>47</b>
5.1) Pré-levantamento de dados e elaboração da base digital para avaliação da taxa de expansão das voçorocas.....	<b>47</b>
5.2) Avaliação qualitativa e quantitativa da expansão das voçorocas.....	<b>53</b>
5.3) Monitoramento da zona não-saturada em áreas com e sem presença de eucalipto a partir de sensores de umidade.....	<b>55</b>
5.4) Monitoramento de poços e piezômetros e relação com a distribuição pluviométrica .....	<b>60</b>
<b>6) RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>63</b>
6.1 – Análise temporal das fotografias aéreas, imagens orbitais e levantamento de campo. ....	<b>63</b>
6.2 – Estimativa quantitativa da taxa de evolução das voçorocas.....	<b>68</b>
6.3 – Observações em campo do escoamento superficial e expansão dos dígito.....	<b>69</b>
6.4 - Observações em campo do escoamento superficial e expansão dos dígito.....	<b>73</b>
6.5 – Poços e Piezômetros.....	<b>76</b>
6.6 -Levantamento da sucção do solo em plantio de eucalipto e pastage.....	<b>82</b>
6.7 – Levantamento das voçorocas na bacia do rio Sesmaria.....	<b>92</b>
<b>7) CONCLUSÃO</b> .....	<b>96</b>
<b>8) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>97</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1** - Rotas de fluxos nas encostas. FSH = fluxo superficial Hortoniano, FS = fluxo subterrâneo, FSSch = fluxo subsuperficial de chuva e FSSat = fluxo superficial de saturação. Dunne & Leopold (1978) e modificado por Coelho Netto (2003).....13
- Figura 2** - Distribuição da água em subsuperfície. (Karmann, 2000).....15
- Figura 3** - Visão da rede de fluxo subterrânea durante a progressão remontante das cabeças de canal na formação de uma rede de drenagem. As setas contínuas são linhas de fluxo, as tracejadas indicam as equipotenciais. A) fluxos subterrâneos em direção da margem; B) Convergência do fluxo subterrâneo na face de exfiltração, ruptura e reentrância inicial; C) Aumento da convergência das linhas de fluxos no entorno da face de exfiltração com avanço remontante das cabeças aumentando o vale. O segundo mostra a distorção do fluxo em direção a outro tributário e por fim, a expansão da rede de canais (Adaptado de DUNNE, 1980; 1990).....20
- Figura 4** - O desenvolvimento da rede de vales pelo crescimento remontante das cabeças dos canais por exfiltração.....20
- Figura 5** - Modelo de evolução da formação de concavidades estruturais tendo como controle a orientação das fraturas proposto por Avelar e Coelho Netto (1992). A interseção de fraturas sub-verticais (A) funcionariam como zonas de alívio de pressão para os fluxos artesianos, que formariam canais de primeira ordem (B) e posteriormente se desenvolveriam seus tributários (C). O processo de formação de canais acompanha o aumento do gradiente topográfico e hidráulico, desencadeando movimentos de massa na encosta. (D) Interseção de fraturas – vales e canais tributários.....21
- Figura 6** – Diagrama esquemático da produção de fluxo superficial hortoniano e conseqüente trabalho erosivo, incluindo a formação de canal. O “x” indica a distância crítica que separa a zona não-erosiva da zona de transporte (Horton, 1931).....25
- Figura 7**- Diagrama esquemático das diferentes processos erosivos, como sulcos, ravinamentos e voçorocamento. (Adaptado de Karmann, 2000).....25
- Figura 8** – A) Variação espacial do atravessamento em relação à árvore central. As linhas de equi-atravessamento estão representadas, sendo a linha em vermelho correspondente ao atravessamento igual a 100%. B) Correlação da precipitação e a relação Q/P (escoamento superficial / precipitação) nas parcelas de escoamento do divisor e da encosta (extraído de Sato, 2008).....32
- Figura 9** - A) Distribuição do número de voçorocas comparadas em dois momentos: 1957 e 1997; B) Distribuição da área (ha) de voçorocas; C) Percentual de voçorocas pelo intervalo de tamanho em dois momentos: 1957 e 1997. (Modificado de Marden *et al.*, 2012).....33
- Figura 10** - Mapa de uso e cobertura do médio vale do rio Paraíba do Sul. (Extraído de Vianna, 2007).....37

<b>Figura 11</b> - Evolução regional do relevo na transição quaternária entre o Pleistoceno-Holoceno (dez mil a oito mil anos antes do presente), alternando períodos de instabilidade e estabilidade dos pacotes em resposta a mudanças climáticas globais e, mais recentemente, em função de alterações por ação humana (adaptado de COELHO NETTO, 1999).....	39
<b>Figura 12</b> - Levantamento das voçorocas na bacia do rio Piracema, principal afluente do rio Bananal, para o ano de 2005 (extraído de LEAL, 2009).....	40
<b>Figura 13</b> - Esquema do histórico de uso e cobertura do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (extraído de Sato, 2008).....	42
<b>Figura 14</b> - (I) Localização da área de estudo: bacia rio Paraíba do Sul e perfil topográfico na seção A-B (UAGODA, 2006); (II) Em vermelho, bacia do rio Sesmaria e em preto, a bacia do rio Bananal; ( <i>adaptado</i> SATO, 2008).....	43
<b>Figura 15</b> - Mapa de uso e cobertura da bacia do rio Sesmaria em 2007.....	44
<b>Figura 16</b> - Localização das duas voçorocas na fazenda Itamarati, na vertente oposta da fazenda Caximonan.....	46
<b>Figura 17</b> - Ortofotos 2743-1 NO e 2743-1 SO feitas a partir do levantamento do IBGE em 2004. Imagem extraída do software ArcGis 10.....	48
<b>Figura 18</b> - A) Receptor GPS Trimble R6 B) Marco Permanente (MP); C) Detalhe da voçoroca 01 ao fundo.....	51
<b>Figura 19</b> - Marcos georreferenciados. Em verde, quatro marcos permanentes (MP), em amarelo, a posição dos vinte marcos temporários (MT) e em vermelho, a delimitação do divisor topográfico entre a Fazendas Caximonan (FIBRIA) e Itamarati.....	51
<b>Figura 20</b> – Levantamento do perímetro da voçoroca 02 e voçoroca 01 com a utilização de estação total Trimble a partir da rede de marcos permanentes e temporários com leitura do prisma a cada 2 metros.....	52
<b>Figura 21</b> – Perímetro das voçorocas no ArcGIS.....	52
<b>Figura 22</b> - Cálculo da área dos dígitos da voçoroca 01 (fundo de vale). Nota-se a sobreposição das áreas dos dígitos a partir do levantamento do contorno em cada período conduzido em campo com auxílio da Estação Total. (Imagem extraída do ArcGis 10).....	54
<b>Figura 23</b> - Localização das unidades de monitoramento com sensores de sucção. Em vermelho, os divisores de drenagem.....	55
<b>Figura 24</b> - Granular matrix sensor (GMS), Watermark 200ss utilizado para monitoramento. Fonte: Irrrometer Company Inc.....	56
<b>Figura 25</b> - Instalação dos sensores de umidade.....	58

<b>Figura 26</b> - Esquema com as profundidades dos sensores instalados em campo.....	59
<b>Figura 27</b> - A) Calhas de coleta de chuva Próximas ao tronco (PT) e Entre Tronco (ET); B) Esquema de disposição das calhas; C) Estação meteorológica utilizada na área de pastagem.....	60
<b>Figura 28</b> - A) Desenho esquemático dos poços de monitoramento (extraído de Sato,2012). B) Detalhe do piezômetro e poço instalado na voçoroca 02; e C) Esquema representativo do piezômetro instalado na área (Silva, 2014).....	62
<b>Figura 29</b> – Voçoroca 01 (esquerda) retrabalhando os depósitos de fundo de vale (rampas). Voçoroca 02 (direita) avançando para alta encosta (próximo ao divisor de drenagem) (Fotos – Sato,2012).....	63
<b>Figura 30</b> – Situação da Voçoroca 01 (esquerda) e da Voçoroca 02 (direita) no dia 07/02/2003 (imagem Ikonos). O contorno em vermelho delimita as voçorocas no ano de 2012.....	64
<b>Figura 31</b> – Panorama completo da área de estudo em 2004 (fotografia aérea IBGE), com o início dos plantios de eucalipto na vertente oposta às voçorocas. A linha em vermelho delimita o divisor e a exportação de sedimentos está indicada pela seta vermelha (modificado de Sato, 2012).....	65
<b>Figura 32</b> – Em detalhe a Voçoroca 01 à esquerda e a Voçoroca 02 à direita na fotografia aérea do IBGE no ano de 2004.....	65
<b>Figura 33</b> – Voçoroca 01 e 02 na imagem Geoeye no dia 21/08/2010. O perímetro das voçorocas em 2012 está delimitado pela linha vermelha (Sato, 2012).....	66
<b>Figura 34</b> - Visualização geral da área de estudo em Dez/2011 (imagem DigitalGlobe). Em verde a rede de marcos permanentes (MPs) e em amarelo a rede de marcos temporários (MTs); na vertente oposta observa-se os poços na fazenda Caximonan da FIBRIA (extraído do Google Earth).....	67
<b>Figura 35</b> - Voçoroca 01 e 02 na imagem CNES/ Astrium (05/02/2014).....	67
<b>Figura 36</b> - Precipitação mensal referente aos anos de 2000 a 2015. Fonte: Banco de dados do INMET – BDMEP.....	70
<b>Figura 37</b> - Média mensal de precipitação da estação de Resende (RJ) durante o período de 1937 a 2000. A média dos anos mais chuvosos está expressa pela linha contínua, enquanto os anos mais secos pela linha tracejada. (FIGUEIRÓ E COELHO NETTO, 2011).....	71
<b>Figura 38</b> - Dados de precipitação mensal do ano de 2015 da estação meteorológica da Fazenda Itamarati – Bacia Sesmaria.....	72
<b>Figura 39</b> – Visualização das Voçorocas durante um evento chuvoso: (A) escoamento superficial nas gramíneas seguindo caminhos preferenciais do gado e o “efeito cachoeira” abaixo; (B) Fluxo turbulento na confluência da Voçoroca 01 e 02 com alta capacidade de transporte de sedimentos; (C) Fluxo contínuo na base; (D) “Efeito cachoeira” em detalhe.....	75

<b>Figura 40</b> - Placa localizada no centro urbano de Resende, no exutório da bacia do rio Sesmarias.....	76
<b>Figura 41</b> – Alinhamento da Voçoroca 02 com a dobra antiformal (linha amarela com setas) e ocorrência de foliações subverticais (SATO, 2012).....	78
<b>Figura 42:</b> Voçoroca 2 avançando em direção ao divisor de drenagem. Na vertente oposta encontra-se os plantios da Fazenda Caximonan da empresa Fibria, introduzidos no ano de 2004 (Foto: Sato, 2012).....	79
<b>Figura 43</b> - Dados dos poços e piezômetros instalados dentro do canal da Voçoroca 1.....	80
<b>Figura 44</b> - Dados dos poços e piezômetros instalados dentro do canal da Voçoroca 2.....	81
<b>Figura 45</b> - Dados médios de sucção por profundidade em cada estação.....	83
<b>Figura 46</b> - Valores acumulado de precipitação mensal e sucção média mensal nas três estações: a) Eucalipto; b) Eucalipto/ Gramínea; c) Gramínea, durante o período de monitoramento de Abril a Novembro de 2015.....	87
<b>Figura 47</b> - Valores diários de sucção e de precipitação para as três estações, considerado como o período úmido antecedente.....	89
<b>Figura 48</b> - Valores diários de sucção e de precipitação para as três estações, considerado o período seco antecedente.....	91
<b>Figura 49</b> - Levantamento de voçorocas ativas e estáveis levantadas na bacia do rio Sesmaria em dois momentos: 2003 e 2012.....	93
<b>Figura 50</b> - Perfil do rio Sesmaria, altitude de colinas e gradiente da bacia.....	94
<b>Figura 51</b> - Perfil do rio Bananal, altitude de colinas e gradiente da bacia.....	94
<b>Figura 52</b> - Plantios de eucalipto e evolução de voçorocas na bacia do rio Sesmaria localizada em outra fazenda a montante da bacia. Em detalhe, raiz de eucalipto (aproximadamente 1,5 m de profundidade) na cabeça do dígito de uma voçoroca em outra localidade da bacia do rio Sesmaria. Nota-se a cabeça do dígito da erosão avançando em direção ao alinhamento do plantio de eucalipto.....	95

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Georreferenciamento dos marcos permanentes (MP).....	50
<b>Tabela 2</b> - Georreferenciamento dos marcos temporários (MT).....	50
<b>Tabela 3</b> – Profundidades monitoradas nas três estações.....	57
<b>Tabela 4</b> - Período de monitoramento da taxa de evolução da voçoroca de fundo vale.....	68
<b>Tabela 5</b> - Estimativa da taxa de evolução da voçoroca de fundo de vale.....	69
<b>Tabela 6</b> - Dados da precipitação total anual da Estação de Resende (RJ) – 2000 a 2015.....	72
<b>Tabela 7</b> – Amostras de carga de sedimento em suspensão (CSS) durante e após um evento de chuva na área estudada (CORREA <i>et al.</i> , 2013).....	75
<b>Tabela 8</b> - Valores de sucção média obtidas nas três estações durante o período levantado – Abril a Novembro de 2015.....	84

## **AGRADECIMENTOS**

A toda equipe de pesquisa do Laboratório de Geohidroecologia da UFRJ, pelo constante companheirismo e pela troca de experiências ao longo de toda a pesquisa. Por toda superação das adversidades e incansáveis ajudas em trabalhos de campo, conversas, dúvidas e trocas sem as quais seria impossível a concretização de mais esta etapa.

A minha família, pelo suporte, incentivo e pelo carinho que sempre me deram. Agradeço todos os dias por poder compartilhar tantos momentos incríveis e por ter aprendido o verdadeiro significado da palavra família. Pelo amor incondicional e por todos os princípios passados a mim.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, nos momentos mais difíceis e também compartilhando momentos únicos na minha vida.

A minha orientadora, professora Ana Luiza, pela amizade e por todo o ensinamento compartilhado, pelas inúmeras conversas e pela força que inspira a todos os seus alunos.

Ao professor Anderson Sato, por toda paciência e cumplicidade; pelos ensinamentos que permitiram a concretização deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Geografia da UFRJ por todo o estímulo e conhecimento transmitido.

Em especial aos alunos do Geoheco, Leonardo Correa, pela ajuda fiel a todos os trabalhos de campo e pelas conversas; Nathalia Lacerda pela amizade desde o início desta caminhada pela universidade pública; Roberta Pereira, Leonardo Barbosa, Pedro Lima, pelas conversas, companheirismo e pelo estímulo diário que fazem do laboratório o nosso segundo lar. Ao famoso Maguinho, nas jornadas incansáveis a campo e pelas risadas e apoio em todos os momentos. Aos funcionários do Centro de Ciências da Matemática e da Natureza, em especial ao Departamento de Geografia por todo o suporte ao longo dos anos da minha jornada acadêmica.

Sem a ajuda de vocês essa missão seria muito mais difícil e não seria tão estimulante,  
Muito obrigada!

## 1) INTRODUÇÃO

A expansão da rede de canais que drena o domínio de colinas do médio vale do rio Paraíba do Sul (MVRPS) segue a Lei de Ajuste de Declives preconizada por Gilbert (1877), tendo sido impulsionada ciclicamente por mudanças ambientais de natureza climática, no período geológico recente da transição Pleistoceno-Holoceno, e por transformações do uso do solo (Coelho Netto, 1999). Estas interações são percebidas em todo o MVRPS, embora a magnitude dos processos erosivos não seja espacialmente uniforme.

Estudos conduzidos por Coelho Netto e colaboradores na bacia do rio Bananal, afluente do rio Paraíba do Sul no seu médio curso, apontam que a expansão da rede de canais nos vales de cabeceiras de drenagem é dominada por mecanismos de erosão por ação da água subterrânea, seguidos por outros mecanismos secundários tais como lavagem superficial e movimentos de massa, configurando feições de canais incisos (*gully*) denominados *voçorocas*, segundo Pichler (1953).

Tendo em vista o histórico de alterações de uso e cobertura do solo na região do MVRPS, atualmente percebe-se um processo acelerado de transformação ambiental resultante da introdução de plantios de eucalipto sobre antigas áreas de pastagem. Esta mudança segue um padrão espacial descontínuo no mosaico da paisagem, marcada por manchas de plantios de eucalipto e alguns fragmentos florestais em uma matriz de pastagem (VIANNA *et al.*, 2007; SATO, 2008).

Estudos recentes desenvolvidos por Sato (2008; 2012) na bacia do rio Sesmaria demonstraram que as encostas sob plantio de eucalipto são altamente favoráveis à infiltração, apresentando uma média da ordem de 99,4%. Esta condição é favorecida pelo atravessamento da chuva concentrado junto ao troço o que é controlado pela arquitetura de galhos convergentes (SATO *et al.*, 2011) e cobertura de uma espessa camada de serrapilheira (MELLOS *et al.*, 2012). Vale acrescentar que o predomínio de enraizamento pivotante também favorece a percolação de água da chuva no solo.

Sato (2012) monitorando quatro vales de cabeceiras com plantio de eucalipto não observou um rebaixamento do lençol freático em consequência destes plantios, contrariando o que é apontado na literatura, ou seja, que estes

plantios geralmente promovem a diminuição da vazão nos canais e rebaixamento do lençol freático, em virtude do alto consumo de água pelo eucalipto.

Nos plantios estudados, ainda não existe uma definição em relação ao quanto da água infiltrada é reabsorvida pelo próprio eucalipto e o quanto é destinado à recarga do lençol freático. A hipótese que se desdobra em virtude do aumento da infiltração de água verificado dentro dos plantios está relacionada com possibilidade destes plantios promoverem um aumento do nível d'água (N.A.), através da recarga do aquífero, que por sua vez pode estar relacionado à reativação de voçorocamento por exfiltração no vale de cabeceira de drenagem adjacente.

Dando prosseguimento e expandindo os estudos de Sato (op. cit.) busca-se neste trabalho avaliar as implicações hidro-erosivas relacionadas a inserção de plantios de eucalipto sobre antigas áreas de pastagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, sobretudo em relação à reativação de processos de voçorocamento em antigos depósitos quaternários. A área de estudo está inserida na mesma bacia experimental do rio Sesmaria e as atuais atividades de campo estão concentradas na Fazenda Itamarati, em Resende-RJ, que compreende uma propriedade onde é desenvolvida atividade pecuária nos moldes tradicionais do MVRPS.

A escolha desta área de pesquisa prende-se ao fato dela apresentar duas voçorocas em fase de reativação erosiva, uma se desenvolvendo na média-alta encosta e a outra no fundo de vale. Através da análise do histórico de evolução destas voçorocas, baseada na observação de fotografias aéreas e imagens de satélite, além de levantamentos de campo para identificar o estado atual destas voçorocas, foi possível avaliar a evolução destas voçorocas nos anos de 2003; 2008; 2010 e até abril de 2012 (SATO, 2012 e FACADIO, 2013). A reativação da voçoroca de fundo de vale é concomitante à introdução do plantio de eucalipto em 2004, cuja plantação se encontra na vertente oposta da encosta onde está localizada a Fazenda Caximonan da empresa FIBRIA em que estações pluviométricas e a vazão dos canais fluviais vêm sendo monitoradas desde 2009 pelo estudo desenvolvido por Sato (2012).

## 2) OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo consiste em subsidiar o entendimento dos processos hidrológicos e erosivos associados ao desenvolvimento de canais incisivos do tipo voçoroca, conectadas a expansão da rede de canais no domínio dos vales de cabeceiras de drenagem, em resposta a mudanças de uso da terra decorrente da introdução de plantios de eucalipto em antigas áreas de pastagens.

Os objetivos específicos compreendem:

- a) Avaliar a influência da hidrologia de encostas sob plantio de eucalipto no comportamento hidrológico da zona não-saturada em vales de cabeceira adjacente.
- b) Avaliar a influência da hidrologia de encostas sob plantio de eucalipto na recarga da zona saturada local e dos vales adjacentes sob pastagens.
- c) Avaliar as implicações das respostas hidrológicas (itens a e b) dos vales de cabeceiras sob plantio de eucalipto na atividade erosiva das encostas adjacentes sob pastagens.
- d) Avaliar a extensão da propagação espaço-temporal da influência hidrológica e erosiva em vales de cabeceira com plantios de eucalipto.

### 3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 – Hidrologia de encostas e hidrologia subterrânea

A bacia de drenagem, como unidade hidrogeomorfológica de análise, constitui um sistema aberto onde as descargas líquidas, sólidas e solúveis convergem para uma saída em comum. Os componentes e a organização interna da bacia influenciam as relações de entrada e saída, de modo que as mudanças externas conduzem a um auto-ajuste das formas e processos. Do mesmo modo, as mudanças nos componentes internos repercutem na dinâmica da bacia, podendo propagar-se para outros pontos da mesma bacia ou para bacias adjacentes (COELHO NETTO, 2005).

De acordo com os estudos conduzidos por Chorley (1962), os impulsos da água proveniente da precipitação acionam os processos hidrológicos e erosivos que regulam as transformações morfológicas e a evolução interna da bacia de drenagem. A partir dos trabalhos de Kirkby & Chorley (1967) e de Dunne & Leopold (1978), a drenagem da água da chuva pode ser dividida em quatro tipos de fluxos: a) superficial hortoniano; b) subterrâneo; c) subsuperficial raso; d) superficial saturado ou fluxo de retorno (Figura 1). De acordo com estes dois últimos autores a importância relativa de cada tipo de fluxo tem uma variação para determinada região em função da geologia, da topografia, do clima e também das características do solo, vegetação e uso do solo. Outro aspecto a ser considerado para o tipo de fluxo dominante é a variação das características de chuvas (maior ou menor intensidade), sendo esses trajetos preferenciais da água determinantes nas características da paisagem.

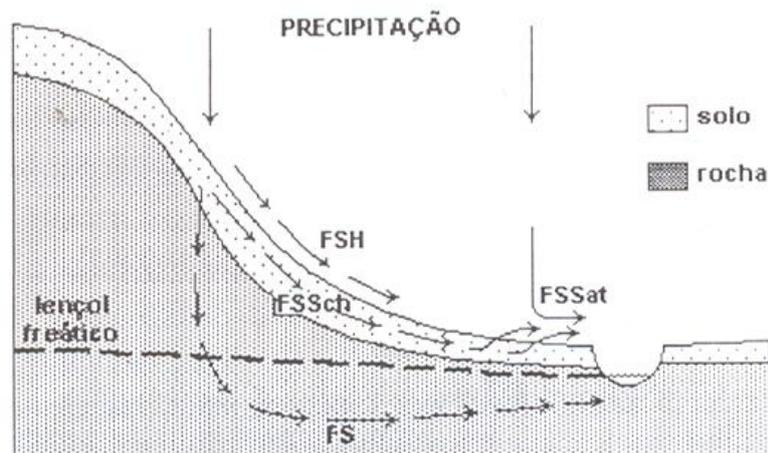


Figura 2 - Rotas de fluxos nas encostas. FSH = fluxo superficial Hortoniano, FS = fluxo subterrâneo, FSSch = fluxo subsuperficial de chuva e FSSat = fluxo superficial de saturação. Dunne & Leopold (1978) e modificado por Coelho Netto (2003).

Quando a água proveniente da chuva atinge a superfície do solo, esta só infiltra até atingir a capacidade de infiltração do solo, que pode variar de acordo com as especificidades da composição do tipo de solo. Tendo como referência a Figura 1, quando esta capacidade é excedida pela intensidade da precipitação, tem-se início o escoamento superficial, também denominado como fluxo hortoniano (HORTON, 1945). Em relação a água da chuva que infiltra no solo, existem preferencialmente três caminhos: escoar em subsuperfície na zona não saturada e, dessa forma, gerando o fluxo subsuperficial raso; ou atingir a zona saturada, recarregando o aquífero e contribuindo com os fluxos subterrâneos. O terceiro caminho está relacionado quando há a concentração de água nas partes inferiores da encosta, próxima ao nível freático, podendo ocorrer o fluxo superficial saturado, também conhecido como fluxo de retorno, que irá se juntar aos fluxos subsuperficiais rasos retornando à superfície. De acordo com Kirkby & Chorley (1967), este fluxo de retorno ocorre geralmente em locais de convergência de fluxos ou onde o gradiente, a espessura do solo ou a condutividade sejam menores (SATO, 2012).

De acordo com o trabalho desenvolvido por Hack & Goodlett (1960), os quais subdividiram as encostas em segmentos côncavos, convexos e retilíneos, elucidaram as relações existentes entre a geometria das encostas e o direcionamento dos fluxos da água no solo. As formas côncavas do relevo foram caracterizadas como zonas de convergência de fluxos e as convexas

como locais de divergência de fluxos. As concavidades se configuram como unidades fundamentais na espacialização dos processos erosivos, onde o modelado do relevo terrestre está associado à formação de feições côncavas por constituírem estas zonas de convergência de sedimentos e fluxos d'água (ANDERSON e BURT, 1978).

Coelho Netto (2003) sobre a evolução das cabeceiras de drenagem, destaca que estas se desenvolvem no domínio de encostas e apresentam topografia côncava sobre as quais se originam ou avançam as cabeças de canais. De acordo com a autora esta terminologia é empregada quando referida às extremidades de montante dos canais erosivos que avançam de forma progressiva através dos fundos de vales das cabeceiras de drenagem e correspondem na literatura internacional ao "*channel head*" (Dietrich & Dunne, 1993) ou "*stream head*" (Kirkby, 1994).

Segundo Sato (2008), diferentes estudos sobre vazões de canais determinaram que o abastecimento dos rios tem como um dos principais componentes o fluxo da água subterrânea, que se faz presente mesmo em longos períodos de estiagem. Este fluxo foi denominado como fluxo de base (*base flow*), sendo também chamado de fluxo atrasado (*delayed flow*), denominação dada por Hewlett & Hibbert, (1967 *apud* Dunne & Leopold, 1978). Este fluxo subterrâneo provém da água subterrânea residente nos solos e nas rochas que pode ter ficado estocada por meses ou até milhares de anos, dependendo das características do aquífero. Este fluxo possui uma velocidade muito inferior se comparado ao fluxo superficial do tipo Hortoniano que ocorre nas encostas, isso porque percorre maiores distâncias no interior do solo, sendo mais lento também pela dificuldade da água fluir por entre os grãos que compõem o solo.

A água em subsuperfície pode ocorrer em dois ambientes distintos: na zona saturada ou na zona não-saturada e a sua movimentação ocorre de forma diferenciada em cada um destes ambientes. Quando a pressão da água contida nos poros do solo é igual à pressão atmosférica, ela se encontra no nível freático ou nível d'água. Na zona não saturada, os poros do solo estão parcialmente preenchidos pela água e uma parte por ar, sob uma pressão abaixo da pressão atmosférica. Já a zona saturada pode ser caracterizada quando as partes com ar nos poros do solo estão completamente preenchidas

por água, estando em condição acima da pressão atmosférica. Na parte superior do nível d'água (ou freático) existe a zona capilar, onde a pressão da água está abaixo da pressão atmosférica, submetida a forças capilares. De acordo com Todd (1959 *apud* Leal, 2009) a água subterrânea se configura como a água encontrada nas zonas saturadas (abaixo do nível freático) como demonstra a Figura 3.

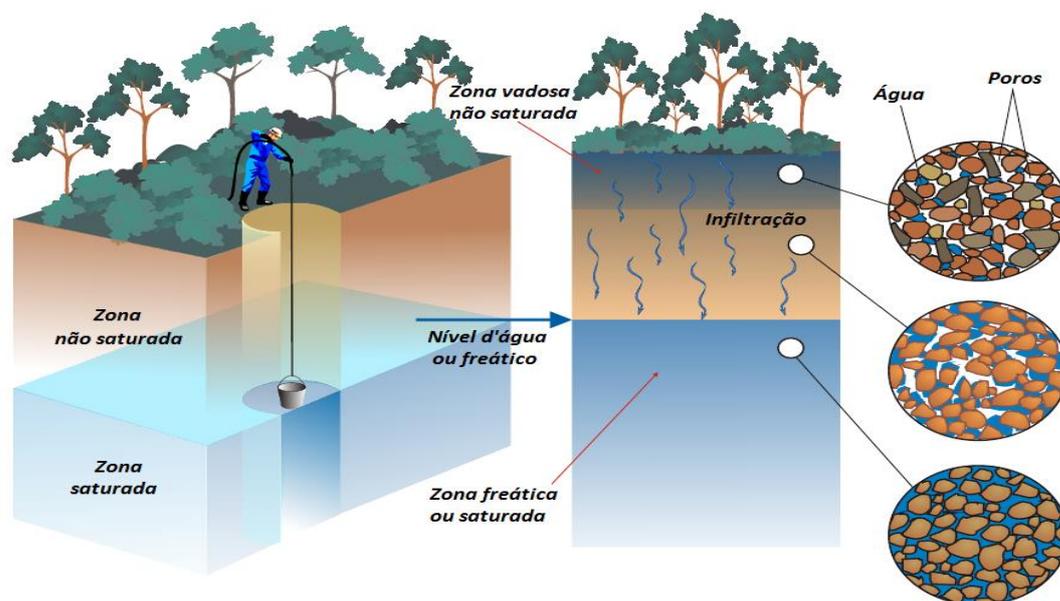


Figura 2 - Distribuição da água em subsuperfície. (Karmann, 2000).

Sobre a movimentação da água subterrânea, Price (1985) afirma que esta só ocorre quando existe energia. Logo a energia potencial proveniente de sua posição (elevação) e da sua condição interna (pressão) são determinantes para esse movimento e uma das formas de se expressar a energia da água subterrânea, é mensurando a altura que ela pode subir acima de determinado ponto. A posição referente à elevação é denominada de carga de pressão e expressa a pressão exercida pela água dentro dos poros do solo (carga poro-pressão).

De acordo com Freeze & Cherry (1979) os processos físicos que envolvem fluxos geralmente precisam de um gradiente potencial. Segundo a Lei de Darcy, a vazão do fluxo subterrâneo é diretamente proporcional ao seu gradiente hidráulico, que pode ser definido a partir da diferença de carga entre dois pontos de uma linha de fluxo dividido pela distância entre dois pontos e proporcional, também, à condutividade hidráulica. A condutividade é a propriedade que define a capacidade de transmissão de fluxos do meio poroso

e segundo Price (1985), a movimentação dessa água subterrânea obedece à declividade do gradiente hidráulico, onde quanto maior for o gradiente, mais rápido será o seu fluxo. Um maior gradiente hidráulico pode aumentar, por sua vez, o potencial erosivo do fluxo. A determinação da declividade do gradiente se configura, portanto, de fundamental importância para compreender os processos erosivos causados por fluxos subterrâneos, como exemplo, as voçorocas (LEAL, 2009).

Leal (2009) destaca ainda que os fluxos sub-superficiais e subterrâneos são reconhecidos pela literatura como sendo responsáveis pela iniciação e propagação de voçorocamento e outras feições erosivas no médio vale do rio Paraíba do Sul (MEIS *et al*, 1985; AVELAR & COELHO NETTO, 1992; FERNANDES *et al*, 1994; COELHO NETTO, 1999) e aponta ainda que vários autores tem ressaltado essa relação em diferentes lugares do mundo (HIGGINS, 1982; 1990; PILLANS, 1985; BEAVIS, 2000).

### **3.2 - Formação e desenvolvimento de rede de canais**

Segundo Coelho Netto (2003) os canais erosivos das cabeceiras de drenagem drenam através da rede principal de canais fluviais, integrando os processos de encostas com os processos fluviais. Assim a rede interconectada de canais fluviais constitui-se como a principal via de descarga de uma bacia de drenagem e, por isso, tornou-se um dos principais objetos de grande interesse hidrológico e geomorfológico, especialmente a partir de Horton (1945). Ahnert (1998 *apud* Coelho Netto, 2003) ressalta que a cabeceira de drenagem é um componente especial do sistema, porque é uma área onde a transição dos processos de denudação para transporte erosivo é caracterizada pela convergência em direção à porção terminal da rede de canais.

De acordo com Rocha Leão *et al.* (2001), dentro dos sistemas de drenagem, o escoamento superficial e sub-superficial das águas convergem para uma rede de drenagem canalizada, como apontado por Horton, (1945); Dunne, (1980); podendo incluir canais conectados ou desconectados a esta rede. O estudo de Montgomery e Dietrich (1989) destaca que a iniciação de um

canal responde a uma relação inversa entre área de contribuição e o gradiente acima da cabeça do canal. Com relação a esta condição, Coelho Netto (1997) propõe que ao se aproximarem dos divisores de águas, as fraturas podem reativar a exfiltração do aquífero regional, adicionando forças cisalhantes na propagação remontante de algumas voçorocas, que conseguem ir além dos divisores de drenagem da água superficial.

