

**Monitoramento Hidrológico em Voçoroca Submetida a práticas de RAD: Morro do Radar, Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão/  
Antônio Carlos Jobim**

**Hugo Portocarrero**

*Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Geografia.*

Orientadores: Nelson Ferreira Fernandes

Alúcio Granato de Andrade

Rio de Janeiro  
Julho de 2004

**Monitoramento Hidrológico em Voçoroca Submetida a práticas de RAD: Morro do Radar, Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão/ Antônio Carlos Jobim**  
**Hugo Portocarrero**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geografia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Aprovada por:

---

Prof. Dr. Nelson Ferreira Fernandes (Orientador – UFRJ)

---

Prof. Dr. Aluísio Granato de Andrade (Co-Orientador – Pesquisador Embrapa Solos)

---

Prof. Dr. Evaristo de Castro Junior (UFRJ/ Dep<sup>to</sup> de Geografia)

---

Prof. Dr. André de Souza Avelar (UFRJ/ Dep<sup>to</sup> de Geografia)

---

Prof. Dr. José Tavares Araruna Junior (PUC-Rio/ De<sup>pto</sup> de Eng. Civil)

---

Prof. Dr. Tácio Mauro Pereira de Campos (Suplente - PUC-Rio/ De<sup>pto</sup> de Eng. Civil)

Rio de Janeiro

Julho de 2004

**Ficha Catalográfica**

Portocarrero, Hugo

Monitoramento Hidrológico em Voçoroca Submetida a práticas de RAD:  
Morro do Radar, Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão/ Antônio  
Carlos Jobim - Rio de Janeiro: UFRJ/ PPGG, 2004.

xi, \_\_\_f.: il.; 31 cm.

Orientadores: Nelson Ferreira Fernandes

Alúísio Granato de Andrade

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ IGEO/ Programa de Pós-graduação em  
Geografia, 2004.

Referências Bibliográficas: f. \_\_\_\_\_.

1. \_\_\_\_\_.

2. \_\_\_\_\_.

A todos engajados na preservação e recuperação dos recursos naturais de nosso planeta.

## Agradecimentos

Ao prof. Nelson F. Fernandes, pela orientação eficiente e constante incentivo durante a execução desta tese.

Ao meu grande amigo e coorientador Aluísio Granato de Andrade, por suas idéias, discussões, apoio e pelas inúmeras “portas abertas” durante este período de luta.

Ao prof. Tácio Mauro Pereira de Campos (PUC-Rio), pelas contribuições, discussões, valiosas aulas e pela viabilização deste monitoramento através do apoio financeiro do PRONEX.

Ao estagiário Diogo Carvalho Ângelo, pela sua grande contribuição e dedicação nos momentos mais difíceis. Aos estagiários Gustavo e Georgia, por suas contribuições, e pelo ambiente saudável gerado durante o convívio com ambos.

À André dos Santos Barros, pelo seu cuidadoso monitoramento das estações tensiométricas e pluviômetros ao longo de todo este período.

Ao prof. Evaristo de Castro Jr., pelas inúmeras e valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento da dissertação.

Ao prof. Marcus Bassis (URFFJ) e à Prof. Maria Naíse, pelas contribuições no início da dissertação.

À minha amiga e inesgotável fonte de conhecimentos Andréia Paula, por todas as suas valiosíssimas contribuições, e por toda a sua atenção, carinho e dedicação. Valeu.

A toda a equipe do NEMPHERS, com a qual tive a oportunidade e felicidade de conviver. Muito obrigado por todas as vezes em que cada um com prazer me ajudou.

A toda a equipe do laboratório de física dos solos da Embrapa Solos (Flávio, Rogério, Leocádio, Pablo, Julho) pelo enorme auxílio durante as análises de laboratório, e pela confiança e amizade depositadas. Jurássico...

A todo o pessoal do grupo do Aluísio, pelos momentos de alegria e trabalho compartilhados.

A todo o pessoal da Embrapa, pelo convívio agradável e companheirismo.

A todo o pessoal do setor de Meio Ambiente da INFRAERO, pelas valiosas excursões técnicas, pelo grande auxílio e pela confiança depositada em meu trabalho.

À equipe de topografia responsável pela execução do criterioso levantamento da área (Alessandro e Reinaldo).

À Embrapa Solos, INFRAERO, PRONEX, CNPQ e CAPES pelo apoio financeiro.

## RESUMO

### **Monitoramento Hidrológico em Voçoroca Submetida a práticas de RAD: Morro do Radar, Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão/ Antônio Carlos Jobim Hugo Portocarrero**

**Orientadores: Nelson Ferreira Fernandes**

**Alúcio Granato de Andrade**

O desenvolvimento desta dissertação está vinculado ao projeto de RAD (recuperação de áreas degradadas) do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, sendo seu objeto o processo de recuperação da voçoroca do Morro do Radar. Através da realização de uma investigação do comportamento hidrológico desta voçoroca após a implantação do projeto, buscou-se fornecer informações que possam constituir um subsídio à avaliação dos efeitos das práticas adotadas.

A metodologia utilizada compreendeu seis etapas: avaliação das variações da topografia local; monitoramento da precipitação; monitoramento da intercepção das chuvas promovida pelas copas arbóreas e pela serrapilheira; avaliação das propriedades físico-hídricas do solo em diferentes profundidades; avaliação dos potenciais matriciais e das cargas totais nos solos nas mesmas profundidades, através de gráficos e construção de mapas de equipotenciais; avaliação da relação entre os condicionantes locais e o desempenho das práticas de RAD.

Os valores de intercepção pelas copas arbóreas e pela serrapilheira revelaram uma proteção eficaz do solo contra o impacto direto das águas pluviais. Com relação à zona de saturação, observou-se que a umidade antecedente está condicionando o padrão de expansão. Foram observados valores de sucção no solo menores que a capacidade de campo (33kPa) durante os períodos de chuva, especialmente em posições que favorecem acúmulo de umidade, sendo que a drenagem da água gravitacional termina após os primeiros dias de estiagem, quando o fluxo perde grande parte de sua velocidade, reduzindo-se a sua erosividade.

As informações geradas nesta dissertação permitem afirmar que as práticas de RAD adotadas foram bem sucedidas. O diagnóstico das propriedades do solo e o monitoramento dos fluxos se mostraram ferramentas úteis nesta avaliação.

Foi observada grande influência dos declives sobre a recuperação, indicando a influência do planejamento da reconformação. As áreas com menores declives apresentaram recuperação mais rápida, o que se relacionou tanto ao estabelecimento da cobertura vegetal e à incorporação de serrapilheira, quanto à própria dinâmica hidro-erosiva inerente.

Palavras-chave: voçoroca, hidrologia, intercepção, propriedades físico-hídricas, RAD.

Rio de Janeiro

Julho de 2004

**ABSTRACT****Hydrological monitoring in a gully submitted to land reclamation practices: Morro do Radar, Rio de Janeiro International Airport/Galeão Antônio Carlos Jobim****Hugo Portocarrero****Advisors: Nelson Ferreira Fernandes****Aluísio Granato de Andrade**

The development of this dissertation is related to the International Airport's land reclamation project, being its subject an investigation of the reclamation process of Morro do Radar's gully. Through an investigation of the gullies hydrological behavior after the reclamation works, the aim was to present information which can contribute the evaluation of the adopted practices.

The adopted methods included six steps: evaluation of local topography changes, precipitation monitoring; tree canopy and litterfall interception; evaluation of soil physical and hydrological properties, at different depths; hydraulic potentials and pore-pressure monitoring at the same depths, through graphics and equipotentials analysis; evaluation of the relation between local parameters and differential responses to the land reclamation practices.

The tree canopy and litterfall interception values revealed an effective soil protection against the raindrop impacts. With respect to the saturated wedge, it was observed that initial water content is conditioning the expansion pattern. Soil suction values were also lower than field capacity (33 kPa) during rainy periods, particularly in positions that allow water accumulation. The gravitational water is drained after the first dry days, when soil water starts to lose much of its speed and erosivity.

The generated data allowed to state that the reclamation practices were successful. Evaluation of soil physical properties and water monitoring seemed to be useful tools in this evaluation.

It was also encountered along all the discussions a strong relation between slope gradients and reclamation performance, which pointed the importance of an adequate slope reshaping planning. Lower gradient areas presented faster reclamation; this was related not only to vegetation cover development and litterfall incorporation, but also to the inherent hydro-erosive dynamic.

**Kew-words:** gully, hydrology, interception, physical and hydrological soil properties, land reclamation.

Rio de Janeiro

Julho de 2004

## Sumário

1	Introdução .....	1
2	Objetivos .....	4
3	Revisão de conceitos .....	5
3.1	Voçorocas .....	5
3.2	Hidrologia de encosta .....	6
3.2.1	Dinâmica da água no solo .....	6
3.2.2	Classificação da água no solo .....	9
3.2.3	Produção e distribuição dos fluxos em encostas .....	11
3.2.4	Redes de fluxo .....	13
3.2.5	Morfologia dos taludes e distribuição dos fluxos .....	14
3.3	Vegetação, serrapilheira e hidrologia de encosta .....	17
3.4	Recuperação de Áreas Degradadas .....	20
3.4.1	Definições .....	20
3.4.2	Técnicas de revegetação .....	23
3.4.2.1	Especificações técnicas em projetos de RAD .....	25
4	Área de Estudo .....	27
4.1	Localização .....	27
4.2	Clima .....	27
4.3	Solos .....	27
4.4	Geologia .....	29
4.5	Histórico de ocupação e modificação do relevo local .....	29
4.5.1	Topografia e vegetação original .....	29
4.5.2	Ocupação anterior à construção do Aeroporto .....	30
4.5.3	O desmonte do morro .....	31
4.5.4	A formação de áreas degradadas no Morro do Radar .....	32
4.6	Práticas de RAD no Morro do Radar .....	33
4.6.1	Práticas mecânicas .....	34
4.6.2	A Revegetação no Morro do Radar .....	37
4.6.3	A voçoroca do Morro do Radar .....	38
4.7	Avaliação da topografia antes e depois das práticas mecânicas .....	40
4.8	Divisão da voçoroca do Morro do Radar em estações de monitoramento .....	41
5	Metodologia .....	49
5.1	Metodologia para avaliação da topografia antes e depois das práticas mecânicas .....	49
5.2	Avaliação das propriedades físico-hídricas do solo .....	50
5.2.1	Coleta de amostras de solo .....	50
5.2.2	Densidade do solo ( $D_s$ ) [ $\gamma_d$ - peso específico seco ] .....	51
5.2.3	Densidade real das partículas ( $D_p$ ) [G - densidade real dos grãos] .....	51
5.2.4	Porosidade total [n] .....	51
5.2.5	Análise granulométrica (percentual de areia, silte e argila) [sem determinação da curva granulométrica] .....	51
5.2.6	Curva de retenção de umidade .....	51
5.2.7	Macro e Microporosidade .....	52
5.2.8	Condutividade hidráulica saturada [ $k_{sat}$ ou permeabilidade saturada] .....	52
5.3	Monitoramento da precipitação .....	52
5.4	Avaliação da intercepção das chuvas promovida pelas copas arbóreas e pela serrapilheira .....	53
5.5	Monitoramento dos potenciais matriciais e cargas totais .....	55
5.6	Definição das equipotenciais .....	59



5.6.1 Equipotenciais em planta	60
5.6.2 Equipotenciais em perfil	61
5.7 Avaliação da relação entre os condicionantes locais e o desempenho das práticas de RAD nas diferentes estações	62
<b>6 Análise dos Resultados</b>	<b>63</b>
6.1 Avaliação das variações na topografia da área de estudo ao longo do tempo	63
6.2 Precipitação e interceptação pelas copas arbóreas e pela serrapilheira	67
6.2.1 Magnitude das chuvas e interceptação pelas copas arbóreas	68
6.2.2 Divisão das chuvas em classes de magnitude	71
6.2.3 Retenção hídrica potencial e capacidade de interceptação da serrapilheira	73
6.2.4 Avaliação da estocagem da água das chuvas nas copas arbóreas e na serrapilheira	76
6.3 Avaliação das propriedades físico-hídricas dos solos	81
6.3.1 Granulometria	94
6.3.2 Densidade do solo e densidade das partículas	95
6.3.3 Curvas de retenção de umidade	95
6.3.4 Macro-micro e porosidade total	96
6.3.5 Condutividade hidráulica saturada (Ksat)	97
6.3.6 Correlações	99
6.4 Avaliações das cargas totais e potenciais matriciais	101
6.4.1 Potenciais matriciais – período completo	102
6.4.2 Cargas totais - período completo	111
6.4.3 Período 1	112
6.4.3.1 Período 1 – potenciais matriciais	113
6.4.3.2 Período 1 – carga total	118
6.4.4 Período 2	124
6.4.4.1 Período 2 – potenciais matriciais	133
6.4.4.2 Período 2 – carga total	134
6.5 Avaliação das equipotenciais em planta	137
6.5.1 Equipotenciais de carga total	137
6.5.2 Equipotenciais de carga de pressão – expansão e contração da zona de saturação	146
6.5.2.1 Momento 1: expansão da zona de saturação	146
6.5.2.2 Momento 2: contração da zona de saturação	151
6.5.2.3 Momento 3: expansão das zona de saturação	152
6.5.2.4 Avaliação das equipotenciais de cargas de pressão em perfil	153
6.6 Avaliação da relação entre os condicionantes locais e o desempenho das práticas de RAD nas diferentes estações	155
<b>7 Considerações finais</b>	<b>162</b>
<b>8. Bibliografia</b>	<b>168</b>

## Lista de Figuras

Figura 3.1. Sistemas de classificação da água do solo (adaptado de Kiehl, 1979). .....	10
Figura 3.2. Principais rotas dos fluxos d'água nas encostas (adaptado de Dunne & Leopold, 1978). .....	11
Figura 3.3. Unidades geomorfológicas das encostas (de Hack & Goodlet, 1960). A direção dos fluxos é convergente nos fundos de vales ou talvegues (H = hollows; CH = talvegue), divergente nas cristas (N = nose e R = ridge) e retilínea nas encostas laterais (S = side slopes). .....	15
Figura 3.4. Controle da topografia, em planta, no direcionamento dos fluxos. $C1 > c2$ – segmento côncavo em planta, convergente; $c1 < c2$ - convexo em planta, divergente; $c1 = c2$ - plana - mantem a direção dos fluxos (adaptado de Hornberger <i>et. al.</i> , 1998). .....	16
Figura 4.1. Localização da área de estudo. À direita e abaixo - Cidade do Rio de Janeiro (localização do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro Galeão/ Antônio Carlos Jobim); Principal: imagem do satélite IKONOS (2002) do Morro do Radar e detalhe da área da Voçoroca. .....	28
Figura 4.2. Visão geral da Ilha do Governador durante as obras de construção do aeroporto (1971). .....	31
Figura 4.3. Voçoroca vista de longe (A), durante o diagnóstico do estado de conservação da área (ano 2000); englobando o entorno; detalhe da voçoroca (B); a voçoroca após os trabalhos da recuperação, em 2004 (C). .....	33
Figura 4.4. Bacia de captação – abertura de covas para plantio no talude de aterro das bacias de captação. .....	35
.....	35
Figura 4.5. Processo de construção do cordão vegetado a oeste da voçoroca. Acima o enterramento dos restos da canaleta (A). Abaixo (B) a voçoroca vista num sobrevôo de helicóptero observando-se a localização da canaleta enterrada (seta e linha tracejada), e também alcovas de regressão na mesma face. .....	35
Figura 4.6. Terraços construídos com o material raspado pelo trator de esteira, antes (A) e depois (B) da revegetação com grama barbante e capim vetiver. .....	36
Figura 4.7. Ordenamento da drenagem pluvial, com construção de terraços e cordões vegetados (em vermelho e amarelo). O cordão amarelo corresponde à	

proteção realizada na área da voçoroca, visando bloquear os fluxos superficiais para dentro da mesma. Ao final de cada terraço os fluxos convergem para bacias de captação, sendo direcionados por uma canaleta de concreto antiga, que termina em uma pequena escada dissipadora construída também com materiais reaproveitados.....	36
Figura 4.8. Práticas mecânicas na voçoroca do Morro do Radar. Observa-se a voçoroca antes na intervenção, com algumas alcovas de regressão (A); o trator de esteira no início do retaludamento, começando de cima para baixo (B); um trecho com a constituição do solo visivelmente diferenciada (C); o efeito de um dia de chuvas, sobre o solo remobilizado, com o trator concluindo a formação do primeiro talude de corte (D).....	39
Figura 4.9. Processo de revegetação da voçoroca do Morro do Radar. Observa-se a abertura das covas (A); as mudas utilizadas (B); plantio em cova de uma muda de Albizia (C); 1 semana após plantio de Grama Barbante (D); o talude no estágio inicial de desenvolvimento das mudas, com a aplicação da apara de grama e uma esteira de bagaço de cana à direita, na parte mais declivosa do talude (E); o talude com vegetação já desenvolvida no talude de aterro, em julho de 2002 (F) e já ao longo de toda a área, em 2003 (G). Em 2004 já não é mais possível fotografar o talude desta posição em função do crescimento da vegetação.....	40
Figura 4.10. MDT da área da voçoroca em seu estágio mais avançado de degradação, anteriormente ao projeto de RAD.....	42
Figura 4.11. MDT da voçoroca após a realização das práticas mecânicas.....	43
Figura 4.12. Modelos Digitais de Terreno da Voçoroca Antes (A) e Depois (B) das Práticas Mecânicas .....	44
Figura 4.13. Cordão vegetado a montante da estação Bt1, em seu estágio inicial de desenvolvimento. ....	46
Figura 4.14. Aplicação de apara de grama na estação Bt2, no estágio inicial de desenvolvimento das plantas. ....	46
Figura 4.15. Barreira de pneus na estação Bt5. Ao fundo a bateria de tensiômetros, na frente um pluviômetro de solo nivelado utilizando-se como base um tijolo (P5). ....	47
Figura 4.16. Erosão entre a estação Bt4 e Bt11, observando-se a barreira de <i>Pallet</i> quebrada. ....	47
Figura 4.17. Erosão próxima às estações Bt5 e Bt6. ....	48

Figura 4.18. Erosão originada da compactação dinâmica do talude de aterro. Nota-se o afloramento de uma alcova de regressão remanescente, entulhada com o material do talude.....	48
Figura 5.1. Pluviômetro de solo P3, localizado próximo à bateria de tensiômetros Bt3.....	55
Figura 5.2. Visão geral da área de estudo, juntamente com a localização das diferentes baterias de tensiômetros. Observa-se a árvore remanescente, que foi enterrada durante a reconformação do talude. ....	56
Figura 5.3. Esquema das profundidades das baterias tensiométricas. ....	57
Figura 5.4. Obtenção dos potenciais matriciais e cargas totais no solo. ....	59
Figura 5.5. Gráfico gerado pelo Surfer das equipotenciais, pronto para exportação para o Autocad. As linhas constituem as equipotenciais de cargas totais, e os pontos representam as diferentes estações tensiométricas espalhadas pela área. ....	61
Figura 6.1. Modelo Digital de Classes de Declividade antes das práticas mecânicas. ....	64
Figura 6.2. Modelo Digital de Classes de Declividade depois das práticas mecânicas. ....	65
Figura 6.3. Variação da precipitação (volume de chuva em 24hs) durante o período de monitoramento da interceptação. ....	67
Figura 6.4. Variação da interceptação das águas pluviais pelas copas arbóreas (percentual) em função da magnitude das chuvas (mm) nos pontos 1 a 6. A figura 5.2 mostra a localização exata destas estações. ....	69
Figura 6.5. Variação da interceptação das águas pluviais pelas copas arbóreas (percentual) em função da magnitude das chuvas (mm) nos pontos 7 a12. A figura 5.2 mostra a localização exata destas estações. ....	70
Figura 6.6. Retenção hídrica potencial (%) e capacidade de interceptação da serrapilheira (mm). ....	73
Figura 6.7. Análise da interceptação das copas, da serrapilheira e da precipitação terminal para o dia 27-08-03 (2.8mm), relativo à Classe I de magnitude. ....	76
Figura 6.8. Análise da interceptação das copas, da serrapilheira e da precipitação terminal para dias de chuva relativos à Classe II de magnitude de chuva. ....	77
Figura 6.9. Análise da interceptação das copas, da serrapilheira e da precipitação terminal para dias de chuva relativos à Classe III de magnitude de chuva. ....	78

Figura 6.10. Análise da interceptação das copas, da serrapilheira e da precipitação terminal para dias de chuva relativos a Classe IV de magnitude de chuva.....	79
Figura 6.11 Análise da interceptação das copas, da serrapilheira e da precipitação terminal para dias de chuva relativos à Classe V de magnitude de chuva.....	80
Figura 6.12. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt1 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 kPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	82
Figura 6.13. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt2 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 kPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	83
Figura 6.14. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt3 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 KPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	84
Figura 6.15. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt4 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 KPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	85
Figura 6.16. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt5 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 KPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	86
Figura 6.17. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt6 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 KPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	87

Figura 6.18. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt7 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 KPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	88
Figura 6.19. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt8 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 KPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	89
Figura 6.20. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt9 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 KPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	90
Figura 6.21. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt10 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 KPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	91
Figura 6.22. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt11 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 KPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	92
Figura 6.23. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt12 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 KPa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm <sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); cond. hidráulica, em cm/s (E); granulometria, em g/kg (F).....	93
Figura 6.24. Gráfico de correlação entre os parâmetros densidade do solo e porosidade total.....	99
Figura 6.25. Gráfico de correlação entre os parâmetros densidade do solo e macroporosidade.....	99

Figura 6.26. Gráfico de correlação entre os parâmetros condutividade hidráulica saturada e macroporosidade.....	100
Figura 6.27. Gráfico de correlação entre os parâmetros densidade do solo e condutividade hidráulica.....	100
Figura 6.28. Gráfico de correlação entre os parâmetros porosidade total e condutividade hidráulica.....	100
Figura 6.29. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt1, Bt2 e Bt3, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm. ....	103
Figura 6.30. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm. ....	104
Figura 6.31. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm. ....	105
Figura 6.32. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	106
Figura 6.33. Variação da carga de total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt1, Bt2 e Bt3, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm. ....	107
Figura 6.34. Variação da carga de total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm. ....	108
Figura 6.35. Variação da carga de total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm. ....	109
Figura 6.36. Variação da carga total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt10, Bt11e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm. ....	110
Figura 6.37. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt1, Bt2 e Bt3, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	114

Figura 6.38. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	115
Figura 6.39. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	116
Figura 6.40. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	117
Figura 6.41. Variação da carga total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt1, Bt2 e Bt3, para as profundidades 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	119
Figura 6.42. Variação da carga total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	120
Figura 6.43. Variação da carga total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	122
Figura 6.44. Variação da carga total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	123
Figura 6.45. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt1, Bt2 e Bt3, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	125
Figura 6.46. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	126
Figura 6.47. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	127
Figura 6.48. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	128



Figura 6.49. Variação da carga total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	129
Figura 6.50. Variação da carga total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	130
Figura 6.51. Variação da carga total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	131
Figura 6.52. Variação da carga total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.....	132
Figura 6.53 – Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 31/01/2003 (A, B e C) e 01/01/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm. ....	138
Figura 6.54– Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 02/01/2004 (A, B e C) e 03/01/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm. ....	139
Figura 6.55 – Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 04/01/2004 (A, B e C) e 09/01/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm. ....	140
Figura 6.56 – Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 16/01/2004 (A, B e C) e 17/01/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm. ....	141
Figura 6.57 – Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 05/02/2004 (A, B e C) e 07/02/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm. ....	142
Figura 6.58 – Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 08/02/2004 (A, B e C) e 14/02/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm. ....	143
Figura 6.59 – Equipotenciais de carga de pressão, em planta, do dia 09/01/2004 (A, B e C) e do dia 16/01/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm. ....	147
Figura 6.60 – Equipotenciais de carga de pressão, em planta, dos dias 17/01/2004 (A, B e C) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm. ....	148
Figura 6.61 – Equipotenciais de carga de pressão, em planta, dos dias 05/02/2004 (A, B e C) e 07/02/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm. ...	149
Figura 6.62 – Equipotenciais de carga de pressão, em planta, dos dias 08/02/2004 (A, B e C) e 14/02/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm. ...	150

Figura 6.63. Comportamento dos potenciais matriciais em kPa nos dias 16 de janeiro (A) e 7 de fevereiro de 2004 (B), para o transecto das estações Bt1, Bt2, Bt3, Bt4, Bt5, Bt6 e Bt7. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.64. Proximidades da estação Bt1, observando-se o crescimento da vegetação ao redor do cordão vegetado. ....	156
Figura 6.65. Visão geral da estação Bt2. ....	157
Figura 6.66. Estação Bt3. Nota-se a grande quantidade de serrapilheira no local. ....	157
Figura 6.67. Estação Bt6, ao fundo a árvore remanescente. ....	159
Figura 6.68. Proximidades da estação Bt9. ....	160
Figura 6.69. Estação Bt10. ....	161
Figura 6.70. Proximidades das estações Bt11 e Bt12, anteriormente à instalação das baterias de tensiômetros. Observa-se que a vegetação foi implantada posteriormente no talude de corte em relação ao talude de aterro logo abaixo. ....	162

### Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Efeitos da vegetação na estabilidade dos taludes (adaptado de Greenway, 1987). ....	16
Tabela 4.1: Posição na encosta, tipo de material, vegetação e práticas de RAD nas estações tensiométricas. ....	43
Tabela 6.1. Características geomorfológicas e tipo de material encontrados nas diferentes estações tensiométricas. ....	64
Tabela 6.2. Distribuição das chuvas por classes de magnitude. ....	70

## 1 Introdução

A degradação das terras e a erosão dos solos constituem um dos maiores problemas a serem enfrentados pela humanidade, sendo objeto de especial atenção por parte do aparelho estatal e da comunidade científica.

O aparecimento de áreas degradadas é crescente no Brasil, já tendo sido estimado em mais de 100 milhões de hectares (Barroso *et al.*, 2001). Na verdade, este fenômeno já é antigo, sendo o ciclo do Pau-Brasil a primeira grande contribuição deste processo. Um grave problema a ser enfrentado, neste sentido, recentemente, tem sido a questão da expansão e manutenção da rede de transportes, onde se podem incluir a malha viária, ferroviária, hidrovias e até mesmo aeroportos, atividades estas que vem acarretando na formação de extensas áreas degradadas.

Atualmente o grande desafio a ser enfrentado não é mais a dificuldade em se edificar grandes obras, mas sim o de construí-las e mantê-las gerando um mínimo de degradação ambiental. Tal equilíbrio tem sido apontado como uma premissa básica; de fato, como afirmaram enfaticamente Santos *et al.* (1981) a degradação ambiental nos últimos séculos vem gerando uma grande preocupação por parte das autoridades ligadas ao setor de transportes.

Através de Contrato de Prestação de Serviços firmado com a Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária - INFRAERO, a Embrapa Solos vem desenvolvendo um projeto de RAD (recuperação de áreas degradadas) em dezenove aeroportos em diferentes estados do Brasil. Dentre estas áreas cita-se o Morro do Radar, que abriga o sistema de radares do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, atual campo experimental da Embrapa Solos para o aperfeiçoamento e produção de tecnologias de RAD.

Neste talude constatava-se a presença de uma grande voçoroca originada do rompimento da canaleta de crista (drenagem pluvial). Dentre as principais estratégias utilizadas neste projeto, cita-se a utilização de práticas mecânicas e vegetativas de baixo custo.

Existem diversos métodos para o controle de feições erosivas, assim como técnicas de revegetação em áreas degradadas. A compreensão dos mecanismos relacionados e das variáveis envolvidas nestes processos está estreitamente relacionada ao conhecimento hidrológico. De fato, muito já tem sido pesquisada

sobre o papel desempenhado pelas práticas de RAD no ordenamento dos fluxos de água no solo e na contenção de processos erosivos (Santos *et al.*, 1981; Gray & Leiser, 1982; Darmer, 1992; Kanji, 1997; Bressani, 1997; Embrapa, 2002; entre outros).

Em estudos hidrológicos ligados à erosão dos solos a compreensão dos fluxos subsuperficiais e suas relações com os processos erosivos têm sido apontadas como de fundamental importância (Dunne, 1990). A hidrologia e a erosão subsuperficial em encostas vêm sendo ambas estudadas e muito já foi produzido e discutido a respeito, dentro do âmbito da geomorfologia. Fernandes *et al.* (1994) estudaram a influência da paleotopografia sob os fluxos subsuperficiais; Anderson & Burt (1976) destacaram a importância do conhecimento do fenômeno da expansão e contração da zona saturada; Montgomery *et al.* (1997) relacionaram o desencadeamento de escorregamentos translacionais rasos ao fluxo subsuperficial e ao desenvolvimento de poro-pressões estudando o efeito de camadas de impedimento (*impeding layers*). Pouco material se observa, entretanto, acerca da dinâmica hidrológica e geomorfológica em voçorocas localizadas em taludes de corte recém recuperadas.

Em relação à revegetação e ao desenvolvimento vegetal, de uma maneira geral, estes possuem como aspectos positivos o aumento da interceptação das chuvas pelas copas arbóreas e pela serrapilheira diminuindo a intensidade erosiva da precipitação terminal (Greenway, 1987). A forma com a qual o dossel florestal exerce uma proteção contra a ação dos agentes erosivos é um tema ainda em discussão, e as áreas reflorestadas apresentam um quadro ainda mais complexo, havendo a necessidade de estudos ligados à hidrologia destes ambientes recém-formados e suas relações com a cobertura vegetal estabelecida. Conforme observado por Vallejo *et al.* (1982), tratando-se de ambientes tropicais a situação se agrava pela própria complexidade em que se apresentam os dados, já que a vegetação se desenvolve em vários extratos, e a fisionomia das plantas varia em muito durante um curto intervalo de tempo, o que faz das medições um verdadeiro desafio.

O desenvolvimento desta dissertação está vinculado ao projeto de RAD da Embrapa Solos em parceria com a INFRAERO, sendo seu objeto uma avaliação da hidrologia local após o projeto de RAD na voçoroca, sendo dada ênfase à hidrologia subsuperficial e ao desempenho das práticas de RAD. Partiu-se da hipótese de que os diversos tipos de intervenção ocorridos na área exerceram, no conjunto, o efeito

de estabilização desejado, visto que a vegetação apresentou bom desenvolvimento e o processo erosivo foi contido. Sendo assim este monitoramento constituirá um subsídio ao entendimento das modificações ocorridas na hidrologia local após o estabelecimento das práticas de RAD. Além disso, o presente trabalho pretende contribuir para a detecção dos mecanismos e condicionantes hidrológicos locais gerados pelas medidas adotadas, observando-se o desempenho das práticas e abordando relações entre alterações na geometria do talude, estruturas de contenção, propriedades físico-hídricas do solo, vegetação e a dinâmica hidrológica subsuperficial. Este monitoramento visou contribuir para a validação da metodologia utilizada no projeto de RAD, assim como para a avaliação do efeito conjugado e individual das diversas práticas adotadas.

## 2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação foi realizar uma investigação do comportamento hidrológico da área da voçoroca do Morro do Radar após a implantação do projeto de RAD. Para tal foram utilizadas como parâmetros de avaliação as influências da morfologia atual, das estruturas de contenção, das propriedades físico-hídricas dos solos e da vegetação sobre a dinâmica hidrológica subsuperficial da área. Procurou-se assim fornecer informações que possam constituir um subsídio para a avaliação dos efeitos das práticas de RAD adotadas na área (efeitos conjugados e individuais), fornecendo informações sobre o comportamento de voçorocas em taludes de corte.

Tendo em vista este objetivo geral foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- 1) Avaliar as variações na topografia da área de estudo antes e depois do projeto de RAD.
- 2) Avaliar a influência da vegetação implantada sob o processo de interceptação, infiltração, estocagem e das águas pluviais.
- 3) Caracterizar as propriedades físico-hídricas dos solos em diferentes segmentos da voçoroca e em diferentes profundidades.
- 4) Avaliar a distribuição dos fluxos subsuperficiais em resposta à diferentes episódios de recarga e de drenagem.
- 5) Avaliar o comportamento dos potenciais matriciais em resposta à diferentes episódios de recarga e de drenagem, definindo, se possível, a expansão e a contração da zona de saturação nos períodos avaliados.
- 6) Avaliar a relação entre os condicionantes locais e o desempenho das práticas de RAD nas diferentes estações, sendo examinadas as relações entre a nova topografia, a vegetação estabelecida e seus efeitos sobre a hidrologia local, as propriedades dos solos, a variabilidade dos potenciais matriciais e cargas totais na área da voçoroca.

### 3 Revisão de conceitos

#### 3.1 Voçorocas

Os processos de voçorocamento têm sido amplamente discutidos, constituindo objeto de interesse comum de engenheiros geotécnicos, geomorfólogos, geólogos, geógrafos, engenheiros agrônomos entre outros profissionais (Gray & Leiser, 1982; Fernandes *et al*, 1994; Guidicini & Nieble, 1983; Fernandes & Amaral, 1998; Santos, 1998). A atenção e atuação de cada tipo de profissional que estuda a erosão, no entanto, estão voltadas e orientadas em aspectos nem sempre coincidentes (Anderson & Richards, 1987), sendo os diferentes enfoques reflexos do interesse de cada campo de especialização ou atuação.

Um problema quando se procura pesquisar o assunto mais a fundo é a grande confusão dentro da ciência com relação ao significado do termo voçorocamento. É consenso que independente do mecanismo de formação ou agente detonador do processo, as voçorocas crescem posteriormente predominantemente por processos subsuperficiais, como o *pipping* (Higgins, 1990). De acordo com o autor a exfiltração nos fundos de vales seria o fator dominante na determinação das formas destas feições erosivas.

No sistema de classificação proposto pelo IPT (1991), os processos de erosão laminar, em sulco e também por voçorocamento integram os processos naturais de transporte de massa. Segundo Guidicini & Nieble (1983), numa definição mais ampla, os movimentos complexos de massa se caracterizam por movimentos múltiplos, ou complexos, e pela ação de vários agentes simultâneos e sucessivos. A denominação movimentos complexos de massa substituiu a de escorregamentos mistos da classificação anterior estipulada por Freire (1965). Nesta classe se englobariam todos os fenômenos de movimentação onde, durante a sua manifestação, ocorram mudanças de características morfológicas, mecânicas ou causais (rastejos, avalanche de detritos, corridas, rastejos e escorregamentos, mecanismos de *piping*, desconfinamento lateral, descalçamento basal, queda de cunhas).

Dentro da conceituação da classe expressa acima, outras formas, como as voçorocas, podem nela se enquadrar. As voçorocas podem ser resultantes de profundas modificações ambientais induzidas pela ação do homem ou resultantes em menor frequência de processos naturais que ocorrem na paisagem. Existem de fato diversas origens para estas feições erosivas: normalmente podem se originar ao longo das linhas de drenagem superficiais naturais ou canaletas de drenagem danificadas, resultando inicialmente na formação de ravinas no solo com sessão típica em V, que, com o avançar do entalhe inicial, passam a atingir os lençóis freáticos, acarretando numa contribuição das águas subterrâneas para o avanço do processo erosivo; podem ter sua origem também ligada ao processo de erosão em túnel, com a expansão da cavidade originada na face de exfiltração do terreno.

### **3.2 Hidrologia de encosta**

Os estudos ligados à hidrologia dos solos têm se tornado fundamentais na compreensão dos processos erosivos e deposicionais que governam a evolução e transformação do modelado de encostas (Fernandes *et al.*, 1989). Dentre as múltiplas funções da água destaca-se sua atuação enquanto agente modelador do relevo, controlando a formação e o comportamento mecânico dos solos e rochas presentes nos maciços rochosos. O conhecimento, a localização e a quantificação dos fluxos d'água nas encostas são de fundamental importância ao entendimento dos processos geomorfológicos que governam as transformações do relevo sob as mais diversas condições climáticas e geológicas (Coelho Netto, 1995).

#### **3.2.1 Dinâmica da água no solo**

Os fluxos de água nos solos podem ser descritos microscopicamente ou macroscopicamente. Na escala microscópica, o fluxo em cada poro individual é considerado para cada poro definido e contínuo, aplicando-se as equações de Navier-Stokes. Em escala macroscópica a fundamentação teórica para a solução de problemas de fluxos de água foi desenvolvida por Forchheimer e difundida por Casagrande a partir de 1937 (Kutílek & Nielsen, 1994). O fluxo de água no meio poroso é descrito por uma equação diferencial (equação de Laplace (equação 3.1)), bastante conhecida e estudada, pois se aplica a diversos fenômenos físicos, como, por exemplo, o fluxo elétrico.



$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (3.1)$$

A solução da equação diferencial de Laplace é constituída por uma função de duas variáveis, apresentando como resultado duas famílias de curvas (linhas equipotenciais e linhas de fluxo) que se interceptam ortogonalmente, formando um reticulado chamado rede de fluxo. As linhas de fluxo representam a trajetória macroscópica de partículas de água através do meio poroso. As linhas equipotenciais representam linhas de mesma carga hidráulica.

Para uma melhor compreensão dos processos de movimentação e percolação da água nos solos é pertinente uma revisão de conceitos relativos ao estado de energia da água no solo. A água no estado líquido, em ausência de membranas semi-permeáveis, tende a se mover em resposta aos gradientes de potenciais hidráulicos. As diferenças de potenciais de um ponto para outro determinam a direção do fluxo bem como o trabalho necessário para promover este fluxo. Em seu movimento, a tendência da água é atingir um estado de energia mínima, migrando para outros pontos no interior do solo (Hillel, 1970). Sabendo-se que a componente osmótica e a cinética podem ser desprezada, são dois principais componentes responsáveis pelo movimento da água no solo: matricial e gravitacional (Smith, 1983).

O potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ) é baseado simplesmente na posição da partícula de água dentro do campo gravitacional. Desta forma, pode se dizer que o potencial gravitacional da água no solo em cada ponto é determinado pela elevação do ponto em questão, em relação a certo nível de referência (*datum*), sendo este arbitrário.

Quando a água nos poros do solo se apresenta em pressões hidrostáticas maiores que a atmosférica, sua carga de pressão ou potencial de pressão é considerada positiva. Entretanto, quando esta água é submetida a sucções ou tensões, a carga de pressão passa a ser negativa (Marinho 1996). Esta última é normalmente denominada potencial matricial, potencial capilar ou de tensão ( $\Psi_p$ ).

Sabe-se que a zona não saturada ou zona vadosa do solo constitui o principal *link* hidrológico entre as águas superficiais (precipitações, fluxos nos rios, lagos e reservatórios) e as águas subterrâneas (Guymon, 1994), daí a sua importância em

estudos de erosão, conservação dos solos e recuperação de áreas degradadas. Outro aspecto importante em relação ao fluxo de água nos solos não saturados é o balanço hídrico das plantas (Hornberger *et al.*, 1998), isto é, a influência da vegetação sob o conteúdo de umidade nesta zona, tema que será ainda abordado.

São três os mecanismos de retenção da água na matriz do solo por forças mátricas: adesão às superfícies sólidas pelas forças de Van der Waals; retenção capilar como resultado de forças adesivas e coesivas; e retenção osmótica por elementos nas camadas duplas difusas (Dirksen, 1999).

De acordo com Libardi (1995) são duas as principais forças responsáveis pelo processo de retenção e movimento da água no solo (denominadas forças de coesão e adesão). O potencial matricial é resultante de forças capilares e de adsorção, devido à interação entre as partículas sólidas (matriz do solo) e a água. Tais forças atuam fixando e atraindo a água do solo, diminuindo sua energia potencial em relação à água livre (Reichardt, 1987).

O potencial total da água no solo ( $\psi_t$ , ver equações 3.2 e 3.3) é representado pelo somatório dos potenciais resultantes das forças atuantes sobre a água no solo. As forças que atuam sobre a água no solo englobam a gravidade ( $\psi_g$ ), chamada de potencial gravitacional; aquela associada à atração da água pela matriz do solo ( $\psi_p$ ), designada de potencial matricial; aquela decorrente da razão entre a energia cinética e o peso do fluido, denominada carga de velocidade ( $\psi_v$ ), normalmente desprezada; e aquela decorrente da presença de solutos ( $\psi_o$ ), denominado de potencial osmótico (que, como já foi dito anteriormente, é desconsiderado na maior parte dos estudos); entre outros de menor importância (Hillel, 1970; Atkinson, 1978; Richter, 1987; Freeze & Cherry, 1979; Fernandes, 1990, entre outros).

$$\psi_t = \psi_g + \psi_p + \psi_o + \psi_v + \dots \quad (3.2)$$

Os potenciais são expressos na forma de energia por unidades de peso, permitindo que sejam expressas em termos de carga hidráulica (Atkinson, 1978; Hillel, 1998; Fernandes, 1990), ou seja, como uma coluna de água medida em centímetros ou em kPa. Assim, a carga total da água do solo passa a ser descrita pela equação 3.2:

$$H_t = H_g + H_p + H_v \quad (3.3)$$

onde:

$H_t$  = carga total (ou carga hidráulica)

$H_g$  = carga gravitacional

$H_p$  = carga de pressão ou matricial

$H_v$  = carga de velocidade

No caso de solos, a carga de velocidade  $H_v$  é em geral negligenciada. Por exemplo, para uma velocidade  $v = 0,01\text{m/s}$  a carga de velocidade correspondente é  $5 \cdot 10^{-6}$  m. Assim, considera-se geralmente que  $H_t = H_g + H_p$ .

Assim, nota-se que estudos voltados para a caracterização da magnitude e dos fluxos requerem, necessariamente, a quantificação das cargas gravitacional e de pressão ou matricial nos diversos pontos do solo, o que requer não só um levantamento topográfico em escala de detalhe, mas também o uso de instrumentação (Brady, 1989; Libardi, 1995).

### 3.2.2 Classificação da água no solo

O estudo da água tem sofrido, através do tempo, uma contínua evolução. A classificação da água no solo é assunto antigo e pertinente a diversas especialidades, como na agronomia, na mecânica dos solos, hidrologia etc. Briggs (1897) foi um dos primeiros a estabelecer um sistema, classificando a água do solo segundo sua natureza, em água gravitacional (a que não é retida pelo solo (pressão  $< 1/3$  de atmosfera), depois deste ser molhado até o encharcamento, drenando para as camadas mais profundas por ação da gravidade); água capilar (retida pelo solo devido à força de tensão superficial, formando películas em torno dos agregados e nos espaços capilares); e água higroscópica (fixada por adsorção na superfície dos colóides do solo, movimentando-se apenas no estado de vapor) (ver figura 3.1).

Posteriormente à classificação de Briggs surgiram ainda diversas, como a classificação biológica, dividindo-a em supérflua, disponível e não disponível para as plantas, e as chamadas constantes de umidade, onde se pretende avaliar a retenção de água no solo por grandezas físicas ou valores estáticos (Kiehl, 1979). As constantes de umidade são as seguintes (ver figura 3.1):

- a) água higroscópica - umidade da amostra seca em estufa à  $110^\circ$
- b) coeficiente higroscópico – porcentagem de água absorvida por uma amostra seca em estufa à  $110^\circ$  e posta em contato com atmosfera carregada de vapor d'água.

- c) Ponto de murchamento – porcentagem de água que um solo apresenta quando as plantas que nele crescem adquirem um estado de murchamento premanente.
- d) Unidade equivalente – umidade contida no solo após ser submetido à pressão de  $\frac{1}{2}$  atm.
- e) Capacidade de campo – termo muito utilizado em agronomia significa o conteúdo de água que um dado solo sustenta sob a ação da gravidade (% de umidade a  $\frac{1}{3}$  de atmosfera constitui uma medida aproximada deste parâmetro).

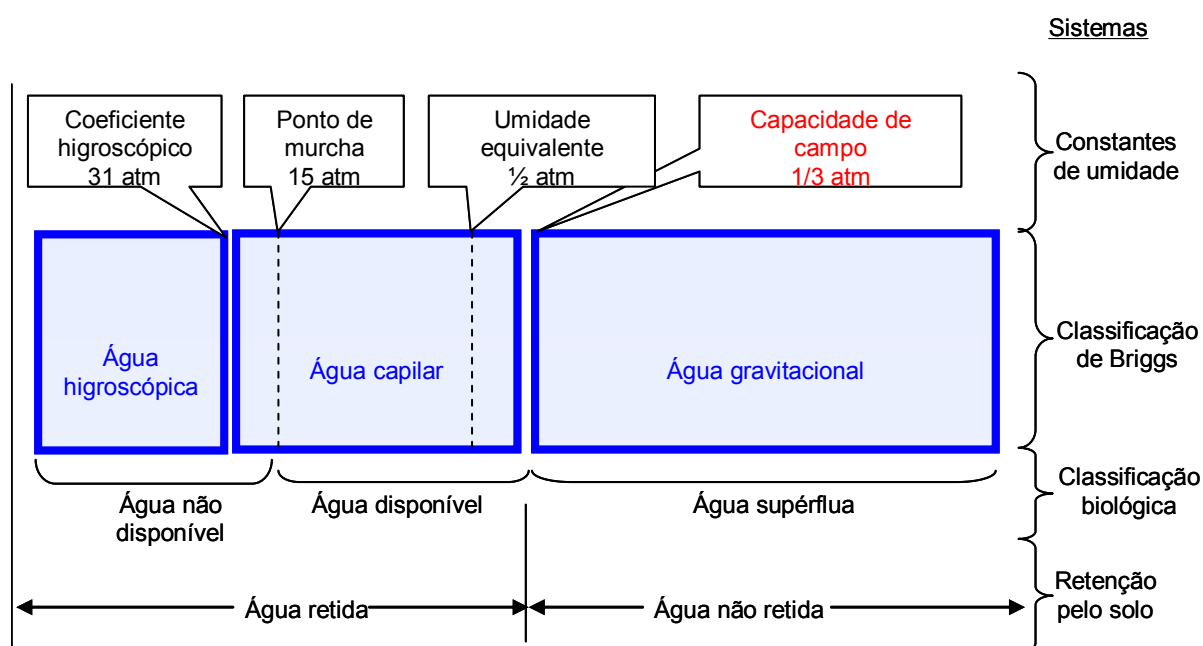


Figura 3.1. Sistemas de classificação da água do solo (adaptado de Kiehl, 1979).

Assim, durante o processo de redistribuição da água no solo, a região do perfil com alto teor de água drena rapidamente para as camadas adjacentes (normalmente em um movimento descendente), mais secas. A perda d'água, por sua vez, faz com que as forças responsáveis por reter a água no solo se manifestem cada vez mais intensamente, tendendo o perfil a uma uniformidade de umidade. A redução de umidade depois de certo tempo torna o movimento da água no solo lento (Oliveira *et al.*, 2001).

O conceito de capacidade de campo revela-se útil para a interpretação de dados de fluxo, pois representa um limiar aproximado entre a água gravitacional (escoa livremente por ação da gravidade, caracteriza em termos de velocidade o movimento da água no solo como um fluxo de velocidade considerável) e a água

capilar (que se movimenta de forma muito mais lenta, e não caracteriza exatamente um fluxo d'água, mais sim uma transferência de umidade mais lenta). A determinação deste parâmetro (a umidade do solo na capacidade de campo) é muito controvertida (Reichardt, 1988).

A utilização da capacidade de campo como uma divisão entre os períodos de lavagem ou fluxo mais intenso no solo e períodos mais secos onde só a transferência de umidade à baixa velocidade é conveniente em estudos de hidrologia e erosão dos solos, pois a erosão está estreitamente relacionada à força erosiva do fluxo d'água superficial e subsuperficial, que é por sua vez controlada pela velocidade do fluxo.

### 3.2.3 Produção e distribuição dos fluxos em encostas

As diferentes rotas dos fluxos estão associadas a mecanismos erosivos determinados. No estudo das voçorocas, esta questão é complexa, pois as mesmas constituem resultado de um conjunto de processos erosivos e de instabilização ocorridos em um mesmo local.

As principais rotas dos fluxos d'água no domínio das encostas foram sumarizadas por Dunne & Leopold (1978), nelas estando incluídos: o fluxo superficial hortoniano (FSH); o fluxo subterrâneo de base (FSb); fluxo subsuperficial da chuva (FSSch) e fluxo superficial de saturação (FSSat) (Figura 3.2).

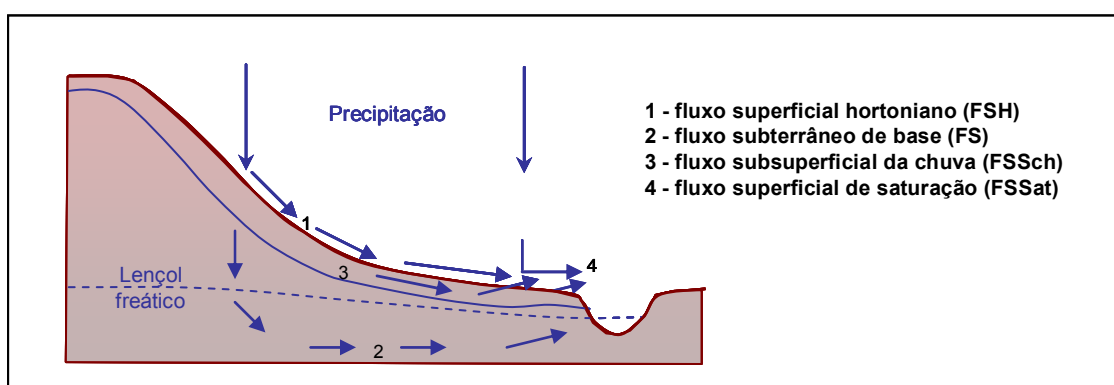


Figura 3.2. Principais rotas dos fluxos d'água nas encostas (adaptado de Dunne & Leopold, 1978).

Quando o escoamento sobre a superfície é produzido com o excedente de precipitação em relação à capacidade de infiltração, este tipo de fluxo vem sendo chamado de fluxo superficial hortoniano (FSH), numa referência a Robert E. Horton.

O fluxo subterrâneo de base (FS) é o fluxo que ocorre normalmente na zona saturada durante as estiagens. O fluxo subsuperficial da chuva (FSSch) é formado quando o nível no lençol freático ascende próximo aos fundos de vales e rios durante as tempestades. O fluxo superficial de saturação (FSSat) ocorre quando a superfície freática atinge a superfície do terreno, sendo que forma-se um fluxo superficial (escoamento superficial).

Os modelos quantitativos de Horton (1933) assumem que, nessa trajetória, a erosão, inicialmente concentrada nas microdepressões da superfície do terreno, poderia evoluir vertical e, depois, lateralmente, dando origem a um canal erosivo e, em seguida, alargando suas paredes laterais (bordas); ao desenvolvimento deste canal se associaria a formação de vales pelo recuo das encostas. Os estudos sobre erosão de solos por muito tempo enfatizaram a questão do escoamento superficial, no entanto, como afirmaram Freeze & Cherry (1979), o movimento da água em subsuperfície também controla a geração do escoamento superficial, e por isso deve ser levado em conta também em modelos de previsão de *runoff*.

Em relação ao escoamento subsuperficial, pode-se dizer que obedece a uma dinâmica muito complexa, variando de uma área para outra em função das características locais, tais como topografia, discontinuidades nos perfis de solos e/ou umidade antecedente às chuvas que precipitam sobre a bacia de drenagem (Whipkey & Kirkby, 1978). Sabe-se que as condições mais propensas à formação de fluxos subsuperficiais podem ser encontradas em encostas florestadas. A água percola em profundidade com taxas proporcionais à condutividade hidráulica saturada. As camadas de baixa permeabilidade, que funcionam como impedimento à percolação, propiciam a saturação até certa altura das camadas de solo sobrejacentes, podendo formar lençóis d'água suspensos (*perched water tables*). De acordo com Torres *et al.* (1998), a formação destes níveis suspensos pode acarretar na formação também de fluxos saturados com o posterior movimento subsuperficial da água proveniente destes locais. Montgomery *et al.* (1997), estudando a resposta hidrológica de encostas íngremes à chuvas artificiais, relacionou o surgimento destes níveis d'água suspensos com a estabilidade das encostas e o desencadeamento de escorregamentos translacionais rasos em solos coluviais.

De acordo com Dunne (1970) o fluxo subsuperficial pode erodir de duas maneiras: através do desenvolvimento de uma força crítica (força de arraste) a qual arrasta as partículas através do afloramento dos fluxos a partir de um meio poroso (*seepage erosion*); através da aplicação de uma tensão cisalhante nas margens de um macroporo (*tunnel scour*).

O fluxo subsuperficial gerado nas encostas pode também emergir na superfície do solo como fluxo de retorno (*return flow*, ou fluxo de retorno, conforme Dunne, 1970). A água emergindo a partir deste ponto do solo, o qual se encontra completamente saturado, é incrementada pela precipitação direta e o fluxo resultante é chamado de fluxo subsuperficial saturado (SOF). Uma ampla revisão sobre este tema pode ser encontrada nos trabalhos de Dunne (1970).

### **3.2.4 Redes de fluxo**

O estudo dos fluxos é muito facilitado pela representação gráfica dos caminhos percorridos pela água e da correspondente dissipação de carga. Esta representação é conhecida como rede de fluxo, forma gráfica de expressar a equação diferencial de Laplace.

Se, em cada ponto do fluido, o potencial hidráulico possui um valor determinado, pode-se, conhecendo-se os potenciais matriciais e cargas totais da água no solo, em vários pontos, construir mapas de isopotencial hidráulico, denominados mapas piezométricos, potenciométricos ou equipotenciométricos. Estes mapas mostram a forma e a elevação de uma superfície piezométrica em uma área de estudo determinada. O traçado dos mapas piezométricos é realizado à semelhança dos mapas topográficos, onde as curvas de nível correspondem as isopiezas ou linhas equipotenciais. São utilizadas para tanto, técnicas de interpolação e extrapolação de pontos, onde a equidistância das isopiezas é definida em função da quantidade de informações disponíveis, da escala e dos objetivos do trabalho etc. (Azevedo e Albuquerque, 1998).

A partir das equipotenciais, é possível estabelecer o padrão do fluxo subterrâneo, determinar os limites e os divisores da bacia hidrogeológica, definir os gradientes hidráulicos, as perdas de carga, as áreas de recarga e descarga da bacia, volumes de escoamento etc.

Normalmente, as áreas de máximo potencial hidráulico se relacionam às áreas de recarga, ou seja, são porções do terreno onde ocorre a alimentação do aquífero pela infiltração das águas de superfície. Por outro lado, as regiões ou zonas de menor carga hidráulica correspondem às áreas de descarga, para as quais convergem os fluxos. Estas áreas podem estar associadas aos elementos de drenagem superficial (rios, fontes e lagos), ou a elementos da drenagem artificial ou profunda dos maciços, tais como drenos em obras civis, que, como vimos, poderão acarretar em excesso de fluxos superficiais e intensificação dos processos erosivos (*op cit.*, 1998).

Em virtude da ocorrência freqüente deste tipo de fluxo em obras de engenharia e de sua importância na estabilidade de barragens, o fluxo bidimensional merece especial atenção. O estudo do fluxo bidimensional é muito facilitado pela representação gráfica dos caminhos percorridos pela água e da correspondente dissipação de carga. Esta representação é conhecida como rede de fluxo.

Uma vez delineadas as equipotenciais, o sentido do fluxo passa a ser conhecido. As linhas de fluxo principais podem ser traçadas, gerando redes de fluxo, aproximadamente quadrangulares, nas quais as linhas equipotenciais e as linhas de fluxo são sempre ortogonais entre si.

De acordo com Souza Pinto (2000) para a análise das equipotenciais deve ser considerado um aspecto importante: a diferença de carga que provoca a percolação dissipa-se linearmente ao longo de cada linha de fluxo, sendo, portanto, possível optar-se por traçar o número de equipotenciais que for necessário para o estudo, o que possibilita a determinação do valor das cargas em qualquer ponto via interpolação.

### **3.2.5 Morfologia dos taludes e distribuição dos fluxos**

A geometria das encostas produz efeitos nítidos na orientação dos fluxos. Estudando cabeceiras de drenagem em anfiteatro na região de Bananal (SP), Fernandes *et al.* (1994) relataram o importante papel atribuído a estas formas côncavas do relevo no controle do escoamento superficial e transporte de sedimentos. O papel da morfologia das encostas no controle da distribuição espacial dos potenciais matriciais no solo, bem como seus reflexos no condicionamento dos processos erosivos associados foi descrito em detalhe por Fernandes (1990). Rocha



Leão (1997) avaliou o efeito da morfologia das encostas também no processo de revegetação de cicatrizes erosivas no Parque Nacional da Tijuca.

A divisão das encostas em *hollows* (fudos de vale), *noses* (cristas) e *side slopes* (encostas laterais), proposta por Hack & Goodlett (1960) é até hoje a mais amplamente difundida, cabendo aqui esquematizá-la como referência (Figura 3.3). Nota-se que a figura permite distinguir processos atuantes em cada ponto da encosta, derivados do fato de que as linhas de fluxo convergem, tornam-se paralelas ou divergentes.

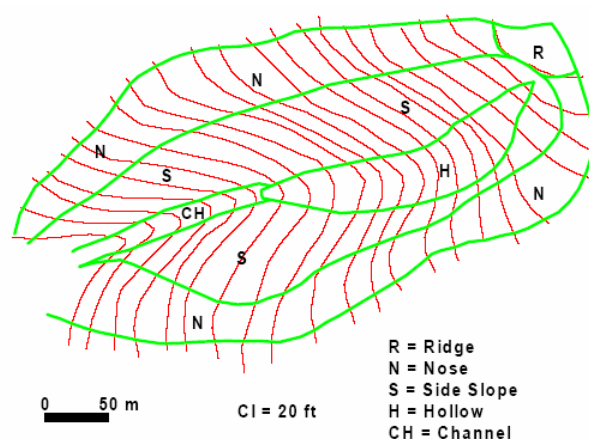


Figura 3.3. Unidades geomorfológicas das encostas (de Hack & Goodlet, 1960). A direção dos fluxos é convergente nos fundos de vales ou talwegues (H = hollows; CH = talvegue), divergente nas cristas (N = nose e R = ridge) e retilínea nas encostas laterais (S = side slopes).

Diversos estudos têm mostrado que os *hollows* representam zonas de convergência não só de fluxos superficiais e subsuperficiais (Anderson & Burt, 1978; Coelho Netto, 1985; Fernandes *et al.*, 1994 entre outros), como também para o transporte de sedimentos ao longo das encostas, levando à acumulação de depósitos coluviais nas suas bases.

Estudos de variação espacial da cunha saturada foram desenvolvidos por Anderson & Burt (1978), os quais mapearam a expansão e contração da cunha de saturação, através de redes de fluxos, mostrando a influência nítida da topografia (tridimensionalmente) na convergência dos fluxos d'água em direção à base dos *hollows*. Os autores concluíram que não ocorriam grandes modificações no “grau de convergência” dos fluxos entre o período seco e o úmido, sendo que a geometria da rede de fluxo era dominada pela topografia e não por variações nas poro-pressões. Os autores concluíram posteriormente (Anderson & Burt, 1980) que a delimitação da

escala de análise torna-se fundamental na interpretação do efeito do relevo na convergência dos fluxos, sendo que nas análises em microescala diversas variáveis podem distorcer o efeito da topografia.

De acordo com Brunsden & Prior (1984), a concentração das linhas de fluxos em taludes produz três importantes efeitos:

- A razão vazão por largura do talude aumenta.
- A degradação química da rocha aumenta em função do aumento no fluxo, e às vezes em função da maior susceptibilidade destas zonas ao ataque químico.
- A concentração aumenta a possibilidade de forças de exfiltração (*seepage*) em função de um aumento do gradiente hidráulico.

Hornberger *et. al.* (1998) definem de forma esquemática o papel desempenhado pela topografia no direcionamento dos fluxos através da Figura 3.4, onde se define a convergência e a divergência dos fluxos em planta.

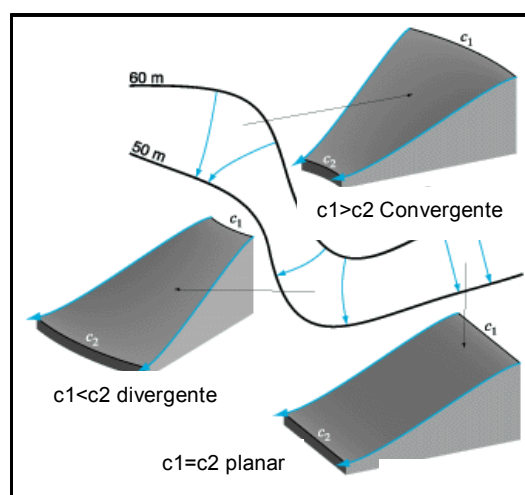


Figura 3.4. Controle da topografia, em planta, no direcionamento dos fluxos.  $C_1 > C_2$  – segmento côncavo em planta, convergente;  $c_1 < c_2$  - convexo em planta, divergente;  $c_1 = c_2$  - plana - mantem a direção dos fluxos (adaptado de Hornberger *et. al.*, 1998).

Os efeitos gerados pelas formas côncavas em planta sobre o direcionamento dos fluxos é similar ao ocasionado pelas formas côncavas em perfil, portanto é necessário o conhecimento da morfologia em ambos os planos de análise.

Com relação aos taludes, tem sido destacada a importância da correta determinação das declividades estipuladas para os cortes. É amplamente reconhecido o fato de que um aumento na declividade de uma encosta resulta em maior instabilidade do terreno. Apesar disso, um problema seria o fato de que a

diminuição do gradiente do talude acarreta em expansão da área de contribuição (aumento do comprimento da rampa), favorecendo a erosão e a instabilidade da encosta (Martins, 1981). A erosão e a estabilidade dos taludes dessa foram constituem processos a serem estudados conjuntamente (como em Santos *et al.* 1981, por exemplo). De acordo com este último, quando se dimensiona um talude, faz-se o cálculo da estabilidade considerando-se normalmente o talude não saturado. Porém, problemas de drenagem acarretam em saturação do solo e erosão.

Tais considerações assumem grande importância quando da execução do projeto das valetas de drenagem. Segundo (Santos *et al.* 1981) o número de taludes que apresentam problemas de instabilidade devido à execução de canaletas de crista mal dimensionadas e mal revestidas é muito grande, geralmente em função da realização de cortes no terreno para a implantação dos sistemas onde chega-se a horizontes mais profundos, por vezes mais erodíveis, como no caso de áreas sob gnaisses. Assim, de acordo com Martins (1981), se avaliamos a execução de projetos de valetas ou canaletas de crista, quem os executa normalmente não se atenta para o material do corte, simplesmente realizando a obra, o que muitas vezes acaba por disparar um fenômeno maior.

### **3.3 Vegetação, serrapilheira e hidrologia de encosta**

A incorporação de análises dos efeitos da vegetação sob a estabilidade dos taludes teve seu início nos anos 60 (Greenway, 1987). A natureza interdisciplinar destes estudos é digna de nota. Apesar das análises detalhadas da estabilidade de taludes serem normalmente trabalho de engenheiros geotécnicos (ou dentro do âmbito da geologia de engenharia), as interações orgânicas entre a vegetação e o solo são mais bem compreendidas por engenheiros agrônomos, pedólogos, engenheiros florestais e biólogos, o que indica a necessidade de uma abordagem interdisciplinar.

A sistematização da influência da vegetação sobre a estabilidade dos taludes proposta por Greenway (1987) é muito conveniente, abrangendo os principais aspectos geotécnicos importantes. A Figura 3.5 e a tabela 3.1 sintetizam de forma clara tais aspectos:

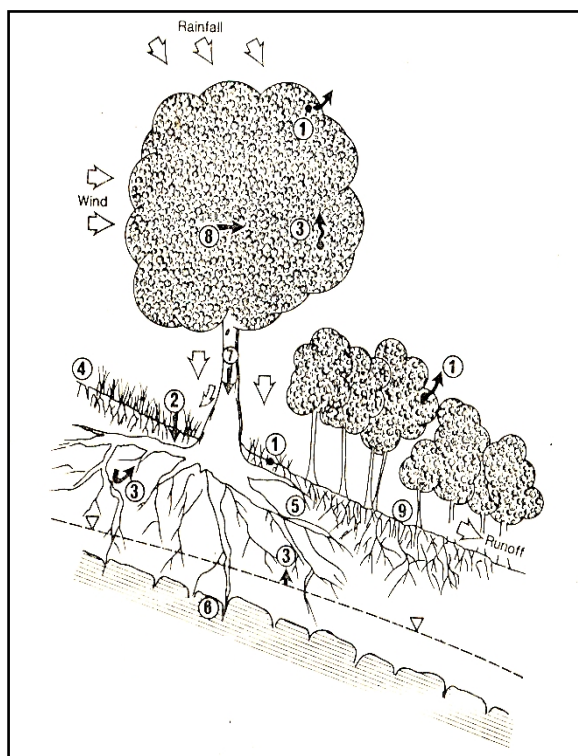


Figura 3.5. Influência da cobertura vegetal sob a estabilidade das encostas. Numeração referente à Tabela 1 (Fonte: Greenway, 1987).

