



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Cloer Costa de Oliveira

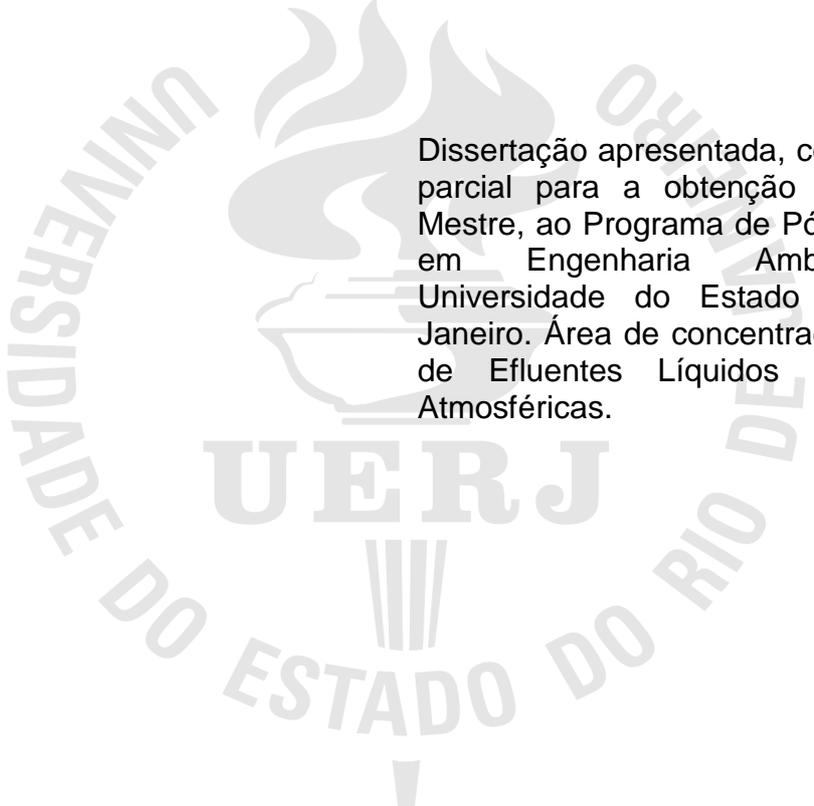
**Substratos para uso em telhados verdes: Avaliação da  
retenção hídrica e qualidade da água de escoamento**

Rio de Janeiro

2012

Cloer Costa de oliveira

**Substratos para uso em telhados verdes: Avaliação da retenção hídrica e  
qualidade da água de escoamento**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle de Efluentes Líquidos e Emissões Atmosféricas.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Márcia Marques Gomes  
Coorientador: Dr. Sílvio Roberto de Lucena Tavares

Rio de Janeiro

2012

**CATALOGAÇÃO NA FONTE**  
**UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B**

O48 Oliveira, Clooer Costa de.  
Substratos para uso em telhados verdes: Avaliação da  
retenção hídrica e qualidade da água de escoamento /  
Clooer Costa de Oliveira. - 2012.  
115 f.

Orientadora: Márcia Marques Gomes.  
Coorientador: Sílvio Roberto de Lucena Tavares  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do  
Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Telhados Verdes –  
Dissertações. I. Gomes, Márcia Marques. II. Universidade  
do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 62:502.12

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Cloer Costa de Oliveira

**Substratos para uso em telhados verdes: Avaliação da retenção  
hídrica e qualidade da água de escoamento**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle de Efluentes Líquidos e Emissões Atmosféricas.

Aprovado em: 01 de março de 2012.

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Márcia Marques Gomes (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciene Pimentel da Silva  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Dr. Sílvio Roberto de Lucena Tavares (Coorientador)  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisas de Solos – Embrapa Solos – CNPS

---

Prof. Dr. Wellington Mary  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ  
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Rio de Janeiro

2012

## DEDICATÓRIA

*À minha mãe, por tudo que  
alcansei.*

*Ao meu amado, Sérgio Luis Jr.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pois nunca devemos perder a fé.

Àquelas que são minha família, minha mãe e irmã, porque somos o que somos juntas e nossa trajetória será repleta de mais realizações.

Ao amor da minha vida, por todo o apoio, compreensão e otimismo.

À minha orientadora por me possibilitar seguir até aqui rodeada de conhecimento.

Ao meu coorientador pelo incentivo ao mestrado e sua importante participação na concepção do objeto de estudo aqui apresentado.

A toda equipe LABIFI pelo companheirismo. Amizades que levarei para sempre.

À Embrapa Solos pelo apoio técnico.

Ao FINEP-MCT-CNPq pelo apoio financeiro à Rede MAPLU e ao sub-projeto *“Telhado Verde (TV) e Captação e Uso de Águas Pluviais (CAP) como técnicas compensatórias em áreas de interesse social e ambiental do Estado do RJ”* e pela bolsa DTI-C a mim concedida.