De fato, os resultados obtidos por Coelho Netto e colaboradores, na bacia do rio Bananal, utilizando os mesmos critérios dos estudos desenvolvidos por Dietrich *et al.* (1986); Montgomery e Dietrich (1988); Dietrich e Dunne (1993), não mostraram dependência entre a localização das cabeças de canais e o tamanho da área com o gradiente topográfico da cabeceira de drenagem. Ao contrário dos outros estudos, a autora demonstrou que algumas se desenvolvem muito próximas ao divisor de águas, o que levou a um questionamento sobre o conceito de zona não-erosiva a partir de uma distância crítica dos divisores de águas (Horton, 1945; Dunne, 1980).

Gabbard *et al.* (1998 *apud* Rocha Leão, 2005) demonstraram que, em algumas regiões, os processos erosivos são fortemente influenciados pela posição na paisagem, respondendo a variações no gradiente hidráulico responsáveis pela movimentação da água em superfície e em sub-superfície.

Coelho Netto (2003) destaca que o desenvolvimento das redes de canais pode ser explicada com base em três modelos determinísticos reconhecidos pela literatura sobre esta temática. O modelo de evolução de canais incisivos proposto por Glock (1931) demonstra que a extensão da rede de canais é feita pelo avanço remontante dos canais ou pela adição de canais que se originam separadamente, podendo atingir uma extensão máxima sobre toda área de drenagem disponível. Ao longo do tempo, com o rebaixamento dos divisores e conseqüente redução do relevo, alguns canais desapareceriam (absorção); e com a migração lateral dos canais principais, outros pequenos canais tributários também desapareceriam (abstração). Sendo assim, em um estágio mais avançado do desenvolvimento da rede, haveria uma progressiva diminuição na densidade de drenagem de uma bacia. No segundo modelo, proposto por Horton (1945) o desenvolvimento da rede de canais tem relação com a ação do escoamento superficial, onde diversos sulcos erosivos paralelos se formariam a partir de uma distância crítica dos divisores. Com o tempo, o

ajuste lateral e a micro-pirataria de águas superficiais entre sulcos adjacentes acarretaria competição e aprofundamento dos sulcos de maior concentração de escoamento superficial preferencial, podendo originar, dessa forma, canais incisos (chamados na literatura internacional de “gully”). De maneira progressiva, estes canais se tornariam mais capazes de absorver os canais adjacentes, por gradação lateral, propiciando a expansão de redes de canais integradas. No modelo hortoniano, a autora destaca que a extensão máxima do canal dominante não ultrapassaria a distância crítica dos divisores ( $x$ ), o que constituiria uma zona não-erosiva na proximidade dos divisores. A autora aponta ainda que o terceiro modelo foi proposto por Howard (1971), com base apenas no crescimento remontante dos canais, onde a rede de canais se desenvolveria até a borda da área não-dissecada, segundo o qual, na medida em que os canais progridem remontantemente e bifurcam, eles ocupam espaços disponíveis e formam uma rede de padrão dendrítico.

Seguindo este último modelo proposto por Howard, os estudos de Dunne (1970, 1980), propuseram que, em regiões úmidas, a formação e o crescimento de redes de canais resultam de mecanismos erosivos por excesso de poro-pressão em faces de exfiltração da água subterrânea (ou “*headward spring sapping*”), onde as fraturas das rochas subjacentes podem influenciar o traçado das rotas preferenciais de crescimento da rede (COELHO NETTO, 2003).

De acordo com Rocha Leão (2005), considerando a atuação dos fluxos subterrâneos na evolução da rede de canais, aponta que estudo conduzido por Dunne (1978) destaca a atuação destes fluxos como mecanismos fundamentais para a compreensão dos processos geomorfológicos em regiões úmidas, articulando os processos operantes nas encostas e com os operantes em canais. Schumm *et al.* (1995), em estudos conduzidos na Flórida (EUA) identificaram que os fluxos d'água subterrâneos são responsáveis pelo controle da evolução das encostas através do recuo remontante dos canais de primeira ordem, afetando diretamente a configuração da paisagem geomorfológica.

Os estudos de Dunne (1970; 1980; 1990) evidenciam o papel do fluxo subsuperficial e subterrâneo na iniciação de canal e crescimento regressivo da rede de canais. Rocha Leão (2005) destaca que no estudo de Dunne (1990)

foram diferenciados dois tipos de mecanismos erosivos associados aos fluxos subsuperficiais. O primeiro refere-se ao mecanismo de erosão por vazamento ou exfiltração, denominado como *seepage erosion*, que envolve o desenvolvimento de uma força crítica que remove partículas de solo ou rocha a partir da exfiltração da água de dentro do meio poroso, causando liquefação. O segundo mecanismo identificado pelo autor foi definido como lavagem em túneis (tunnel scour) que se associa a aplicação de uma força de cisalhamento nas margens de um macro-poro. Dunne (op. cit) descreve uma percolação preferencial da água no solo através de macro-poros interconectados, formados a partir da própria dinâmica de escoamento da água no solo, ou mesmo por origem biológica (fauna escavadora e dutos de raízes mortas). Esses caminhos preferenciais, onde a água fica menos sujeita a forças de retenção da zona não saturada do solo, foram denominados de *pipe*, sendo o fluxo que se desenvolve em seu interior denominado *pipeflow*. Ainda de acordo com Rocha Leão (2005) esses mecanismos descritos por Dunne (1970) podem provocar a progressão remontante das encostas devido à formação de túneis erosivos com posterior solapamento e desabamentos. Este processo de recuo lateral de encostas pode acontecer de diferentes formas, envolvendo movimentos de massa e voçorocas.

Segundo Dunne (1980), os trabalhos de Kirkby e Chorley (1967; 1968) apontaram que o fluxo de subsuperfície e sua influência sobre os processos erosivos fornecem "a outra extremidade-membro do espectro contínuo de modelos de fluxo e erosão". Eles estavam se referindo ao fluxo de subsuperfície raso, mas o fluxo de águas subterrâneas profundas também torna-se importante para o desenvolvimento de redes de canais e bacias de drenagem. Dunne (op. cit.) destaca que o processo de avanço remontante das cabeças dos canais ocorre mais rapidamente do que o alargamento do canal em si devido a maior convergência de fluxo, mas pondera que o alargamento pode ocorrer como resultado de corrosão lateral através do fluxo assim como exfiltração (Figura 3). Ainda de acordo com Dunne (op.cit) o processo contínuo de colapsos, recuo remontante e ramificações forma uma rede de vales fluviais. A integração da rede de canais, desta forma, não está limitada a pequenas bacias de drenagem. A água subsuperficial pode migrar sob divisores

topográficos e a competição por água subterrânea pode levar a captura de canais vizinhos ou taxas de rebaixamento diferenciadas entre canais (Figura 5).

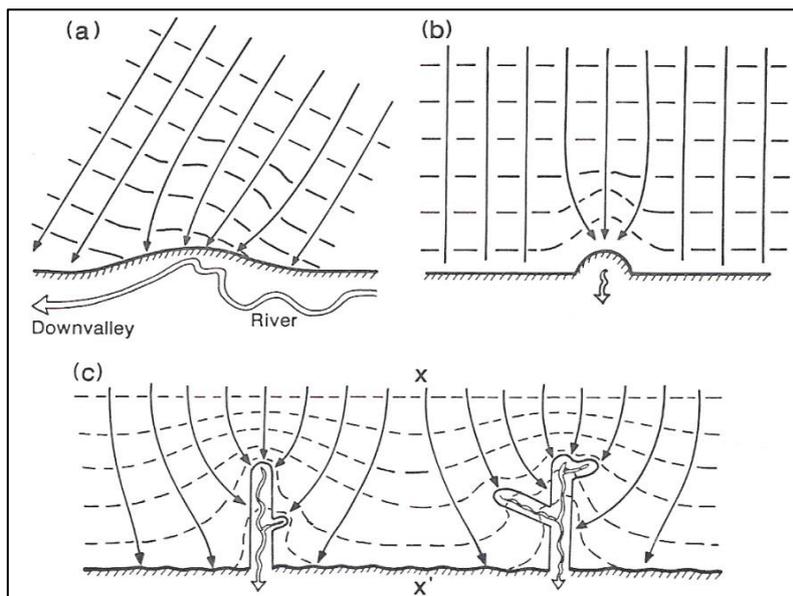


Figura 3: Visão da rede de fluxo subterrânea durante a progressão remontante das cabeças de canal na formação de uma rede de drenagem. As setas contínuas são linhas de fluxo, as tracejadas indicam as equipotenciais. A) fluxos subterrâneos em direção da margem; B) Convergência do fluxo subterrâneo na face de exfiltração, ruptura e reentrância inicial; C) Aumento da convergência das linhas de fluxos no entorno da face de exfiltração com avanço remontante das cabeças aumentando o vale. O segundo mostra a distorção do fluxo em direção a outro tributário e por fim, a expansão da rede de canais (Adaptado de DUNNE, 1980; 1990).

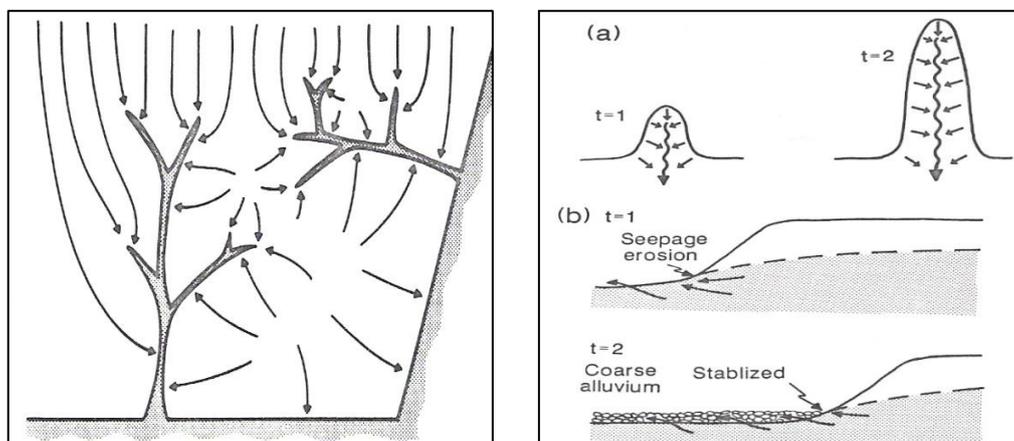


Figura 4: O desenvolvimento da rede de vales pelo crescimento remontante das cabeças dos canais por exfiltração.

Além disso, Leal (2009) aponta que existem inúmeros trabalhos que apontam resultantes decorrentes dos fluxos intra-fraturas. O estudo realizado por Dunne (1990) evidencia que variações espaciais nas propriedades hidrogeológicas podem causar concentrações preferenciais de descarga ou mesmo reduções locais da resistência ao intemperismo e à força de exfiltração. Em trabalho sobre exfiltração de fluxos subterrâneos e mecanismos erosivos Higgins (1984) aponta as fraturas e outras zonas de fraqueza estrutural como áreas que podem concentrar fluxos, favorecendo o desenvolvimento de canais. Berger & Aghassy (1984) complementa indicando as fraturas como condicionantes de fluxos artesianos e indicam que, nesses casos, existe a possibilidade de elevações pontuais do lençol freático (LEAL, 2009).

Tendo por base o estudo desenvolvido na bacia do rio Bananal, Avelar e Coelho Netto (1992a ; 1992b) apontaram que o controle lito-estrutural das fraturas sub-verticais tem relação direta com a formação de concavidades, sendo que a orientação predominante nas fraturas tem uma correspondência com o eixo das concavidades. Segundo os autores citados, o desenvolvimento das concavidades pode ser relacionado com o processo de exfiltração da água subterrânea por artesianismo, dentre as fraturas (Figura 5)

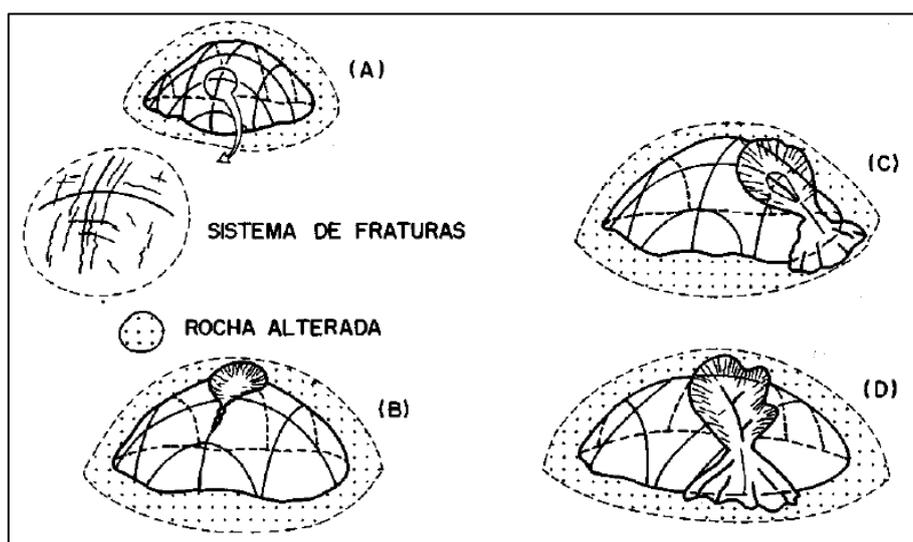


Figura 5 - Modelo de evolução da formação de concavidades estruturais tendo como controle a orientação das fraturas proposto por Avelar e Coelho Netto (1992). A interseção de fraturas sub-verticais (A) funcionariam como zonas de alívio de pressão para os fluxos artesianos, que formariam canais de primeira ordem (B) e posteriormente se desenvolveriam seus tributários (C). O processo de formação de canais acompanha o aumento do gradiente topográfico e hidráulico, desencadeando movimentos de massa na encosta. (D) Interseção de fraturas – vales e canais tributários.

Conforme apontado por Coelho Netto (2003) houve um aumento dos estudos voltados à modelagem física e matemática sobre expansão da rede de canais (nas décadas de 80 e 90), com atenção especial sobre a localização das cabeças de canais, ou seja, aonde inicia os canais nas cabeceiras drenagem. Para Kirkby (1994 *apud* Coelho Netto, 2003) esta modelagem torna-se relevante tanto na explicação da variação dos padrões espaciais estáticos das redes de canais quanto na avaliação da vulnerabilidade potencial dessas áreas para uso da terra ou para avaliar os efeitos das mudanças climáticas globais. O autor sugere ainda que o espaçamento entre canais de cabeceiras de drenagem parece estar relacionado, ao menos em parte, com o balanço entre os processos de encosta e, no canal, com o transporte de água e sedimentos; trata-se, portanto, de uma feição morfológica que se relaciona com a magnitude e frequência dos eventos climáticos, especialmente os pluviométricos (COELHO NETTO, 2003).

### **3.3 - Erosão por voçorocamento**

Como demonstrado pela literatura, há uma relação direta da exfiltração da água subterrânea com a formação de canais incisivos com bordas bem definidas, do tipo voçorocas (Coelho Netto & Fernandes, 1990; Rocha Leão, 2005). Segundo Leal (2009), sobre os canais incisivos formados por escoamento concentrado, mesmo sendo amplamente estudados, não existe um consenso entre os pesquisadores quanto à terminologia adotada na definição de tais feições. Furlani (1980), destaca que existem diversas propostas de classificação de voçorocas, seguindo variados critérios como estado de evolução, morfologia, dimensões e posição no relevo.

Outra questão controversa está relacionada aos mecanismos responsáveis pela iniciação destas formas erosivas; se por fluxo superficial ou subsuperficial e subterrânea. Segundo Bacellar (2000), as voçorocas constituem um fenômeno natural de gênese e evolução complexas, já que tanto os fluxos superficiais e subsuperficiais, bem como diversos tipos de movimentos de massa, podem atuar isoladamente ou conjuntamente. A reação

em cadeia, com mecanismos primários ativando mecanismos secundários tornam sua análise ainda mais complexa.

O termo voçoroca que tem origem na palavra tupi-guarani “*ibi-çoroc*” (terra rasgada) de acordo com Pichler (1953), é utilizado para designar feições onde água subterrânea é a causadora pelos processos erosivos dominantes na produção da forma (LEAL, 2009).

De acordo com Higgins (1990) “*gully*” pode ser definida como feições que possuem bordas íngremes e que, geralmente, têm a seção transversal em forma de “U” (base achatada), e desenvolvem-se de jusante para montante (crescimento remontante) através do solapamento da base da cabeça ou das paredes do canal com a consequente instabilização do material localizado na parte superior - processo conhecido em inglês como “*sapping*”- ao passo que “*rills*” podem ser caracterizados como sulcos estreitos e que possuem seção transversal em forma de “V”, com bordas arredondadas não muito íngremes e associadas aos fluxos superficiais de encostas sem coberturas (HIGGINS, 1990). A literatura internacional utiliza o termo em inglês “*gully*”, em referência às feições incisas, com bordas bem definidas e o termo “*rill*” para caracterizar as feições mais instáveis.

De acordo com Coelho Netto (1994), Horton integrou o modelo de hidrologia superficial com o modelo de erosão pela ação de fluxo superficial, enfatizando o processo de formação de canais, rede de canais e vales ou bacias de drenagem em seus múltiplos níveis hierárquicos. Para a compreensão de como opera o fluxo superficial hortoniano considera-se que o solo possui uma taxa máxima de absorção de água da chuva, a qual Horton (1933) chamou de “capacidade de infiltração”, sendo que a tendência dessa taxa é diminuir progressivamente logo após o início do evento chuvoso e tende a se estabilizar após algum tempo. Essa diminuição da capacidade de infiltração é explicada pela saturação gradual do perfil do solo como também pela selagem da superfície do solo gerada pelo efeito erosivo do impacto das gotas da chuva, denominado de erosão por “*splash*” ou salpicamento (Guerra, 1994). De Ploey (1983 *apud* Guerra, 1997) também ressalta a importância do efeito de salpicamento, no sentido de induzir uma poro-pressão positiva na superfície do solo, aumentando a formação de poças (*ponds*) e, conseqüentemente, a geração de *runoff*. De acordo com o autor, a partir deste

momento, ocorre uma liquefação, porque a resistência ao cisalhamento é zero, nessas circunstâncias, em especial nos solos arenosos. Se a intensidade da chuva for superior à capacidade de infiltração do solo em questão, o excedente de chuva passa a escoar superficialmente (*runoff*), dando origem ao escoamento superficial hortoniano, mas se a intensidade de chuva for igual ou inferior à capacidade de infiltração do solo não haverá escoamento superficial e a água infiltrará no solo (Horton 1933; 1945). Esse fluxo é formado pela concentração de água em micro-depressões na superfície do terreno, possui alta velocidade e algumas vezes tem a capacidade de erodir os solos, sendo que essa erosão pode evoluir verticalmente e, depois, lateralmente, dando origem a um canal erosivo e, em seguida, alargando suas paredes laterais (COELHO NETTO, 1994)

Segundo Guerra (1997), o primeiro pesquisador a reconhecer a importância geomorfológica das ravinas nas encostas foi Horton (1945), na medida em que chamava atenção do seu papel como condutoras de água e sedimento e, ao mesmo tempo, como embriões de um sistema de drenagem. A formação destas formas está relacionada com a concentração da água que escoam em superfície, em depressões do solo (microtopografia), até que começa a descer a encosta, através de um lençol (*sheetflow*), que pode evoluir para ravina. Ainda de acordo com o autor, a remoção inicial de partículas é atribuída por Horton (1945) à força de cisalhamento exercida pelo escoamento (*runoff*), à medida que este aumenta gradativamente em profundidade, encosta abaixo (Figura 6). É nesse contexto que Horton (1945) propõe o conceito de *belt of no erosion* (área sem erosão), ou seja, próximo aos divisores de drenagem a força de cisalhamento imposta pelo fluxo laminar (*sheetflow*) não é suficiente para remover partículas, entretanto, à medida que esse fluxo de água aumenta e acelera ao longo do perfil da encosta, ocorre o cisalhamento das partículas de solo e, finalmente, a erosão começa a ocorrer a partir de uma distância crítica. Ou seja, começa a ocorrer uma incisão no solo, onde o fluxo de água tende a se concentrar, formando as ravinas. Mas as ravinas também podem se formar próximo à base das encostas, onde uma pequena incisão pode recuar em direção ao topo da encosta (GUERRA, 1997).

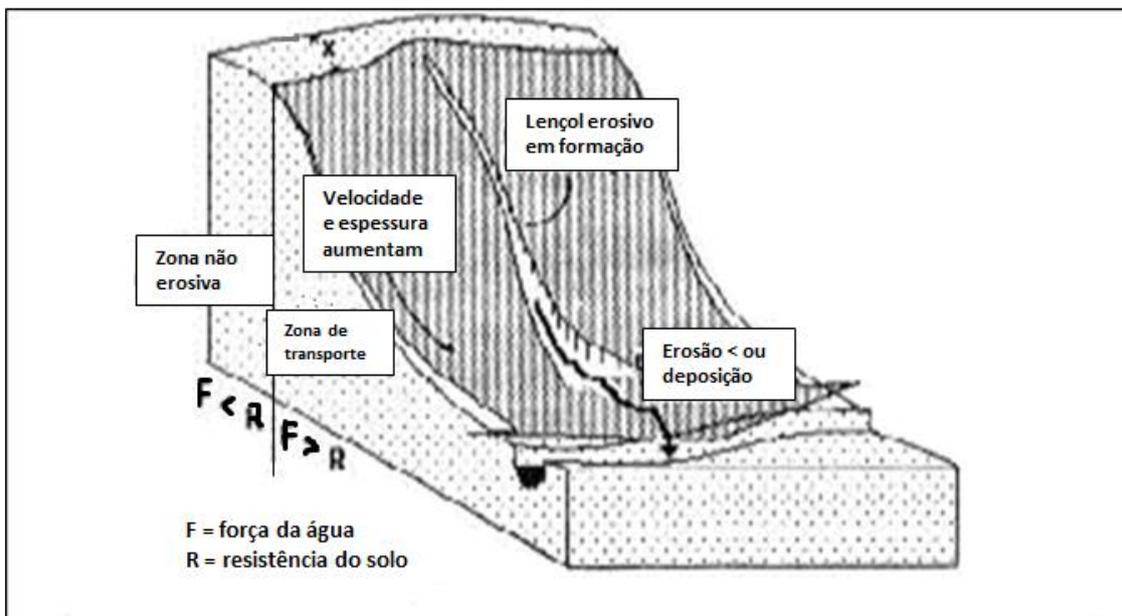


Figura 6 – Diagrama esquemático da produção de fluxo superficial hortoniano e consequente trabalho erosivo, incluindo a formação de canal. O “x” indica a distância crítica que separa a zona não-erosiva da zona de transporte (Horton, 1931).

Os sulcos erosivos são feições incipientes cujo fluxo superficial na encosta proveniente da precipitação possui ainda um caráter difuso e por vezes temporário. As formas erosivas relacionadas a ravinamentos e voçorocamentos possuem um canal inciso, com bordas bem definidas, por onde o fluxo d’água escoar preferencialmente (Figura 7).

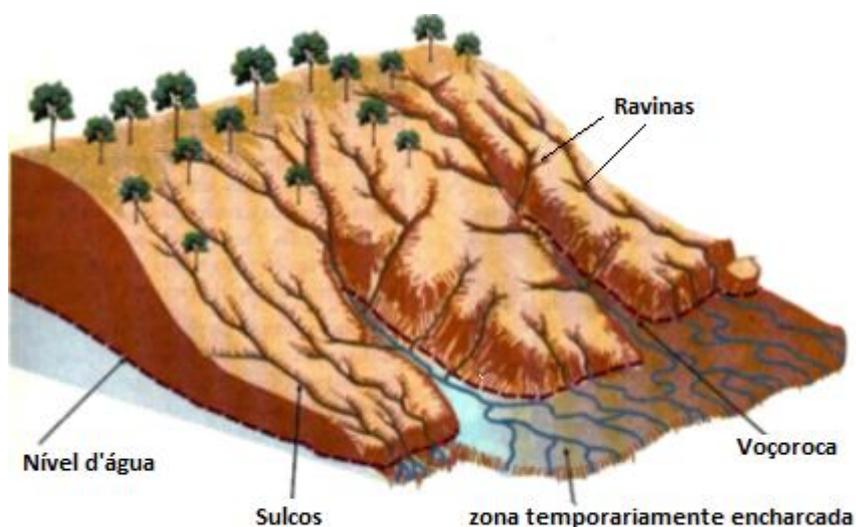


Figura 7 – Diagrama esquemático das diferentes processos erosivos, como sulcos, ravinamentos e voçorocamento. (Adaptado de Karmann, 2000).

Além disso, em casos de aprofundamento de ravinas até o nível freático ou quando os processos de erosão em túneis (*pipping*) por exfiltração se tornam dominantes no seu desenvolvimento, o canal erosivo pode ser classificado como voçoroca (HIGGINS, 1990).

Como ressalta Leal (2009), geomorfologicamente quando se analisa uma feição erosiva, é preciso ater-se aos agentes causadores ou responsáveis pelo seu desenvolvimento. Com isso, acredita-se que os aspectos fundamentais para diferenciar voçorocas de ravinas são os mecanismos que operam no desenvolvimento de tais feições: as voçorocas são feições formadas a partir de fluxos subsuperficiais ou subterrâneos e ravinas são aquelas causadas por fluxos superficiais concentrados.

De acordo com Augustin (2006) o reconhecimento de que as voçorocas são geradas pela atuação de processos complexos, tem tido respaldo em evidências de campo, a partir de trabalhos como Kirkby, (1978) ; Jones, (1981); Beckedahl & Dardis (1988); Bocco (1991); Poesen et al (1998); Beavis, (2000), e que dentre esses processos destaca-se o *piping* (túnel erosivo) que constitui um dos tipos mais importantes de erosão subsuperficial do solo (Crouch, 1983; Jones, 1987). Segundo os estudos de Bull & Kirkby (1997 apud Augustin, 2006) a ocorrência destes dutos podem ser atribuído a diversos fatores, tais como: gradiente hidráulico elevado, presença de íons solúveis no solo, ocorrência de períodos de seca prolongados, que favorecem a ocorrência de fissuras, e às chuvas intensas e irregulares que reativam percolações concentradas subsuperficiais. Pierson (1983:1) ainda acrescenta a essa lista vários outros mecanismos como: erosão fluvial sub-superficial, promovida pela ocorrência de olhos d'água (minas) em situações de alto gradiente hidráulico ou baixo poder de agregação do solo, passagens deixadas por raízes decompostas e a ação de escavamento de micro, meso e macro-fauna. Este mesmo autor também chama a atenção para o fato de que a ocorrência de rocha não alterada, ou de horizontes menos permeáveis, podem induzir à concentração subsuperficial da água levando, eventualmente, à formação desses canais. A gênese destes túneis erosivos ou dutos (*pipes*) está relacionado com o carreamento de pequenos grãos do solo, partículas de argila e outros colóides, ou mesmo através da remoção dos componentes do solo por solução, ou seja, pelo processo de *piping*. O transporte desse material se faz

através do transporte de sólidos e de componentes dissolvidos em rotas preferenciais, o que lhes confere tanto a atuação de forças físicas, quanto químicas. O desenvolvimento dessas rotas preferenciais de escoamento sub-superficial pode levar à formação de uma verdadeira rede interligada de fluxos (AUGUSTIN, 2006). Ainda de acordo com a autora, o surgimento das voçorocas ocorreria com o colapso do teto dos túneis e o alargamento, por escoamento superficial e por movimentos de massa, do canal assim formado. A ação combinada desses processos aumentaria sensivelmente as forças envolvidas na escavação e alargamento das paredes do canal. A autora destaca que, embora vários autores apontem para a existência de estreita correlação entre a formação das voçorocas e a ação de *piping* (Jones, 1987; Beckedahl & Dardis, 1988), sua comprovação não pode ser considerada simples, pois nem sempre é possível detectar na superfície o início do aparecimento do canal superficial por colapso do túnel. Senso assim, uma vez ocorrido o colapso, a ação do escoamento superficial tende a se tornar preponderante, encobrendo evidências da presença do duto sub-superficial, anterior à do canal superficial.

Esse mesmo aspecto também foi evidenciado por Higgins (1990) onde destacou que geralmente os indícios deixados pela erosão promovida por fluxos subsuperficiais são apagados por fluxos superficiais subsequentes, e que os processos de exfiltração e de erosão em túneis (*piping*) raramente são observados. Com isso, o pesquisador poderia à primeira vista concluir erroneamente que os processos operantes em determinada voçoroca seriam superficiais. Leal (2009) faz referência a este caso apontando que os fluxos superficiais podem promover a lavagem das paredes das voçorocas, desobstruindo as faces de exfiltração e potencializando os efeitos por exfiltração e pode produzir um depósito ao longo do eixo do canal erosivo, onde os processos fluviais são operantes. Higgins (1990) propõe ainda que a maioria das voçorocas é iniciada e alargada por processos de erosão superficial, assim como no modelo proposto por Dunne (1980), a não ser nos casos em que a montante da cabeça do canal existia uma concentração local de fluxo superficial bem definido, capaz de gerar o “efeito cachoeira”.

Em estágio mais avançado de atividade erosiva e com relação ao recuo de divisores de drenagem, Coelho Netto (2003) aponta que com o aprofundamento e avanço regressivo dos canais sobre as encostas traseiras e mais íngremes das cabeceiras de drenagem, os movimentos gravitacionais de solos (deslizamentos), tornam-se mais relevantes no recuo dos divisores, assim como os mecanismos erosivos subsequentes de erosão por ação direta das chuvas e especialmente do escoamento superficial. De acordo com a autora em referência a estes casos, as chuvas locais alimentam diretamente a remoção dos materiais que foram colapsados, favorecendo o retro-avanço dos deslizamentos e, por conseguinte, o recuo dos divisores. Ela destaca também a importância do papel dos aquíferos suspensos que, por sua vez, podem ser preponderantes na definição de superfícies de rupturas em associação, principalmente, aos saprolitos de gnaisses bandados, envolvendo possíveis relações com as chuvas locais e/ou com as chuvas regionais. Sendo assim, as chuvas regionais seriam responsáveis pela geração das superfícies de rupturas associadas ao nível freático do aquífero regional, especialmente nos casos de pirataria de água subterrânea entre vales fluviais paralelos e desnivelados entre si.

Coelho Netto (2003) destaca ainda que a expansão regressiva da rede de canais pode ser considerada descontínua no tempo e no espaço, e que é governada por relações funcionais que regulam a dinâmica dos aquíferos subterrâneos e os processos conjuntos de denudação química e mecânica. A autora afirma que esta expansão da rede de canais envolve mudanças externas, climáticas e/ou vegetacionais, traduzidas nas variações da infiltração e recarga dos aquíferos e que também pode ser relacionada com os limiares internos do sistema de drenagem, os quais podem ser ultrapassados por mecanismos de retroalimentação positiva no que diz respeito ao rebaixamento do nível de base pela progressão linear e remontante da incisão dos canais erosivos (do tipo voçorocas) ou ainda pelo recuo de divisores e capturas de drenagem dos vales fluviais suspensos em relação aos vales capturados, como consequência da pirataria de água subterrânea do vale capturado, sendo este último aspecto destacado no trabalho de Leal (2009).

Valentin e Poesen (2005), apontam que o crescimento do interesse dos cientistas por este tipo de erosão está associado principalmente com o

aumento da preocupação dos impactos “indiretos”, àqueles que transcendem a escala das parcelas de cultivo apenas, destacando os impactos causados em escalas maiores, como os impactos na bacia hidrográfica.

De acordo com levantamento realizado por estes autores sobre outros estudos conduzidos nos EUA, Austrália, China e Etiópia, mostram que a maior parte de sedimentos nas bacias de drenagem pode estar relacionada com a erosão por voçorocamento, devido ao aporte de sedimento produzido por estas. Poesen (2003) e Valentin et al (2005), relatam que a partir de duas conferências internacionais (Bélgica e China), houve uma atenção especial às questões sobre os impactos extra-parcelas, ou seja, na bacia. Destacam que o fator de deflagração dessas erosões geralmente está associado ao manejo inadequado do solo, do cultivo, dos sistemas de irrigação, construções de estradas (drenagens ineficientes) e urbanização. Diversas técnicas empregadas (datações, estratigrafia, dentre outras) apontam que os períodos de erosão por voçorocamento na Europa correspondem não apenas ao intenso desmatamento e ao uso intensivo do solo (mudança de uso e cobertura), mas também ao período de alta frequência de chuvas intensas. Os autores relacionam também a questão das técnicas empregadas para a diminuição dos impactos e das tentativas de controle de erosão, entretanto destacam que, muitas vezes, o valor do solo não compensa o valor das técnicas de reparação e contenção das erosões, pois sua implementação é raramente associada a um benefício rápido para os agricultores em termos de aumento na produtividade da terra.