Tabela 3.1. Efeitos da vegetação na estabilidade dos taludes (adaptado de Greenway, 1987).

Aspectos Hidrológicos	Influência na estabilidade
1) As folhagens interceptam as chuvas, ocasionando perdas por evaporação e adsorção, reduzindo a quantidade de chuva disponível para a infiltração.	Benéfico
2) As raízes e galhos aumentam a rugosidade do terreno e a permeabilidade dos solos, gerando aumento na capacidade de infiltração por vezes excessivo.	Adverso
3) As raízes extraem umidade do solo, que é perdida para a atmosfera via transpiração, levando a uma redução das poro-pressões	Benéfico
4) A redução da umidade dos solos provocada pela vegetação pode acentuar o processo de formação de fendas e rachaduras, resultando em maior capacidade de infiltração.	Adverso
Aspectos mecânicos	Influência na estabilidade
5) As raízes reforçam o solo, aumentando a resistência ao cisalhamento.	Benéfico
6) As raízes podem estar ancoradas em substrato firme, provendo sustentação ao manto de solo acima na encosta através de arqueamento e suporte.	Benéfico
7) O peso das árvores pode sobrecarregar a encosta, aumentando as componentes normal descendente.	Adverso / benéfico (dependendo da situação)
8) A vegetação exposta aos ventos transmite forças dinâmicas às encostas.	Adverso
9) As raízes unem partículas do solo, reduzindo a susceptibilidade à erosão.	Benéfico

Para ambientes tropicais, a vegetação define um papel fundamental na dinâmica hidrológica, promovendo fluxos característicos. O papel da vegetação na dinâmica hidrológica, em ambiente florestal, foi convenientemente subdividido por Jansen (2001) na influência das partes aéreas: copas arbóreas (folhagem e arquitetura das galharias, interceptação e fluxo de atravessamento), troncos (rugosos ou lisos, com presença ou não de sapopemba – geração de fluxo de tronco); e das partes subterrâneas: raízes (extração de umidade do solo, definição de rotas preferenciais de infiltração, ancoragem e reforço mecânico). O efeito cunha, que provoca o fenômeno do gotejamento (quando a precipitação abaixo do dossel passa a ser maior que acima, em função do acúmulo diferencial das águas pelas folhagens), também é um fator que merece destaque nestas avaliações.

Com o suprimento das demandas biológicas de água dos vegetais pelas raízes, reduz-se diretamente o conteúdo de umidade na zona de raízes, alterando a distribuição da umidade (e das poro-pressões) muito além da zona de raízes. De fato, em toda a sua complexidade, a influência da vegetação sob o ciclo hidrológico e o regime de umidade dos solos tem sido tema de inúmeros estudos (Gray & Leiser, 1982; Coelho Netto, 1985, 1987; Greenway, 1987, entre muitos outros). A vegetação pode afetar a distribuição das poro-pressões nos solos interceptando as chuvas, diminuindo a velocidade do escoamento superficial, aumentando a permeabilidade e macroporosidade, e reduzindo também a quantidade de água no solo via transpiração (Terwilliger, 1990). Tem sido também dada ênfase em grande parte dos estudos atuais à questão da influência da serrapilheira e as copas arbóreas no regime hidrológico dos solos (Miranda, 1992; Vallejo, 1982, Castro Jr., 1991, entre outros).

O processo hidrológico em áreas florestadas se inicia com a interceptação das chuvas pela vegetação, tendo como precipitação terminal (água que atinge o piso florestal) a soma da água proveniente dos fluxos de atravessamento e de tronco (Coelho Netto, 1995, Greenway, 1987). A partir daí a água é interceptada e armazenada pela serrapilheira, desempenhando um importante papel na redistribuição das águas em função da variabilidade da estrutura e disposição espacial desta material (Coelho Netto, 1987; Valejo, 1982).

Para Miranda (1992) as várias formas de interceptação e redistribuição dos fluxos das chuvas são funções de variações na morfologia das plantas e arquitetura das copas arbóreas. Para o autor, o mecanismo de *throughfall* (fluxo de

atravessamento dos troncos) apresenta comportamentos pontuais acentuadamente discrepantes.

Sabe-se que a serrapilheira possui uma capacidade de absorver grandes quantidades de água, constituindo o chamado processo de retenção hídrica pela serrapilheira, que estaria relacionado a uma redução da erosividade das chuvas, impedindo o gotejamento direto sobre o solo, diminuindo a erosão superficial, evitando assim a selagem do topo do solo e permitindo altas taxas de infiltração (Vallejo, 1982, Coelho Netto, 1985 e 1987 e Castro Jr., 1991, entre outros). Em função da estrutura dos materiais, bem como da existência de descontinuidades hidráulicas neste sistema, podem ocorrer processos de escoamento superficial sobre a serrapilheira (o que Coelho Netto chamou de fluxo superficial descontínuo (Coelho Netto, 1987)).

Para Andrade (1997) a maioria dos estudos sobre revegetação de solos degradados com leguminosas arbóreas tem focado principalmente a seleção de espécies vegetais (Franco *et al.*, 1992 e 1994; Hrudayanath *et al.*, 1995), de bactérias fixadoras de nitrogênio (Dobereiner, 1967; Faria, *et al.*, 1984, 1987; Faria, 1995) e de fungos micorrízicos (Jasper *et al.*, 1989; Oliveira *et al.*, 1995). No entanto, pouco se sabe sobre a quantidade, a qualidade e a velocidade de decomposição da serrapilheira, bem como a influência da biomassa, arquitetura radicular e aérea destas plantas sobre os processos erosivos.

Para Rocha Leão (1997) os projetos de revegetação devem procurar desenvolver técnicas que objetivem controlar a erosão, devendo-se conhecer a função hidrológica da revegetação no sistema hidro-erosivo das encostas, em seus diferentes estágios de sucessão, pois tanto a fisionomia de galhos quanto os sistemas radiculares e de produção e decomposição da serrapilheira, variam nos diferentes estágios sucessionais. Sendo assim a recuperação ambiental deveria se adequar à dinâmica geohidroecológica da área.

### **3.4 Recuperação de Áreas Degradadas**

#### **3.4.1 Definições**

Vários processos podem gerar a formação de áreas degradadas, desde a falta de um planejamento adequado de uso e ocupação do solo, o desmatamento de

áreas com alta susceptibilidade a erosão, o uso do solo em desacordo com sua real aptidão, a adoção de práticas agrícolas inadequadas, até as operações de movimentação de terra para terraplenagem, exploração mineral ou deposição de rejeitos (Andrade, 1997).

Um ecossistema degradado seria, de acordo com Carpanezzi *et al.* (1990), aquele que, após distúrbio, teve eliminados os seus meios de regeneração natural, apresentando baixa resiliência. Para estes ambientes seria necessária a intervenção antrópica para a sua recuperação. Perdas ou excessos são as formas mais comuns de degradação ambiental. Apesar de serem admitidas várias definições para o termo, pode-se afirmar que houve processo de degradação de uma área se a mesma tiver sua vegetação nativa e sua fauna destruídas, removidas ou expulsas; se a camada fértil do solo for perdida, removida ou enterrada; ou se a qualidade e o regime de vazão do sistema for alterado.

Williams *et al.* (1990) consideraram que recuperação significa o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização previamente estabelecida. Implica que uma condição estável será obtida em conformidade com os valores ambientais, estéticos e sociais da circunvizinhança. Assim, o sítio degradado deverá ter condições mínimas de estabelecer um novo equilíbrio dinâmico, desenvolvendo um novo solo e uma nova paisagem.

A generalização das palavras degradação e recuperação tem provocado alguma confusão. Tal controvérsia levou à edição do Decreto nº 97.632, de 10 de abril de 1989, que regulamenta o artigo 2º, inciso VII da lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981. Ficou estabelecido, através deste instrumento, que:

*“São considerados como degradação os processos resultantes dos danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou se reduzem algumas das suas propriedades, tais como a qualidade ou a capacidade produtiva dos recursos ambientais e que a recuperação deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo, visando a uma estabilidade do meio ambiente.”*

A Legislação Ambiental Brasileira é por vezes classificada como “restritiva”, “avançada” ou “protetora”. Em relação aos projetos de recuperação de áreas degradadas, a mesma oferece uma série de dispositivos que visam garantir ao cidadão o direito a um ambiente ecologicamente equilibrado, prevendo também a

restauração ou recuperação de um ambiente degradado. Assim, são oferecidos instrumentos que teoricamente garantiriam a recuperação de ambientes degradados, seja pelo poder público, seja pelos responsáveis pelas atividades potencialmente causadoras de degradação ambiental.

Em relação recuperação de taludes, Griffith *et al.* (1994) apontaram como sendo o principal problema o restabelecimento de uma relação positiva entre a vegetação implantada e os substratos, o que ocorre principalmente quando da ausência de horizontes superficiais. Para estes autores, devem ser melhor explorados os mecanismos de sucessão vegetal, em detrimento das chamadas “técnicas do tapete verde”.

Com relação aos taludes de corte, o substrato normalmente apresenta sérias restrições ao desenvolvimento vegetal. A eliminação dos horizontes superficiais dos solos faz com que o solo passe a não mais dispor de matéria orgânica, apresentando por isso baixa disponibilidade de nutrientes, baixa capacidade de retenção de umidade e características físicas indesejáveis (Santos, 1998). Segundo o autor, um dos problemas cruciais na revegetação de taludes seria o elevado grau de coesão do substrato que, associado à forte declividade, reduziria a capacidade de infiltração do terreno, reduzindo assim o volume de água disponível para as plantas.

Sabe-se que esta elevada coesão ocorre em função do solo (em seus horizontes subsuperficiais, ou no saprolito) apresentar características semelhantes ao material de origem. Desta forma, no processo de seleção de espécies e das técnicas de produção de mudas para fins de estabilização de taludes de corte, deve ser levada em conta a capacidade de penetração dos sistemas radiculares (Andrade, 1997).

A degradação estrutural e das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, recorrente nestes substratos, aliada a alta declividade dos taludes, favorece o aumento do escoamento superficial, e conseqüentemente o arraste de sedimentos, propágulos vegetais e de matéria orgânica depositada sobre o terreno em processo de recuperação. Além disso, em função da elevada exposição aos agentes climáticos (insolação, chuvas, ventos), as variações de temperatura e umidade diárias são extremas, o que resulta em escassa colonização vegetal (Santos, 1998).

Segundo Carpanezi *et al.* (1990), a observação de mecanismos de regeneração natural pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias para a



revegetação de áreas degradadas. Algumas espécies vegetais conseguem se desenvolver mesmo em taludes de corte, embora em ritmo mais lento (Santana Filho *et al.*, 1995).

As estratégias de colonização variam de acordo com as espécies. O desenvolvimento das plantas altera as condições do sítio, através do aumento da área sombreada, deposição de tecidos vegetais, retenção de água e sedimentos (como visto no capítulo sobre a influência da vegetação na estabilidade dos taludes), permitindo o estabelecimento de plantas mais exigentes. Daí resulta o aparecimento de pequenas ilhas de vegetação contendo uma ou mais espécies, sendo que, sem a intervenção humana, o processo de regeneração pode ser extremamente lento (*op. cit.*, 1998). A partir destes modelos naturais de colonização vegetal foram idealizadas técnicas de estabilização e revegetação de taludes visando criar nichos artificiais para o crescimento de espécies nativas, principalmente através do plantio de pioneiras com elevado grau de rusticidade.

### **3.4.2 Técnicas de revegetação**

As técnicas de revegetação podem variar desde o simples pousio da área para retorno natural da vegetação até a utilização de avançadas técnicas de sucessão que permitirão o retorno da estrutura florística e fitossociológica do ecossistema original num curto espaço de tempo. A escolha de uma ou outra metodologia deve sempre levar em consideração as características da área, o custo e o resultado final pretendido com a recuperação.

A revegetação de áreas degradadas geralmente é feita com alto investimento, muitas vezes à custa da transferência da camada fértil de outras áreas ou de técnicas onerosas, como a hidrosemeadura com gramíneas que em muitos casos necessitam de replantio e adubação de manutenção (IBRAM, 1992).

A técnica do pousio pode ser apontada como uma das mais simples metodologias para a revegetação de áreas degradadas, tendo sua aplicação restrita a áreas com abundantes fontes de propágulos e seus respectivos agentes dispersores. Além destas características é necessário minimizar a herbivoria sobre tais áreas através da construção de cercas e prevenção a incêndios. Na implementação dessa técnica é interessante que o homem atue como agente dispersor de sementes das florestas para a área a ser recuperada e que as espécies

a serem utilizadas possuam as seguintes características: impalatabilidade das sementes, para não serem comidas pelos animais; grande porte, para que tenham bastante energia armazenada e possam competir, durante a difícil fase de estabelecimento, com a vegetação existente; exigir poucos nutrientes, para que possam crescer nos solos inférteis das pastagens abandonadas; capacidade de enraizamento profundo para que possam buscar, no verão, as águas armazenadas nas profundezas do solo (Santos, 1998).

O rápido recobrimento do solo é premissa principal para minimizar os efeitos erosivos sobre áreas abertas, notadamente em taludes e áreas íngrimes, onde, segundo Barth (1989) a água é o principal fator de instabilidade, sendo responsável pelo deslizamento da superfície, transporte de partículas e movimentos de massa. Neste sentido, a espécie utilizada deve viabilizar a infiltração de água no solo, minimizando a erosão. Em muitos casos só é possível conter os processos erosivos através de um melhor ordenamento das águas superficiais através da construção de valas, canaletas e do plantio de grama em faixas.

Durante muitos anos a principal técnica de recobrimento do solo utilizada na RAD consistia na semeadura, a lanço ou através de hidrossemeadura, de gramíneas exóticas com elevada capacidade de cobertura do solo. Barth, (1989) contesta tal prática por apenas atender os objetivos da RAD em curto prazo, além de em alguns casos não barrar o processo erosivo, apesar de apresentar-se verde. Para o autor seria mais sensato utilizar espécies leguminosas em virtude da sua possibilidade de fixação do nitrogênio atmosférico que contribuiria positivamente no processo de sucessão natural. Através da fixação biológica do nitrogênio ( $N_2$ ), as plantas introduzidas se tornam auto suficientes neste elemento e, com a colonização de fungos micorrízicos, suas raízes aumentam a área de contato com o solo, e promovem uma maior absorção de água e nutrientes, principalmente o fósforo, facilitando o estabelecimento e o desenvolvimento vegetal.

Devido à grande capacidade de produção de fitomassa, estas plantas cobrem o substrato superficial rapidamente, melhoram a capacidade de infiltração de água através da malha radicular e adicionam matéria orgânica rica em nitrogênio, condições essenciais para a recuperação dessas áreas.

Através do uso de ferramentas modernas da biotecnologia, a Embrapa desenvolveu um modelo para revegetação de áreas degradadas em ambientes tropicais (Franco *et al.*, 1992). Este envolveu desde a identificação de espécies

vegetais rústicas, capazes de se associarem a microrganismos, o isolamento e a multiplicação de bactérias diazotróficas e fungos micorrízicos, a produção de mudas noduladas e micorrizadas, até o plantio com adubação conforme análise do substrato e validação em diferentes ecossistemas degradados.

As maiores dificuldades no processo de RAD em taludes íngremes e áreas de mineração se referem aos parâmetros edáficos do horizonte ou camada exposta à superfície. Enquanto em áreas não degradadas o horizonte A se caracteriza por ser friável e rico em matéria orgânica (Griffith *et al*, 1994) em áreas de empréstimo encontram-se expostos horizontes profundos, saprolíticos, de composição tipicamente mineral e muitas vezes afloramentos de rocha. Os principais desafios dizem respeito à sustentação mecânica das raízes nestes substratos, em geral residuais jovens, e as melhorias químicas, físicas e biológicas destes permitindo o estabelecimento de vegetais. Segundo Griffith *et al*, (1994) tais dificuldades podem ser contornadas através da utilização de técnicas de implantação adequadas.

### **3.4.2.1 Especificações técnicas em projetos de RAD**

Visando um melhor entendimento dos objetivos das práticas de RAD adotadas no Morro do Radar, mencionadas ao longo desta dissertação, abaixo são descritas especificações técnicas referentes e seus objetivos, extraídos do Caderno de Especificações técnicas para transferências de tecnologias, diagnósticos do estado de conservação das terras e projetos de recuperação de áreas degradadas da (Embrapa, 2003).

Práticas mecânicas referem-se a operações mecanizadas e/ou manuais para transporte de material, movimentação de terra, alocação e/ou remoção de rejeitos e construção de pequenas obras de contenção e dispositivos de drenagem superficial.

A conformação de taludes e barrancos tem como objetivo conformar taludes e/ou barrancos por meio de cortes e aterros para obtenção de geometrias mais estáveis, favorecendo a estabilização geotécnica e revegetação dos locais alterados. Os cortes previstos para regularização dos taludes, devem atender a geometria definida no respectivo desenho do projeto de obras, contendo Planta Topográfica e Seções Transversais, ou seguindo orientações gerais como: formação de talude de no máximo 45° e comprimento de rampa de 10m. A construção de aterros é necessária no caso de preenchimento de escavações e valas, após a colocação de

tubulações, substituição de solos em fundações, recomposição de terrenos e formação de bermas (taludes de aterro). As características de um aterro dependerão do tipo de material a ser utilizado e de sua finalidade.

A regularização da superfície do terreno visa a eliminação dos sulcos onde ocorre a concentração da enxurrada, melhorando as condições de plantio e de ordenamento do escoamento superficial.

A construção de Terraços visa formar obstáculos físicos e seccionar o comprimento de rampa, possibilitando assim, a redução da velocidade e a subdivisão do volume do deflúvio superficial, permitindo maior infiltração da água no solo e/ou o redirecionamento do escoamento até um leito estável de drenagem natural ou artificial. Recomenda-se, como aplicação de técnicas mistas (mecânico-vegetativas), procedendo a revegetação dos terraços como medida de estabilização e maior proteção do solo.

A construção de Bacias de Retenção visa armazenar as águas do escoamento pluvial superficial, conduzidos pelo terraço. A construção de descidas de água, paliçadas e barreiras visa ordenar e reduzir a velocidade do escoamento superficial além de conter as paredes verticais de taludes/barrancos e reter sedimentos. As descidas de água deverão ser construídas em pontos onde haja grande concentração de águas pluviais superficiais, geralmente em locais com declividade acentuada (maior ou igual a 45°). As paliçadas de bambu, com o tempo, acumulam sedimentos na base frontal da paliçada, possibilitando o surgimento de vegetação ou o brotamento do bambu utilizado na confecção, funcionando como uma barreira natural.

A seleção de Espécies Vegetais tem por objetivo a escolha das que apresentem maior potencial para iniciar o processo de revegetação em áreas degradadas. Esta seleção se baseia em critérios de adaptabilidade edafoclimática, rusticidade, capacidade de reprodução, velocidade de crescimento, facilidade de obtenção de sementes, eficiência no controle do processo de erosão, baixo custo de aquisição e manutenção.

A formação de cordões vegetados tem como objetivo a quebra a velocidade de escoamento da enxurrada e facilitar a infiltração da água que esco superficialmente, contribuindo para a redução do processo erosivo sobre o solo. São quase tão eficientes quanto os terraços e apresentam como vantagens a simplicidade e a facilidade de execução.

## 4 Área de Estudo

### 4.1 Localização

A área está situada na Ilha do Governador, próximo à antiga Estrada Grande, na colina em que se encontra instalado o sistema de radar do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro Galeão/Antônio Carlos Jobim, na vertente voltada para as pistas de pouso e decolagem de aeronaves (Figura 4.1).

### 4.2 Clima

O clima da região segundo a classificação de KÖPPEN é do tipo Aw (de acordo com Nimer (1979) com uma estação seca definida, que inicia-se, em geral, em maio a junho e estende-se até o final de novembro, época em que começa o período chuvoso, ocorrendo fortes precipitações, que vão diminuindo até o mês de maio.

### 4.3 Solos

A cobertura pedológica original da área é de Latossolo Amarelo (solo residual maduro<sup>1</sup>), essencialmente caulinitico e originado de sedimentos argiloarenosos correlacionáveis à Formação Barreiras. Imediatamente abaixo do *solum*, ocorre um saprolito<sup>2</sup> (subdividido em horizontes C1, 2C2 e 2C3), que apresenta estrutura da rocha preservada e alcança cerca de 20 metros de profundidade. Consta em anexo (anexo I) uma descrição de perfil realizada quinze metros a oeste da voçoroca (perfil RAD 4, descrito por Lumbreiras *et al.* (1999)).

---

<sup>1</sup> Solo Residual Maduro: Solos residuais são aqueles de decomposição das rochas que se encontram no próprio local em que se formaram. Para que eles ocorram, é necessário que a velocidade de decomposição da rocha seja maior que a velocidade de remoção por agentes externos. Os solos residuais se apresentam em horizontes com grau de intemperismo decrescente (Souza Pinto, 2000). Vargas (1981) identifica as seguintes camadas, cujas transições são gradativas: solo residual maduro (que perdeu toda a estrutura original da rocha mãe); saprolito ou solo saprolítico; rocha alterada.

<sup>2</sup> Saprolito: É comumente reconhecido como um produto de alteração da rocha *in situ*, isovolumétrico e denominado como horizonte C (Curi, 1993). Estes solos mantêm a estrutura original da rocha matriz, inclusive veios intrusivos, fissuras e xistosidade, mas perdem a consistência da rocha. São também chamados de solos residuais jovens ou solo de alteração de rocha.

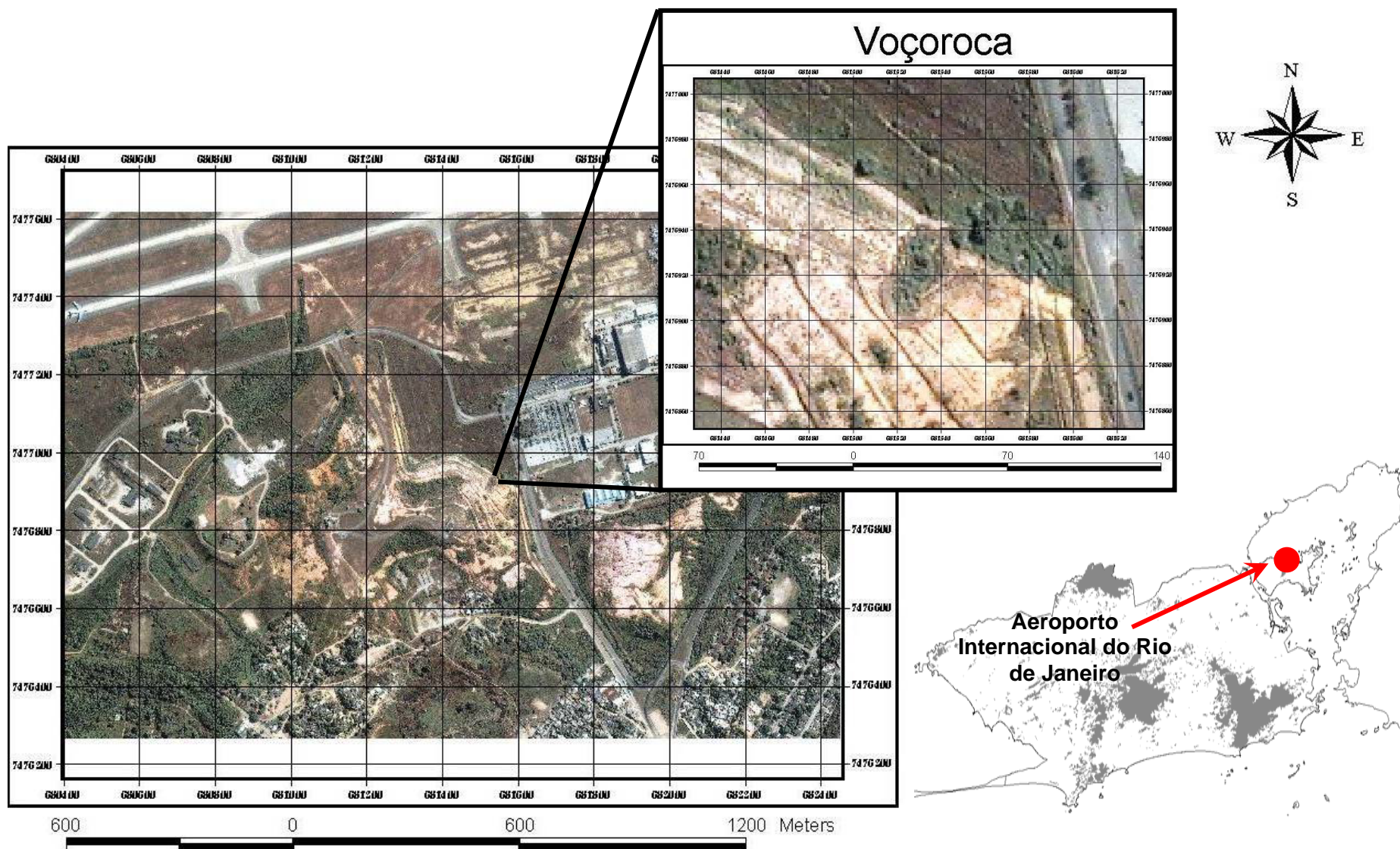


Figura 4.1. Localização da área de estudo. À direita e abaixo - Cidade do Rio de Janeiro (localização do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro Galeão/ Antônio Carlos Jobim); Principal: imagem do satélite IKONOS (2002) do Morro do Radar e detalhe da área da Voçoroca.

Um maior detalhamento dos solos na área da voçoroca pode ser encontrado na discussão dos resultados, no tópico referente à avaliação das propriedades físico-hídricas. Ressalta-se que os horizontes superficiais nesta área foram decapitados, tendo sobrado somente o saprolito, que constitui a camada que está sendo avaliada nesta dissertação.

#### **4.4 Geologia**

A geologia predominante na área é composta de granitos e gnaisses do Pré-Cambriano, subjacente à Formação Macacú.

#### **4.5 Histórico de ocupação e modificação do relevo local**

Neste tópico serão abordadas a topografia e a vegetação original da área, a ocupação anterior à construção do aeroporto, o desmonte do morro e a formação das áreas degradadas.

##### **4.5.1 Topografia e vegetação original**

A área do Morro do Radar anteriormente constituía parte do relevo colinoso típico da parte central da ilha (Strauch, 1955). Este relevo é caracterizado por níveis de altitudes moderadas (cotas máximas em torno de 50 metros) que se apresentam de maneira geral com encostas suaves. A geologia referente à constituição destas colinas (descrita com maior detalhe adiante) é variada: ora surgem granitos, ora gnaisses totalmente alterados, surgindo em alguns casos até mesmo rochas sedimentares estratificadas. No caso da área do Morro do Radar predominam gnaisses bastante alterados alternados com granitos. As colinas originais tendiam a possuir encostas com inclinações suaves, apresentando uma camada de decomposição ou saprolito razoavelmente profundo.

A vegetação original que recobria esta área era de Mata Atlântica (Amador, 1997). Em função dos fragmentos florestais remanescentes, a fitofisionomia da cobertura vegetal primitiva é do tipo floresta tropical subcaducifólia (Floresta A). A vegetação se espalhava por toda a região das colinas, sendo bordada por mangues, que posteriormente dificultaram a ocupação deste trecho da ilha.

#### 4.5.2 Ocupação anterior à construção do Aeroporto

De acordo com Meis (1976), o solo deste trecho da ilha foi recoberto por sua vegetação natural até meados do século XVI, quando se deu a primeira fase de ocupação do recôncavo da Baía de Guanabara (que durou até meados do século XIX). Esta fase representa o período de implantação, expansão e auge da cultura da cana-de-açúcar. As regiões de topografia deprimida ou plana (a maior parte da ilha) eram mais propícias à instalação de grandes propriedades açucareiras. Em conseqüência, a floresta tropical foi praticamente destruída em toda a área plana da ilha, permanecendo, entretanto na encostas e elevações do terreno (como é o caso da área colinosa que deu origem ao Morro do Radar). A população se distribuía ao longo de estradas, construídas na época pelos frades beneditinos (que eram os proprietários destas terras).

Durante uma segunda fase de ocupação do recôncavo (que durou do final do século XIX até as primeiras décadas do século XX), caracterizada pela decadência da monocultura canavieira, vários campos foram abandonados e despovoados, sendo a lavoura de cana-de-açúcar praticamente interrompida. Numa fase que foi de 1920 a meados de 1940, várias áreas abandonadas foram reconquistadas através da implantação e ampliação das culturas de banana e laranja, com o desenvolvimento das culturas de chácaras. Os laranjais desenvolveram-se principalmente em áreas já desmatadas, ocupando diversas colinas e morros da ilha. Toda a área referente ao Morro do Radar e seu entorno era, neste período, utilizada por pequenos sitiantes para a produção agrícola, sendo esta uma das áreas onde ocorria grande exploração agrícola na ilha (Strauch, 1955). A população ainda se distribuía ao longo das estradas, construídas de longa data, quando estas terras pertenciam aos frades beneditinos. Aos poucos a atividade agrícola foi desaparecendo até que, em 1942 (com o início da construção do aeroporto e o estabelecimento da zona militar) foram desapropriados os últimos sitiantes, na estrada do Itacolomi e Tubiacanga (*op. cit.*). Muitos destes sitiantes ficaram radicados ali, trabalhando na base (*op. cit.*).

A ocupação recente é toda de caráter militar, ou, pelo menos, sob controle militar, sendo que os próprios trechos ocupados anteriormente vão desaparecendo, em virtude das desapropriações contínuas, por parte da Aeronáutica (Strauch, 1955). Isto não quer dizer que tenha havido estagnação da população até meados



da década de 60, pois o próprio Ministério edificou com certa intensidade vilas para funcionários civis e militares, sem contar a ampliação natural da base aérea, que se deu em sucessivas etapas.

#### 4.5.3 O desmorte do morro

As vertentes do Morro do Radar foram cortadas em forma de bermas (taludes de corte) durante a construção do aeroporto (no final década de 70) (Figura 4.2), tendo sido o material extraído utilizado para o aterro da estrada, da via de acesso e de obras civis das instalações do radar (Embrapa, 2001).

O corte no morro foi ordenado, dando origem a um talude de corte. O corte no morro apresentava originalmente um desenvolvimento longitudinal com uma conformação senoidal, sendo constituído por três taludes com inclinações entre 30° e 35°, intercalados por duas bermas (ENAR, 2000). Foi construído um sistema de drenagem, com escadas dissipadoras, sendo realizado concomitantemente um trabalho de revegetação com o uso da hidrosemeadura (*op. cit.*).



Figura 4.2. Visão geral da Ilha do Governador durante as obras de construção do aeroporto (1971).

#### 4.5.4 A formação de áreas degradadas no Morro do Radar

Sabe-se que os resultados de projetos de hidrosemeadura nem sempre são os esperados, dependendo o sucesso da ação muitas vezes do próprio estado de degradação do solo. Algum tempo depois da intervenção no Morro do Radar e da formação do talude de corte, o solo começou a apresentar sinais de erosão. Deve-se levar em conta a grande suscetibilidade à erosão do solo: por vezes solo residual saprolítico de gnaiss, ou saprolito de granito, ou resquícios de horizontes superficiais de latossolos amarelos de baixa fertilidade, todos pobres em matéria orgânica, álicos (elevado teor de alumínio) e de baixa fertilidade natural.

A degradação do sistema de drenagem, ocasionado por um eventual dimensionamento incorreto das canaletas de crista, foi supostamente o maior *input* inicial do processo de degradação na área (Enar/Comando da Aeronáutica, 2000; Embrapa, 2001). Isto pôde ser constatado através da presença de erosão laminar intensa e em sulcos. Após um grande rompimento do sistema de drenagem (fragmentos das canaletas foram arrastados por longas distâncias talude abaixo) iniciou-se um processo de erosão superficial intenso em função da grande quantidade de água que convergia diretamente pelas rachaduras morro abaixo, o que deu origem à voçoroca do Morro do Radar. Posteriormente a erosão atingiu camadas mais profundas do solo, o que ocasionou em intensificação do processo, através de uma modificação da dinâmica subsuperficial dos fluxos d'água. A maior das feições erosivas encontradas na área é a voçoroca que se formou próximo ao limite leste do Talude.

Em 2000 a empresa ENAR Engenharia e Representações (ENAR, 2000) diagnosticaram a presença de solo descoberto, sulcos, ravinas e voçorocamentos na área do Morro do Radar, sendo documentada pela primeira vez a existência da grande voçoroca, ocasionada pelo rompimento da drenagem superficial. A meta da empresa era realizar um projeto executivo de drenagem, revegetação e paisagismo, com reintrodução de espécies arbóreas. Foram propostas técnicas de hidrosemeadura e geotêxteis, entretanto este projeto não foi executado.

Segundo o diagnóstico da Embrapa Solos (2001) as bermas do Morro do Radar se encontravam, em sua maior parte, desprovidas de cobertura vegetal, com ocorrência de erosão laminar, em sulcos e voçorocamentos, totalizando uma área degradada de 5,0ha. Tal quadro de degradação, aliado à falta de sistema de

drenagem pluvial, vinha causando a instabilização e queda dos taludes, ocorrendo nesta época um processo já acelerado de expansão da voçoroca no Morro do Radar, ocasionando um recuo do talude em direção ao sistema de radares (Figura 4.3).

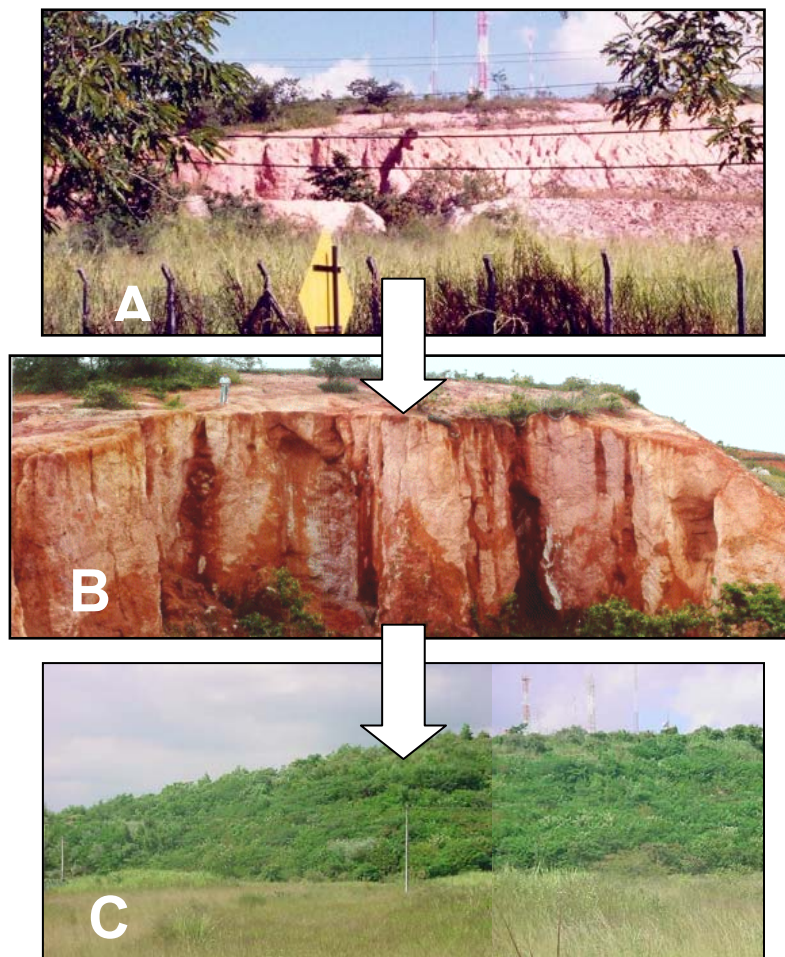


Figura 4.3. Voçoroca vista de longe (A), durante o diagnóstico do estado de conservação da área (ano 2000); englobando o entorno; detalhe da voçoroca (B); a voçoroca após os trabalhos da recuperação, em 2004 (C).

#### 4.6 Práticas de RAD no Morro do Radar

O enfoque utilizado no projeto de RAD do Morro do Radar/Galeão (que teve como coordenador o Eng<sup>o</sup> Agrônomo Dr. Aluísio Granato de Andrade), para a estabilização das bermas centrou-se na execução de práticas mecânicas e vegetativas: reconformação de parte dos taludes, ordenamento e dissipação das águas pluviais superficiais, e implantação de cobertura vegetal.

#### 4.6.1 Práticas mecânicas

Os trabalhos mecânicos desenvolvidos na área do Morro do Radar, visando o controle da erosão nos taludes (bermas), consistiram em construção de terraços, construção de paliçadas de bambu, eucalipto e *pallets* (de madeira) de caixas transporte aeroviário, paliçadas de sacos de terra (figuras de paliçadas podem ser encontradas no tópico referente ao detalhamento da voçoroca (4.7.3)), construção de canais escoadouros e de bacias de captação da água conduzida pelos terraços (Embrapa 2002, ver Figura 4.4). Para o entendimento do processo de RAD da voçoroca do Morro do Radar é necessário o conhecimento destes processos, já que foi realizado o ordenamento das águas desde a parte superior do talude (proveniente do divisor de drenagem), até a sua base.

Um aspecto do projeto que pode ser considerado de extrema relevância é o fato de que um dos cordões vegetados foi construído enterrando-se primeiro os restos de antigas canaletas de drenagem que já estavam destruídas na área (Figura 4.5). Depois de enterradas as canaletas (que foram quebradas em fragmentos pequenos, foi construído o terraço. Esta prática foi realizada no cordão que está à direita da voçoroca, indo até o seu limiar, o que como veremos, pode estar gerando condições similares as de um dreno subsuperficial, que traz águas provenientes de sessões mais distantes do talude até a parede oeste da voçoroca. Este processo não é desejado, mas o enterramento das canaletas fragmentadas constituiu o método mais fácil para a retirada deste resíduo, aproveitando-o também como material para aumentar o volume do cordão. As condições subsuperficiais geradas porém, como veremos, podem ser indesejadas, com uma possível geração de poropresões nas paredes do talude, em função da proximidade da área, o que deve estar condicionando a existência de processo erosivo nesta parede da voçoroca.



Figura 4.4. Bacia de captação – abertura de covas para plantio no talude de aterro das bacias de captação



Figura 4.5. Processo de construção do cordão vegetado a oeste da voçoroca. Acima o enterramento dos restos da canaleta (A). Abaixo (B) a voçoroca vista num sobrevôo de helicóptero observando-se a localização da canaleta enterrada (seta e linha tracejada), e também alcovas de regressão na mesma face.

Para a construção dos terraços foi utilizado um trator de esteira que raspou o solo para formar cordões com 1 metro de altura, tendo em sua base um canal escoadouro com 50cm de profundidade, este também construído com auxílio de retroescavadeira (Figura 4.6).



Figura 4.6. Terraços construídos com o material raspado pelo trator de esteira, antes (A) e depois (B) da revegetação com grama barbante e capim vetiver.

Na parte superior do Morro do Radar afetada pela erosão foram construídos cinco terraços (Figura 4.7). O primeiro terraço recebe a água proveniente da parte montante do terreno; o segundo, a água que escorre pelo terreno logo abaixo do primeiro terraço; o terceiro está localizado acima e próximo à voçoroca, desviando a enxurrada de interior da mesma.

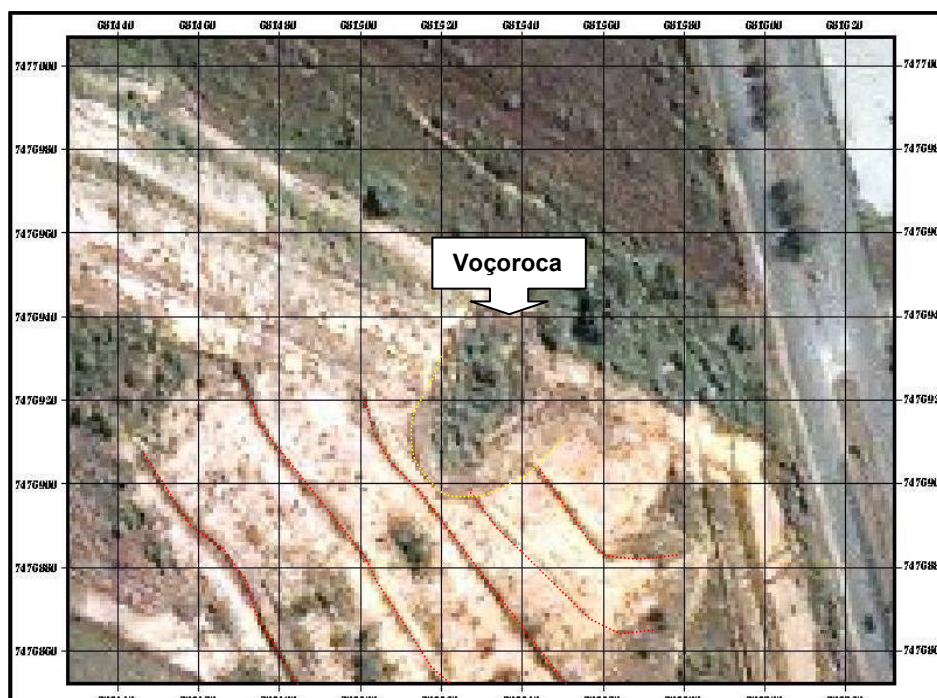


Figura 4.7. Ordenamento da drenagem pluvial, com construção de terraços e cordões vegetados (em vermelho e amarelo). O cordão amarelo corresponde à proteção realizada na área da voçoroca, visando bloquear os fluxos superficiais para

dentro da mesma. Ao final de cada terraço os fluxos convergem para bacias de captação, sendo direcionados por uma canaleta de concreto antiga, que termina em uma pequena escada dissipadora construída também com materiais reaproveitados.

Os terraços e os taludes das bacias de captação foram revegetados. Com a construção dos terraços, a parte final da canaleta de drenagem (valeta), que se encontrava totalmente destruída, numa extensão aproximada de 30 metros, foi removida. No seu local, onde se formou um enorme sulco erosivo, foram montadas paliçadas de bambu e sacos de terra.

Na área dos taludes (bermas), os sulcos e voçorocas foram protegidos com a construção de paliçadas de bambu e sacos de terra, dispostas no interior dos mesmos. Isto permite a redução da velocidade do escoamento superficial e do fluxo de sedimentos, culminando com o aterro progressivo dos sulcos e voçorocas e possibilitando maior eficiência das práticas vegetativas.

#### 4.6.2 A Revegetação no Morro do Radar

Na área de contribuição foi implantado experimento com três espécies de leguminosas arbustivas e com três doses dos seguintes produtos: lodo de esgoto (utilizado como fertilizante), fertilurb<sup>3</sup>, esterco bovino, esterco de equino e Stockosorb (um polímero retentor de umidade semelhante ao utilizado para fraldas e absorventes, que é utilizado para aumentar a retenção de água do solo, evitando o murchamento das plantas em seus estágios iniciais).

Nos terraços foi plantado o capim *Vetiveria zizanioides nash* (Vetiver) formando cordões vegetados e foram plantadas grama batatais nas bacias de captação (Embrapa, 2002). Foram também plantadas várias espécies de leguminosas arbóreas pioneiras: *Mimosa bimucronata* (maricá), *Mimosa caesalpiniaefolia* (sabiá), *Mimosa artemisiana*, *Enterolobium contortisilikum* (orelha de nego), *Albizia guachapelle*, *Gliricidia sepium*, *Mimosa artemisiana* (jurema branca), *Piptadenia paniculata* (maminha de porca), *Erythrina verna* (mulungu), *Inga marginata*, *Inga vera*, *Chorisia speciosa* (paineira) e *Schinus terebenthifolius*

---

<sup>3</sup> Fertilurb é um composto de lixo orgânico produzido pela Companhia de Lixo Urbano do Rio de Janeiro (CONLURB).

juntamente com outras espécies nativas da Mata Atlântica de outros estágios sucessionais.

Nos taludes de corte foram plantadas diferentes espécies arbóreas de porte baixo em consórcio com leguminosas herbáceas como o feijão Guandu anão e o arranha gato. Para as leguminosas foi adotado o espaçamento de 0,5 x 0,5 m entre plantas para os taludes e para a área de contribuição e os patamares o espaçamento é de 1,5 x 1,5 m entre plantas. O capim Vetiver foi plantado em espaçamento de 0,3 X 0,3 m entre plantas.

As covas foram abertas no mês de janeiro de 2001 com as seguintes dimensões: 0,30 x 0,30 x 0,30 m. A adubação consistiu de uma mistura de *Yorin Master*<sup>4</sup> e Sulfato Potássico. O plantio das leguminosas foi realizado em janeiro através de mudas inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos com 20 a 30 cm de altura. O capim *Vetiver* foi plantado através de propágulos extraídos de touceiras saudáveis e a grama foi implantada através de placas também no mês de janeiro.

#### **4.6.3 A voçoroca do Morro do Radar**

A área da voçoroca do Morro do Radar mereceu maior destaque quando da execução do projeto de RAD, tendo sido adotadas práticas mecânicas e vegetativas mais intensas.

Uma das práticas mecânicas mais importantes realizadas para o controle da voçoroca já foi discutida e constituiu do ordenamento dos fluxos à montante, desde o primeiro terraço; isto porque a voçoroca, por ser originada de rompimento da drenagem, era conseqüência de um acúmulo de águas pluviais que vinham desde as partes mais altas do talude. A partir do momento que os fluxos foram ordenados a montante, a reconformação do talude (realizada com o auxílio de retroescavadeira, conforme na Figura 4.8), teve como objetivo principal viabilizar o trabalho de revegetação. Ainda foram utilizadas algumas estruturas de contenção nos pontos de maior declive e/ou possivelmente mais ativos da voçoroca.

---

<sup>4</sup> *Yorin Master* é um adubo fosfatado cuja composição é: 17,5% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 20% Ca; 7% Mg; 0,5% Zn; 0,1% B; 0,12% Mn; 0,006% Mo; 0,05% Cr.



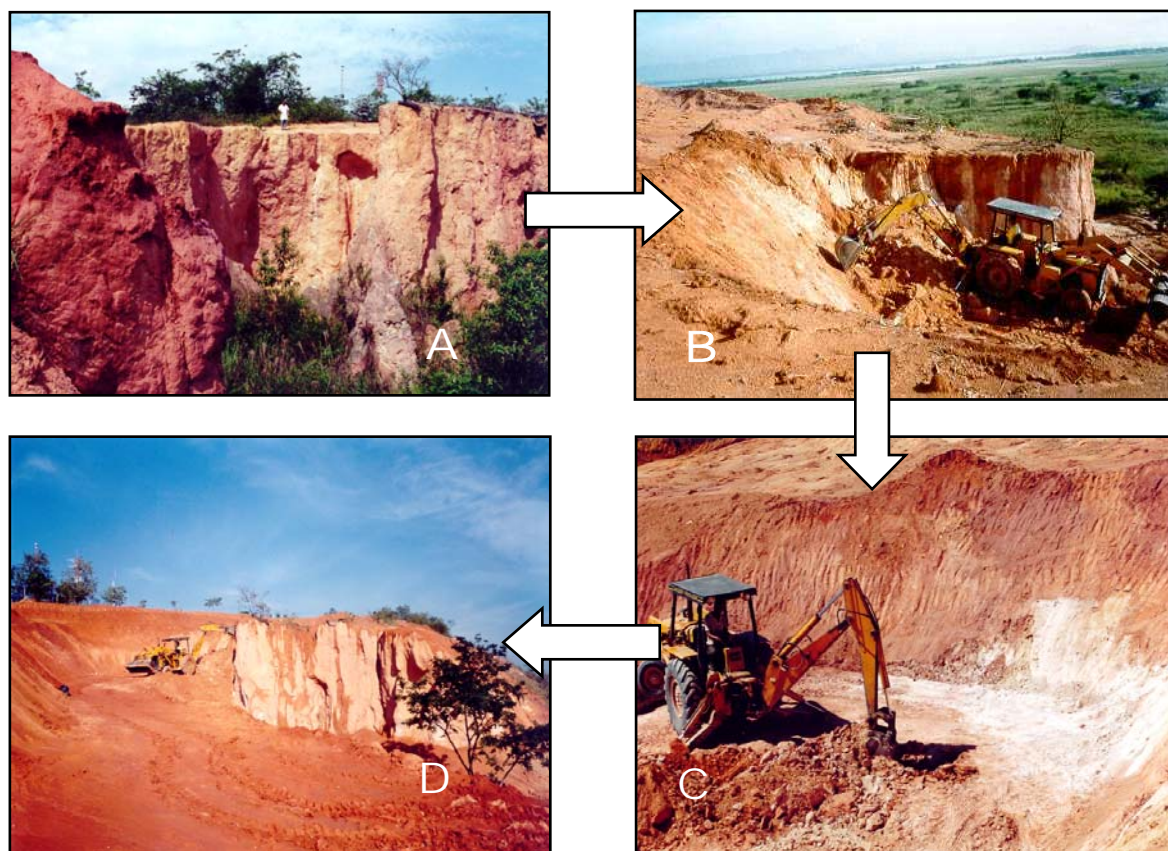


Figura 4.8. Práticas mecânicas na voçoroca do Morro do Radar. Observa-se a voçoroca antes na intervenção, com algumas alcovas de regressão (A); o trator de esteira no início do retaludamento, começando de cima para baixo (B); um trecho com a constituição do solo visivelmente diferenciada (C); o efeito de um dia de chuvas, sobre o solo remobilizado, com o trator concluindo a formação do primeiro talude de corte (D)

O resultado do trabalho de reconformação foi a formação de uma pequena bacia de drenagem, com dois taludes de corte, dois taludes de aterro, e uma zona de deposição.

Para a revegetação foram plantadas também algumas espécies de leguminosas arbóreas de rápido crescimento inoluladas. Dentre as espécies cita-se: *Mimosa bimucronata* (maricá), *Mimosa caesalpiniaefolia* (sabiá) e *Mimosa artemisiana* *Acacia Mangium*, *Albizia Guachapelle* etc. A Figura 4.9 mostra a área da voçoroca durante e após o estabelecimento da vegetação.

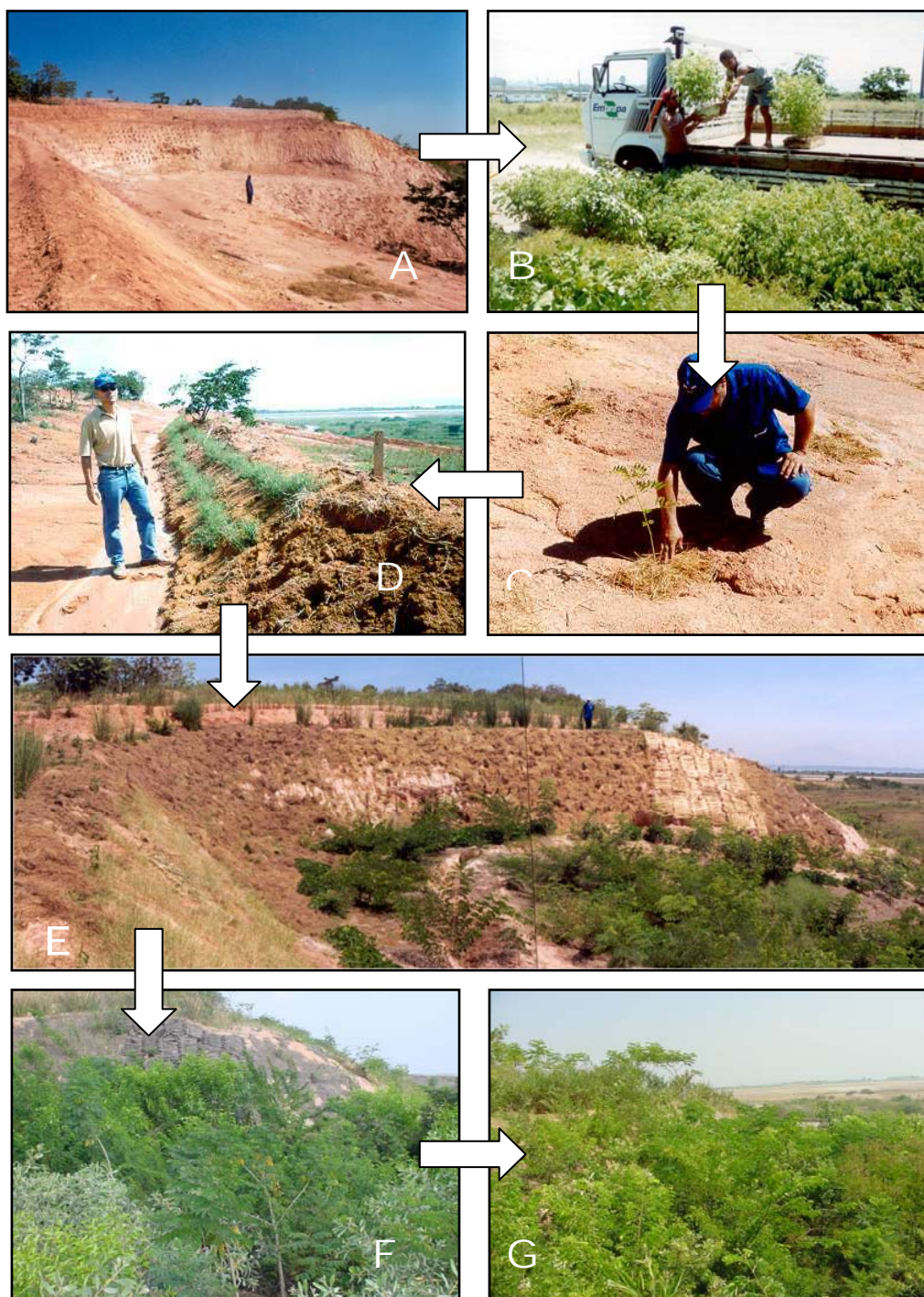


Figura 4.9. Processo de revegetação da voçoroca do Morro do Radar. Observa-se a abertura das covas (A); as mudas utilizadas (B); plantio em cova de uma muda de Albizia (C); 1 semana após plantio de Grama Barbante (D); o talude no estágio inicial de desenvolvimento das mudas, com a aplicação da apara de grama e uma esteira de bagaço de cana à direita, na parte mais declivosa do talude (E); o talude com vegetação já desenvolvida no talude de aterro, em julho de 2002 (F) e já ao longo de toda a área, em 2003 (G). Em 2004 já não é mais possível fotografar o talude desta posição em função do crescimento da vegetação.

#### **4.7 Avaliação da topografia antes e depois das práticas mecânicas**

A topografia original do talude, quando de sua execução, já foi avaliada (ver sub-ítem 4.5.3). Para uma melhor avaliação do efeito da geomorfologia local, em microescala, foram gerados modelos digitais de terreno (MDTs) com a voçoroca em seu estágio mais avançado e após a intervenção. O modelo gerado para a voçoroca em seu estágio mais avançado foi baseado nos dados de uma cubagem e na topografia (ENAR, 2000). Observa-se que a precisão dos dados é muito menor nesta última; a avaliação foi feita, no entanto, para dar uma idéia do gradiente das faces da voçoroca anteriormente e principalmente para estabelecer o MDT da área após o RAD, visando estudar os efeitos da morfologia do talude nos fluxos e o resultado das práticas de RAD. As discussões do efeito destas alterações na topografia, assim como mapas de declives encontram-se na discussão dos resultados. Neste tópico são apresentados os MDTs (Figuras 4.10 e 4.11) e uma figura com uma visualização em três dimensões dos dois estágios (4.12).

#### **4.8 Divisão da voçoroca do Morro do Radar em estações de monitoramento**

Logo ao início do trabalho foram selecionados doze pontos para as diversas avaliações realizadas, nomeados de estações (a abreviação Bt é utilizada ao longo da dissertação). A discussão das razões da escolha destes pontos consta na metodologia (capítulo 5).

Visando sumarizar as características geomorfológicas, da vegetação, assim como as práticas de RAD implantadas especificamente nas proximidades de cada estação, foi gerada a tabela 4.1. As fotos das práticas de RAD, referenciadas ao longo da tabela. No tópico referente às avaliações das variações da topografia e desempenho dos processos de RAD a relação entre as variáveis topográficas e, conseqüentemente, hidrológicas, sob os processos de revegetação e contenção dos processos erosivos é avaliada.

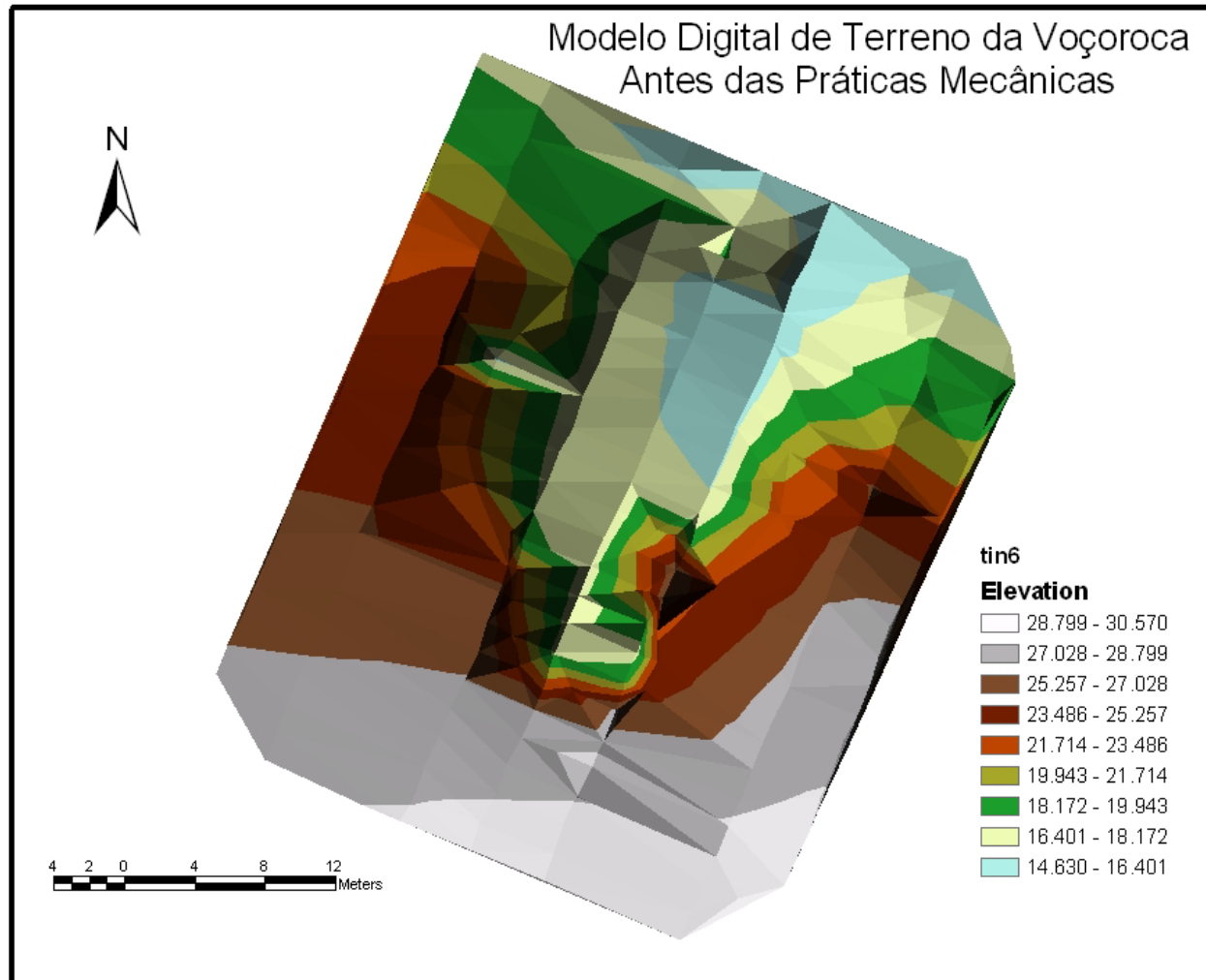


Figura 4.10. MDT da área da voçoroca em sue estágio mais avançado de degradação, anteriormente ao projeto de RAD.

## Modelo Digital de Terreno da Voçoroca Depois das Práticas Mecânicas

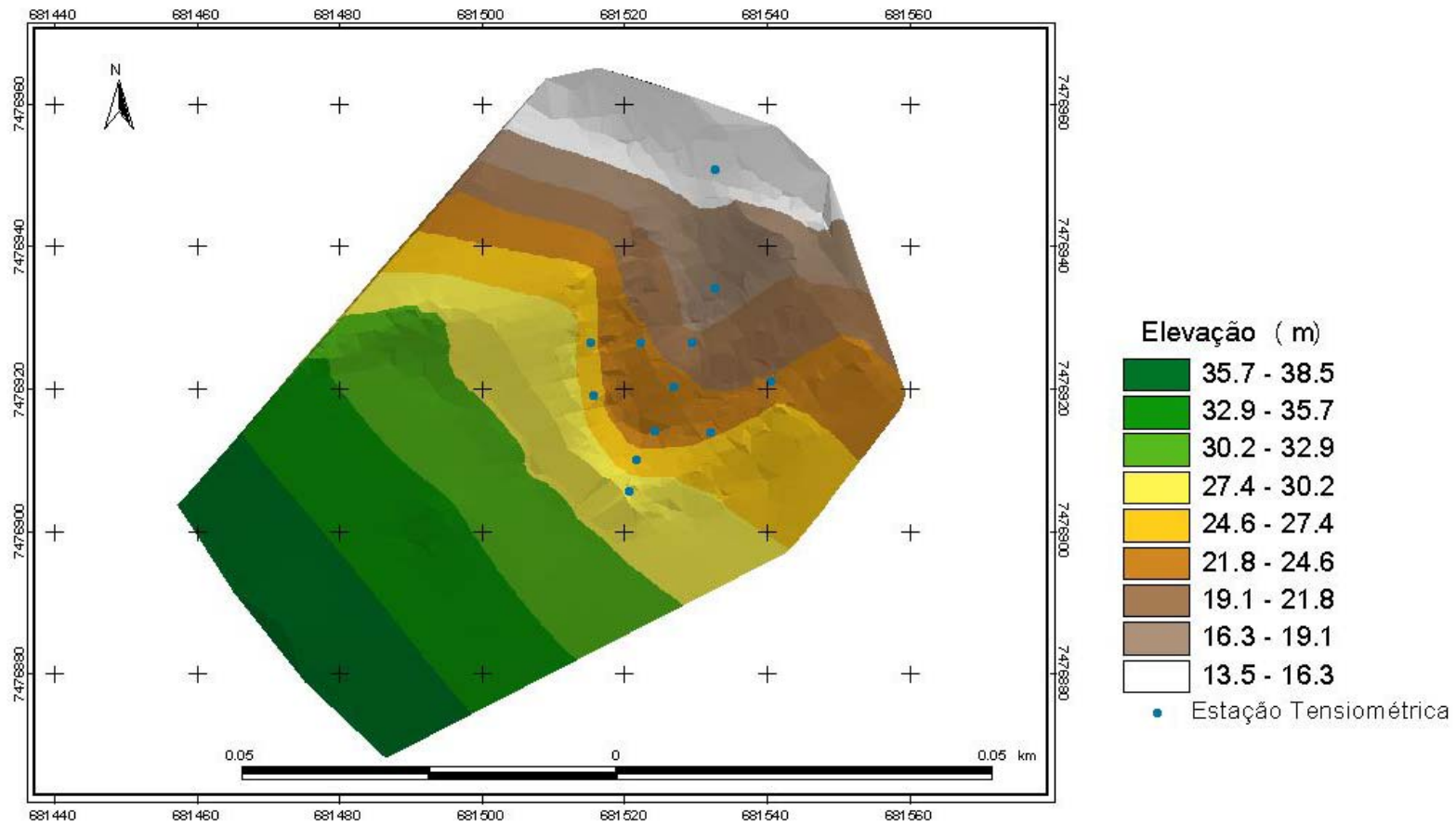


Figura 4.1

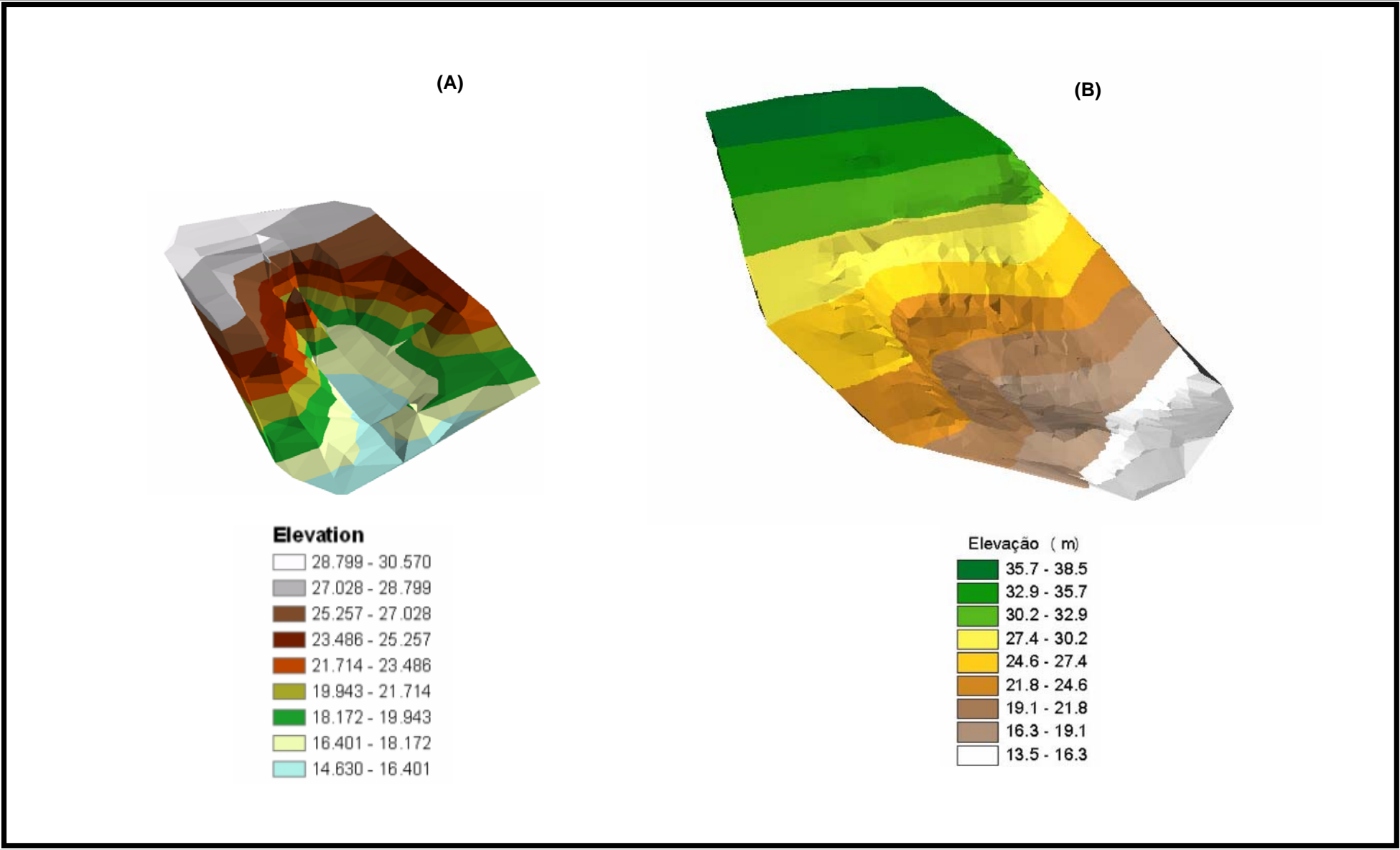


Figura 4.12. Modelos Digitais de Terreno da Voçoroca Antes (A) e Depois (B) das Práticas Mecânicas

Tabela 4.1: Posição na encosta, tipo de material, vegetação e práticas de RAD nas estações tensiométricas.