## RESUMO

OLIVEIRA, Clooer Costa. *Substratos para uso em telhados verdes: Avaliação da retenção hídrica e qualidade da água de escoamento*. 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Telhados verdes são uma alternativa interessante para mitigar o risco de enchentes dada a enorme área de telhados não utilizada das superfícies impermeáveis nas áreas urbanas. Graças a sua capacidade de armazenagem de água, os telhados verdes podem reduzir significativamente o pico de escoamento dos eventos de maior pluviosidade. Investigações sobre a composição de substratos baseados em materiais locais e projetos adequados para regiões climáticas tropicais são menos frequentes. Vegetação e substrato são elementos de um telhado verde que precisam ser adaptados para cada microclima e não universalizados. O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de diferentes composições de substratos baseados em solo local, biomassa de coco, condicionador de solo e componentes comerciais, com a finalidade de maximizar a capacidade de retenção da água de chuva e diminuir necessidades de manutenção. Um pré-ensaio de colunas avaliou a capacidade de retenção hídrica e a relação peso seco x peso úmido de 15 composições de substrato. As composições com melhores resultados constituíram os substratos S1 (15% solo + 55% coco + 30% componentes comerciais), S2 (30% solo + 40% coco + 30% componentes comerciais) e S3 (60% solo + 10% coco + 30% componentes comerciais). A caracterização físico-química dos substratos, solo e fibra de coco foi realizada. Em seguida um teste de colunas avaliou a capacidade de retenção hídrica dos substratos sob duas condições de precipitação: uma leve (8,77 mm/h); e outra mais forte (42,0 mm/h). Os resultados apontaram que os substratos S2 e S3 apresentaram melhores resultados de retenção para ambas as intensidades de precipitação. Observou-se que S1, que apresentou melhor capacidade de retenção no pré-ensaio, teve desempenho inferior aos demais o que pode ser atribuído à maior concentração de fibra de coco na sua composição e o consequente surgimento de caminhos preferenciais ao longo do perfil da coluna, por onde a água escoou mais rapidamente. Em eventos de precipitação mais leve, os substratos reteram de 60 a 100% do total aplicado. Quando se aplicou uma intensidade de precipitação mais forte, a faixa de retenção ficou entre 40% e 59%. No entanto, as variáveis analisadas para avaliar a qualidade da água de escoamento dos substratos (pH, CE, P, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Co, Ni) ficaram acima dos valores comumente encontrados na literatura, indicando que as composições aqui adotadas para os substratos podem implicar em uma fonte de poluição hídrica. Os substratos para uso em telhados verdes apresentados neste estudo atenderam seu objetivo quanto à retenção hídrica, mas a qualidade da água percolada torna seu uso inviável até o momento. Verificou-se a necessidade de estudar mais profundamente a qualidade da água lixiviada por cada componente dos substratos, individualmente, a fim de identificar as fontes dos elementos que presentes em concentrações elevadas tornam-se poluentes. Pode ser considerada a remoção de algum (s) dos componentes presentes na composição para se atingir um nível satisfatório de qualidade da água de escoamento.

Palavras-Chave: Telhados verdes; Substrato; Coco; Retenção de Água.

## ABSTRACT

Green roofs are an interesting alternative to mitigate the risk of flooding given the huge area of unused roofs of impermeable surfaces in urban areas. Thanks to its ability to store water, green roofs can significantly reduce the peak flow events with higher rainfall. Investigations on the composition of substrates based on local materials and designs suitable for tropical climatic regions are less frequent. Vegetation and substrate are elements of a green roof that need to be adapted to each microclimate and not universalized. The objective of this study was to evaluate the performance of different substrate compositions based on local soil, coconut biomass, soil conditioner and commercial components in order to maximize retention capacity of rainwater and lower maintenance needs. A pre-test columns evaluated the water retention capacity and relative wet weight dry weight x 15 substrate compositions. The compositions were the best performing substrates S1 (15% soil + 55% + 30% coconut commercial components), S2 (30% soil + 40% + 30% coconut commercial components) and S3 (60% + 10% soil + coco 30% commercial components). The physicochemical characterization of substrates, soil and coconut fiber was performed. Then a test column evaluated the water retention capacity of the two substrates under precipitation conditions: a gentle (8.77 mm / h), and another strong (42.0 mm / h). The results showed that the substrates S2 and S3 showed better retention results for both intensities of rainfall. It was observed that S1, which showed better retention capacity in the pre-test, performance was inferior to the others which can be attributed to the higher concentration of coconut fiber composition and the consequent emergence of preferential paths along the profile of the column, through which water drained more quickly. In lighter precipitation events, the substrates while retaining 60-100% of the total applied. When applied a stronger intensity of precipitation, the band retention was between 40% and 59%. However, the variables analyzed to evaluate the quality of the water drainage of the substrates (pH, CE, P, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Co, Ni) were higher than the values generally found in the literature, indicating that the compositions here adopted for the substrates can bring in a source of water pollution. The substrates for use in green roofs presented in this study met its goal for retaining water, but the quality of percolated water makes its use impractical until now. There was the need to study further the quality of water leached for each component of the substrates individually in order to identify sources of the elements present in high concentrations become pollutants. It can be considered the removal of some (s) of the components present in the composition to achieve a satisfactory level of quality of the water flow.