### **3.4 – Distribuição da água dentro dos plantios de eucalipto**

O histórico de uso e cobertura do solo no médio vale do rio Paraíba do Sul apresenta diferentes períodos de alterações no mosaico da paisagem que foram orientados pelos sucessivos ciclos econômicos. Atualmente, a silvicultura do eucalipto se configura como a atividade econômica que vem recebendo destaque nesta região. Dentre os questionamentos sobre os impactos ambientais que se desdobram em virtude desta prática, tanto em âmbito nacional como internacional, (Jayal, 1985 *apud* Sato, 2008) destaca que a alta

demanda de água do eucalipto esgotaria a umidade do solo e acabaria com a recarga da água subterrânea.

De acordo com Sato (2008), os estudos de Poore e Fries (1985) e Lima (1996), entretanto, apontam que muitos destes questionamentos relacionados à silvicultura do eucalipto e aos impactos ambientais resultantes destes plantios não possuem, de fato, estudos científicos que embasem as conclusões feitas acerca do assunto. Por outro lado, Lima *et al.* (2003), Soares & Almeida (2001) e Mielke *et al.* (1999) demonstraram que o gênero das espécies de eucalipto plantadas no Brasil apresentam características de evapotranspiração anual e do uso de água do solo comparáveis às áreas de floresta Atlântica.

Sobre as características da interceptação da água dentro de ambientes florestais, Sato (2012) destaca que a água pode percorrer o seu percurso até chegar ao topo do solo por meio de dois caminhos: como fluxo de atravessamento (*throughfall*) ou fluxo de tronco (*stemflow*). O fluxo de atravessamento corresponde à água que consegue atravessar diretamente o dossel ou que faz esse caminho a partir do gotejamento das folhas e galhos. Já o fluxo de tronco corresponde à parcela da água que escoar pelos troncos (Hewlett, 1982; Dunne & Leopold, 1978; Coelho Netto, 1994 *apud* Sato, 2012). Pode-se considerar que apenas uma pequena parcela do total precipitado chega diretamente ao solo em áreas com vegetação densa já que parte da água da precipitação é armazenada nas folhas, galhos, caules e troncos da vegetação. Quando essas superfícies já se encontram úmidas a água passa a escoar para os estratos inferiores da vegetação e então para a camada de serrapilheira, onde uma outra parcela de água é interceptada, antes de atingir o solo mineral. A quantidade de água que é armazenada nessas diversas superfícies vegetais é conhecida como armazenamento de interceptação (*interception storage*), e sua magnitude depende de diversos fatores, como forma, densidade e textura das folhas, galhos, entre outras superfícies (Dunne & Leopold, 1978), assim como de características das chuvas, como número e espaçamento entre os eventos e a intensidade da precipitação (Hewlett, 1982). Sendo assim, a água que passa pelo dossel como fluxo de atravessamento tende a adquirir uma energia cinética maior abaixo das copas, energia essa que é desenvolvida durante a queda livre das gotas, resultando em maior poder

erosivo à medida que o diâmetro das gotas aumenta (Lee, 1980 *apud* Montezuma, 2005).

Os estudos de Sato (2008; 2012) desenvolvidos na bacia do rio Sesmaria, tinha como principal objetivo avaliar as alterações geo-hidroecológicas decorrentes da substituição das antigas pastagens por plantios de eucalipto, buscando entender as variações temporais e espaciais dos processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial, capacidade de retenção hídrica (CRH), produção e estocagem da serrapilheira. Os resultados obtidos através deste estudo demonstraram que dentro dos plantios de eucalipto o escoamento superficial é negligenciável (relação Q/P da ordem de 0,6%) devido à espessa camada de serrapilheira, que possui baixas taxas de decomposição, tendo como valores máximos 1,3% e 3,8%, que ocorreu no dia em que a precipitação foi de 90 mm. A infiltração (99,4%) é favorecida principalmente devido à arquitetura convergente dos galhos, formando um atravessamento preferencial junto aos troncos (SATO *et al.*, 2011), acompanhado em seguida o enraizamento pivotante que facilita a percolação da água no solo (Figura 8). De acordo com Sato (2008), os estudos desenvolvidos por Freire Allemão (1997), Jansen (2001) e Silveira (2004) com base em experimentos em campo nas encostas florestadas por Mata Atlântica no Maciço da Tijuca (RJ) e em laboratório, indicaram a relevância do papel das raízes de espécies arbóreas na atuação de vias preferenciais dos fluxos de infiltração no solo. Além disso, como apontado por Sato (2012) em relação à oscilação do lençol freático, não foi identificado uma clara tendência de rebaixamento no período analisado que pudesse ser creditada aos plantios.

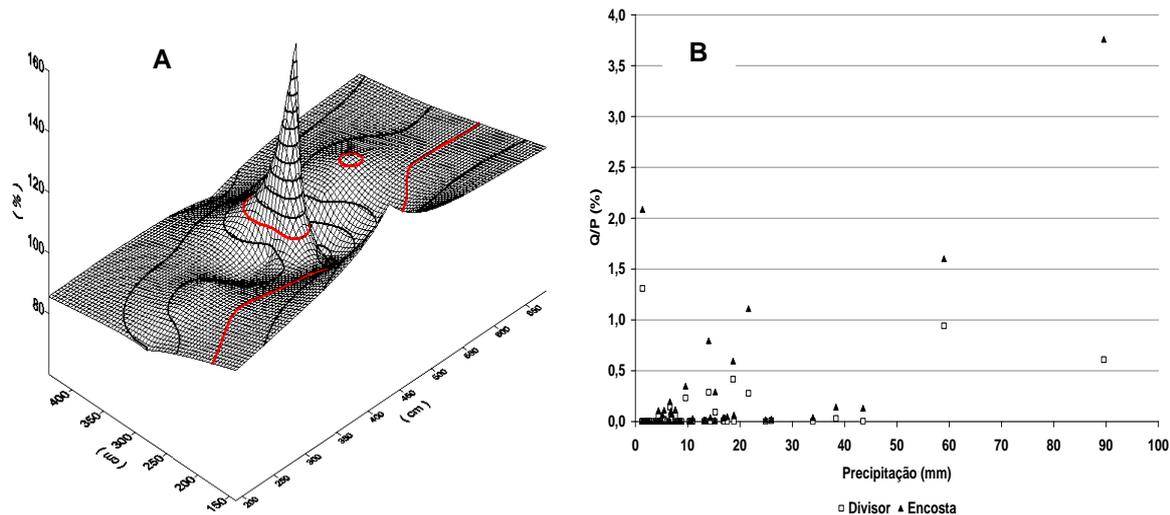


Figura 8 – A) Variação espacial do atravessamento em relação à árvore central. As linhas de equi-atravessamento estão representadas, sendo a linha em vermelho correspondente ao atravessamento igual a 100%. B) Correlação da precipitação e a relação Q/P (escoamento superficial / precipitação) nas parcelas de escoamento do divisor e da encosta (extraído de Sato, 2008).

Nos plantios estudados, ainda não existe uma definição em relação ao quanto da água infiltrada é reabsorvida pelo próprio eucalipto e o quanto é destinado ao reabastecimento do lençol freático, que podem ter implicações na reativação erosiva através de voçorocamento. Outro ponto importante a se destacar, é o fato de que o comportamento da água subterrânea não necessariamente corresponde aos recortes das bacias hidrográficas. Segundo Leal (2009) os divisores de drenagem redistribuem e orientam os fluxos superficiais, já a dinâmica subterrânea pode ser investigada a partir da rede de fluxo subterrânea.

### 3.5 - Voçorocas e Eucalipto

A principal indagação desta pesquisa é se de fato exista alguma relação entre a inserção dos plantios de eucalipto na área de estudo investigada com a reativação de canais de voçorocamento. Na literatura não foram encontrados, até o presente momento, estudos que relatassem esta relação de forma direta. Grande parte dos estudos voltados para o controle da expansão de canais erosivos (ravinamentos e voçorocamento) está relacionado com a introdução

de vegetação (reflorestamento) como medida para retardar o desenvolvimento destas feições (PIÉGAY et al., 2004; PHILLIPS e MARDEN, 2005).

Entretanto, os resultados da pesquisa de Marden *et al.* (2012) sobre o histórico e distribuição de voçorocas em resposta a mudanças de uso da terra indicaram de forma indireta algo semelhante ao observado pelo presente estudo. Com base no levantamento feito pelos autores de fotografias aéreas durante o período de 1960 a 1997 na região de East Coast da Nova Zelândia, foram observadas o aparecimento de novas voçorocas e o desenvolvimento de antigas erosões após a introdução de espécies arbóreas, dentre elas principalmente *Pinus* e *Eucalyptus sp.* O objetivo deste estudo era avaliar a distribuição de voçorocas ao longo do tempo em resposta ao desmatamento das florestas nativas (período de 1880 a 1920) em comparação com as primeiras medidas de controle, iniciadas pelo governo da Nova Zelândia em 1960, por meio do reflorestamento com espécies exóticas, até o ano de 1997, ou seja, depois de quase 40 anos de esforços para o controle dessas erosões.

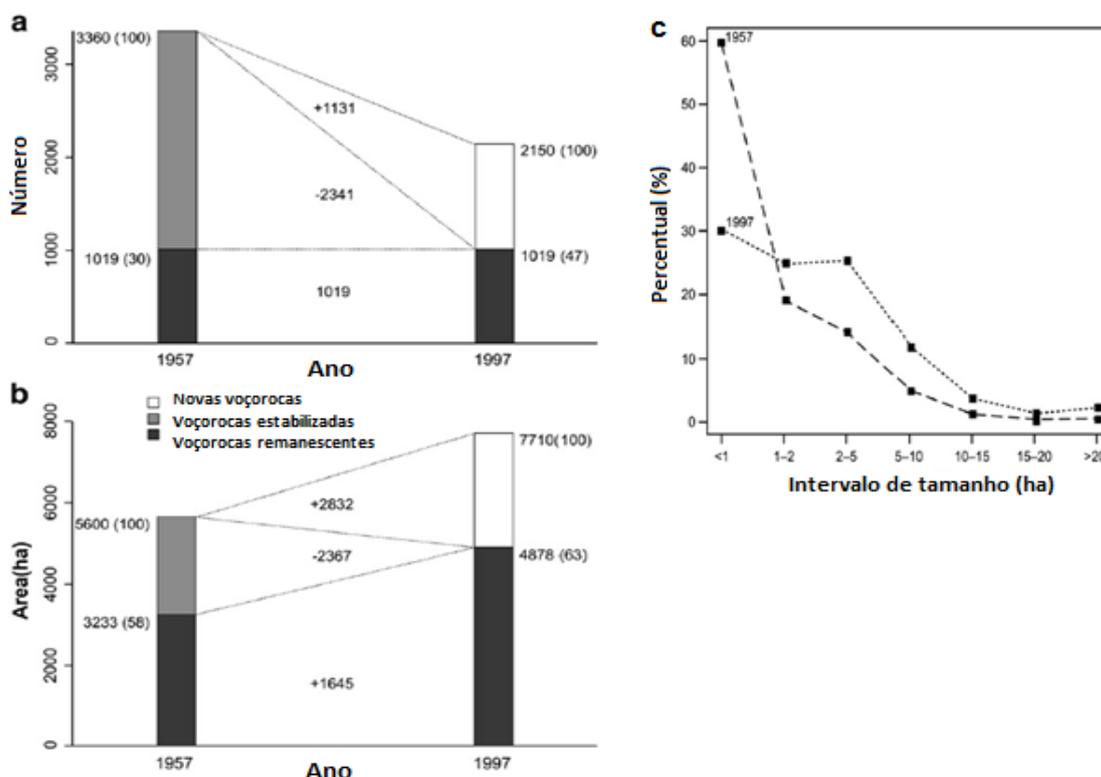


Figura 9: A) Distribuição do número de voçorocas comparadas em dois momentos: 1957 e 1997; B) Distribuição da área (ha) de voçorocas; C) Percentual de voçorocas pelo intervalo de tamanho em dois momentos: 1957 e 1997. (Modificado de Marden *et al.*, 2012)

De acordo com os resultados obtidos pelo estudo de Marsden et al (2012), o número de voçorocas estabilizadas de 1967 não voltaram a reativar no ano de 1997, entretanto os autores apontam o surgimento de novas voçorocas, 1.131 no total (Figura 9-A). Pode-se observar também o crescimento em área (ha) de voçorocas remanescentes e também o crescimento da área proporcional às novas voçorocas (Figura 9-B). A Figura 9-C evidencia o aumento da porcentagem de voçorocas maiores em área no ano de 1997, comparado ao ano de 1957. Diminuíram o número de voçorocas pequenas (>1 ha), entretanto a porcentagem de erosões maiores que 1 ha cresceram consideravelmente.

## 4) ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 - Médio vale do rio Paraíba do Sul

Localizada na região Sudeste, a bacia do rio Paraíba do Sul corresponde a uma das áreas mais industrializadas do país, principalmente no que diz respeito aos investimentos direcionados no eixo Rio de Janeiro - São Paulo. Segundo o comitê da bacia do rio Paraíba do Sul (CEIVAP) a área se estende por parte dos territórios dos estados de São Paulo, com uma área correspondente de 13.500 km<sup>2</sup>; Minas Gerais com 20.900 km<sup>2</sup> e Rio de Janeiro com 22.600 km<sup>2</sup>, totalizando aproximadamente uma área de 55.500 km<sup>2</sup>.

Do ponto de vista geológico, a área estudada está inserida na região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (MVRPS), no Planalto Sudeste Brasileiro e de acordo com o descrito por Heilbron *et al.*, (2000 apud Eirado Silva, 2006), essa área está compreendida na parte central da Faixa Móvel Ribeira, ao sul do cráton de São Francisco. Na classificação proposta por Heilbron *et al.* (2000), a Faixa Ribeira é subdividida em cinco principais unidades tectônicas: Terrenos Ocidental, Oriental, Cabo Frio, e as duas que abrangem a região do MVRPS, que são os Terrenos Paraíba do Sul e Embu. Estas duas unidades apresentam predominantemente uma orientação Nordeste- Sudoeste. O grupo Paraíba do Sul é composto por gnaisses bandados com intercalações de xistos pelíticos, mármore e rochas calcissilicáticas, e o Complexo Embu é constituído por gnaisses xistosos com intercalações de quartzitos e também rochas calcissilicáticas (EIRADO SILVA, 2006).

A região compreende quatro compartimentos tectônicos, sendo um autóctone e três alóctones: o ciclo orogênico Brasileiro, durante as eras Neo-Proterozóico e Cambro-Ordoviciano, que foi marcado por forças de compressão e forças dúcteis responsáveis pela formação do cinturão móvel; outros dois ciclos marcados por forças extensivas e rúpteis. Estes dois últimos ciclos podem ser relacionados com a abertura do oceano Atlântico, pelas

margens passivas, que tiveram início no período Jurássico da era Mesozóica e ao rifteamento continental de idades Neocretácea e Paleogênica. Nestes compartimentos tectônicos estão incluídos três grupos litológicos: o embasamento (pré 1.8 G.a.), quando foi herdado a megasinformal do Paraíba do Sul; as rochas supra-crustais (pós 1.8 G.a.) e as rochas granitoides de idade pós-tectônica Brasileiro e colisionais (HEILBRON, 1995 *apud* COELHO NETTO, 2003). O sistema de rifteamento do sudeste brasileiro é caracterizado por diversos falhamentos rúpteis e subverticais que tiveram origem na tectônica cretácea-paleogênica. O médio curso do rio Paraíba do sul corre, principalmente, no gráben da principal falha normal (ENE) e muda seu curso para NW-SE (entre Floriano e Barra Mansa) onde corre sobre a chamada zona transtensional de Volta Redonda (COELHO NETTO, 2003)

Sobre os aspectos geomorfológicos do MVRPS, Avelar e Coelho Netto (1992) dividem a região em duas principais unidades geomorfológicas, a de colinas convexo-côncavas, com desnivelamentos inferiores a 200 m e a montanhosa escarpada, com variações acima da cota de 700 m. Esta última corresponde à escarpa Interior da Serra do Mar e a escarpa sul da Serra da Mantiqueira, onde dominam mecanismos de erosão gravitacional, como deslizamentos translacionais, fluxos detríticos e quedas de blocos, onde há uma maior declividade das encostas.

A unidade de colinas convexo-côncavas corresponde ao *graben* do Paraíba do Sul e está localizado entre estas duas Serras (Mantiqueira e do Mar), e apresentam comumente processos erosivos resultantes da exfiltração de água subterrânea, do tipo voçorocas. Neste domínio colinoso, os deslizamentos também são comuns devido ao efeito erosivo do escoamento fluvial e do descalçamento da base de taludes. Fonseca (2006) complementa e aponta também como causa do deslizamento nestes domínios, o avanço remontante das cabeças de canais por voçorocamento.

Com relação ao clima da região, tanto a precipitação quanto a temperatura média apresentam dois períodos contrastantes: um quente e úmido, que ocorre entre os meses de outubro a março, e um frio e seco, entre junho a agosto. Já a precipitação média mensal foi mensurada a partir da análise feita em dezoito estações pluviométricas localizadas no MVRPS entre o

período de 1970 a 1999, que apresentaram uma taxa média anual de 1700 mm. Existe, entretanto, uma diferença considerável entre os índices detectados em compartimento colinoso e montanhoso, apresentando valores de 1509 mm referentes ao primeiro e de 1996 mm no segundo, conforme levantado por Sato (2008). A temperatura média anual chega a 20,8 °C no domínio de colinas, enquanto no domínio montanhoso é de 18,2 °C (SATO, 2012).

O histórico de uso e cobertura do solo no MVRPS apresenta diferentes períodos de alterações no mosaico da paisagem que foram orientados pelos sucessivos ciclos econômicos. Atualmente, a silvicultura do eucalipto se configura como a atividade econômica que vem recebendo destaque nesta região. Dessa forma, estudos e discussões embasadas sobre o tema tornam-se cada vez mais relevantes, principalmente do ponto de vista dos impactos ambientais e das alterações na dinâmica hidro-erosiva, especificamente abordada neste trabalho, que esta atividade pode promover (Figura 10).

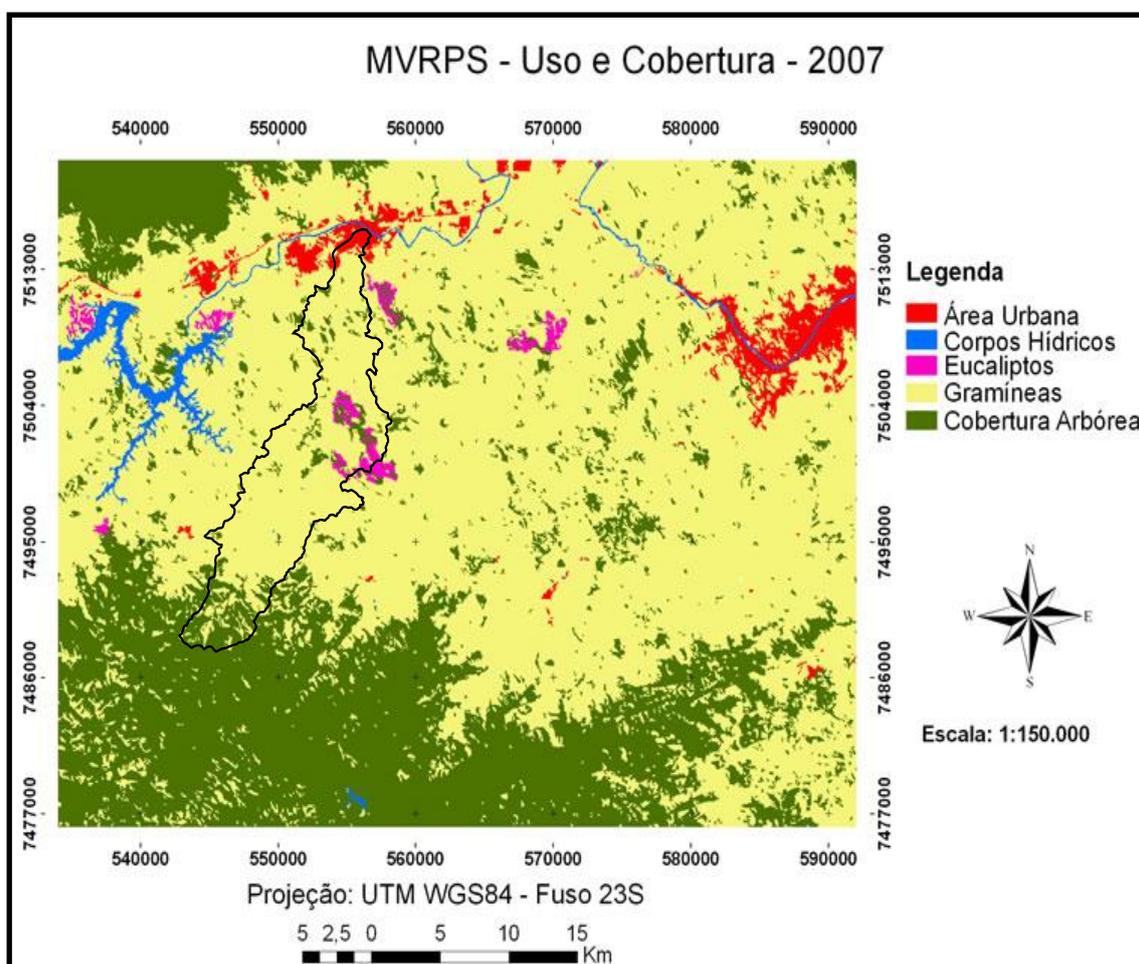


Figura 10: Mapa de uso e cobertura do médio vale do rio Paraíba do Sul. (Extraído de Vianna, 2007).

Ao longo do tempo geológico, esta paisagem foi modulada por diferentes períodos de estabilidade/ instabilidade erosiva. Coelho Netto (2003) descreve que a região do MVRPS pode ser caracterizada, essencialmente, por apresentar uma paisagem heterogênea, instável e que vem sendo submetida a mudanças de caráter ambiental cada vez mais rápida. A partir de datações absolutas realizadas em depósitos colúvio-aluvionares na bacia experimental do rio Bananal, foram identificados períodos de alta atividade hidro-erosiva em toda a extensão da área levantada durante aproximadamente 2 mil anos A.P., entre 10 Ka e 8 Ka A.P (da transição do período Pleistoceno para o Holoceno) marcado por mudanças climáticas de âmbito global, onde as condições no Sudeste brasileiro se tornaram mais quentes e úmidas (Dietrich et al., 1991; Coelho Netto et al., 1994; Coelho Netto, 1999). Posteriormente, os depósitos foram marcados por períodos de estabilidade, podendo ser relacionado com o desenvolvimento de floresta ombrófila densa (bioma Mata Atlântica) na paisagem, substituindo o bioma cerrado predominante anteriormente.

Com a inserção dos cultivos de café durante o século XVIII sobre áreas de floresta ombrófila, iniciou-se um novo ciclo de instabilidade destes pacotes quaternários (Figura 11), restando apenas poucos fragmentos florestais em domínio colinoso e algumas áreas mais contínuas em domínio montanhoso, onde a inserção da atividade cafeeira era naturalmente dificultada (Sato, 2012). Segundo Coelho Netto (1985), esta substituição de floresta Atlântica por plantios de café promoveu uma modificação em todo o sistema hidrológico que operava por meio de processos de infiltração e estocagem. Dantas (1995) aponta que a atividade cafeeira sobre as antigas áreas de floresta ombrófila resultou o aumento do escoamento superficial e, conseqüentemente, de altas taxas de erosão.

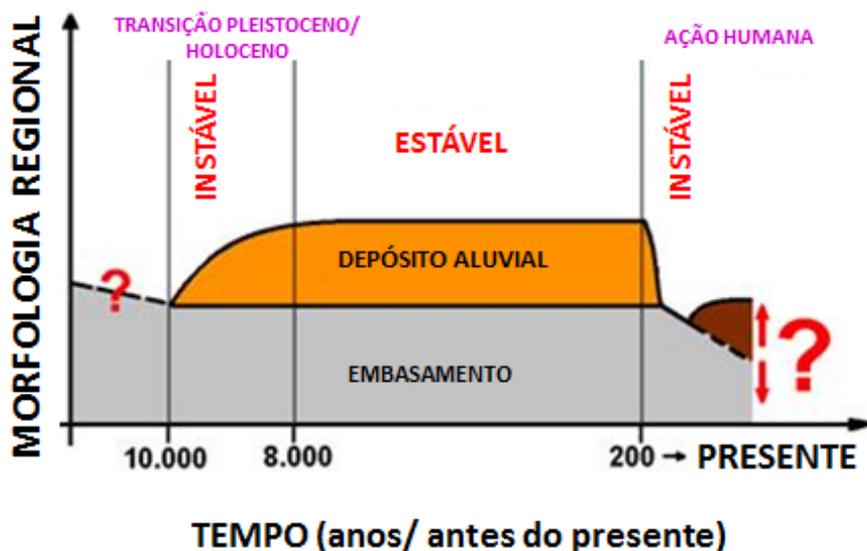


Figura 11 – Evolução regional do relevo na transição quaternária entre o Pleistoceno-Holoceno (dez mil a oito mil anos antes do presente), alternando períodos de instabilidade e estabilidade dos pacotes em resposta a mudanças climáticas globais e, mais recentemente, em função de alterações por ação humana (adaptado de COELHO NETTO, 1999).

Devido a implementação da atividade cafeeira na região, o aumento da erosão das encostas pode ser associado com uma maior carga de sedimentos disponível nos canais fluviais. O estudo de Dantas e Coelho Netto (1995) mostrou que a taxa de sedimentação da bacia do rio Piracema – um dos afluentes do rio Bananal – na transição Pleistoceno-Holoceno era de aproximadamente  $1.485 \text{ m}^3/\text{km}/\text{ano}$ . Já a taxa correspondente do período de atividade cafeeira era mais que o dobro, da ordem de  $3.737 \text{ m}^3/\text{km}/\text{ano}$ . O aumento do escoamento superficial nas encostas e da carga de sedimentos pode ser entendido como a principal razão da incisão vertical dos principais rios coletores, refletindo na abertura de faces de exfiltração de água em complexos de rampa, iniciando o surgimento de voçorocas (Coelho Netto, 1999). Sato (2012) complementa que a ascensão regional do nível d'água subterrâneo e a degradação do fundo dos canais fluviais poderiam contribuir, de forma conjunta, para a iniciação dos processos de voçorocamento.

Posteriormente, foi verificado durante o século XX o avanço progressivo do modelo de pecuária extensiva em antigas áreas de cultivo cafeeiro. Estas alterações promoveram, por sua vez, outras implicações no sistema hidrológico da região, principalmente devido às descontinuidades hidrológicas verificadas na base das raízes das gramíneas, do gênero *Brachiaria*, utilizadas como pasto

nesta área. Além disso, Deus (1991) demonstrou em seu estudo como a atuação das formigas saúva favorece na formação de uma zona saturada suspensa na base dos depósitos quaternários, na medida em que é criada uma densa rede de dutos subterrâneos, que chegam a um raio de até 500 m da parte central do formigueiro, aumentando a velocidade do escoamento subsuperficial nestes locais de grande permeabilidade, podendo até mesmo gerar exfiltração nos dígitos das voçorocas.

Sobre estes processos de exfiltração, um levantamento no ano de 2005 feito por Leal (2009) na bacia do rio Piracema, afluente do rio Bananal, mostrou que grande parte das voçorocas mapeadas (total de 128) estavam conectadas da rede de drenagem (87%), já 13% se encontravam desconectadas (Figura 12). Dentre estas voçorocas mapeadas, 28% estavam em fase ativa, enquanto 72% encontravam-se inativas.

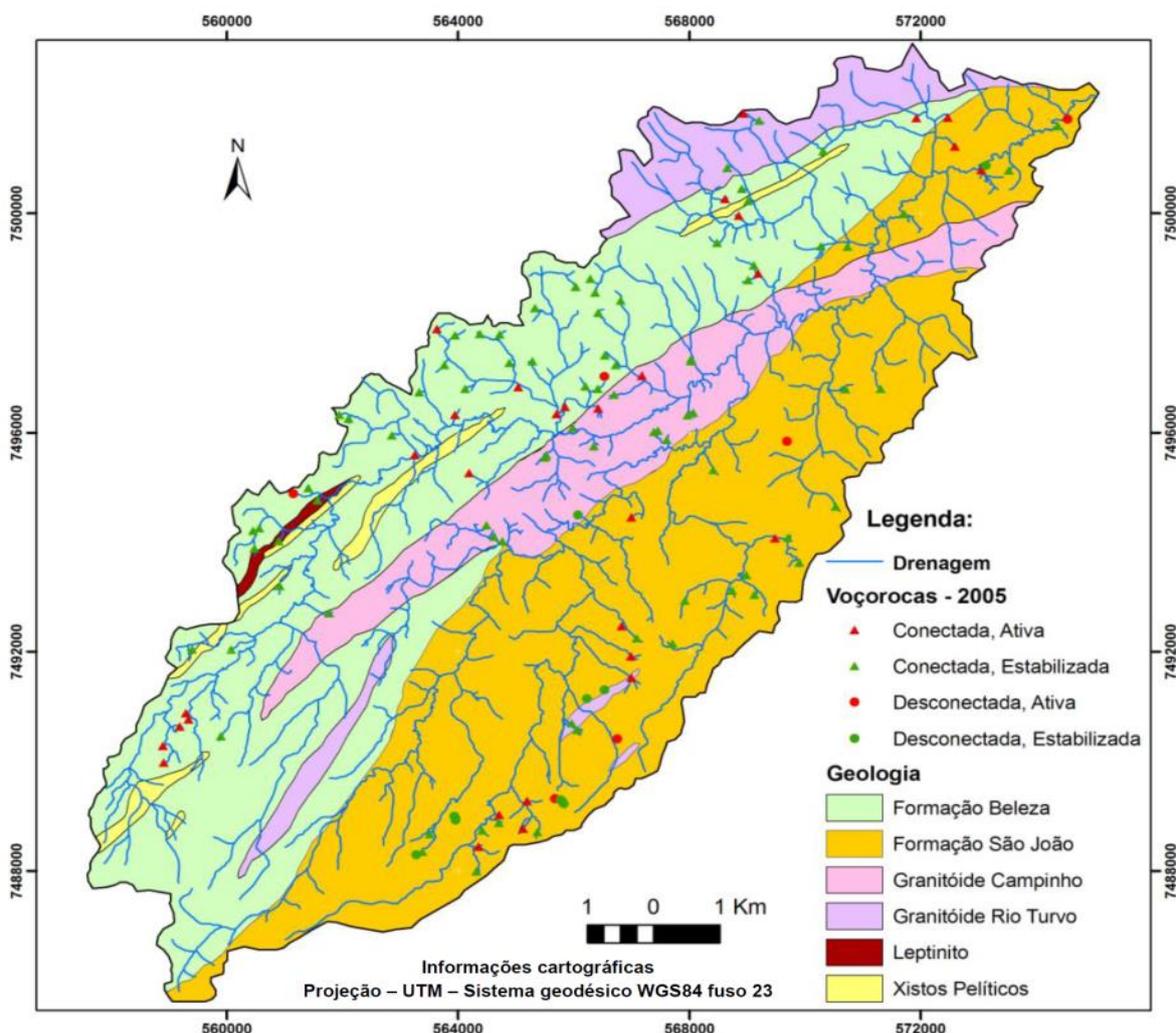


Figura 12– Levantamento das voçorocas na bacia do rio Piracema, principal afluente do rio Bananal, para o ano de 2005 (extraído de LEAL, 2009).

Em um estudo anterior feito por Cambra (1995) a partir do levantamento de fotografias aéreas do ano de 1973 (USAF) não mostrou diferença significativa nos percentuais em comparação ao estudo realizado por Leal (2009). Foram verificadas que 29% das voçorocas estavam em fase ativa e 88% conectadas à rede de drenagem, embora não se possa afirmar que as voçorocas teriam sido estabilizadas. Ainda de acordo com Leal (2009), a bacia apresentava uma densidade de voçorocas da ordem de 0,93 voçorocas por hectare, relacionadas principalmente com a litologia do tipo Granitóide Campinho, chegando a apresentar uma densidade na ordem de 1,22. Com relação à litologia e o desenvolvimento destas voçorocas, verificou-se que existe um aumento na velocidade de incisão tanto vertical quanto horizontal quando estas atingem o saprolito já que este não possui muita coesão, facilitando o desenvolvimento remontante de canais (ROCHA LEÃO, 2005).