Estação	Posição na encosta	Tipo de material	Vegetação	Práticas de RAD
Bt1	Alta	Corte	<i>Vetiveria zizanioides nash</i> (Capim Vetiver); feijão guandu anão, plantados em volta da voçoroca, na forma de dois cordões com bom desenvolvimento vegetal. Vegetação em torno de 3 metros.	A vegetação está em cordão somente na área adjacente a voçoroca (Figura 4.13). Na exata localização da bateria o local está desprovido de vegetação. Existe também um cordão vegetado em área logo acima.
Bt 2	Alta	Corte	Esparsamente povoado. Coquetel de leguminosas arbóreas: <i>Mimosa bimucronata</i> ; <i>Mimosa caesalpinieaeifolia</i> . Indivíduos em torno de 3 a 7 metros.	Aplicação de apara de grama (Figura 4.14) (batatais).
Bt 3	Média	Aterro	Muitas espécies invasoras trepadeiras no chão. Vegetação com bom desenvolvimento. Predomínio no ambiente de <i>Mimosa caesalpinieaeifolia</i> . Indivíduos em torno de 5 a 10 metros de altura.	Aplicação de para de grama. Serrapilheira bastante desenvolvida. Base do primeiro talude de corte.
Bt 4	Média	Aterro	<i>Mimosa bimucronata</i> bem desenvolvido protegendo a bateria. A volta constata-se a presença de <i>Acácia holocerícea</i> ; <i>Acácia auriculiformis</i> e <i>Albízia guachapelle</i> . Indivíduos em torno de 5 a 10 metros de altura.	Beira do talude de aterro construído. Logo abaixo se constata uma barreira de pneus junto à estação Bt5 (Figura 4.15). Acima desta área, próximo à estação Bt11, há uma barreira de <i>pallet</i> quebrada, originando um sulco que vai até esta estação (Figura 4.16).
Bt 5	Média – baixa	Corte	Vegetação bem desenvolvida: <i>Acácia auriculiformis</i> e <i>Mimosa caesalpinieaeifolia</i> . Indivíduos em torno de 10 a 15 metros de altura.	Barreira com cinco pneus logo abaixo, o que pode induzir a concentração da umidade neste local. Nota-se a presença de muitos sulcos ao longo deste talude de corte, drenando em direção a estação Bt6 (Figura 4.17).
Bt 6	Baixa	Aterro	Árvore remanescente do local anterior a revegetação e recuperação da área. Muitos outros indivíduos de com bom desenvolvimento: <i>Acácias auriculiformis</i> ; <i>Mimosas caesalpinieaeifolia</i> . Indivíduos em torno de 10 a 20 metros de altura.	A árvore remanescente foi soterrada (algumas fotos desta árvore na época da realização das práticas mecânicas podem ser encontradas na metodologia), restando mais ou menos metade de sua antiga altura acima da superfície. Posicionada no fundo do vale, esta estação recebe fluxos e sedimentos provenientes de sulcos presentes ao longo de todo o talude de corte inferior.
Bt 7	Baixa	Aterro	Capim colônio. Vegetação esparsa. No interceptômetro está instalado na borda da vegetação da voçoroca, próximo a <i>Mimosa bimucronata</i> ; <i>Mimosa caesalpinieaeifolia</i> ; <i>Acácia auriculiformis</i> . Indivíduos em torno de 10 a 20 metros de altura.	Fora da voçoroca – escoadouro. Logo a frente da voçoroca, entre a estação Bt7 e a voçoroca, foi instalada uma barreira de pneus para impedir a formação dos fluxos para fora da área.
Bt 8	Alta	Corte	<i>Mimosa bimucronata</i> ; <i>Mimosa caesalpinieaeifolia</i> . Indivíduos em torno de 5 a 10 metros de altura.	Antigo experimento com <i>Arachis pintóia</i> . Aplicação de apara de grama – bom desenvolvimento vegetal. Posição mais baixa no talude de corte e relação à estação Bt9
Bt 9	Alta	Corte	<i>Mimosa bimucronata</i> ; <i>Mimosa caesalpinieaeifolia</i> . Indivíduos em torno de 5 a 10 metros de altura.	Antigo experimento com <i>Arachis pintóia</i> . Aplicação de apara de grama – bom desenvolvimento vegetal.
Bt 10	Média	Aterro	Vegetação bem desenvolvida. <i>Acácias auriculiformis</i> ; <i>Mimosas caesalpinieaeifolia</i> . Indivíduos em torno de 10 a 20 metros de altura.	Aplicação de apara de grama batatais. Beirada do segundo talude de corte, ainda no talude de aterro, próximo a área onde o processo erosivo ainda está ativo.
Bt 11	Alta	Corte	Cordão vegetado logo acima – capim colônio, feijão guandu anão. Presença de indivíduos de porte mediano em relação aos demais locais; <i>Mimosa bimucronata</i> . <i>Mimosas caesalpinieaeifolia</i> . Indivíduos em torno de 5 a 10 metros de altura.	Logo acima da área onde o processo erosivo ainda está ativo. Aplicação de esteira bagaço de cana para contenção da erosão superficial (uma foto desta prática se encontra na figura 4.9 (e), onde se observa a esteira no extremo direito da foto). Logo abaixo desta estação há uma barreira de <i>pallet</i> quebrada, originando um sulco que vai até a estação Bt4 (Figura 4.16).
Bt 12	Alta	Corte	Cordão vegetado logo acima – capim colônio, feijão guandu anão. Presença de indivíduos de menor porte em relação aos demais locais – <i>Acácias holocerícea</i> ; <i>Mimosa caesalpinieaeifolia</i> . Indivíduos em torno de 5 a 10 metros de altura.	Logo acima da área onde o processo erosivo ainda está ativo. Aplicação de esteira bagaço de cana para contenção da erosão superficial. Foi instalada também logo abaixo desta estação uma barreira de <i>pallets</i> de caixas de transporte aeronáutico, com o objetivo de conter a água das enxurradas que poderia vir de montante. Logo abaixo da estação constata-se erosão ativa, remanescente de uma alcova de regressão que havia sido entulhada com o material do talude de aterro (Figura 4.18).



Figura 4.13. Cordão vegetado a montante da estação Bt1, em seu estágio inicial de desenvolvimento.



Figura 4.14. Aplicação de apara de grama na estação Bt2, no estágio inicial de desenvolvimento das plantas.





Figura 4.15. Barreira de pneus na estação Bt5. Ao fundo a bateria de tensiômetros, na frente um pluviômetro de solo nivelado utilizando-se como base um tijolo (P5).



Figura 4.16. Erosão entre a estação Bt4 e Bt11, observando-se a barreira de *Pallet* quebrada.



Figura 4.17. Erosão próxima às estações Bt5 e Bt6.



Figura 4.18. Erosão originada da compactação dinâmica do talude de aterro. Nota-se o afloramento de uma alcova de regressão remanescente, entulhada com o material do talude.

## 5 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho pode ser dividida em 6 etapas. A primeira compreende um estudo das variações ocorridas na topografia local e a avaliação das formas de relevo e declividades presentes na topografia atual. A segunda etapa refere-se à avaliação das propriedades físicas dos solos nos diferentes segmentos da voçoroca. A terceira compreende o monitoramento da precipitação, acompanhado da quarta etapa, que constitui o monitoramento da interceptação das chuvas promovida pelas copas arbóreas e pela serrapilheira, objetivando-se a obtenção de valores de precipitação terminal<sup>5</sup> (sendo desprezada contribuição do *stemflow* ou fluxo de tronco) e estocagem de umidade em cada um dos compartimentos estudados. A quinta etapa corresponde ao monitoramento dos potenciais matriciais e das cargas totais nos diferentes segmentos da voçoroca. Com base nesta quinta etapa segue-se a sexta etapa, onde são descritos os procedimentos utilizados para a construção dos mapas equipotenciométricos.

### 5.1 Metodologia para avaliação da topografia antes e depois das práticas mecânicas

Visando obter um melhor critério na escolha das localidades das estações tensiométricas, assim como subsidiar a discussão das avaliações das cargas totais e cargas de pressão no solo, bem como as equipotenciais, foi realizado um pequeno estudo das variações ocorridas na topografia da voçoroca desde a execução das práticas de RAD.

Nesta etapa foram observadas as variações ocorridas essencialmente na declividade do talude após a sua reconformação, observando-se as também as formas de relevo originadas. Para estas avaliações foram gerados os mapas de classes de declividade da voçoroca em seu estágio mais avançado e após as práticas de RAD, sendo também estipuladas as formas na encosta em cada segmento, em planta e em perfil (o critério para a classificação foi uma comparação da carta topográfica com observações em campo). Para a geração destes mapas de

---

<sup>5</sup> A precipitação terminal representa a quantidade de água que atravessa o dossel da vegetação e atinge o solo. A parte da água das chuvas que atravessa os troncos das árvores (fluxo de tronco ou *stemflow*) atinge o solo pontualmente, na base dos indivíduos vegetais. O conceito de precipitação terminal assemelha-se ao de precipitação efetiva ou útil, que seria a parcela de precipitação pluviométrica total que se torna disponível para o desenvolvimento das plantas (Curi, 1993).

declividade foram utilizados registros topográficos do talude original (escala 1:200); registros da cubagem da área da voçoroca (escala 1:50), realizada anteriormente à intervenção (com nível topográfico); e também de um levantamento topográfico realizado após as intervenções (escala 1:50, curvas de 0,5 em 0,5m, tendo sido esta a carta utilizada para a geração das equipotenciais). Posteriormente, os mapas de declividade foram gerados no *ArcView* e *ArcMap*. Os resultados depois foram relacionados em uma tabela que correlaciona estas variáveis, posição na encosta e tipo de material.

O objetivo quando da avaliação das formas em planta e em perfil foi procurar estabelecer uma relação mais precisa possível entre as formas de relevo após a reconformação e a dinâmica hidrológica local (fluxos subsuperficiais e interceptação diferencial), podendo-se observar a convergência dos fluxos tanto em função de uma morfologia côncava em planta, quanto côncava em perfil.

## **5.2 Avaliação das propriedades físico-hídricas do solo**

Para a avaliação das propriedades físicas dos solos a metodologia consistiu da coleta de amostras em campo e em seu processamento em laboratório, seguindo a metodologia descrita no Manual de Métodos de Análises de Solos (Embrapa, 1997).

### **5.2.1 Coleta de amostras de solo**

Para a determinação das propriedades físicas dos solos foram coletadas amostras deformadas (amolgadas) e indeformadas, em doze pontos ao longo da voçoroca (uma amostragem para cada estação tensiométrica). As profundidades selecionadas (20cm e 40cm e 80cm) correspondem às profundidades dos tensiômetros instalados na área.

As amostras indeformadas de solo foram coletadas em cilindros com volume de 183cm<sup>3</sup> (anéis de Uhland), e em cilindros com volume de 50cm<sup>3</sup> (anéis de Kopecky). As primeiras foram utilizadas para a determinação dos valores de condutividade hidráulica saturada (permeabilidade ou  $k_{sat}$ ), retenção de umidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total; as últimas foram utilizadas para a determinação do peso específico do solo seco e da densidade das partículas

(ou densidade real dos grãos). As amostras amolgadas foram utilizadas somente para a determinação da distribuição granulométrica do solo.

### **5.2.2 Densidade do solo ( $D_s$ ) [ $\gamma_d$ - peso específico seco ]**

Determinada pelo método do anel volumétrico de Kopecky, onde se estabelece uma relação entre o volume da amostra e seu peso seco (amostra seca em estufa a 105°C).

### **5.2.3 Densidade real das partículas ( $D_p$ ) [G - densidade real dos grãos]**

Obtida medindo-se o volume ocupado por 10g de terra fina seca a 105°C, utilizando-se álcool etílico absoluto e balão aferido a 50mL.

### **5.2.4 Porosidade total [n]**

Deduzida a partir da Equação 5.1:

$$n(\%) = \frac{100(D_p - D_s)}{D_p} \quad (5.1)$$

### **5.2.5 Análise granulométrica (percentual de areia, silte e argila) [sem determinação da curva granulométrica]**

Determinada por sedimentação, empregando-se agitador de alta rotação e NaOH (e em casos especiais Calgon) como agente de dispersão.

### **5.2.6 Curva de retenção de umidade**

Na realidade constitui uma curva que descreve o secamento da amostra, a partir da saturação. Esta foi obtida através da aplicação de diferentes sucções (6kPa; 10kPa; 33kPa; 100kPa; 500kPa; 1500kPa). Para a aplicação das tensões nas amostras foi utilizado o aparelho extrator de Richards, em amostras de solo previamente saturadas.

### **5.2.7 Macro e Microporosidade**

A microporosidade foi determinada através da utilização do valor de umidade correspondente à tensão de 6kPa na curva de retenção de umidade da amostra (60 cm de coluna d'água). A macroporosidade corresponde à diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

### **5.2.8 Condutividade hidráulica saturada [ $k_{sat}$ ou permeabilidade saturada]**

Avaliada através do método do permeâmetro de carga constante (em laboratório). Para este procedimento foram utilizadas as mesmas amostras utilizadas na determinação da curva de retenção, após este último procedimento.

## **5.3 Monitoramento da precipitação**

Para a obtenção dos registros pluviométricos foram utilizados dados provenientes de três diferentes fontes. No primeiro período do monitoramento, de 23/03/2003 até 14/09/03, foram utilizados registros de um pluviógrafo (registro contínuo) instalado em área próxima à voçoroca. Neste período foi possível a obtenção de dados de intensidade das chuvas, bem como o exato número de episódios de chuva em cada dia monitorado.

Posteriormente, no período de 15/09/03 a 1/12/03, foram utilizados dados provenientes da estação meteorológica do CENPES, dentro da Ilha do Fundão, pois não foi possível a obtenção de registros diretos na área. Os dados de chuva provenientes desta estação são fornecidos em magnitude por hora (milímetros de chuva).

A partir do mês de dezembro foram utilizados dados provenientes de um pluviômetro instalado no campo experimental do Morro do Radar em área próxima à voçoroca (que fornece dados de altura total de chuva (mm) precipitada em 24 horas, não tendo sido possível a determinação das intensidades).

Neste estudo foi dada ênfase à análise das chuvas diárias por classes de magnitude, para que pudessem ser estudados padrões de interceptação das copas arbóreas e da serrapilheira, e, conseqüentemente, os valores de precipitação terminal decorrentes de diferentes magnitudes de chuvas. A partir deste tipo de avaliação procurou-se estimar a influência de chuvas de diferentes magnitudes de

chuva sob o processo de infiltração da água no solo, alterando em última análise o comportamento dos potenciais matriciais, cargas totais e o direcionamento dos fluxos d água no solo.

A distribuição das classes de chuvas diárias foi arbitrada tomando-se como critério o padrão de comportamento da intercepção, como sugerido por Miranda (1992). As classes de chuva estipuladas foram outras, entretanto, em função do padrão de precipitação encontrado no período avaliado e os valores de intercepção obtidos. Na discussão dos resultados encontram-se as classes estipuladas.

#### **5.4 Avaliação da intercepção das chuvas promovida pelas copas arbóreas e pela serrapilheira**

A metodologia consistiu de avaliações da intercepção das chuvas pelas copas arbóreas, da retenção hídrica da serrapilheira e de sua capacidade de intercepção. O monitoramento refere-se ao período de 25/08/2003 a 3/03/2004. Os registros pluviométricos foram obtidos diariamente (precipitação total diária em mm/24hs). Durante este período foram registrados 63 dias em que houve precipitação, que foram divididos em cinco classes de magnitude. Posteriormente foram gerados gráficos de dispersão, com a distribuição do percentual de intercepção de água pelas copas arbóreas em função da magnitude das chuvas.

Para a avaliação da intercepção promovida pela vegetação foram utilizados dois tipos de instrumentos: na precipitação total foi utilizado um pluviômetro (instalado a um metro e meio do solo, em área desprovida de vegetação, próxima à voçoroca); e para a intercepção das copas foram utilizados 12 pluviômetros de solo (Figura 5.1), nomeados P1, P2 e assim por diante. Estes últimos foram espalhados em diferentes 12 pontos da voçoroca, embaixo das copas arbóreas, em posições próximas a cada uma das baterias de tensiômetros (tal critério de escolha da localização dos pluviômetros teve como objetivo gerar valores de precipitação terminal para as diferentes estações tensiométricas). Foram obtidos assim os valores de intercepção das copas em diferentes pontos ao longo da área de estudo, com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial deste processo e sua influência sob o processo de infiltração da água no solo e, em última análise sob o comportamento dos fluxos subsuperficiais.

Para a avaliação da retenção hídrica máxima da serrapilheira (ou potencial) foram coletadas 36 amostras de serrapilheira, três amostras por ponto, acumulada na superfície do solo. Para esta coleta foram utilizados “quadrats”, que são molduras quadradas, com uma espessura de 30 cm e uma área total de 0.25 m<sup>2</sup>, fincadas no chão até atingir o solo, sendo coletada somente a serrapilheira presente acima do solo. As amostras foram levadas ao laboratório, sendo saturadas durante 90 minutos (Vallejo & Vallejo, 1982), sendo depois pesadas para o cálculo percentual da capacidade de retenção hídrica máxima em cada um dos pontos amostrais.

Para o cálculo da capacidade de intercepção (ou capacidade de intercepção máxima) da serrapilheira foram utilizados os resultados da capacidade de retenção hídrica da mesma. Os valores do peso em gramas de água foram convertidos para mililitros através da Equação 5.2 (Miranda, 1992):

$$T(mm) = \frac{t(ml)}{a(dm^2) \times 10} \quad (5.2)$$

Onde: T = precipitação (em milímetros); t = volume de água retido no pluviômetro de solo (mililitros); a = área da seção transversal do pluviômetro de solo (em decímetros quadrados).

Após estas avaliações, com os valores de precipitação total, intercepção das copas e intercepção da serrapilheira, puderam-se calcular os valores de precipitação terminal. Atenta-se novamente para o fato de que o fluxo nos troncos está sendo negligenciado neste estudo, dado que normalmente considera-se a importância relativa desta variável muito pequena. Miranda (1992) encontrou valores de aproximadamente 1,8% para a Floresta da Tijuca. A partir destes dados foi possível gerar gráficos com valores de intercepção das copas arbóreas, intercepção pela serrapilheira e precipitação terminal, para chuvas de diferentes classes de magnitude. A partir destes dados foram obtidos valores médios gerais para todo o período monitorado para os parâmetros intercepção pelas copas e retenção hídrica potencial.





Figura 5.1. Pluviômetro de solo P3, localizado próximo à bateria de tensiômetros Bt3.

### 5.5 Monitoramento dos potenciais matriciais e cargas totais

Para a determinação dos potenciais matriciais foram utilizadas 12 baterias de tensiômetros de manômetro de mercúrio (denominadas Bt1, Bt2, Bt3, etc., cada uma com três tensiômetros, nas profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm), instalados em diferentes segmentos da voçoroca (Figuras 5.2 e 5.3). O objetivo foi caracterizar a variação temporal e espacial dos potenciais matriciais diariamente (isto é, foram realizadas leituras diárias por técnico de campo, no mesmo horário em todas as estações), possibilitando uma avaliação da resposta da área a precipitação diária, para as diferentes profundidades avaliadas.

Quando da escolha da localização das estações tensiométricas, procurou-se abranger os diferentes compartimentos funcionais da voçoroca (taludes de corte e aterro), de modo a definir as possíveis rotas de fluxos subsuperficiais.

As profundidades foram selecionadas visando, primeiramente, nos 20cm, avaliar a influência direta da vegetação e da cobertura morta sob o comportamento dos fluxos subsuperficiais, constituindo uma profundidade mínima onde o uso do tensiômetro é viável, sem a ocorrência de sucções muito elevadas, que pudessem comprometer o monitoramento (o que poderia acontecer se os aparelhos fossem instalados em menores profundidades). Os 80cm foram escolhidos como sendo a profundidade mais elevada que foi viável para instalação dos tensiômetros com o equipamento disponível. O objetivo quando da escolha desta profundidade foi avaliar

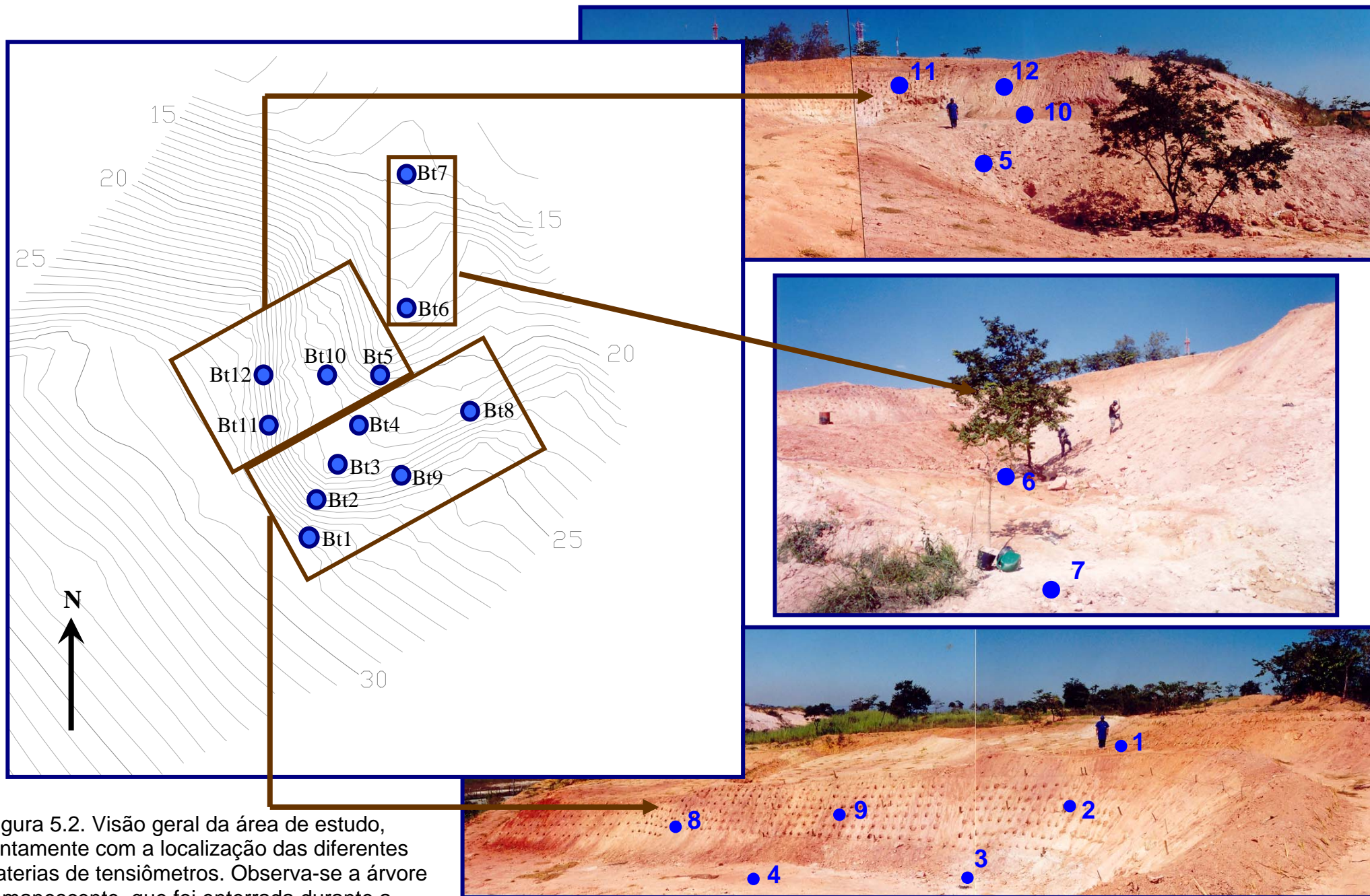


Figura 5.2. Visão geral da área de estudo, juntamente com a localização das diferentes baterias de tensiômetros. Observa-se a árvore remanescente, que foi enterrada durante a reconformação do talude

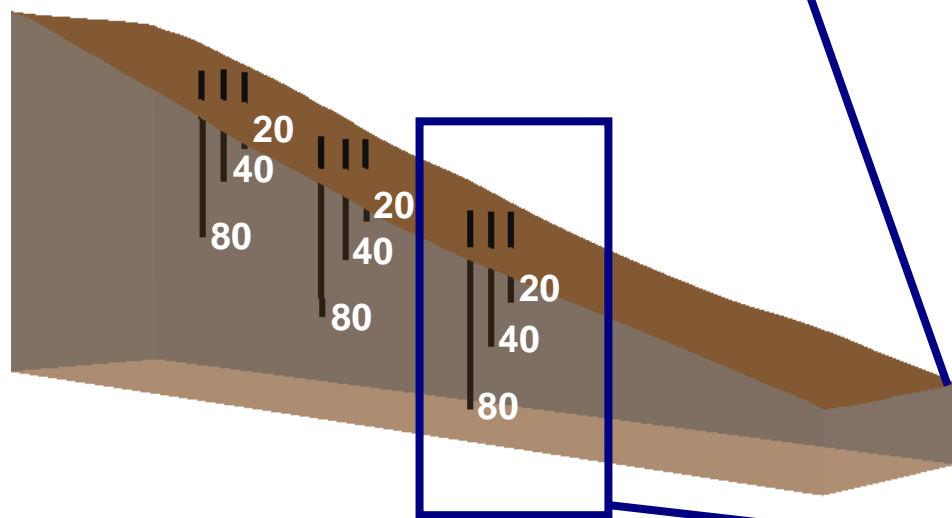
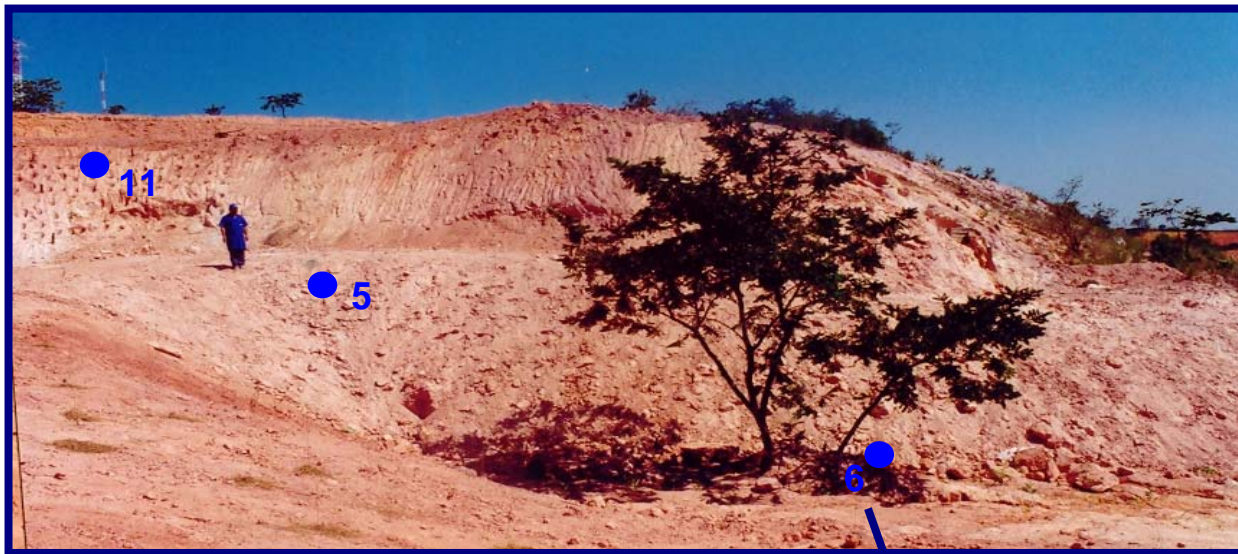


Figura 5.3. Esquema das profundidades das baterias tensiométricas.

O fluxo subsuperficial à maior profundidade possível, sendo detectadas maiores influências das propriedades físico-hídricas do solo, além de possíveis anisotropias que tendem a ocorrer com o aumento da profundidade de avaliação.

Os 40 cm foram selecionados por constituírem uma profundidade média entre as duas outras. O objetivo foi avaliar também a influência dos sistemas radiculares das espécies implantadas (grosso modo, já que não foram realizadas avaliações específicas sobre arquitetura radicular) e de espécies em estágio sucessional mais avançado de ambientes florestais no Rio de Janeiro.

O modelo utilizado constitui um tensiômetro de manômetro de mercúrio industrial, confeccionado por Embrapa Petrolina. O corpo do instrumento é de PVC de ½ polegada de diâmetro, possuindo uma cápsula porosa de porcelana conectada à sua extremidade inferior, sendo a outra extremidade tampada com uma rosca *cap*, de forma a impedir a entrada de ar no sistema. Abaixo da rosca, à (cinco) centímetros, ocorre a conexão com o tubo capilar, sendo este uma mangueira de nylon com diâmetro de 1/8 de polegada. O suporte para a coluna de mercúrio é de alumínio (com estacas de fácil instalação em solos residuais saprolíticos e substratos adensados), possuindo uma cubeta de acrílico transparente para o armazenamento do mercúrio. A mangueira deve apresentar boa transparência (permitindo a detecção de bolhas de ar), para uma melhor leitura da coluna de mercúrio, possuindo também boa resistência às condições atmosféricas (insolação, calor, chuvas etc).

De acordo com Reichard (1987), para a obtenção dos potenciais matriciais faz-se necessária a transformação da leitura do tensiômetro em carga de pressão, que é obtida utilizando-se da seguinte Equação (5.3):

$$H_p = -13,6h + h_1 + h_2 \quad (5.3)$$

$$H_p = -12,6h + (h_1 + h_2)$$

Onde 13,6 é a relação entre os pesos específicos do mercúrio e da água;  $h$  é a leitura do tensiômetro, em centímetros de mercúrio;  $h_1$  é a altura que vai desde a superfície do terreno até o ponto do tensiômetro onde ocorre a conexão com a mangueira de nylon (no modelo utilizado  $h_1$  é constante e igual a 10cm);  $h_2$  é a profundidade do tensiômetro abaixo do solo. A Figura 5.4 ilustra de modo simples o processo de aferição destes parâmetros.

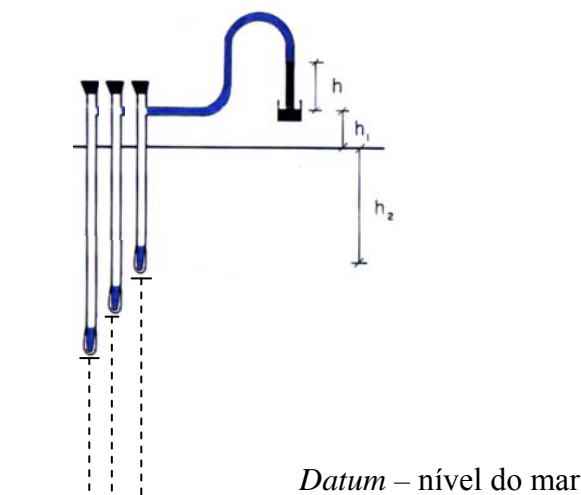


Figura 5.4. Obtenção dos potenciais matriciais e cargas totais no solo.

Como vimos na revisão de literatura, o potencial total da água no solo constitui, em termos práticos, a soma do potencial matricial e do potencial gravitacional.

O potencial gravitacional será medido em função da elevação em relação a um nível referencial ou *Datum* das diferentes estações tensiométricas instaladas. O *Datum* escolhido para a geração dos gráficos de variação das cargas totais, equipotenciais de carga total, em planta e em perfil, foi o nível do mar. Sendo assim, o potencial gravitacional de cada tensiômetro é dado pela altura da cápsula porosa, a partir do nível de referência, de forma a serem obtidos valores constantes de potenciais gravitacionais para cada tensiômetro.

Posteriormente, os valores obtidos em cada estação tensiométrica foram interpolados de modo a permitir a geração de equipotenciais, assunto melhor discutido no item a seguir.

## 5.6 Definição das equipotenciais

A definição das equipotenciais ou mapas equipotenciométricos teve como objetivo a caracterização do sentido dos fluxos subsuperficiais no solo (através das equipotenciais de carga total), bem como, o mapeamento da expansão e contração da zona de saturação (através das equipotenciais de carga de pressão), em diferentes momentos.

### 5.6.1 Equipotenciais em planta

Para a geração das equipotenciais em planta da área da voçoroca o primeiro passo foi estimar os valores de cargas totais e de cargas de pressão para cada bateria de tensiômetro, dentro de cada uma das profundidades, pois os mapas foram feitos por profundidade (um para cada uma das profundidades avaliadas).

Os mapas foram gerados pelo *software Surfer 7.0 (Golden Software Inc., 1999)*, que se utiliza de uma planilha digital com valores das coordenadas x, y e z para interpolar os valores dos diferentes pontos, gerando as equipotenciais. Os valores de x e y (posicionamento das baterias de tensiômetros no plano bidimensional) foram obtidos da carta topográfica da área (arquivo *dwg*). Os valores de z correspondem às cargas totais ou de pressão, conforme se queira gerar equipotenciais de carga total ou carga de pressão, respectivamente. Os valores x,y e z foram primeiramente digitados em uma planilha do Excel (arquivo *xls*), para serem posteriormente exportados para o *Surfer 7.0*. Os dados são então interpolados no *Surfer 7.0* (o método de interpolação escolhido foi o de Krigagem), gerando um *grid*, que constitui um arquivo onde os valores de z possuem uma arrumação espacial retangular e regular.

Posteriormente cada *grid* foi transformado em um gráfico (*contour map*), que constitui o mapa equipotenciométrico (Figura 5.5). Posteriormente os gráficos foram exportados para o *Autocad Map 2000*, para serem georeferenciados, editados e incorporados ao mapa topográfico, para a visualização das equipotenciais em relação às curvas de nível do terreno.

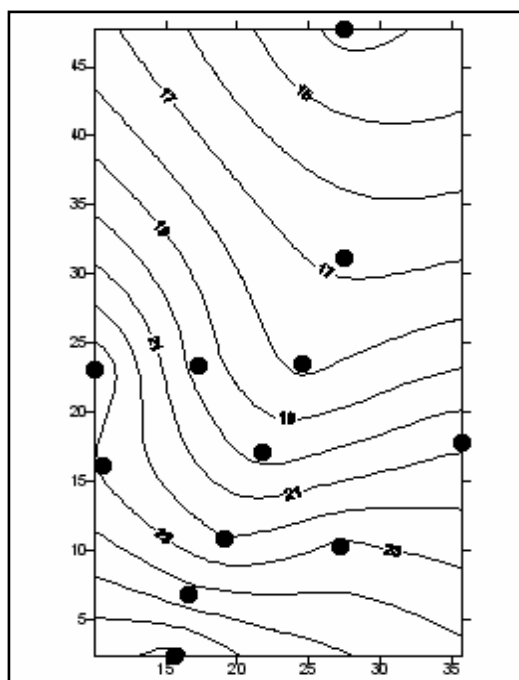


Figura 5.5. Gráfico gerado pelo Surfer das equipotenciais, pronto para exportação para o Autocad. As linhas constituem as equipotenciais de cargas totais, e os pontos representam as diferentes estações tensiométricas espalhadas pela área.

### 5.6.2 Equipotenciais em perfil

Para esta avaliação foram utilizadas somente as baterias de tensiômetros Bt1 a Bt7, que constituem um transecto que passa do ponto mais alto ao mais baixo da voçoroca, sendo possível o traçado de um perfil transversal. Desde já se atenta para o fato de que estes perfis possuem um limite de profundidade ao longo do talude correspondente à profundidade máxima dos tensiômetros (80 cm), no entanto, os dados foram extrapolados até a profundidade de 1,2 m, de modo a visualizar o fenômeno da percolação dos fluxos com maior facilidade. Esta profundidade limite é arbitrária, porém pode ser considerada pequena, pois constitui um incremento de somente 40 cm de profundidade.

O objetivo quando da utilização deste procedimento foi tentar relacionar a existência de alguns condicionantes locais, como a árvore remanescente presente na voçoroca na altura da estação Bt6, as estruturas de contenção entre a estação Bt5 e a Bt6, a declividade em cada ponto, as propriedades dos solos e a vegetação sobre o comportamento das poro-pressões, de modo a finalizar a avaliação das poro-pressões.

As equipotenciais em perfil (ver Figura 5.6) foram geradas segundo o mesmo princípio dos mapas em planta, porém agora com valores de x e de y diferentes. Os valores de x e y foram obtidos através de um perfil topográfico elaborado no *software Autocad Map 2000*, que já possuíam a localização e a cota de cada aparelho. Os valores foram então transferidos para uma planilha do *Excel*, e neste programa os valores de z foram adicionados (os mesmos valores utilizados para a geração das equipotenciais em planta, para cada profundidade). Os dados foram então interpolados no *Surfer 7.0*, gerando-se *grids*, que foram posteriormente transformados em gráficos (*contour map*) e incorporados aos perfis transversais do *Autocad (dwg)* para a visualização das equipotenciais em relação ao perfil transversal do terreno (seguindo-se procedimento semelhante ao empregado para a geração das equipotenciais em planta).

### **5.7 Avaliação da relação entre os condicionantes locais e o desempenho das práticas de RAD nas diferentes estações**

Nesta etapa foram examinadas as relações entre a nova topografia, propriedades físico-hídricas dos solos, a vegetação estabelecida e seus efeitos sobre a hidrologia local, e, em última análise, sobre o desempenho das práticas de RAD e sobre o processo de contenção da voçoroca.



## **6 Análise dos Resultados**

A avaliação dos resultados constituiu de seis etapas. Primeiramente foram avaliadas as variações ocorridas na topografia da área de estudo ao longo do tempo. Posteriormente foram avaliadas as relações entre as precipitações e a interceptação pelas copas arbóreas e pela serrapilheira, sendo depois avaliadas as propriedades físico-hídricas dos solos. De posse destes resultados deram-se início as avaliações da variabilidade das cargas totais e cargas de pressão para a área, através de gráficos e mapas de equipotenciais.

A última etapa da discussão dos resultados constitui uma avaliação do desempenho das práticas de RAD adotadas nas diferentes estações e suas relações com os diversos condicionantes locais já mensurados.

### **6.1 Avaliação das variações na topografia da área de estudo ao longo do tempo**

Seguem os mapas de classes de declividade para as duas fases (Figuras 6.1 e 6.2). Observa-se que o mapa de declividade gerado para a voçoroca em seu estágio mais avançado ficou com uma definição baixa, em função da falta de dados para a geração dos MDTs, o que já foi constatado no capítulo 4. Na realidade os dados utilizados para a confecção deste mapa foram obtidos em uma pequena cubagem realizada com um nível topográfico pela empresa ENAR de engenharia ambiental, quando da execução do seu diagnóstico do estado de conservação. No entanto o objetivo maior desta avaliação foi estipular valores com precisão suficiente para que se pudesse avaliar o efeito da reconformação do talude.

Foram constatados valores de declividade de 2,80% a 89,85% para a voçoroca em seu estágio mais avançado, o que indica condições precárias de estabilidade e para o estabelecimento da vegetação. Os valores são muito superiores, em sua maioria, aos valores do talude original (que eram de 30° e 35°), em função do colapso das paredes do talude com o avanço da voçoroca. Os maiores declives foram encontrados obviamente para as paredes da voçoroca, sendo observada também uma pequena sessão remanescente e muito declivosa, separada do resto do talude, e que provavelmente entraria em colapso sem os trabalhos de RAD.

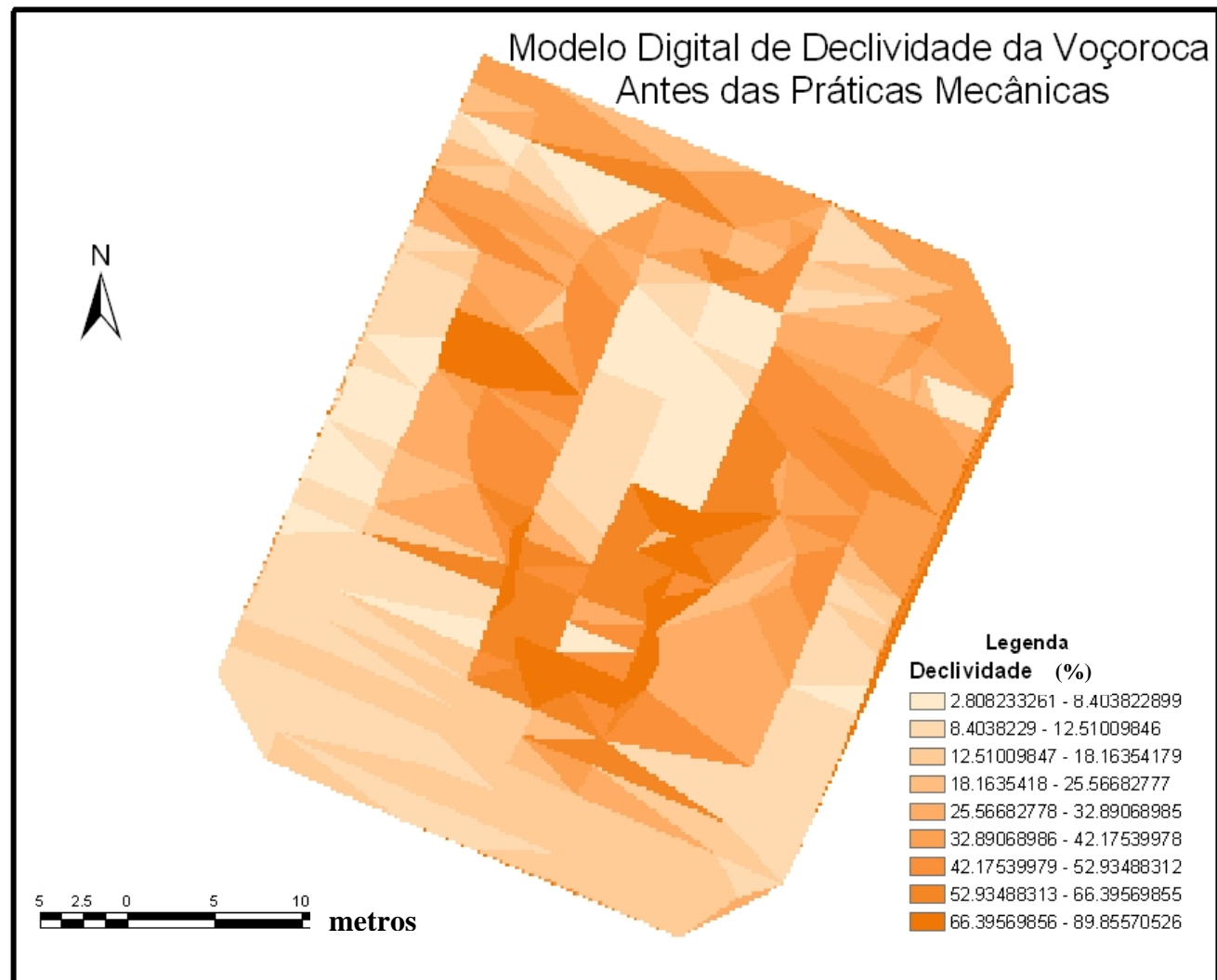


Figura 6.1. Modelo Digital de Classes de Declividade antes das práticas mecânicas.

## Modelo Digital de Declividade da Voçroca Depois das Práticas Mecânicas

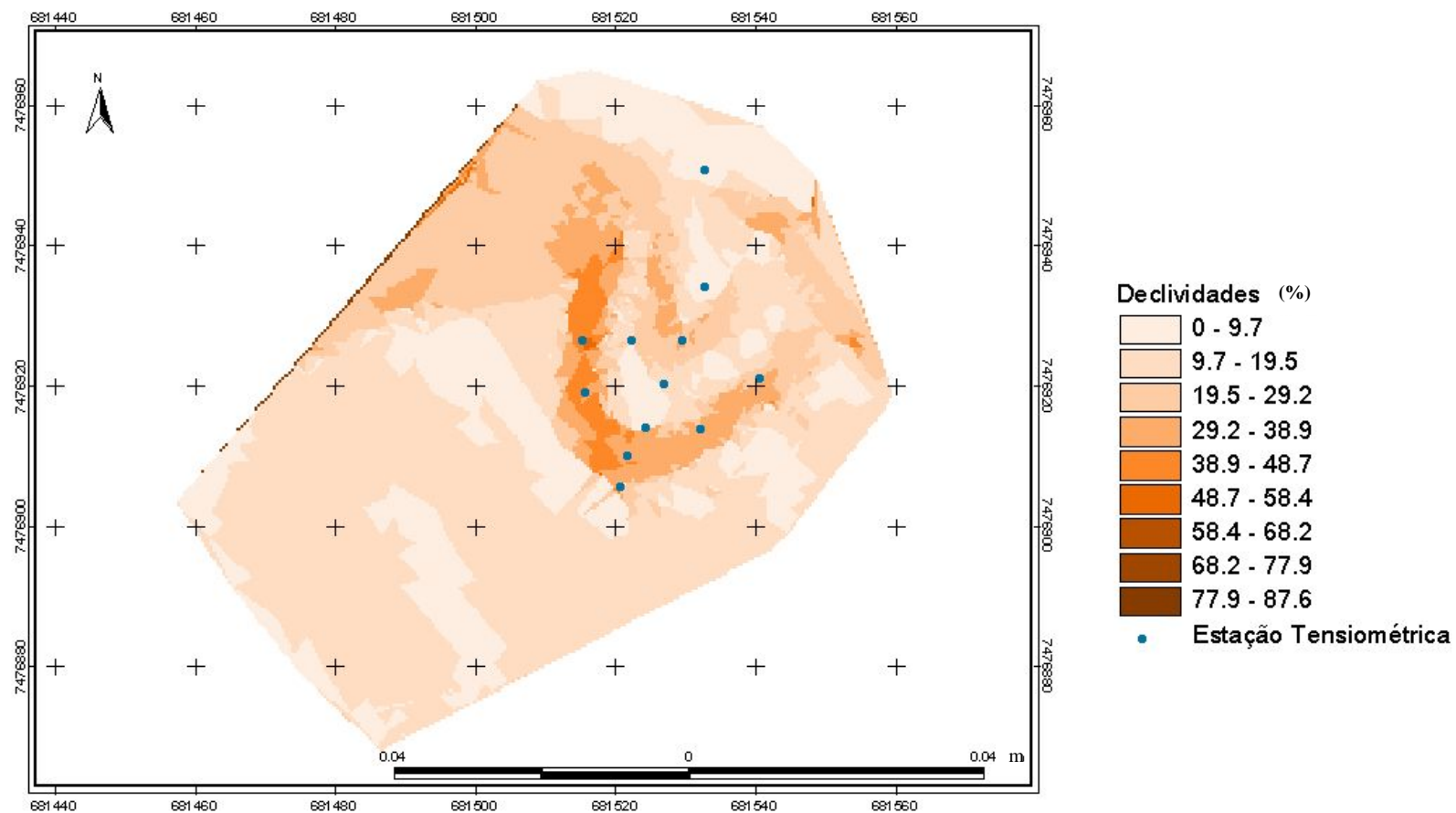


Figura 6.2. Modelo Digital de Classes de Declividade depois das práticas mecânicas.

Com relação aos declives encontrados na área após os trabalhos de RAD, os valores variam de 45,52% a 0%, sendo que um máximo estipulado para este tipo de situação é de 45% (conforme descrito no sub-ítem 3.5.3 da revisão de conceitos). A diminuição geral das declividades resultante da reconformação do talude proporcionou condições mínimas ao desenvolvimento vegetal, apesar de terem sido estipuladas declividades superiores as do talude original. Os valores de declividade encontrados em cada uma das estações tensiométricas, bem como as formas identificadas em campo, encontram-se sumarizados na tabela 6.1.

*Tabela 6.1. Características geomorfológicas e tipo de material encontrados nas diferentes estações tensiométricas.*

Estação	Formas de relevo	Posição na encosta	Tipo de material	Declividade (%)
1	Retilíneo / Retilíneo	Alta	Corte	22.84
2	Côncavo / Retilíneo	Alta	Corte	35.71
3	Côncavo / Côncavo	Média	Aterro	0
4	Retilíneo / Retilíneo	Média	Aterro	10.59
5	Côncavo / Retilíneo	Média – baixa	Aterro/corte	29.11
6	Côncavo / Retilíneo	Baixa	Aterro	7.08
7	Retilíneo / Retilíneo	Baixa	Aterro	5.15
8	Côncavo / Côncavo	Alta	Corte	28.61
9	Côncavo / Côncavo	Alta	Corte	37.10
10	Retilíneo / Retilíneo	Média	Aterro	16.56
11	Retilíneo / Retilíneo	Alta	Corte	39.82
12	Retilíneo / Retilíneo	Alta	Corte	45.52

Os resultados da tabela 6.1 mostram maiores valores de declividade para as estações Bt12 (45,52%) e Bt11 (39,82%). Ambas as estações encontram-se em talude de corte, na alta encosta e em segmentos retilíneos em planta e em perfil. Ressalta-se que abaixo destas estações o processo erosivo ainda está ativo, sendo constatada a presença da alcova de regressão e da barreira de *pallet* quebrada, o que torna este trecho da voçoroca o mais susceptível à intensificação dos processos erosivos.

Declives elevados foram encontrados também nas estações Bt2, Bt5, Bt8 e Bt9, porém menores em relação às estações Bt11 e Bt12. Todas estas estações encontram-se no talude de corte, sendo que somente a estação Bt5 possui um tipo de material que é mistura do talude de corte com material de aterro.

As estações Bt1 e Bt4 apresentaram valores medianos de declividade em relação às outras estações (22,84% e 10,59%). As duas estações encontram-se em segmentos retilíneos em planta e em perfil, em posições relativamente estáveis da

encosta, ambas no eixo central da voçoroca (assim como as estações Bt2, Bt3, Bt5, Bt6 e Bt7).

As estações Bt3, Bt7 e Bt6 possuem os menores valores de declividade (0; 5,15% e 7,08% respectivamente). Ambas estão em taludes de aterro, sendo que a estação Bt3 encontra-se no talude superior de aterro, possuindo além dos menores valores de declividade, uma morfologia côncava em planta e em perfil, o que induziu à concentração dos fluxos nesta estação e a um aumento dos potenciais matriciais no local.

## 6.2 Precipitação e interceptação pelas copas arbóreas e pela serrapilheira

Os dados do monitoramento da precipitação referente aos dias onde foi estudada a interceptação das chuvas (com valores de magnitude diários), realizado durante o período de 25/08/03 a 26/02/2004, encontram-se na Figura 6.3. A seqüência completa com todos os dias monitorados aparece junto às avaliações de cargas totais e cargas de pressão, já que neste primeiro momento será dada ênfase à avaliação das chuvas em função do padrão de interceptação das copas arbóreas e da serrapilheira decorrente de diferentes magnitudes de chuvas.

Não foi avaliado o padrão de ocorrência de chuvas na área ao longo de uma série temporal mais ampla, portanto não se sabe se o ano estudado foi ou não atípico. No entanto, a escala temporal dos processos que estão sendo avaliados permite o uso dos dados sem avaliá-los dentro de um contexto temporal mais amplo, o que constituiria em si uma tarefa bastante laboriosa.

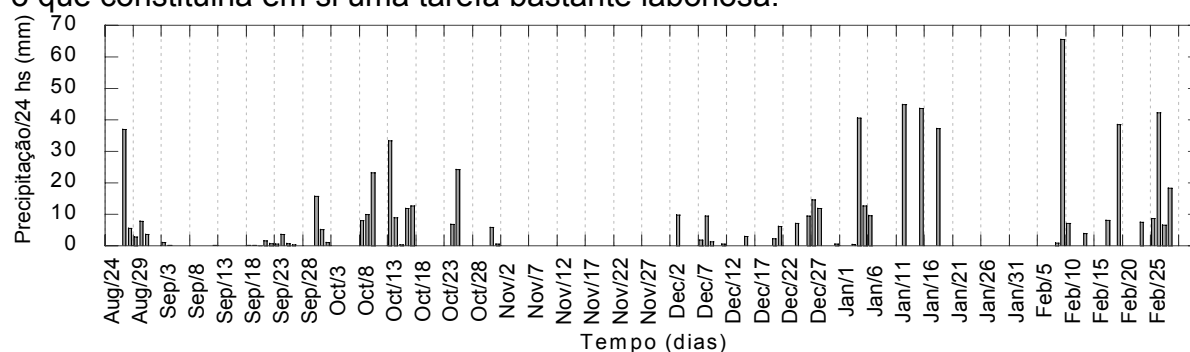


Figura 6.3. Variação da precipitação (volume de chuva em 24hs) durante o período de monitoramento da interceptação.

### 6.2.1 Magnitude das chuvas e interceptação pelas copas arbóreas

Os resultados das avaliações do percentual de interceptação de água pelas copas arbóreas em função da magnitude das chuvas encontram-se sumarizados nas Figuras 6.4 e 6.5. Durante a construção destes gráficos não foi possível o traçado de curvas ou linhas de tendência que expressem uma relação entre a magnitude das chuvas e o percentual de interceptação. Observa-se, porém, que pode haver uma tendência se utilizarmos na avaliação somente dados de precipitações superiores a 40 mm de magnitude diária, quando a interceptação passou a apresentar valores progressivamente menores (esta relação não foi no entanto avaliada neste trabalho).

Puderam ser detectadas algumas diferenças no que diz respeito à quantidade de dias onde os valores de interceptação foram negativos, havendo ocorrido o fenômeno do gotejamento, isto é, quando a vegetação exerce um efeito de convergência da água das chuvas. Ao longo da discussão dos resultados os pluviômetros de solos serão chamados de P1, P2, P3, e assim por diante, conforme apontado na metodologia, referindo-se as estações correspondentes.

O P 10 não apresentou nenhum evento de interceptação com gotejamento, sendo, portanto um local onde a vegetação protege bem o solo. Poderia-se atentar também para a possibilidade da ocorrência de fluxos de tronco; esta variável está sendo desprezada neste estudo, entretanto, conforme dito anteriormente, devido ao fato de que em indivíduos com tronco de pequena espessura os valores tornam-se muito baixos. O P 4 se mostrou também um local bem protegido, apresentando somente um evento de gotejamento (em uma chuva de classe de magnitude II). Ambos os pluviômetros encontram-se no talude de aterro, em posição mais bem protegida não só da ação dos ventos, mas possivelmente pela estrutura da vegetação.

O P 11 apresentou dois dias de gotejamento (nas classes de magnitude II e V).

O P 1 e o P 7 apresentaram três dias de gotejamento (o P 1 nas classes III e V e o P 7 nas II, III e V). O P 6 apresentou quatro dias com valores de gotejamento (nas classes de magnitude II, IV e V).

O P 2, P 3 e o P 5 apresentaram cinco dias de gotejamento, constituindo o padrão de ocorrência de gotejamento mais encontrado na voçoroca (nas classes de magnitude II para P 2, III e V para o P 3 e II e III para o P 5). O P 9 apresentou seis

dias com valores de gotejamentos (em todas as classes de magnitude exceto a classe I).

O P 8 e o P 12 apresentaram ambos nove dias com valores de gotejamentos (em todas as classes exceto a classe I para o P 8 e II, IV e V para o P 12). Estas duas foram as baterias que apresentaram maior quantidade de dias com valores de gotejamentos (nove dias em cada uma das duas). Nota-se que as duas estações estão no talude de corte superior, nos extremos da voçoroca, o que possibilita um aumento do peso da variável vento.

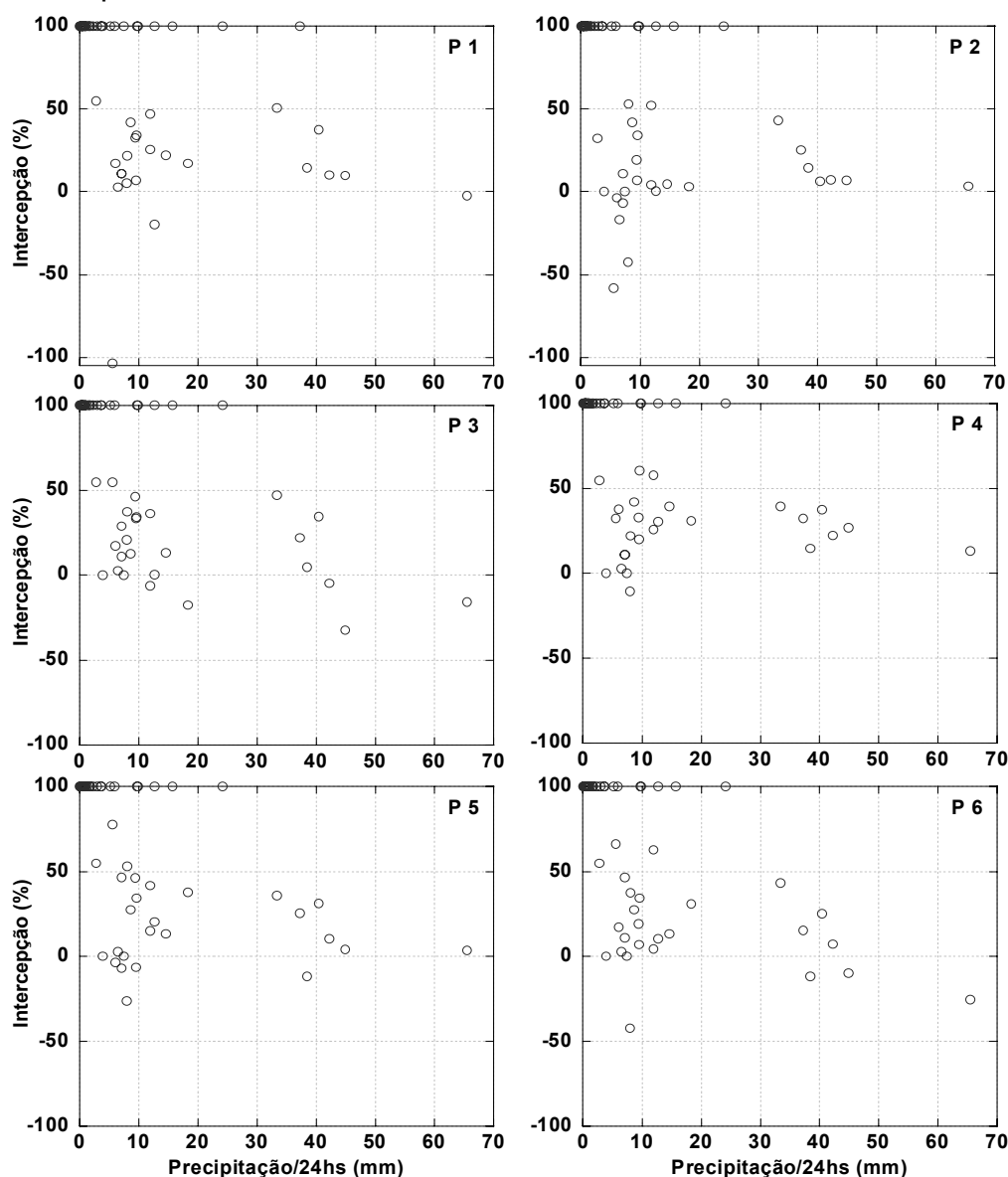


Figura 6.4. Variação da interceptação das águas pluviais pelas copas arbóreas (percentual) em função da magnitude das chuvas (mm) nos pontos 1 a 6. A figura 5.2 mostra a localização exata destas estações.

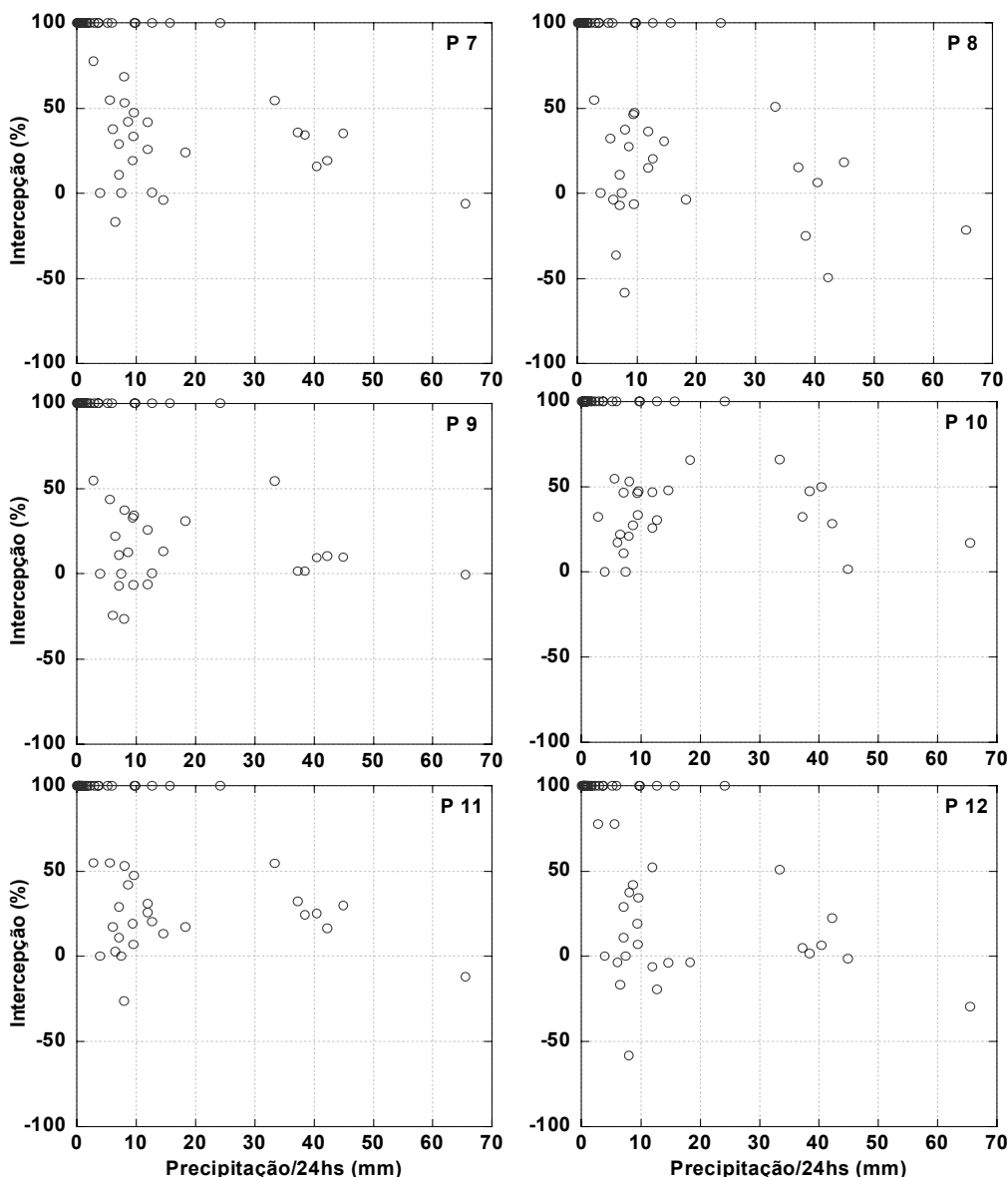


Figura 6.5. Variação da intercepção das águas pluviais pelas copas arbóreas (percentual) em função da magnitude das chuvas (mm) nos pontos 7 a12. A figura 5.2 mostra a localização exata destas estações.

O padrão de intercepção semelhante encontrado para o P 1 e para o P 7 está provavelmente relacionado à semelhança da cobertura vegetal e ao posicionamento, já que ambas as estações estão nos limiares da voçoroca revegetadas com capim Vetiver no P 1 e capim colônia no P 7. O P 6 apresentou um padrão diferente dos demais, com a quantidade de dias de gotejamentos um pouco abaixo da média (constituindo a melhor cobertura no tocante a intercepção), provavelmente em função da presença de uma árvore remanescente neste local, a única que foi aproveitada desde o começo do processo de revegetação.



### 6.2.2 Divisão das chuvas em classes de magnitude

Apesar da dificuldade em se estabelecer relações entre a magnitude das chuvas e o processo de interceptação pelas copas arbóreas, observa-se que o valor médio de interceptação obtido para todo o período de monitoramento é da ordem de 38%. Clegg (1963) encontrou valores da ordem de 40% avaliando florestas pluviais secundárias em Porto Rico. Coelho Netto (1992), estudando o mesmo fenômeno na Floresta da Tijuca, encontrou valores da ordem de 17%, tendo contado em suas avaliações também os espaços abertos desprovidos de cobertura vegetal.

Os valores obtidos para a Floresta da Tijuca constituem uma boa base para avaliação, já que a mesma é a vegetação mais próxima à observada em áreas florestadas da Ilha do Governador, e a recomposição da floresta original, pelo menos em parte, é o objetivo final do projeto de RAD. Observa-se que o valor encontrado por Coelho Netto é maior do que o encontrado para a área de estudo, mesmo a área não possuindo espaços abertos expressivos. Apesar disso o valor encontrado indica que a vegetação implantada na área está desempenhando o papel desejado no que diz respeito a este parâmetro (interceptação pelas copas), e os valores menores refletem o estágio de desenvolvimento dos indivíduos, já que os mesmos possuem somente três anos.

Com base nos resultados das figuras 6.4 e 6.5 não foi possível realizar a estratificação das chuvas diárias tomando-se como critério o padrão de comportamento da interceptação, como sugerido por Miranda (1992), que encontrou um comportamento logarítmico para a relação da magnitude das chuvas com o padrão de interceptação das copas arbóreas. Foram, no entanto, encontrados valores progressivamente menores de interceptação para chuvas de magnitude superior a 40 mm, o que se deve provavelmente a uma maior intensidade das chuvas. As classes de chuva foram estipuladas então principalmente para que pudessem ser utilizadas nas avaliações diárias, agrupando-se diferentes magnitudes para facilitar a discussão dos resultados.

Selby (1993) chamou atenção para esta dificuldade em se tecer conclusões diretas sobre os processos de interceptação, dado que dependem de muitos fatores, dentre eles a duração, a magnitude, a frequência e a intensidade das precipitações (que não foi avaliada), a velocidade dos ventos, a umidade pré-existente nas plantas, a temperatura do ar e os tipos de vegetação.

De modo a facilitar a discussão dos resultados, foram estipuladas classes de chuva similares às estipuladas em Miranda (op.cit.) e Vallejo & Vallejo (1981), porém foram agrupadas as chuvas de 20 a 40 mm, sendo também estipulada uma classe de chuvas com magnitudes maiores que 40 mm, que tiveram cinco ocorrências no período de monitoramento. Segue a distribuição das chuvas por classes de magnitude (Tabela 6.2).

Tabela 6.2. Distribuição das chuvas por classes de magnitude.

<b>Classe I (0.0 a 5.0mm)</b>	<b>Classe II (5.1 a 10.0mm)</b>	<b>Classe III (10.1 a 20.0mm)</b>	<b>Classe IV (20.1 a 40.0mm)</b>	<b>Classe V (+40.0mm)</b>
3.6	5.6	15.7	37.0	40.5
1.0	7.8	11.9	23.2	44.9
0.2	5.2	12.7	33.4	43.6
0.2	8.0	14.6	24.2	65.5
0.2	9.9	11.9	37.3	42.3
0.2	9.0	12.7	38.5	
0.1	6.8	18.3		
1.6	5.9			
0.8	9.7			
0.5	9.5			
3.7	6.1			
0.7	7.1			
0.3	9.4			
1.0	9.6			
0.3	7.1			
0.5	8.1			
1.8	7.5			
1.3	8.7			
0.5	6.5			
3.0				
2.3				
0.6				
0.4				
0.9				
3.9				
1.8				
2.8				
Coef. de variação: 1.16	Coef. de variação: 1.41	Coef. de variação:2.25	Coef. de variação: 6.45	Coef. de variação: 9.52
Mag. Média: 1.18	Mag. média: 7.88	Mag. média: 13.68	Mag. média: 31.32	Mag. média: 49.08
Nº total de dias avaliados: 25	Nº total de dias avaliados : 19	Nº total de dias avaliados :7	Nº total de dias avaliados : 6	Nº total de dias avaliados : 5

O número total de dias na classe I foi de 25, com uma magnitude média de 1.18mm e um coeficiente de variação de 1.16. O número total de dias na classe II foi de 19, com uma magnitude média de 7.88mm e um coeficiente de variação de 1.41. O número total de dias na classe III foi de 7, com uma magnitude média de 13.68mm

e um coeficiente de variação de 2.25. O número total de dias na classe IV foi de 6, com uma magnitude média de 31.32mm e um coeficiente de variação de 6.45. O número total de dias na classe V foi de 5, com uma magnitude média de 49.08mm e um coeficiente de variação de 9.52.

A intercepção das copas, dos 25 dias registrados na classe I (0-5mm), 24 apresentaram 100% de intercepção pelas copas arbóreas. No único evento que apresentou intercepção menor que 100% também não foi constatado nenhum valor de gotejamento, embora este evento tenha sido precedido de chuvas de 5,6mm na véspera e 37mm no dia 25-08-03.

### 6.2.3 Retenção hídrica potencial e capacidade de intercepção da serrapilheira

Os resultados das avaliações de capacidade de retenção hídrica da serrapilheira e sua capacidade de intercepção encontram-se sumarizados na Figura 6.6.

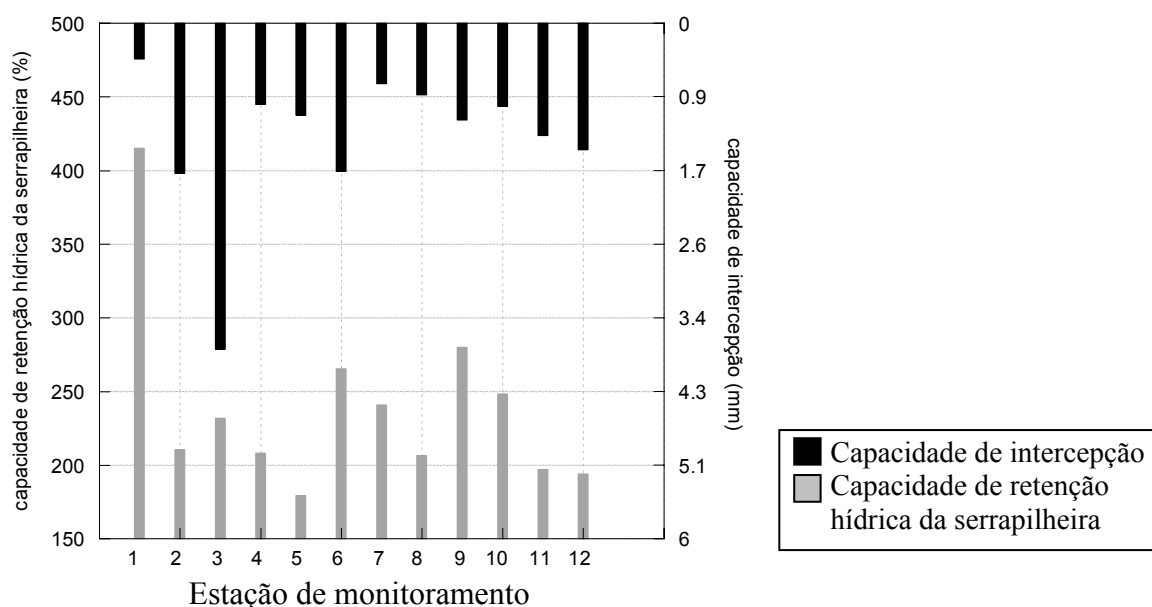


Figura 6.6. Retenção hídrica potencial (%) e capacidade de intercepção da serrapilheira (mm).

Em relação aos valores de retenção hídrica da serrapilheira encontrados, observa-se um valor médio de 240%. Os valores encontrados para a Floresta da Tijuca por Vallejo (1982), Coelho Netto (1985, 1987) e Castro Jr. (1991), da ordem de 130 a 300%, e Miranda (1992), da ordem de 200%, foram muito similares. Deve-se ter em mente que os valores encontrados para a área de estudo levam em conta

o papel da cobertura morta, incorporada através de apara de grama e da esteira de bagaço de cana. Os valores encontrados indicam, no entanto, que as práticas de RAD estão exercendo efeito positivo, sendo encontrada uma serrapilheira semelhante à encontrada em florestas, o que constitui uma situação de elevada estabilidade.

O P 1 apresentou os maiores valores de retenção hídrica (415%) e os menores valores de capacidade de intercepção (0.41mm), o que indica que a vegetação local (Feijão Guandu Anão e Capim Vetiver) produz uma serrapilheira com grande capacidade de retenção, porém em menor aporte relativo. O P 2 apresentou um aporte de material relativamente elevado com retenção hídrica mediana (210%), resultando em capacidade de intercepção mediana a elevada em relação aos demais locais (1.74mm). O P 3 possui um material com retenção hídrica mediana (231%), com um grande aporte, resultando na mais elevada capacidade de intercepção (3.79mm). Nestas duas últimas estações foi aplicada grande quantidade de para de grama, o que dificulta a avaliação da exata relação entre a vegetação local e a cobertura morta presente.

O P 4 e o P 5 apresentaram material com uma baixa retenção hídrica (208 e 179%, respectivamente), com um aporte mediano, resultando em baixa a média capacidade de intercepção (0.94 e 1.07mm, respectivamente). O P 6 tem um menor aporte de material, porém com uma maior retenção hídrica (265%), resultando numa média a alta capacidade de intercepção (1.7mm). O P 7, P 8, P 10, P 11, P 12 apresentam material com retenção hídrica média a alta, em pequeno aporte resultando numa baixa capacidade de intercepção. O P 9 apresentou material com elevada retenção hídrica (280%), em pequeno aporte resultando em baixa capacidade de intercepção (1.12mm). As estações Bt8 e Bt9 possuem a mesma cobertura vegetal, portanto as diferenças na serrapilheira devem estar relacionadas às diferenças na aplicação de apara de grama. Com relação às estações Bt11 e Bt12, a aplicação da esteira de bagaço de cana parece ter exercido um efeito benéfico.

Avaliando-se qual foi a melhor cultura ou espécie vegetal em relação à intercepção e à retenção hídrica da serrapilheira, observa-se que a vegetação de gramínea possui uma retenção hídrica maior (seu material absorve maior quantidade de água). Em relação a intercepção, nota-se maiores valores nas áreas ocupadas por indivíduos arbóreos mais altos, o que está neste caso relacionado ao maior

aporte de material. Entretanto, pode-se dizer que uma avaliação mais acurada de qual espécie foi a mais propícia para o aumento da retenção hídrica potencial e interceptação da serrapilheira é complicada para a situação estudada, já que foi sempre utilizado consórcio de espécies, em diferentes combinações.

Os resultados obtidos nas avaliações de capacidade de retenção hídrica e capacidade de interceptação da serrapilheira, de uma maneira geral, apontaram também para a tendência de que a quantidade de material (aporte) possui maior influência sob a capacidade de interceptação do que os valores de retenção hídrica inerentes aos materiais. Estes resultados de certa forma contrastam com grande parte da literatura produzida acerca do assunto, onde as variações observadas pela maioria dos autores (segundo Vallejo, 1982) envolvem, principalmente, aspectos qualitativos e relacionados ao tipo de material. Deve-se tomar cuidado também na estipulação do peso relativo destas variáveis, já que em áreas submetidas a projetos de RAD os indivíduos encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento, possuindo também fisiologias diferenciadas que ocasionam em velocidades de crescimento diferenciadas.

Os dados, obtidos por ensaio em laboratório, expressam o potencial ou a capacidade máxima de interceptação das chuvas, e não exatamente o quanto é retido em determinado dia ou evento. Este valor só poderia ser obtido mediante avaliações da umidade atual da serrapilheira, para cada dia ou evento avaliado. Por isso constatou-se que os valores de interceptação pela serrapilheira foram em geral maiores para o P 3, pois lá foi encontrada maior quantidade de material (mesmo quando plotados junto à interceptação pelas copas arbóreas). Resta também saber se quando é atingido o limite de retenção hídrica da serrapilheira haverá fluxos superficiais.

Outra consideração importante, e que mostra relação com os resultados obtidos, é a importância da topografia (fator que também foi ressaltado por Vallejo (1982)) no acúmulo da serrapilheira (a estação Bt3 encontra-se na área de menor declividade de toda a voçoroca (0), além de estar na base do primeiro talude de corte e em um segmento côncavo em planta), e, conseqüentemente, na proteção do solo. No tópico referente à topografia será retomado ainda este assunto.

### 6.2.4 Avaliação da estocagem da água das chuvas nas copas arbóreas e na serrapilheira

Para uma avaliação da influência da umidade antecedente sob o comportamento da interceptação das copas, além de uma avaliação da precipitação terminal (excluindo-se o efeito do fluxo nos troncos) para as diferentes classes de magnitude de chuva estipuladas, foram selecionados 13 dias. Os resultados de interceptação das copas, interceptação da serrapilheira e precipitação terminal (excluindo-se o *throughfall*) para estes dias encontram-se nas figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11. Deve-se atentar para o fato de que foram utilizados, para a determinação da estocagem de água na serrapilheira, os resultados de capacidade de interceptação (ou interceptação máxima), não havendo um monitoramento da umidade atual, o que poderia trazer resultados diferentes. Sendo assim os dados apresentados constituem uma aproximação do ocorrido no dia, e servem principalmente como uma base de comparação entre as estações avaliadas. Os dados obtidos nas avaliações anteriores apontaram também para uma grande variabilidade do parâmetro interceptação pelas copas arbóreas, o que indica que as avaliações constituem, assim como avaliações de fluxos de água no solo, apenas um “retrato” do padrão que está acontecendo no momento.

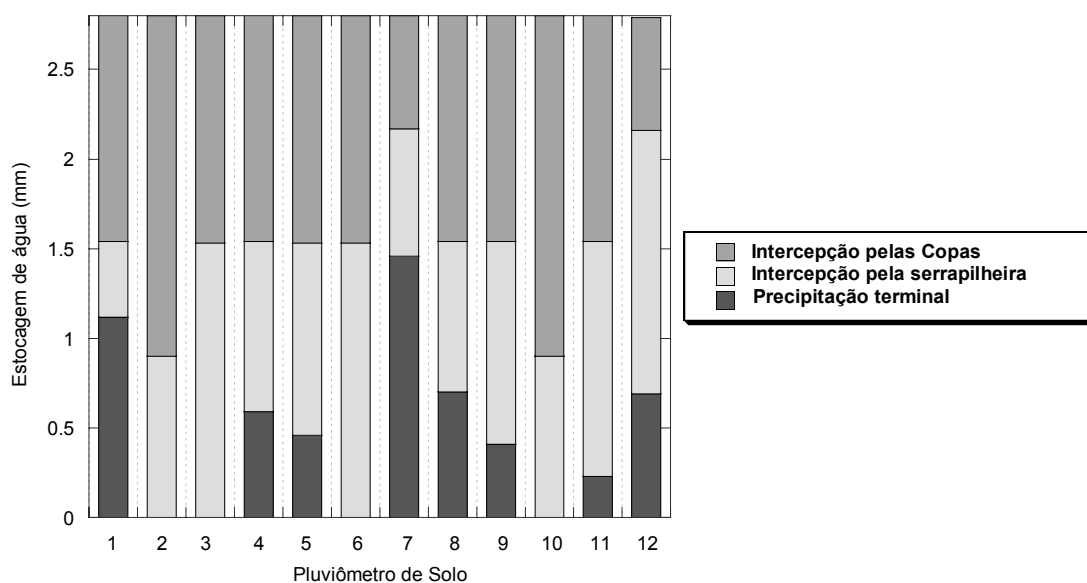


Figura 6.7. Análise da interceptação das copas, da serrapilheira e da precipitação terminal para o dia 27-08-03 (2.8mm), relativo à Classe I de magnitude.

Durante a avaliação dos dias na Classe I foi constatado apenas um evento onde houve *throughfall*, sendo que em todos os outros 24 dias as copas arbóreas

interceptaram toda a precipitação. Em função disso, só pôde ser analisado o evento do dia 27-08-03, de magnitude 2,8mm, precedido de 5,6mm de chuva na véspera e de 37,0mm no dia 25-08-03. Neste dia o P 2 e o P 10 apresentaram o maior valor de interceptação pelas copas (1,9mm), não havendo precipitação terminal. O P 7 e o P 12 (ambos situados em extremos da voçoroca) apresentaram o menor valor de interceptação pelas copas (0,63mm), tendo o P 7 o maior valor de precipitação terminal (1,46mm), em função em uma menor proteção exercida pela vegetação de capim colônio. O P 1, P 3, P 4, P 5, P 6, P 8, P 9 e o P 11 apresentaram o mesmo valor de interceptação pelas copas (1,27mm), sendo constatado um comportamento relativamente homogêneo para o evento avaliado em todas as estações. O P 3 e o P 10 não apresentaram precipitação terminal. O P 3 e o P 6 apresentaram o maior valor de interceptação pela serrapilheira (1,53mm).

Para o estudo da classe II de magnitude de chuva foram avaliados os dias 6-10-03; 15-02-04 e 23-02-04 (ver Figura 6.8).

No evento do dia 06-10-03 (8 mm), que não foi precedido de chuva desde o dia 30-09-03 (1,0mm), o P 1 e o P 3 não apresentaram precipitação terminal. O P 8 e o P 12 apresentaram o maior valor de gotejamento (-12,66mm, confirmando a tendência observada no item 6.2.1). O P 4, P 5, P 9 e o P 11 apresentaram também gotejamento, porém menor (-10,13mm). O P 1 apresentou o maior valor de interceptação pelas copas (7,59). O P 2 (1,75mm). O P 6 (1,72mm) e o P 3 (1,67mm) apresentaram os maiores valores de interceptação pela serrapilheira.

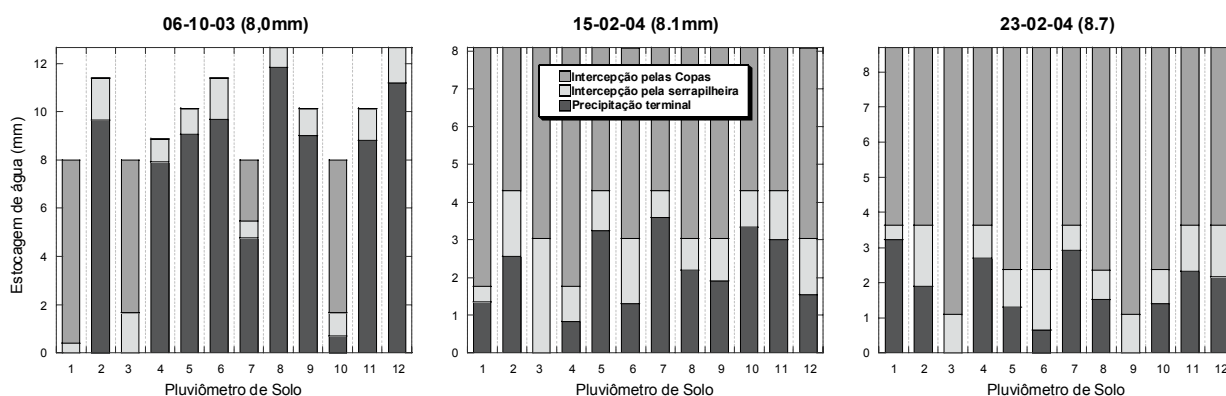


Figura 6.8. Análise da interceptação das copas, da serrapilheira e da precipitação terminal para dias de chuva relativos à Classe II de magnitude de chuva.

O dia 15-02-04 (8,1mm) também não foi precedido de chuva significativa (11-02-04 com 3,6mm). Neste evento o P1 e o P 4 apresentaram o maior valor de interceptação pelas copas (6,33mm). O P 7 apresentou o maior valor de precipitação terminal (3,5mm). O P 3 não apresentou precipitação terminal neste momento, apresentando ainda o maior valor de interceptação pela serrapilheira (3,04mm).

O dia 23-02-04 (8.7mm) foi precedido de precipitação totalizando 7,5mm no dia 21-02-04. Neste dia o P 3 e o P 9 apresentaram o maior valor de interceptação pelas copas (7,59mm). O P 2 e o P 6 apresentaram os maiores valores de interceptação pela serrapilheira (1,75 e 1,72mm). O P 1 apresentou o maior valor de precipitação terminal (3,22mm).

Os resultados das avaliações na Classe III de magnitude de chuva encontram-se na Figura 6.9. O dia 25-12-03 (14,6mm) foi precedido de precipitação de 9,4mm no dia 24-12-03. Neste, o maior valor de interceptação pelas copas foram obtidos no P 2 (13,92mm). O P 7 e o P 12 apresentaram os maiores valores de gotejamento (-15,19mm). O P 3 apresentou o maior valor de interceptação pela serrapilheira (1,94mm).

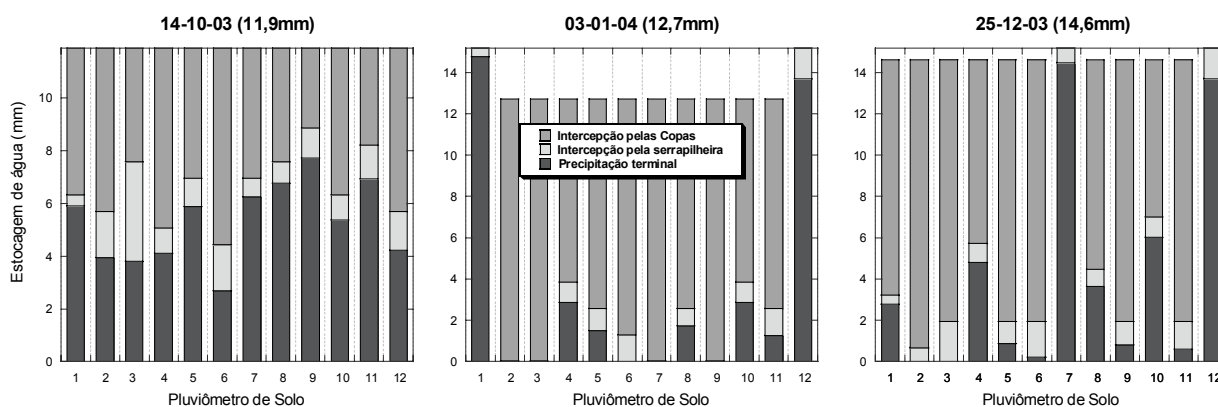


Figura 6.9. Análise da interceptação das copas, da serrapilheira e da precipitação terminal para dias de chuva relativos à Classe III de magnitude de chuva.

O dia 14-10-03 (11,9mm) foi precedido de chuva de 0,3mm na véspera, de chuva de 9,0mm no dia 12-10-03 e de chuva de 33,4mm no dia 11-10-03, o que constitui uma condição de umidade antecedente elevada. Neste dia o P 6 apresentou o maior valor de interceptação pelas copas (7,46mm), e o P 9 o maior valor de precipitação terminal (7,73mm). O P 3 apresentou o maior valor de interceptação pela serrapilheira (3,79mm).



O dia 03-01-04 (12,7mm), que apresentou gotejamento, foi precedido de uma chuva de 40,5mm (02-01-04). Esta elevada umidade antecedente exerceu influência na geração destes valores, em função do molhamento prévio das folhas. Já os outros dois dias dentro desta classe não apresentaram valores de magnitude de chuva antecedente da mesma proporção. Neste momento os maiores valores de precipitação terminal foram obtidos no P 1 e P 12 (14,77 e 13,72mm); o maior valor de interceptação pelas copas foi obtidos no P 2, P 3, P 7 e P 9 (1,66mm), sendo que nestes não houve precipitação terminal. O P 6 e o P 12 apresentaram o maior valor de interceptação pela serrapilheira (1,31mm).

Na Classe IV de magnitude de chuva (Figura 6.10) o evento do dia 11-10-03 (33,4mm) não foi precedido de chuva significativa desde 08-10-03 (23,2mm). Neste evento o P 10 apresentou o maior valor de interceptação pelas copas (22 mm). O P 3 apresentou os maiores valores de interceptação pela serrapilheira (3,79mm). O P 5 apresentou os maiores valores de precipitação terminal (20,44mm).

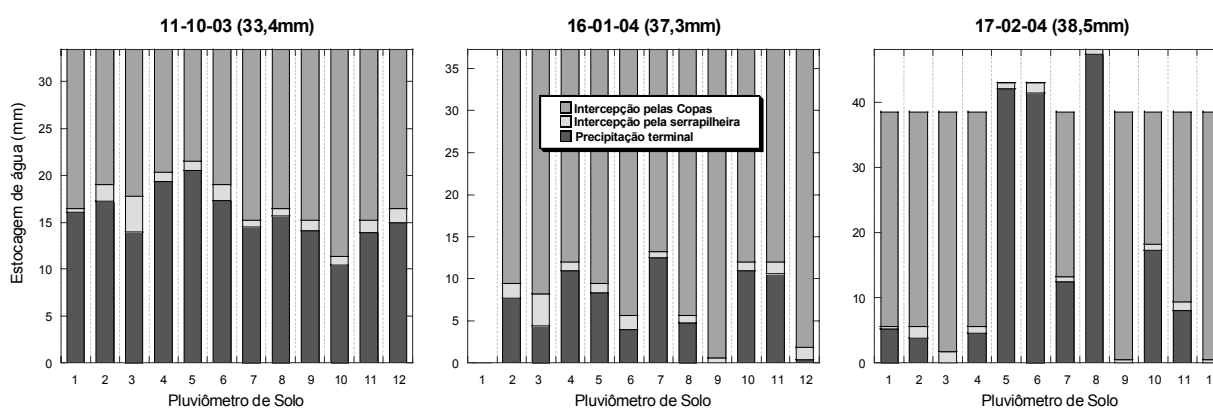


Figura 6.10. Análise da interceptação das copas, da serrapilheira e da precipitação terminal para dias de chuva relativos a Classe IV de magnitude de chuva.

O dia 16-01-4 (37,3mm) também não foi precedido de precipitação significativa (13-01-04 com 43,6mm) e não houve medição no P 1, em função do roubo do pluviômetro de solo referente a esta bateria. Neste, o P 9 apresentou o maior valor de interceptação pelas copas (36,71 mm). O P3 apresentou o maior valor de interceptação pela serrapilheira (3,8 mm). O P 7 apresentou o maior valor de precipitação terminal (12,54mm).

O evento do dia 17-02-04 (38,5mm), apesar de apresentar gotejamento, também não foi precedido de chuva significativa (15-02-04 com 8,1mm). Neste evento o P 8, assim como o P 5 e o P 6, apresentou gotejamento (-48,1; -43,04 e -

43,03mm, respectivamente). O P 12 apresentou o maior valor de interceptação pelas copas (37,97 mm). Este resultado foi de encontro às avaliações do item 6.2.1 e também para o dia 6 de outubro de 2003, onde se observa um padrão de gotejamento para o P12. O P 3 apresentou o maior valor de interceptação pela serrapilheira (1,79mm). O P 10 foi o local que apresentou o maior valor de precipitação terminal (17,27mm), sem ocorrência de gotejamento.

Analisando a classe V de magnitude de chuva (Figura 6.11), no dia 24-02-04 (42,3mm), precedido por chuva de 8,7mm no dia 23-02-04, o P 8 apresentou gotejamento (-63,29mm), sendo que o maior valor de precipitação terminal também foi encontrado nesta bateria (62,45mm) e no P 3 (40,51mm). O P 2 e o P 6 apresentaram o maior valor de interceptação pelas copas (39,24mm), e o P 3 apresentou o maior valor de interceptação pela serrapilheira (3,8mm).

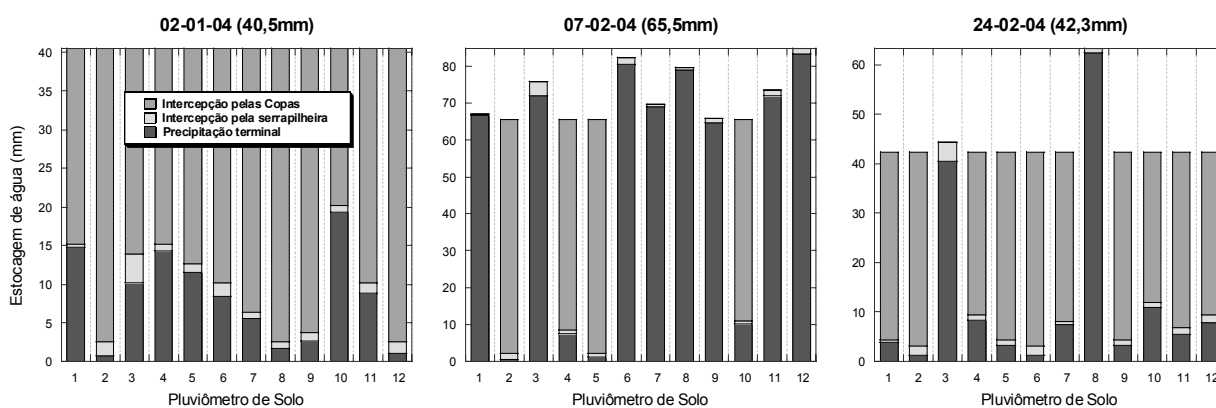


Figura 6.11 Análise da interceptação das copas, da serrapilheira e da precipitação terminal para dias de chuva relativos à Classe V de magnitude de chuva.

No dia 02-01-04 (40,5mm) o P 10 apresentou o maior valor de precipitação terminal (19,27). O P 12, P 2 e o P 7 apresentaram o maior valor de interceptação pelas copas (37,97mm). O P 3 apresentou o maior valor de interceptação pela serrapilheira (3,8mm).

No dia 07-02-04 (65,5mm), precedido por chuva de 0,9mm no dia 06-02-04, o P 12 apresentou o maior valor de gotejamento. O P 2 e o P 5 apresentaram o maior valor de interceptação pelas copas (63,29mm). O P 12 apresentou o maior valor de precipitação terminal (83,34mm). O P 3 apresentou o maior valor de interceptação pela serrapilheira (3,8mm).

Observando-se os resultados dos dias avaliados, de uma maneira geral, foi constatada uma relação entre a umidade antecedente e a ocorrência de valores de

gotejamentos somente nas classes I e III, o que indica que a intensidade dos episódios de chuva, os ventos, assim como possivelmente a umidade do ar devem estar controlando o *throughfall* de uma maneira geral.

Foi também constatada observando-se todos os resultados uma tendência a valores de interceptação maiores durante o inverno e primavera, em detrimento dos resultados obtidos no verão. Isto pode estar relacionado ao desenvolvimento da vegetação, que nos estágios iniciais de desenvolvimento pode até propiciar uma maior interceptação das chuvas.

Também foi confirmada a tendência da relação entre o posicionamento na encosta e os valores de interceptação, assim como ocorreu nas avaliações de serrapilheira, onde há como resultado um acúmulo diferencial. Deste modo observa-se o papel decisivo da topografia e do posicionamento das estações na área sobre o comportamento do atravessamento (*throughfall*). Nota-se que os maiores valores de retenção na serrapilheira ocorreram geralmente na estação Bt3, o que está ligado ao fato de terem sido usados valores de retenção potencial como parâmetro, como já dito anteriormente.

### **6.3 Avaliação das propriedades físico-hídricas dos solos**

Os dados de propriedades físico-hídricas dos solos gerados nas análises em laboratório foram dispostos na forma de gráficos de variação das propriedades por profundidade para todos os parâmetros avaliados.

Este estudo visou a detecção de anisotropias no solo que pudessem controlar os fluxos d'água subsuperficiais, sendo que o estudo das propriedades em perfil se justificou pela compreensão da distribuição vertical das propriedades físicas dos solos como sendo fundamental para a realização de estudos sobre fluxos, de modo a se relacionar posteriormente o desenvolvimento de fluxos laterais e verticais em função destas propriedades, como já anteriormente apontado por Castro Jr. (1991).

Estes resultados encontram-se sumarizados nas figuras 6.12 a 6.23, que relacionam todos estes dados por estação. A discussão destes resultados passou por duas etapas. Depois destas os dados continuaram a ser utilizados para as discussões das variações dos potenciais matriciais, cargas totais e mapas de equipotenciais gerados, constituindo, portanto uma das bases da discussão dos resultados.

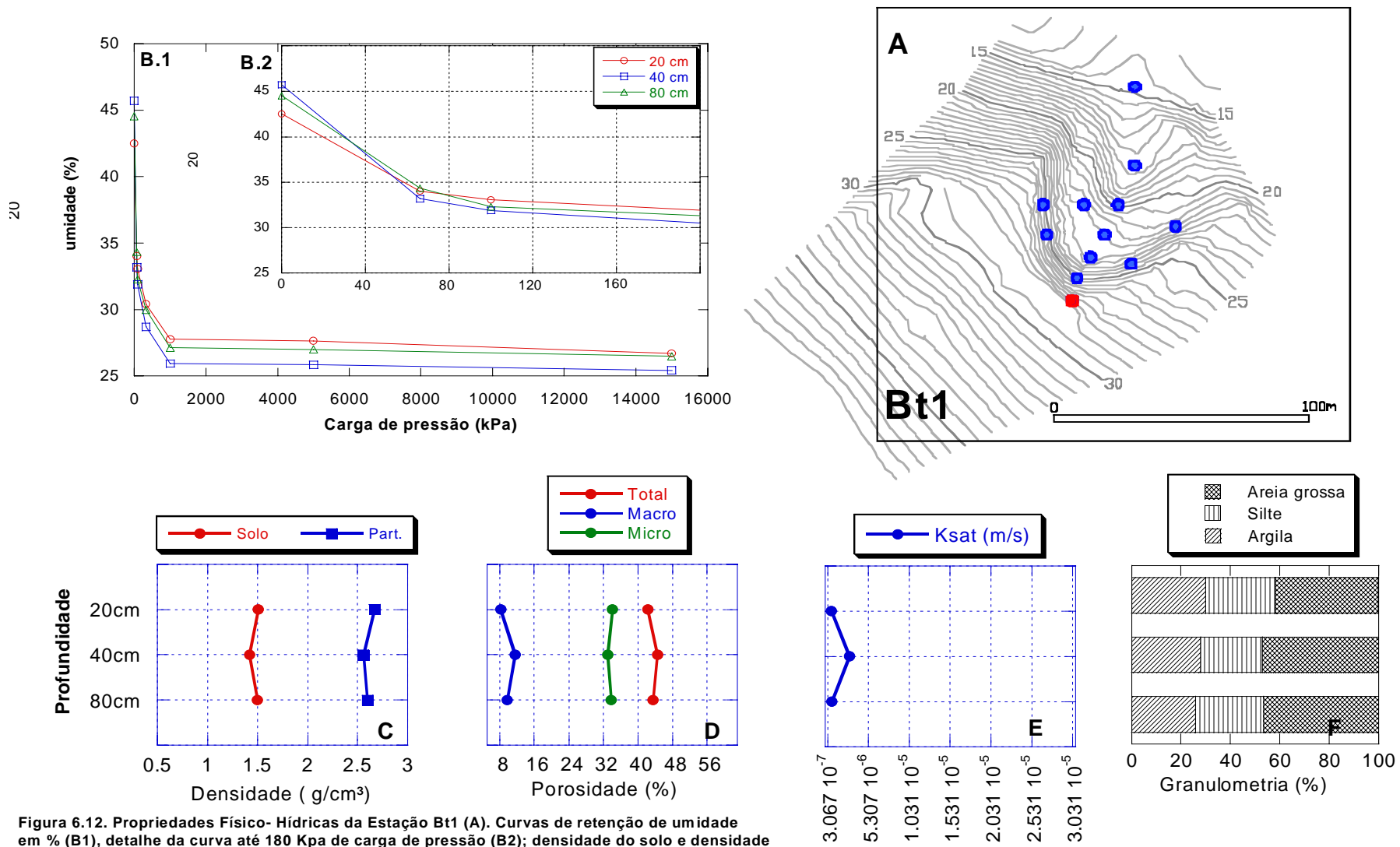


Figura 6.12. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt1 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

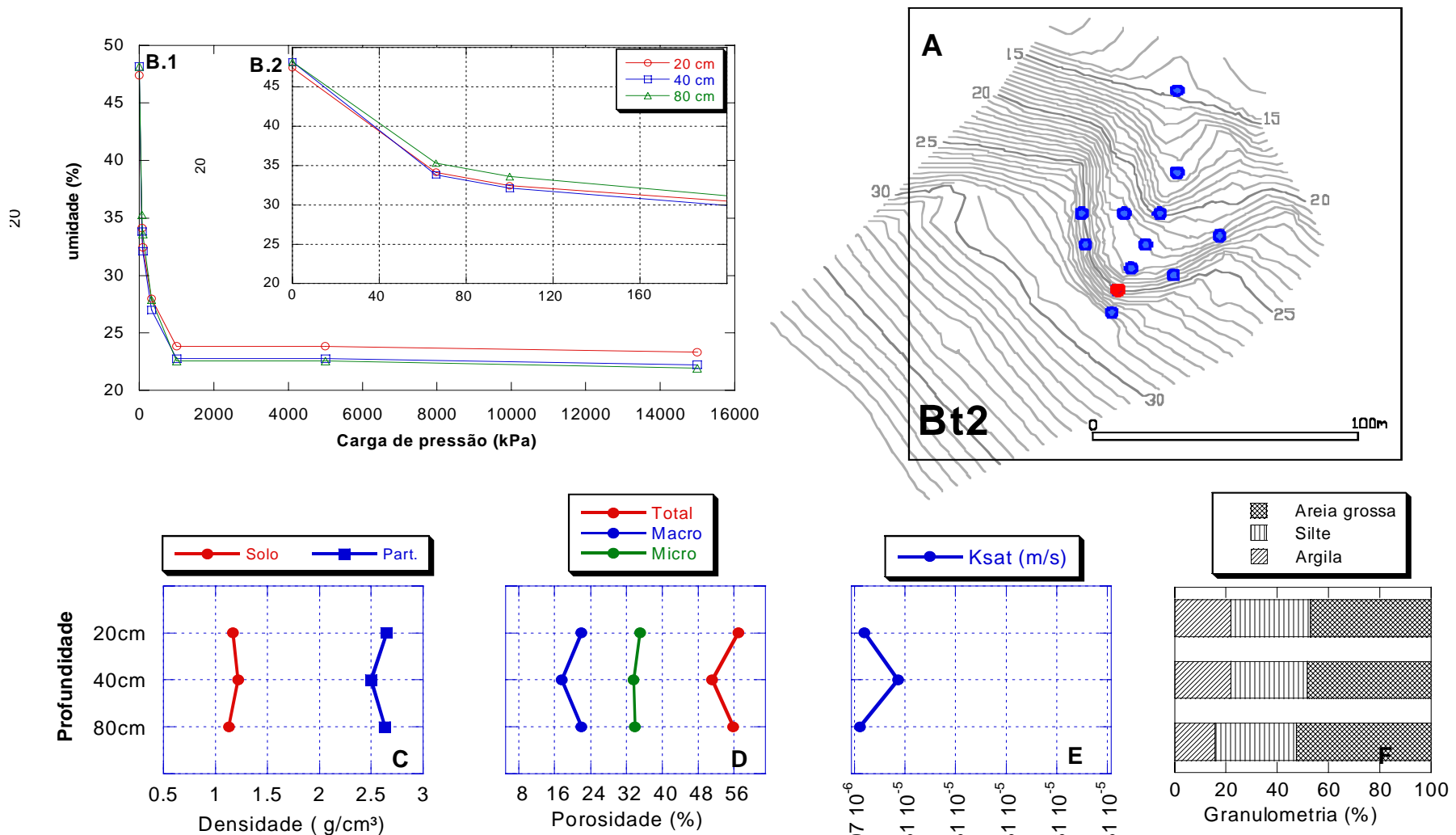


Figura 6.13. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt2 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

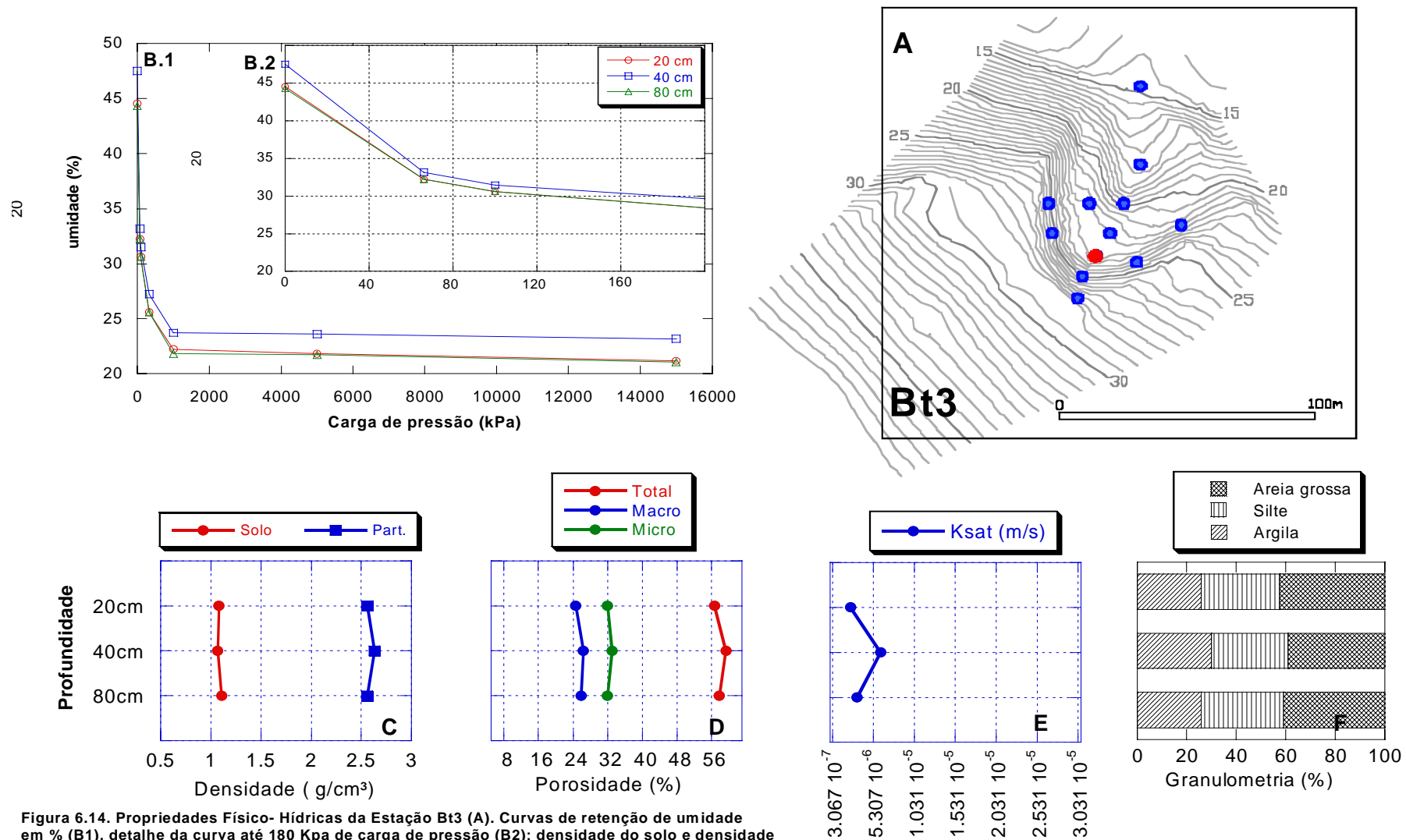


Figura 6.14. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt3 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

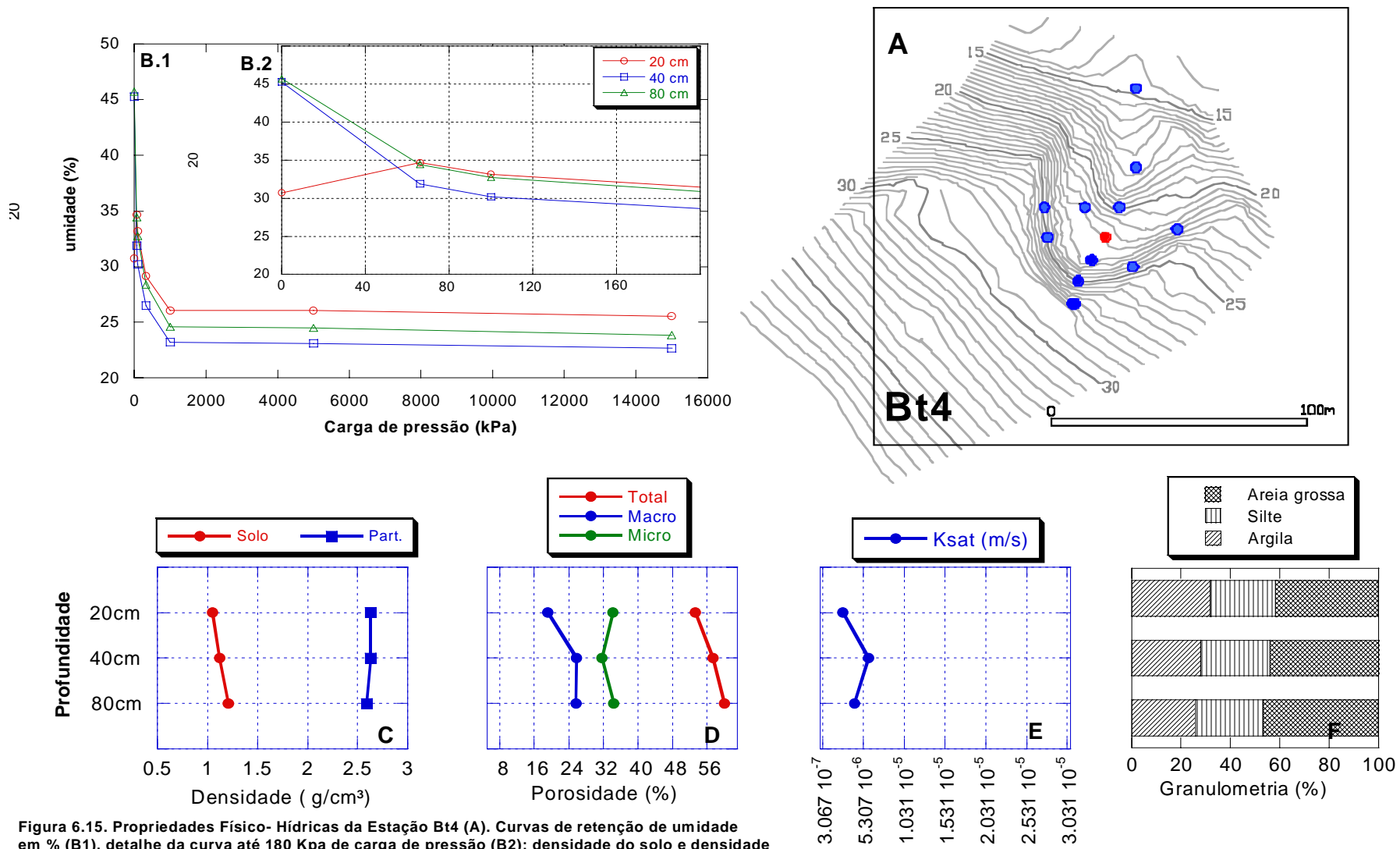


Figura 6.15. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt4 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

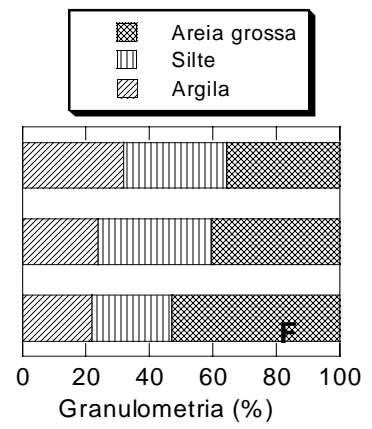
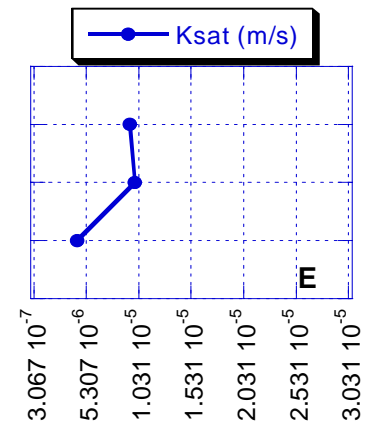
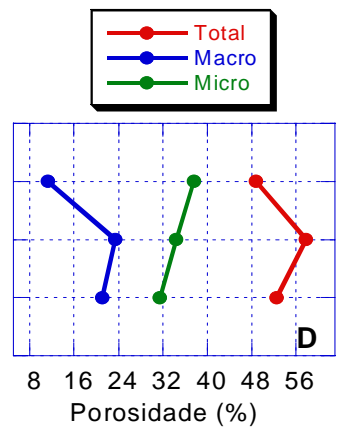
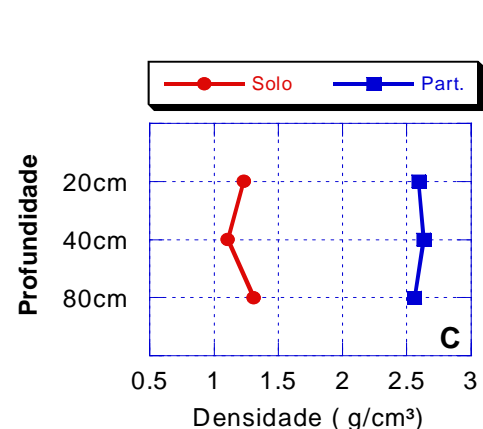
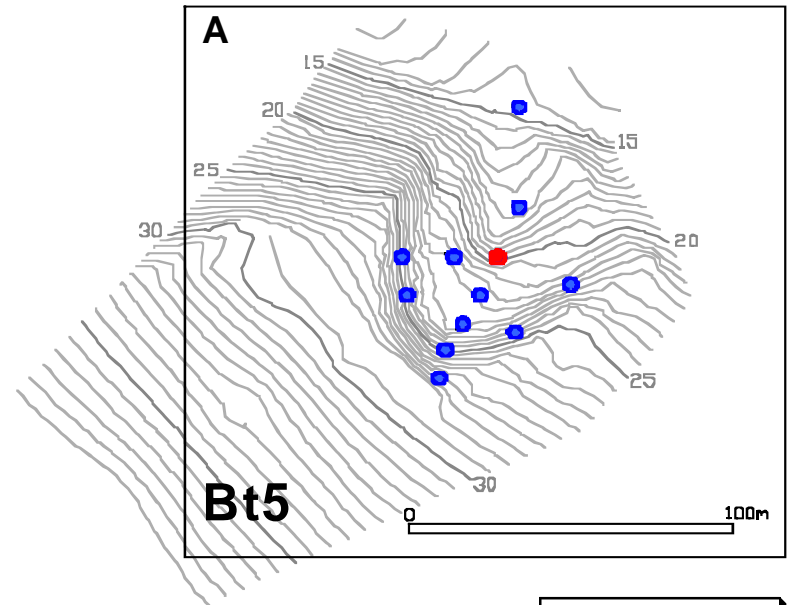
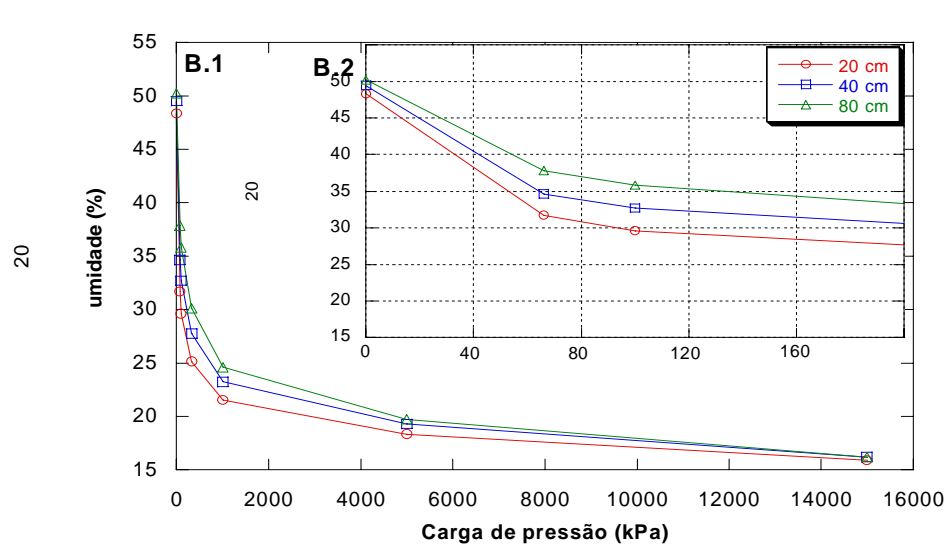


Figura 6.16. Propriedades Físico- Hidricas da Estação Bt5 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).