Outra relação que deve ser levada em conta quanto a evolução das voçorocas, é que não necessariamente a água subterrânea coincide com os divisores topográficos da bacia, como aponta Coelho Netto (2003) e Leal (2009), o que justificaria também a evolução destes canais mesmo estando bastante próximos aos divisores de drenagem, indicando a possibilidade de pirataria de água subterrânea. A Figura 13 mostra o histórico de uso e cobertura do Médio Vale do Paraíba do Sul de forma didática, configurado pelas sucessivas alterações acompanhadas de ciclos econômicos diferenciados. Atualmente verifica-se a expansão dos plantios de eucalipto sobre as antigas áreas de pastagem degradadas, que de acordo com Sato (2012) se diferencia por possuir uma extensa área de influência para suprir a demanda de matéria prima das fábricas localizadas às margens do rio Paraíba do Sul a partir de fazendas produtoras próximas.

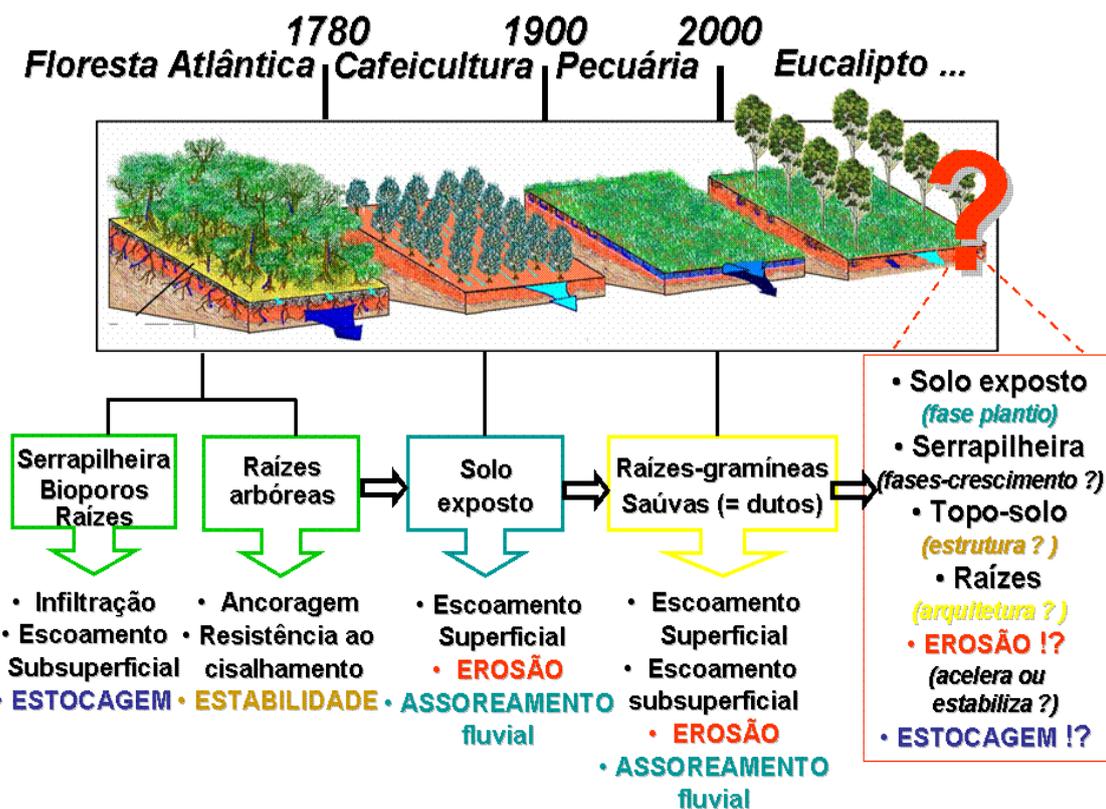


Figura 13: Esquema do histórico de uso e cobertura do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (extraído de Sato, 2008).

Assim como as outras atividades, entretanto, a silvicultura do eucalipto produz alterações de caráter econômico, social e ambiental, sendo este último o foco deste trabalho.

#### 4.2 - Bacia do rio Sesmaria

A bacia do rio Sesmaria está situada no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, localizada na fronteira entre os estados de Rio de Janeiro e São Paulo, apresentando uma área correspondente de 149 km<sup>2</sup> (Figura 14). Quanto aos seus aspectos geomorfológicos, a bacia apresenta um desnivelamento topográfico da ordem de 1695 m - 400m da cota mais baixa e 2095 m na mais alta - e é dividida em dois principais compartimentos: o domínio colinoso (inferiores a 600 m) e o montanhoso (acima de 600 m).

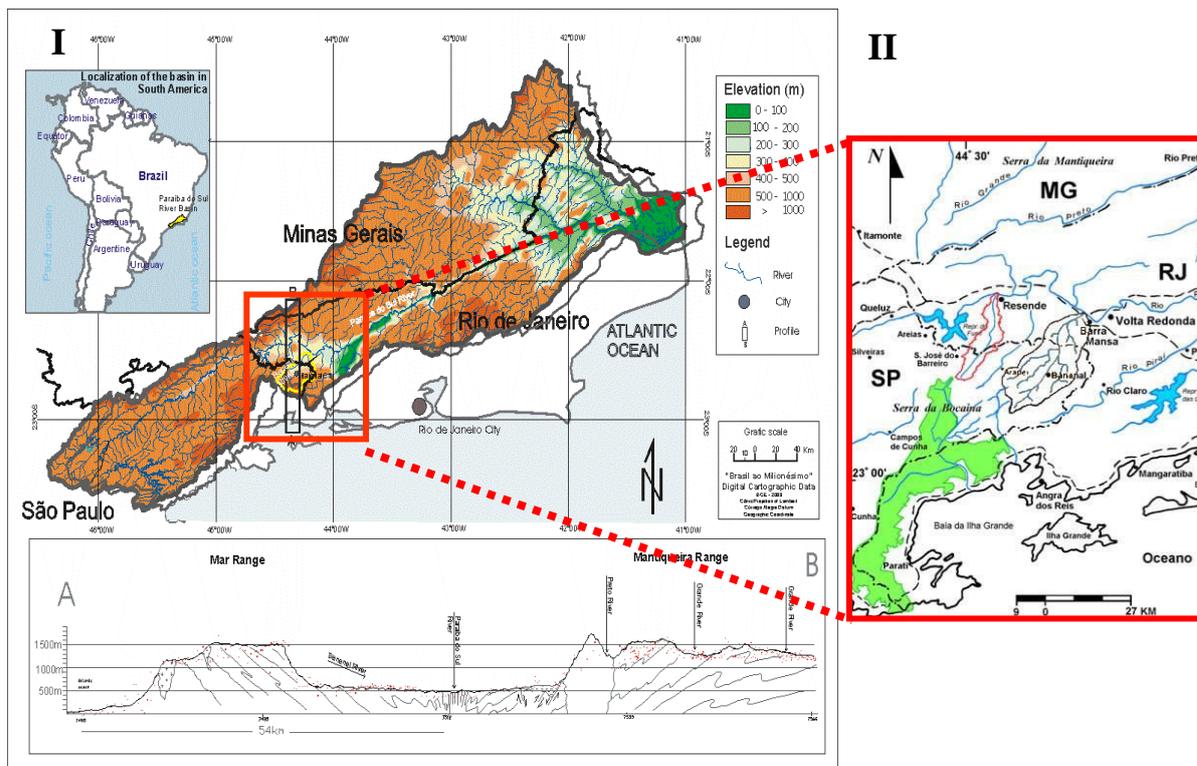


Figura 14 – (I) Localização da área de estudo: bacia rio Paraíba do Sul e perfil topográfico na seção A-B (UAGODA, 2006); (II) Em vermelho, bacia do rio Sesmaria e em preto, a bacia do rio Bananal; (*adaptado* SATO, 2008).

Nesta bacia, também pode ser encontrado vetores de expansão da silvicultura do eucalipto, que vem crescendo na paisagem do MVRPS e, segundo Vianna *et al.* (2007), representa 3,1% da área total da bacia do rio Sesmaria. Estes plantios estão concentrados no domínio colinoso enquanto os fragmentos de floresta Atlântica, que juntos correspondem a 31,7% da área da bacia, estão localizados principalmente no compartimento montanhoso. Segundo Sato (2012) a matriz da paisagem desta bacia, assim como o encontrado por todo o MVRPS, é de gramíneas destinadas à pecuária extensiva, totalizando 63,5% da sua área, e apenas 1,6% corresponde a áreas de ocupação urbana (Figura 15).

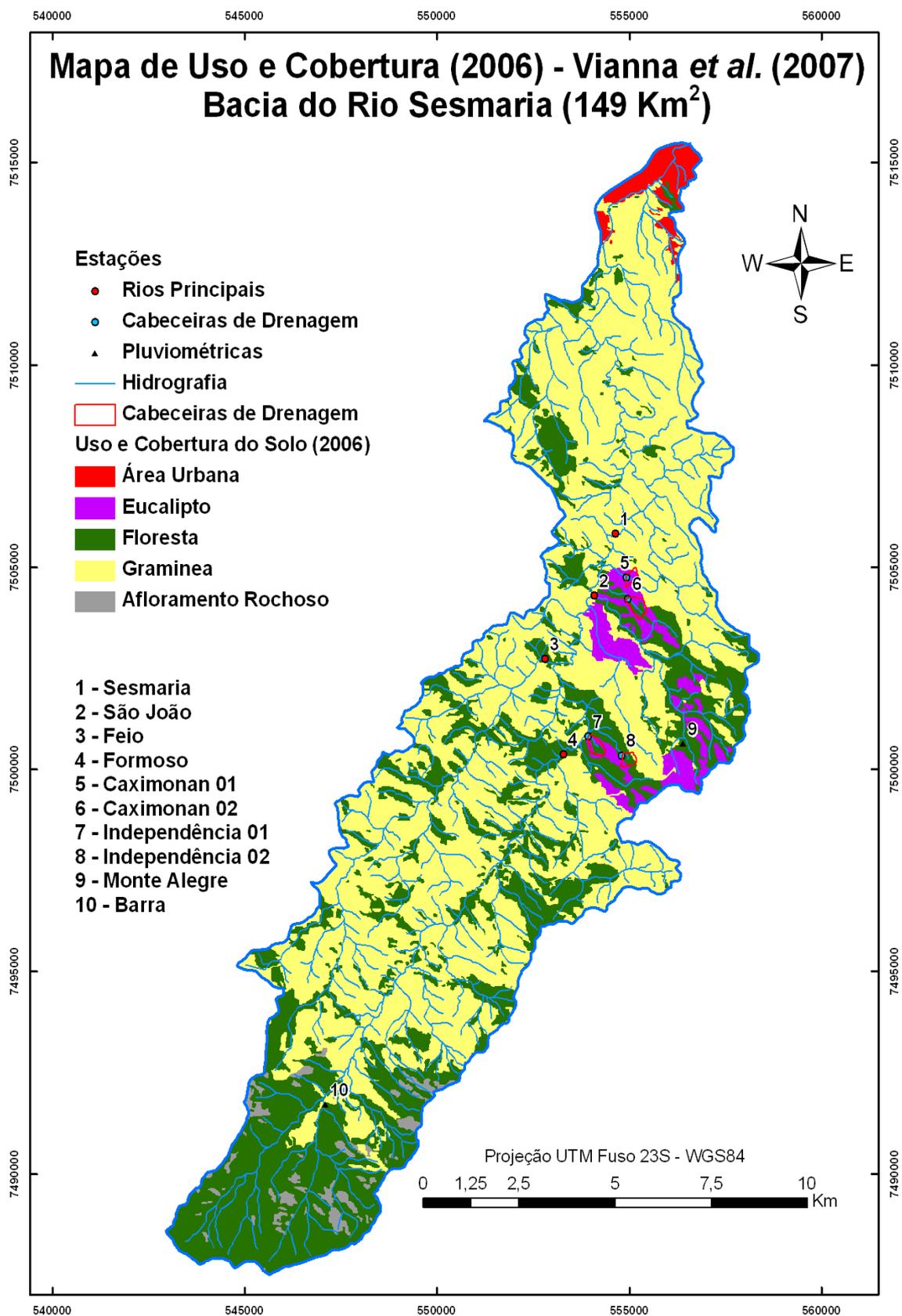


Figura 15: Mapa de uso e cobertura da bacia do rio Sesmaria em 2007. (Vianna et al. 2007)

Sobre os aspectos geológicos, a bacia apresenta predominantemente rochas com orientação nordeste-sudoeste do Complexo Embu e Taquaral, além da Suíte Campo Alegre, todos de idade Pré-Cambriana. Os rios que drenam a escarpa interior da Serra do Mar, dentre eles o rio Sesmaria, são fortemente controlados pela herança geológica (*strike*) das rochas, além das fraturas e falhas. No caso do rio Sesmaria, é predominante a orientação NE seguindo este *strike*, sendo as mudanças abruptas em seu médio-baixo curso associadas a falhas que sofre duas inflexões para NW antes de chegar à Bacia Sedimentar de Resende (EIRADO SILVA, 1993).

A área específica do trabalho está inserida nesta bacia experimental do rio Sesmaria, que apresenta quatro estações de monitoramento em cabeceiras de drenagem com plantios de eucalipto da empresa FIBRIA, a Fazenda Caximonan 01 e 02 e Independência 01 e 02. Esta bacia vem sendo monitorada desde 2009 pelo estudo de Sato (2012) onde foram instalados vertedores para medir a cota e vazão dos principais canais desta bacia além do monitoramento pluviométrico em duas estações de forma automatizada - Fazenda Caximonan 02 e Independência 02 – e poços em todas as quatro estações para o acompanhamento da água subterrânea.

Na fazenda Itamarati, localizada na vertente oposta da fazenda Caximonan, é realizado atividades de campo e monitoramento de duas voçorocas (Figura 16). Compreende uma propriedade onde é desenvolvida atividade pecuária nos moldes do MVRPS, apresentando uma matriz de gramínea do gênero *Brachiaria*. O histórico de uso da terra nesta fazenda segue o ciclo descrito de substituição direta da floresta Atlântica por gramíneas destinadas à atividade pecuária.



Figura 16: Localização das duas voçorocas na fazenda Itamarati, na vertente oposta da fazenda Caximonan.

## **5) PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

### **5.1) Pré-levantamento de dados e elaboração da base digital**

Para a análise temporal da evolução das duas voçorocas, foram coletadas previamente fotografias aéreas e imagens orbitais a fim de criar um histórico com diferentes fases de desenvolvimento, tendo assim um panorama dos momentos de atividade e estabilidade destes processos. As ortofotos obtidas são relativas a um levantamento aéreo do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE no ano de 2004.

As ortofotos podem ser caracterizadas como fotos corrigidas das deformações presentes na fotografia aérea. Essas deformações são comuns devido a própria projeção cônica da fotografia e das variações altimétricas do relevo em relação a rota do voo de levantamento, que produzem diferentes escalas. A principal diferença entre a ortofoto e a fotografia aérea se dá pela conversão de projeção. Na fotografia aérea a projeção é cônica, já a ortofoto é obtida a partir da conversão em uma projeção ortogonal, e das correções de deformações do relevo com base em determinados parâmetros, obtidos através da aerotriangulação e em pontos de controle para sua orientação. A partir da ortofoto é possível medir com precisão distâncias, áreas, ângulos dos elementos que a compõe, assim como vetorizá-las. As ortofotos utilizadas foram 2743-1 NO e 2743-1 SO (Figura 17).

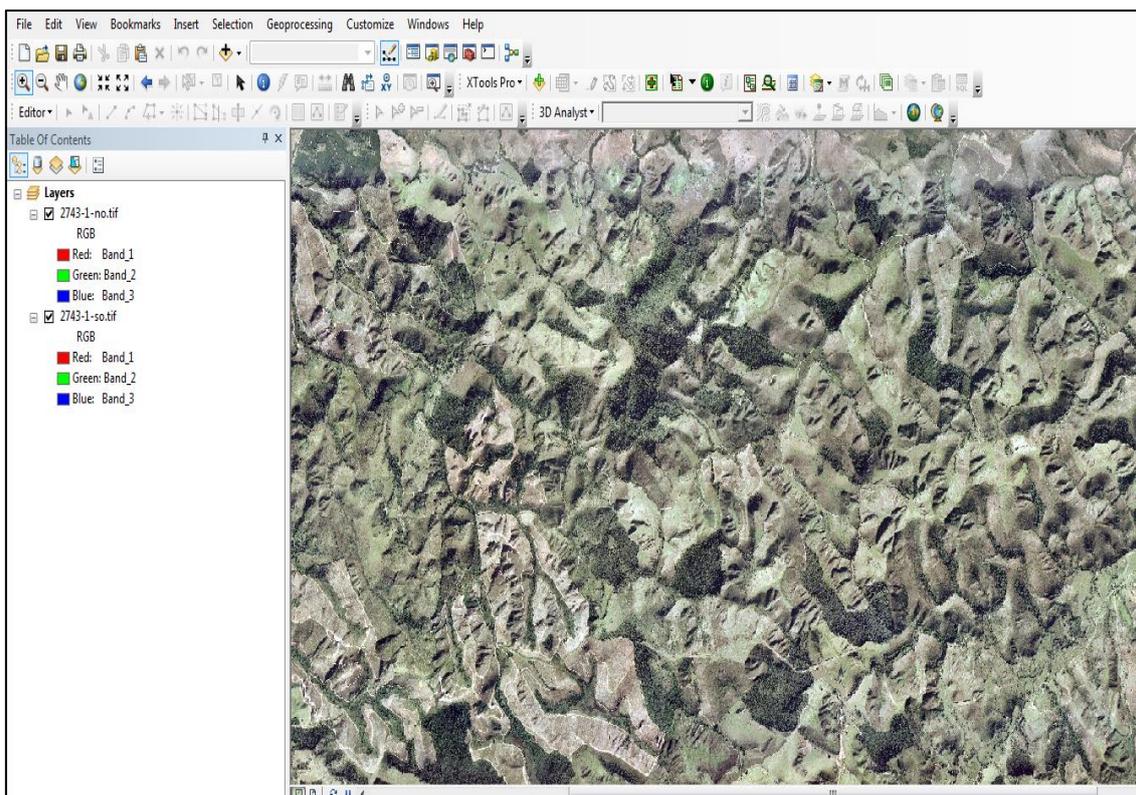


Figura 17. Ortofotos 2743-1 NO e 2743-1 SO feitas a partir do levantamento do IBGE em 2004. Imagem extraída do software ArcGis 10.

As imagens orbitais utilizadas foram da Ikonos (07/02/2003), Geoeye (21/08/2010), DigitalGlobe (12/12/2011) e CNES/ Astrium (05/02/2014) disponíveis no programa Google Earth e imagem QuickBird referente ao ano de 2012 disponibilizada através de uma parceria com Crescente Fértil através do Projeto Sesmaria. É importante pontuar que essas imagens foram utilizadas apenas como parâmetro qualitativo para analisar o desenvolvimento das voçorocas. A estimativa das taxas, a mensuração da expansão, foi realizada com base nos levantamentos feitos em campo utilizando uma estação total. A estação total (ou Taqueômetro) trata-se de um instrumento eletrônico que permite a medição de ângulos e distâncias de pontos em campo, que a partir dos princípios de trigonometria, podem ser usados para calcular e determinar as coordenadas das posições (X, Y e Z) destes pontos examinados com precisão, ou a posição do instrumento com relação a pontos já conhecidos, como foi utilizado especificamente neste trabalho para levantamento do desenvolvimento destas erosões.

Para a análise quantitativa das taxas de evolução das voçorocas, foram realizadas campanhas a campo com o objetivo de levantar informações sobre o atual estágio de desenvolvimento. As duas voçorocas, localizadas na Fazenda Itamarati, tiveram o perímetro delineado em diferentes períodos: Abril e Maio de 2012, Janeiro e Agosto de 2013, Janeiro e Julho de 2014.

Para a preparação da base digital, o marco geodésico do IBGE mais próximo (SAT 93652), localizado no centro da cidade de Bananal/SP cerca de 18 Km, foi transposto para quatro marcos permanentes (MP) na Fazenda Itamarati em Agosto de 2011, utilizando os receptores GNSS L1/L2 da Trimble R6 e a técnica do posicionamento relativo estático. Nesse tipo de posicionamento, tanto o receptor da estação referência quanto o da estação com coordenadas a determinar, permanecem estacionários durante todo o levantamento, sendo que a duração do levantamento varia de 20 minutos até várias horas. Os levantamentos realizados em linhas de base com comprimento inferior a 10 km, cujos receptores estejam estacionados em locais onde não haja ocorrência de obstrução e sob condições ionosféricas favoráveis, 20 minutos são suficientes para se conseguir solução das ambigüidades com receptores de simples freqüência. Esta situação se modifica conforme as condições de localização das estações e com o aumento do comprimento da linha de base. No caso de linhas de base maiores que 10 km, como no caso do marco de Bananal até a área de estudo, é recomendado a utilização de receptores de dupla freqüência, bem como a utilização de efemérides e do erro do relógio do IGS. A precisão conseguida com esta técnica de posicionamento varia de 0,1 a 1 ppm (MONICO, 2000).

Com base nesses parâmetros, o intervalo de aquisição dos dados foi configurado para cada 1 segundo e o rastreamento de duração programado para 2 horas em cada um dos quatro marcos, para uma maior precisão da coordenada. Os pontos foram processados pelo próprio software da Trimble, na projeção UTM Fuso 23S e datum WGS 84. A precisão X, Y e Z dos pontos foi de aproximadamente 2 centímetros.

Tabela 1 -Georreferenciamento dos marcos permanentes (MP)

Estação	Condição	X (m)	Y (m)	h (m) <sup>1</sup>	H (m) <sup>2</sup>	Projeção / Datum
SAT 93652	Base	569635,520	7491439,556	445,730	449,720	UTM 23S WGS84
Marco 01	Rover	555365,136	7504288,611	620,672	624,482	UTM 23S WGS84
Marco 02	Rover	555392,708	7504567,448	584,142	587,952	UTM 23S WGS84
Marco 03	Rover	555547,870	7504446,196	551,555	555,365	UTM 23S WGS84
Marco 04	Rover	555762,764	7504266,148	592,173	595,983	UTM 23S WGS84

Pontos transpostos da base de Bananal/SP, SAT 93652. <sup>1</sup> h: elevação elipsoidal/geométrica,

<sup>2</sup> H: elevação geoidal/ortométrica (Correção feita pelo MapGeo 2000)

Para obter uma melhor visada dos limites dos dígitos e do canal principal da voçoroca, outras quatro campanhas de campo foram realizadas em Abril e Junho de 2012, e Janeiro. Foram fixados 20 marcos temporários (MT), feitos em estacas de madeira e também georreferenciados como apresentado na Tabela 2. Para os marcos temporários (MT) foram utilizados receptores GNSS L1 modelo Astech ProMark 2 com a mesma técnica de posicionamento relativo estático, e programado para rastrear durante trinta minutos em cada ponto (Figura 18). Neste levantamento, os quatro marcos permanentes (MP), já georreferenciados na campanha de campo pretérita, serviram como estações de base para os pontos dos marcos temporários.

Tabela 2 - Georreferenciamento dos marcos temporários (MT).

Pontos	Descrição	X (m)	Y (m)	h <sup>1</sup> (m)	H <sup>2</sup> (m)	Projeção/Datum
MT01	Marco Temporário	555788,157	7504317,540	583,412	587,222	UTM 23S WGS84
MT02	Marco Temporário	555762,744	7504412,129	538,293	542,103	UTM 23S WGS84
MT03	Marco Temporário	555733,501	7504464,500	524,550	528,360	UTM 23S WGS84
MT04	Marco Temporário	555759,138	7504464,626	528,876	532,686	UTM 23S WGS84
MT05	Marco Temporário	555748,651	7504543,984	524,451	528,261	UTM 23S WGS84
MT06	Marco Temporário	555744,118	7504592,437	524,470	528,280	UTM 23S WGS84
MT07	Marco Temporário	555643,197	7504460,584	526,947	530,757	UTM 23S WGS84
MT08	Marco Temporário	555574,159	7504436,416	546,410	550,220	UTM 23S WGS84
MT09	Marco Temporário	555252,306	7504638,201	609,959	613,759	UTM 23S WGS84
MT10	Marco Temporário	555360,841	7504747,340	578,567	582,367	UTM 23S WGS84
MT11	Marco Temporário	555435,367	7504665,603	560,180	563,990	UTM 23S WGS84

<sup>1</sup> h: elevação elipsoidal/geométrica, <sup>2</sup> H: elevação geoidal/ortométrica

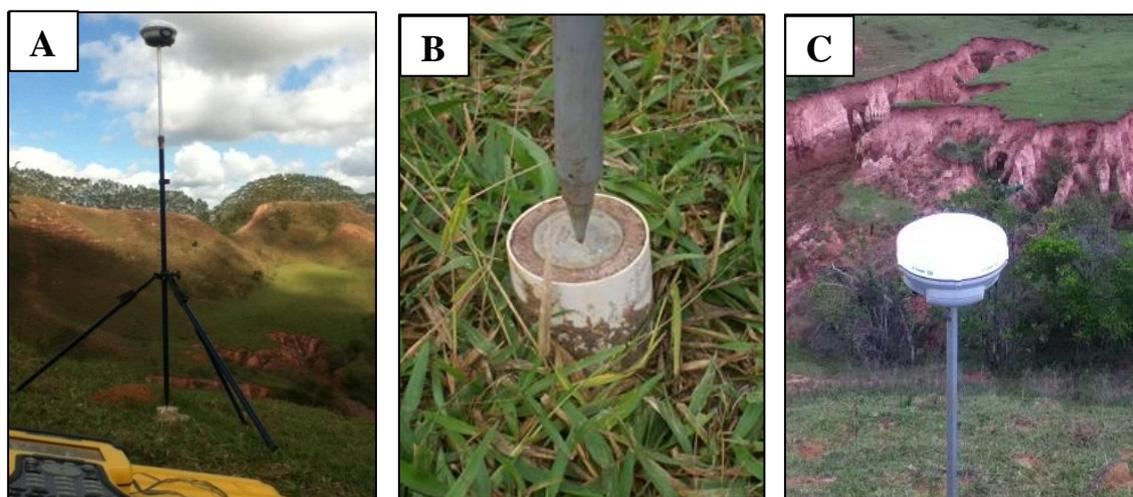


Figura 18 - A) Receptor GPS Trimble R6 B) Marco Permanente (MP); C) Detalhe da voçoroca 01 ao fundo.

O perímetro das voçorocas foi delimitado utilizando uma Estação Total Trimble modelo 3302 DR e modelo S3. A estação foi colocada na rede de marcos permanentes e temporários georreferenciados (Figura 19) e, para uma maior precisão do contorno das voçorocas, os prismas foram posicionados a cada dois metros fechando um polígono para cada voçoroca em diferentes períodos de monitoramento conforme descrito anteriormente (Figura 20).



Figura 19. Marcos georreferenciados. Em verde, quatro marcos permanentes (MP), em amarelo, a posição dos vinte marcos temporários (MT) e em vermelho, a delimitação do divisor topográfico entre a Fazendas Caximonan (FIBRIA) e Itamarati.



Figuras 20 – Levantamento do perímetro da voçoroca 02 e voçoroca 01 com a utilização de estação total Trimble a partir da rede de marcos permanentes e temporários com leitura do prisma a cada 2 metros.

Com o levantamento em campo do perímetro das duas voçorocas realizadas em Abril e Maio de 2012 foi possível estabelecer um histórico da evolução e desenvolvimento a partir da comparação destes contornos com o levantamento do perímetro em ortofotos e imagens de sensores orbitais disponíveis em anos pretéritos. O levantamento das voçorocas com a estação total foi organizado em planilhas no Excel 2010 e os pontos com as coordenadas foram plotados no software ArcGis, versão 10 (Figura 21). Dessa forma os polígonos com a delimitação dos contornos das duas voçorocas foram posteriormente projetadas e comparadas qualitativamente com as ortofotos e as imagens orbitais.

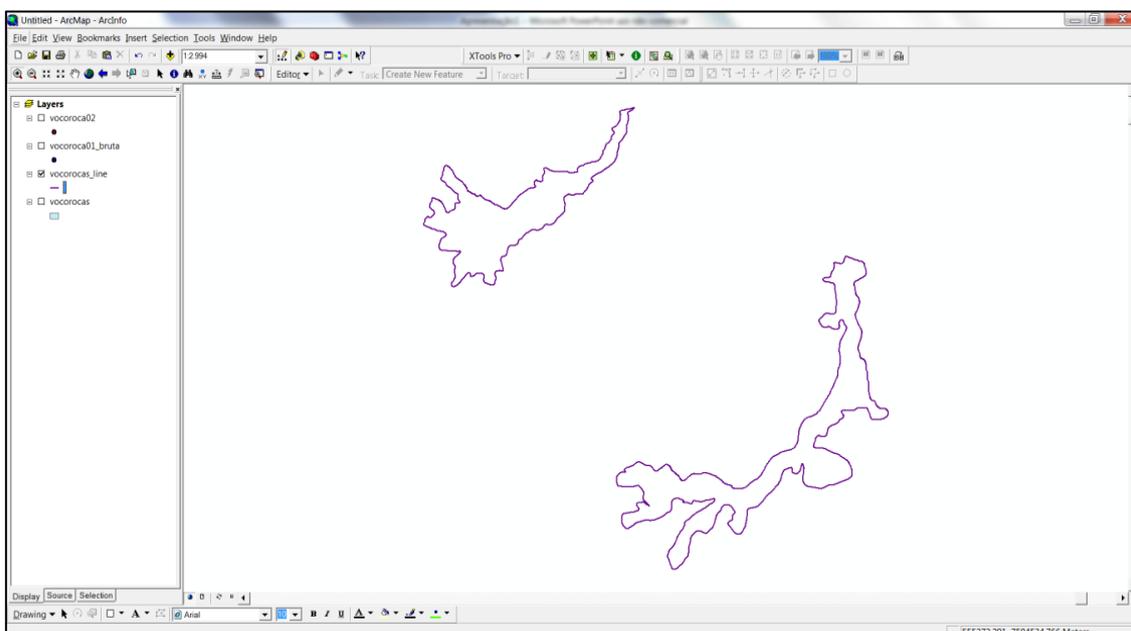


Figura 21 – Perímetro das voçorocas no ArcGIS.

## 5.2) Avaliação qualitativa e quantitativa da expansão das voçorocas

A partir deste conjunto de fotografias e imagens orbitais coletados de períodos distintos, foi realizada uma estimativa qualitativa temporal da atividade destas voçorocas. Embora as imagens orbitais não tenham sido ortorretificadas, dando assim uma estimativa de baixa precisão, foi verificado um ajuste entre a sobreposição do levantamento em campo realizado em 2012 com as imagens Ikonos, Geoeye dos anos de 2003 e 2010, respectivamente, e com as imagens QuickBird de 2012 e CNES/ Astrium de 2014, que serviram como base para uma avaliação qualitativa do desenvolvimento destes canais erosivos.

Para a estimativa quantitativa das taxas de recuo das cabeças dos dígitos das voçorocas, foram considerados os levantamentos em campo do perímetro das voçorocas realizadas em Abril e Maio de 2012, Janeiro e Agosto de 2013, e Janeiro e Julho de 2014. A partir da sobreposição destes contornos no software ArcGis 10, foi calculada através da ferramenta *Calculate Geometry* a diferença das áreas dos dígitos e a taxa linear de recuo das cabeças dos dígitos (Figura 22).

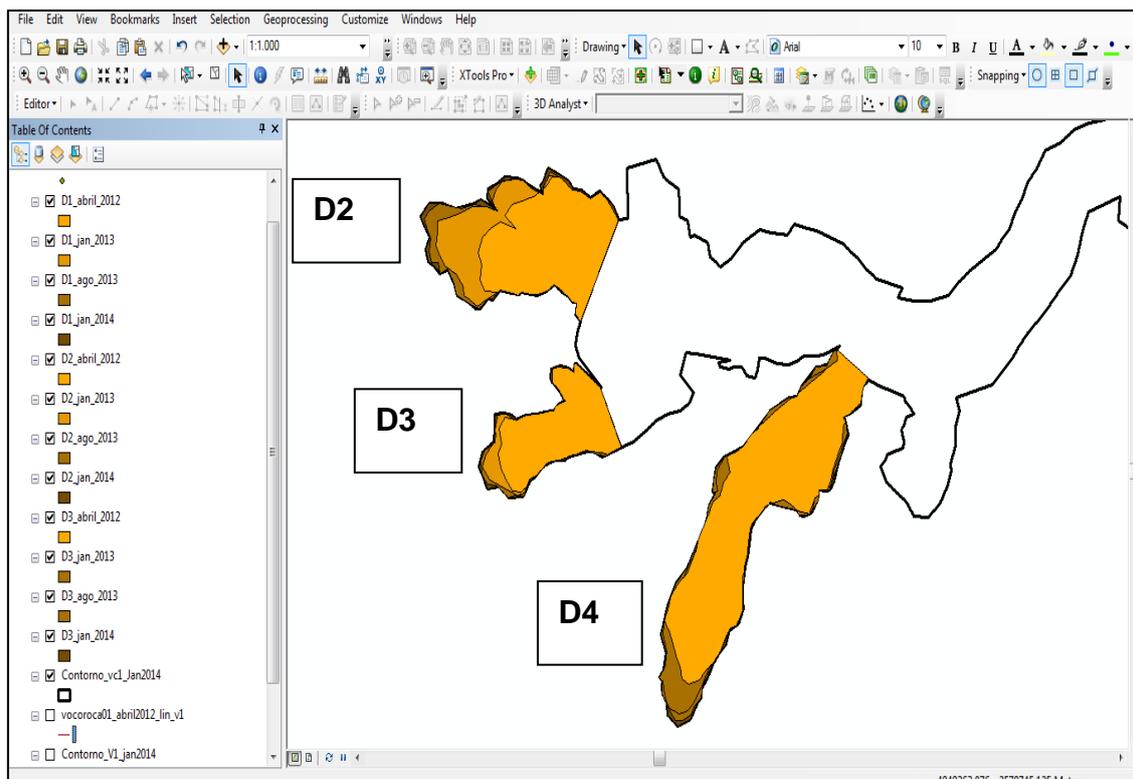


Figura 22: Cálculo da área dos dígitos da voçoroca 01 (fundo de vale). Nota-se a sobreposição das áreas dos dígitos a partir do levantamento do contorno em cada período conduzido em campo com auxílio da Estação Total. (Imagem extraída do ArcGis 10).

Tendo por base a comparação das fotografias aéreas com as imagens orbitais e também do levantamento e das observações feitas em campo, foi possível obter um histórico do comportamento destas voçorocas, pré e pós os plantios de eucalipto, no que diz respeito aos períodos de atividade/ estabilidade e de desenvolvimento. Dessa forma, foram avaliadas as possíveis relações entre os processos erosivos por água subterrânea com a introdução da silvicultura do eucalipto nesta área.

### 5.3) Monitoramento da zona não-saturada em áreas com e sem presença de eucalipto a partir de sensores de sucção.

Foram instalados em campo três (3) estações para o monitoramento da sucção do solo em áreas adjacentes sob domínio de pastagem e eucalipto. As estações foram instaladas da seguinte forma: 1) dentro do plantio de eucalipto; 2) na encosta adjacente ao plantio, porém com cobertura de gramínea (*brachiaria*); 3) na gramínea, sem proximidade com plantio de eucalipto (Figura 23). As três estações foram dispostas de forma a manter a mesma distância do divisor de drenagem e também a mesma declividade, a fim de padronizar os dados a serem coletados e posteriormente correlacioná-los, comparativamente.

Dessa forma, pretende-se avaliar se os plantios têm alguma influência sobre a zona não-saturada em vales adjacentes com pastagem; além de avaliar também o comportamento da água no solo.



Figura 23: Localização das unidades de monitoramento com sensores de sucção. Em vermelho, os divisores de drenagem.

Para o monitoramento, foram utilizados sensores de matriz granular (GMS-*granular matrix sensor*) da Irrometer (modelo Watermak 200ss), que funcionam pelo princípio de resistência elétrica variável (Figura 24).



Figura 24: Granular matrix sensor (GMS), Watermark 200ss utilizado para monitoramento. Fonte: Irrometer Company Inc.

Estes sensores funcionam de modo análogo aos blocos de gesso, desenvolvidos inicialmente por Bouyoucos e Mick (1940). Estes autores afirmavam que em todos os solos a porcentagem de água disponível é aproximadamente a mesma para um dado valor de resistência, sendo as leituras de resistência nos blocos de gesso interpretadas em termos da água disponível no solo para as plantas (MOTA, 2014).

Segundo informações do fabricante (Irrometer Company Inc), o princípio de funcionamento do sensor Watermark 200ss compreende um dispositivo resistivo que responde à mudanças na umidade do solo. Uma vez que são instaladas no solo, ele permuta água com o solo circundante, ficando dessa forma em equilíbrio com ele. Trata-se de um condutor elétrico, indicando o estado relativo de umidade do solo. À medida que o solo seca, a água é removida do sensor e a medição da resistência aumenta. Por outro lado, quando o solo é novamente umedecido, a resistência diminui. O sensor de marca d'água é o único que leva a sua medição resistiva dentro de um material de matriz interna definida e consistente, em vez de utilizar o solo circundante como o meio de medição. Esta característica única permite ao sensor ter uma calibração estável e consistente. A relação de ohms de resistência para centibars (CB) ou quilopascal (kPa) de tensão de água no solo é constante e

incorporados nos dispositivos de leitura que são usados para interrogar o sensor, no caso deste trabalho o monitor 900M do mesmo fabricante foi instalado. O sensor é calibrado para relatar a tensão de água no solo ou potencial matricial. O sensor Watermark consiste em eletrodos em aço inoxidável embebido numa matriz granular interna definida e consistente que age como um solo na forma como ele se move água. Esta matriz é envolto em um material hidrofílico que estabelece boa condutividade hidráulica com o entorno do solo. Além disso, este equipamento não necessita de calibração no local ou manutenção de rotina.

De acordo com Evett *et al* (2008), o gesso que constitui a matriz porosa do sensor é feita com sulfato de cálcio, que é um sal fracamente solúvel, que se dissolve na água presente na porosidade do sensor, tornando-o condutor de água. Quanto mais água o sensor contiver, maior será a condutividade entre os eletrodos, ou seja, a resistência diminuirá à medida que aumentar o conteúdo de água no sensor (MOTA, 2014).

O modelo de *data logger* 900M (Irrrometer) foi utilizado para o armazenamento. Este dispositivo comporta até oito sensores, sendo um destes utilizado para monitorar a temperatura do solo. As sete profundidades determinadas para a instalação dos sensores de umidade estão descritas na tabela abaixo, tanto para as duas estações na área com pastagem quanto para a estação na área de eucalipto.

Tabela 3 – Profundidades monitoradas nas três estações.

EUCALIPTO	PASTAGEM 1	PASTAGEM 2
0,20	0,20	0,20
0,50	0,50	0,50
0,80	0,80	0,80
1,20	1,20	1,20
1,50	1,50	1,50
2,00	2,00	2,00
3,00	3,00	3,00

Para a seleção das profundidades (Tabela 3), foram levadas em consideração observações feitas em campo e estudos já desenvolvidos anteriormente (JANSEN, 2001; SILVEIRA, 2010; ACCIOLY, 2011; MOTA, 2014). As profundidades mais superficiais (0,20 m; 0,50 m e 0,80m) foram escolhidas para a instalação dos sensores por representarem a faixa onde ocorre o processo de infiltração. Além disso foi observado que as gramíneas ( gênero *Brachiaria*) neste local alcançam em média uma profundidade de 40 cm, corroborando com o levantamento feito por Cambra e Coelho Netto (1998), onde as gramíneas do mesmo gênero estudadas na bacia do rio Bananal indicavam que a maior concentração de biomassa de raízes estava nos primeiros 40 cm. Também foi levado em consideração a susceptibilidade às alterações das propriedades físico-hídricas do solo por mudanças na cobertura (gramínea e eucalipto), além de estarem mais propícias ao processo de evaporação. As maiores profundidades (1,20m; 1,50m; 2,00m e 3,00m) estão mais relacionadas ao sistema radicular do eucalipto, com intuito de analisar a percolação da água, onde a hipótese que se trabalha é que a raiz pivotante do eucalipto favoreça a percolação da água em maiores profundidades, como caminho preferencial.

A instalação dos sensores (Figura 25 e 26) foi realizada de acordo com as instruções do manual do equipamento e também como descrito por Mota (2014).



Figura 25: Instalação dos sensores de umidade.

De acordo com a autora (*op.cit.*), é importante que haja um contato perfeito entre o solo e o sensor. Para assegurar esta condição, o diâmetro do trado utilizado deve ser similar (de preferência o mesmo) do diâmetro do sensor *GMS*, criando dessa maneira um contato permanente entre a matriz do

solo e o sensor. Com isso, foram feitos furos com trado do tipo rosca (diâmetro de 3/4"), o que permitiu o ajuste do sensor com o solo em todas as profundidades (0,20m até 3,00m), tanto nas estações localizadas em gramíneas quanto dentro do plantio de eucalipto.

Os sensores foram instalados imediatamente após cada perfuração ser completada na profundidade estipulada, evitando que o solo cedesse. Com base nas instruções do fabricante, os sensores devem ser previamente umedecidos (saturados) em laboratório um recipiente com água e levados a campo para instalação em condição saturada. Durante a perfuração com o trado, o solo retirado deve ser colocado em um recipiente com pouca água e identificado com profundidade representada para posteriormente ser recolocado no furo como uma "lama", preenchendo novamente o perfil do solo (Figura 24). O objetivo é garantir que o solo retirado de certa profundidade seja preenchido pelo mesmo material, porém isto só é possível formando esta "lama", que o fabricante denomina como "*mud slurry*". É importante destacar que pelo motivo do equipamento ser instalado saturado, foram descartados os primeiros dois meses de monitoramento, por não representar a condição real de umidade do solo.

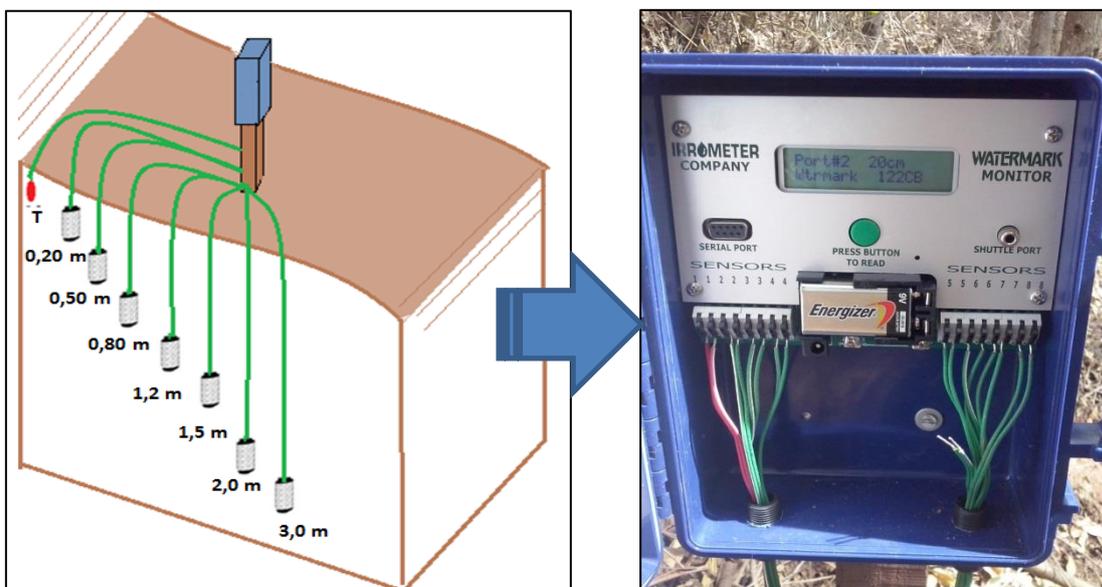


Figura 26: Esquema com as profundidades dos sensores instalados em campo.

A partir das amostras de solo coletadas com perfuração de trado, foi realizada análise granulométrica conforme o método da ABNT (NBR-7181), para caracterização dos perfis de solo em que foram instalados os sensores.

O monitoramento da precipitação foi diferenciado para as duas áreas. Dentro dos plantios de eucalipto, devido à variabilidade de interceptação verificado por Sato (2012), foram instalados quatro (4) calhas, sendo duas próximos aos troncos (PT) e duas entre as fileiras dos eucaliptos (ET), como ilustram as figuras 27-A e 27-B. Já para a área de pastagem, foi instalado uma estação meteorológica automática modelo U30 da HOBO (Figura 27-C). Os dados de precipitação foram necessários para correlacionar com os dados de umidade detectados pelos sensores de umidade.

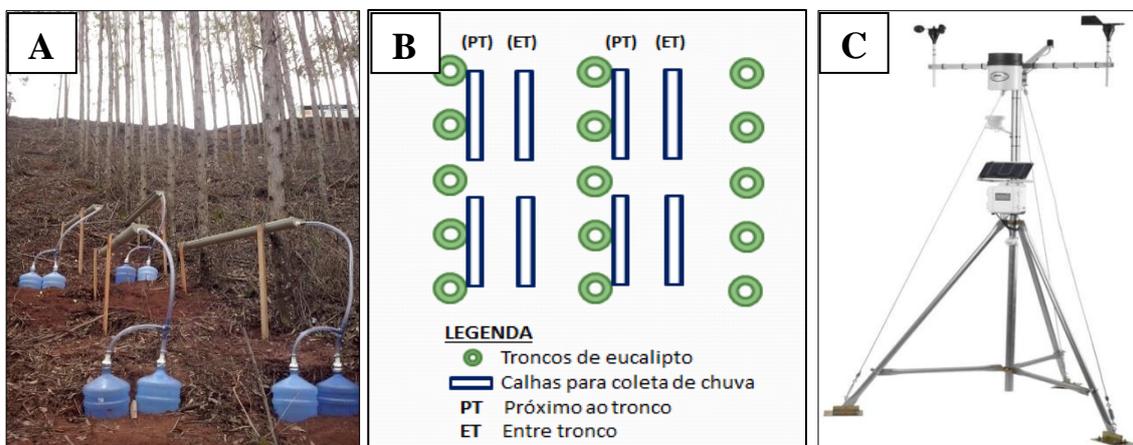


Figura 27: A) Calhas de coleta de chuva Próximas ao tronco (PT) e Entre Tronco (ET); B) Esquema de disposição das calhas; C) Estação meteorológica utilizada na área de pastagem.

#### 5.4) Monitoramento de poços e piezômetros

Buscando entender a dinâmica do lençol freático na área em questão, foram instalados poços e piezômetros na parte interna do canal de voçorocamento.

A instalação de poços e piezômetros dentro destes canais erosivos foi realizada através da perfuração com trado mecânico até a atingir o nível d'água (N.A.). Na voçoroca 2 (encosta) o piezômetro e poço instalado possuem

profundidade de 9,22 m e 7,75m, respectivamente. Na primeira medição realizada logo após a instalação, o nível d'água encontrava-se próximo dos 4,60 m em ambos, piezômetro e poço. Já na voçoroca 1 (fundo de vale), a profundidade total que se conseguiu a partir tradagem mecânica até atingir o N.A foi de 3,93 m.

Seguindo o método utilizado por Sato (2012) na instalação dos poços na Fazenda Caximonan (vertente oposta), foi depositado inicialmente no fundo do furo uma camada de areia lavada de aproximadamente 30 cm e, posteriormente, inserido um tubo de PVC de 4" ranhurado ao longo de sua extensão e envolto por uma tela geotêxtil a fim de reduzir a entrada de solo no interior dos tubos. Após a colocação dos tubos, o espaço entre o tubo e a parede do furo foi preenchida por areia lavada até aproximadamente 30 cm, a partir de onde o espaço restante foi preenchido com material selante feito de bentonita (Figura 28).

Para a instalação dos piezômetros, utilizou-se o modelo do tipo Casagrande, de acordo com as especificações da norma NBR 15495. Foi utilizado um tubo de PVC de 50 mm de diâmetro para a confecção do instrumento e um tubo de 100 mm para fazer o acabamento do furo na parte externo. No piezômetro foram feitas ranhuras na parte inferior do cano para a passagem de água. Essas ranhuras, como destaca Victorino *et al.* (2003) devem ser realizadas somente na parte inferior do cano, sendo essa uma das diferenças, em relação ao poço. Em torno das ranhuras, foi colocada uma tela geotêxtil, a fim de impedir a passagem de partículas de solo ou de areia do filtro.

Assim como a instalação do poço, nesse caso foi colocada uma camada de areia lavada no fundo do furo feito pela tradagem mecânica para servir como filtro. Com o tubo instalado dentro do furo, iniciou-se o preenchimento entre o cano e a parede do furo. Primeiro, colocou-se uma camada de areia lavada, para agir como filtro. Logo após, foi colocado a selagem com material impermeável (bentonita), com espessura suficiente para estabilizar o cano instalado. O próprio solo local escavado foi utilizado como material de preenchimento final (Figura 28 B e C).

Juntamente com o monitoramento dos poços e piezômetros, pretende-se avaliar também a distribuição da chuva durante este período, onde foi detectado a reativação destes processos.



Figura 28 – A) Desenho esquemático dos poços de monitoramento (extraído de Sato,2012). B) Detalhe do piezômetro e poço instalado na voçoroca 02; e C) Esquema representativo do piezômetro instalado na área (Silva, 2014).

## 6) RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 – Análise temporal das fotografias aéreas, imagens orbitais e levantamento de campo.

A partir dos levantamentos de imagens orbitais (2003, 2010, 2011, 2012 e 2014) e das fotografias aéreas (2004), assim como o levantamento do perímetro das voçorocas em campo (2012), foi possível analisar de forma qualitativa a evolução destas feições em momentos distintos, tendo como referencial a introdução de plantios de eucalipto no ano de 2004 pela empresa FIBRIA, na época Votorantim Celulose e Papel.

É importante destacar que as voçorocas atualmente ocupam e retrabalham áreas diferenciadas dos vales de cabeceira. A Voçoroca 01 ainda está restrita aos depósitos de fundo de vale (Figura 29), ao passo que os dígitos da Voçoroca 02 ocupam as encostas (baixa, média e alta encosta).

Com base em observações feitas em campo, foi verificado que a exfiltração de água subterrânea através de túneis erosivos (*piping*) localizados nos dígitos da Voçoroca 01 ocorre durante todo o ano, apresentando fluxo contínuo na sua base, mesmo em períodos de baixos índices pluviométricos. Na Voçoroca 02, a exfiltração também ocorre, porém esta se limita a parte inferior, a aproximadamente 20 m da confluência com o canal principal da Voçoroca 01.



Figura 29 – Voçoroca 01 (esquerda) retrabalhando os depósitos de fundo de vale (rampas). Voçoroca 02 (direita) avançando para alta encosta (próximo ao divisor de drenagem) (Fotos – Sato,2012).

Na imagem Ikonos relativa ao ano de 2003, foi verificado que a Voçoroca 01 apresentava características que indicavam uma situação de estabilidade, devido principalmente à presença de vegetação e ausência de solo exposto (Figura 30). Já a Voçoroca 02 encontrava-se em condição ativa, entretanto a cabeça do canal principal estava ainda restrita ao fundo de vale e média encosta (exceto no dígito 1 – D1). As duas imagens abaixo mostram as duas voçorocas no ano de 2003 e o contorno em vermelho realizado no ano de 2012 apontam a sua expansão.

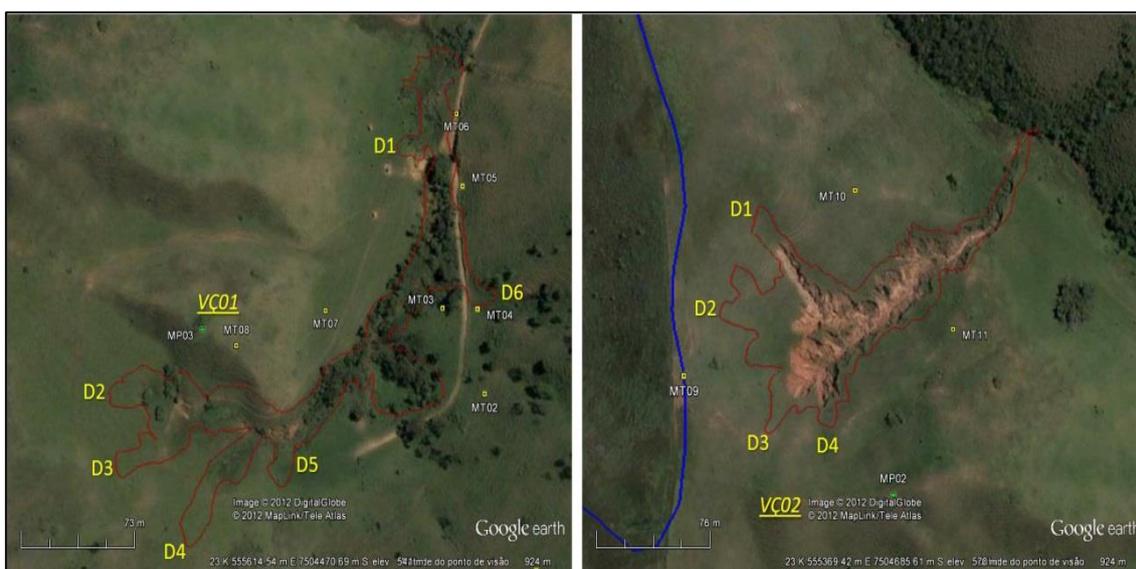


Figura 30 – Situação da Voçoroca 01 (esquerda) e da Voçoroca 02 (direita) no dia 07/02/2003 (imagem Ikonos). O contorno em vermelho delimita as voçorocas no ano de 2012.

Através da fotografia aérea do IBGE relativa ao ano de 2004, mesmo ano da introdução de eucaliptos na vertente adjacente, observa-se que estes plantios estão em estágio inicial (Figura 31). Nota-se nesta fotografia com panorama geral da área, que as cabeças destes canais recuam seguindo a morfologia do terreno de uma forma pretérita.



Figura 31 – Panorama completo da área de estudo em 2004 (fotografia aérea IBGE), com o início dos plantios de eucalipto na vertente oposta às voçorocas. A linha em vermelho delimita o divisor e a exportação de sedimentos está indicada pela seta vermelha (modificado de Sato, 2012).

Nesse período a Voçoroca 01 apresentava características que permitiram avaliar o início de uma reativação. Pode ser observado também pela morfologia (figura 32), a pré-existência de um canal na mesma área onde a voçoroca está localizada, porém as bordas ainda bastante convexas indicam uma estabilidade da mesma. Assim como a imagem Ikonos de 2003, a Voçoroca 02 permanecia em situação ativa, sendo que a cabeça do canal ainda estava restrita ao fundo de vale.



Figura 32 – Em detalhe a Voçoroca 01 à esquerda e a Voçoroca 02 à direita na fotografia aérea do IBGE no ano de 2004.

Na imagem Geoeye referente ao ano de 2010, a Voçoroca 01 já apresentava indícios de plena atividade, tanto em sua expansão lateral quanto longitudinal, com a formação e expansão de sete dígitos seguindo o padrão da morfologia pré-existente, de uma voçoroca pretérita. É possível verificar esses indícios pela supressão da vegetação e também pela base apresentar grande quantidade de solo exposto, apontando para a produção de sedimentos. Em comparação com a imagem anterior, de bordas convexas (indicador de estabilidade), na imagem abaixo foi verificado arestas bastante acentuadas, indicando atividade. Como observado na imagem (Figura 33), a Voçoroca 02 permanecia em situação ativa como nas anteriores, porém foi verificada a formação e expansão de pequenos dígitos que se expandiram do fundo de vale em direção às encostas.

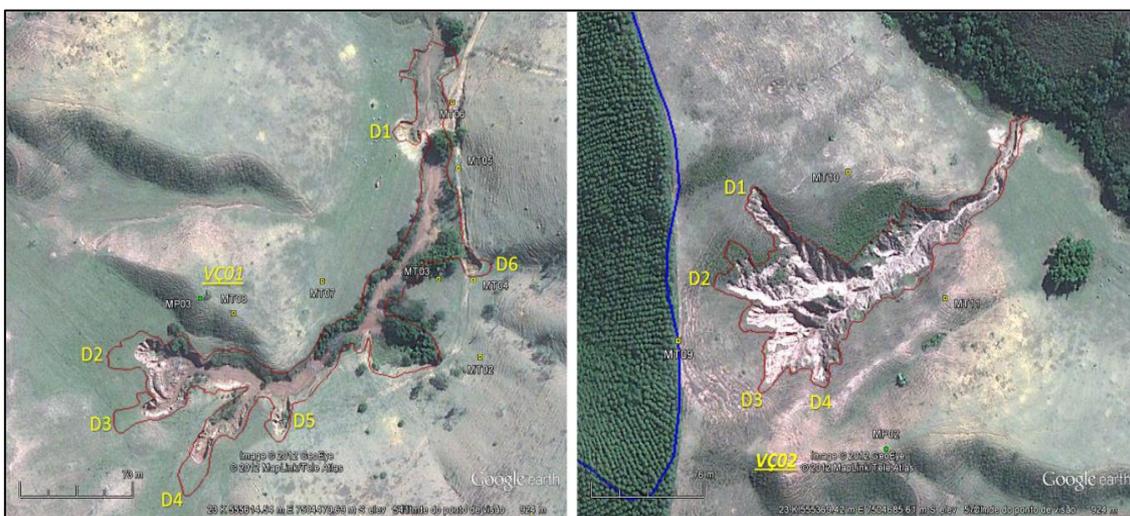


Figura 33 – Voçoroca 01 e 02 na imagem Geoeye no dia 21/08/2010. O perímetro das voçorocas em 2012 está delimitado pela linha vermelha (Sato, 2012).

Na sequência, a análise qualitativa através das imagens DigitalGlobe (Dez/2011) e CNES/ Astrium (Fev/2014) mostra o desenvolvimento das duas voçorocas, ambas em plena atividade e expandindo em direção às encostas, sendo a Voçoroca 02 avançando de modo remontante muito próximo ao divisor de drenagem (Figuras 34 e 35).

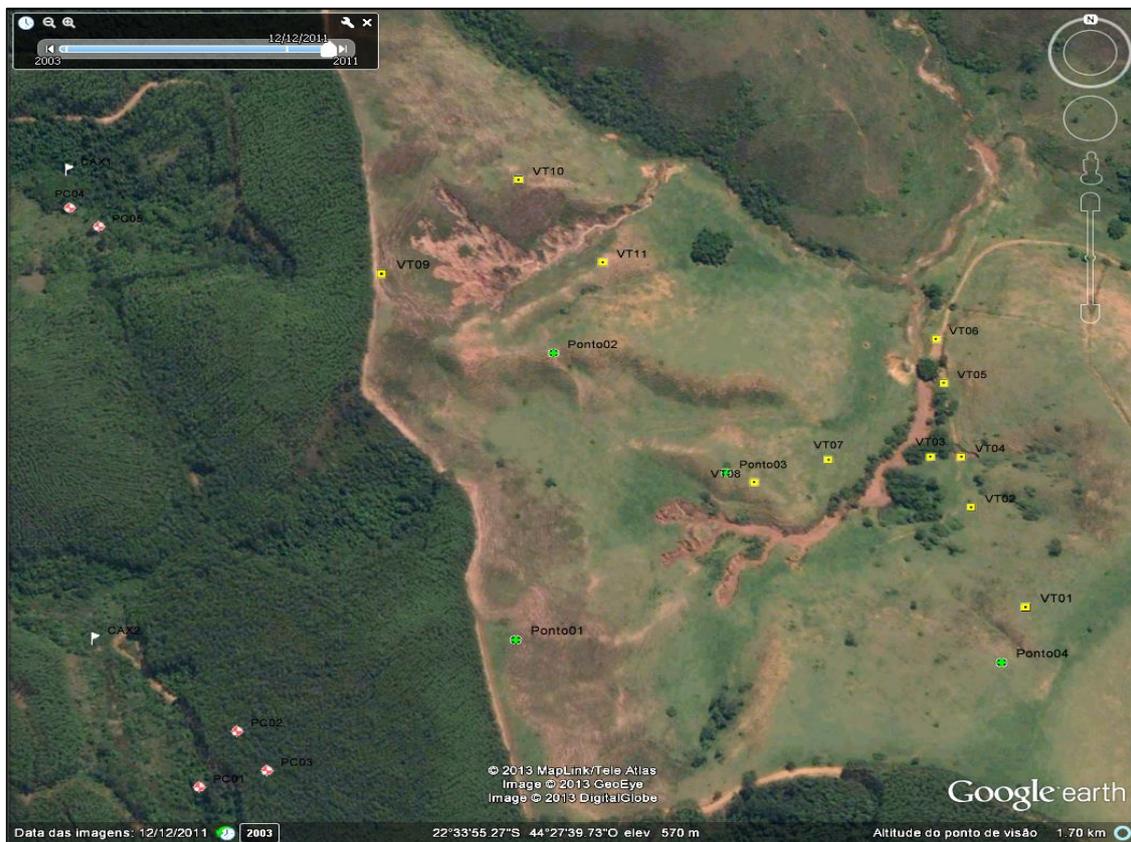


Figura 34: Visualização geral da área de estudo em Dez/2011 (imagem DigitalGlobe). Em verde a rede de marcos permanentes (MPs) e em amarelo a rede de marcos temporários (MTs); na vertente oposta observa-se os poços na fazenda Caximonan da FIBRIA (extraído do Google Earth).



Figura 35: Voçoroca 01 e 02 na imagem CNES/ Astrium (05/02/2014).

## 6.2 – Estimativa quantitativa da taxa de evolução das voçorocas

A partir da comparação da sobreposição das imagens orbitais (Geoeye) de 2010 com o levantamento do perímetro em campo realizado em 2012, foi possível estimar que as taxas de expansão da Voçoroca 01 alcançaram valores superiores a 1 m/mês em alguns dos dígitos. Para efeito comparativo, segundo um levantamento feito por Bull & Kirkby (1997) sobre a média das taxas de expansão remontante das cabeças das voçorocas em diferentes estudos, indicou que estas variam espacialmente e temporalmente com uma taxa variando da ordem de 0, 125 a 6 metros por ano.

As Tabelas 4 e 5 mostra as taxas de evolução das voçorocas em uma série temporal de 2012 a 2014 obtidos a partir dos levantamentos realizados em campo com estação total e no processamento com o software ArcGis.

Tabela 4: Período de monitoramento da taxa de evolução da voçoroca de fundo vale.

Voçoroca 01 (Fundo de Vale)			
Dígito	Período	Intervalo dias	Área Total (m <sup>2</sup> )
D2	abr/12	-	774,8
	jan/13	275	1069,9
	ago/13	212	1154,7

	jan/14	152	1197,1
<b>D3</b>	abr/12	-	508,7
	jan/13	275	564,7
	ago/13	212	583,8
	jan/14	152	598,5
<b>D4</b>	abr/12	-	1393,6
	jan/13	275	1541,5
	ago/13	212	1614,1
	jan/14	152	1630,5

Tabela 5: Estimativa da taxa de evolução da voçoroca de fundo de vale

Voçoroca 01 (Fundo de Vale)				
Dígito	Período	Evolução Área (m <sup>2</sup> )	Evolução Linear (m)	Taxa de recuo (m/mês)
<b>D2</b>	abr/12 a jan/13	295,1	14,9	1,63
	jan/13 a ago/13	84,8	3,7	0,52
	ago/13 a jan/14	42,3	1,1	0,22
<b>D3</b>	abr/12 a jan/13	56,0	5,6	0,61
	jan/13 a ago/13	19,1	0,49	0,07
	ago/13 a jan/14	14,6	0,47	0,09
<b>D4</b>	abr/12 a jan/13	147,9	8,05	0,88
	jan/13 a ago/13	72,5	1,61	0,23
	ago/13 a jan/14	16,5	1,42	0,28

### 6.3 – Distribuição da Precipitação

Com base na estimativa da evolução das Voçoroca 01 (Tabela 5), observa-se que o período com maior evolução tanto em área quanto a taxa de recuo apresentada corresponde ao intervalo das medições de Abril de 2012 e Janeiro de 2013, com valor de 1,63 m/mês.