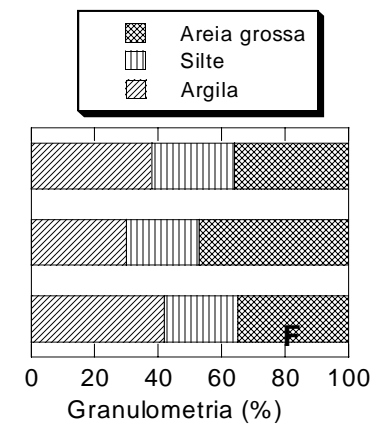
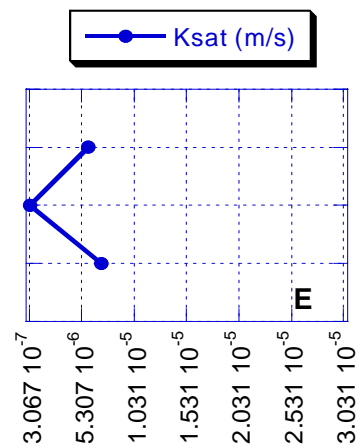
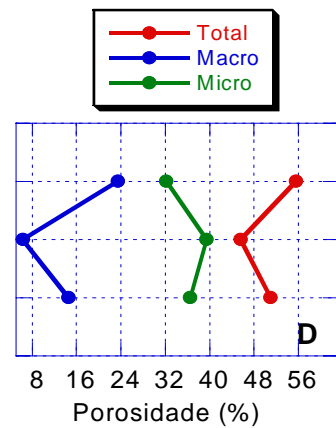
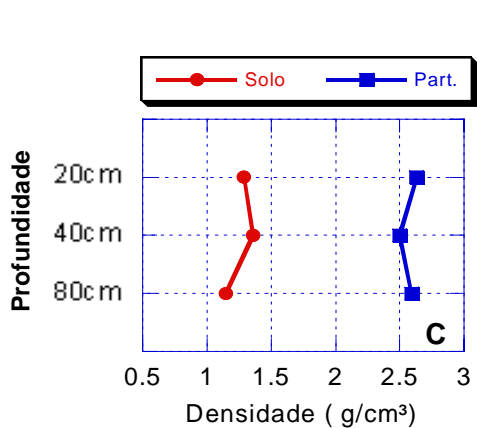
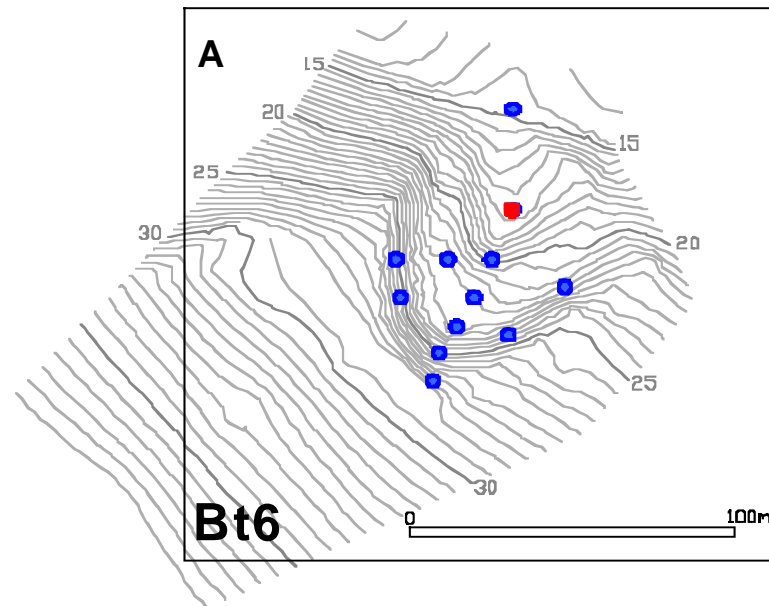
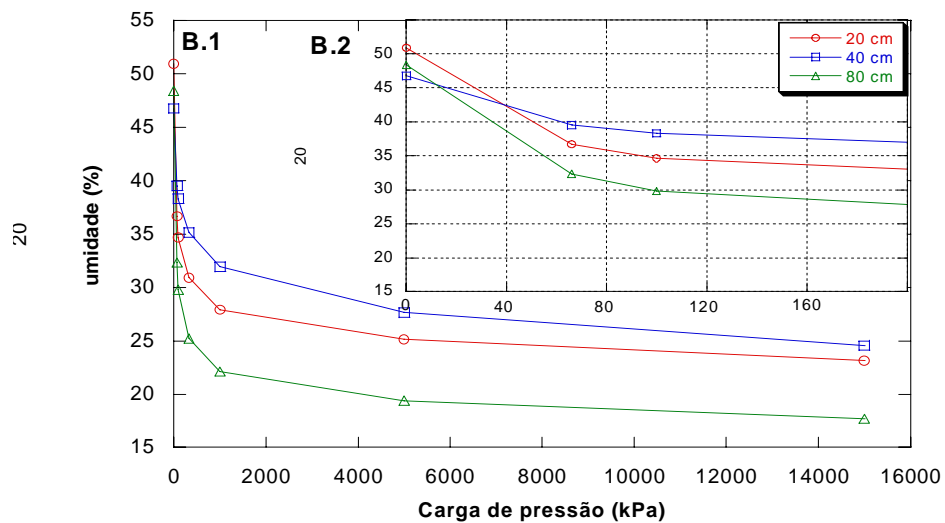


Figura 6.17. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt6 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

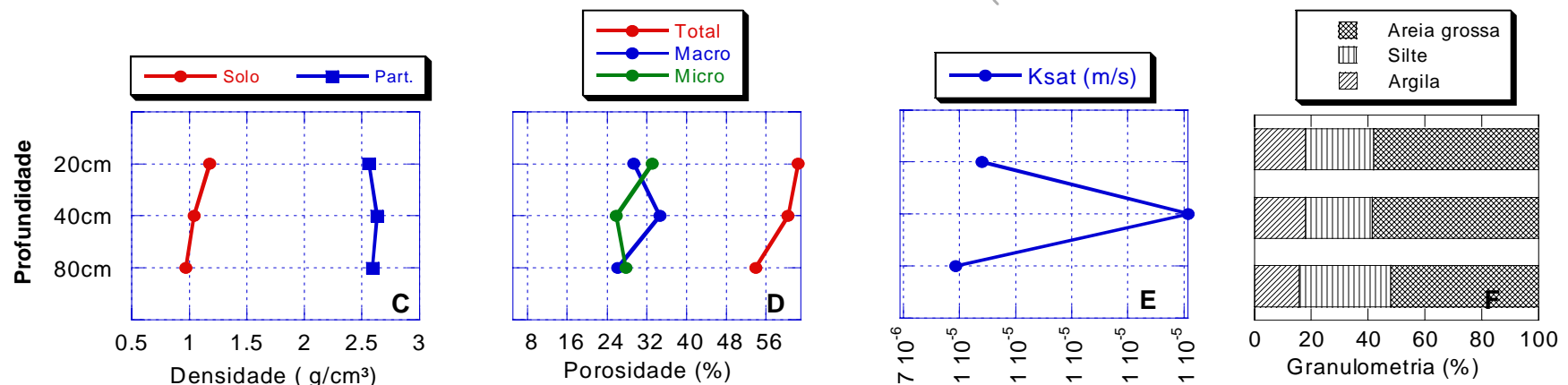
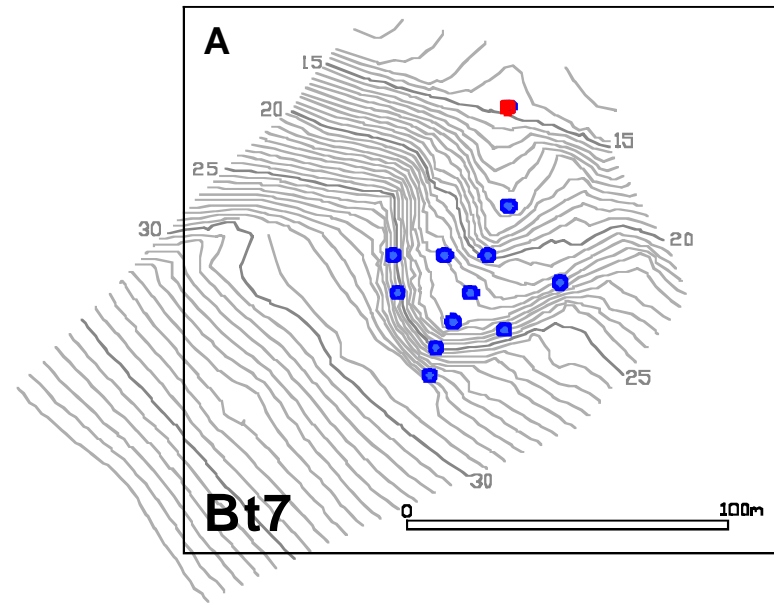
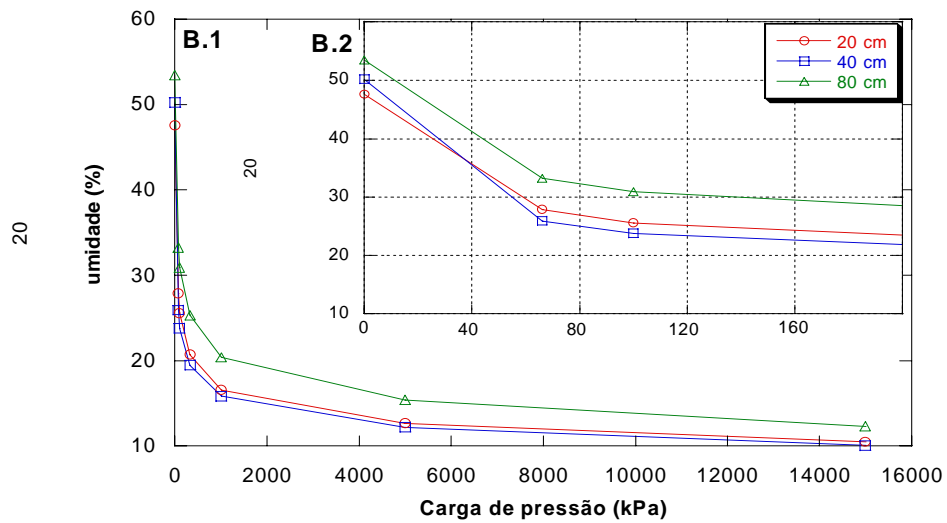


Figura 6.18. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt7 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

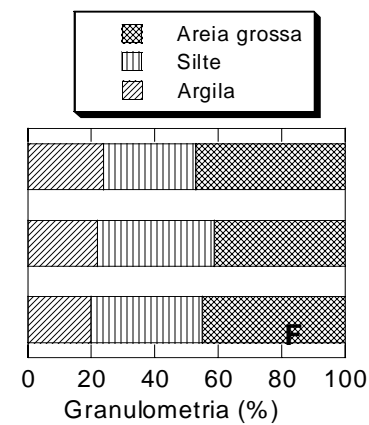
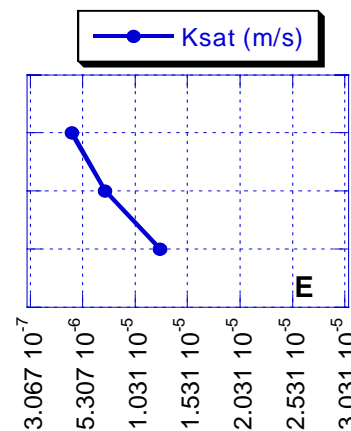
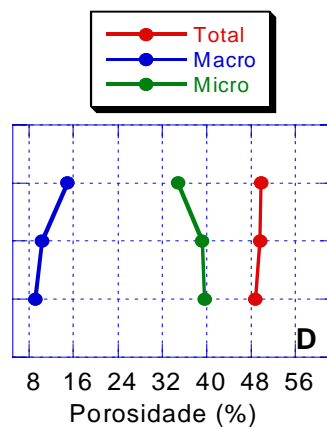
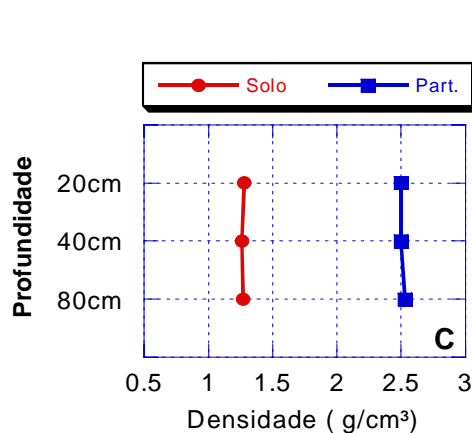
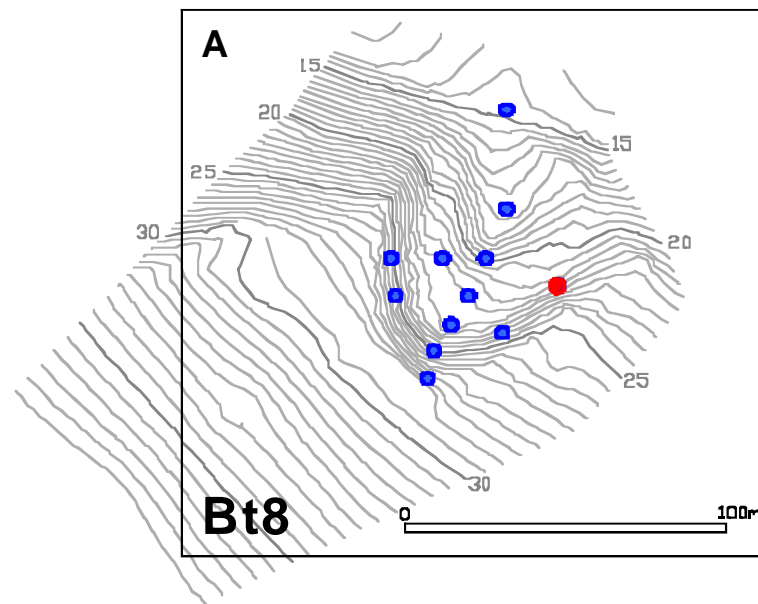
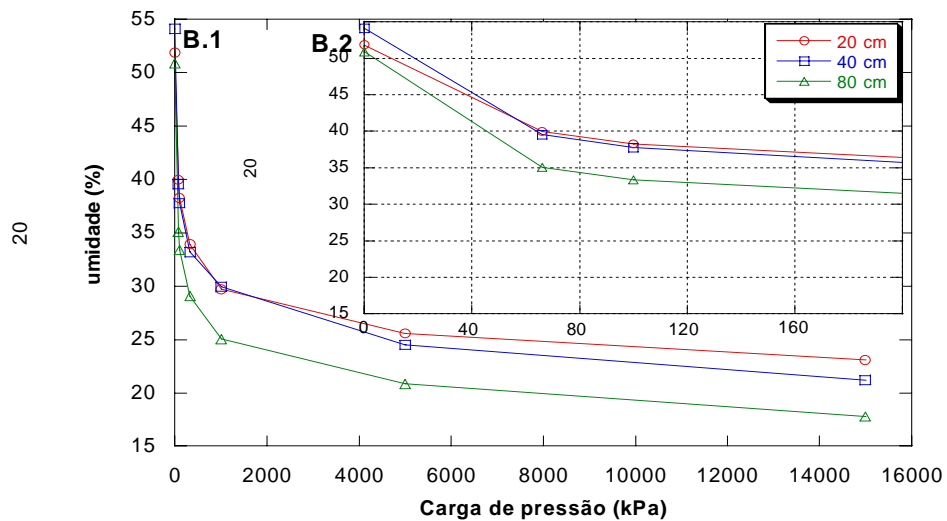


Figura 6.19. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt8 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

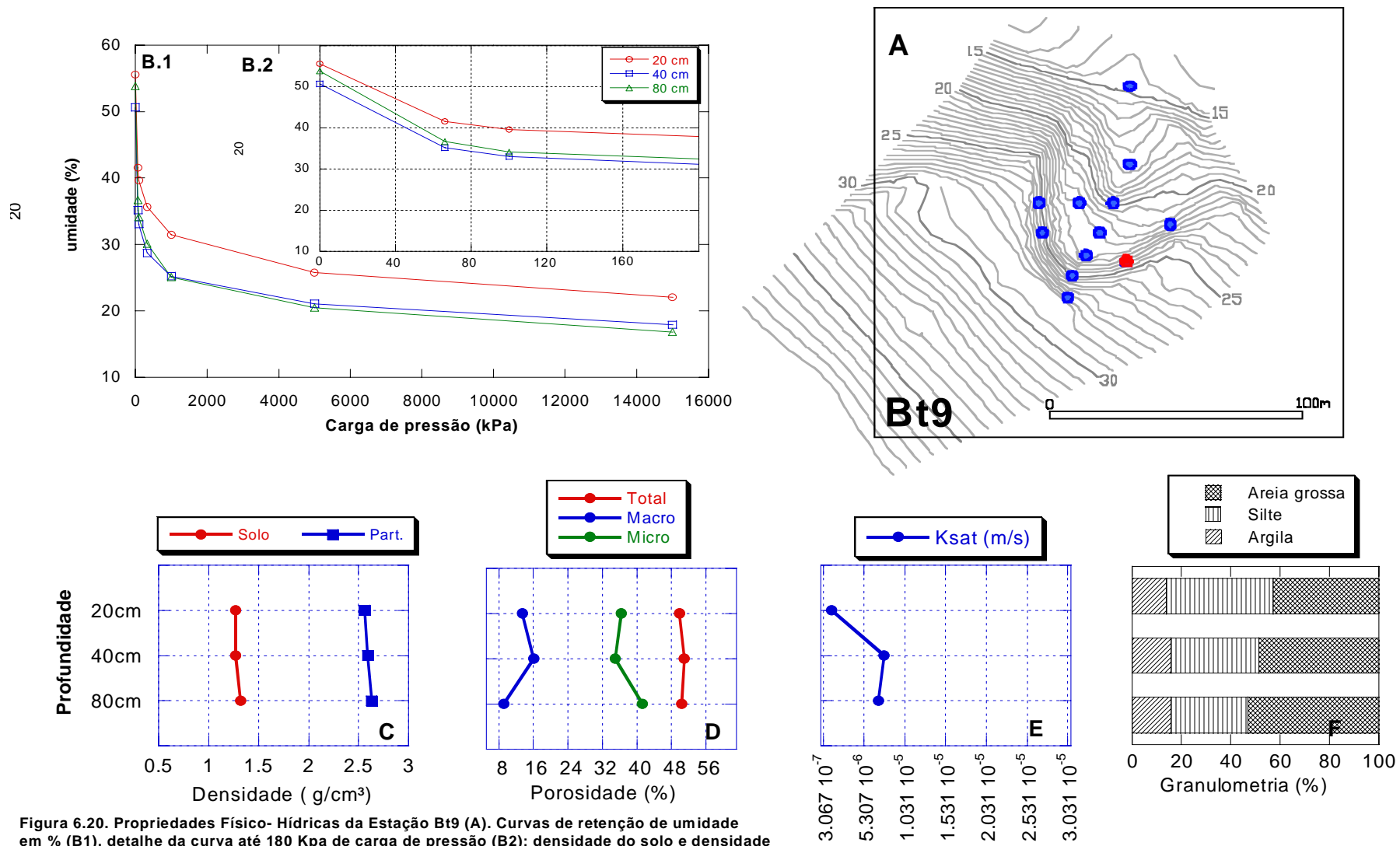


Figura 6.20. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt9 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

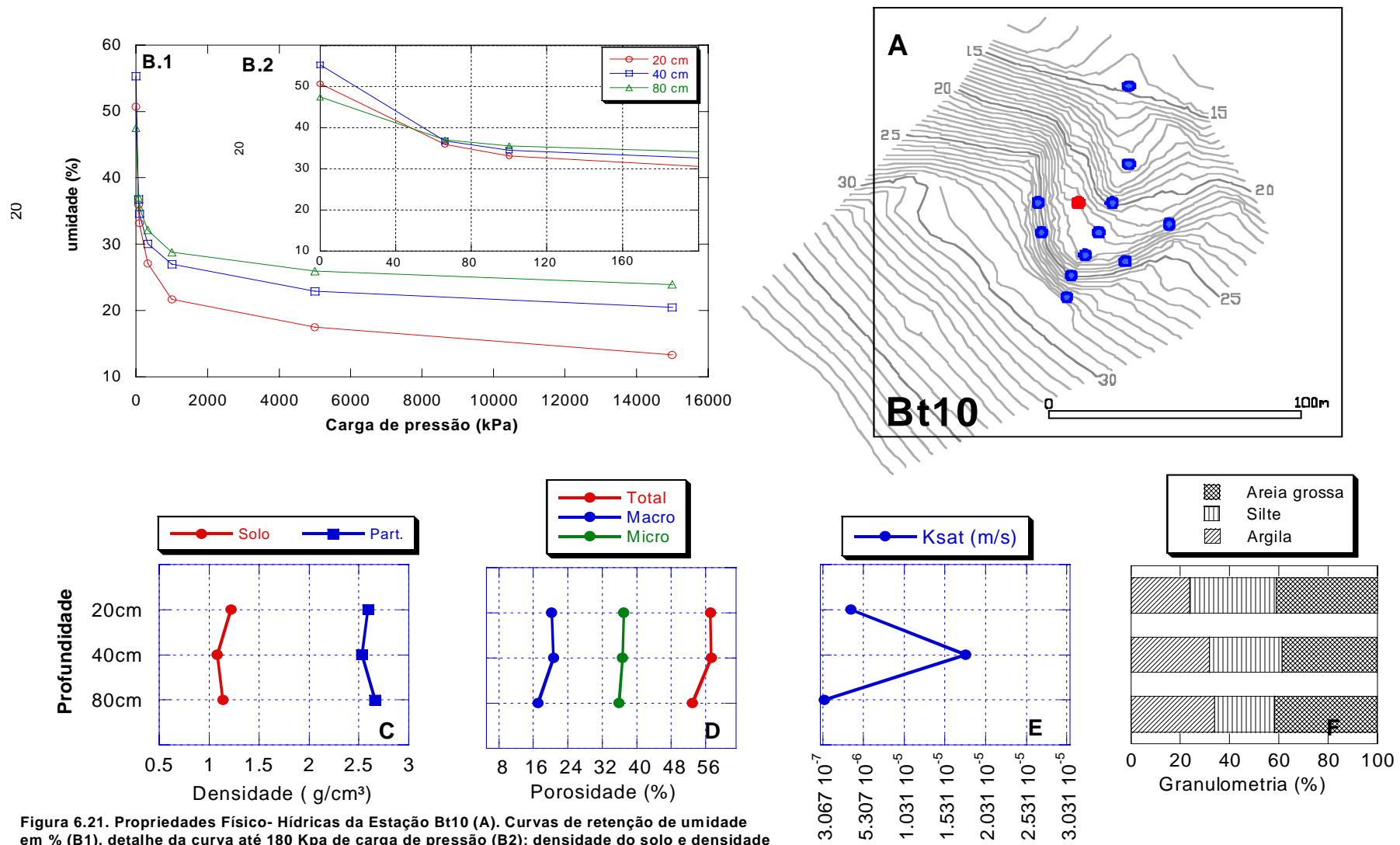


Figura 6.21. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt10 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm³ para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

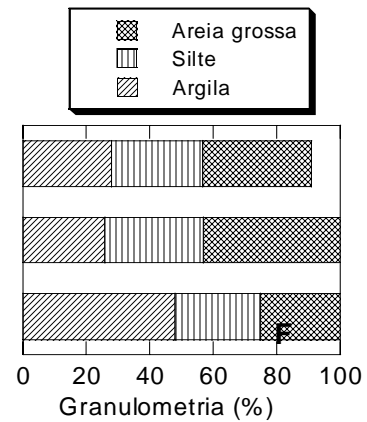
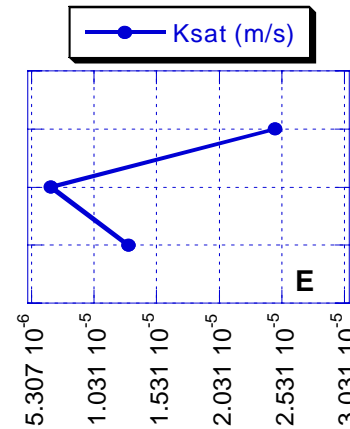
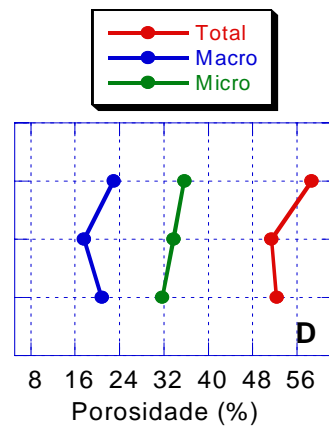
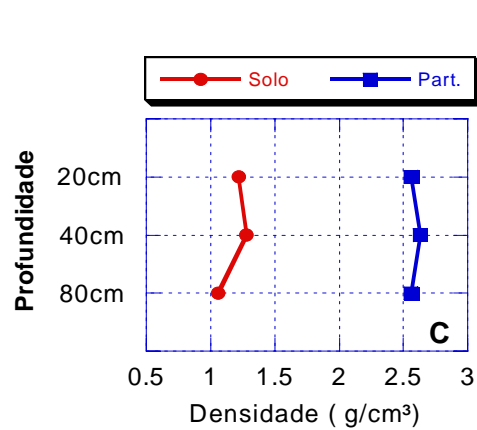
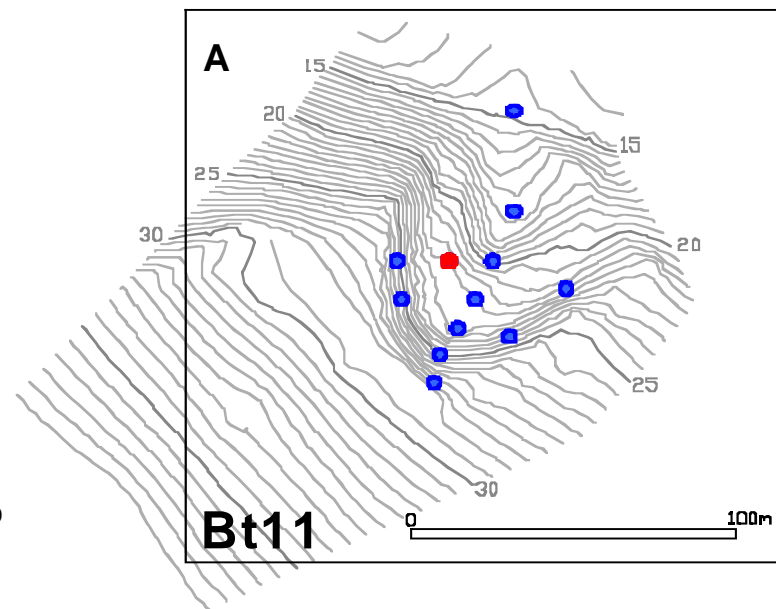
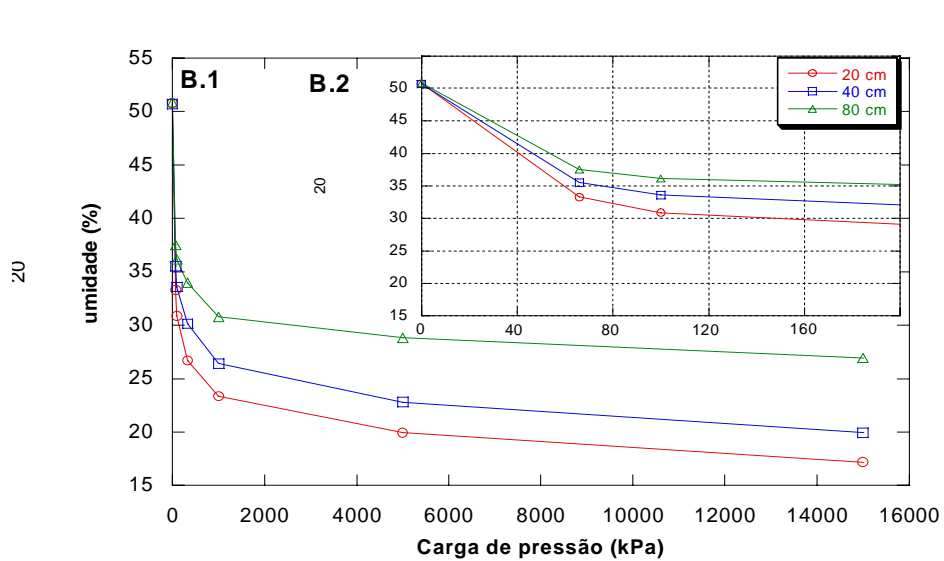


Figura 6.22 Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt11 (A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

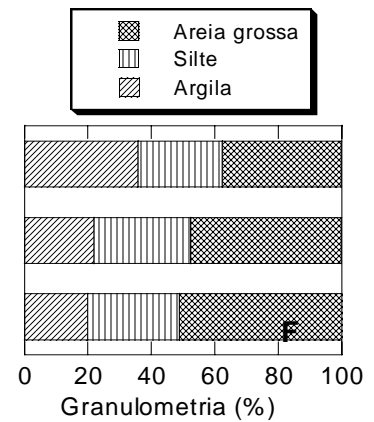
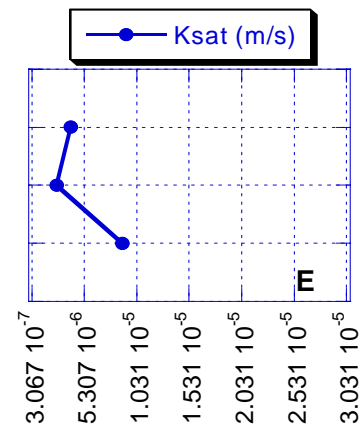
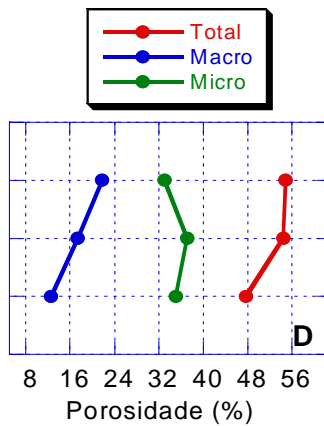
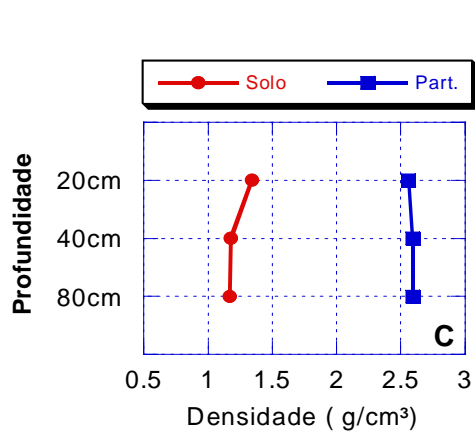
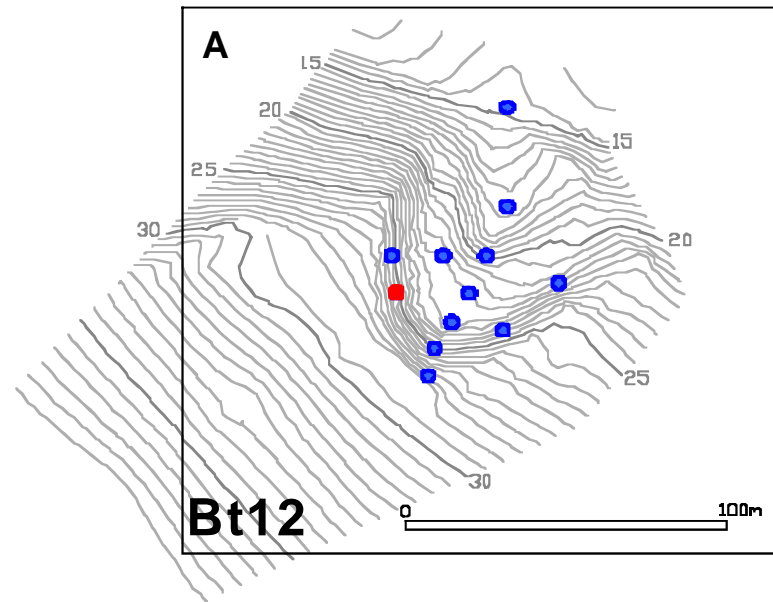
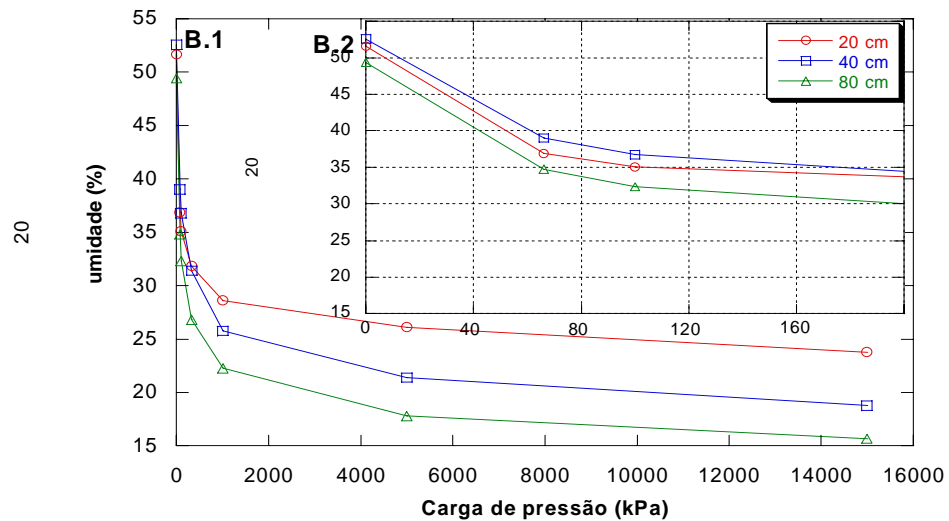


Figura 6.23. Propriedades Físico- Hídricas da Estação Bt12(A). Curvas de retenção de umidade em % (B1), detalhe da curva até 180 Kpa de carga de pressão (B2); densidade do solo e densidade das partículas, em g/cm<sup>3</sup> para as profundidades 20, 40 e 80 cm.(C); macro, micro e porosidade total em %. (D); Ksat em m/s (E); granulometria em % (F).

As duas primeiras etapas no processo de avaliação das propriedades físicas dos solos foram os testes de correlações e a avaliação da variabilidade geral das propriedades na área de estudo. Para a primeira etapa foram utilizados somente dados de macroporosidade, porosidade total  $[n]$ , densidade dos solos  $[\gamma_d]$  e condutividade hidráulica saturada  $[k_{sat}]$ , cujos resultados estão apresentados e discutidos no subitem 6.3.1.

### 6.3.1 Granulometria

O que pôde ser observado avaliando-se todas as baterias é que o material é predominantemente siltoso (classe textural franco), sendo esta granulometria relacionada à natureza do material de origem (gnaisse).

A seguir os percentuais das três diferentes frações granulométricas estimadas são correlacionados, sendo geradas as classes texturais do solo (utilizando-se do triângulo textural adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Curi, 1993)) para todas as profundidades e estações (dados nas Figuras 6.12 a 6.23, item F).

O Bt1 apresentou textura franco argilosa nos 20 cm, e franco argilo arenosa nos 40 cm e 80 cm. O Bt2 apresentou textura siltosa em todas as profundidades, o que se relaciona com a natureza do material (saprolito de gnaisse ou solo residual maduro). As baterias Bt3, Bt4, Bt5, Bt6 e Bt7 apresentaram pequenas variações texturais. Na estação Bt3 o solo é franco argiloso na profundidade 40 cm e franco nas demais. Na estação Bt4 o solo é franco argilo-arenoso na profundidade 80 cm e franco argiloso nas demais. Na estação Bt5 o solo é franco argiloso nos 20 cm, franco nos 40 cm e franco-argilo-arenoso nos 80 cm. Na estação Bt6 o solo é franco argiloso nos 20 cm, franco-argilo-arenoso nos 40 cm e argiloso nos 80 cm. Na estação Bt7 o solo é franco arenoso nas profundidades de 20 e 40 cm e franco nos 80 cm. No Bt 8 o solo é franco nas três profundidades avaliadas. Na estação BT9 o solo é franco arenoso nos 20 cm, franco nos 40 cm e franco arenoso nos 80 cm. Na estação Bt10 o solo é franco nos 20 cm franco argilo-arenoso nos 20 cm e franco argiloso nos 80 cm. Na estação Bt11 o solo é franco-argilo-arenoso nos 20 cm, franco nos 40 cm e argiloso nos 80 cm (único ponto com a presença de textura argilosa). Na estação BT12 o substrato é franco-argiloso nos 20 cm, franco nos 40 cm e franco-argilo-arenoso nos 80 cm. Esta textura argilosa presente na estação Bt11, na profundidade 80 cm, está condicionando uma diferenciação no



comportamento dos potenciais matriciais e totais em relação às estações vizinhas, conforme será detalhado nas avaliações das estações tensiométricas.

### **6.3.2 Densidade do solo e densidade das partículas**

Os resultados de densidade do solo e das partículas obtidos (ver Figuras de 6.12 a 6.23, ítem C) mostraram-se bastante homogêneos, com valores de densidade do solo variando de  $0,97\text{g/cm}^3$  (Bt7 80 cm) a  $1,51\text{g/cm}^3$  (Bt1 20 cm), e valores de densidade das partículas variando de  $2,5\text{g/cm}^3$  (Bt2 40 cm e Bt6 40 cm), a  $2,67$  (Bt1 20 cm), estes últimos em função da natureza do material de origem. A menor densidade do solo encontrada na estação Bt7 pode ser relacionada à presença da vegetação de gramíneas, que possui um sistema radicular que favorece o desenvolvimento de estrutura granular nos primeiros centímetros do solo, além de estar posicionada fora da parede do talude de corte.

Observa-se que a densidade do solo local é baixa suficiente para o estabelecimento da vegetação, principalmente nos taludes de aterro. Nos taludes de corte, foram encontrados maiores valores de densidade do solo e isto é um dos fatores que induzem ao menor crescimento da vegetação nos mesmos, o que neste caso não chegou a comprometer o projeto de RAD.

### **6.3.3 Curvas de retenção de umidade**

Observando-se os dados de retenção de umidade das diferentes estações tensiométricas (ver Figuras 6.12 a 6.23, ítem B), constata-se que as estações Bt1 e Bt7 possuem os valores menores de retenção em relação às demais estações. Os maiores valores foram encontrados nas estações Bt8, Bt9, Bt10 e Bt12, ambos no mesmo talude de corte. Na profundidade de 20 cm, os maiores valores de retenção foram encontrados na estação Bt9 e Bt12, sendo os menores encontrados nas estações Bt7 e Bt3. Na profundidade de 40 cm, os maiores valores foram encontrados nas estações Bt6 e Bt10, e os menores nas estações Bt3, Bt4 e Bt7. Na profundidade de 80m, os maiores valores foram encontrados nas estações Bt9 e Bt12, e os menores nas estações Bt1, Bt2, Bt3, Bt5 e Bt7.

Observa-se que estes dados não expressam uma relação direta entre a umidade em campo dos solos e seus potenciais matriciais, o que só poderia ser

obtido através de ensaios com o papel filtro, que levam em conta o fenômeno da histerese.<sup>6</sup> Em função disto, estes dados possuem como principal função subsidiar a compreensão dos processos de drenagem atuantes na encosta, e serão utilizados quando da avaliação do comportamento da contração da zona de saturação após os dias de chuva. Além disso, sabe-se que o ponto de inflexão da curva de retenção de umidade dos solos pode ser utilizado para estimar a capacidade de campo dos solos e assim saber quando o solo perde toda a água gravitacional e toda a umidade restante passa a estar retida no solo por forças capilares.

### 6.3.4 Macro-micro e porosidade total

Os maiores valores de porosidade total (para as avaliações de porosidade, ver Figuras 6.12 a 6.23, item D) foram obtidos nos pontos da estação Bt 7 (53,91% nos 20 cm; 60,46% nos 40 cm e 62,55% nos 80 cm, sendo este último o maior valor encontrado em toda a avaliação). Estes valores estão possivelmente relacionados a uma natureza diferenciada do substrato presente em relação às demais baterias que estão sendo avaliadas. Esta diferenciação pode ocorrer desde o momento em que a estação Bt 7 já não se encontra mais no talude, e sim em sua base.

Os menores valores de porosidade total foram encontrados no Bt1 (43,45% nos 20 cm; 44,53% nos 40 cm; e 42,31% nos 80 cm, sendo este último o menor valor encontrado).

Os maiores valores de macroporosidade foram encontrados também no Bt 7, 80 cm. Já os menores valores foram encontrados no Bt 6 (14,49% nos 20 cm; 6,22% nos 40 cm; e 29,42% nos 80cm, sendo o valor obtido nos 40 cm o menor de todos os pontos). Os resultados de densidade dos solos, no entanto, não corroboraram com esta hipótese, o que pode estar relacionado ao fato de serem utilizadas amostras

---

<sup>6</sup> Hillel (1970) relata que a relação entre umidade do solo e o potencial de pressão é afetada pela direção e taxa de variação da umidade, sensível às mudanças na estrutura e volume dos solos. A umidade e o potencial de sucção dos solos variam largamente no tempo e no espaço, conforme o solo é molhado pela chuva, drenado pela gravidade, e secado pela evaporação e extração das raízes. O equilíbrio da umidade do solo para uma dada sucção é maior na desorção (secamento) do que no molhamento. Esta diferença entre volumes do sistema de vazios preenchidos por água sob condições de drenagem e molhamento para uma certa tensão de umidade do solo, é chamado de histerese (Knapp,1978). Tal fenômeno pode ser atribuído à heterogeneidade do tamanho dos poros individuais do solo, ao aprisionamento do ar durante o molhamento, fenômenos de expansão e contração dos solos etc. (fernandes 1990). Devido à complexidade destas relações, a histerese é muitas vezes ignorada, e a característica de umidade do solo é geralmente relatada pela curva de desorção ou de descarga de umidade do solo.

diferentes nas avaliações. O que será observado ainda é uma boa correlação negativa entre a macroporosidade e a densidade dos solos, o que aponta para um erro no resultado somente na avaliação desta estação.

Vale lembrar que os valores de macroporosidade dão também uma boa indicação do percentual de umidade dos solos na capacidade de campo, e estes valores dão uma idéia da umidade dos solos quando estes drenaram toda a água gravitacional após um evento de molhamento.

Os maiores valores de microporosidade foram obtidos na estação Bt9 (41,26% nos 20 cm; 34,95% nos 40 cm; e 36,42% nos 80 cm), e os menores no Bt7. A estação Bt7 então, apesar de possuir elevados valores de porosidade total e macroporosidade, possui, proporcionalmente, baixos valores de microporosidade.

### **6.3.5 Condutividade hidráulica saturada (Ksat)**

Nos ensaios de condutividade hidráulica saturada (Figuras de 6.12 a 6.23, item E) foram obtidos valores bastante heterogêneos (de  $3 \times 10^{-5}$  a  $2.78 \times 10^{-7}$  m/s), sendo os maiores valores encontrados na profundidade de 40 cm (principalmente na estação Bt7, onde o valor é de  $3 \times 10^{-5}$  m/s), o que induz à concentração de fluxos subsuperficiais. Os valores estão na maior parte dos pontos de acordo com o esperado para solos siltsos (segundo Souza Pinto (2000) os valores vão de  $10^{-6}$  a  $10^{-9}$  m/s), porém, em alguns locais, como em todas as profundidades da Bt7, os valores estão muito altos, talvez em função de problemas de amostragem ou descontinuidades no solo.

A grande variabilidade de resultados denotou um ambiente anisotrópico em relação à velocidade dos fluxos e também possivelmente uma menor precisão nos dados obtidos. O Ksat não se correlacionou bem com as demais propriedades, porém a mesma seria de grande valia na avaliação do direcionamento dos fluxos subsuperficiais. O problema principal na determinação deste parâmetro é não só a sua heterogeneidade, mas também a sua anisotropia, o que faz com que este parâmetro, obtido nesta avaliação, seja aplicável somente quando se fala em fluxos verticais, já que as amostras foram coletadas com esta orientação. Além disso, no procedimento são utilizadas amostras pequenas de representatividade e que estão

sujeitas ao efeito da amostragem, onde a cravação induz a formação de caminhos de percolação preferenciais no corpo de prova.

Buscou-se utilizar estes valores para uma avaliação geral comparativa da condutividade hidráulica saturada nas diferentes estações, de modo a se tentar observar uma relação entre este parâmetro e a orientação da percolação da água nos solos. Uma metodologia mais aplicável a este tipo de avaliação seria o permeâmetro em campo (ex. permeâmetro de Guelph, que tem sido utilizado para avaliações em encostas íngremes (ex. Vieira, 2001)), que mensuram a condutividade do meio após a formação de um bulbo saturado no solo.

Os dados de condutividade hidráulica saturada se mostraram altos na estação Bt10 aos 40 cm ( $10^{-5}$  m/s) e na estação Bt4 aos 20 cm de profundidade ( $2 \cdot 10^{-5}$  m/s). Os elevados valores encontrados em todas as profundidades na estação 7 apontam para a possibilidade de alívio de forças de exfiltração na base do novo anfiteatro, o que poderá ocasionar em instabilização do talude. Os elevados valores obtidos para a estação 7 20 cm reforçam ainda a hipótese de que uma das possíveis rotas finais de fluxos de exfiltração ao longo do anfiteatro passa por esta bateria. Nos pontos de menor condutividade, a tendência será a orientação dos fluxos para outras zonas, geralmente acarretando na formação de zonas de acúmulo (podendo gerar níveis d'água suspensos) que, em alguns locais, juntamente com outros fatores, como a topografia, poderão influenciar no desenvolvimento de faces de exfiltração no interior do anfiteatro.

Os maiores valores de condutividade em todas as baterias na profundidade de 40 cm revelam que nesta profundidade há uma concentração dos fluxos subsuperficiais, constituindo a profundidade onde ocorrem maior vazão e velocidade de percolação dos fluxos, fatores relacionados aos processos erosivos. Tais discontinuidades têm sido apontadas como responsáveis pela formação de planos de ruptura. Além disto, avaliando as poro-pressões em solos na Floresta da Tijuca, Freire Alemão (1998) encontrou uma forte influência dos sistemas radiculares nesta profundidade, e a relacionou a condições mais favoráveis de infiltração, o que se evidencia pela existência de dutos associados às raízes profundas de ancoragem.

### 6.3.6 Correlações

A fim de confirmarmos a validade prática dos dados de propriedades dos solos que foram obtidos nas análises de laboratório, procedeu-se a um exame básico de correlações, essencialmente para comparar parâmetros retirados de amostragens indeformadas de diferentes moldes, que possuem maiores chances de erro. Foram correlacionadas as seguintes propriedades dos solos: condutividade hidráulica saturada, densidade do solo, macroporosidade e porosidade total. Os resultados destas correlações encontram-se nos gráficos a seguir (figuras 6.24 a 6.28).

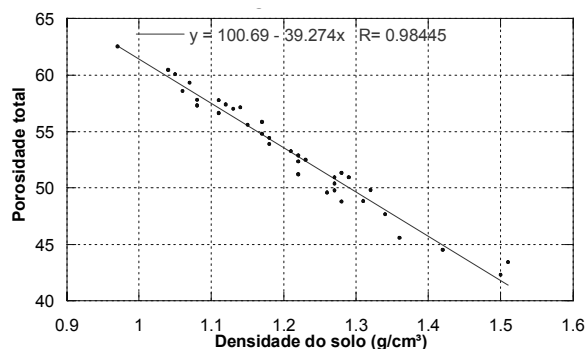


Figura 6.24. Gráfico de correlação entre os parâmetros densidade do solo e porosidade total.

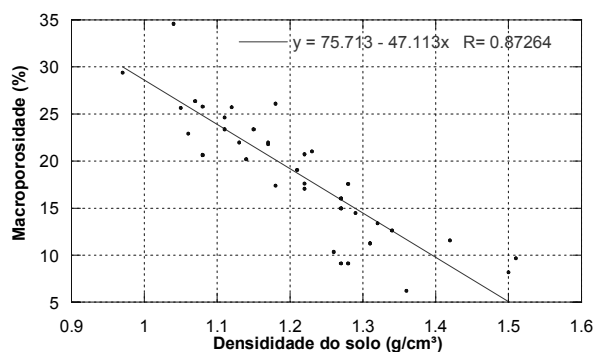


Figura 6.25. Gráfico de correlação entre os parâmetros densidade do solo e macroporosidade.

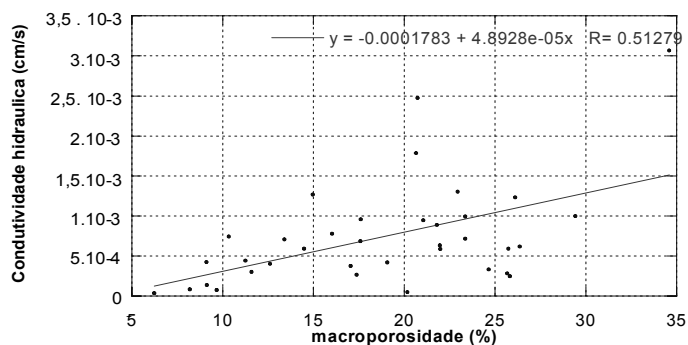


Figura 6.26. Gráfico de correlação entre os parâmetros condutividade hidráulica saturada e macroporosidade.

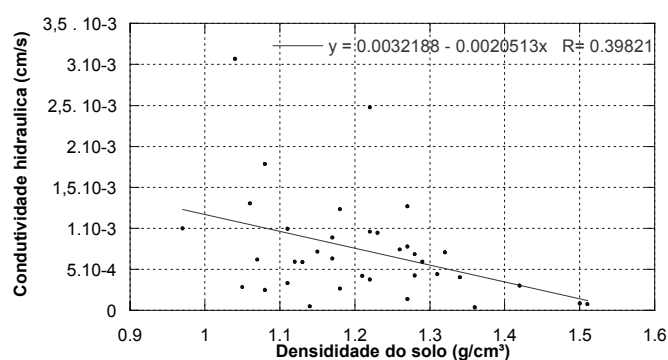


Figura 6.27. Gráfico de correlação entre os parâmetros densidade do solo e condutividade hidráulica.

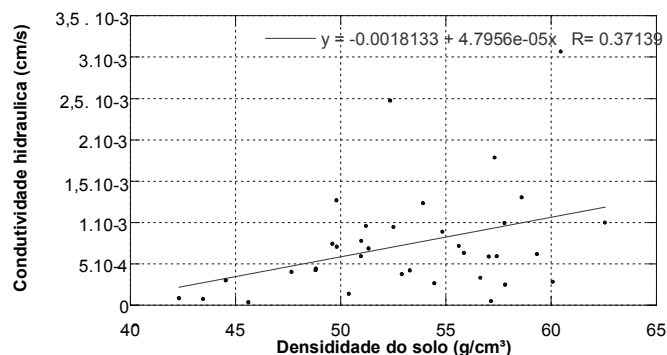


Figura 6.28. Gráfico de correlação entre os parâmetros porosidade total e condutividade hidráulica.

As melhores correlações foram obtidas entre densidade do solo e porosidade total ( $R = 0,98445$  para  $y = 110,69 - 37,274x$ ); e entre macroporosidade e densidade do solo (com um  $R = 0,87264$  para  $y = 75,713 - 47,113x$ ).

A condutividade hidráulica saturada apresentou também uma boa correlação com os dados de macroporosidade ( $R = 0,51279$  para  $y = -0,0001783 + 4,8928e-$

05x), e uma baixa correlação com os valores de densidade do solo ( $R = 0,39821$ , para  $y = 0,0032188 - 0,0020513x$ ) e porosidade total ( $R = 0,37139$ , para  $y = -0,0018133 + 47.956e - 0.5x$ ).

As propriedades avaliadas nestes testes apresentaram, portanto, boas correlações. Este teste ganha importância se pensarmos que as próprias amostras de solos utilizadas para as avaliações de densidade dos solos e porosidades são diferentes, sendo também submetidas a condições distintas em laboratório.

#### **6.4 Avaliações das cargas totais e potenciais matriciais**

Primeiramente será realizada uma avaliação do comportamento geral das cargas totais e poro-pressões das baterias de tensiômetros nas diferentes estações ao longo de todo o período de monitoramento. Posteriormente serão avaliadas em detalhe duas seqüências temporais, uma primeira na estação seca (de 24 de agosto a 27 de setembro de 2003), e uma na estação chuvosa (dias 31 de dezembro de 2003 a 14 de fevereiro de 2004). O primeiro período envolve uma única fase de recarga seguida de drenagem, e o segundo envolve três fases de recarga e drenagem, com diferentes padrões de magnitude e freqüência pluviométricos.

Observando-se o comportamento geral das baterias de tensiômetros para todo o período estudado (Figuras 6.29 a 6.36) podemos constatar inicialmente uma maior variabilidade das cargas totais e potenciais matriciais nas baterias Bt2, Bt8, Bt10, Bt11 e Bt12. Todas estas estações estão situadas no mesmo talude de corte, exceto a Bt10, porém esta última está situada próxima a uma feição erosiva (conforme consta na tabela 4.9). As baterias Bt1, Bt3, Bt5 e Bt9 foram as que possuíram, de uma maneira geral, respostas mais homogêneas em todas as profundidades em relação à chegada da frente de umedecimento durante a recarga.

A estação Bt1, a Bt3 e a Bt7 apresentaram um padrão de drenagem semelhante, sendo as recargas em geral maiores na Bt3 e, principalmente, na Bt7, provavelmente pela posição mais baixa na encosta em relação às demais. Ambas as estações possuem em comum baixos valores de declividade.

#### 6.4.1 Potenciais matriciais – período completo

Observou-se uma maior amplitude dos potenciais matriciais, de uma maneira geral, na profundidade de 20 cm. Provavelmente esta variabilidade dos potenciais é resultado de uma maior influência das propriedades dos solos e da cobertura vegetal na área. Castro Jr. (1991) observou comportamento semelhante avaliando solos florestais, e acredita que há um predomínio da influência, para o caso de sua área de estudo, da influência das propriedades dos solos.

Os resultados das avaliações da variabilidade dos potenciais matriciais constam nas figuras 6.29 a 6.32, resultado das avaliações diárias dos 36 tensiômetros ao longo da voçoroca (note que o horário das medições não consta nas figuras, mas foi incluído na planilha). Estes revelam inicialmente um predomínio de menores sucções e um maior acúmulo de umidade nas baterias Bt1, Bt3 e Bt7, o que deve estar relacionado à baixa declividade em ambas as estações.

Os resultados até agora obtidos sugerem que há uma concentração das águas pluviais, provenientes de outras áreas na Bt1, para que esta mesma possa apresentar comportamento similar ao encontrado nas baterias Bt3 e Bt7, que se encontram, topograficamente, em posições onde se favorece maior acúmulo de umidade.

As baterias Bt3 e Bt7 possuem em comum o fato de estarem ao sopé de taludes, sendo que a Bt3, que apresentou os menores valores de carga de pressão para o período monitorado (mais seca), está em talude de aterro, com uma área de contribuição menor e menores declives. Observa-se a influência de outras variáveis, que não somente a topográfica, estão controlando o processo de umedecimento, retenção e movimentação da água no solo nestas áreas. Uma das variáveis importantes é a condutividade hidráulica saturada do solo, que é baixa, no caso da estação Bt3 aos 80 cm (Figura 6.29), o que pode estar constituindo um impedimento à percolação das águas para maiores profundidades.

A maior variabilidade dos potenciais matriciais ocorreu nas baterias Bt2, Bt8, Bt10, Bt11 e Bt12. As baterias Bt11 e Bt12 apresentaram alguns momentos de saturação, após uma seqüência de três chuvas de magnitude elevada.



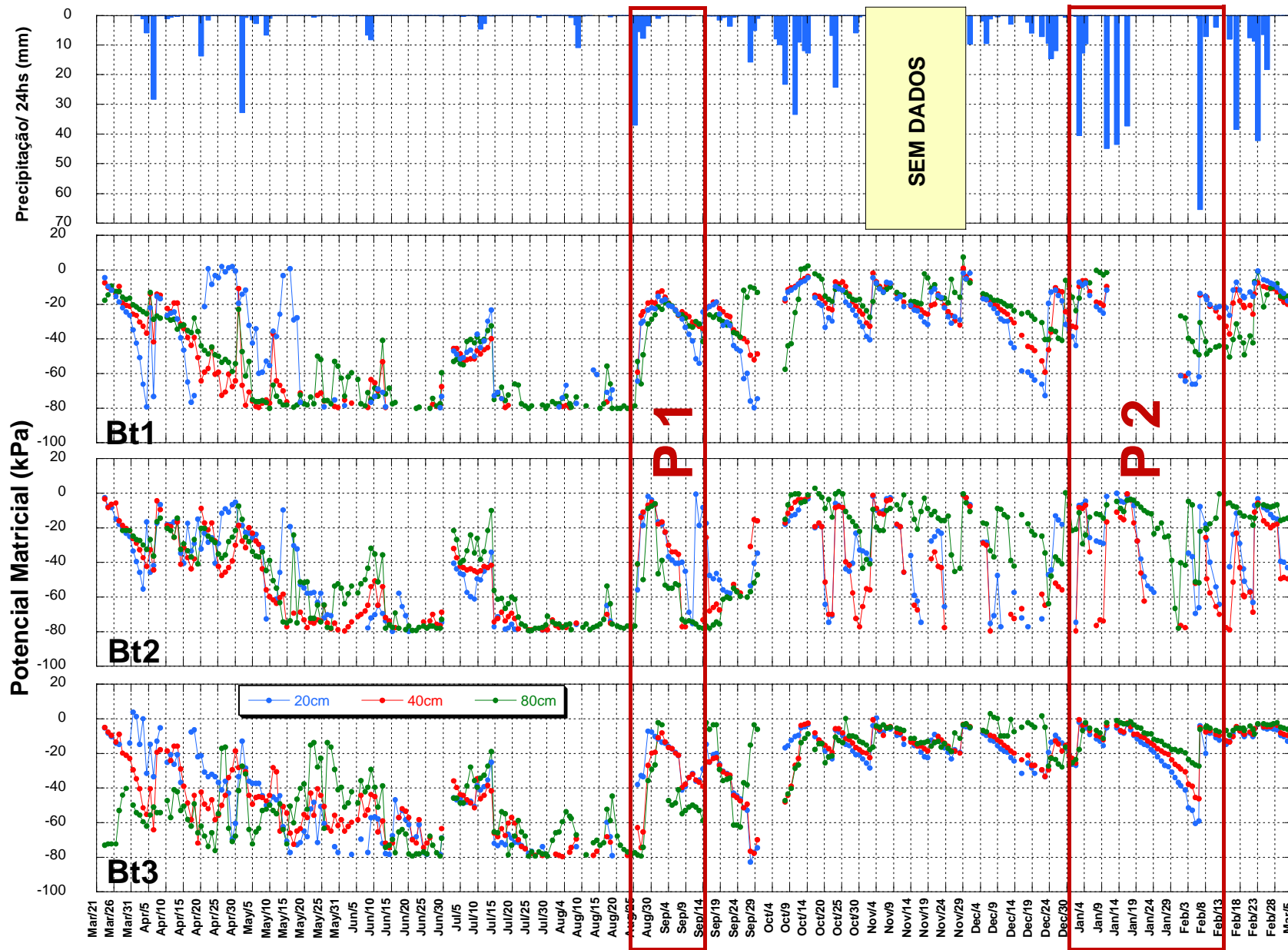


Figura 6.29. Variação dos potenciais matriciais (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt1, Bt2 e Bt3, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

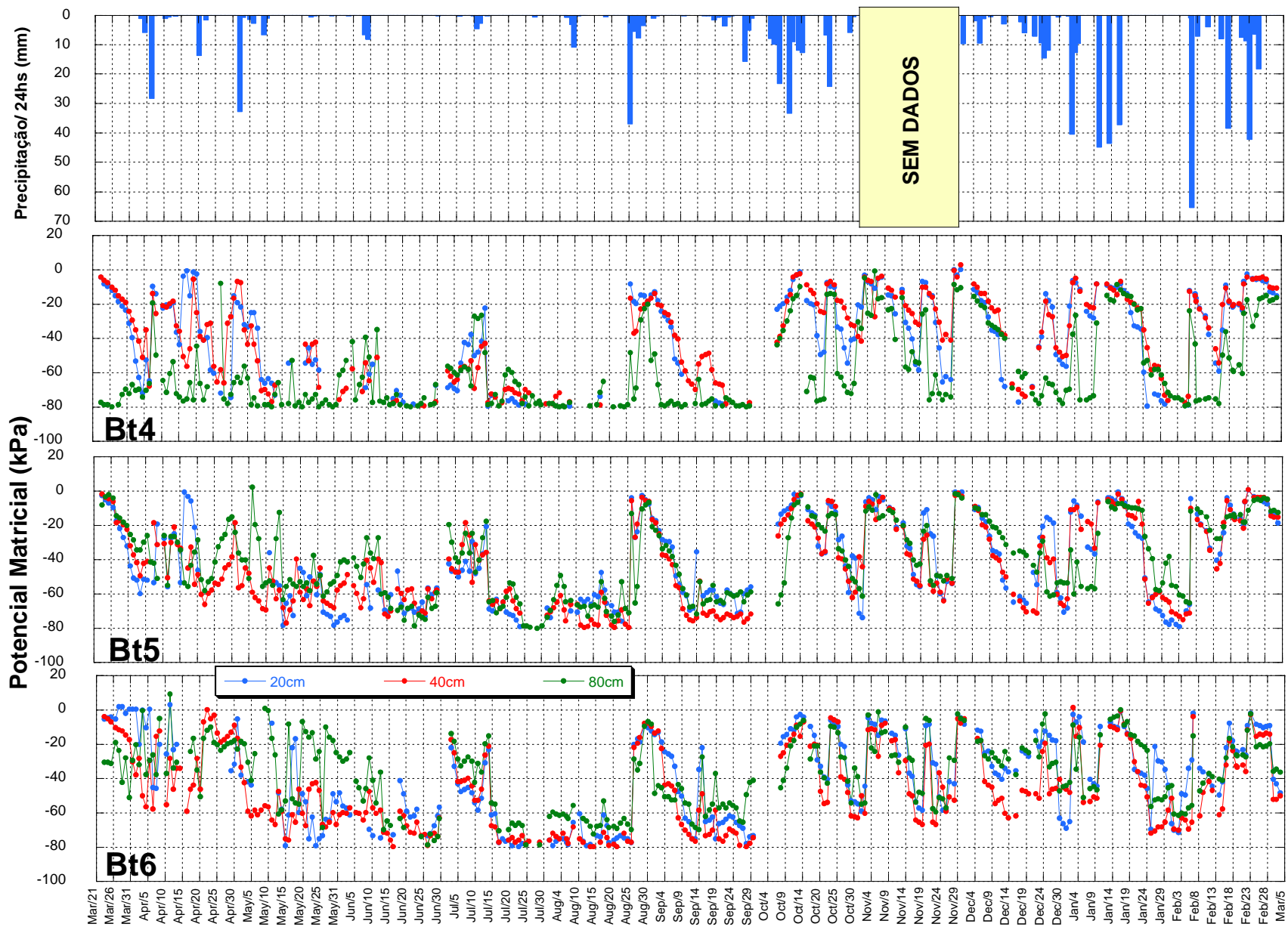


Figura 6.30. Variação dos potenciais matriciais (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

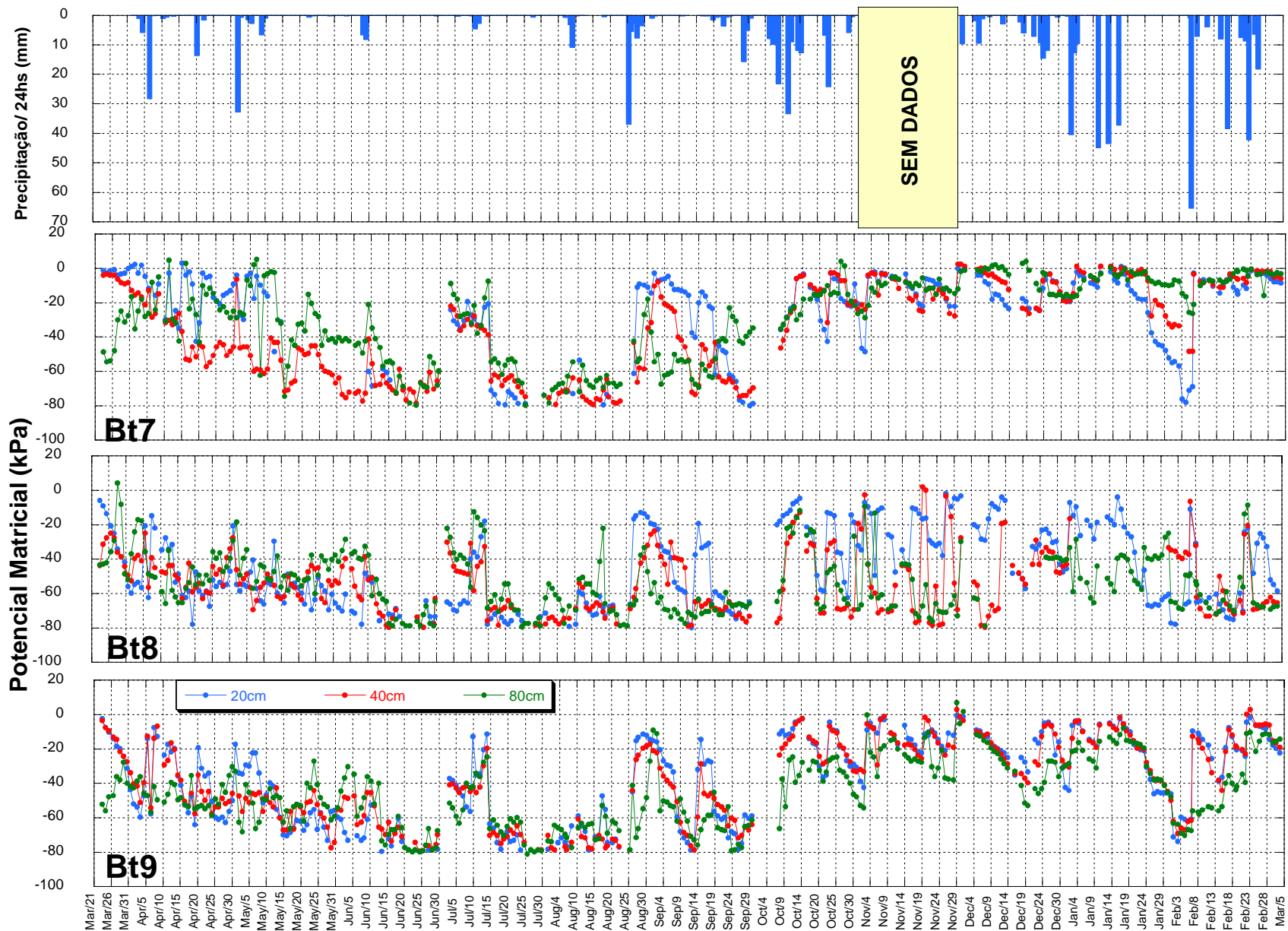


Figura 6.31. Variação dos potenciais matriciais (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

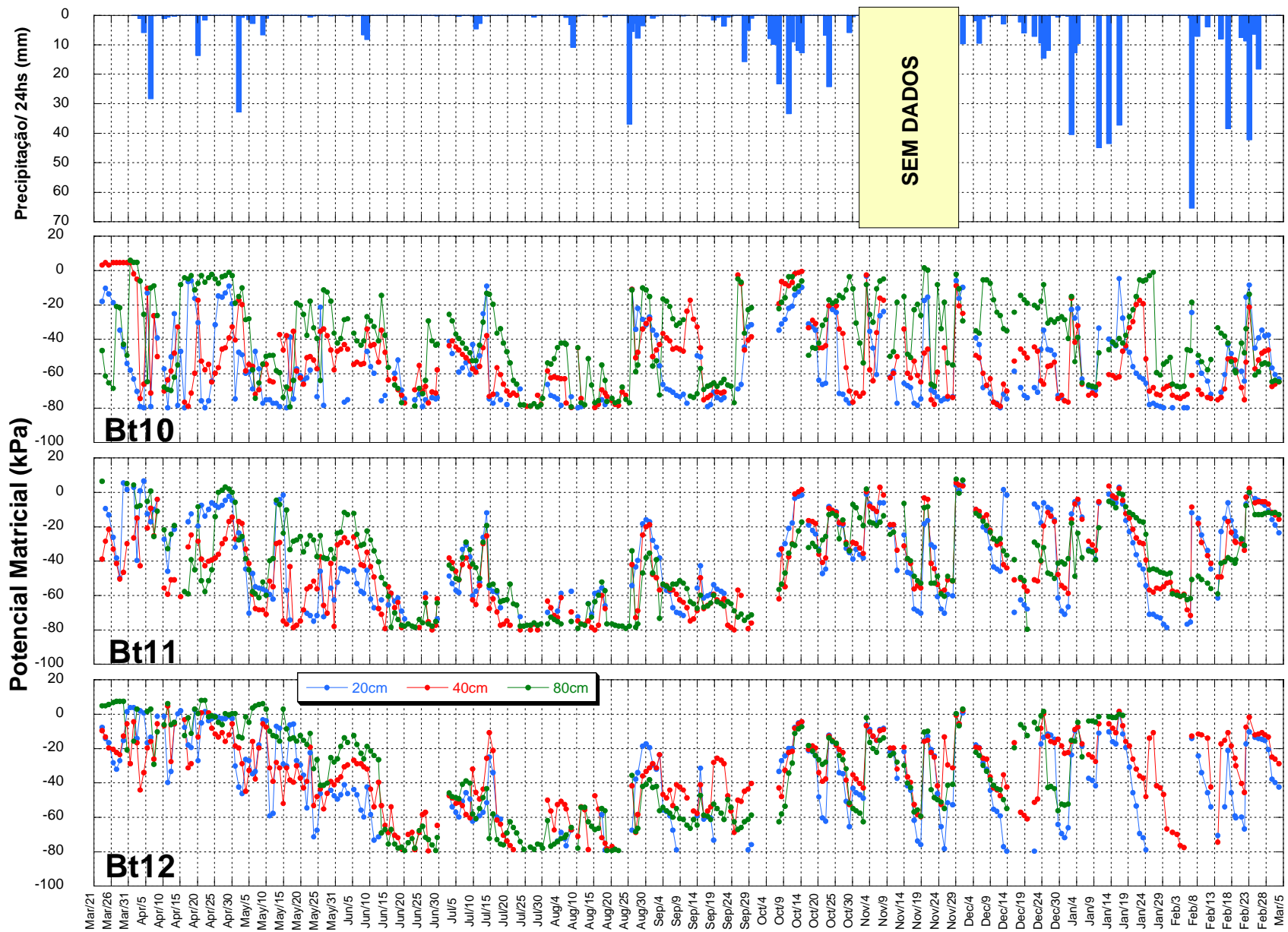


Figura 6.32. Variação dos potenciais matriciais (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

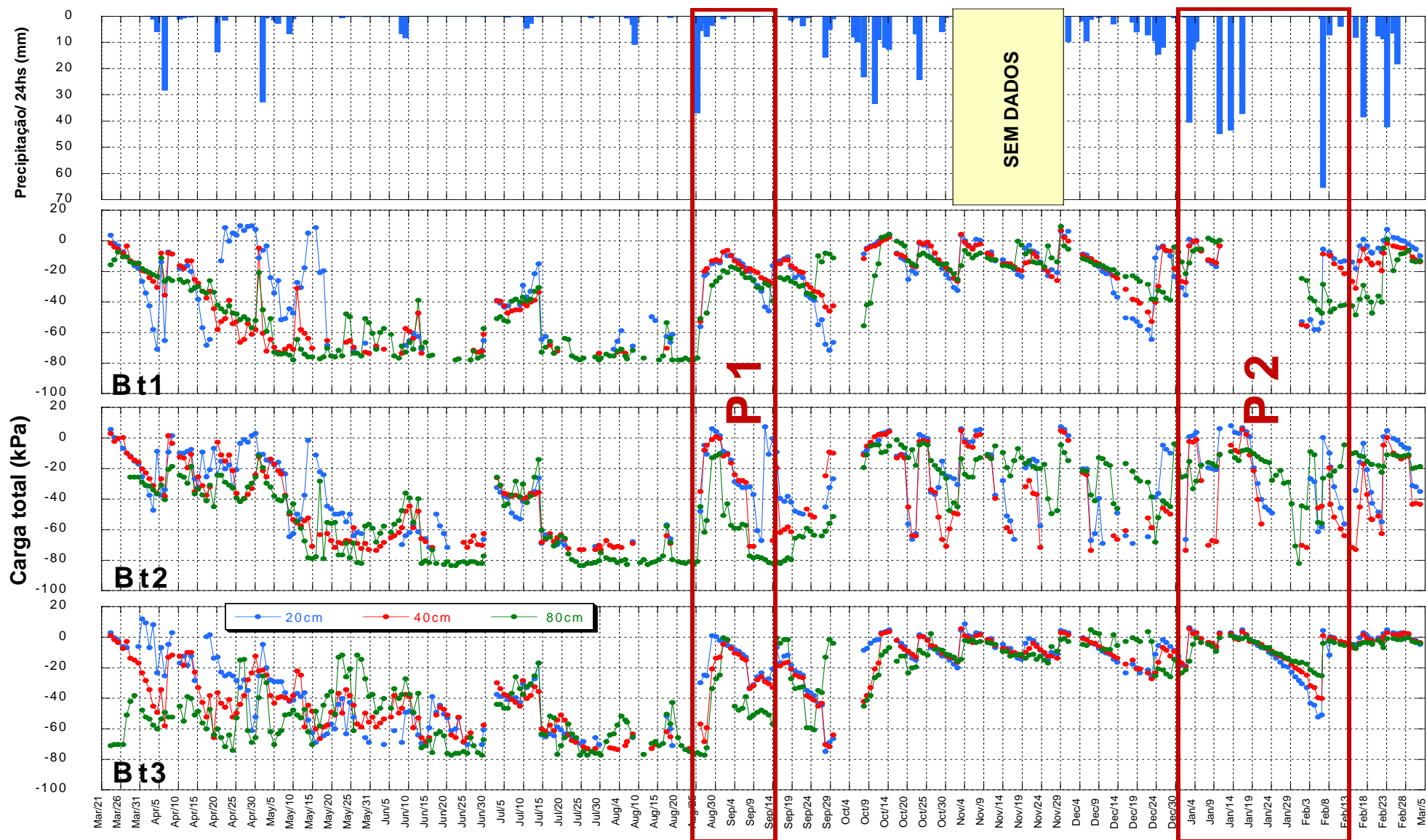


Figura 6.33. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt1, Bt2 e Bt3, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