Outro questionamento que se desdobra é a relação da evolução desses dígitos com a precipitação, principalmente durante o período em que foram observadas as imagens orbitais para o levantamento qualitativo (2003 – 2010), como mostradas anteriormente, e as análises quantitativas (Tabela 5). Para compreender essa relação, foi feito um levantamento na base do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, referente à série histórica de chuvas da estação de Resende, pela proximidade da área em foco e por possuir dados mais completos da série histórica analisada (2000-2015) (Figura 36)

### **Precipitação mensal - Estação Resende - 2000 a 2015**

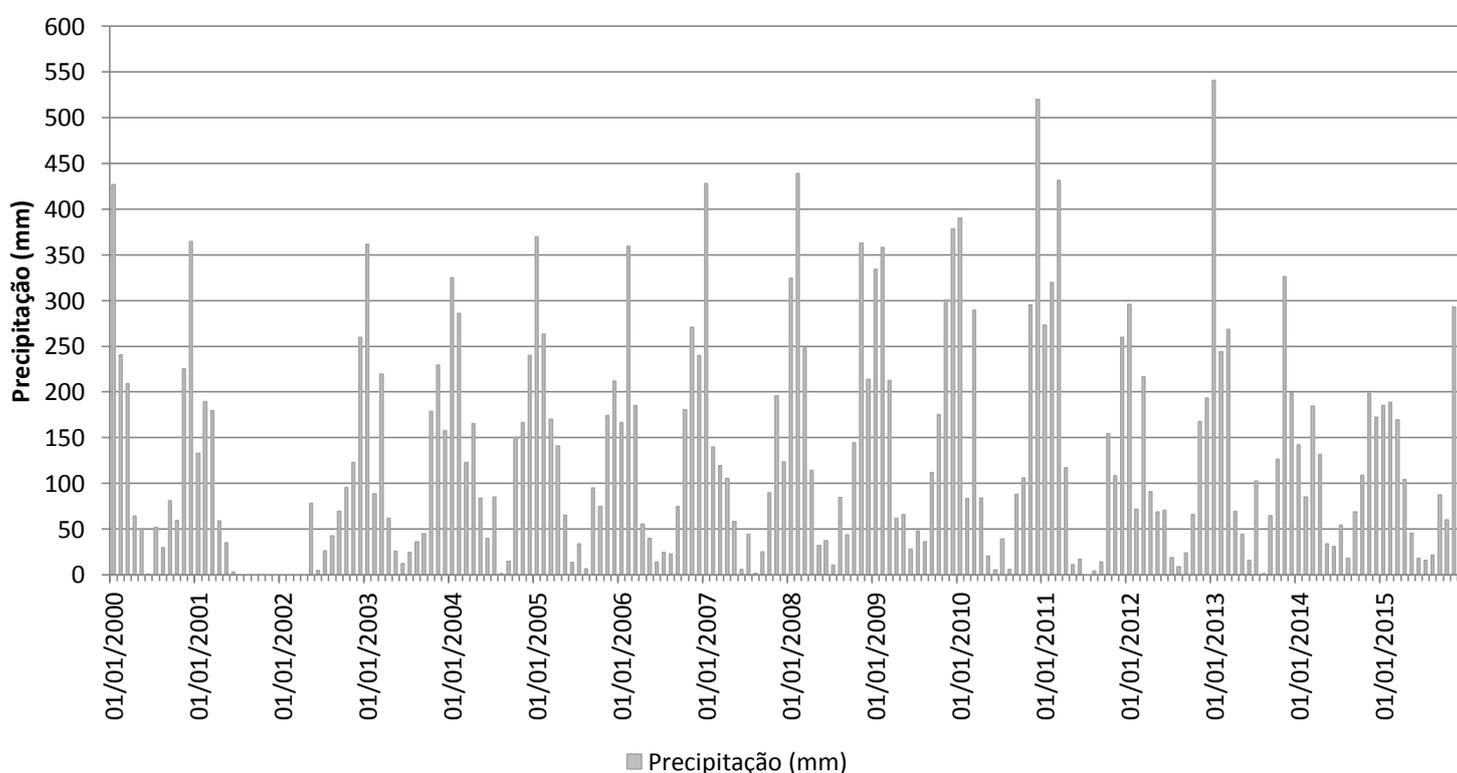


Figura 36: Precipitação mensal referente aos anos de 2000 a 2015. Fonte: Banco de dados do INMET – BDMEP.

Verifica-se no período que compreende o final de 2012 e início de 2013 (verão 2012/ 2013) é o que apresenta os maiores valores de precipitação, destacando-se o mês de Janeiro de 2013, com valor total de 541,1 mm. Sendo

assim, levando em consideração o período de monitoramento das taxas de recuo dos dígitos da Voçoroca 1, observa-se a relevância da chuva com a expansão desta erosão. Os meses subsequentes apresentam menores valores tanto de precipitação quanto nas taxas de recuo dos dígitos levantados.

Os meses de Novembro de 2010 a Fevereiro de 2011 também apresentaram valores muito elevados de chuva, alcançando pico de 520 mm em Dezembro. Segundo o levantamento feito pelo estudo do Projeto Sesmaria da Crescente Fértil das erosões na bacia do Sesmaria e do mapeamento das erosões da bacia do Sesmarias, foi possível identificar que a maioria destas erosões surgiram neste ano de 2010, provavelmente em decorrência das chuvas deste período.

Em comparação com a série histórica da estação de Resende analisada pelo estudo de Figueiró e Coelho Netto (2011) das médias mensais (1937-2000), verifica-se que os anos posteriores compreendidos entre 2000 e 2015 apresentaram valores de chuva superiores a média mensal, com chuvas acima de 500 mm (colunas da Figura 37), entretanto não atingiram a média do regime dos anos mais chuvosos, representado pela linha contínua da Figura 37.

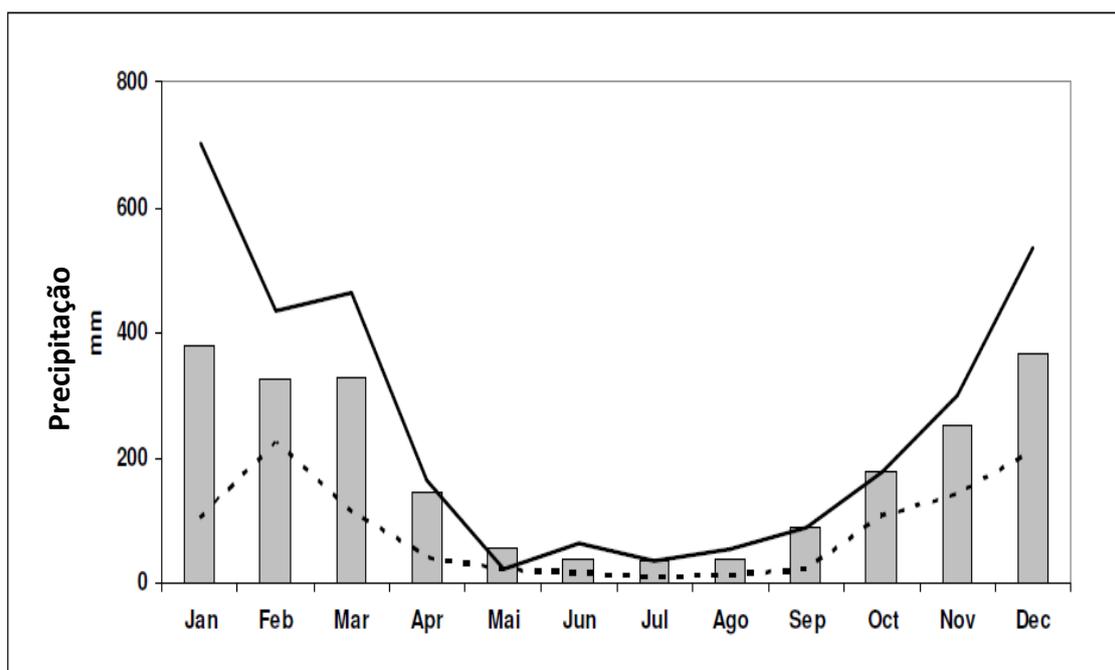


Figura 37: Média mensal de precipitação da estação de Resende (RJ) durante o período de 1937 a 2000. A média dos anos mais chuvosos está expressa pela linha

contínua, enquanto os anos mais secos pela linha tracejada. (FIGUEIRÓ E COELHO NETTO, 2011).

Os dados de precipitação total anual da Tabela 6 mostram que os anos de 2008, 2009, 2010 e 2013 foram os anos mais chuvosos, sendo neste último ano observada a alta taxa de recuo dos dígitos. Já os anos de 2014 e 2015 foram anos mais secos, onde também observou-se o decréscimo da taxa de recuo dos dígitos da voçoroca.

A Figura 38 mostra o levantamento feito pela estação meteorológica automática instalada na Fazenda Itamarati, na bacia Sesmaria. Verifica-se que comparado a série histórica levantada por Figueiró e Coelho Netto (2011) – Figura 37 - da estação Resende, o ano de 2015 está compreendido abaixo da média mensal de precipitação, caracterizado como um ano mais seco.

Tabela 6: Dados da precipitação total anual da Estação de Resende (RJ) – 2000 a 2015

Precipitação Total Anual	
Ano	Precipitação (mm)
2000	1802
2001*	597,5
2002*	698,4
2003	1439,5
2004	1679,9
2005	1617,5
2006	1631,9
2007	1335,7
2008	2053,5
2009	2110,2
2010	1925,6
2011	1708
2012	1292,7
2013	2002,7
2014	1229
2015	1404,5

\*2001 – Período incompleto – Janeiro a Julho

\*2002 – Período incompleto – Maio a Dezembro

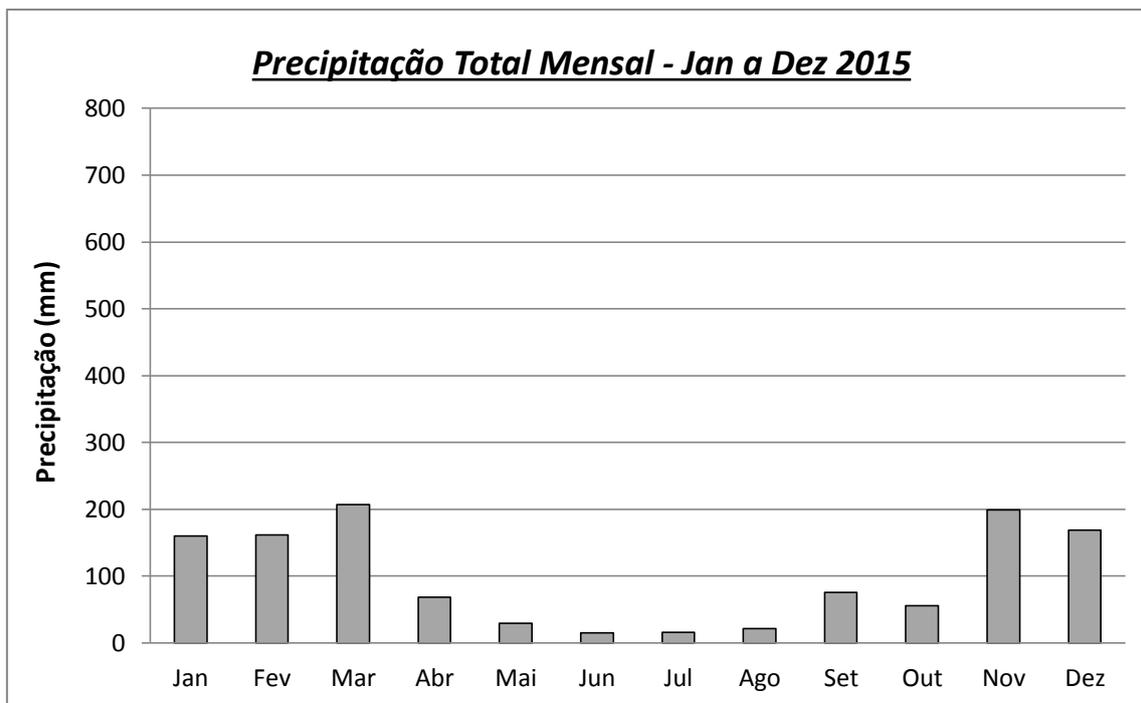


Figura 38: Dados de precipitação mensal do ano de 2015 da estação meteorológica da Fazenda Itamarati – Bacia Sesmaria.

Como observado em campo, a questão da alta precipitação está também diretamente ligada com o aumento do escoamento superficial e recuo das cabeças das voçorocas, além de promover a lavagem e a desobstrução dos *pipings*, como será visto no próximo tópico.

#### **6.4 – Observações em campo do escoamento superficial e expansão dos dígitos.**

Sobre a evolução da cabeça dos dígitos das voçorocas, grande parte da sua expansão pode ser atribuída ao escoamento superficial em eventos de chuva. Foi observado em campo, durante um desses eventos, que os caminhos formados pelo gado ao longo da encosta formam vias preferenciais de escoamento em direção às cabeças da voçoroca, promovendo assim o chamado “efeito cachoeira” (Figura 39).

Leal (2009) faz referência a este caso apontando que os fluxos superficiais podem promover a lavagem das paredes das voçorocas, desobstruindo as faces de exfiltração e potencializando os efeitos por exfiltração e pode produzir um depósito ao longo do eixo do canal erosivo, onde os processos fluviais são operantes. Higgins (1990), entretanto, complementa afirmando que geralmente os indícios deixados pela erosão promovida por fluxos subsuperficiais são apagados por fluxos superficiais subsequentes, e evidencia que os processos de exfiltração e de erosão em túneis (piping) raramente são observados. Com isso, o pesquisador poderia à primeira vista concluir erroneamente que os processos operantes em determinada voçoroca seriam superficiais. De acordo com Leal (2009) esse mesmo autor propõe ainda que a maioria das voçorocas é iniciada e alargada por processos de erosão subsuperficial, assim como no modelo proposto por Dunne (1980), também identificando casos em que a montante da cabeça do canal exista uma concentração local de fluxo superficial bem definido, capaz de gerar o efeito cachoeira.

As observações dos conjuntos de imagens levantados assim como análises em campo e dos dados permitiram avaliar dois momentos distintos na evolução das voçorocas. O primeiro momento diz respeito à reativação, sendo esta atribuída ao fluxo subsuperficial nas faces de exfiltração das paredes da voçoroca, causando a progressão remontante pelo solapamento das mesmas. Isso pode ser associado, segundo o modelo proposto por COELHO NETTO et al. (1988), tanto ao aquífero regional quanto a níveis suspensos de saturação, que produzem um aquífero temporário na base dos depósitos quaternários (ROCHA LEÃO, 2005).

No segundo momento verificou-se também a atuação do fluxo superficial nas encostas na desestabilização, lavagem e recuo da cabeça do canal da voçoroca como um todo, devido aos fluxos torrenciais concentrados em sulcos na encosta durante os eventos de chuva. Destaca-se também uma mensuração, onde foi estimada a carga de sedimento em suspensão (CSS) transportada na confluência destes canais, feita durante e logo após um evento de chuva. Foi verificado que a CSS no período de chuva atingiu concentração de 60,37 g/L e que no recesso da vazão do canal, logo após o evento de chuva, a concentração reduziu abruptamente para 1,80 g/L.

Para efeitos comparativos, a média da CSS monitorada por Sato (2012) nos exutórios de cabeceiras de drenagem com plantios de eucalipto foi de aproximadamente 0,02 g/L, atingindo um máximo de 0,11 g/L, com contribuição da produção de sedimentos oriundos de estradas não-pavimentadas dentro destes plantios para os canais coletores.

Estes dados indicam que os processos de escoamento superficial também contribuem para a evolução desta feição erosiva, com elevada exportação de sedimentos durante os eventos de chuva (Tabela 7).

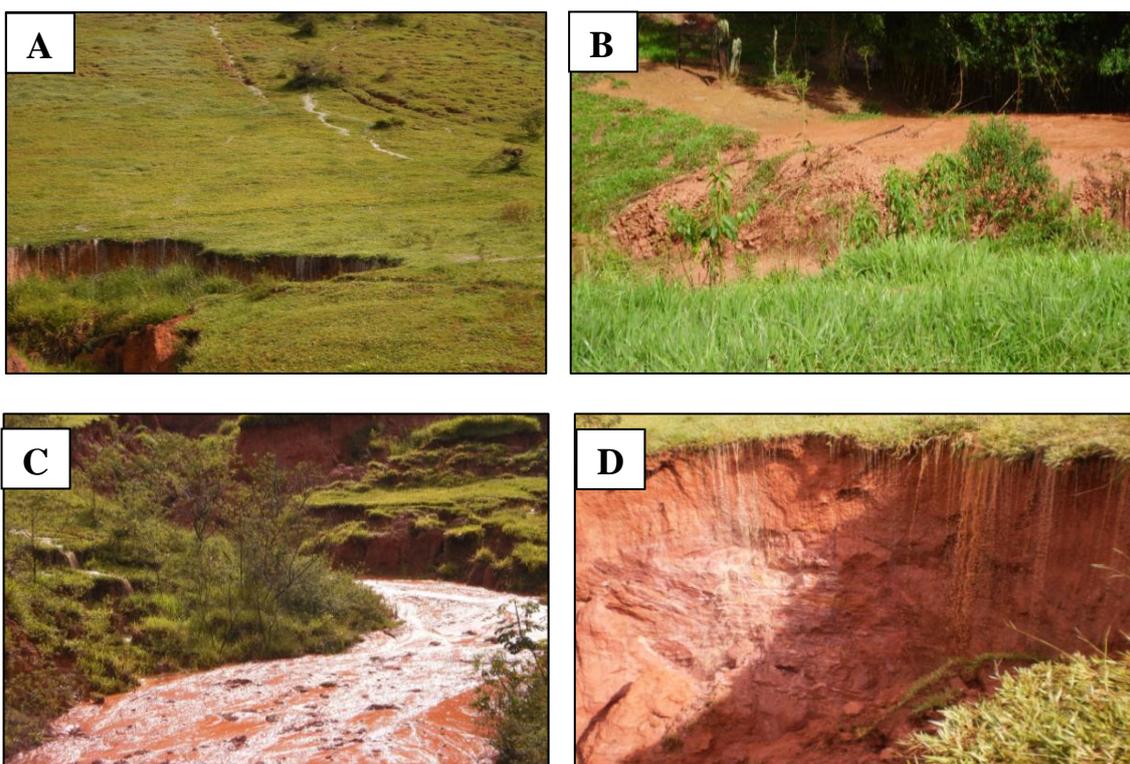


Figura 39 – Visualização das Voçorocas durante um evento chuvoso: (A) Escoamento superficial nas gramíneas seguindo caminhos preferenciais do gado e o “efeito cachoeira” abaixo; (B) Fluxo turbulento na confluência da Voçoroca 01 e 02 com alta capacidade de transporte de sedimentos; (C) Fluxo contínuo na base; (D) “Efeito cachoeira” em detalhe.

Tabela 7 – Amostras de carga de sedimento em suspensão (CSS) durante e após um evento de chuva na área estudada (CORREA *et al.*, 2013)

CARGA DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO (CSS)				
Amostra/ Data	Condição de coleta	Peso Líquido (g)	Média (g) em 50 ml	g/L
1) 18/01/2013		2,79	3,0188	60,376

	Durante a chuva	3,59		
		2,68		
2) 18/01/2013 PC*	Pós-chuva	0,08	0,0903	1,805
		0,08		
		0,11		
3) 19/01/2013	Durante a chuva	2,47	2,2229	44,458
		2,48		
		1,72		
4) 20/08/2013	Pós-chuva	0,05	0,0487	0,974
		0,04		
		0,05		

Durante os eventos de chuva, ocorre a remoção e transporte do material depositado na base dos canais erosivos e sua exportação de sedimentos para os canais coletores à jusante. Considerando eventos de maior índice pluviométrico, é importante considerar as implicações de caráter hidro-erosivo, ecológico e econômico que estas voçorocas, assim como outras na bacia, podem promover como a perda de área produtiva, a degradação do solo, o assoreamento dos canais fluviais e o favorecimento à ocorrência de enchentes, como é visto no centro urbano da Resende, no exutório do rio Sesmarias, onde conflui com o rio Paraíba do Sul (Figura 40). Estas erosões certamente constituem-se em novos vetores de alteração ambiental em uma região que já se encontra historicamente degradada por sucessivas alterações de uso da terra.



Figura 40: Placa localizada no centro urbano de Resende, no exutório da bacia do rio Sesmarias.

## 6.5 – Poços e Piezômetros

Os poços e piezômetros foram instalados na parte interna do canal de voçorocamento para buscar identificar um possível artesianismo na área em foco. Como dito anteriormente, através de observações de campo, a Voçoroca 1 possuía água no canal erodido praticamente durante todo o período, indicando a exfiltração da água. Durante os eventos de chuva, o fluxo no interior do canal era maximizado, como exemplificado também na Figura 39-C.

De acordo com Coelho Netto (2003), os períodos transitórios de mudanças da cobertura vegetal, em associação com os períodos mais chuvosos contendo eventos extremos de chuvas, seriam os mais críticos em termos de intensidade erosiva por meio de avanço regressivo da rede de canais. Ela destaca também a importância do papel dos aquíferos suspensos que, por sua vez, podem ser preponderantes na definição de superfícies de rupturas em associação, principalmente, aos saprolitos de gnaisses bandados, envolvendo possíveis relações com as chuvas locais e/ou com as chuvas regionais. Sendo assim, as chuvas regionais seriam responsáveis pela geração das superfícies de rupturas associadas ao nível freático do aquífero regional, especialmente nos casos de pirataria de água subterrânea entre vales fluviais paralelos e desnivelados entre si.

Como demonstrado por estudos anteriores (COELHO NETTO & AVELAR, 1992; ROCHA LEÃO, 2005; SATO, 2012), o comportamento do aquífero pode apresentar um caráter regional. Sendo assim, existe a hipótese de que as variações do nível d'água (freático) acompanham a evolução da voçoroca. É necessário avaliar, entretanto, se os plantios de eucalipto possuem influência direta na recarga do aquífero.

Como já explicitado anteriormente, Sato (2008) demonstrou que dentro dos plantios de eucalipto o escoamento superficial é bastante baixo (relação Q/P da ordem de 0,6%) devido à espessa camada de serrapilheira, que possui baixas taxas de decomposição, e que a infiltração (99,4%) é favorecida principalmente devido à arquitetura convergente dos galhos, formando um escoamento preferencial junto aos troncos, acompanhado em seguida o enraizamento pivotante que facilita a percolação da água no solo. Ainda não foi

quantificado o quanto dessa água é reabsorvida pelo próprio eucalipto (evapotranspiração) e o quanto é destinado à recarga do aquífero.

Dessa forma, torna-se fundamental compreender a dinâmica da água subterrânea para verificar se a água proveniente dos plantios através da alta infiltração é direcionada para a vertente oposta em que estão localizadas as voçorocas. Infelizmente no presente estudo não foi possível realizar a instalação de uma rede de poços e piezômetros ao longo da encosta para monitorar a variação do lençol freático e da carga piezométrica e verificar uma possível pirataria da água subterrânea entre vales adjacentes, como o exemplo visto no modelo de Leal (2009) em Bananal. Como trata-se de uma fazenda particular, a instalação foi restrita e autorizada apenas dentro dos canais de voçorocamento. Entretanto, outros pontos que corroboram para essa hipótese podem ser verificados a partir da análise das imagens, em que a introdução dos plantios de eucalipto (fevereiro de 2004) foi concomitante à reativação da Voçoroca 01, além do fato de que a área de estudo, de acordo com Sato (2012) segue o padrão da linha de uma dobra antiformal mapeada por Eirado Silva *et al.* (2005). Essa área possui influência direta do controle estrutural na orientação da voçoroca (Figura 41). Foi observado em campo que as foliações das rochas neste ponto são subverticais e alinhadas com o eixo principal da Voçoroca 02, o que facilitaria a passagem de fluxos subterrâneos entre vertentes adjacentes.



Figura 41– Alinhamento da Voçoroca 02 com a dobra antiformal (linha amarela com setas) e ocorrência de foliações subverticais (SATO, 2012).

De acordo com o estudo desenvolvido por Sato (2012) este plantio na Fazenda Caximonan da FIBRIA em 2004 foi antecedido por uma capina química em toda a área, com o objetivo de eliminar a competição das mudas de eucalipto com a gramínea (braquiária), favorecendo a redução da evapotranspiração destas cabeceiras adjacentes. A hipótese trabalhada pelo autor, neste caso, é da possibilidade de ter ocorrido uma elevação do nível freático localmente na área da Fazenda Caximonan e gerado um gradiente hidráulico em direção ao vale de cabeceira de drenagem onde está localizada a Voçoroca 01. Segundo o autor, estudos apontam para essa elevação do nível d'água quando há a supressão da vegetação (Brown *et al.*, 2005).

Foi avaliado neste estudo de Sato (2012) que a troca de água subterrânea entre vales adjacentes pode ser possível pelo fato da elevação do nível d'água em todos os poços da estação Caximonan 02 (elevação média do Nível d'água do Poço1= 522 m; Poço 2 = 523 m; Poço 3 = 528 m) estarem suspensos em relação ao fundo da Voçoroca 02 (~537m) mesmo durante a rotação do plantio de eucalipto. Isso ratifica o que é observado com o dígito 04 (D4), que cresce de forma oblíqua em relação ao divisor topográfico. Neste divisor existe uma grande diferença entre as paredes da voçoroca (de montante e jusante), sendo que na parede a montante é possível verificar uma grande quantidade de túneis erosivos (*piping*), enquanto na parede de jusante estes túneis são raramente observados, indicando que os fluxos são oriundos da direção da estação Caximonan 02 (SATO, 2012).



Figura 42: Voçoroca 2 avançando em direção ao divisor de drenagem. Na vertente oposta encontra-se os plantios da Fazenda Caximonan da empresa Fibria, introduzidos no ano de 2004 (Foto: Sato, 2012).

Com base nos dados coletados durante o período de monitoramento, final de Junho de 2014 até meados de Agosto de 2015, foram observadas as oscilações da carga piezométrica em relação ao nível d'água (N.A.) encontrado nos poços, tanto na Voçoroca 1 (maior variação) quanto a Voçoroca 2 (menor variação). É importante destacar que as leituras foram feitas por um leitor de campo duas vezes na semana, sempre nos mesmos dias, com um medidor de nível d'água ("pio"). Os gráficos da Figura 43 e 44 representam as variações dos quatro pontos monitorados: um poço e um piezômetro no canal da voçoroca 1; e um poço e piezômetro no canal da voçoroca 2. Como descrito na metodologia, as profundidades dos pontos da voçoroca 1 são muito mais superficiais se comparados à voçoroca 2. O nível d'água nesta última encontrava-se a profundidades maiores.

Observa-se logo de início pelo gráfico relativo a voçoroca 1 e 2, que os valores da carga piezométrica são maiores do que os valores de N.A., indicando um possível artesianismo nesta localidade.

O período de Novembro de 2014 a Abril de 2015, houve uma tendência geral de ascensão do N.A. e da carga piezométrica na voçoroca 1, o que corresponde também a um período de maior precipitação. Entretanto, entre os meses de Maio e Setembro de 2015, houve uma inversão dos valores da carga piezométrica em relação ao poço na voçoroca 1, o que pode indicar a não existência do artesianismo durante esses meses, possivelmente devido ao menor acumulado de chuva mensal neste período.

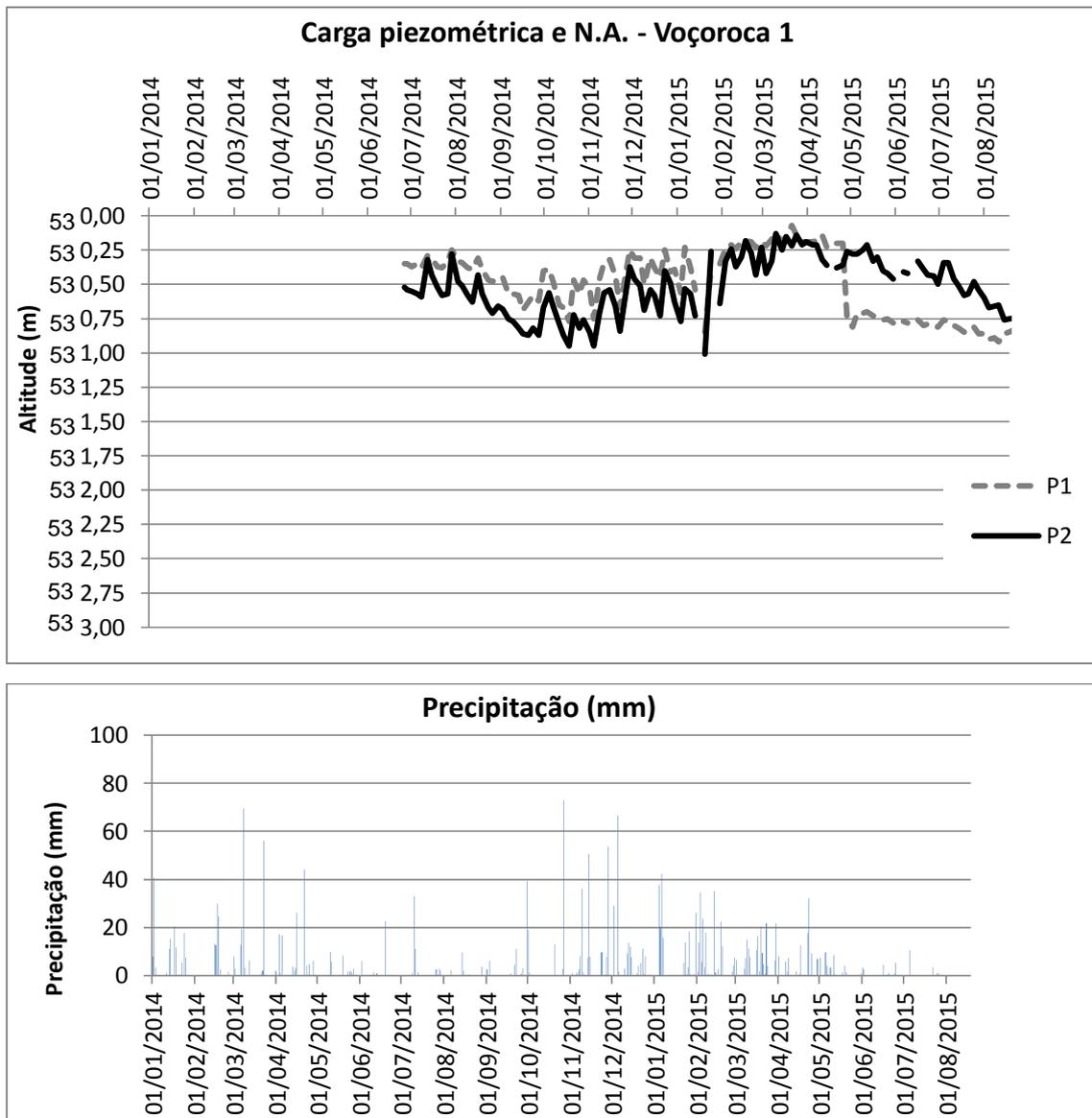


Figura 43: Dados dos poços e piezômetros instalados dentro do canal da Voçoroca 1.

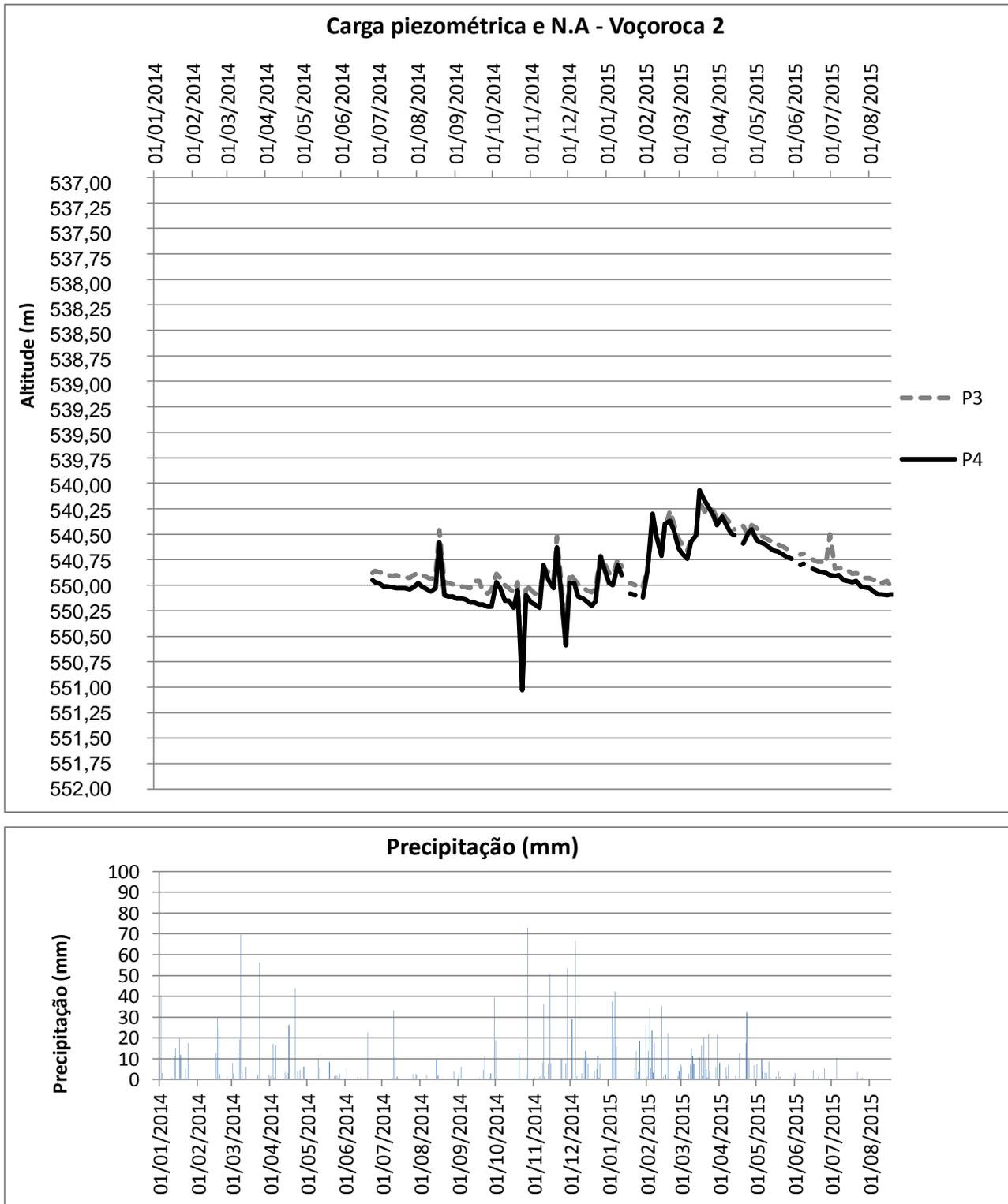


Figura 44: Dados dos poços e piezômetros instalados dentro do canal da Voçoroca 2.

## **6.6 - Levantamento da sucção do solo em plantio de eucalipto e pastagem**

O objetivo deste monitoramento consistiu em avaliar se os plantios de eucalipto possuíam alguma influência sobre a zona não-saturada em vales adjacentes com pastagem (gramínea); além de avaliar também o comportamento da água no solo nas duas coberturas: eucalipto e gramínea (pastagem). Como descrito na metodologia, as três estações instaladas foram dispostas da seguinte forma: uma dentro do plantio de eucalipto (Estação Eucalipto – E); uma na vertente oposta ao eucalipto mas sob cobertura de gramínea (Estação Pastagem 2 - ; e a outra na gramínea, sem proximidade com o eucalipto.

Os dados das três estações de monitoramento foram obtidos durante o período de Fevereiro de 2015 a Novembro de 2015. Entretanto, devido a condição de instalação do equipamento ser realizada através do umedecimento do solo e do sensor, os dois primeiros meses não foram considerados. Sendo assim, a análise dos dados de sucção obtidos e comparados entre as três estações está compreendida entre os meses de Abril e Novembro de 2015.

A Figura 45 e a Tabela 8 apresentam a média de sucção obtida para cada profundidade (0,20m; 0,50m; 0,80m; 1,20m; 1,50m; 2,00m e 3,00m) durante todo o período de monitoramento, assim como o respectivo desvio padrão. Observa-se de princípio que a média de sucção para todas as profundidades na estação de eucalipto apresentam valores mais elevados, se comparados às estações localizadas nas gramíneas, com exceção dos valores correspondentes à média menos o desvio padrão (Média - DP) de até 0,80 cm de profundidade. Verifica-se também com base nos dados médios desta estação que as profundidades de 0,20m, 0,50m, 0,80m e 1,50 m apresentaram valores de maior umidade do que nas profundidades de 1,20m, 2,00m e 3,00m. É importante destacar a possibilidade da percolação da água no solo até a profundidade de 1,50m ser favorecida pelo sistema radicular do eucalipto, que apresenta raiz pivotante e profunda.

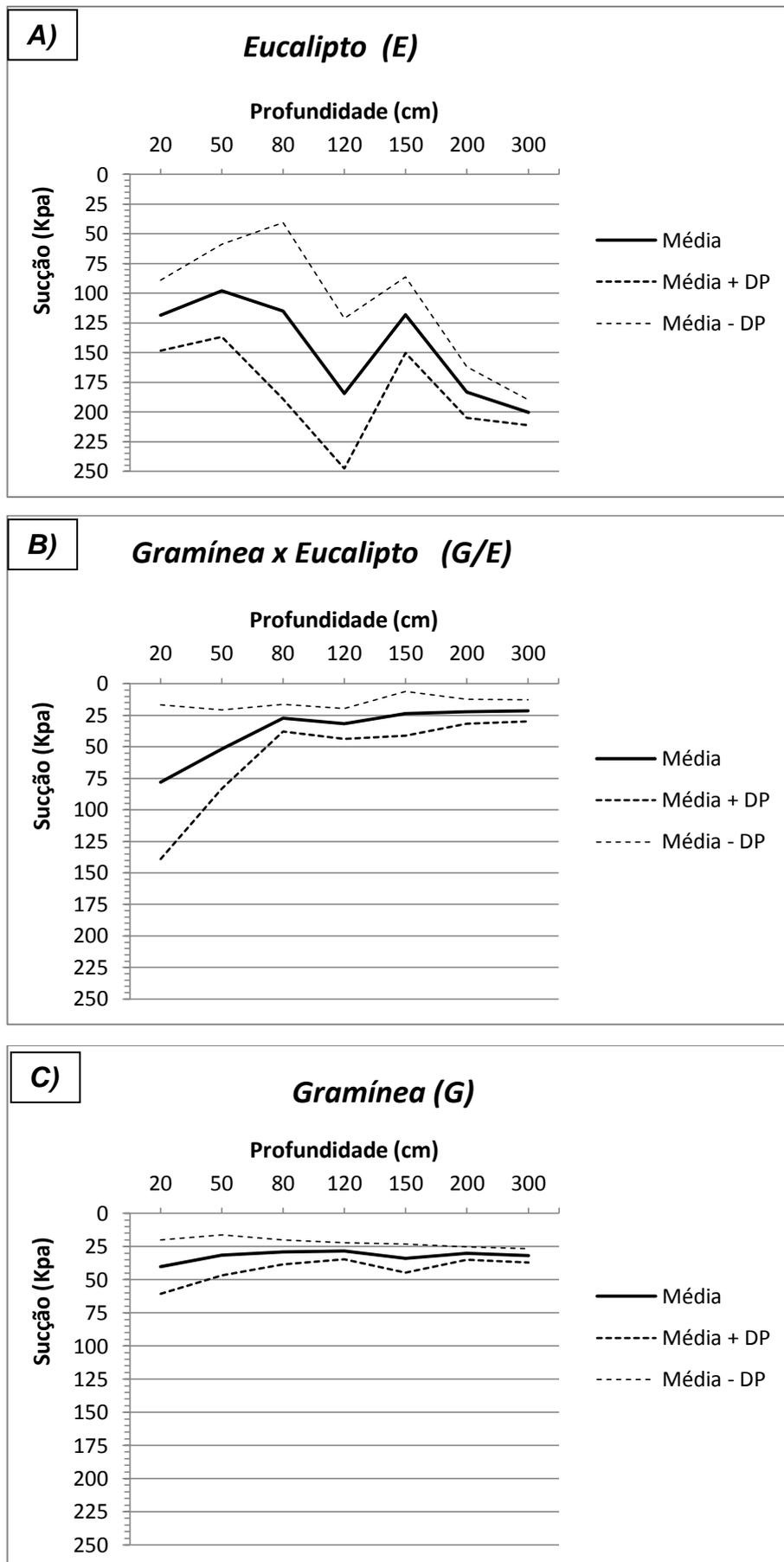


Figura 45: Dados médios de sucção por profundidade em cada estação.

Tabela 8: Valores de sucção média obtidas nas três estações durante o período levantado – Abril a Novembro de 2015.

<b>(E) Eucalipto</b>							
<b>Prof. (cm)</b>	<b>20 cm</b>	<b>50 cm</b>	<b>80 cm</b>	<b>120 cm</b>	<b>150 cm</b>	<b>200 cm</b>	<b>300 cm</b>
<b>Méd + DP</b>	148	137	189	248	150	205	211
<b>MÉDIA</b>	119	98	115	185	118	183	200
<b>Méd - DP</b>	89	59	41	121	86	162	190

<b>(E/G) Gramínea/Eucalipto</b>							
<b>Prof. (cm)</b>	<b>20 cm</b>	<b>50 cm</b>	<b>80 cm</b>	<b>120 cm</b>	<b>150 cm</b>	<b>200 cm</b>	<b>300 cm</b>
<b>Méd + DP</b>	139	83	38	44	41	32	30
<b>MÉDIA</b>	78	52	27	32	24	22	21
<b>Méd - DP</b>	17	21	16	20	6	12	13

<b>(G) Gramínea</b>							
<b>Prof. (cm)</b>	<b>20 cm</b>	<b>50 cm</b>	<b>80 cm</b>	<b>120 cm</b>	<b>150 cm</b>	<b>200 cm</b>	<b>300 cm</b>
<b>Méd + DP</b>	61	47	38	35	45	35	37
<b>MÉDIA</b>	40	32	29	28	34	30	32
<b>Méd - DP</b>	20	16	20	22	23	25	27

Como indicado anteriormente, é possível que a percolação da água no solo até a profundidade de 1,50m (na Estação Eucalipto) seja favorecida pelas raízes. Estudos como o de Freire Allemão (1997), Jansen (2001) e Silveira (2004) já destacaram essa relação das raízes de espécies arbóreas desempenhando um importante papel como vias preferenciais dos fluxos de percolação de água no solo, podendo até mesmo promover na base da zona radicular, a formação de uma camada saturada; e uma redução da condutividade em profundidades maiores além desta zona, o que é evidenciado também pelos maiores valores de sucção nas profundidades de 200 cm e 300 cm (Tabela 8).

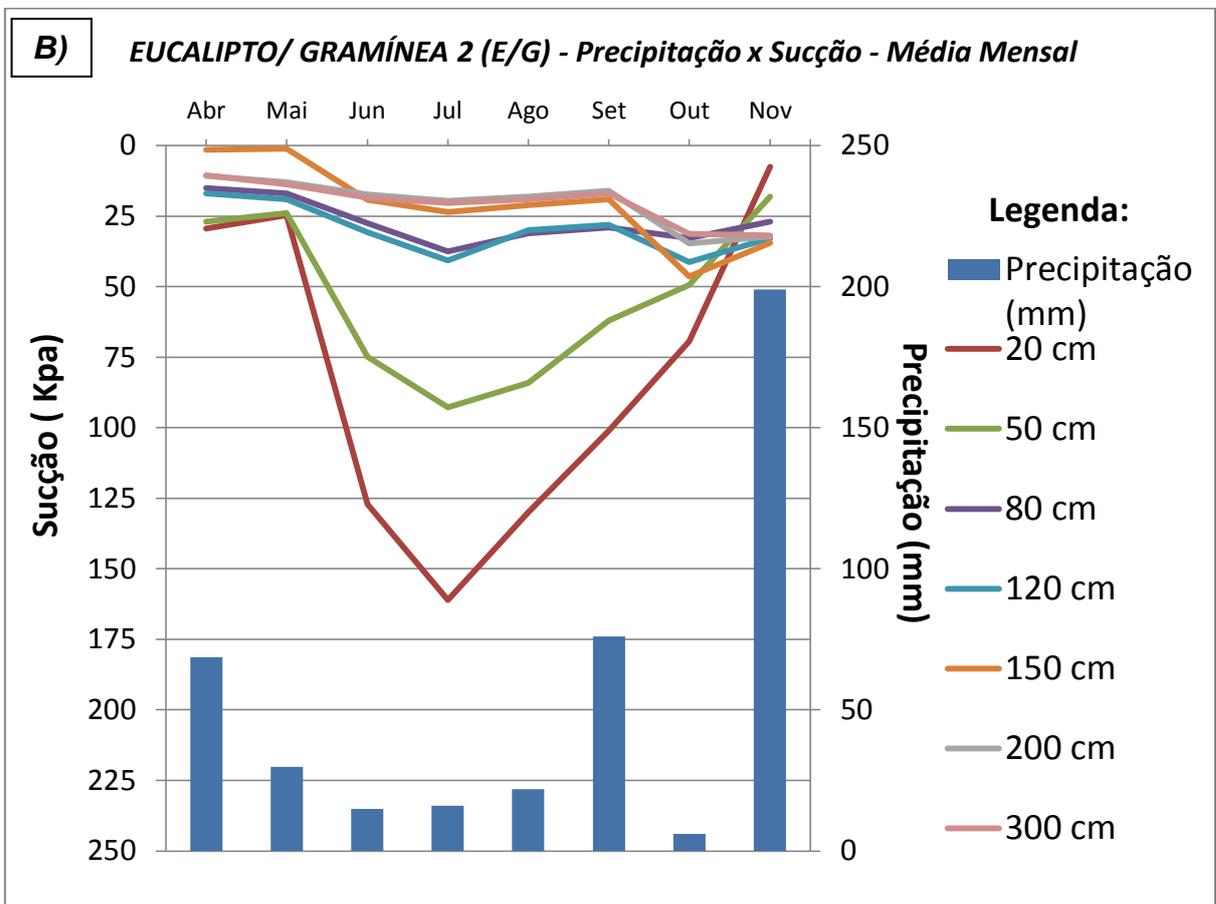
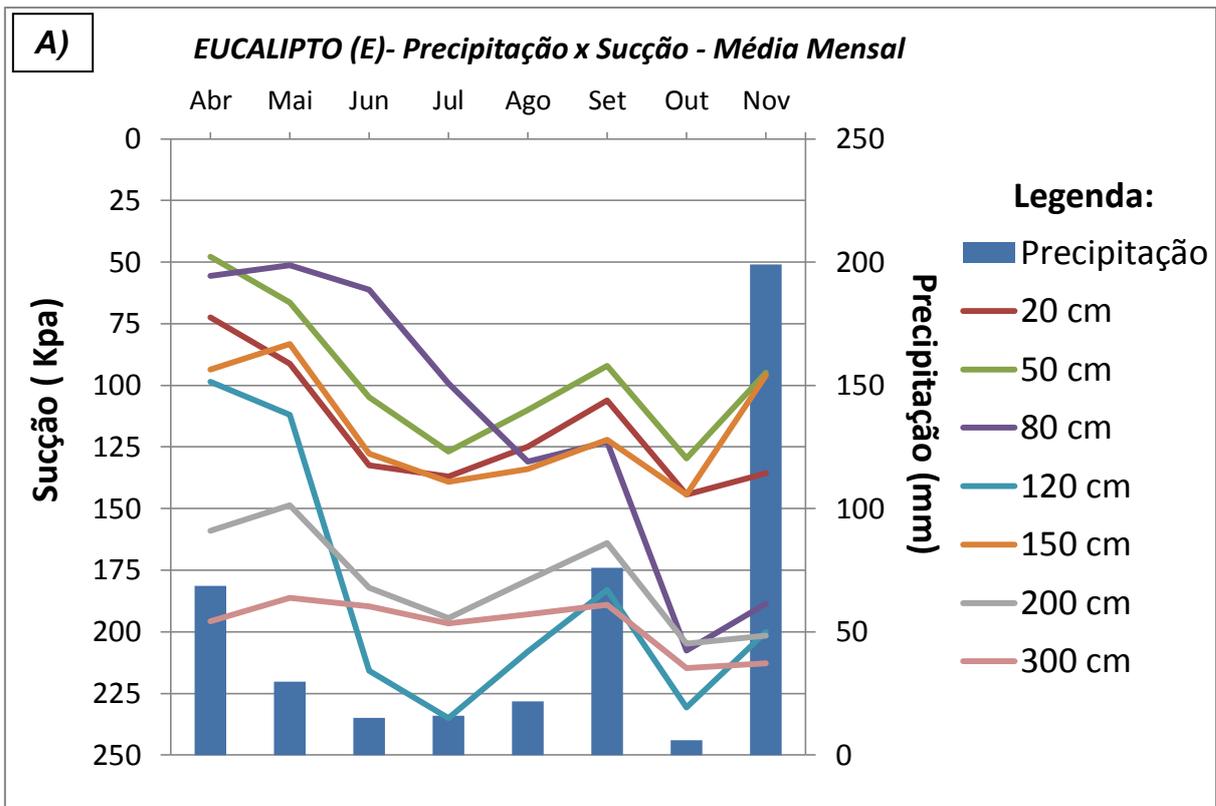
Em comparação ao eucalipto, as estações na gramínea mostram valores médios de sucção bastante menores, indicando uma condição mais úmida do solo. É interessante notar que a estação localizada na gramínea, na vertente

oposta ao eucalipto, apresentou valores de sucção em profundidades maiores (1,50; 200 e 300 m) menores, principalmente na profundidade de 150 m. Pelos valores da média de sucção das estações localizadas na gramínea, pode-se inferir que esta conserva a umidade em profundidades maiores.

Assim como os dados médios, os dados médios mensais e dados de precipitação do acumulado mensal mostram condições similares para as estações na gramínea (Figura 46), constituindo um ambiente que favorece a preservação da umidade do solo em profundidade. Já os valores respectivos a pequenas profundidades (0,20 e 0,50 m) oscilam de acordo com a incidência de chuva, entretanto perdem a umidade com maior facilidade, muito provavelmente por estar mais propícia ao processo de evaporação nos primeiros centímetros de solo.

Um efeito similar foi destacado pelo estudo de Mota (2014), que instalou o mesmo equipamento de monitoramento da sucção no sertão da Bahia. Apesar da distribuição da chuva na área ser bastante diferenciada, a autora relata que curiosamente, o sensor instalado a 0,20m apresentou o seu menor potencial matricial (sucção) em resposta às chuvas do período monitorado. Quando ocorreram as chuvas do final do mês de Novembro (período com alta pluviosidade) o solo a 0,20 m mostrou estar perdendo água, por evaporação e/ou para o próprio solo. De acordo com a autora, tratando-se de uma estação instalada em local sem cobertura vegetal, a taxa de evaporação do topo do solo tende a ser alta, sendo que no processo de infiltração e percolação da água das partes mais superficiais do solo para as partes mais profundas, de acordo com TUCCI (1993), parte da água é transferida para a atmosfera pela evaporação ou pela transpiração da vegetação, recuperando a capacidade de infiltração do solo, ou seja, resgatando o potencial que o solo tem de absorver a água em sua superfície (MOTA, 2014).

Os valores médios de sucção mensal e dados de precipitação do acumulado mensal correspondente para as três estações estão representadas pela Figura 46, a seguir.



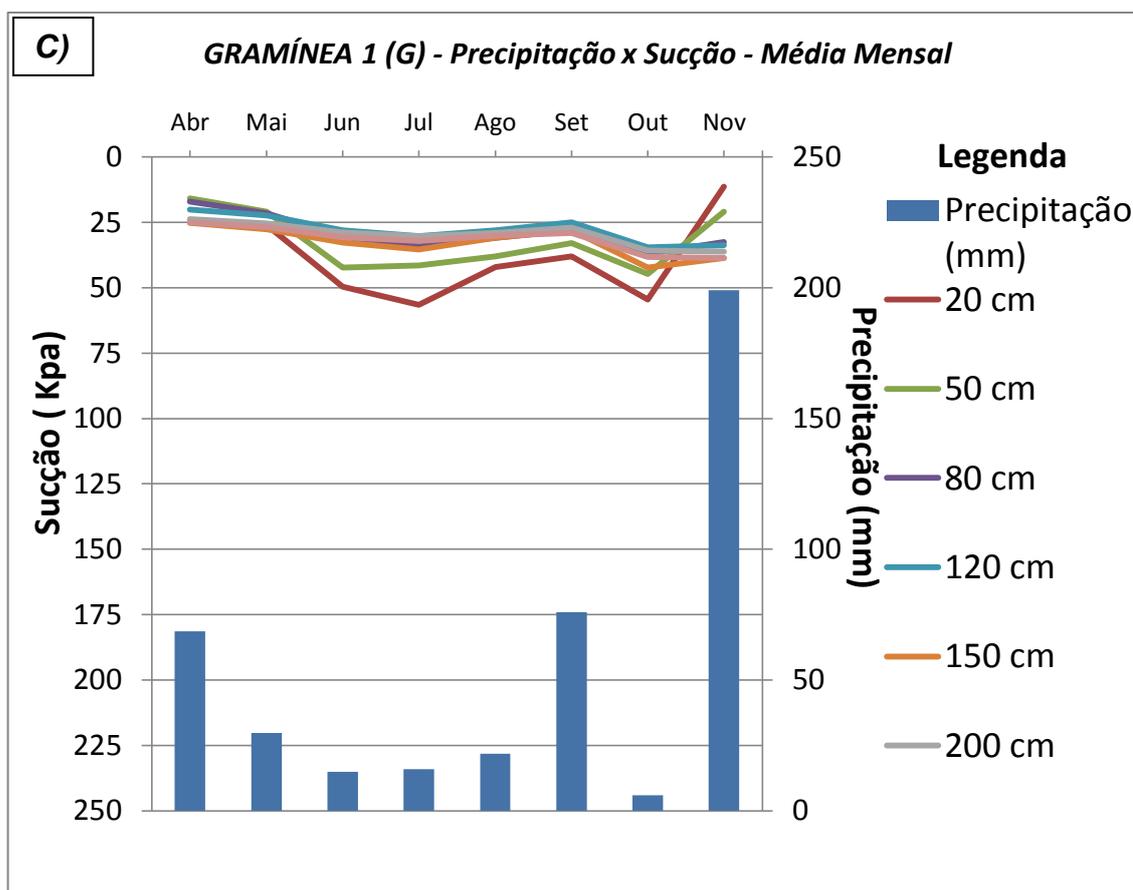


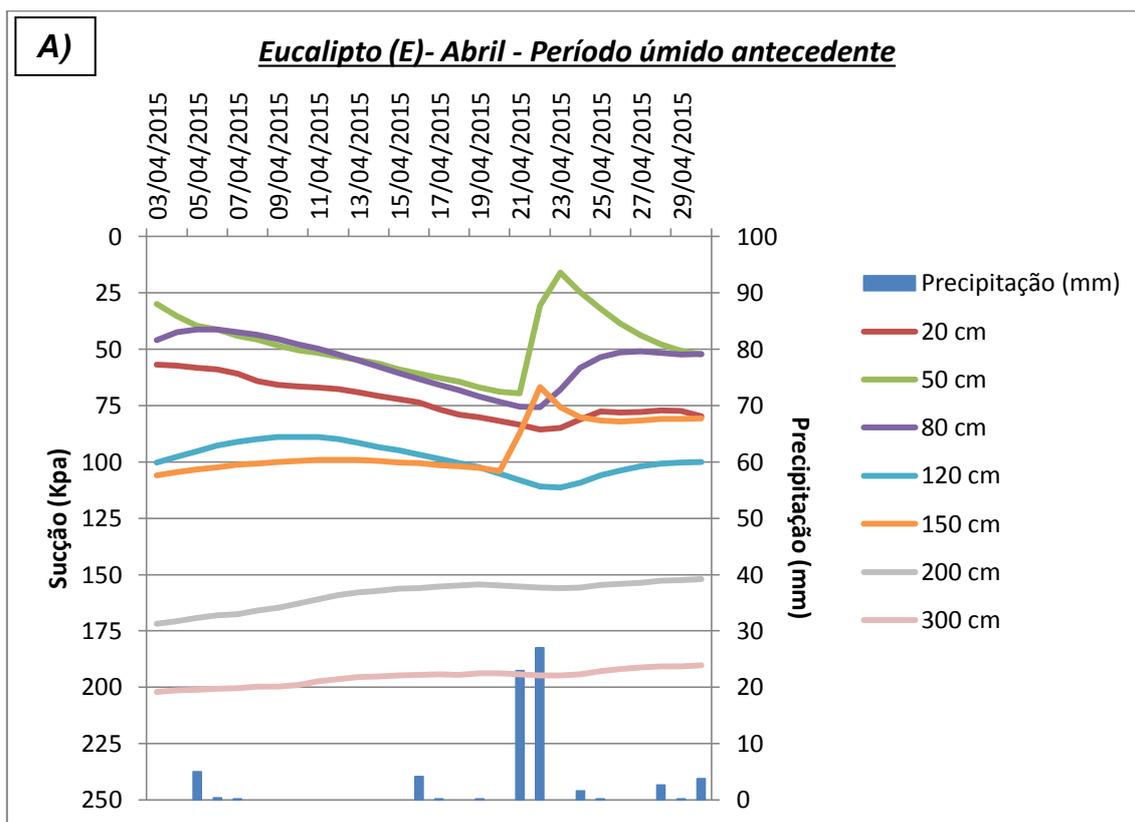
Figura 46: Valores acumulado de precipitação mensal e sucção média mensal nas três estações: a) Eucalipto; b) Eucalipto/ Gramínea; c) Gramínea, durante o período de monitoramento de Abril a Novembro de 2015.

Outro aspecto a ser destacado na estação dentro do plantio de eucalipto (Figura 46) diz respeito ao valor de sucção encontrado nas profundidades de 0,50, 0,80 e 1,50 m apresentar sucção menor do que na profundidade de 0,20m, o que pode corresponder a via preferencial de percolação junto a raiz pivotante, como apontado anteriormente. Existe, entretanto uma descontinuidade da sucção na profundidade de 1,20m significativa, apresentando os valores mais altos, o que não pode ser explicado com base nesses valores médios. Na profundidade de 0,20 m, verifica-se valores de sucção mais altos do que a profundidades maiores, caracterizando um solo mais seco.

Um aspecto a ser considerado diz respeito à capacidade de retenção hídrica (CRH) da serrapilheira. Os estudos de Melos *et al.*, (2011), na bacia do rio Sesmaria sobre a serrapilheira produzida pelo eucalipto, além de detectarem uma elevada produção anual de serrapilheira ( $4,4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )

associada a um baixo coeficiente de decomposição ( $K = 0,39$ ), proporcionam o acúmulo de serrapilheira, que atingiu valor médio de  $11,9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  em um plantio com quatro anos de idade. Esta serrapilheira apresenta capacidade de retenção hídrica ( $\text{CRH} = 235\%$ ) e papel de regulador hidrológico similar à serrapilheira da floresta Atlântica (SATO, 2012). Isso poderia explicar os valores de sucção a 0,20 cm serem maiores durante um período com pouca chuva do que nas profundidades subsequentes. Já na gramínea, o estudo de Deus (1991), em áreas de pastagem no MVRPS, são apontados valores de CRH pelas gramíneas de até 500% durante o período de estiagem, o que pode ser corroborado com os resultados obtidos de alta sucção em 0,20 m nas estações localizadas na pastagem durante o período de pouca chuva, e em Novembro de 2015, com maior acumulado de chuva, os valores de sucção terem diminuído drasticamente, quase alcançando a condição saturada.

Foram feitas análises também dos valores de sucção diários com antecedente de um período úmido (Figura 47). Para este período foram consideradas as chuvas dos meses antecedentes: Janeiro (160 mm), Fevereiro (162 mm) e Março (207,2 mm).



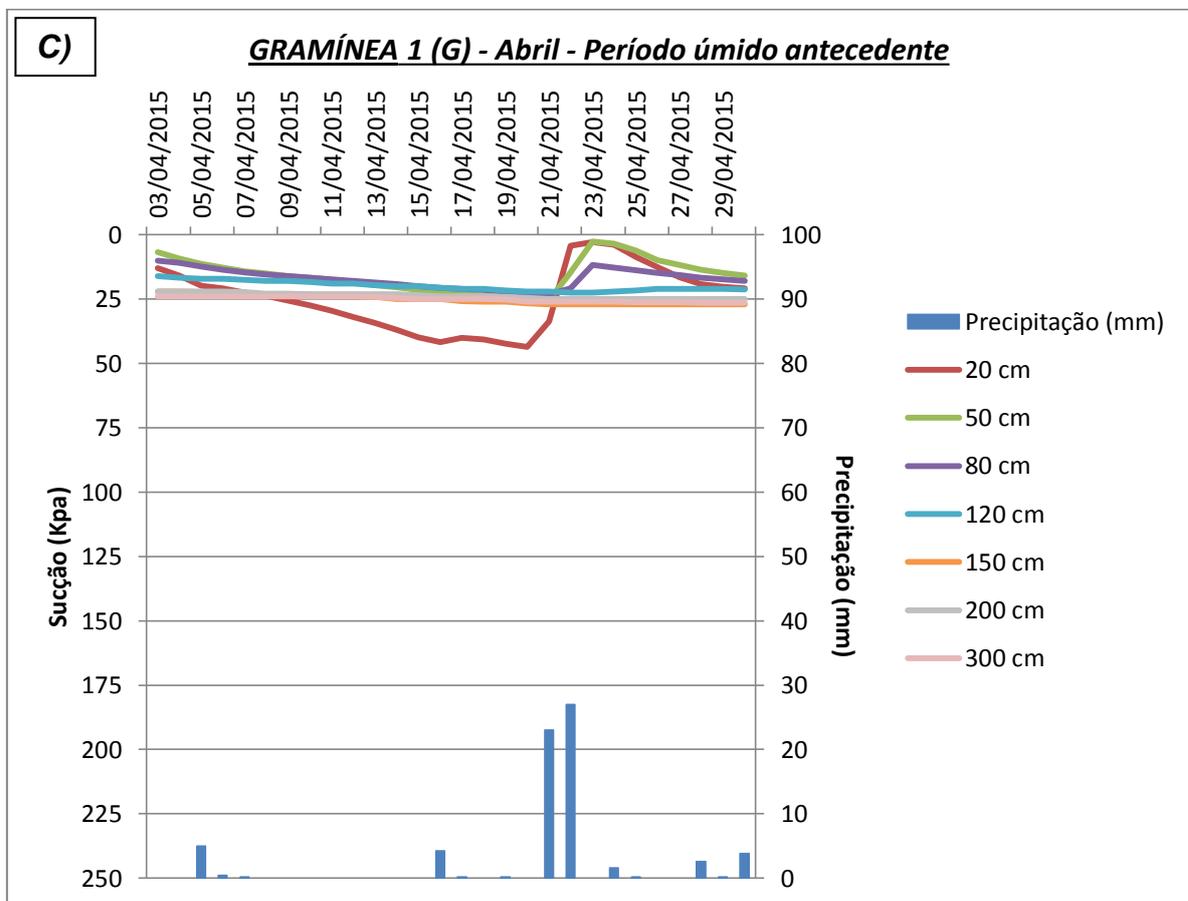
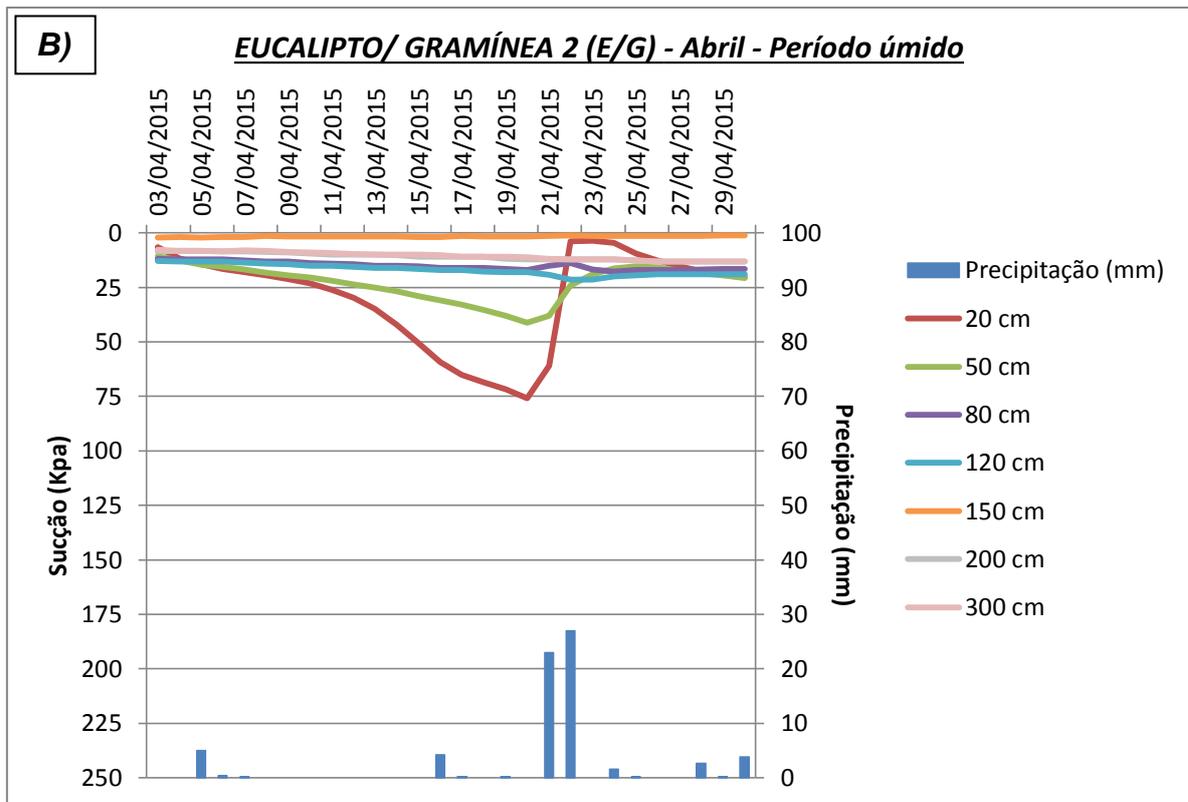


Figura 47: Valores diários de sucção e de precipitação para as três estações, considerado como o período úmido antecedente.