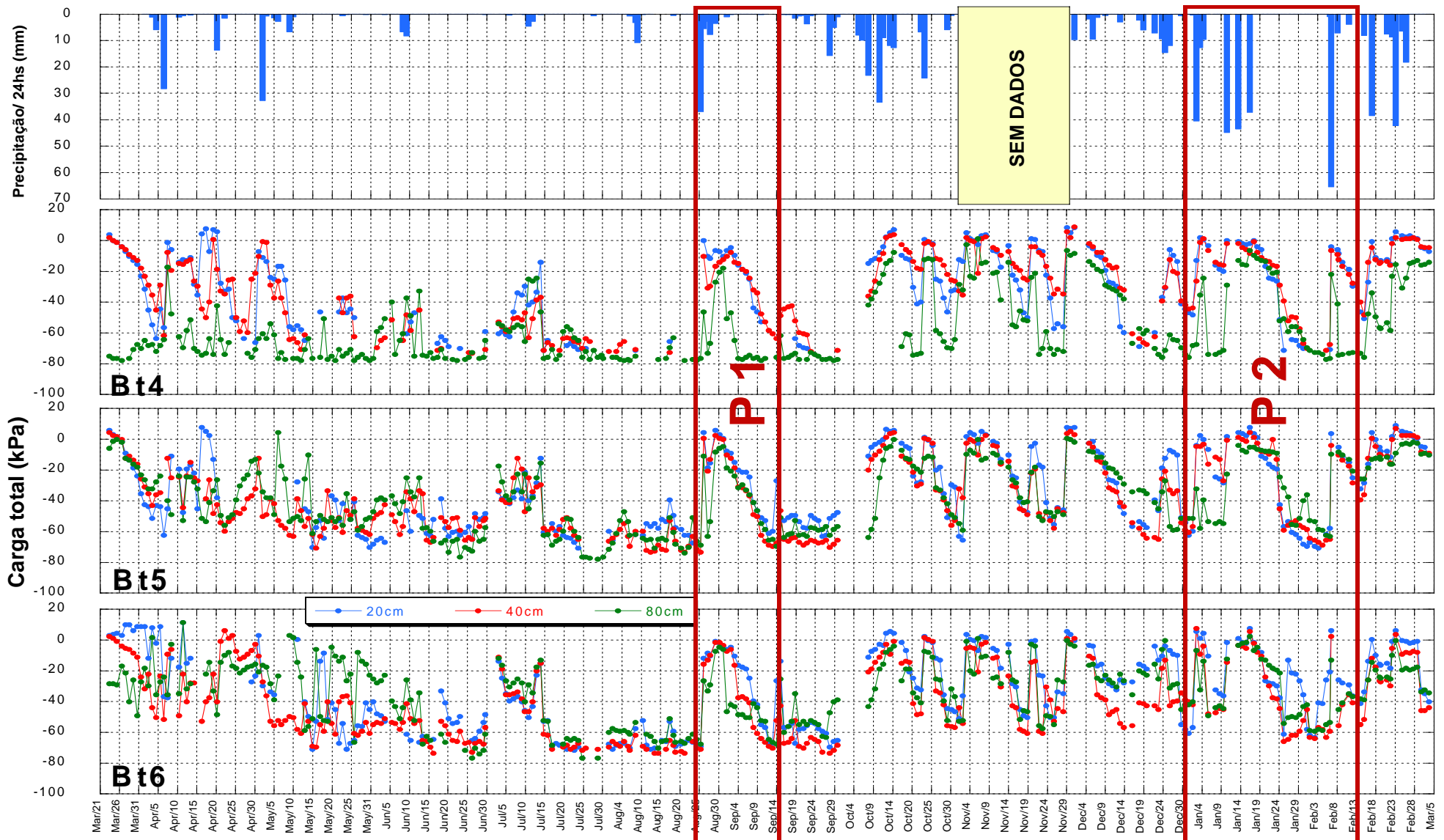


Figura 6.34. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

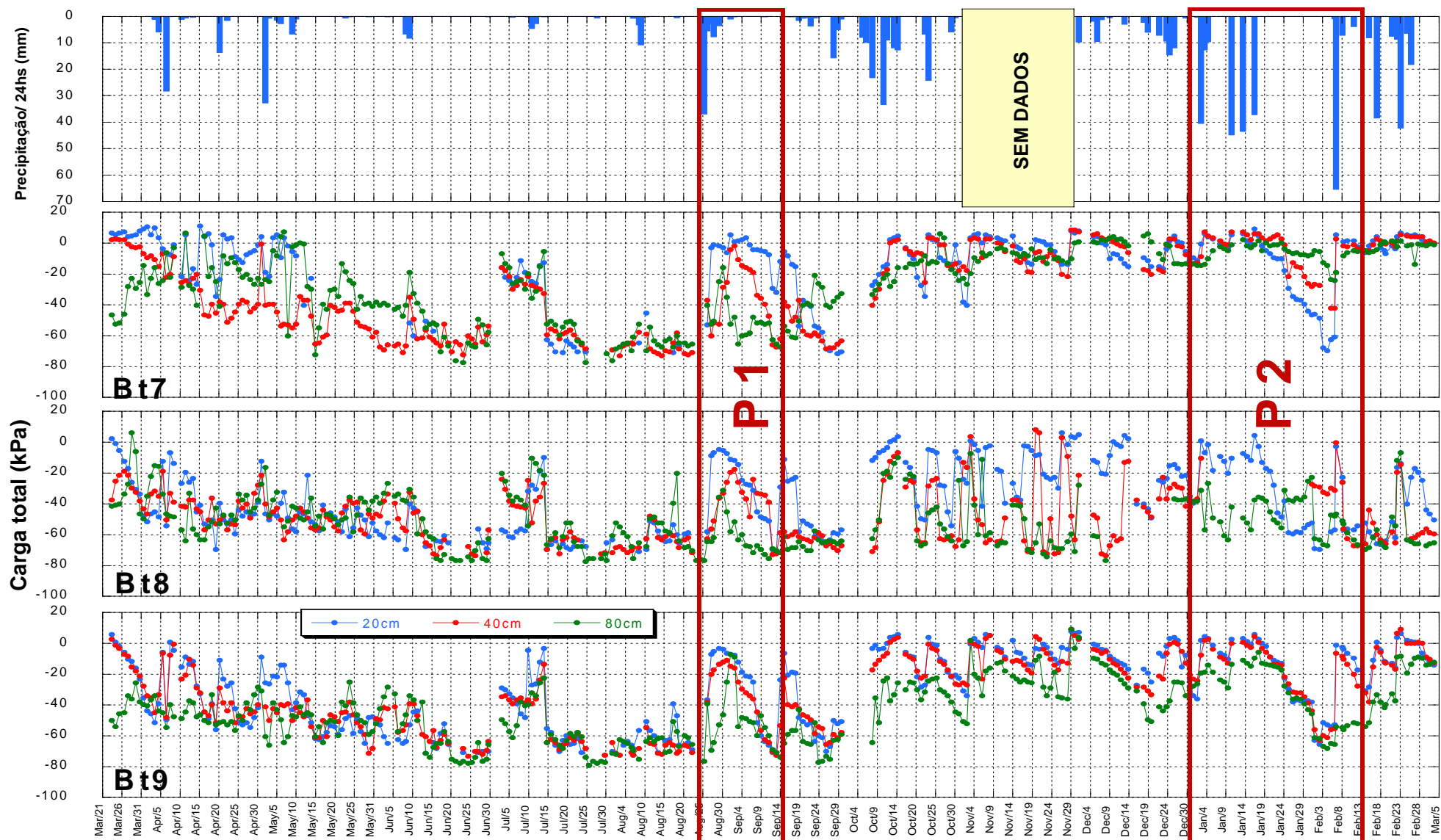


Figura 6.35. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

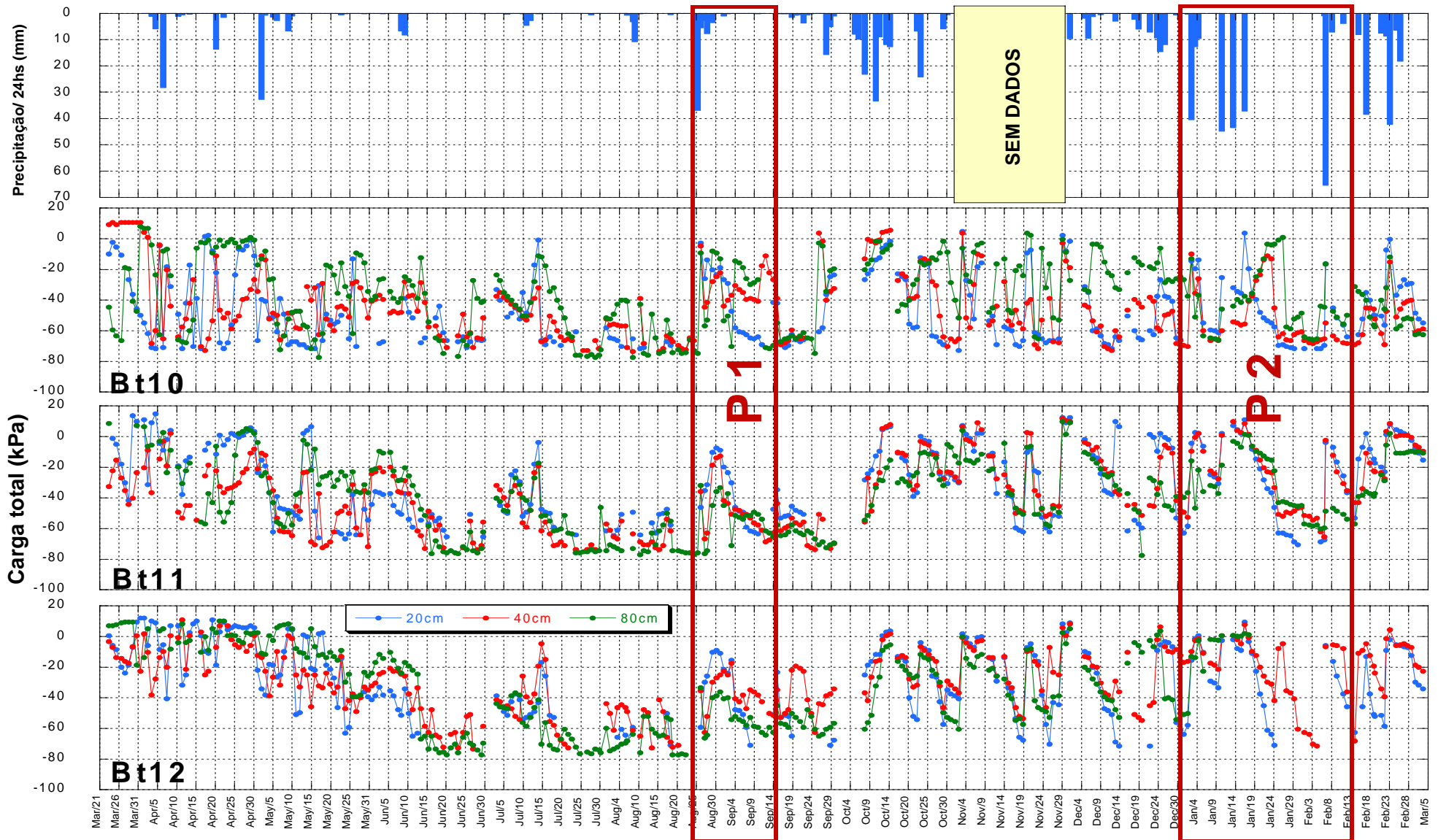


Figura 6.36. Variação da carga total (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período completo de avaliação, nas estações Bt10, Bt11e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.



No que diz respeito ao processo de retenção e drenagem da água no solo durante todo este período, pode-se observar que a sucção no solo normalmente é menor que a capacidade de campo dos solos durante os períodos de chuva, só excedendo-a após alguns dias na maior parte dos tensiômetros monitorados. Estas observações são especialmente importantes para as baterias Bt3 e Bt7, que favorecem maior acúmulo de umidade. Conclui-se que a água percola no solo e é drenada por gravidade, ou de acordo com a direção do maior gradiente total de carga, durante os primeiros dias (normalmente 1 semana), quando então o movimento da água no solo perde grande parte de sua velocidade e passa a se caracterizar como transferência de umidade e os efeitos erosivos da água das chuvas são reduzidos. Esta transição de velocidade e seus efeitos sob os processos erosivos constitui um tema que pode ser ainda aprofundado, mas não é abordado nesta dissertação.

#### **6.4.2 Cargas totais - período completo**

Observando-se o comportamento dos tensiômetros na estação Bt1 (Figura 6.33) nota-se uma resposta bem definida as precipitações, podendo haver transferência de umidade ascendente após prolongados períodos úmidos, provavelmente em função dos processos de evaporação e evapotranspiração (retirada de umidade dos solos pelas plantas).

Na estação Bt2 (Figura 6.33) houve grande variabilidade das cargas totais, como já mencionado. O padrão de drenagem constatado é semelhante ao da estação Bt1, porém as profundidades 20 cm e 40 cm respondem com maior variabilidade, o que pode se relacionar maior declividade e à posição na encosta, já que o Bt2 já está num segmento côncavo em planta e em perfil, o que gera acumulação dos fluxos. Este comportamento pode ainda estar relacionado aos valores mais elevados de condutividade hidráulica saturada e macroporosidade encontrados na estação com relação à anterior.

O comportamento na estação Bt3 (Figura 6.33) foi bastante definido, respondendo às recargas com fluxos predominantemente descendentes, ocorrendo transferência de umidade ascendente após prolongados períodos úmidos. Tal comportamento pôde ser encontrado também nas estações Bt4, Bt5 e Bt6 (Figura

6.33). No caso da estação Bt3 não foi observado comportamento definido associado à exfiltração na base do primeiro talude de corte.

A estação Bt9 (Figura 6.35) apresentou um comportamento bem definido, porém os fluxos permaneceram descendentes, o que deve estar relacionado à posição na alta encosta, além da textura (aumento gradual do percentual de areia com a profundidade).

O comportamento da Bt8 (Figura 6.35) foi similar ao encontrado em sua estação vizinha Bt9, porém com maiores variações nas profundidades 20cm e 40cm. Ressalta-se o fato de que na estação Bt8 os valores de condutividade hidráulica saturada diminuem com a profundidade.

O comportamento da Bt7 (Figura 6.35) divergiu em muito das demais baterias, apresentando vários momentos de fluxos ascendentes, logo após os períodos úmidos, ou ainda, no início dos períodos de drenagem. Este comportamento deve estar associado à posição da bateria na encosta, o que já era de se esperar para o ponto de convergência da topografia local. Destaca-se os elevados valores de condutividade hidráulica saturada encontrados para esta estação em todas as profundidades. Como a umidade dos solos ainda está acima da capacidade de campo nos primeiros dias de drenagem, este fluxo é rápido e pode conter elevada força erosiva, e é uma evidência da rota dos fluxos subsuperficiais saturados.

O comportamento na Bt10 (Figura 6.36) diferiu de sua vizinha Bt4, havendo vários momentos com secagem e transferência de umidade ascendentes, durante os períodos de drenagem, principalmente após os períodos mais úmidos.

O comportamento da Bt11 e o da BT12 (Figura 6.36) foi similar, ambos apresentando grande variabilidade das cargas totais ao longo o período estudado, principalmente nas profundidades mais superficiais (20 cm e 40 cm).

### **6.4.3 Período 1**

Será avaliada agora a variabilidade dos potenciais matriciais e cargas totais no solo durante a estação seca (inverno), em resposta a um sequência de chuvas de magnitudes de 37mm; 5,6mm; 2,8mm; 7,8mm; 3,6mm nos dias 25 a 29 de agosto, seguida de um período de estiagem, com precipitações de magnitude inferior a 2mm, exceto no dia 22 de setembro, quando choveu 3,7mm.

#### 6.4.3.1 Período 1 – potenciais matriciais

Observando-se os gráficos de variabilidade dos potenciais matriciais ao longo do período seco estudado (Figuras 6.37 a 6.40), constatou-se que a umidade gerada com as precipitações não foi suficiente para gerar a formação de poro-pressões positivas, o que implica que, durante toda esta recarga, o talude passou por um momento não saturado. Somente a estação Bt2 apresentou um tensiômetro com poro-pressão próxima à zero, no dia 30 de agosto, em resposta à última precipitação do sequência de chuva (na profundidade 20 cm, o que pode estar associado ao início do movimento de percolação e infiltração da frente de saturação no solo).

A umidade dos solos, entretanto, raramente apresentou valores inferiores à capacidade de campo, especialmente nas estações Bt3 e Bt7, onde todos os tensiômetros estiveram a maior parte do tempo com valores de sucção inferiores à 1/3 de atmosfera. Isto significa que o período avaliado é em sua maior parte caracterizado por uma drenagem por gravidade e geração de fluxos subsuperficiais não saturados.

Os maiores valores de sucções (locais mais secos) ao longo do período estudado foram encontrados de uma maneira geral nas profundidades 80 cm. Nas estações BT4, Bt5 e Bt8 os maiores valores de sucções foram encontrados na profundidade 40 cm, o que sugere a transferência de umidade para esta profundidade nestas baterias, o que deve estar relacionado aos valores de condutividade hidráulica saturada maiores para esta profundidade nestas estações.

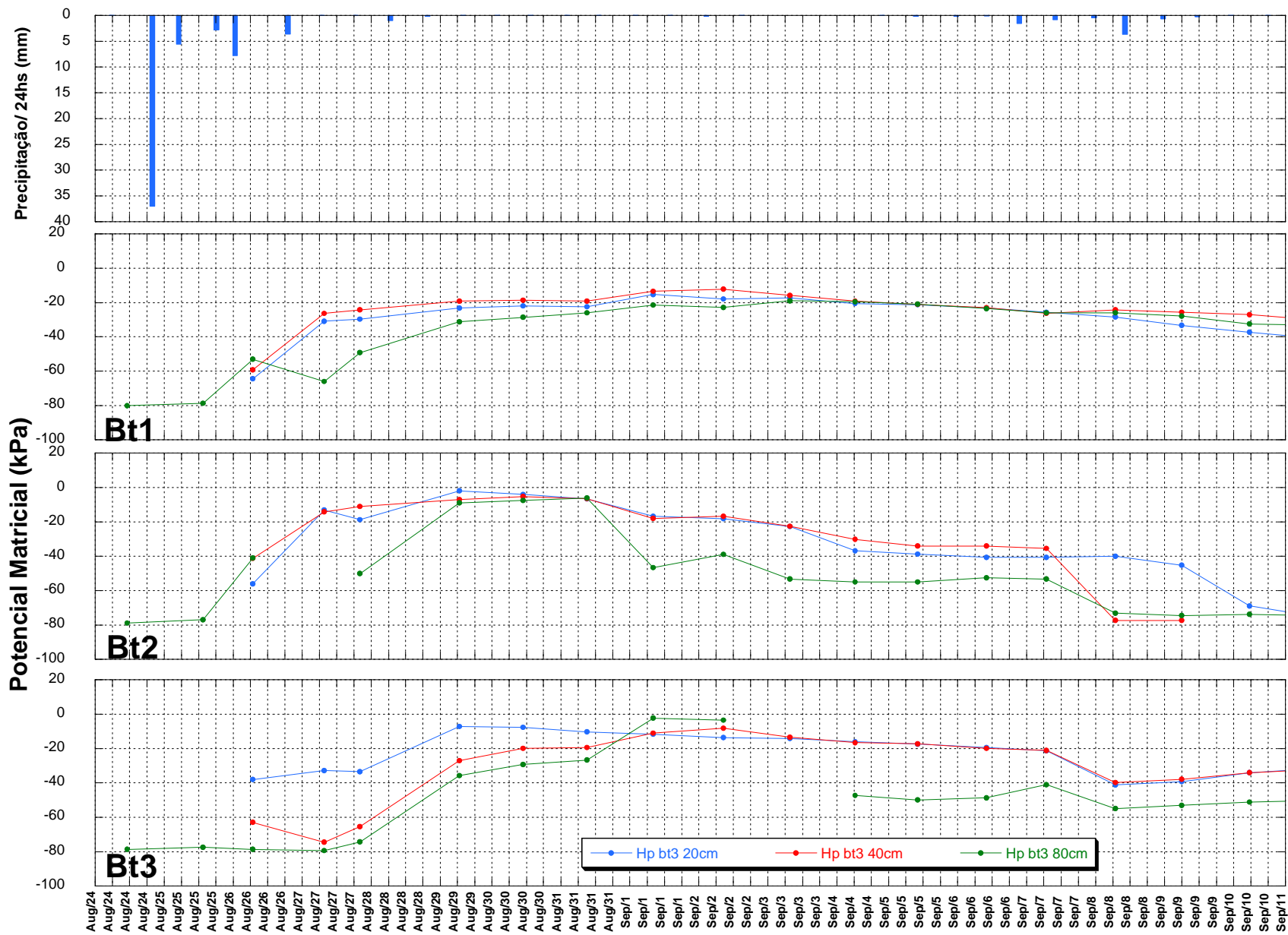


Figura 6.37. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt1, Bt2 e Bt3, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

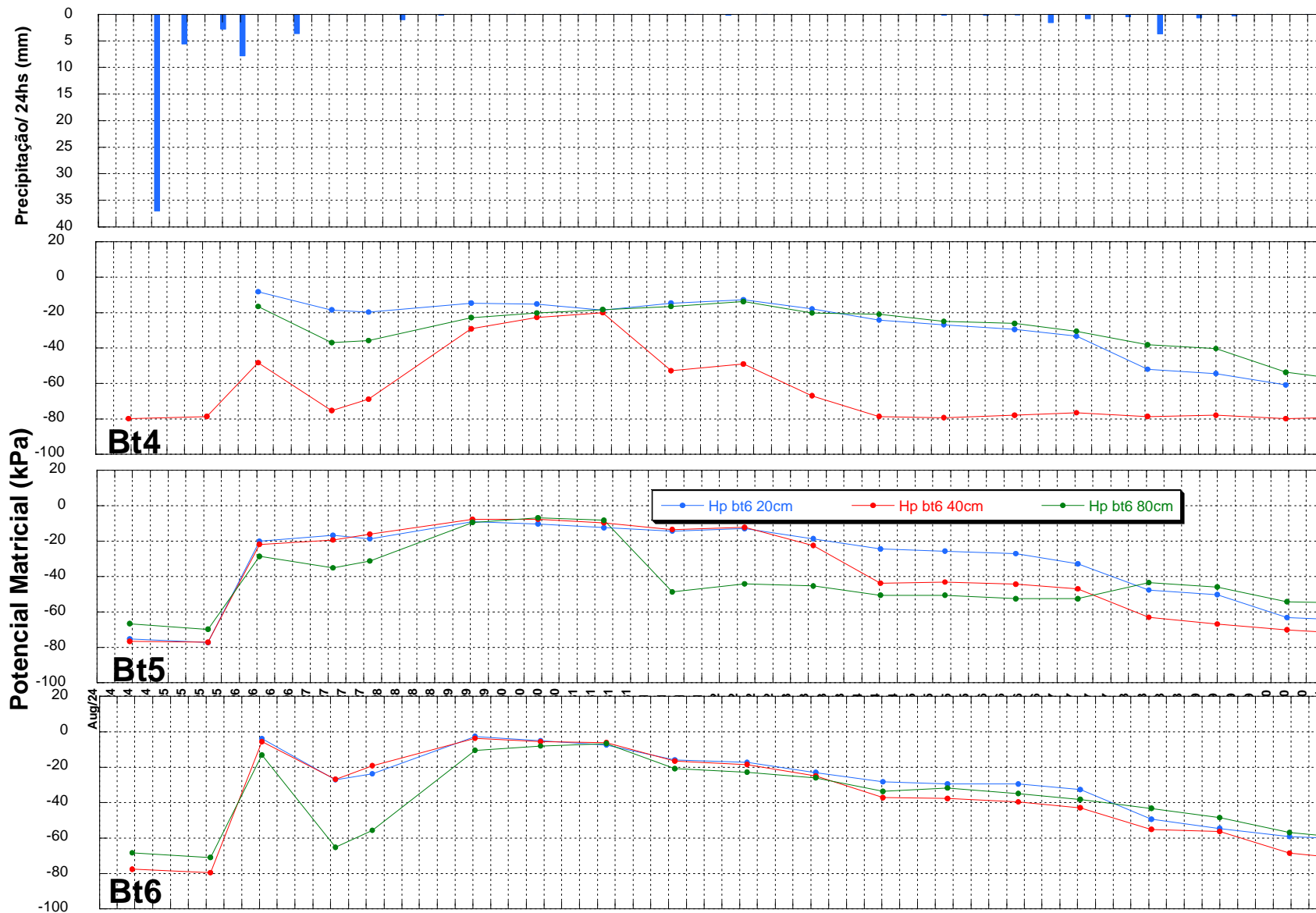


Figura 6.38. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

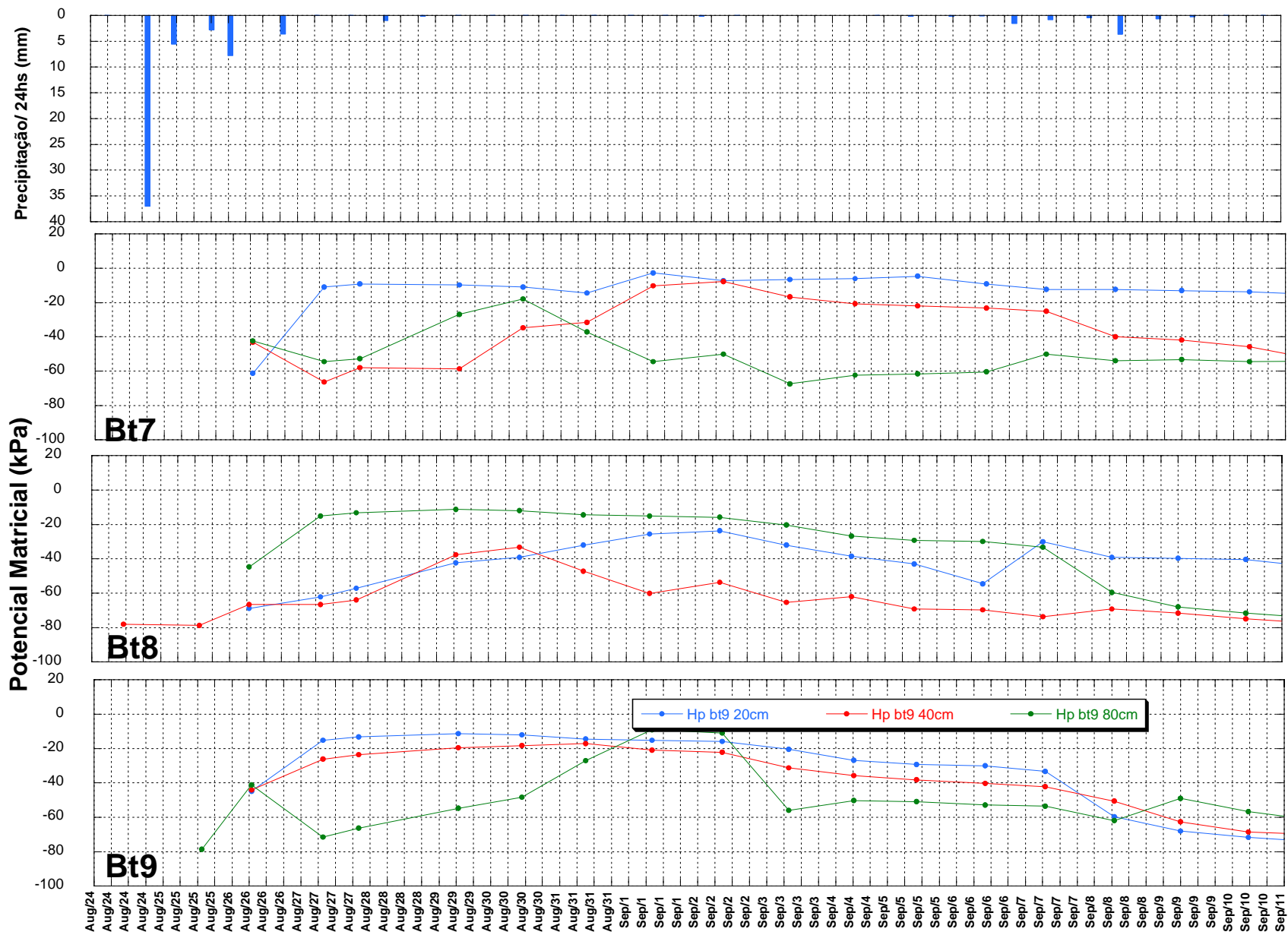


Figura 6.39. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

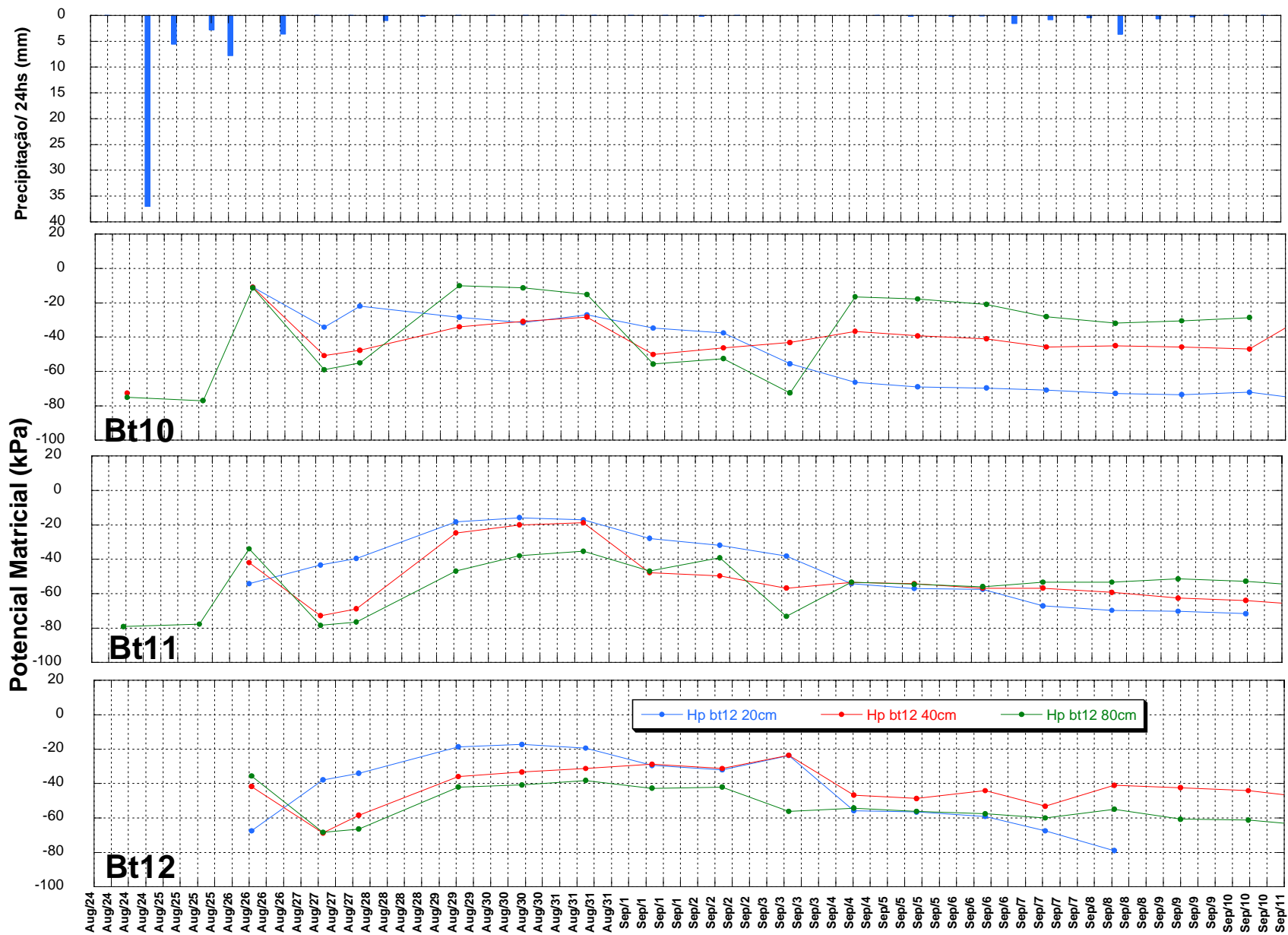


Figura 6.40. Variação do potencial matricial (kPa) e precipitação diária (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

#### 6.4.3.2 Período 1 – carga total

Na estação Bt1 (Figura 6.41) foram detectados momentos de transferência de umidade da profundidade 40 cm para a profundidade 20 cm. Este padrão foi encontrado geralmente em período seco ao final das estiagens.

Na estação BT2 (Figura 6.41) foi observado predomínio de drenagem descendente ao longo do período avaliado, tendo havido, somente na época que precedeu a primeira precipitação da série temporal (no dia 24 de agosto), transferência de umidade da profundidade 40 cm para 20 cm, provavelmente em função dos processos de evapotranspiração.

Na estação Bt3 (Figura 6.41) pôde ser detectado um predomínio de drenagem descendente em resposta as precipitações, podendo ser observada, porém três épocas com geração de fluxos direcionados para a profundidade 40 cm, que, no caso da precipitação do dia 2 de setembro, acabou por evoluir para um fluxo ascendente desde os 80 cm. Atenta-se para o fato de que estes fluxos ascendentes ocorreram com solo com umidade acima da capacidade de campo, isto é, caracterizam-se por uma drenagem rápida, e por isso deverão possuir alguma intensidade erosiva.

Na estação Bt4 (Figura 6.42) foi constatado um predomínio de fluxos descendentes em resposta aos eventos de chuva, havendo, entretanto momentos com fluxos dos 40 cm para ambas as profundidades, o que sugere que nesta profundidade a recarga já era maior em função das adjacências, e a água passa a ser transferida para outras profundidades a partir desta posição do talude.

Na estação Bt5 (Figura 6.42) foi constatado predomínio de fluxo descendente, havendo momentos de transferência de umidade para os 40 cm de ambas as profundidades nos momentos secos (assim como ocorrido na estação vizinha Bt4), principalmente a partir de 10 de setembro.

A estação Bt6 (Figura 6.42) apresentou predomínio transferência de umidade ascendente, a partir de 19 de setembro, com a estiagem mais prolongada. Nesta estação (Bt6), o período de maior pluviosidade foi acompanhado por fluxos descendentes de 20 cm para os 80 cm de profundidade, tendo ocorrido um momento de transferência de umidade de 80 cm e de 20 cm para os 40 cm de 8 a 13 de setembro, no começo do período de estiagem.



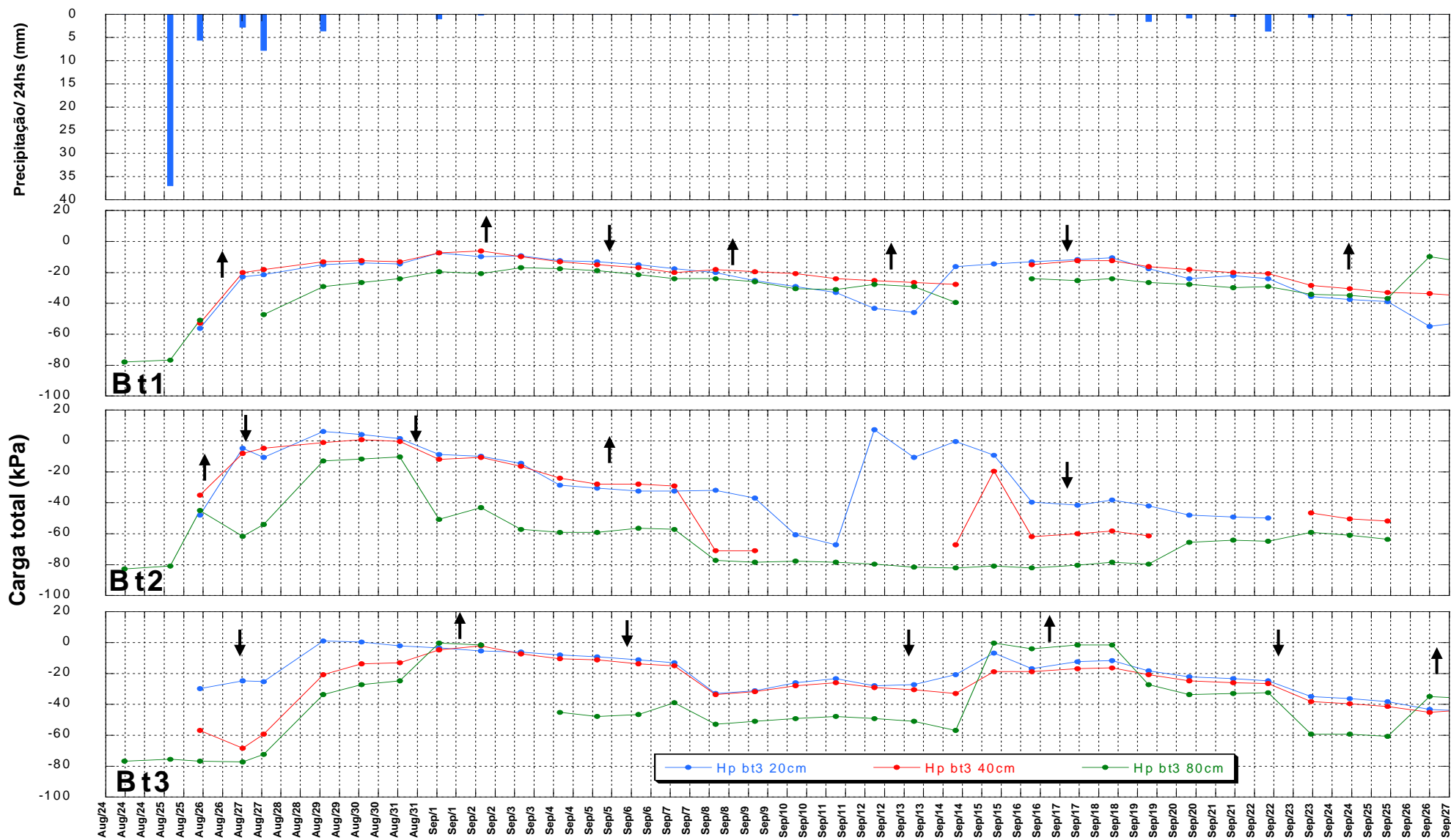


Figura 6.41. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt1, Bt2 e Bt3, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

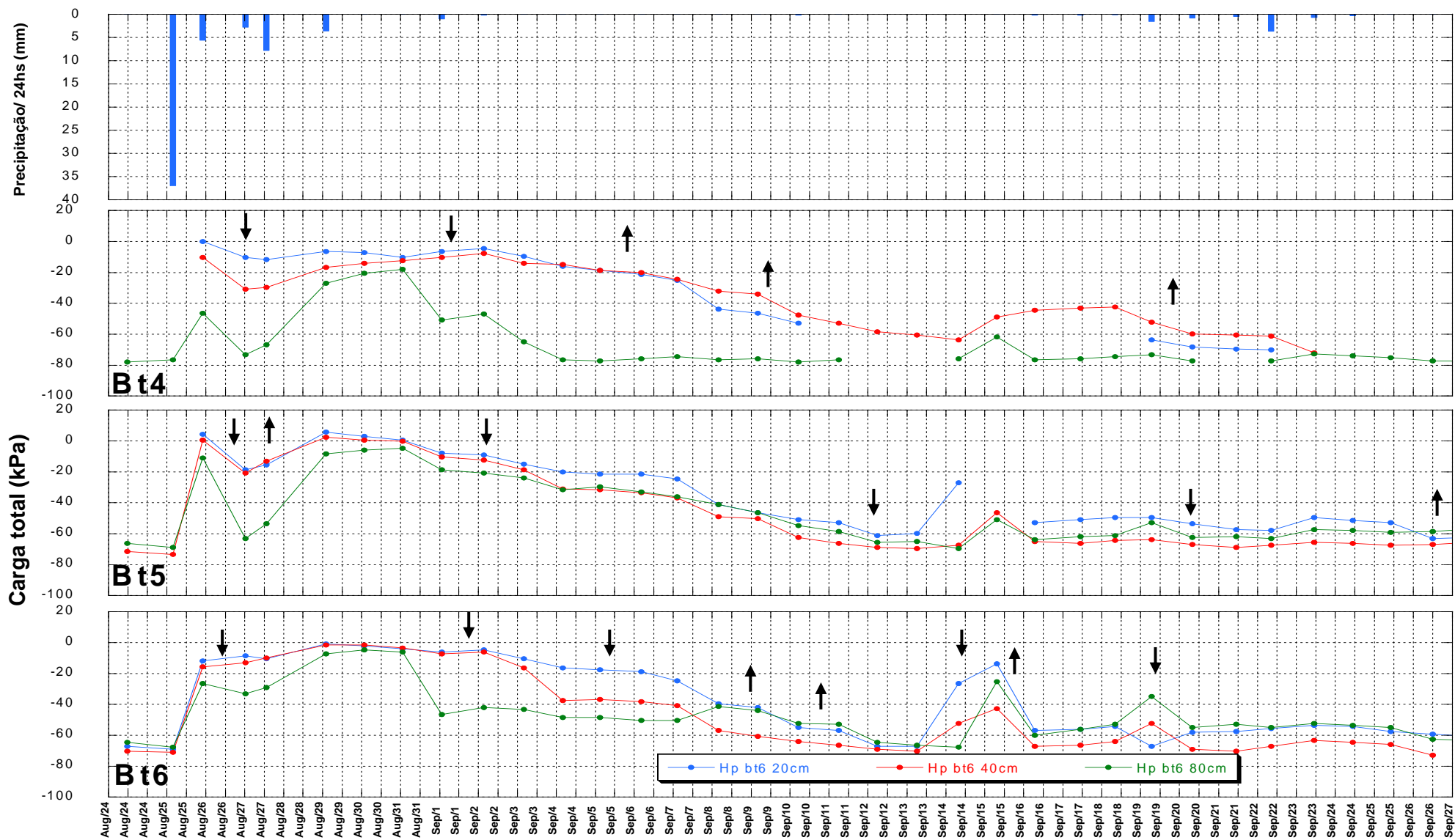


Figura 6.42. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

A estação Bt7 (Figura 6.43) apresentou, para o período avaliado, um predomínio de fluxos descendentes, o que revela que a intensidade e a umidade antecedente propiciada por esta época (estação seca) não foram capazes de gerar um processo de exfiltração. Foram também detectados dois momentos de fluxos convergentes para os 40 cm, durante período de estiagem a partir do dia 12 de setembro.

Na estação Bt8 (Figura 6.43) o comportamento foi semelhante ao da Bt2, havendo predomínio de fluxos descendentes, com a geração de um fluxo dos 40 cm para ambas as outras profundidades (80 cm e 20 cm) nos dias 7, 24 e 25 de setembro. No dia 23 de setembro ocorreu transferência de umidade ascendente de 80 cm para os 20 cm.

Na estação Bt9 (Figura 6.43) o padrão dos fluxos foi semelhante ao da Bt3, havendo um predomínio de fluxos ascendentes, e transferência de umidade ascendente nos dias 1, 9, 19 e 23 de setembro, todos em períodos de estiagem.

Na estação Bt10 (Figura 6.44) houve um predomínio de fluxos ascendentes no período estudado, o que constituiu um comportamento divergente das demais baterias. Somente as chuvas dos dias 25 de agosto e do dia 31 de agosto foram capazes de gerar a formação de fluxos descendentes. Este fato pode estar relacionado à reduzida umidade na estação, na maior parte do tempo abaixo da capacidade de campo, ou existência de uma reativação na feição erosiva entre esta bateria e a Bt11. No dias 29 e 31 de agosto e 14 de setembro foram detectados também fluxos convergindo para a profundidade 40 cm.

Na estação Bt11 (Figura 6.44) o comportamento foi de certa forma similar ao encontrado na Bt10. Houve um momento de fluxos ascendentes desde 8 a 13 de setembro, e no dia 26 de agosto, havendo também um dia com fluxos convergindo para a profundidade 40cm, no dia 2 de setembro. Nos demais dias a estação respondeu com fluxos descendentes em resposta as precipitações.

Na estação Bt12 (Figura 6.44) o comportamento das baterias de tensiômetros foi bastante definido neste período, havendo drenagem descendente em resposta as precipitações, seguido da geração de um fluxo proveniente da profundidade 40 cm durante o começo das estiagens.

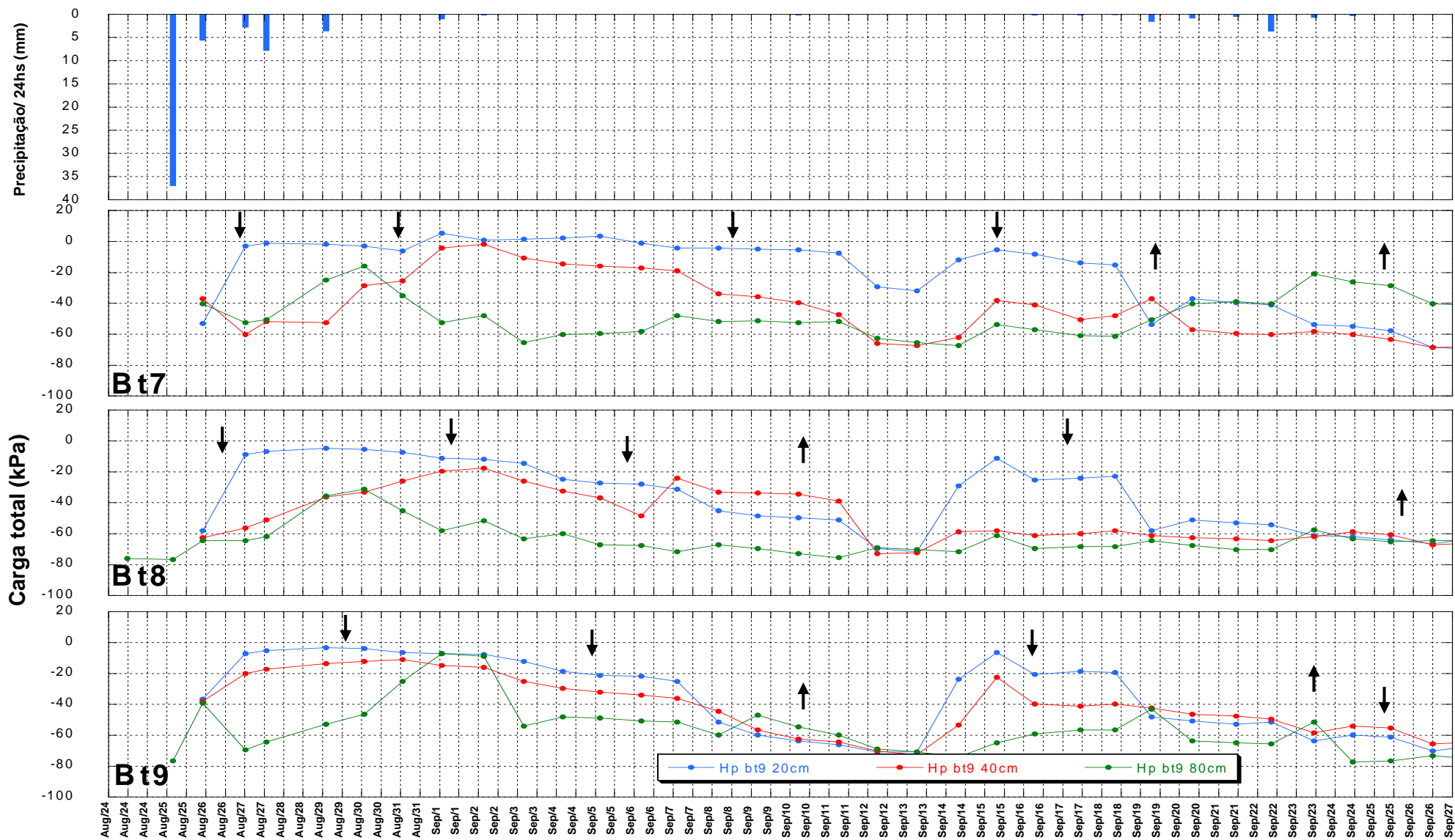


Figura 6.43. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

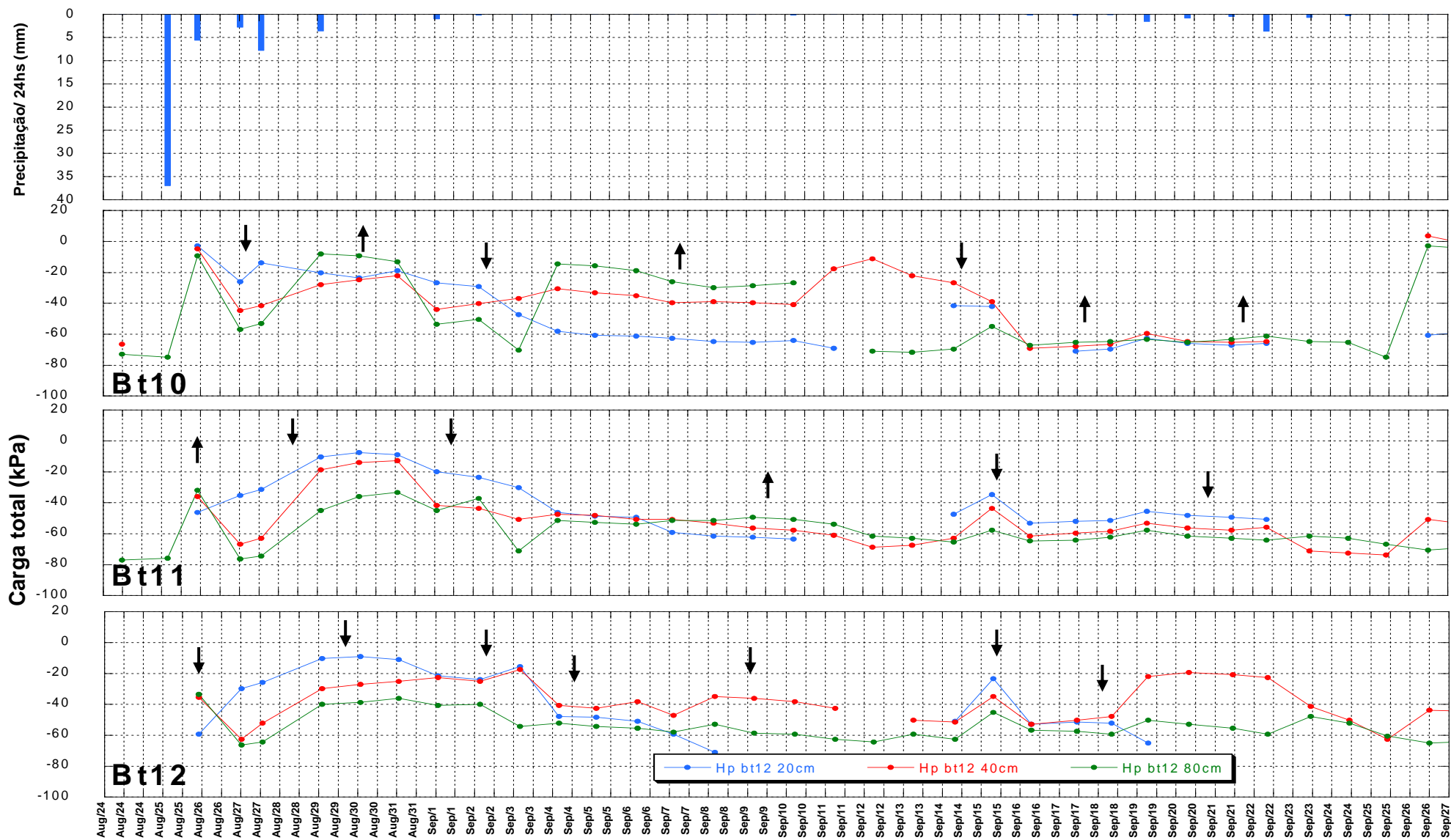


Figura 6.44. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 1, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

#### 6.4.4 Período 2

Será avaliada agora a variabilidade dos potenciais matriciais e cargas totais ao longo de um período na estação chuvosa (de 31 de dezembro de 2003 a 14 de fevereiro de 2004) (Figuras de 6.45 e 6.52). Este período pode ser dividido em três fases de recarga e drenagem. A primeira fase corresponde a sequência de chuvas dos dias 1, 2, 3 e 4 de janeiro de 2004 (magnitudes de 0,4mm; 40,5mm; 12,7mm e 9,6mm), seguido de drenagem até o dia 10 de janeiro de 2004. A segunda fase se refere à sequência de chuvas dos dias 10, 13 e 16 de janeiro de 2004 (magnitudes 44,9mm; 43,6mm; 37,3mm), seguido do período de drenagem que vai do dia 17 de janeiro ao dia 5 de fevereiro. A terceira fase corresponde a sequência de chuvas dos dias 5, 6 e 7 de fevereiro (magnitudes de 0,9mm; 65,5mm e 7,1mm, respectivamente). A separação em fases foi feita de modo a ser detectada a influência da magnitude das precipitações, bem como as condições de umidade antecedentes encontradas após diferentes seqüências de chuvas. Na primeira fase observa-se uma única precipitação de classe IV, acompanhada de precipitações de magnitudes inferiores em dois consecutivos. Esta fase constitui o momento de recarga de menor magnitude.

Na segunda fase constitui o período de maior acúmulo de chuvas em termos de magnitude no período avaliado. O objetivo de se estudar esta fase foi avaliar a hidrologia local após uma seqüência de chuvas de magnitude alta seguida de um longo período de estiagem, constituindo o período de maior umidade antecedente.

A terceira fase corresponde ao período onde se insere a precipitação de maior magnitude em todo o período avaliado (65,5mm). A mesma é seguida e precedida de precipitações de magnitude muito baixa, sendo o objetivo do foco nesta fase a observação do comportamento hidrológico das estações tensiométricas após uma grande recarga proveniente de um único dia de chuvas.



Figura 6.45. Variação dos potenciais matriciais (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt1, Bt2 e Bt3, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

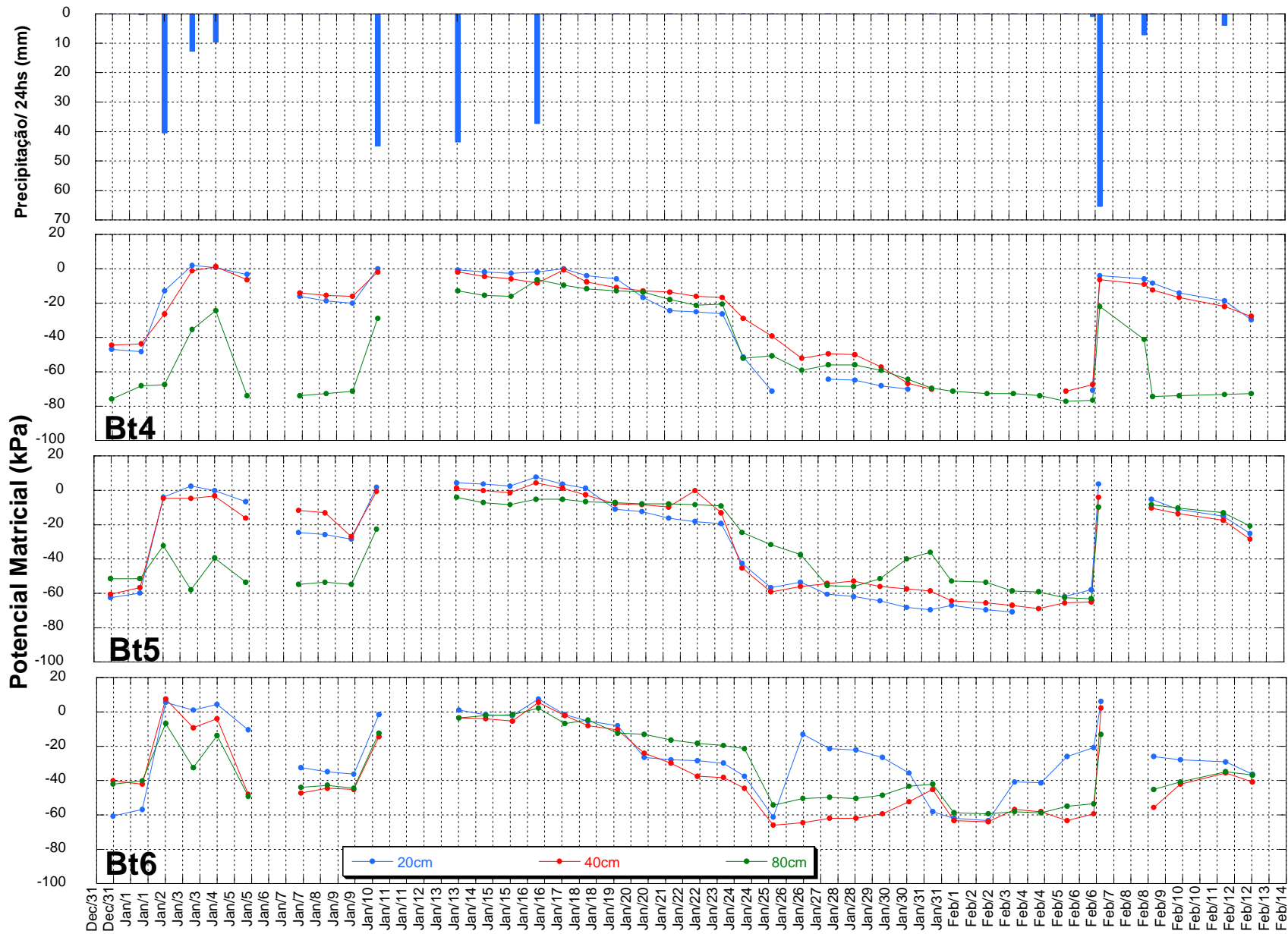


Figura 6.46. Variação dos potenciais matriciais (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.



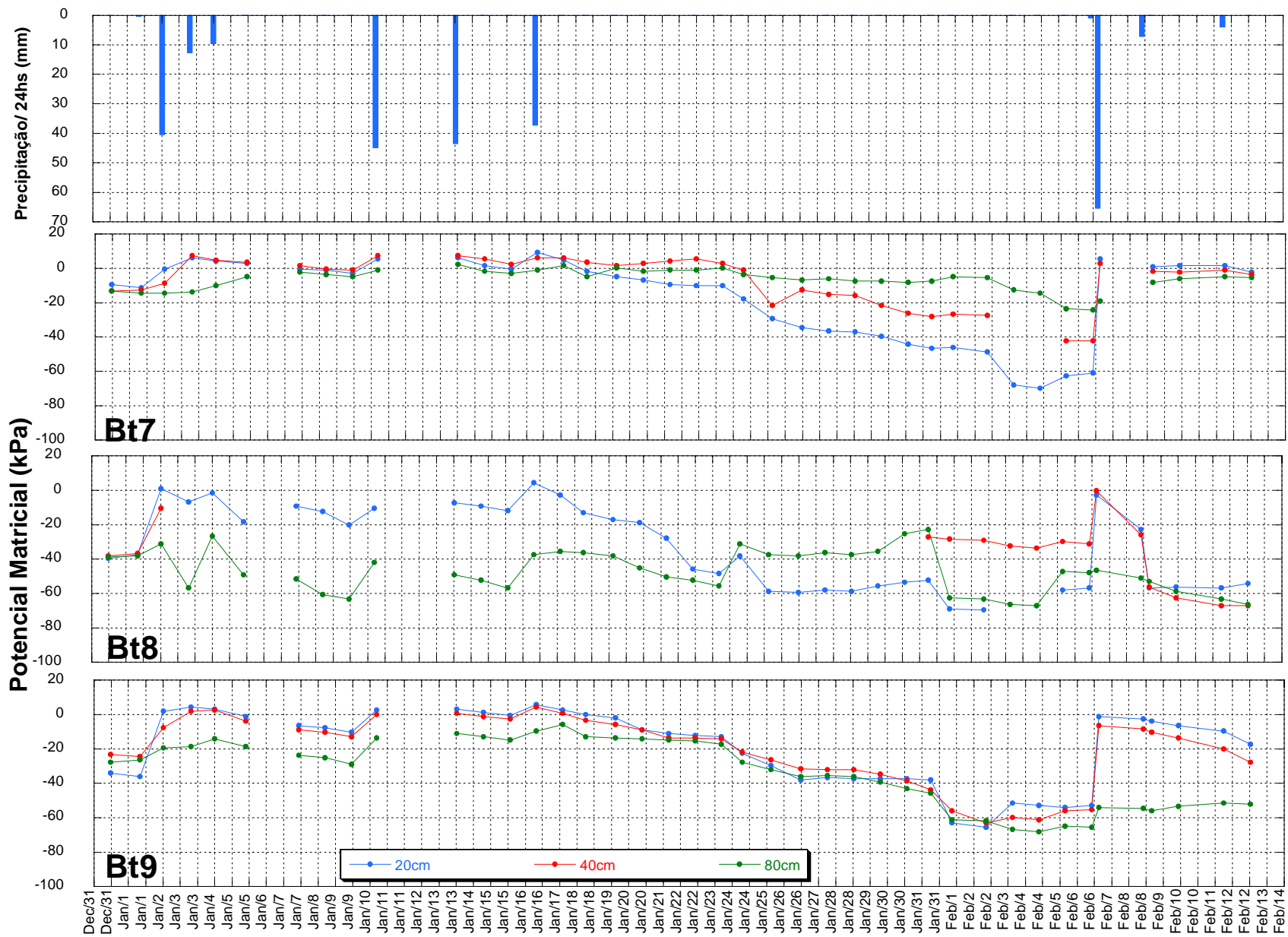


Figura 6.47. Variação dos potenciais matriciais (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.