No mês de abril referente ao período úmido antecedente, observa-se oscilações significativas nos sensores instalados a 0,50 m, 0,80m e 1,50m em resposta a dois eventos de chuva diário mais forte (acima de 20 mm) nos dias 21 e 22 de Abril. Nestas profundidades os sensores responderam rapidamente, principalmente os de 0,50 e 1,50 m diminuindo os valores de sucção do solo. Ressalta-se, mais uma vez, a possibilidade de favorecimento da raiz na percolação da água por caminhos preferenciais.

Em contrapartida, os valores representados pela estação na gramínea teve resposta significativa nos primeiros 0,20 m, seguido pelas profundidades de 0,50 e 0,80m. Nota-se na Figura X-B, referente à estação da gramínea na vertente oposta ao eucalipto, os baixos valores de sucção constante na profundidade de 1,50m, praticamente na saturação, variando a sucção entre -2 Kpa e -1 Kpa. Considerando um período úmido antecedente, e como visto pelo comportamento médio de sucção, a gramínea pode apresentar a tendência de armazenar umidade a profundidades maiores (1,50m; 2,00m e 3,00m). Entretanto, na profundidade de 1,50m na encosta da gramínea sem influência do eucalipto, os valores de sucção a 1,50m foram comparativamente superiores, ou seja, o solo estava mais secos do que na vertente oposta ao eucalipto. Outra hipótese a ser considerada, vai ao encontro da levantada sobre a percolação do eucalipto na profundidade de 1,50m, formando uma zona úmida na base do sistema radicular e criando uma frente de umedecimento para a vertente oposta, e por este motivo os sensores localizados na gramínea a 1,50m estarem praticamente saturados. Essa consideração, entretanto, só poderia ser assegurada por um período maior de monitoramento, onde poderia ser verificada uma tendência.

Assim como para o período úmido antecedente, foram analisadas também os valores de sucção diários com antecedente de um período seco (Figura 48), a tabela com os valores podem ser vistos também no Anexo II. Para este período foram consideradas a baixo índice pluviométrico bastante longo, referente aos meses antecedentes de: Junho (15 mm), Julho (16 mm), Agosto (21,8 mm), Setembro (76 mm) e Outubro (6 mm).

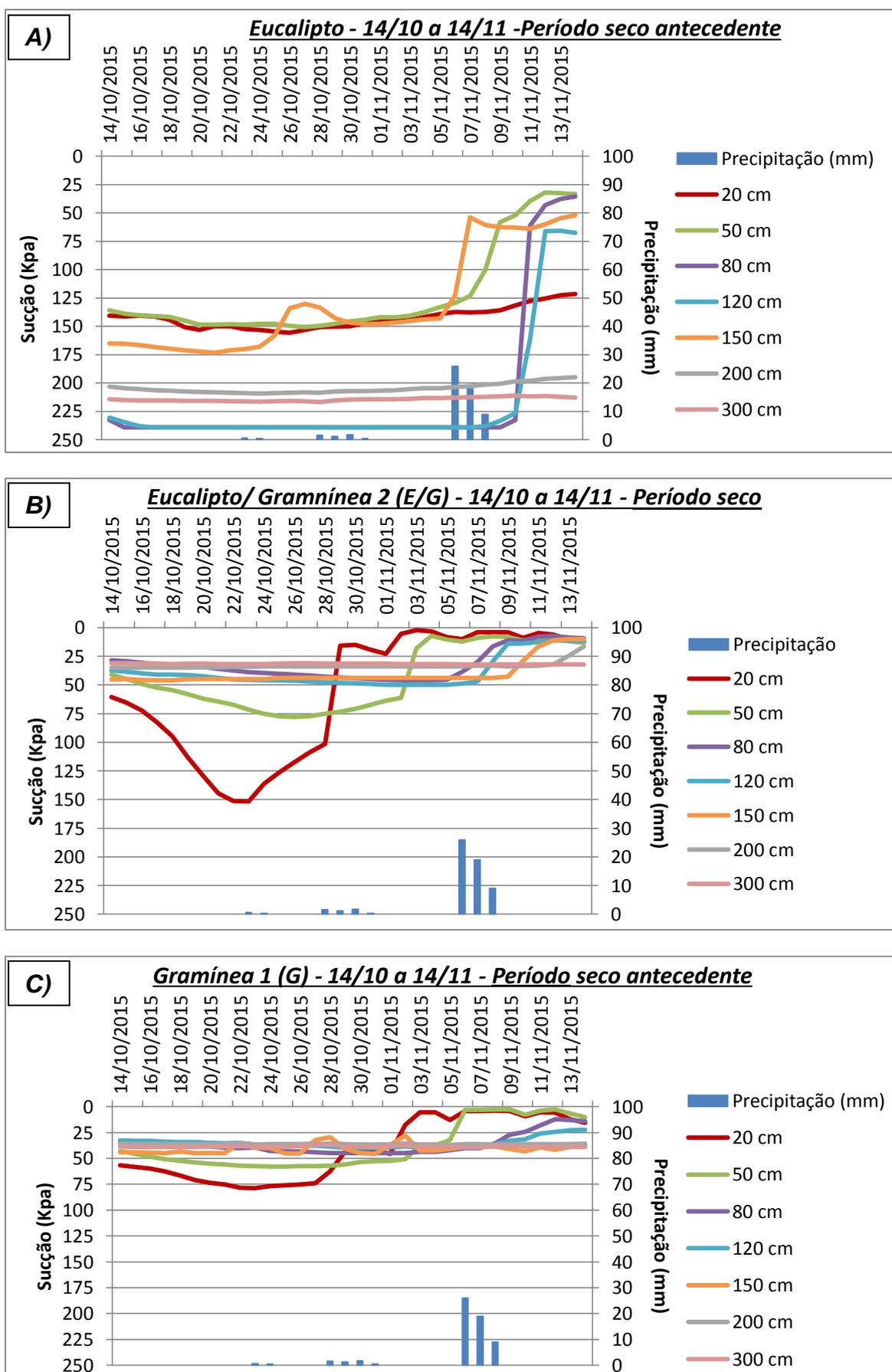


Figura 48: Valores diários de sucção e de precipitação para as três estações, considerado o período seco antecedente.

Como esperado, o comportamento próximo a superfície (0,20m e 0,50m) nas estações localizadas na gramínea apresentaram maior flutuação, acompanhando a distribuição das chuvas, tanto em escala diária quanto mensal. No eucalipto, a sucessão de chuvas nos dias 6, 7 e 8 de Novembro (total 54 mm para estes três dias) tiveram respostas nos sensores mais profundos (0,80; 1,20; 1,50) que estavam muito secos anteriormente, devido ao período de estiagem. Entretanto, os sensores de maior profundidade (a 2,00m e 3,00m) não responderam a esta chuva, não havendo variação. Estima-se que apenas um maior acumulado de chuva, ou chuva mais intensa, seja capaz de responder a estas profundidades, entretanto neste período monitorado (Abril a 14 de novembro de 2015) não houve chuvas significativas, onde as chuvas > 40 mm só ocorreram na segunda quinzena de novembro e no mês de dezembro, onde o monitoramento já havia sido interrompido.

### **6.7 – Levantamento das voçorocas na bacia do rio Sesmaria**

O levantamento de voçorocas na bacia do rio Sesmaria foi realizado através de duas imagens orbitais em dois períodos: no ano de 2003 (Ikonos – Google Earth) e o ano de 2012 (QuickBird – Projeto Sesmaria), no intuito de investigar as mudanças de atividade dessas voçorocas. Observou-se que no ano de 2003, das 28 voçorocas mapeadas, 43% encontravam-se estáveis e 57% ativas. Já no ano de 2012, houve um aumento considerável de voçorocas ativas. Do total mapeado (38 voçorocas), 32% estavam estáveis e 68% ativas (Figura 49).

Um levantamento similar feito pelo estudo de Leal (2009) na bacia do rio Piracema, afluente do rio Bananal, mostrou que parte das voçorocas mapeadas (total de 128), 28% estavam em fase ativa (35), onde a bacia apresentava uma densidade da ordem de 0,93 voçorocas por hectare. Apesar do menor número de voçorocas mapeadas na bacia do rio Sesmaria, a quantidade de voçorocas ativas é alta, onde destaca-se também a relevância destas erosões na elevada carga de sedimentos exportados para os canais coletores, como visto pelo levantamento da CSS produzida (60,2 g/ litro) durante um evento de chuva

mais intensa. Outra informação a ser considerada, diz respeito aos maiores índices pluviométricos detectados no ano de 2010, onde muitas erosões, principalmente as superficiais (sulcos erosivos), foram desencadeadas.



Figura 49: Levantamento de voçorocas ativas e estáveis levantadas na bacia do rio Sesmaria em dois momentos: 2003 e 2012.

Em comparação entre as duas bacias, é importante destacar que o gradiente da bacia do rio Sesmaria ( $G = 0,055$ ) é maior do que a bacia do rio Bananal, que apresenta um gradiente de  $0,040$  (Figuras 50 e 51). Em termos das suas respectivas dinâmicas hidrológicas, a diferença nesse parâmetro pode possuir diferentes significados para o escoamento das águas, da eficiência do processo de drenagem, e do ajuste do modelado do relevo. É possível que pelo maior gradiente apresentado pela bacia do rio Sesmaria, sua dinâmica hidro-erosiva ainda esteja em curso, o que evidencia o crescimento de voçorocas ativas no ano de 2012 em comparação com 2003.

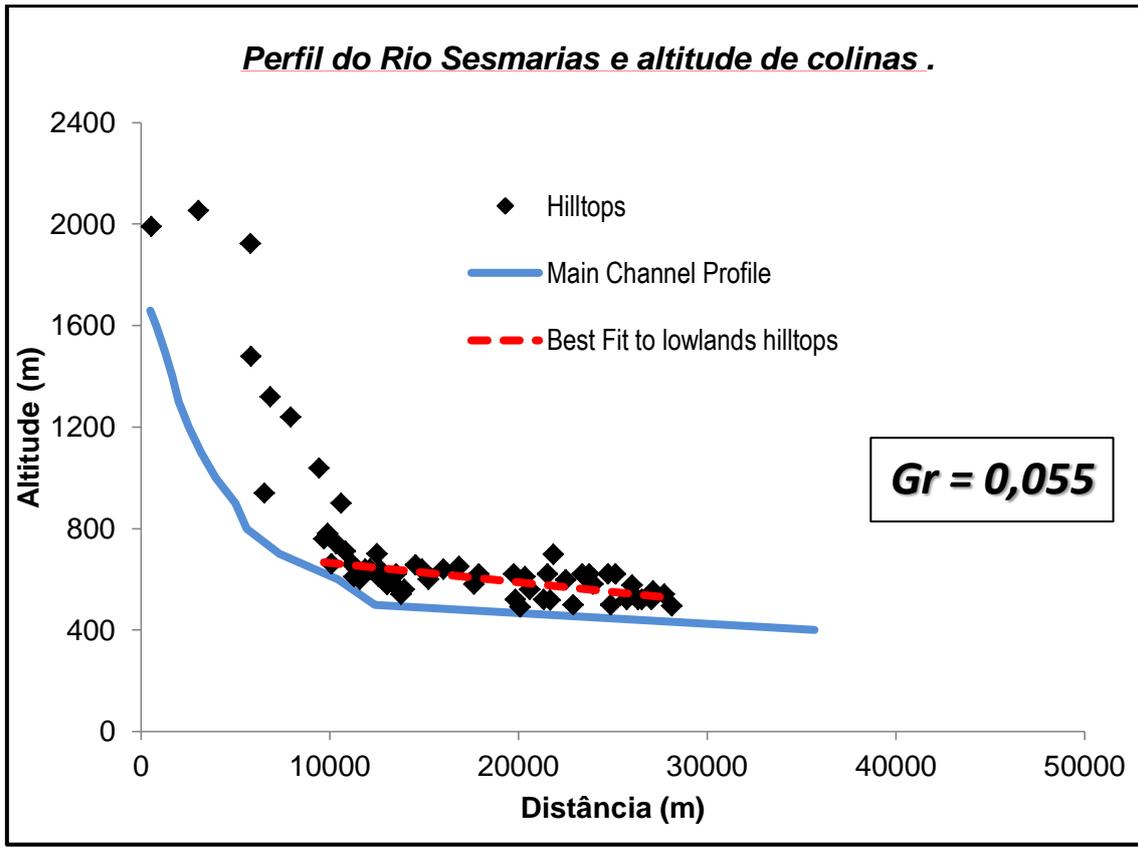


Figura 50: Perfil do rio Sesmarias, altitude de colinas e gradiente da bacia.

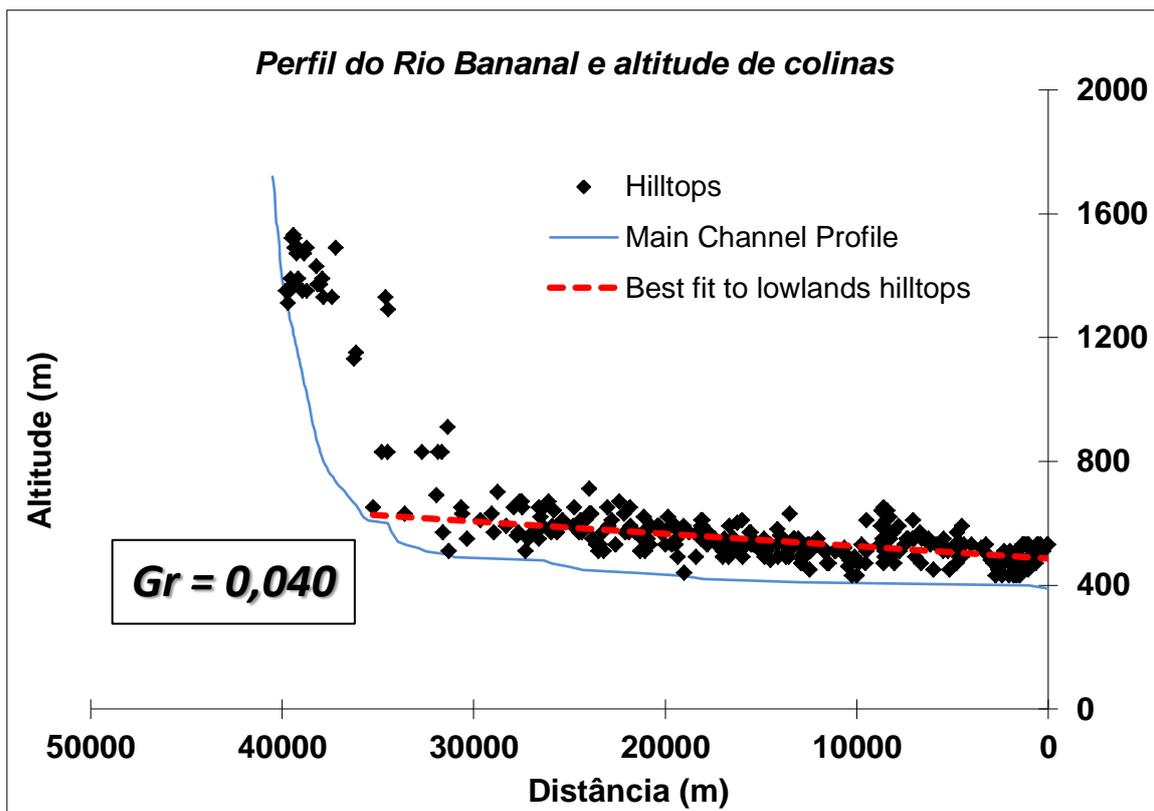


Figura 51: Perfil do rio Bananal, altitude de colinas e gradiente da bacia.

Em síntese, apenas as voçorocas monitoradas neste estudo encontravam-se próximas a plantios de eucalipto, além de uma voçoroca localizada a montante desta área em uma fazenda também com presença de eucalipto. Com base no relato de funcionários desta fazenda, os plantios não se destinam a indústria de celulose, como no caso da fazenda Caximonan, da Fibria. É interessante observar na Figura 52 que o avanço desta voçoroca (que encontrava-se ativa no levantamento do ano de 2012) segue o alinhamento do plantio de eucalipto.



Figura 52: Plantios de eucalipto e evolução de voçorocas na bacia do rio Sesmaria localizada em outra fazenda a montante da bacia. Em detalhe, raiz de eucalipto (aproximadamente 1,5 m de profundidade) na cabeça do dígito de uma voçoroca em outra localidade da bacia do rio Sesmaria. Nota-se a cabeça do dígito da erosão avançando em direção ao alinhamento do plantio de eucalipto.

## **7) CONCLUSÕES**

A análise do histórico de evolução das duas voçorocas levantou hipóteses sobre as repercussões da introdução da silvicultura do eucalipto sobre áreas já degradadas pela pastagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. Devido a crescente expansão destes plantios e de questionamentos acerca do tema, torna-se fundamental a discussão acadêmica e o desenvolvimento de estudos científicos que avaliem as possíveis implicações hidro-erosivas, socioeconômicas e ambientais destas mudanças.

Este trabalho verificou taxas máximas de crescimento dos dígitos das voçorocas da ordem de 1,60 metros por mês no período monitorado, representando uma média de expansão de 12 metros por ano. De acordo com um levantamento feito por Bull & Kirkby (1997) sobre a média das taxas de expansão remontante das cabeças das voçorocas em diferentes estudos, indicou que estas variam tanto espacialmente quanto temporalmente com uma taxa variando da ordem de 0,125 a 6 metros por ano. Com relação a estes dados, pode-se verificar comparativamente que a taxa correspondente à Voçoroca 01 apresenta o dobro desta média, demonstrando, portanto, a capacidade de produção e transporte de sedimentos destas cabeceiras. A partir deste trabalho foi possível aplicar métodos precisos para o monitoramento de voçorocas que vêm recebendo cada vez mais destaque em estudos com esta temática.

Em relação ao monitoramento de sucção comparando áreas de pastagem com e sem influência do eucalipto, e também o entendimento da percolação da água dentro destes plantios, foi observado que as raízes desempenham papel fundamental atuando como vias preferenciais de percolação, formando na base

destas raízes uma zona úmida que poderia influenciar na umidade verificada na encosta adjacente com cobertura de gramínea. Outra resposta a ser considerada é a capacidade das áreas com cobertura de gramínea em preservar a umidade em profundidades maiores (2,00m e 3,00m). Já nos primeiros centímetros a sucção apresentou valores com grande oscilação, devido principalmente a evaporação da água.

Nas voçorocas analisadas foi observado que a exfiltração da água subterrânea ocorre mesmo nos períodos de estiagem na voçoroca 1. O que evidencia o papel do aquífero e da chuva regional no desenvolvimento destas feições. Entretanto, destaca-se a influência dos eventos de chuva no recuo das cabeças dos dígito dos canais de voçorocamento, assim como na remoção e transporte dos sedimentos produzidos, atingindo taxas da ordem de 60g/ litro, evidenciando também a sua capacidade de produção e exportação de sedimentos para os canais coletores à jusante. Considerando eventos de maior índice pluviométrico, é importante considerar as implicações de caráter hidro-erosivo, ecológico e econômico que estas voçorocas, assim como outras na bacia, podem promover como a perda de área produtiva, a degradação do solo, o assoreamento dos canais fluviais e o favorecimento à ocorrência de enchentes, como é visto no centro urbano da Resende, no exutório do rio Sesmarias, onde conflui com o rio Paraíba do Sul. Estas erosões certamente constituem-se em novos vetores de alteração ambiental em uma região que já se encontra historicamente degradada por sucessivas alterações de uso da terra, aliado ao crescimento verificado pelo levantamento de voçorocas ativas na bacia do rio Sesmaria no ano de 2012, em comparação ao ano de 2003.

Como destacado por Sato (2012), a extensão dos plantios de eucalipto na bacia do rio Sesmaria representa pequenas alterações hidrológicas, uma vez que apenas 3% da área total da bacia foram convertidas para este novo tipo de uso do solo. A modelagem histórica produzida no seu estudo indica que esta conversão resultou em alterações no balanço hídrico da ordem de 1%. Entretanto, deve ser considerada a expansão dos plantios na bacia do rio Sesmaria, assim como no MVRPS, uma vez que a demanda por produtos de celulose vem aumentando, e as implicações na dinâmica hidrológica e erosiva resultantes desta alteração.

## 8) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHNERT, F. (1998) Introduction to Geomorphology. Ed by Arnold, London: 352 p.
- ANDERSON, M.G e BURT, T.P (1978) The role of topography in controlling throughflow generation. *Earth Surface Process and Landforms*, 3, 331-344p.
- AUGUSTIN, C.H.R.R e ARANHA, P.R.A. (2006) Pipping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geomorfologia - Ano 7, nº 1* (2006)
- AVELAR, A.S. e COELHO NETTO, A.L. (1992a): “Fraturas e desenvolvimento de unidades geomorfológicas côncavas no médio vale do rio Paraíba do Sul.” *Rev. Bras. Geociências* 22(2): 222-227.
- AVELAR, A.S., COELHO NETTO, A.L. (1992b): “Fluxos d’água subsuperficiais associados à origem das formas côncavas do relevo” 1º COBRAE: 709-719.
- BACELLAR, L. (2000). Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na Bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto –MG. Tese de doutorado – COPPE UFRJ, 226p.
- BERGER & AGHASSY, J. (1984). Near-surface groundwater and evolution of structurally controlled streams in soft sediments. In: LaFleur, R.G., ed., *Groundwater as a geomorphic agent*. Boston, Allen and Unwin, p. 18-58.
- BULL, L.J. & KIRKBY, M.J. (1997) Gully processes and modelling. *Progress in Physical Geography*, 21(3): 354-374.
- CAMBRA, M.F.E.S (1995). Extensão da rede de canais no médio vale do rio Paraíba do Sul: condicionantes morfológicos e lito-estruturais. Monografia de graduação, IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro.

- CHORLEY, R.J. (1962). *Geomorphology and the General Systems Theory*. U.S. Geol. Survey Prof. Paper. 500-B: 10p.
- COELHO NETTO, A. L. (2003): "Evolução de cabeceiras de drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural". *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Ano 4, Nº 2 (2003) 69-100p.
- COELHO NETTO, A. L & FERNANDES, N. F. (1990) Hillslope erosion-sedimentation and relief inversions in SE Brazil: Bananal SP. *IAHS Publ.* 192: 174-182. *Proceedings of the Intern. Symp. on "Research Needs and Applications to Reduce Erosion & Sedimentation in Tropical Steeplands"*. Suva, Fiji.
- COELHO NETTO, A.L. (1985): "Surface hydrology and soil erosion in a tropical mountainous rainforest drainage basin, Rio de Janeiro." Phd thesis, Katholieke Univ. Leuven, Belgium, 185p
- COELHO NETTO, A.L. (1997) Voçorocamento na bacia do rio Bananal. CD do Congresso Brasileiro de Solos, no Rio de Janeiro.
- COELHO NETTO, A.L. (1999): "Catastrophic Landscape Evolution in a Humid Region (SE Brazil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes." *Supplementi di Geografia* 162 (III), Tomo 3: 21-48.
- COELHO NETTO, A.L.(2005) Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: Guerra, A., Cunha, S. (Orgs.) *Geomorfologia, uma atualização de bases e conceitos 6ª edição*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p. 93-144
- DANTAS, M.E. (1995): "Controles naturais e antropogênicos na sedimentação fluvial, espacialmente não uniforme, na bacia do rio Bananal (SP/RJ): médio vale do rio Paraíba do Sul." *Dissertação (mestrado) PPGG/IGEO/UFRJ*. 142p.
- DANTAS, M.E; FERNANDES, L.F.R; AVELAR, A.S; COELHO NETTO. A.L. (2012) Caracterização geomorfológica da bacia do rio Sesmarias (SP/RJ) – Médio vale do rio Paraíba do Sul. In: *Anais Geotecnologias e mapeamento geomorfológico, IX Simpósio Nacional de Geomorfologia*. 2012.
- 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.

- DIETRICH, W.E., MONTGOMERY, D., COELHO NETTO, A.L., MOURA, J.R.S. (1991): "Evidence for regional aggradation starting in the Early Holocene in southeastern Brazil and for degradation due to deforestation." Am. Geoph. Union, Fall Meet., San Francisco, USA/EOS, vol. 70(43):1124.
- DUNNE, T. (1970) Runoff production in a humid area. US Department of Agriculture Report ARS 41-160.
- DUNNE, T. & LEOPOLD, L.B. (1978). Water in Environmental Planning. W.H Freeman&Co. New York. 818p.
- DUNNE, T. (1980) Formation and controls of channel networks. Prog. Phys. Geogr. 4,211-239.
- DUNNE, T. (1990) Hydrology, mechanics and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. In Higgins C.G. & Coates, D.R. (Eds), Groundwater Geomorphology, Geol. Soc. Am. Sp. Paper 252: 1-28.
- EIRADO SILVA, L.G.; DANTAS, M.E. & COELHO NETTO, A.L. (1993) Condicionantes lito-estruturais da formação de níveis de base locais (knickpoints) e implicações geomorfológicas: médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ)". Anais do III Simp. Geol. Do Sudeste/ SBG Rio de Janeiro, p96-102, 1993.
- FERNANDES, N. F., COELHO NETTO, A.L. e LACERDA, W. A. (1994) Subsurface hydrology of layered colluvium mantle in unchanneled valleys: southeastern Brasil. Earth Surface Process and Landforms, vol. 19: 609-626 p.
- FONSECA, A.P. (2006): "Análise de mecanismos de escorregamento associados a voçorocamento em cabeceiras de drenagem na bacia do rio Bananal (SP/RJ)." Tese (Doutorado), COPPE/UFRJ. 348p.
- FREIRE ALLEMÃO, A.V. (1997): "Recarga e drenagem em solos florestados: o papel dos sistemas radiculares." Dissertação (mestrado) PPGG/IGEO/UFRJ. 136p.
- FREEZE, R. A & CHERRY, J. A (1979). Groundwater. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall Inc., 604 p,
- FURLANI, G.M. (1980) Estudo geomorfológico das boçorocas de Casa Branca, São Paulo. Dissertação de Mestrado. Dept de Geografia – FFLCH/ USP.
- GLOCK, W.S. (1931) The development of drainage systems: a synoptic view. Geogr. Rev. 21:475- 482.

- GUERRA, A.J.T (1997). Ravinas: Processos de formação e desenvolvimento. Anuário do Instituto de Geociências - Volume 20 - pp. 9-26 - 1997
- GUERRA, A.J.T. (1994): Processos erosivos nas encostas”, in Geomorfologia; uma atualização de bases e conceitos, ( Guerra, A.J.T;Cunha, S.B, orgs.)Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, pp.149-209.
- HACK, J. T. & GOODLETT, J. C. (1960). Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 347, 66p.
- HEILBRON M., Mohriak W.,Valeriano C.M., Milani E., Almeida J.C.H., Tupinambá M. (2000). From Collisional to Extension: The Roots of The Southeastern Continental Margin of Brasil. *In: Mohriak W.U. & Talwani M. (eds.)Geology & Geophysics of Continental Margin*. AGU Geophysical Monograph, p.1-32.
- HEILBRON, M. (1995) O Segmento Central da Faixa Ribeira: síntese geológica e ensaio de evolução geotécnica. Tese de Livre Docência. DGEL/UERJ, p. 110.
- HEWLETT, J.D. (1982): “Principles of forest hydrology” University of Georgia Press, USA.
- HIGGINS, C. G. (1984) Piping and sapping: Development of landforms by groundwater outflow, in LaFleur, R. G (ed), Groundwater as a geomorphic agent, Boston Allen and Unwin, p.18-58.
- HIGGINS, C.G (1990) Gully desenvolvimento, with case study by Hill, B.R, and Lehre, A.K, in Higgins, C.G and Coeates, D.R, eds., Groundwater geomorphology; The role of subsurface water in Earth-Surface Processes and Landforms: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper. 252p.
- HORTON, R.E. (1933): “The role of infiltration on the hydrologic cycle.” Trans. Am. Geophys. Union 145: 446-460.
- HORTON, R.E. (1945): “Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrological approach to quantitative geomorphology.” Bull. Geol. Soc. Am. 56:275-330.
- HOWARD, A.D. (1971) Simulation of stream network by headward growth and branching. Geogr. Anal. 3: 29-50.

- JANSEN, R.C. (2001): "Distribuição dos sistemas radiculares em encostas florestadas e sua influência sobre a infiltração." Dissertação (mestrado) PPGG/IGEO/UFRJ. 118p.
- KARMANN, Ivo. (2000) Ciclo da água: água subterrânea e sua ação geológica. In TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, Maria Cristina Motta; FAIRCHILD, Thomas Rich e TAIOLI, Fabio (eds.). Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 114 – 138.
- KIRKBY, M.J. & CHORLEY, R.J., (1967) Throughflow, overland flow and erosion: Internat. Assoc. Sci. Hydrology Bull., v. 12, n°. 3, pp. 5-21.
- LEAL, P.J.V. (2009). Crescimento de redes de canais e pirataria de água subterrânea em vales de cabeceiras de drenagem: modelagem numérica tridimensional. Tese (Doutorado), PPGG/ UFRJ, 246p.
- LIMA, W.P. 1996. Impacto ambiental do eucalipto. São Paulo: EDUSP (2a ed.), 301p.
- LIMA, W.P.; JARVIS, P.; RHIZOPOULOU, S. (2003): "Stomatal responses of Eucalyptus species to elevated CO2 concentration and drought stress." Scientia Agricola 60(2): 231-238.
- MEIS, M.R.M. & Monteiro, A.M.F. (1979). Upper Quaternary ramps: Doce river valley, SE Brazilian Plateau. Zeit. Geomorph., 23: 132- 151.
- MELOS, A.R. , SATO, A.M. , COELHO NETTO, A.L. (2011): "Produção, estoque e retenção hídrica da serrapilheira em encosta sob plantio de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis no médio vale do rio Paraíba do Sul". Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ, v. 33, p. 66-73, 2010.
- MONICO, J. F. G. (2000) Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações. 1ª ed. São Paulo: Unesp, 2000a. p 287.
- MONTEZUMA, R.C. (2005): "Produção e reabilitação funcional do piso florestal em clareira de deslizamento – Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro." Tese (Doutorado), PPGG/IGEO/UFRJ. 294p.
- MOTA, P. O. (2014) "Influência da Cobertura do Solo, Propriedades Físicas e Topografia na Hidrologia dos Solos – Caetité (BA)" Dissertação (Mestrado) – PPGG/ UFRJ.

- POESEN, J., NACHTERGALE, J., VERTSTRAETEN, G., VALENTIN, C., (2003). Gully erosion and environmental change. Importance and research needs. *Catena* 50 (2–4), 91 – 134.
- POORE, M.E.D , FRIES C. (1985). The ecological effects of Eucalyptus. FAO: Rome,90.
- PRICE, M. (1985). *Introducing Groundwater*. Chapman & Hall/CRC, Oxfordshire, UK.
- ROCHA LEÃO, O.M. (2005): “Evolução regressiva da rede de canais por fluxos de água subterrânea em cabeceiras de drenagem: bases geo-hidroecológicas para a recuperação de áreas degradadas com controle de erosão.” Tese (Doutorado), PPGG/IGEO/UFRJ. 247p.
- ROCHA-LEÃO, O.M.; MORAES SILVAA, T.R.; LEAL, P., LACERDA, W.A. & COELHO NETTO, A.L. (2001) Relações entre propagação de voçorocamento em cabeceiras de drenagem e movimentos de massa em divisores topográficos, Bananal, SP. Anais, III COBRAE/ABMS-RJ:141-149.
- SATO, A. M.(2012) Influência do plantios de eucalipto na hidrologia e erosão: Bacia do rio Sesmaria, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. Tese (Doutorado) PPGG/IGEO/UFRJ. 177 p.
- SATO, A.M. (2008): “Respostas geo-hidroecológicas à substituição de pastagens por plantações de eucalipto no médio vale do rio Paraíba do Sul: a interface biota-solo-água”. Dissertação (Mestrado), PPGG/UFRJ. 160p.
- SCHUMM, S.A., BOYD, K.F., WOLFF, C. G e SPITZ, W.J (1995). A groundwater sapping landscape in the Florida Panhandle. *Geomorfology*, V.12, 281-297p.
- SILVEIRA, C.S. (2004): “Infiltração e transporte de solutos na zona não saturada de um solo florestal – Parque Nacional da Tijuca, RJ.” COPPE/UFRJ. 217p.
- TEIXEIRA, W., TOLEDO, M. FAIRCHILD, T;TAIOLI, F (2008). Decifrando a Terra. Ed. Companhia Nacional/USP/Oficina de Textos, 2008 558p.
- TOOD, D. K. (1959). *Ground water hydrology*. John Wiley & Sons, Inc. N.Y.
- VALENTIN, C.; POESEN, J e LI, Y (2005). Gully erosion: impacts, factors, and control. *Catena* 63: 132-153, 2005.

VIANNA, L.G.G., SATO, A.M., FERNANDES, M.C., COELHO NETTO, A.L. (2007). Fronteira de expansão dos plantios de eucalipto no geocossistema do médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ). Taubaté, Brasil, IPABHi, 367-369.