Figura 6.48. Variação dos potenciais matriciais (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

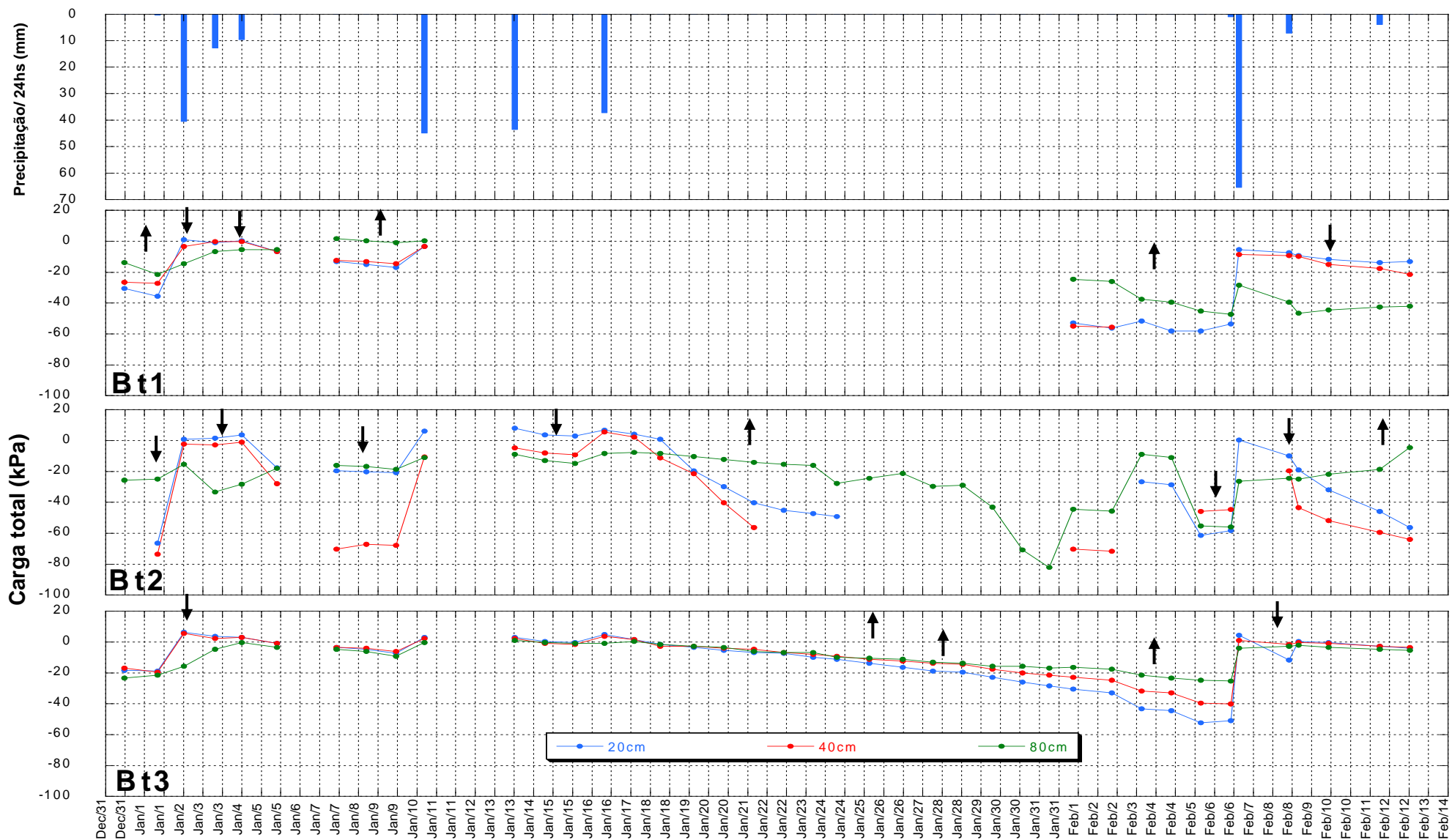


Figura 6.49. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

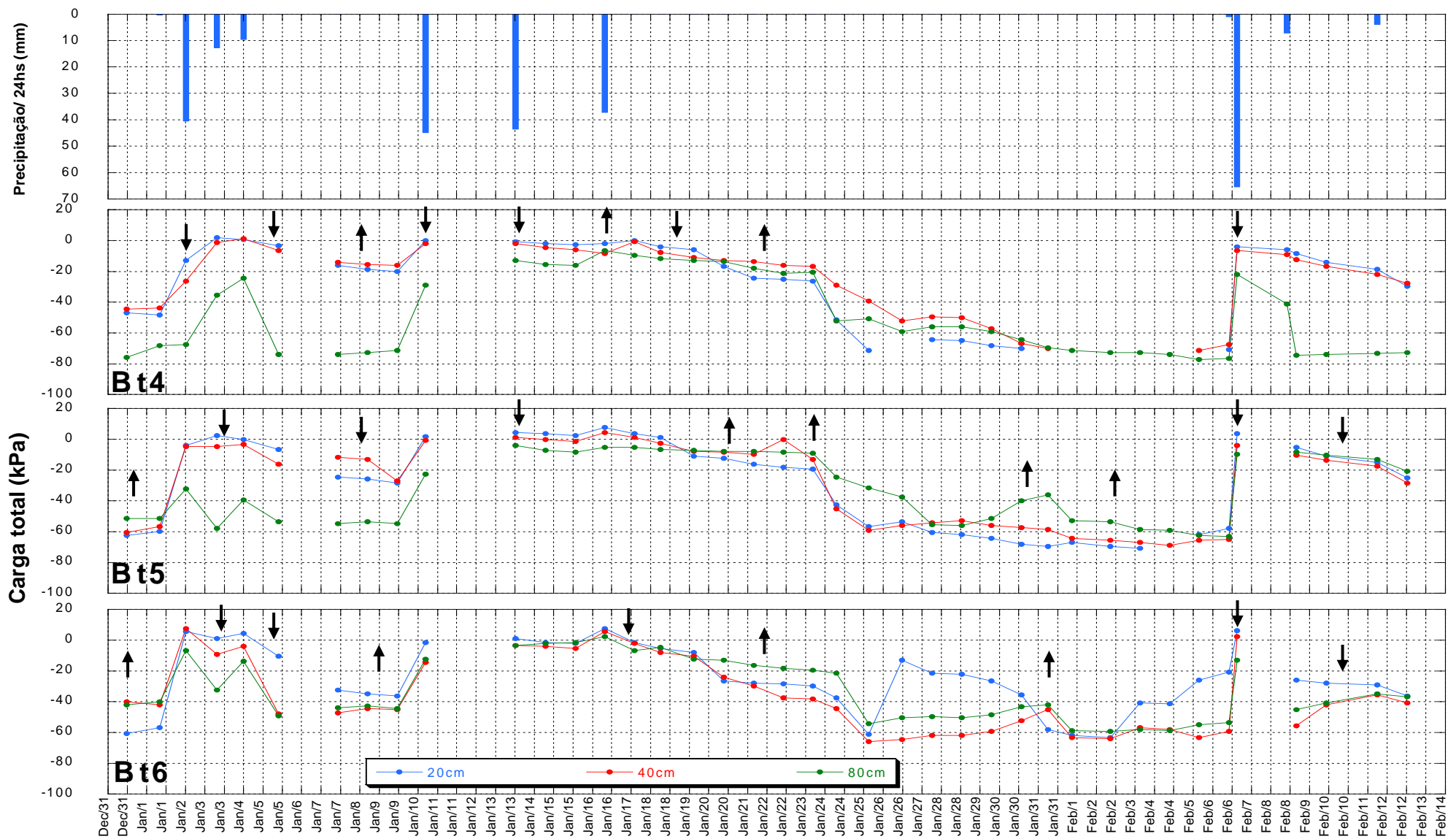


Figura 6.50. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt4, Bt5 e Bt6, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

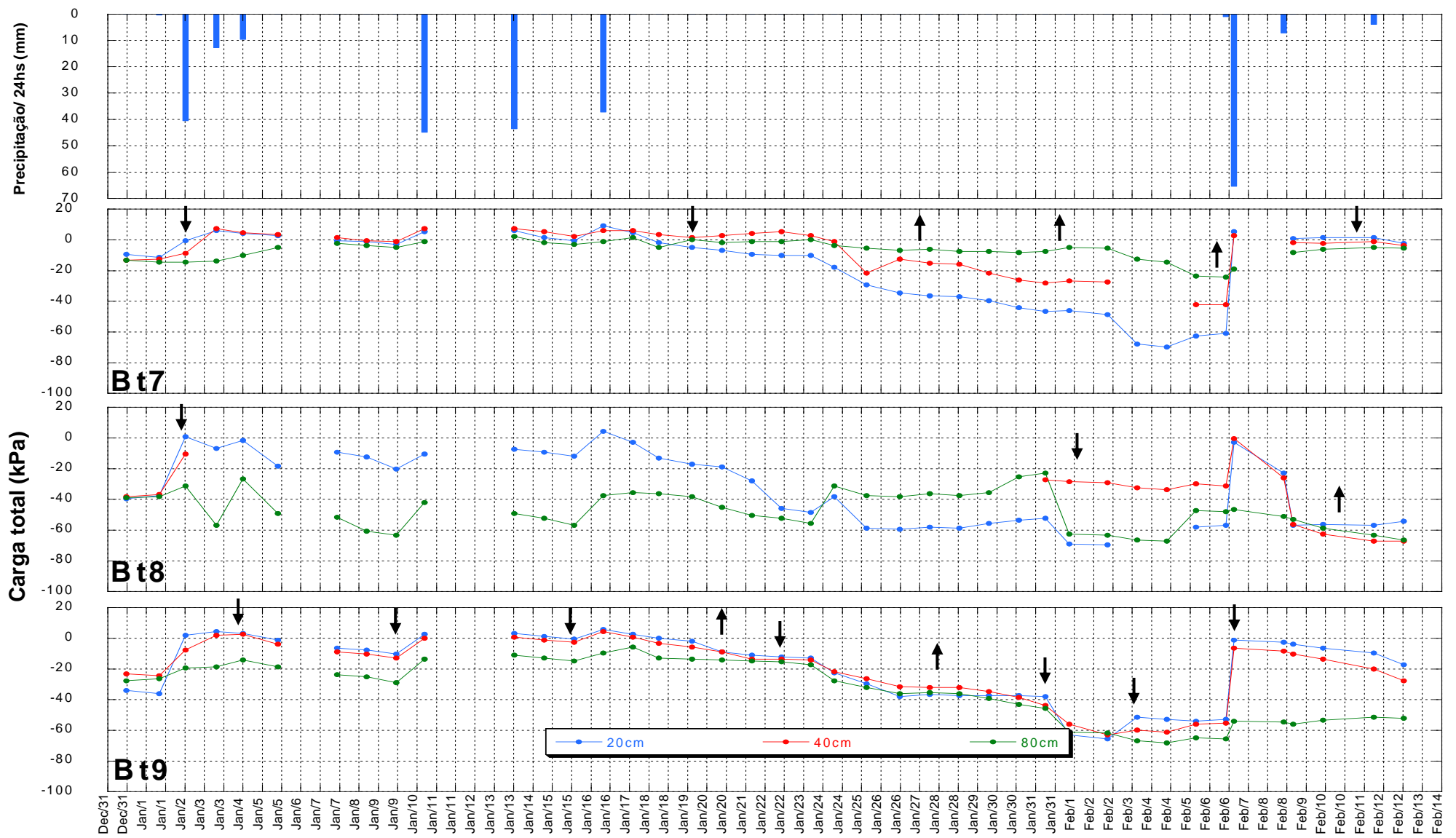


Figura 6.51. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt7, Bt8 e Bt9, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

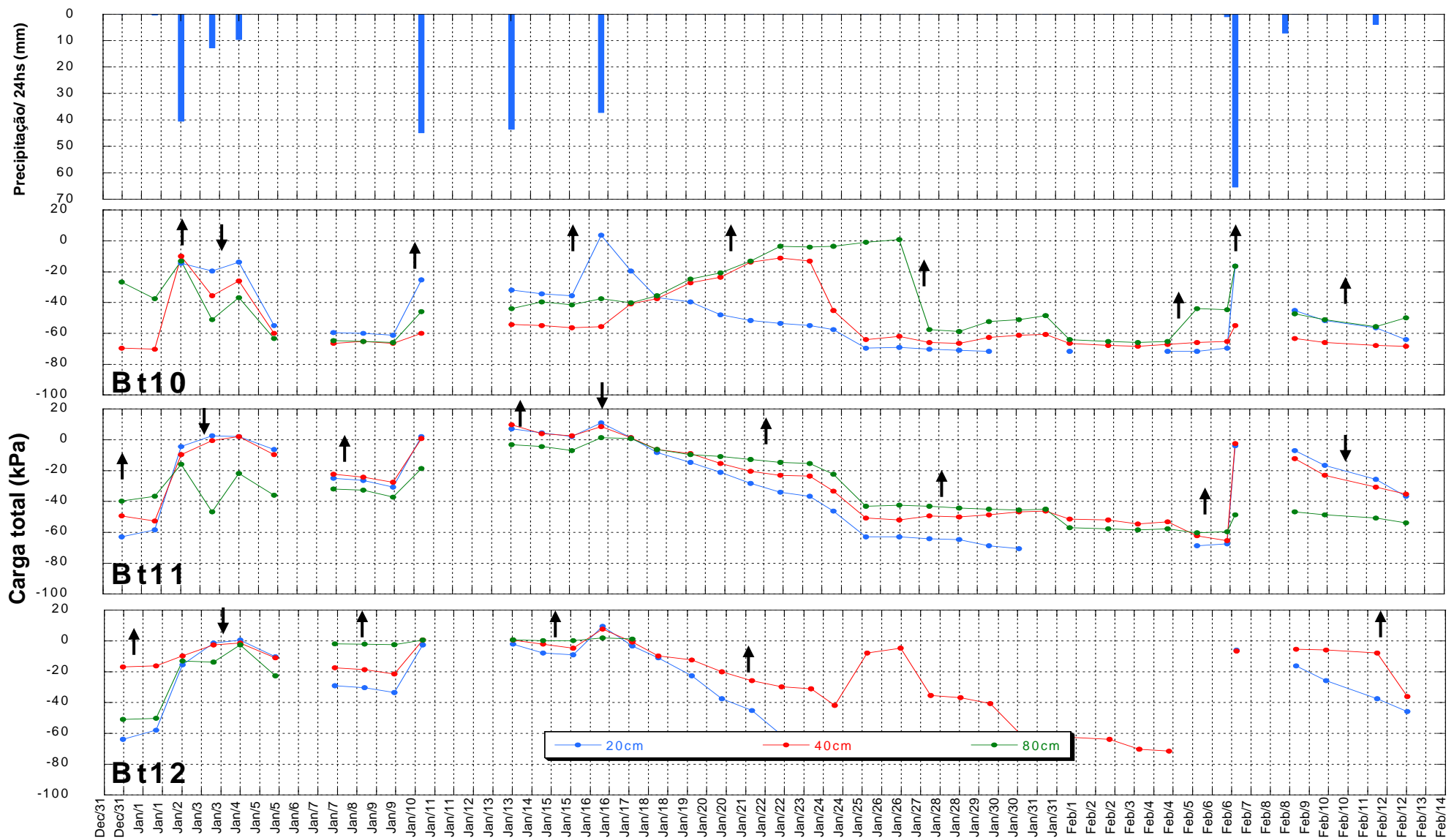


Figura 6.52. Variação da carga total (kPa) e eventos pluviométricos (mm/24hs) ao longo do período 2, nas estações Bt10, Bt11 e Bt12, para as profundidades de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

#### 6.4.4.1 Período 2 – potenciais matriciais

Observando-se os gráficos de variabilidade dos potenciais matriciais ao longo do período seco estudado (Figuras 6.45 a 6.48), constatou-se que a frente de umidade gerada com a chegada das precipitações foi suficiente para gerar poro-pressões positivas, essencialmente após a segunda sequência de chuvas. As estações Bt7 e Bt12 foram as que apresentaram a maior frequência de desenvolvimento de poro-pressões positivas (constituindo os locais de maior umidade). Os valores de sucção no solo raramente excederam  $1/3$  de atmosfera durante a maior parte dos períodos de drenagem em todas as estações, especialmente na Bt3 e Bt7, onde este quadro só ocorreu após a longa estiagem da segunda recarga avaliada. Nas demais estações ocorreu grande variabilidade dos potenciais matriciais dentro das mesmas estações, o que dificulta este tipo de interpretação, mas aponta para uma menor velocidade dos fluxos de uma maneira geral, especialmente nas estações Bt8 e Bt10.

Na estação Bt7 (Figura 6.47) foram constatadas poro-pressões positivas em todas as profundidades avaliadas após a segunda sequência de chuvas, e somente nas profundidades 20 cm e 40 cm no primeiro e na terceira sequência de chuvas.

Na estação Bt12 (Figura 6.47) a segunda sequência de chuvas também gerou o desenvolvimento de poro-pressões positivas em todas as profundidades avaliadas, tendo gerado somente na profundidade de 80 cm após a primeira sequência de chuvas, no período de estiagem.

A estação Bt11 (Figura 6.47) apresentou um comportamento bastante similar ao encontrado para a estação Bt12, porém não houve saturação até os 80 cm de profundidade para a segunda sequência de chuvas.

As baterias Bt1, Bt3, Bt4, Bt8 e Bt10 apresentaram somente alguns valores de poro-pressões positivos (sendo encontrada uma umidade menor em termos gerais), nos 20 cm e nos 40 cm para todas as estações exceto a BT10, onde se desenvolveram poro-pressões positivas aos 80 cm de profundidade.

De fato a estação Bt10 apresentou de uma maneira geral elevada umidade ao longo de todos os períodos avaliados, podendo constituir um dos locais de escoamento dos fluxos subsuperficiais.

Nas estações Bt1, Bt3, Bt7 e Bt11 os maiores valores de sucções foram encontrados nas profundidades de 20 cm, o que está relacionado ao secamento superficial do solo pela ação do sol. Nas baterias Bt2 e Bt6 os maiores valores de sucções (menor umidade) foram encontrados nas profundidades de 40 cm, e nas estações Bt4 e Bt9 foram encontrados para a profundidade de 80 cm.

#### 6.4.4.2 Período 2 – carga total

Ao longo deste período de avaliação (Figuras 6.49 a 6.52) foram detectados momentos de transferência de umidade ascendente nas estações Bt1, Bt3, Bt5, Bt6, Bt7, Bt10, Bt11 e Bt12. Só não foi detectada a presença de fluxos ascendentes nas estações Bt2, Bt4, Bt8 e Bt9.

O desenvolvimento de fluxos ascendentes ocorreu principalmente nas estações Bt7, Bt10 e Bt11. A estação Bt7 está posicionada ao final do anfiteatro, na baixa encosta, e recebe os fluxos provenientes das demais baterias. A existência de fluxos ascendentes nesta bateria está relacionada à transferência das águas das estações vizinhas, gerando um fluxo subsuperficial que pode acarretar na formação de frentes de exfiltração e erosão por *pipping*, o que poderá reativar a feição erosiva.

As estações Bt10 e Bt11 (Figura 6.52), ambas próximas ao local onde está havendo queda de material (uma reativação da feição erosiva em pequena escala), apresentaram vários momentos de transferência de umidade (Figura 6.50). Este aumento da umidade pode ser conseqüência do arranjo do talude.

O comportamento ao longo das diferentes baterias de tensiômetros seguiu um padrão similar. Na estação Bt1 (Figura 6.49) a primeira recarga foi seguida de fluxo descendente, e, quando iniciou a drenagem, os fluxos tornaram-se ascendentes (a partir do dia 7 de janeiro). Na segunda fase o padrão foi semelhante, sendo que a drenagem culminou com fluxos ascendentes. No terceiro momento de recarga as baterias já responderam com fluxos descendentes por um período mais prolongado, não sendo detectados fluxos ascendentes. O que se observa na verdade é que durante a recarga (quando chove) os solos se tornam mais úmidos e ocorre a drenagem por gravidade, que é substituída por transferência ascendente de umidade após as estiagens, normalmente em função de processos evapotranspirativos e do distanciamento das águas da recarga, que fazem com que os valores de sucção excedam a capacidade de campo dos solos.



Na estação Bt2 (Figura 6.49) o comportamento das cargas totais após todas as recargas foi semelhante. Formaram-se fluxos descendentes durante a recarga, havendo durante os picos das estiagens fases com fluxos convergindo para os 40 cm.

Na estação BT3 (Figura 6.49) o comportamento diferiu em relação às diferentes fases de recarga. Após a primeira recarga foram gerados fluxos somente descendentes, e após a segunda sequência de chuvas a estação apresentou quase os mesmos valores de cargas totais nas diferentes profundidades avaliadas. Ao final do longo período de estiagem que se seguiu, a partir do dia 25 de janeiro, começou a ocorrer transferência de umidade ascendente, voltaram a se formar fluxos descendentes após a última recarga.

Na estação Bt4 (Figura 6.50) predominaram fluxos descendentes em todas as fases de recarga e drenagem. No primeiro período de estiagem foi constatado fluxo dos 40 cm para os 20 cm, após a segunda recarga foram constatados fluxos convergindo para os 40 cm, e, ao final da estiagem, fluxos dos 40 cm para as demais profundidades. Após a última recarga a estação apresentou fluxos descendentes.

Na estação BT5 (Figura 6.50) foram constatados alguns momentos de fluxos ascendentes ao longo deste período. Após a primeira recarga as baterias responderam com fluxos descendentes seguidos de, durante a estiagem, transferência de umidade dos 40 cm para as demais profundidades. Após a segunda recarga predominou o fluxo descendente, seguido de transferência de umidade dos 40 cm para as demais profundidades, e, ao final da estiagem, a partir do dia 24 de janeiro, formaram-se fluxos ascendentes. Após a terceira recarga as baterias responderam com fluxos descendentes, havendo também uma fase posterior com convergência de fluxos para os 40 cm, a partir do dia 12 de fevereiro.

Na estação Bt6 (Figura 6.50) as respostas foram similares para a primeira e a terceira fase de recarga, havendo um momento com fluxos descendentes seguidos convergência de fluxos para os 40 cm. Durante a segunda fase de recarga o comportamento da estação tensiométrica diferiu, com transferência de umidade ascendente, dos 80 cm para os 40 cm, 4 dias após o sequência de chuvas (no dia 20 de janeiro). Atenta-se para o fato de que esta fase constituiu o momento de maior recarga acumulada, com valores totais de magnitude de 125,8mm, sendo assim a importância da umidade antecedente no comportamento desta bateria foi maior em relação às demais até agora avaliadas.

Na estação Bt7 (Figura 6.51) o comportamento dos tensiômetros diferiu em função das diferentes fases de recarga avaliadas. A primeira fase a drenagem culminou com a formação de fluxos dos 40 cm para as demais profundidades. Na segunda recarga as baterias responderam com transferência de umidade ascendente ao final da estiagem. Na terceira recarga os fluxos se mantiveram ascendentes.

Na estação Bt8 (Figura 6.51) os fluxos seguiram padrão semelhante ao encontrado na estação seca, havendo por vezes transferência de umidade ascendente, ao final da estiagem mais prolongada (dia 31 de janeiro, e também transferência de umidade dos 40 cm para as demais profundidades ao final da estiagem, bem como convergência de fluxos para os 40 cm ao começo da última estiagem).

Na estação Bt9 (Figura 6.51) o comportamento dos tensiômetros foi bastante homogêneo, sendo as variações similares em todas as profundidades. Houve predomínio de transferência de umidade ascendente ao longo de todo o período estudado, e somente alguns dias com transferência de umidade dos 40 cm para as demais profundidades nos dias 20 e 28 de janeiro.

Na estação Bt10 (Figura 6.52) o comportamento dos tensiômetros diferiu bastante das demais baterias até agora avaliadas. A primeira fase de recarga foi seguida de fluxos descendentes, no entanto a segunda sequência de chuvas (que possui uma magnitude total mais elevada) foi seguida de transferência de umidade ascendente até o final do período de estiagem. Após o último sequência de chuvas houve transferência de umidade para a profundidade 40 cm.

Na estação Bt11 (Figura 6.52) o comportamento foi similar ao encontrado na bateria 10, havendo transferência de umidade ascendente principalmente após a segunda sequência de chuvas. A primeira sequência de chuvas foi seguido de transferência de umidade dos 40 cm para as demais profundidades.

Na estação Bt12 (Figura 6.52) o comportamento foi bem diferenciado em relação a todas as baterias. Houve um predomínio de transferência de umidade ascendente em quase todo o período avaliado, tendo ocorrido fluxos descendentes somente após a primeira sequência de chuvas.

## **6.5 Avaliação das equipotenciais em planta**

De modo a gerar um maior detalhamento dos fluxos subsuperficiais ao longo da voçoroca, foram também geradas equipotenciais de carga total em planta para todo o período 2 de monitoramento (dias de 31 de dezembro de 2003 a 14 de fevereiro de 2004). O objetivo quando da geração das equipotenciais de carga total em planta foi avaliar a distribuição dos fluxos subsuperficiais em resposta aos episódios de recarga e de drenagem observados.

Posteriormente, com o objetivo de detectar variação na zona de saturação, caracterizando, se possível, o fenômeno da expansão e contração da zona de saturação, foram geradas equipotenciais de carga de pressão em planta para as diferentes profundidades avaliadas, durante o período de 9 de janeiro a 14 de fevereiro de 2004.

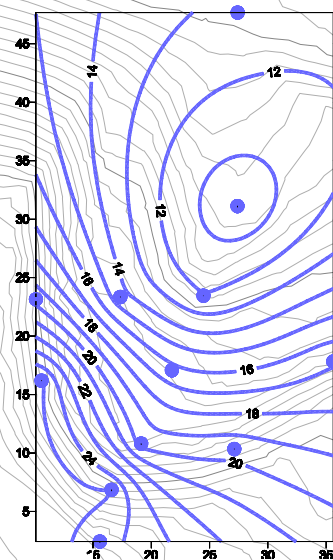
Durante este último período se incluem a segunda e a terceira fase de recarga do período 2 de avaliação (referente aos trens de chuvas dos dias 10, 13 e 16 de janeiro de 2004 (magnitudes 44,9mm; 43,6mm; 37,3mm) e dos dias 5,6 e 7 de fevereiro (magnitudes de 0,9mm; 65,5mm e 7,1mm, respectivamente). Para tal análise foram também geradas equipotenciais referentes às condições anteriores de umidade e também de drenagem e estiagem máximas.

### **6.5.1 Equipotenciais de carga total**

Durante a avaliação das equipotenciais de carga total (Figuras 6.53 a 6.58) pode ser detectada uma tendência de acumulação e concentração das águas das chuvas na estação Bt10, sendo que, de uma forma geral, há uma concentração da umidade quando da recarga na extremidade esquerda da voçoroca (incluem-se também as estações Bt11 e Bt12, próximas às zonas onde o processo erosivo ainda está ativo), o que, como veremos, poderá estar sendo condicionado pela presença de uma antiga canaleta de drenagem enterrada próximo à face oeste do talude de corte superior.

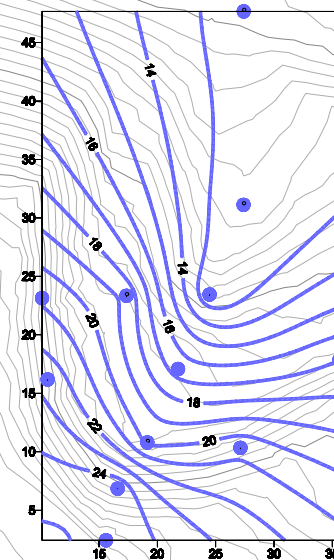
Agora será feita uma avaliação da seqüência de respostas hidrológicas da voçoroca a todas as fases de recarga e de drenagem avaliadas no período 2 de monitoramento.

A



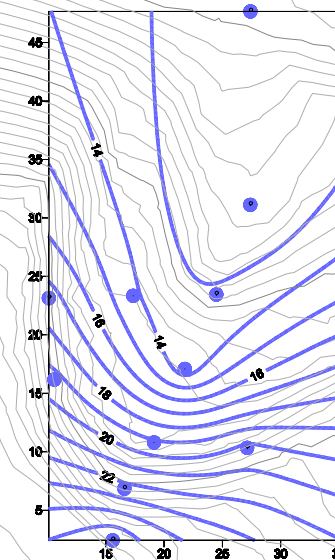
20cm

B



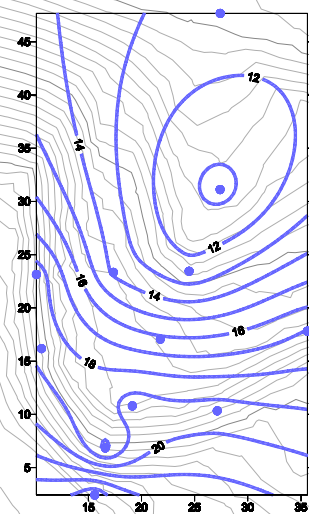
40cm

C



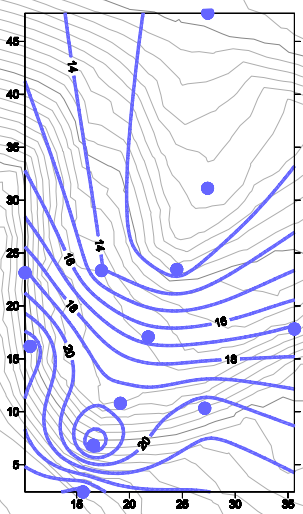
80cm

D



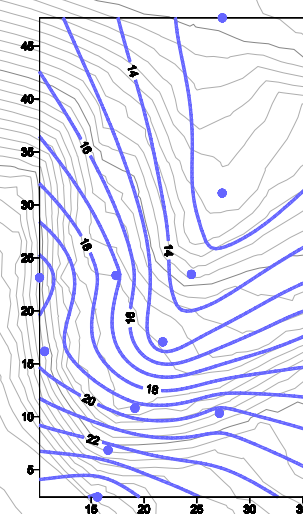
20cm

E



40cm

F



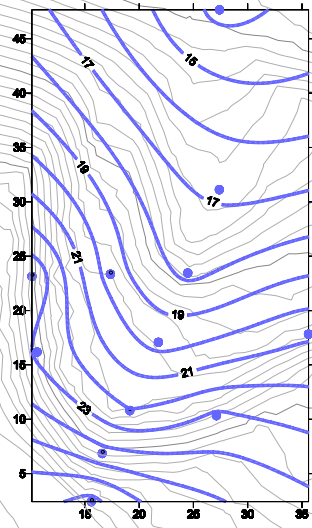
80cm

Figura 6.53 – Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 31/01/2003 (A, B e C) e 01/01/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm.

**Dia 02/01/2004**

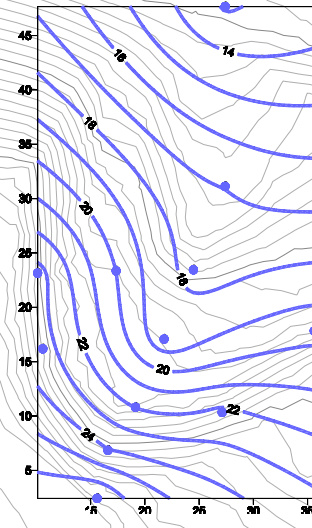
**Precipitação Total – 40.5mm/24hs**

**A**



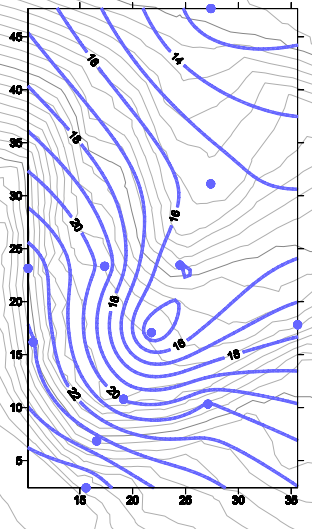
**20cm**

**B**



**40cm**

**C**

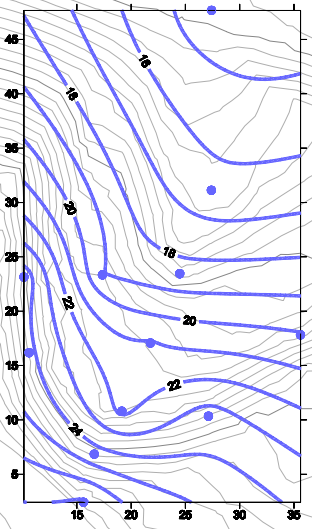


**80cm**

**Dia 03/01/2004**

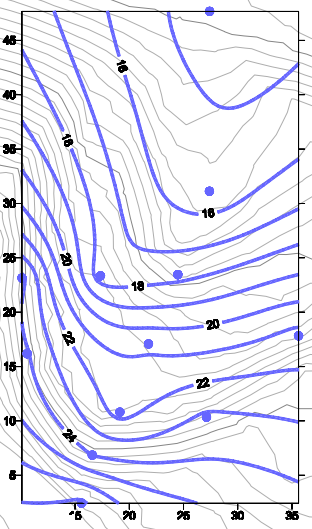
**Precipitação Total – 12.7mm/24hs**

**D**



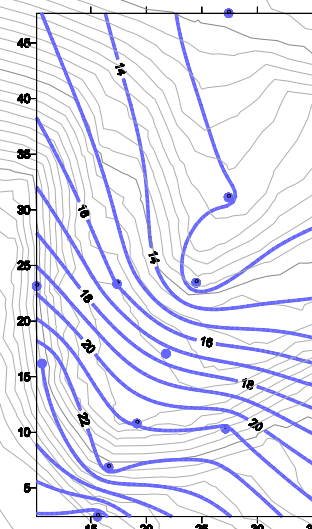
**20cm**

**E**



**40cm**

**F**



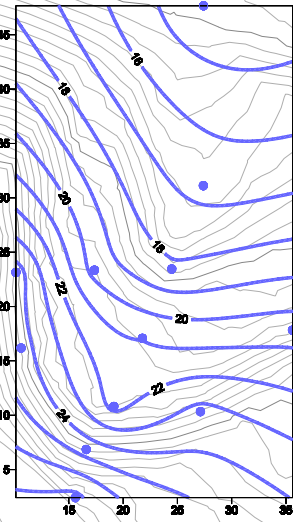
**80cm**

Figura 6.54– Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 02/01/2004 (A, B e C) e 03/01/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm.

**Dia 04/01/2004**

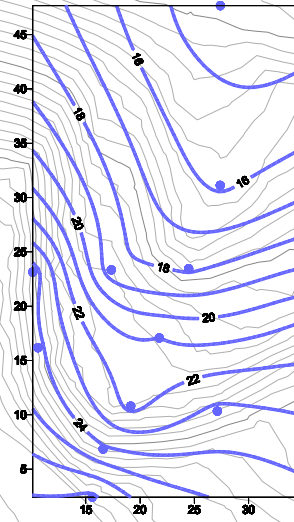
**Precipitação Total – 9.6mm/24hs**

**A**



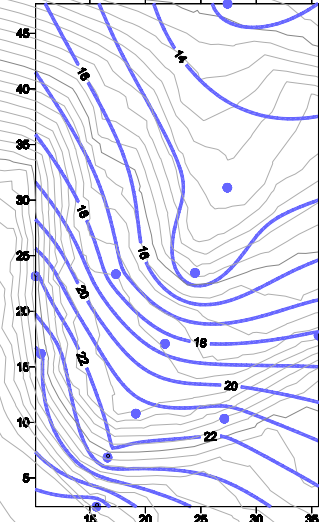
**20cm**

**B**



**40cm**

**C**

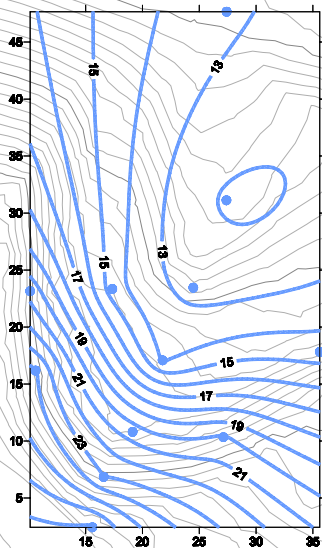


**80cm**

**Dia 09/01/2004**

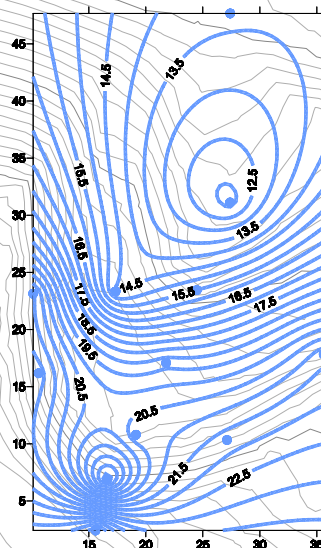
**Precipitação Total – 6mm/24hs**

**D**



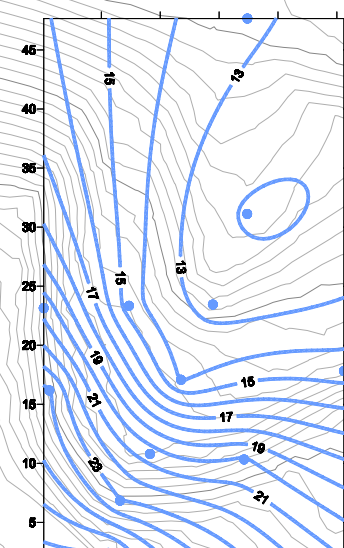
**20cm**

**E**



**40cm**

**F**

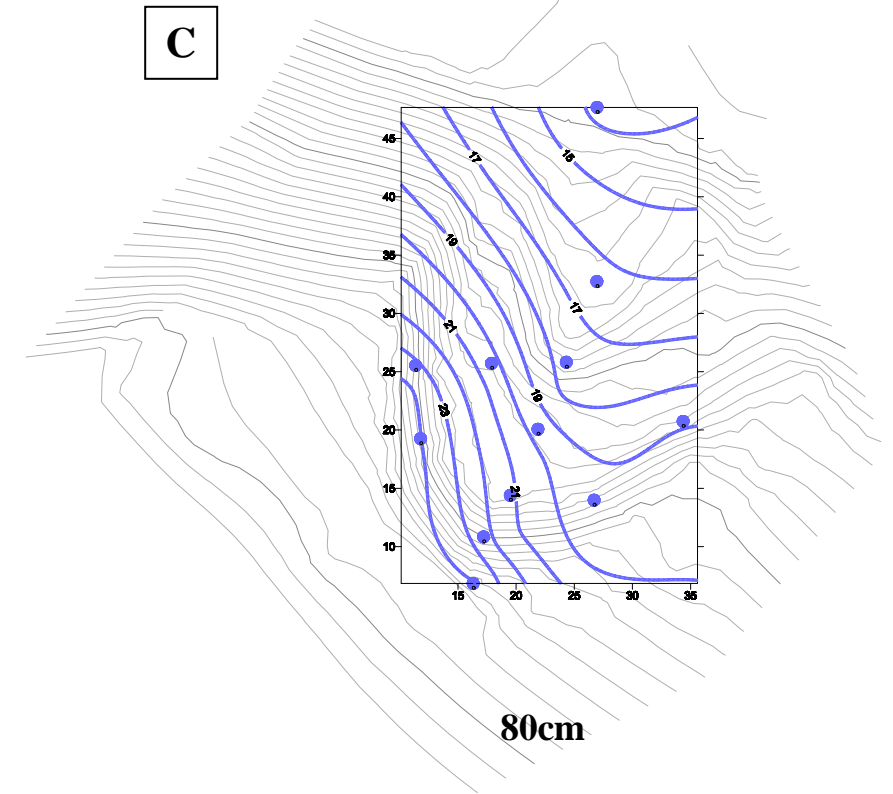
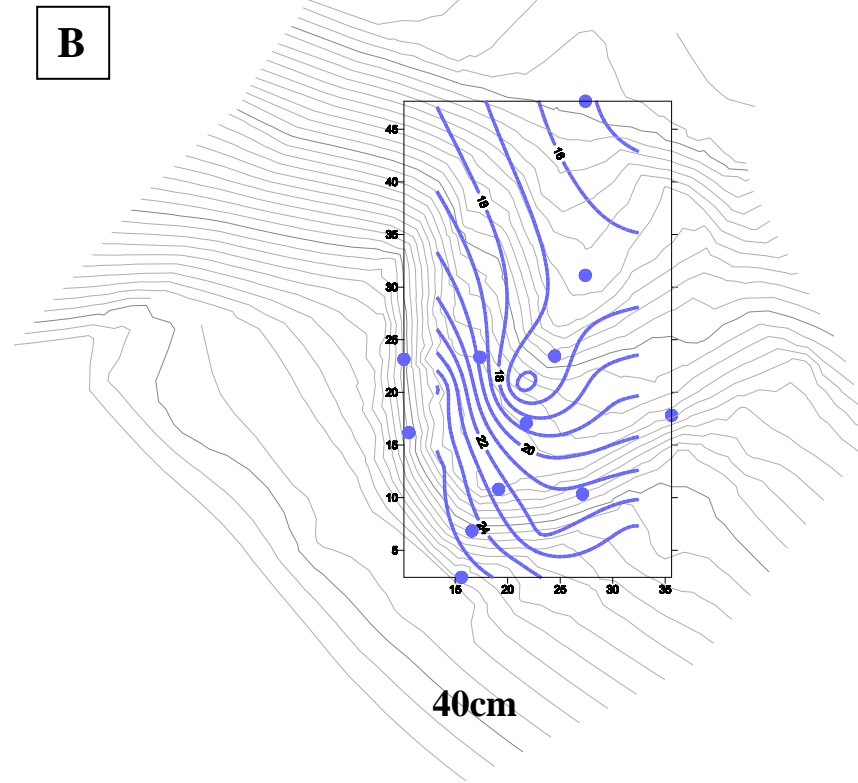
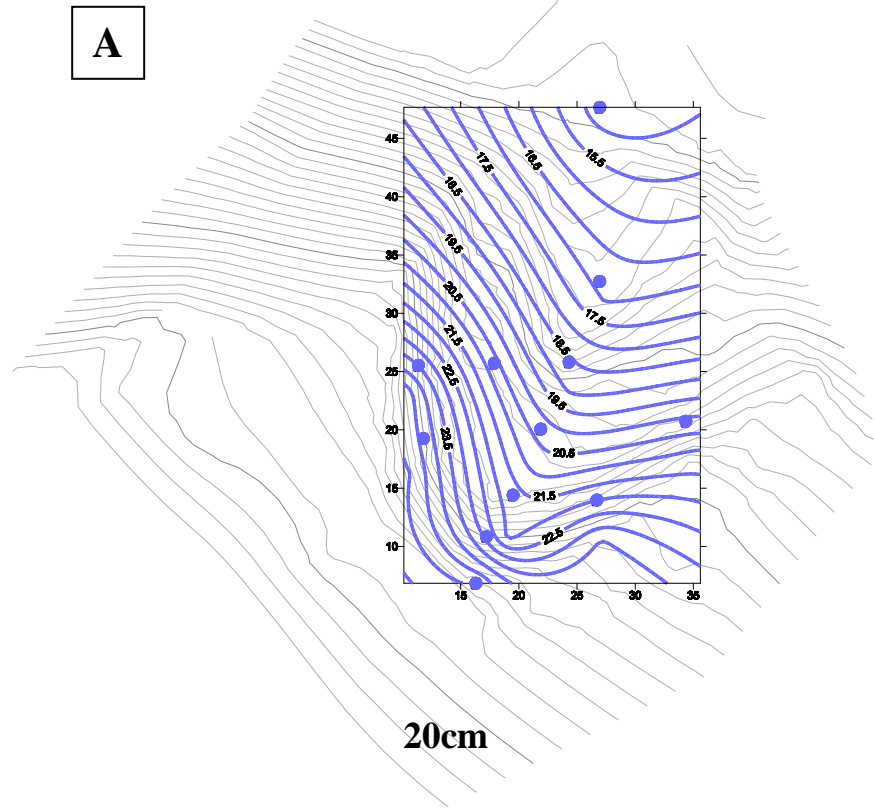


**80cm**

Figura 6.55 – Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 04/01/2004 (A, B e C) e 09/01/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm.

**Dia 16/01/2004**

**Precipitação Total – 37.5mm/24hs**



**Dia 17/01/2004**

**Precipitação Total – 0mm/24hs**

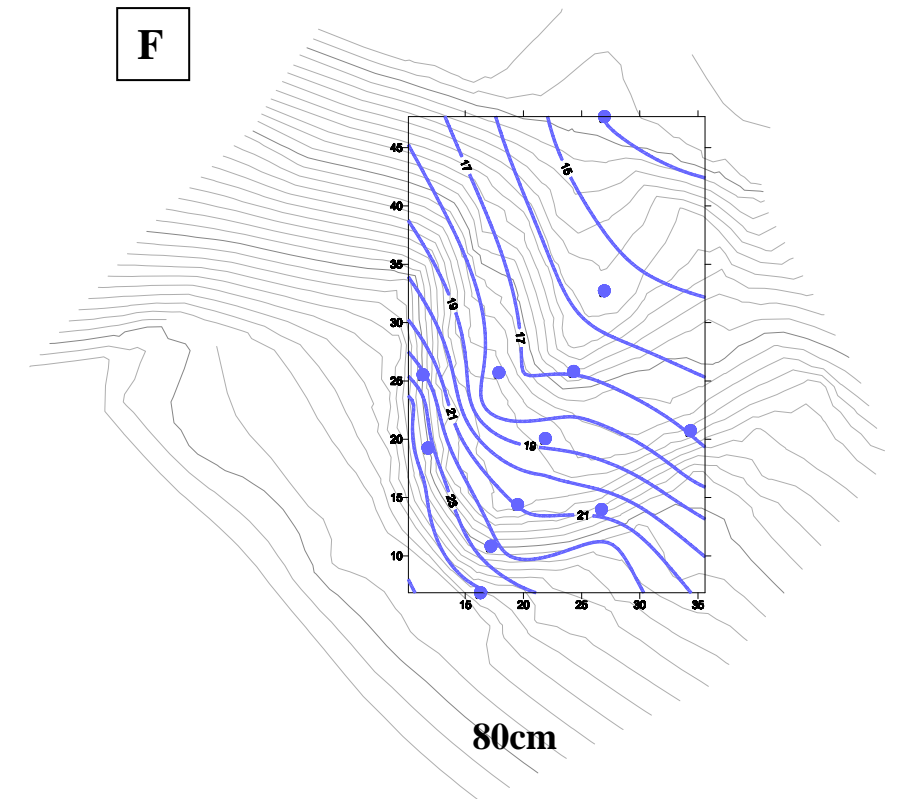
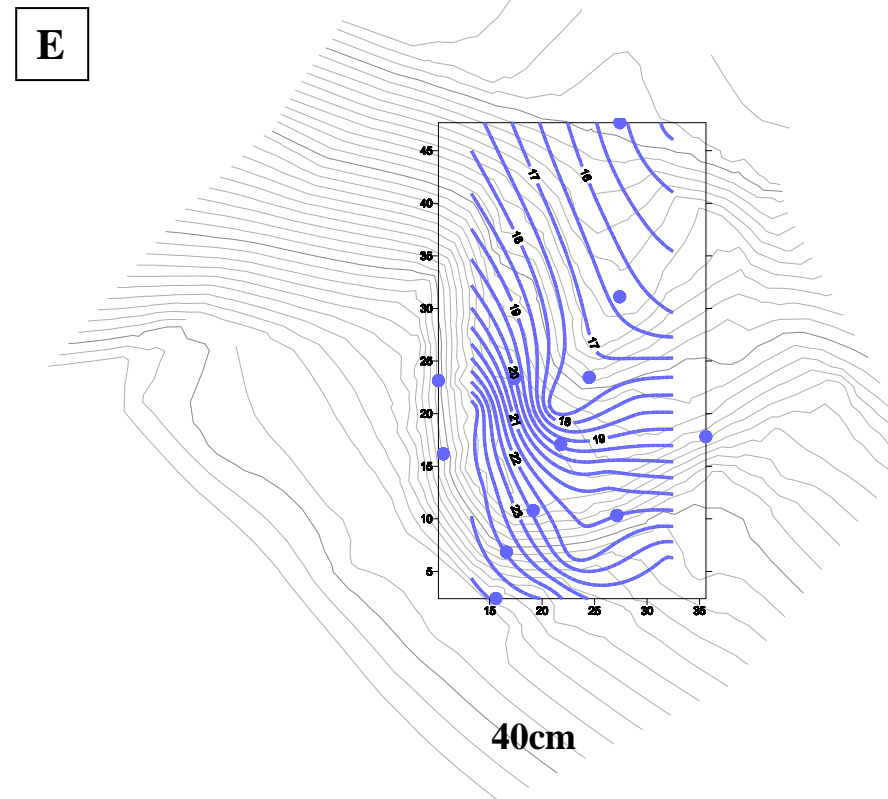
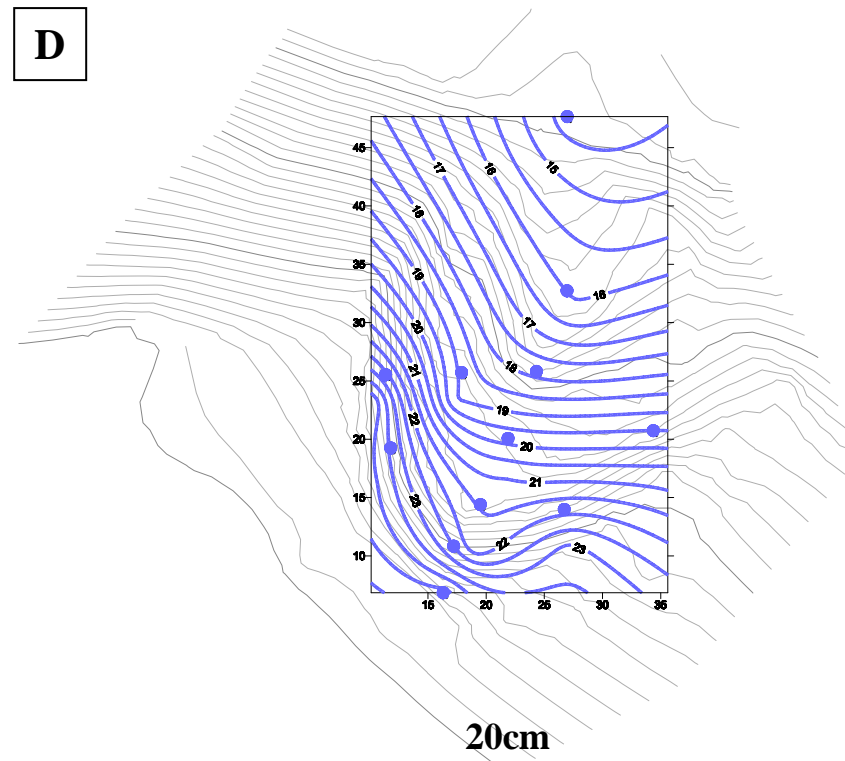
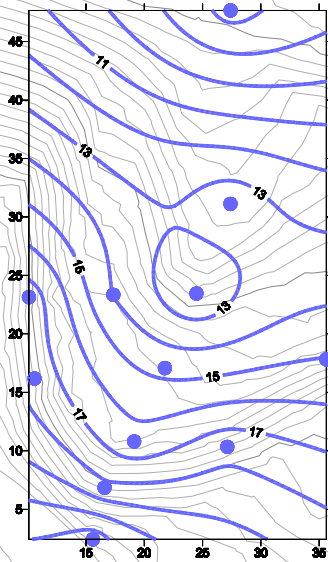


Figura 6.56 – Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 16/01/2004 (A, B e C) e 17/01/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm.

Dia 05/02/2004

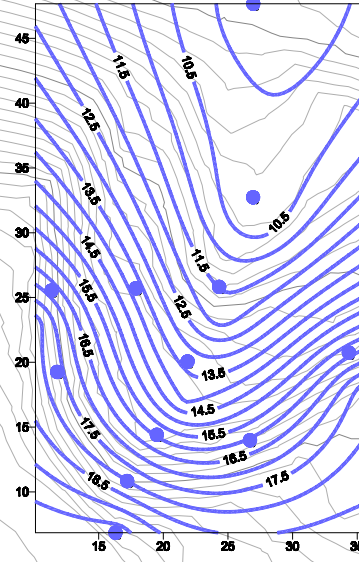
Precipitação Total – 0mm/24hs

A



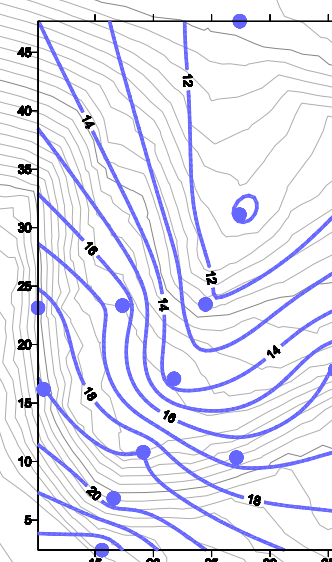
20cm

B



40cm

C

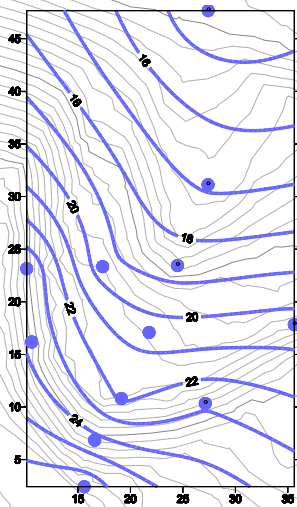


80cm

Dia 07/02/2004

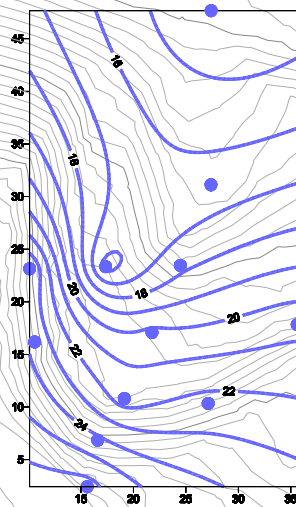
Precipitação Total – 65.5mm/24hs

D



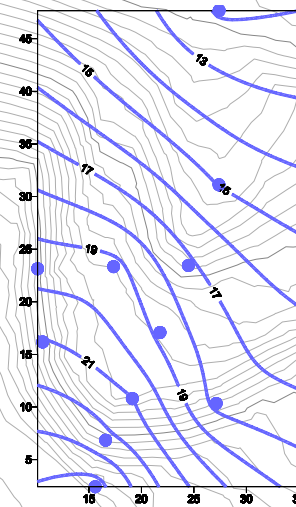
20cm

E



40cm

F



80cm

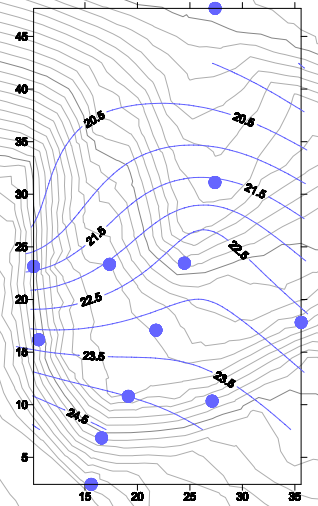
Figura 6.57 – Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 05/02/2004 (A, B e C) e 07/02/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm.



Dia 08/02/2004

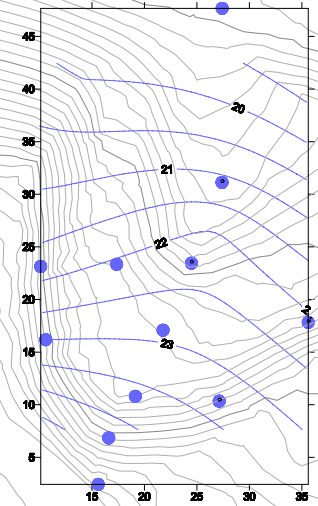
Precipitação Total – 7.1mm/24hs

A



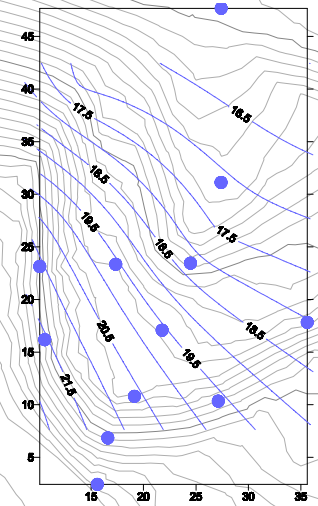
20cm

B



40cm

C

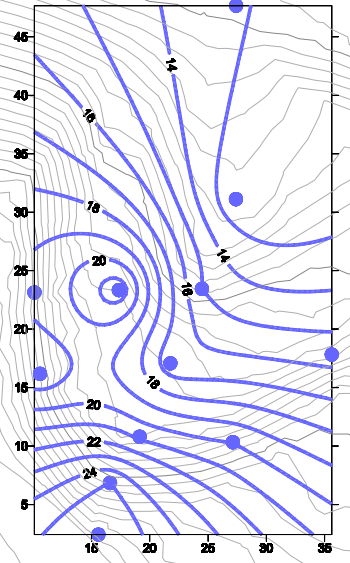


80cm

Dia 14/02/2004

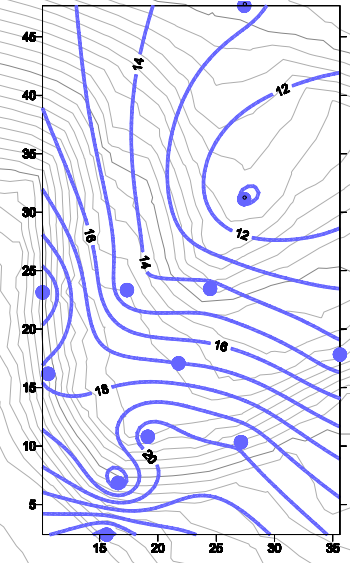
Precipitação Total – 0mm/24hs

D



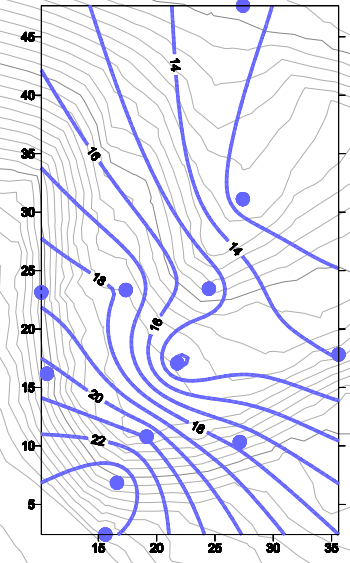
20cm

E



40cm

F



80cm

Figura 6.58 – Equipotenciais de carga total, em planta, dos dias 08/02/2004 (A, B e C) e 14/02/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm.

Observando-se o comportamento das equipotenciais durante a primeira fase de recarga (Figura 6.53), observa-se que a primeira chuva (de janeiro, magnitude de 0,4mm) não foi suficiente para alterar a distribuição geral das equipotenciais. Já no dia 2 de janeiro (Figura 6.54) a chuva provocou uma forte reorientação das equipotenciais, com os fluxos agora convergindo para o eixo da voçoroca, em todas as profundidades avaliadas. Atenta-se para o fato de que as cargas totais não aumentaram quando da continuidade da recarga, mantendo-se em torno de 12 a 24KPa. As únicas diminuições detectáveis foram nas proximidades das estações Bt2 e Bt3, nos 20 cm e 40 cm, respectivamente, o que está relacionado à drenagem do sistema após a chuva. As cargas nas estações Bt5 e Bt6, ambas nas profundidades 40 cm e 80 cm, aumentaram, o que sugere a recarga nestas posições. Com relação à geometria geral das equipotenciais, nota-se que a maior concentração das equipotenciais ocorreu aos 80 cm, na área que vai do talude de corte superior ao talude de aterro.

Após a terceira chuva do dia 3 de janeiro (Figura 6.54) (12,7mm) houve uma maior concentração dos fluxos na estação Bt3, nos 20 cm e 40 cm. Esta concentração é observada também em outros períodos, observando-se também uma tendência de grande recarga nesta estação, o que certamente está relacionado à posição na beira do talude de corte, recebendo os fluxos do mesmo. Nos 80 cm de profundidade, o comportamento das estações tensiométricas foi diferente, havendo um maior direcionamento dos fluxos para as estações Bt2 e Bt5. Após este evento, a chuva do dia seguinte, de 9,6mm (Figura 6.55) não produziu alterações significativas na orientação das equipotenciais, tendo sido detectado somente um aumento das cargas totais próximo às estações Bt5 e Bt6, o que ainda está relacionado ao processo de recarga, que foi incrementado também pela precipitação ocorrida no dia.

Ao final desta seqüência de chuvas foi avaliado o dia de estiagem máxima que constitui o dia 9 de janeiro (6.55). Neste dia a orientação das equipotenciais é totalmente diferente, não havendo mais a concentração dos fluxos no eixo da voçoroca. O que pode ser observado é justamente uma orientação das equipotenciais no sentido inverso, sendo observados os menores valores de cargas totais nas estações Bt10 (em todas as profundidades); Bt2 e Bt5 (nos 40 cm) e Bt4 (somente nos 80 cm).

O próximo período avaliado corresponde à segunda fase de recarga avaliada no tópico, anterior, cuja avaliação começa a partir da última chuva de um trem de três chuvas, o que constitui o período de maior umidade antecedente.

No dia 16 de janeiro (Figura 6.56) após a chuva de 37,5mm, foi observada uma orientação das equipotenciais semelhante à encontrada durante o dia 2 de janeiro, quando as equipotenciais apontaram para fluxos em direção ao eixo principal da voçoroca. Ocorre um aumento geral das cargas totais, que constitui o processo de saturação do talude, sendo que pode ser detectado neste dia um maior direcionamento das cargas totais na parte direita do talude, onde se inserem as estações Bt8 e Bt9.

No dia 17 de janeiro (Figura 6.56), logo após a chuva, já no período de drenagem, observa-se uma diminuição geral das cargas totais. Aos 80 cm não foi constatada nenhuma mudança, pois é uma profundidade mais elevada e as respostas são atrasadas.

O dia 5 de fevereiro (6.57), que constitui o final do período de drenagem, observa-se um direcionamento dos fluxos rumo à estação Bt5 nos 40 cm. Os fluxos estão relativamente orientados no eixo da voçoroca, principalmente aos 40 cm, onde foram constatadas cargas totais menores.

No dia 7 de fevereiro (6.57), dia onde a magnitude diária da precipitação foi a maior para o período avaliado, pôde ser constatada a convergência dos fluxos para o eixo da voçoroca, porém o direcionamento foi menos acentuado, sendo que a resposta a esta precipitação foi menos expressiva (menor alteração da configuração das equipotenciais) em relação à fase anterior de recarga já avaliada.

No dia seguinte, em resposta a um volume de chuvas de 7,1mm (Figura 6.58), foi constatado um comportamento anômalo em relação ao dia anterior. A direção dos fluxos neste dia deixa de convergir, passando a divergir em todas as direções, o que só não acontece com tanta intensidade nos 80 cm, visto ao atraso normal da resposta nesta bateria. Foi detectada, porém, nesta última estação tensiométrica, um aumento das cargas totais.

Ao final do período de drenagem e estiagem referente a sequência de chuvas do dia 7 de fevereiro, pode ser observado o comportamento das equipotenciais para o dia 14 de fevereiro (6.58). Constata-se neste dia que os fluxos perdem completamente a orientação em relação ao eixo da voçoroca. Em situações como

esta, a existência de sucções elevadas no solo faz desta última variável a grande controlador da distribuição espacial da umidade no solo.

### **6.5.2 Equipotenciais de carga de pressão – expansão e contração da zona de saturação**

Com o objetivo de caracterizar o fenômeno da expansão e da contração da zona de saturação para as duas últimas fases de recarga estudadas, referentes aos trens de chuvas dos dias 16 de janeiro e 7 de fevereiro, foram também incluídas para esta avaliação as equipotenciais de carga de pressão do dia 9 de janeiro, visando caracterizar a situação anterior à recarga que culmina com a chuva do dia 16 de janeiro (Figuras 6.59 a 6.62).

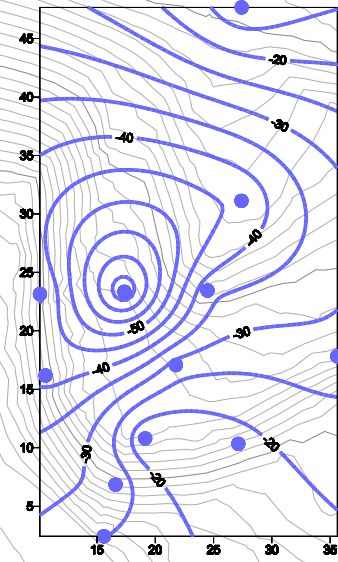
A zona de saturação, ou a altura da franja capilar, é o ponto onde a sucção matricial iguala-se a zero. Em uma situação onde predominem condições não saturadas, é interessante o conhecimento das áreas onde a poro-pressão é quase zero também, já que são os locais onde a redução na coesão em função da perda de sucção é máxima.

Com relação comportamento das equipotenciais de carga de pressão avaliados, segue-se uma avaliação dos mesmos dias de recarga e drenagem referentes à segunda e a terceira fase de recarga do período 2 de monitoramento. Para facilitar a visualização dos resultados as zonas de isopressões de 0 a -5KPa e de 0KPa ou maior foram hachuradas, com diferentes classes para cada uma das zonas.

#### **6.5.2.1 Momento 1: expansão da zona de saturação**

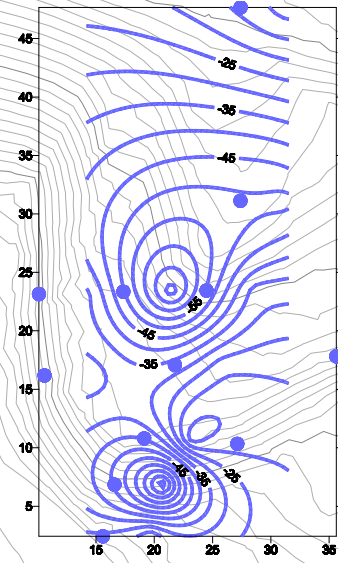
Observando-se o comportamento das equipotenciais de carga de pressão durante o dia de estiagem anterior a primeira sequência de chuvas (Figura 6.59), observa-se que as sucções estão elevadas (ambiente seco) em toda a área, resultando em uma condição de fluxo não saturado. As equipotenciais nas diferentes profundidades avaliadas mostram cargas de pressão mínimas em torno de -60KPa e máximas em torno de -20KPa.

A



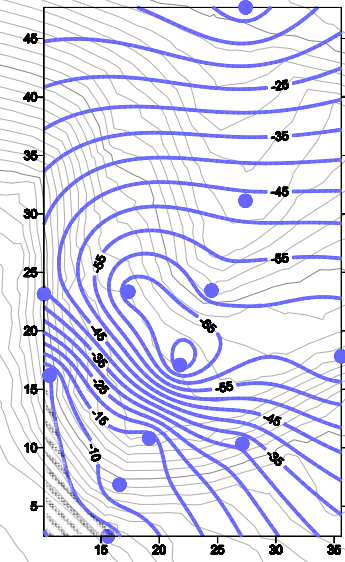
20cm

B



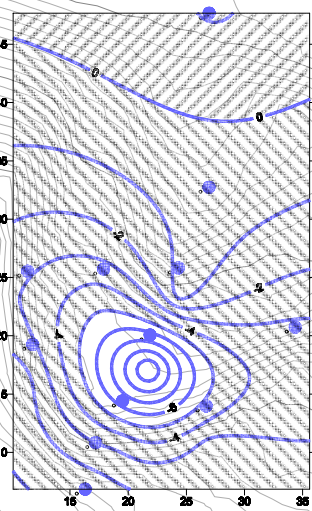
40cm

C



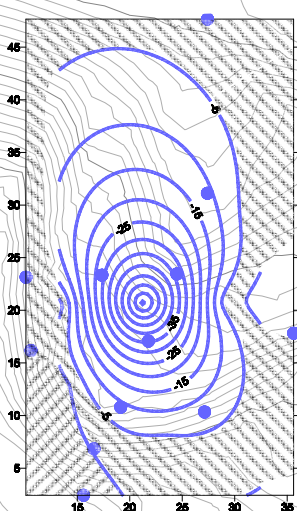
80cm

D



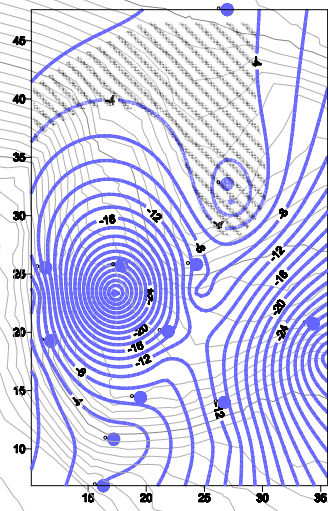
20cm

E

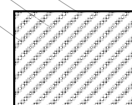


40cm

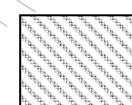
F



80cm



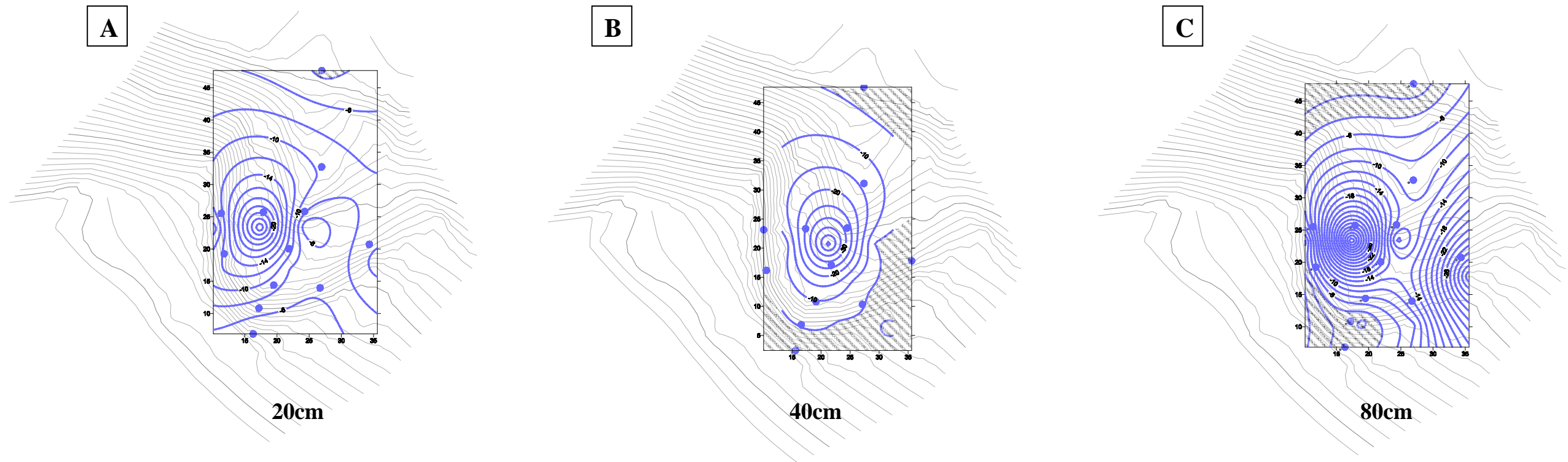
Cargas de pressão superiores à 0 kPa



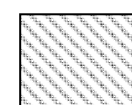
Cargas de pressão entre -5 e 0 kPa

Figura 6.59 – Equipotenciais de carga de pressão, em planta, do dia 09/01/2004 (A, B e C) e do dia 16/01/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm.

Dia 17/01/2004 Precipitação Total – 0mm/24hs



Cargas de pressão superiores à 0 kPa



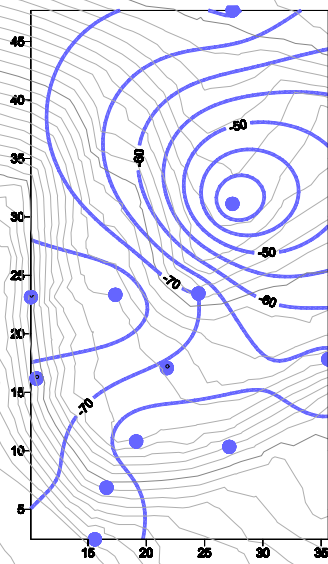
Cargas de pressão entre -5 e 0 kPa

Figura 6.60 – Equipotenciais de carga de pressão, em planta, dos dias 17/01/2004 (A, B e C) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm.

Dia 05/02/2004

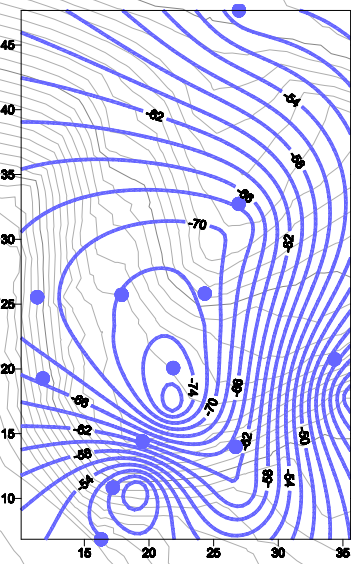
Precipitação Total – 0mm/24hs

A



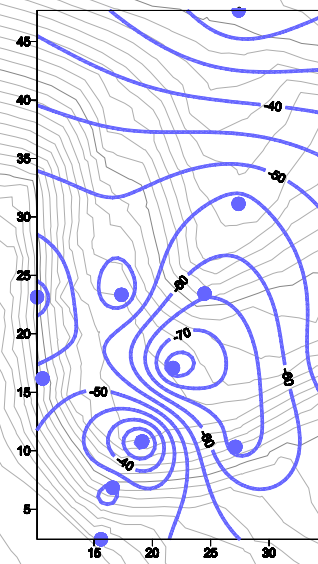
20cm

B



40cm

C

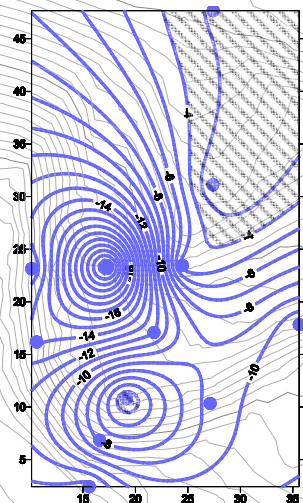


80cm

Dia 07/02/2004

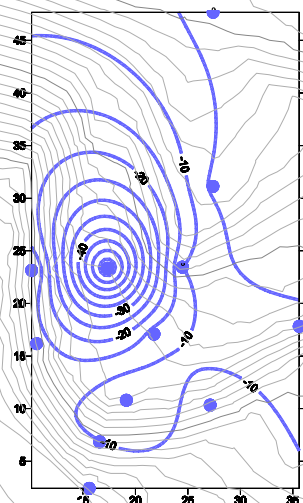
Precipitação Total – 65.5mm/24hs

D



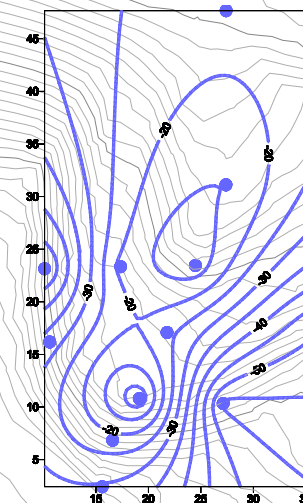
20cm

E

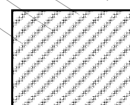


40cm

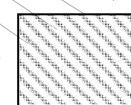
F



80cm



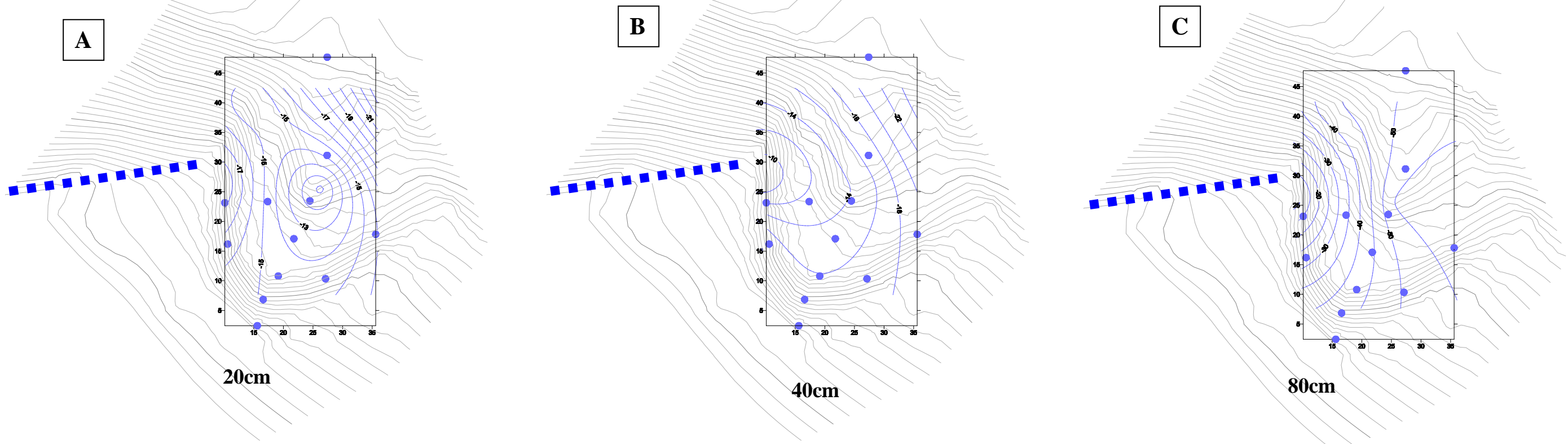
Cargas de pressão superiores à 0 kPa



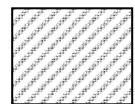
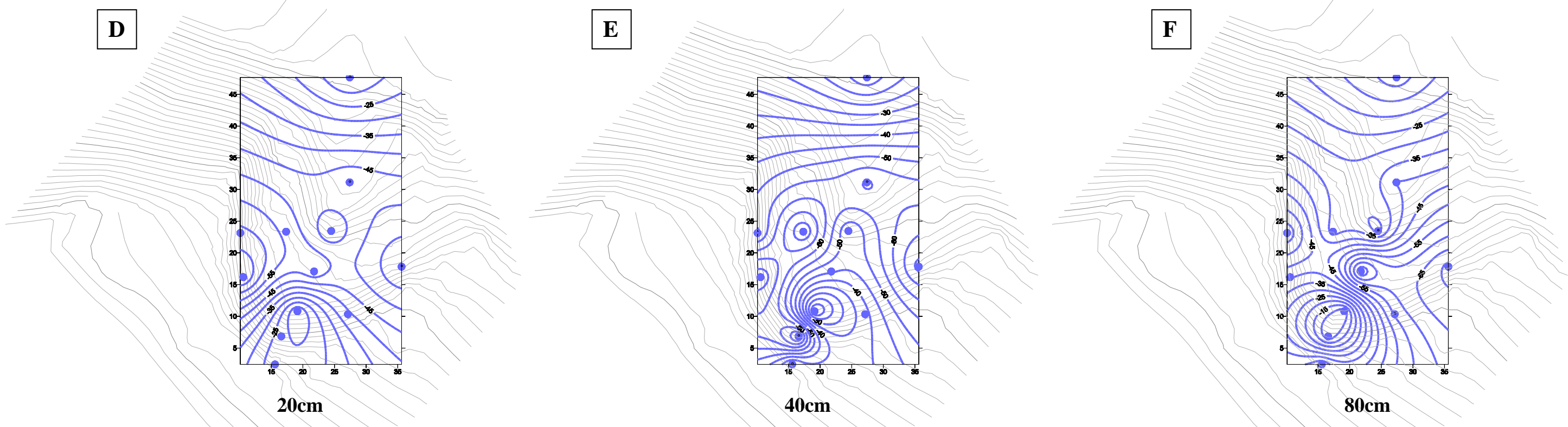
Cargas de pressão entre -5 e 0 kPa

Figura 6.61 – Equipotenciais de carga de pressão, em planta, dos dias 05/02/2004 (A, B e C) e 07/02/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm.

**Dia 08/02/2004      Precipitação Total – 7.1mm/24hs**



**Dia 14/02/2004      Precipitação Total – 0mm/24hs**



Cargas de pressão superiores à 0 kPa



Cargas de pressão entre -5 e 0 kPa

■ ■ ■ ■ Posição da canaleta enterrada

Figura 6.62 – Equipotenciais de carga de pressão, em planta, dos dias 08/02/2004 (A, B e C) e 14/02/2004 (D, E e F) para as profundidades de 20, 40 e 80 cm.



No dia 16 de janeiro (Figura 6.59), após o sequência de chuvas que gerou a maior magnitude acumulada de chuvas, pôde ser constatada a presença da zona de saturação. A carga de pressão chegou à zero na base do talude, entre as estações Bt6 e Bt7 nos 20 cm.

Aos 40 cm formou-se uma pequena zona de saturação na parte mais alta do talude, próximo à estação Bt1, e uma zona de cargas entre 0 e -5KPa no entorno da área. A explicação para a geração desta zona de saturação na alta encosta (que constitui um nível de saturação suspenso, ou *perched water table*) está relacionada não só à velocidade de percolação diferencial nas profundidades, que faz com que a própria saturação ocorra primeiramente nos 20 cm, mas também a uma possível contribuição de fluxos provenientes da retenção de águas propiciada pelo cordão vegetado logo abaixo da bateria. Além disto, há a possibilidade da formação destes níveis suspensos em função de fluxos laterais. Pode estar acontecendo também uma transferência em subsuperfície das águas vindas do outro lado do cordão, fazendo com que ocorra uma maior saturação nesta estação em relação às outras.

Aos 20 cm se observa um comportamento diferenciado para a estação Bt3, havendo também quase saturação nesta posição do talude (zona entre 0 e -5KPa), o que está relacionado à concentração dos fluxos superficiais em função das formas do relevo (a estação está na base do talude, em uma posição côncava em perfil).

Nos 80 cm foi observada a expansão da zona de saturação, na mesma posição da detectada para os 20 cm, na base do talude, o que constitui a trajetória final natural dos fluxos no talude (considerando-se o meio isotrópico).

### **6.5.2.2 Momento 2: contração da zona de saturação**

Durante o dia 17 de janeiro (Figura 6.60), que constitui o início do período de drenagem das chuvas acumuladas do dia 16 (Figura 6.59), foi verificada uma mudança na configuração da zona de saturação em todas as profundidades avaliadas. Aos 20 cm a zona de saturação recuou bastante, estando presente nesta profundidade somente uma zona com carga de pressão entre 0 e -4KPa a partir de uma posição muito próxima a estação Bt7. Tal condição tem relação com a posição da estação em relação à encosta, já que a estação possui valores de retenção de umidade reduzidos.

Nos 40 cm a tendência foi semelhante, havendo a retração da zona de saturação e a manutenção somente de uma zona com cargas de pressão entre 0 e -5 nas partes alta do talude, próximo as estações Bt1, Bt2, Bt8, Bt9 e Bt11; e parte baixa do talude, próximo à estação Bt7, drenando para a direita. Atenta-se para os elevados valores de retenção de umidade encontrados nas estações Bt8 e Bt9, isto é, mesmo as estações estando em posições topográficas desfavoráveis à manutenção de elevados potenciais matriciais, foi provavelmente esta propriedade do solo que fez com que fossem encontrados valores altos neste momento. Aos 80 cm o comportamento foi semelhante ao observado nos 40 cm, havendo a formação de poro-pressões semelhante nas mesmas posições do talude, sendo a orientação das zonas de iso-pressão agora voltadas mais para a parte esquerda do talude.

No dia 5 de fevereiro (Figura 6.61), ao final do período de drenagem, já não foi mais observada a presença da proximidade da zona de saturação, sendo este período suficiente para gerar condições não saturadas ao longo de todo o talude, em todas as profundidades avaliadas.

### **6.5.2.3 Momento 3: expansão das zona de saturação**

Após o evento registrado para o dia 7 de fevereiro (Figura 6.61) foi observada uma formação, ainda que incipiente, de uma zona próxima à saturação, somente na profundidade de 20 cm. As zonas ocorreram nas posições referentes às estações Bt3 e Bt6 e Bt7, o que reforça a tendência de se constatar a expansão da zona de saturação nos taludes de aterro e área de deposição da voçoroca. Aos 20 cm o comportamento das poro-pressões indicou a formação das zonas, no caso dos 20cm, em um arranjo semelhante ao encontrado para o período anterior, voltada para a esquerda (leste). A formação da zona próxima à saturação está condicionada, como já foi mencionando, à posição no talude.

A chuva que se seguiu, durante o dia 8 de fevereiro (7,1mm) (Figura 6.62), não foi capaz de gerar condições para a manutenção do quadro de saturação alcançado durante o dia anterior. No entanto, neste dia as equipotenciais adquiriram uma configuração interessante, provavelmente relacionada à presença de uma antiga canaleta de drenagem que foi enterrada.

Conforme explicado no capítulo 4, os restos desta canaleta (figura 4.5) foram enterrados, o que pode gerar a formação de um caminho preferencial para os fluxos

subsuperficiais, dependendo da resposta hidrológica local às diversas variáveis que controlam os processos de recarga (magnitude e intensidade das chuvas, interceptação, infiltração, anisotropias etc.). A hipótese é de que a chuva do dia 7 (de elevada magnitude), aliada à do dia seguinte, foram capazes de gerar uma condição de fluxo lateral na área, nos 40 cm e 80 cm. Aos 20 cm este comportamento realmente não era esperado (a profundidade reduz a possibilidade de influência de um dreno), mas as profundidades em que ocorreu o mesmo estão dentro da influência da canaleta, que foi enterrada até mais ou menos 1 metro. O que se percebe é um fluxo de oeste para leste, muito nítido principalmente aos 40 cm, o que deve estar relacionado também aos maiores valores de condutividade hidráulica saturada encontrados nesta profundidade, que facilitam a percolação dos fluxos.

O padrão encontrado neste dia (8 de fevereiro) não foi encontrado no dia 16 de janeiro (onde houve uma maior umidade antecedente), o que pode estar relacionado à intensidade das chuvas, ou ao volume acumulado por 24 horas, que devem estar controlando a formação deste fluxo preferencial.

Observando-se os resultados obtidos nesta avaliação de uma maneira geral, pode-se deduzir que o volume de chuvas acumulado no momento 1 foi o principal responsável pela maior expansão da zona de saturação em relação ao momento 3. Se observa que a umidade antecedente está condicionando de forma decisiva a formação da zona de saturação, e nem a precipitação de 65,5mm, do dia 7 de fevereiro (Figuras 6.61 e 6.62), foi capaz de gerar condições de saturação similares, em função da estiagem do período logo anterior, que criou condições de umidade antecedente muito menor.

#### **6.5.2.4 Avaliação das equipotenciais de cargas de pressão em perfil**

De forma complementar as avaliações sobre as cargas de pressão na área ao longo dos momentos já discutidos, será agora avaliada a variação das poro-pressões em perfil para o transecto das estações Bt1, Bt2, Bt3, Bt4, Bt5, Bt6 e Bt7, nos dias 16 de janeiro, quando foram registradas as maiores poro-pressões no período estudado, e no dia 7 de fevereiro, quando houve a chuva de maior magnitude registrada.

Observando-se o comportamento dos potenciais matriciais no transecto avaliado (Figura 6.63), nota-se que no dia 16 de janeiro as precipitações

acumuladas geraram maiores poro-pressões (valores absolutos) do que aqueles do dia 7 de fevereiro, o que está de acordo com os resultados obtidos nas equipotenciais em planta.

No dia 16 de janeiro nota-se a formação de zonas próximas à saturação tanto na parte alta da encosta (estação Bt1, com valores de poro-pressões superiores à -4kPa), quanto na base do talude, este último relacionado ao mecanismo geral de distribuição da umidade nas encostas, em função da topografia. A face de exfiltração que possivelmente se originaria a partir da estação Bt5 (encosta abaixo) dissipa-se com o redirecionamento dos fluxos à jusante da estação Bt6.

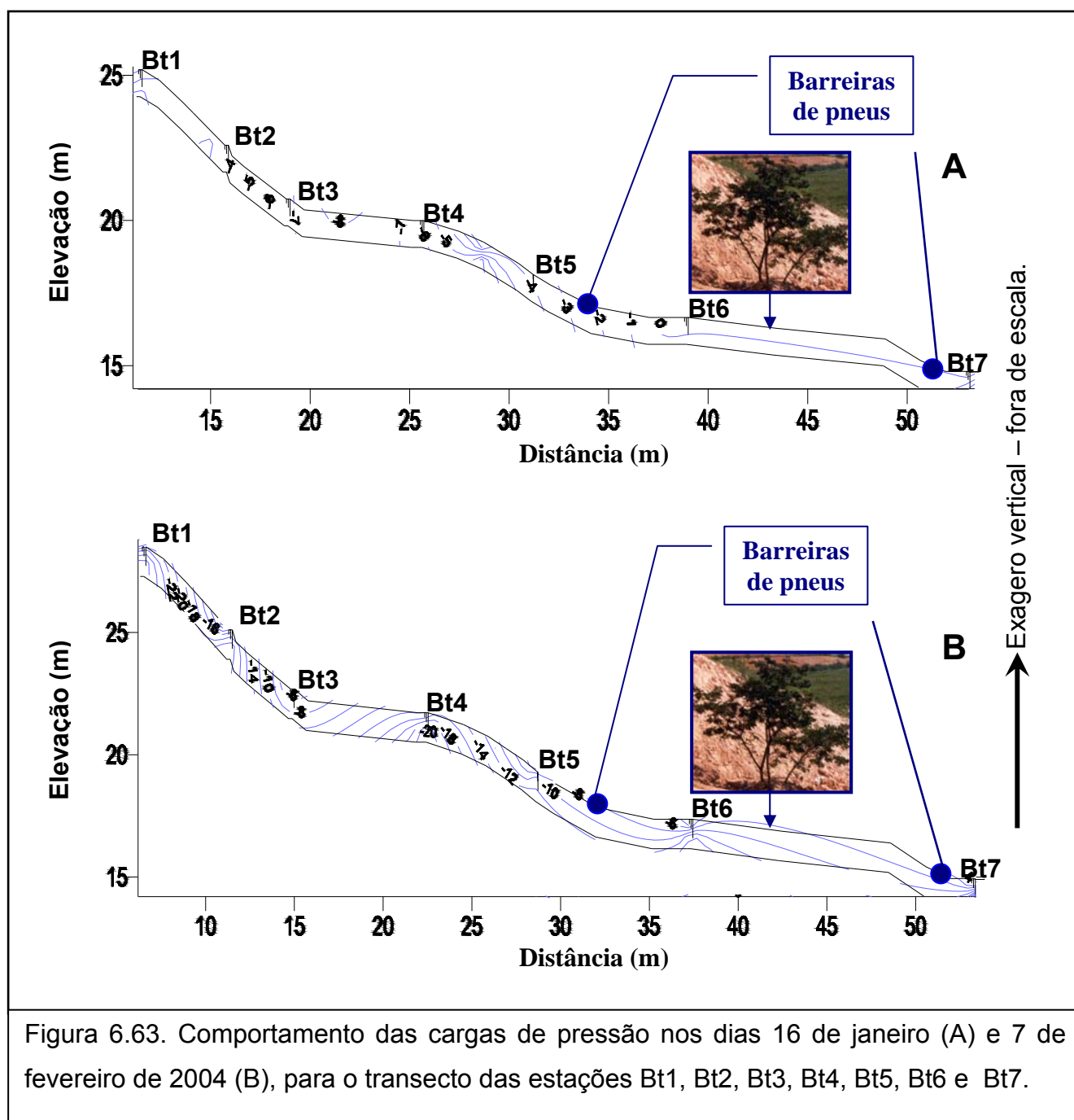


Figura 6.63. Comportamento das cargas de pressão nos dias 16 de janeiro (A) e 7 de fevereiro de 2004 (B), para o transecto das estações Bt1, Bt2, Bt3, Bt4, Bt5, Bt6 e Bt7.

No dia 7 de fevereiro, apesar da pequena umidade antecedente e das menores poro-pressões, o arranjo final das equipotenciais foi bastante diferenciado, havendo a formação de forças de exfiltração na altura da estação Bt2 (no meio do primeiro talude de corte), e na altura da estação Bt4. Constata-se também uma elevação geral das poro-pressões (aumento da umidade) próximo à estação Bt6, o que pode estar relacionado ao efeito do sistema radicular da árvore remanescente que está localizada nas proximidades desta estação.

Em relação ao papel desempenhado pelas barreiras de pneus instaladas ao longo deste transecto (à jusante da estação Bt5 e à montante da estação Bt7), observa-se que estas não afetaram a distribuição das poro-pressões em profundidade ao longo do talude. Este comportamento se deve à pequena profundidade de instalação dos mesmos, já que a intenção maior desta prática é a retenção de um possível fluxo superficial de água e sedimentos. Estes fluxos, detectados através da presença de sulcos, entretanto, podem ser constatados ao longo de grande parte do talude de corte inferior, exceto na região onde foi instalada a barreira, o que indica a eficácia desta prática na contenção da erosão em sulcos. O efeito sobre a hidrologia subsuperficial, entretanto, não foi relevante.

## **6.6 Avaliação da relação entre os condicionantes locais e o desempenho das práticas de RAD nas diferentes estações**

Durante a avaliação que se segue serão enfocadas as diferenças entre as estações, sendo apontadas as propriedades físico-hídricas mais contrastantes em cada estação e a morfologia do talude, para que estes resultados pudessem ser relacionados ao comportamento dos fluxos e ao desempenho das práticas de RAD.

A estação Bt1 (declividade local de 22,84%) está situada em segmento retilíneo em planta e em perfil, em posição relativamente estável da encosta. A densidade do solo e das partículas é elevada em relação às demais estações (principalmente aos 20 cm), havendo também uma elevada porosidade total à profundidade de 40 cm e uma reduzida retenção de umidade aos 80 cm. A estação apresentou um padrão de interceptação semelhante ao encontrado na estação Bt7, o que está relacionado à semelhança da cobertura vegetal predominante (Feijão Guandu, capim Vetiver). Os valores de poro-pressões foram em geral elevados ao longo de todo o período avaliado, indicando uma elevada umidade no solo, o que

está sendo condicionado pela contribuição à montante e pelo acúmulo de águas em função do cordão vegetado. Em relação ao processo de RAD na área, a cobertura vegetal se desenvolveu bem, sendo que as práticas obtiveram o desempenho desejado, tendo o cordão vegetal funcionado como impedimento à entrada dos fluxos superficiais na área, além de ser constatado um processo de povoamento recente às margens da voçoroca (com espécies arbóreas em sua maioria nascidas espontaneamente), o que pode ser observado na Figura 6.64.



Figura 6.64. Proximidades da estação Bt1, observando-se o crescimento da vegetação ao redor do cordão vegetado.

A estação Bt2, situada no primeiro talude de corte (alta encosta, declividade de 22,84%, segmento côncavo em planta e retilíneo em perfil), apresentou também uma elevada densidade das partículas (agora aos 40 cm) e uma baixa retenção de umidade aos 80 cm. Nesta estação também foi detectada a presença de forças de exfiltração durante os eventos de maior magnitude e umidade antecedente. Pode-se dizer que a área encontra-se estável, com uma cobertura de serrapilheira principalmente formada por incorporação de aparas de grama, não tendo sido encontradas evidências de reativação de processos erosivos (ver Figura 6.65).



Figura 6.65. Visão geral da estação Bt2.

A estação Bt3, situada no talude de aterro (declividade 0, segmento côncavo em planta e em perfil), também apresenta como característica principal uma baixa retenção de umidade aos 80 cm. Esta estação pode ser considerada um dos locais onde o processo de RAD foi mais facilitado pelo relevo (declive 0°). A serrapilheira é bem desenvolvida, o solo parece já apresentar sinais de incorporação de matéria orgânica, e não é detectada a presença de erosão (ver Figura 6.66).



Figura 6.66. Estação Bt3. Nota-se a grande quantidade de serrapilheira no local.

Já a estação Bt4, situada no talude de aterro (declividade de 10,59%, em segmento retilíneo em planta e em perfil) apresenta como problema a existência dos

sulcos provenientes da erosão na estação Bt11, assim como os sulcos que se originam no seu talude de aterro e se estendem até a estação Bt6. Sendo assim, apesar de pouco declivosa, a estação apresenta um quadro hidro-erosivo já diferenciado da Bt3, talvez em função de uma declividade maior, talvez em função de seu posicionamento na beirada do talude de corte, o que faz com que, durante o processo de acomodação do talude de aterro, se formem os sulcos encosta abaixo, em direção às estações Bt5e Bt6 (ver Figura 4.16). Outro aspecto importante é a elevada condutividade hidráulica saturada aos 20 cm, e a reduzida retenção aos 40 cm, que podem estar condicionando a formação destas feições.

Na estação Bt5 as características do material (aterro), aliadas à contribuição dos fluxos provenientes dos taludes de corte e aterro existentes à montante (a estação está situada em segmento côncavo em planta, e retilíneo em perfil, com declividade de 29,11%), ocasionaram na formação de sulcos ao longo deste segundo talude de corte, exceto à jusante da estação, onde foi colocada uma barreira de pneus. Esta teve como função principal reduzir a erosão quando do estabelecimento inicial da vegetação. Nos pontos onde não foi colocada a barreira de pneus, formaram-se inicialmente sulcos que depois foram se expandindo. No entanto, em função da posição na média baixa encosta, a vegetação apresentou bom desenvolvimento, provavelmente em função da maior umidade nesta área (ver Figura 4.14).

A estação Bt6 apresentou uma de densidade do solo elevada aos 40 cm, resultando em baixa macroporosidade (conforme se constata nas correlações as duas variáveis tenderam a ser inversamente proporcionais, o que é de se esperar) e uma elevada retenção de umidade. A mesma encontra-se situada em segmento côncavo em planta e retilíneo em perfil (declividade de 7,08%), e apresentou um desempenho das práticas de RAD também facilitado pela topografia. No entanto, atenta-se para o fato de que a estação Bt6 recebe fluxo de sedimentos provenientes dos taludes à montante, que é direcionado por sulcos existentes ao longo do talude de aterro da estação Bt5. Observa-se que a barreira de pneus abaixo da estação Bt5 exerceu efeitos benéficos sobre a hidrologia local, não sendo constatada a presença de sulcos nesta sessão do talude. Outro aspecto importante no desempenho das práticas de RAD nesta estação foi a manutenção de uma árvore próxima à mesma quando da execução do retaludamento, que pode ter gerado condições mínimas ao estabelecimento das mudas no início do processo de revegetação (ver Figura 6.67).





Figura 6.67. Estação Bt6, ao fundo a árvore remanescente.

A estação Bt7 está situada em um segmento retilíneo em planta e em perfil (declividade de 5,15%), possui elevados valores de porosidade e densidade do solo baixa aos 80 cm; possui também uma baixa retenção de umidade em todas as profundidades, além da elevada condutividade hidráulica saturada aos 40 cm. O padrão de interceptação é semelhante ao encontrado na estação Bt1, havendo elevada freqüência do desenvolvimento de poro-pressões positivas e formação de fluxos ascendentes. O quadro encontrado nesta estação é um pouco diferente das demais. Ela está posicionada justamente logo ao final da feição erosiva, logo após uma extensa barreira de pneus, que consegue controlar eficientemente a saída dos fluxos, já que não são detectados sinais de feições erosivas na área.

As estações Bt8 e Bt9 possuem em comum os elevados valores de retenção de umidade, além de estarem muito próximas, na mesma sessão do primeiro talude de corte (declives de 28,61% e 37,10%, respectivamente). Ambas as estações obtiveram um bom desempenho em relação às práticas de RAD, consideravelmente melhor do que as estações Bt11 e Bt12 (situadas no lado oposto do talude) provavelmente em função não só dos menores declives, mas também em função do menor comprimento ou altura do talude de corte neste trecho (ver Figura 6.68). Em todas estas quatro estações foi encontrada grande variabilidade dos potenciais matriciais, o deve estar relacionado à posição no talude.



Figura 6.68. Proximidades da estação Bt9.

A estação Bt10 possui como característica marcante a presença de elevados valores de condutividade hidráulica saturada e de retenção de umidade aos 40 cm. A mesma está situada em um segmento retilíneo em planta e em perfil, com declividade de 16,56% (mediana em relação às demais estações). Foi registrada elevada variabilidade dos potenciais matriciais, sendo os valores geralmente altos (o que implica em um acúmulo de umidade nesta sessão do talude), além da formação de fluxos ascendentes durante os episódios de chuvas de maiores magnitudes. O que se observa nesta estação é um desempenho localizado do processo de RAD, apesar da existência de feições erosivas logo acima, próximo às estações Bt11 e Bt12 (ver Figura 6.69).



Figura 6.69. Estação Bt10.

As estações Bt11 e Bt12, ambas na mesma sessão do talude de corte, na alta encosta e em segmento retilíneo em planta e em perfil (declives de 39,82% e 45,52%) apresentaram vários momentos de saturação, elevada frequência de desenvolvimento de poro-pressões positivas (principalmente na estação Bt12, situada no extremo oeste do talude, o que está relacionado a movimentação padrão dos fluxos d'água em um talude, com o possível afloramento de fluxos provenientes de montante), além de uma elevada variabilidade geral das poro-pressões ao longo do período monitorado. Este comportamento pode estar relacionado à presença de uma canaleta enterrada (hipótese levantada no sub-ítem anterior, quando foi discutida a variação dos potenciais matriciais em perfil). Nestas estações as práticas de revegetação obtiveram o seu menor desempenho, o que pode ser constatado pela presença das erosões localizadas (processos erosivos ativos, sendo constatada a presença da alcova de regressão e da barreira de *pallet* quebrada). A vegetação demorou a se estabelecer em função de um efeito prejudicial ocasionado pela alocação da esteira de bagaço de cana visando uma proteção mais efetiva nesta área, tendo sido este efeito menos benéfico, proporcionalmente, em relação aos locais onde foi implantada cobertura morta de apra de grama (ver Figura 6.70).



Figura 6.70. Proximidades das estações Bt11 e Bt12, anteriormente à instalação das baterias de tensiômetros. Observa-se que a vegetação foi implantada posteriormente no talude de corte em relação ao talude de aterro logo abaixo.

## 7 Considerações finais

Foi encontrada ao longo de todas as discussões uma grande influência da topografia da área sobre os processos de recuperação, o que indica a importância do planejamento adequado da reconformação do talude. Observa-se que a diminuição geral das declividades proporcionou condições mínimas ao desenvolvimento vegetal, apesar de terem sido estipuladas declividades superiores as do talude original. Constatou-se somente nas estações situadas nos pontos mais declivosos maiores dificuldades nos processos de RAD.

Com relação ao processo de interceptação das águas das chuvas pelas copas arbóreas, não foi possível estabelecer uma correlação entre a magnitude das chuvas e o percentual de interceptação. Foi constatado um valor médio obtido para todo o período de monitoramento da ordem de 38%, valor pouco inferior ao encontrado por Coelho Netto (1992) para a Floresta da Tijuca (17%). Os valores obtidos para a Floresta da Tijuca constituem uma boa base de comparação, o valor encontrado indica que a vegetação implantada na área está desempenhando o papel desejado, no que diz respeito à interceptação das copas, já que foram geradas condições

semelhantes às de uma floresta plenamente desenvolvida. Foi encontrada também forte relação entre a interceptação pelas copas e a variável topografia, já que nos taludes de corte (onde pode haver maior capacidade de penetração das chuvas e dos ventos) os valores de *throughfall* obtidos foram consideravelmente maiores.

De acordo com os resultados obtidos nas avaliações de capacidade de retenção hídrica e capacidade de interceptação da serrapilheira, a quantidade de material (aporte) possuiu, na situação estudada, maior influência sobre a capacidade de interceptação do que os valores de retenção hídrica inerentes aos materiais. A aplicação de apra de grama e esteira de bagaço de cana dificultou a avaliação deste parâmetro, entretanto a influência destas aplicações está embutida nestas avaliações.

Em relação aos valores de retenção hídrica da serrapilheira encontrados, observou-se um valor médio de 240%. Os valores encontrados para a Floresta da Tijuca por Vallejo (1982), Coelho Netto (1985, 1987) e Castro Jr. (1991), da ordem de 130 a 300%, e Miranda (1992), da ordem de 200%, foram muito similares. Mesmo que estes valores encontrados na voçoroca levem em conta o papel da cobertura morta, incorporada através de apra de grama e da esteira de bagaço de cana, eles indicam que as práticas de RAD estão exercendo o efeito desejado sobre a hidrologia superficial local. Como resultado formou-se uma cobertura semelhante a florestas plenamente desenvolvidas, intensificando o processo de infiltração e a recarga dos fluxos subsuperficiais.

Os resultados das avaliações das propriedades físico-hídricas dos solos apontaram para uma pequena variabilidade textural na área. Foram encontrados valores de densidade das partículas padrões para a constituição do material de origem (saprolito/residual jovem) destes solos.

As melhores correlações entre as propriedades avaliadas foram obtidas entre densidade do solo e porosidade total ( $R = 0,98$ ) A condutividade hidráulica saturada apresentou também uma boa correlação com os dados de macroporosidade ( $R = 0,51$ ). Este teste ganha importância se pensarmos que as amostras utilizadas para as avaliações são diferentes, o que indica que provavelmente foi gerada uma aproximação razoável das propriedades físico-hídricas locais.

Nos ensaios de condutividade hidráulica saturada foram obtidos valores bastante heterogêneos, sendo os maiores valores encontrados na profundidade de 40 cm. A grande variabilidade de resultados denotou um ambiente anisotrópico em

relação à velocidade dos fluxos e também possivelmente uma menor precisão nos dados obtidos. O problema principal na determinação deste parâmetro é não só a sua heterogeneidade, mas também a sua anisotropia, o que faz com que este parâmetro, obtido nesta avaliação, seja aplicável somente quando se fala em fluxos verticais, já que as amostras foram coletadas com esta orientação. Além disso, no procedimento são utilizadas amostras pequenas de representatividade e que estão sujeitas ao efeito da amostragem, onde a cravação induz a formação de caminhos de percolação preferenciais no corpo de prova.

Em relação ao comportamento das poro-pressões nas diferentes profundidades, observou-se uma maior amplitude dos potenciais matriciais, de uma maneira geral, na profundidade de 20 cm. Provavelmente esta maior variabilidade das cargas foi resultado da influência de elementos superficiais (cobertura vegetal, serrapilheira, insolação etc.). Os resultados revelaram um predomínio de menores sucções nas baterias Bt1, Bt3 e Bt7 (acúmulo de umidade), o que provavelmente no caso estudado se deve à posição das estações e a morfologia do talude. A maior variabilidade dos potenciais matriciais ocorreu nas baterias Bt2, Bt8, Bt10, Bt11 e Bt12, todas situadas no talude de corte superior, exceto a Bt10.

No que diz respeito ao processo de retenção e drenagem da água no solo pode-se observar que a sucção no solo normalmente é menor que a capacidade de campo dos solos durante os períodos de chuva, só excedendo-a após alguns dias na maior parte dos tensiômetros monitorados. Estas observações são especialmente importantes para as baterias Bt3 e Bt7, que favorecem maior acúmulo de umidade.

Conclui-se que a água percola no solo e é drenada por gravidade, ou de acordo com a direção do maior gradiente total de carga, durante os primeiros dias (normalmente 1 semana), quando então o movimento da água no solo perde grande parte de sua velocidade e passa a se caracterizar como transferência de umidade e os efeitos erosivos da água das chuvas são reduzidos. Esta transição de velocidade e seus efeitos sob os processos erosivos constitui um tema que pode ser ainda aprofundado, mas não foi abordado nesta dissertação.

Com relação ao direcionamento dos fluxos (comportamento das cargas totais), foi observado o desenvolvimento de transferência de umidade ascendente principalmente nas estações Bt7, Bt10 e Bt11. A estação Bt7 está posicionada ao final do anfiteatro, na baixa encosta, e recebe os fluxos provenientes das demais baterias. A existência de transferência de umidade ascendente nesta bateria está

relacionada à transferência das águas das estações vizinhas à montante. As estações Bt10 e Bt11, ambas próximas ao local onde está havendo queda de material, apresentaram vários momentos de transferência de umidade ascendente, porém com cargas totais menores que as encontradas na estação Bt7.

Durante a avaliação das equipotenciais de carga total pode ser detectada uma tendência de acumulação e concentração dos fluxos na estação Bt10, sendo que, de uma forma geral, há uma concentração dos fluxos quando da recarga na extremidade esquerda da voçoroca (incluem-se também as estações Bt11 e Bt12).

Com relação à expansão e contração da zona de saturação, foi notado que a umidade antecedente está condicionando de forma decisiva a formação da zona de saturação. Um padrão diferente foi encontrado no durante o dia 8 de fevereiro, pois as equipotenciais apontaram para a formação de fluxos laterais da face oeste para a face leste da voçoroca, o que provavelmente relacionada à presença de uma antiga canaleta de drenagem que foi enterrada. Observou-se que o padrão encontrado neste dia não foi encontrado no dia 16 de janeiro (onde houve uma maior umidade antecedente), o que pode estar relacionado à intensidade das chuvas, ou ao volume acumulado por 24 horas, que devem estar controlando a formação deste fluxo preferencial.

Na avaliação do comportamento do transecto avaliado (estações Bt1 a Bt7), observa-se no dia 7 de fevereiro (com chuva de magnitude 65,5mm), que apesar da pequena umidade antecedente e das menores poro-pressões, o arranjo final das equipotenciais foi bastante diferenciado, havendo a formação de forças de exfiltração na altura da estação Bt2 (no meio do primeiro talude de corte), e na altura da estação Bt4. Constatou-se também uma elevação geral das poro-pressões próximo à estação Bt6, o que pode estar relacionado à sucção exercida pela árvore remanescente que está localizada nas proximidades desta estação. Em relação ao papel desempenhado pelas barreiras de pneus instaladas ao longo deste transecto (à jusante da estação Bt5 e à montante da estação Bt7), observa-se que estas não afetaram a distribuição das poro-pressões nas profundidades avaliadas, o que se deve à pequena profundidade de instalação dos mesmos, já que o objetivo desta prática é a retenção dos fluxos superficiais quando do início da revegetação.

Com relação ao desempenho das práticas de RAD, foi constatada certa diferenciação entre as estações avaliadas. De uma maneira geral, foi notada uma estreita relação entre o desempenho inicial diferenciado das estações monitoradas e

a topografia nas diferentes sessões do talude. As áreas de menores declives apresentaram uma recuperação mais rápida em relação às demais, o que se relacionou tanto ao estabelecimento da cobertura vegetal e à incorporação de serrapilheira, quanto à própria dinâmica hidro-erosiva. No talude de aterro foram encontrados alguns pequenos sulcos, possivelmente provocados por processos de acomodação, já que o talude de aterro não foi compactado.

Apesar de não ter comprometido a recuperação da área, observou-se que nos locais onde foram utilizadas práticas mecânicas mais intensas (estruturas de contenção) quando início da revegetação, o processo de RAD se mostrou geralmente mais eficaz. Deduz-se que estas medidas de contenção durante a fase intermediária (da reconformação do talude ao estabelecimento da vegetação) realizaram seu papel na estabilização da área, fornecendo condições iniciais mínimas anteriormente ao estabelecimento da vegetação. No caso de voçorocas de maiores dimensões, talvez seja mais adequada uma maior intervenção neste sentido.

De uma maneira geral, o conjunto de informações geradas nesta dissertação permitiu afirmar que as práticas de RAD adotadas estão de acordo com preconizado para a situação local. Deve-se deixar claro, entretanto, que projetos de RAD em áreas de voçorocas são situações extremas e diversas de degradação, e podem ter vários condicionantes específicos envolvidos, conforme foi revisado no capítulo 3.1. No caso estudado, o ordenamento dos fluxos superficiais a montante da voçoroca foi suficiente para reduzir a erosão, e de uma maneira geral isto se aplica à maior parte dos taludes degradados por processos erosivos encontrados no Brasil. No entanto podem ocorrer situações mais drásticas onde o uso de drenos ou a utilização mais extensiva de práticas mecânicas como instalação de barreiras de pneus, pallets etc., torne-se imprescindível.

Para a execução de outros projetos de RAD observa-se que um bom diagnóstico das propriedades do solo (especialmente as físico-hídricas, estreitamente relacionadas aos processos erosivos, e a fertilidade, relacionada ao desenvolvimento vegetal) além de um acompanhamento posterior e monitoramento dos fluxos d'água, podem ser excelentes ferramentas no auxílio ao estabelecimento da recuperação das áreas. O monitoramento realizado nesta dissertação utilizou-se de poucos recursos, o que mostra que este tipo de avaliação não é oneroso e apresenta grandes vantagens.



Como continuidade do estudo proposto nesta dissertação, uma próxima etapa é a realização de monitoramento em outro período, de modo a complementar os dados, de modo a rodar, de posse desta base de dados, modelos que simulem os fluxos no talude. Observou-se que devem ser instalados instrumentos em maiores profundidades para o traçado das equipotencias em perfil, sendo adequada a instalação de um piezômetro na base do talude para confirmar os dados de saturação na base encontrados nos tensiômetros da estação Bt7. A realização de monitoramento com ferramentas que permitam mensurar diretamente a umidade dos solos, como o TDR, além da realização de um monitoramento com instrumental automatizado, poderão também vir a gerar grande número de informações.

## 8. Bibliografia

- AMADOR, E. S. (1997). *Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: Homem e Natureza*. Rio de Janeiro: REPROARTE.
- ANDERSON, M. G. & BURT, T.P. (1976). The role of topography in controlling throughflow generation. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 3: pp. 331-344.
- ANDERSON, M.G.& BURT, T.P. (1978). Toward More Detailed Field Monitoring of Variable Sources Areas. In: *Water Resources Research*, v. 14, n. 6. pp. 1123-1131.
- ANDERSON, M.G & BURT, T.P. (1977). Automatic monitoring of soil moisture conditions in a hillslope spur and hollow. In: *Journal of Hydrology*, v. 33.
- ANDERSON, M.G.& BURT, T.P. (1980). The role of topography in controlling throughflow generation: a reply. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 5: pp. 193-195.
- ANDERSON, M.G .& RICHARDS, K.S. (1987). Modelling slope stability: the complimentary nature of geotechnical and geomorfological approaches. In: ANDERSON, M.G.& RICHARDS, K.S. (1987) (orgs.). *Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorfology*. Chichester: John Wiley & Sons.
- ANDRADE, A.G. (1997). *Ciclagem de nutrientes e arquitetura radicular de leguminosas arbóreas de interesse para revegetação de solos degradados e estabilização de encostas*. Tese de Doutorado. Seropédica: UFRRJ, 168p.
- ATKINSON, T.C. (1978). Techniques for measuring subsurface flow on hillslopes. In: KIRKBY, M.J. (ed). *Hillslope Hidrology*, chap. 3:73-120.
- AZEVEDO, A.A. & ALBUQUERQUE Filho, J.L. Águas suBterrâneas. In: OLIVEIRA, A. M. S. & BRITO, S.N.A. (orgs.). (1998). *Geologia de Engenharia*. ABGE. CNPQ/FAPESP. pp. 111-130.
- BARROSO, L.V.; SILVA, J.C.L. BARBOSA, A.L. PEREIRA FILHO, J.P.A. (2001). Estabilização do Talude da Estrada de Itaipú (Região Oceânica de Niterói) por Meio de Drenagem e Reflorestamento. In: *III COBRAE – Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Taludes – Anais....* Associação Brasileira de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica.
- BARTH, R.C. (1989). Avaliação da recuperação de áreas mineradas no Brasil. In: *SIF-Boletim Técnico n.1*.
- BRADY, N.C. (1989). *Natureza e propriedades dos solos*. 7ª ed. São Paulo: Freitas Bastos, 878p.
- BRESSANI, L.A. (1997). Field Suction Measurements in a Residual Soil Slope. In: *II Panamerican Symposiun on Landslides; II COBRAE*. Rio de Janeiro. pp.363-369.
- BRIGGS, L.J. (1897). The machanics of soil moisture. U.S. Dept. Bur. Soil Bul. 10.
- BRUNSDEN, D. & PRIOR, D.B. (1984). *Slope Instability. Landscape systems: a series in geomorfology*. Chichester: John Wiley & Sons.

- CARPANEZZI, A.A.; COSTA, L.G.S.; KAGEYAMA, P.Y. CASTRO, C.F.A. (1990). Espécies pioneiras para recuperação de áreas degradadas: observação de laboratórios naturais. In: *CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO*, 6. Anais...Campos de Jordão: SBS. pp.16-221.
- CASTRO Jr, E. (1991). *O papel da fauna endopedônica na estruturação física do solo e seu significado para a hidrologia de superfície*. Dissertação de mestrado PPGG/UFRJ.
- CLEGG, (1963). Rainfall Intecption in a tropical forest. In: *Caribbean Forester*. 24(2), 75-79.
- COELHO NETTO, A.L. (1985). *Surface Hidrology and Soil Erosion in a Tropical Mountainous Rainforest Drainage Basin*. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 181p.
- COELHO NETTO, A.L. (1987). Overlandflow production in a tropical rain forest catchment: the role of the litter cover. In: *CATENA*, v.14, nº3: 213-231.
- COELHO NETTO, A.L. (1995). Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B. da. (orgs.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- COELHO NETTO, A.L. (1992). O geocossitema da Floresta da Tijuca. In: Abreu, M.A. (org.). *Natureza e Sociedade no Rio de Janeiro*. Biblioteca Carioca IplanRio. pp. 104-142.
- CURI, N. (coord.) (1993). *Vocabulário de Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Fontes: Campinas.
- DARMER, G. (1992). *Landscape and surface mining: ecological guidelines for reclamation*. New York: Ed. Van Nostrand Reinhold, 155p.
- DIRKSEN, C. (1999). *Soil Physics Measurements*. Geocology Paperback. CATENA VERLAG. Reiskirchen, Germany. 154p.
- DOBEREINER, J. (1967). Efeito da inoculação de sementeiras de sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*) no estabelecimento e desenvolvimento das mudas no campo. In: *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.2, p.301-305.
- DUNNE, T. (1970). *Runoff Production in a Humid Area*. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Services. ARS 41-160.
- DUNNE, T. & LEOPOLD, L.B. (1978). *Water in environmental planning*. San Francisco: W.H. Freeman & Company San Francisco, 818p.
- DUNNE, T. (1990). Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. In: Higgins, C.G. & Coates, D.R. (eds). *Groundwater Geomorphology, The role of subsurface water in Earth-surface processes and landforms*. Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper 252, p.139-155.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e conservação de solos. (1997). *Manual de métodos de análise de solo*.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (2001). *Diagnóstico do Estado de Conservação – Morro do Radar. Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas*.

- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (2002). *Relatório Técnico e Plano de Monitoramento do Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas*. Rio de Janeiro.
- EMBRAPA. (2003). *Caderno de Especificações técnicas para transferências de tecnologias, diagnósticos do estado de conservação das terras e projetos de recuperação de áreas degradadas*.
- ENAR. (2000). Engenharia e Representações LTDA. Comando da Aeronáutica – Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária/INFRAERO. *Execução do Levantamento topográfico e elaboração de projeto executivo de drenagem e revegetação em áreas degradadas do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (SBGL) – RJ*. Relatório Técnico.
- FARIA, S.M. de; MOREIRA, V.G.; FRANCO, A.A. (1984). Seleção de estipes de Rhizobium para leguminosas florestais. In: *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.19, (s/n), p.175-180.
- FARIA, S.M. de. (1997). Nodulation occurrence and Rhizobial selection for legumes trees adapted to acid soils. In: *Nitrogen Fixing trees adapted to acid soils. Nitrogen Fixing Tree Research Reports*, Hawaii, p.295-300.
- FRANCO, A.A.; FARIA, S.M. de. (1995). The contribution of N<sub>2</sub>-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. In: *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v.29, n.5/6, p.897-903.
- FERNANDES, N.F.; COELHO NETTO, A.L.; DEUS, C.E. (1989). Monitoramento dos fluxos d'água no solo: Instrumentação Alternativa. In: *III Simpósio de Geografia Física Aplicada*, Nova Friburg, v. 1:71-97p.
- FERNANDES, N.F. (1990). *Hidrologia subsuperficial e propriedades físico-mecânicas dos solos dos "complexos de rampa"- Bananal – SP*. Dissertação de mestrado. IGEO- UFRJ.
- FERNANDES, N.F.F.; COELHO NETTO, A.L.; LACERDA, W. (1994). Subsurface Hydrology of Layered Colluvium Mantles in Unchannelled Valleys – South-Eastern-Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, v., 19, 609-626.
- FERNANDES, N.F. & AMARAL, C.P. do. (1998). Movimentos de Massa. Uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A.J.T. de; CUNHA, S.B. da. (orgs.). *Geomorfologia e Meio Ambiente*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 372p.
- FRANCO, A.A.; CAMPELO, E.F.; SILVA, E.M.R.; FARIA, S.M. (1992). *Revegetação de solos degradados*. Seropédica, RJ, EMBRAPA/CNPAB, 11p. (EMBRAPA/CNPAB, Comunicado técnico 9).
- FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.; DIAS, L.E.; FARIA, S.M. de. (1994). Revegetação de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas-PA com leguminosas arbóreas noduladas e micorrizadas. In: *I SIMPÓSIO SUL-AMERICANO, 1., SIMPÓSIO NACIONAL, RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 2., Foz do Iguaçu, 1994*. Anais. Curitiba: FUPEF, p.145-153.
- FREIRE ALEMÃO, A.V.(1997). *Recarga e Drenagem em solos florestados: o papel dos sistemas radiculares*. Dissertação de mestrado PPGG/UFRJ.
- FREIRE, E.S. de M. (1965). *Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática*. Rio de Janeiro: Construção, 8 (95): 10-18, il.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, Pentice Hall, 604 p.

- GRAHAM, R.C.; TICE, K.R.; GUERTAL, W.R. (1994). The pedologic nature of Weathered rock. In: *Whole Regolith Pedology. Soil Sci. Soc. Am., USA, (special publication nº4)*, 22-40.
- GRAY, D.H. & LEISER, A.T. (1982). *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company.
- GREENWAY, D.R. (1987). Vegetation and slopes stability. In: ANDERSON, M.G.; RICHARDS, K.S. (orgs.) *Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorfology*. Chichester: John Wiley & Sons.
- GRIFFITH, J.J.; DIAS, L.E.; JUCKSCH. (1994). Novas estratégias ecológicas para a revegetação de áreas mineradas no Brasil. In: *Simpósio SUL-AMERICANO, 1.; SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 2*. Foz do Iguaçu, 1994. Anais... Curitiba: FUPEF, P. 31-43.
- GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M. (1983). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. São Paulo: Edgar Blücher LTDA.
- GUYMON, G.L. (1994). *Unsaturated zone hydrology*. Hall, New Jersey: Ed. Prentice
- HACK, J.T. & GOODLETT, J.C.(1960). *Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the Central Appalachians*. United States Geological Survey, Professional paper 347, 64p.
- HIGGINS, C.G. (1990). Gully Development. In: Higgins, C.G. & Coates, D.R. (eds.). *Groundwater Geomorphology, The role of subsurface water in Earth-surface processes and landforms*. Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 252, p.139-155.
- HILLEL, D. (1970). *Solo e água: fenômenos e princípios físicos*. Trad. Convênio UFRGS – USAID/Winsconsin. Departamento de solos - UFRGS. Porto Alegre.
- HILLEL, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. London UK: Academic Press.
- HORTON, R.E. (1933). The role of infiltration in the hidrological cycle. *Trans, Am. Geophys. Union*, 14, 446-460.
- HORNBERGER, G.M.; RAFFENSPERGER, J.P.; WIBERG, P.L.; ESHLEMAN, K.N. (1998). *Elements of Physical Hydrology*. London, UK : John Hopkins University Press.
- HRUDAYANATH, T.; MISRA, A.K.; PADHI, G.S.; THATOI, H. (1995). Comparative growth, nodulation and total nitrogen content of six tree legume species grown in iron mine waste soil. In: *Journal of Tropical Forest Science*, v.8, p.107-115.
- IBRAM, INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. (1992), *Mineração & Meio Ambiente*. Brasília, 126p.
- IPT. (1991). *Ocupação de Encostas*. Publicação IPT nº1831, 216p.
- JANSEN, R. C. (2001). *Distribuição dos sistemas radiculares em encostas florestadas e sua influência sobre a infiltração*. Dissertação de mestrado PPGG/UFRJ.
- JASPER, A.D.; ABBOTT, L.K.; ROBSON, A.D. (1989). Acacias respond to additions of phosphorus and to inoculation with VA mycorrhizal fungi in soils stockpiled during mineral sand mining. In: *Plant and Soil*, The Hague, v.115, p.99-108.

- KANJI, M. A. (1997). Estabilização e Remediação de Taludes – Relato Geral. In: *// Panamerican Symposiun on Landslides; // COBRAE*. Rio de Janeiro. pp. 251-259.
- KIEHL, J.E. (1979). *Manual de edafologia*. São Paulo: Agronômica Ceres, 262p.
- KLAR, A.E. (1984). *A água no sistema solo-planta atmosfera*. São Paulo: Ed. Nobel. 408p.
- KNAPP, B.J. (1978). Infiltration and Storage of Soil Water. In: *Hillslope Hidrology* Chap. 2, 43-72pp, John Wiley.
- KUTÍLEK, M. & NIELSEN, D.R. (1994). Soil Hidrology. *Geoecology In: Textbook. Germany*. Cremlingen-Desdedt: Catena- Verlag.
- LIBARDI, P.L. (1995). *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba, São Paulo: ed. ESALQ/USP, 1ª ed., 497p.
- MARINHO, F.A.M. (1996). *Mecânica dos solos não saturados. Notas de aula para o curso mecânica dos solos não saturados*. COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro. 105p.
- MARSH, G.P. (1864). *Man and Nature*. New York. 650p.
- MARTINS, I da C.(1981). A Erosão em Taludes e Encostas. Mesa Redonda – Tema III. In: *II Simpósio sobre o Controle de Erosão*. ABGE. Vol 2.
- MEIS, M.R.M. (1976). *Contribuição ao estudo do Terciário Superior e Quaternário da Baixada da Guanabara*. Tese de doutorado em geografia/Universidade de Lisboa.
- MIRANDA, J. C. de.(1992). Intercepção das chuvas pela vegetação florestal e serrapilheira nas encostas do Maciço da Tijuca: Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado PPGG/UFRJ.
- MORGAN, R.P.C. (1995). *Soil erosion and Conservation*. London, UK: Longman Group, 298p.
- MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E.; TORRES, R.; ANDERSON, S.P.; HEFFNER, J.T.; LOAGUE, K. (1997). Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall. In: *Water Resources Research*, Vol.33, No. 1, pp 91-109.
- NIMER, E. (1979). *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, v. IV.
- OLIVEIRA, E. de; FRANCO, A.A.; SILVA, E.M.R. da. (1995). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi inoculum concentration on the initial development of the tropical legumes tree *Mimosa caesalpinifolia*. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE AGRICULTURE FOR THE TROPICS - NITROGEN FIXATION*, Abstracts. Angra dos Reis: EMBRAPA-CNPAB; UFRRJ; Brazilian Academy of Sciences, p.168.
- OLIVEIRA, L.F.C.; BONOMO, R.; CORTÊS, F.C. (2001). Desenvolvimento matemático de uma equação para estimativa da capacidade de campo. In: *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 31 (1): 65-69.
- PINTO, C. de S. (2000). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. São Paulo: Oficina de Textos.
- RICHTER, J. (1987). *Soil as a Reactor. Modeling Processes in the soil*. Cremlingen,. Germany : CATENA paperback.. 192p.

- REICHARDT, K (1987). *A água em sistemas agrícolas*. São Paulo: Ed. Manole, 188p.
- REICHARDT, K (1988). Capacidade de campo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 12: 211-216.
- ROCHA LEÃO, O. M. (1997). *Potencialidades e limitações da revegetação no controle da hidrologia e erosão superficial*, Maciço da Tijuca – RJ. Dissertação de mestrado PPGG/ UFRJ.
- SANTANA FILHO, S.; CARDOSO, I.M.; SANTOS, R.H.S. (1995). Levantamento florístico em horizonte C de taludes de estrada da região de Viçosa – MG. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO*, 25, Viçosa. Anais...UFV:SBCS. p1855-1861.
- SANTOS, C.J.F. 1998 *Técnicas de plantio para proteção e estabilização de taludes*. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo – UFRRJ.
- SANTOS, A.R. dos; FERREIRA, C.S.M.; GIESEKE, C.V.S. (1981). A Erosão em Taludes e Encostas. Mesa Redonda – Tema III. In: *II Simpósio sobre o Controle de Erosão*. ABGE. Vol 2.
- SELBY, M.J. (1993). *Hillslope Materials and Processes*. Oxford: Oxford University Press.
- SMITH, R.E. (1983). Approximate Soil Water Movement by Kinetic Characteristics. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* Vol. 47. P3-8
- SOUZA, A.P. (2003) *Monitoramento da erosão de solos durante eventos pluviométricos: subsídio a compreensão dos processos erosivos em ambiente agrícola serrano*. Dissertação de Mestrado. IGEO-UFRJ.
- STRAUCH, L.M.M. (1955). Distribuição da População na Ilha do Governador. In: *Revista Brasileira de Geografia*. Ano XVII, nº 3.
- TERWILLIGER, V.J. (1990). Effects of Vegetation on Soil Slippage by Pore Pressure Modification. In: *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 15, No 6.
- TORRES, R.; DIETRICH, W.E.; MONTGOMERY, D.R.; ANDERSON, S.P.; LOAGUE, K. (1998). Unsaturated zone processes and the hydrologic response of a steep, unchanneled catchment. In: *Water Resources Research*, Vol.34, No 8.
- VARGAS, M.(1981). *Introdução à mecânica dos solos*. New York: John Willey & Sons.
- VALLEJO, L.R. (1982). *A influência do "litter" na distribuição das águas pluviais*. Dissertação de mestrado PPGG/UFRJ.
- VALLEJO, L.R. & VALLEJO, M.S. (1981). Aspectos da dinâmica hidrológica em áreas florestadas e suas relações com os processos erosivos – primeiros resultados. In: *Atas do IV Simpósio do Quaternário no Brasil*: 365-380.
- VIEIRA, B.C. (2001). *Caracterização in situ da condutividade hidráulica saturada dos solos e sua influência no condicionamento dos deslizamentos da bacia do rio Papagaio, Maciço da Tijuca (RJ)*. Dissertação de mestrado. IGEO-UFRJ.
- WILLIAMS, D.D.; BUGIN, A.; REIS, J.L.B.C. (1990). *Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação*. Brasília: IBAMA, 96p.

WHIPKEY, R.Z.; KIRKBY, M.J. 1978. Flow within the soil. In: Kirkby, M.J. (Org.) *Hillslope Hydrology*. New York. John Wiley e Sons. P121-143.