**Keywords:** Green roof; Substrate; Coconut; Water retention.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Tipos de tecnologia convencional de cobertura verde extensiva....  | 19 |
| Figura 2. Processos hidrológicos em um sistema telhado verde.....  | 21 |
| Figura 3. <i>Arachis Pintoi</i> .....  | 43 |
| Figura 4. Experimento em escala piloto para a avaliação da retenção hídrica utilizando três diferentes tipos de vegetação e controle.....  | 44 |
| Figura 5. Telhado verde experimental instalado na Universidade de Hong Kong.....   | 45 |
| Figura 6. Telhado verde com <i>arachis pintoi</i> em inclinações de até 12% instalado em residência na Costa Rica.....   | 46 |
| Figura 7. Máquina trituradora para galhos verdes.....  | 50 |
| Figura 8. Cascas de coco trituradas e espalhadas em bandejas para secagem em estufa.....   | 50 |
| Figura 9. Pré-ensaio de colunas: avaliação da capacidade de retenção hídrica de quinze substratos compostos com cinco diferentes granulometria de palha de coco testadas em três proporções..... | 54 |
| Figura 10. Aparato experimental para o teste de colunas.....   | 56 |
| Figura 11: Sistema de irrigação das colunas (gotejamento).....   | 57 |
| Figura 12. Coleta do lixiviado.....  | 57 |
| Figura 13. Gráficos demonstrativos da ocorrência de Cu, Fe, Mn e Zn durante as lixiviações para $i = 8,77$ mm/h e $i = 42$ mm/h.....   | 93 |
| Figura 14. Gráficos demonstrativos da ocorrência de Cr, Co e Ni durante as lixiviações para $i = 8,77$ mm/h e $i = 42$ mm/h.....   | 94 |
| Figura 15. Visualização da cor das amostras obtidas durante os ensaios no teste de colunas: a) $i = 8,77$ mm/h; b) $i = 42$ mm/h.....  | 96 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1. Retenção de umidade do solo quando submetido a pressões de 0,006 MPa, 0,033 MPa e 1,5 MPa.....                            | 60 |
| Gráfico 2. Intervalo e valores médios da concentração dos nutrientes Ca, Mg, Fe e P na palha de coco, em mg/Kg.....                  | 61 |
| Gráfico 3. Intervalo e valores médios da concentração dos nutrientes Cu, Mn, Zn, Cr e Ni na palha de coco, em mg/Kg.....             | 62 |
| Gráfico 4. Volume percolado por coluna (mm).....   | 64 |
| Gráfico 5. Desempenho da capacidade de retenção hídrica das colunas no Pré-ensaio.....   | 65 |
| Gráfico 6. Relação peso seco x peso úmido das colunas no Pré-ensaio.....   | 66 |
| Gráfico 7. Intervalo e valores médios da concentração Mn nos substratos S1, S2 e S3, em mg/dm <sup>3</sup> .....                     | 67 |
| Gráfico 8. Intervalo e valores médios da concentração Fe nos substratos S1, S2 e S3, em mg/dm <sup>3</sup> .....                     | 67 |
| Gráfico 9. Intervalo e valores médios da concentração Cu nos substratos S1, S2 e S3, em mg/dm <sup>3</sup> .....                     | 68 |
| Gráfico 10. Intervalo e valores médios da concentração Zn nos substratos S1, S2 e S3, em mg/dm <sup>3</sup> .....                    | 68 |
| Gráfico 11. Intervalo e valores médios da concentração C nos substratos S1, S2 e S3, em g/Kg.....                                    | 69 |
| Gráfico 12. Intervalo e valores médios da concentração N nos substratos S1, S2 e S3, em g/Kg.....                                    | 69 |
| Gráfico 13. Distribuição de tamanho de partícula, onde o peso cumulativo foi calculado para 1 kg de amostra para cada substrato..... | 70 |
| Gráfico 14. Retenção de umidade dos substratos S1, S2 e S3 (%).....  | 71 |
| Gráfico 15. Porosidade total, macro e micro para os substratos S1, S2 e S3.....  | 72 |
| Gráfico 16. Intervalo e valores médios de pH nos substratos S1, S2 e S3....  | 73 |
| Gráfico 17. Intervalo e valores médios das concentrações de Al nos substratos S1, S2 e S3, em cmolc/dm <sup>3</sup> .....            | 74 |

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 18. Intervalo e valores médios das concentrações de Ca nos substratos S1, S2 e S3, em $\text{cmolc/dm}^3$ .....  | 75 |
| Gráfico 19. Intervalo e valores médios das concentrações de Mg nos substratos S1, S2 e S3, em $\text{cmolc/dm}^3$ .....  | 75 |
| Gráfico 20. Intervalo e valores médios das concentrações de Na nos substratos S1, S2 e S3, em $\text{mg/dm}^3$ .....   | 76 |
| Gráfico 21. Intervalo e valores médios das concentrações de K nos substratos S1, S2 e S3, em $\text{mg/dm}^3$ .....  | 76 |
| Gráfico 22. Intervalo e valores médios das concentrações de P nos substratos S1, S2 e S3, em $\text{mg/dm}^3$ .....  | 77 |
| Gráfico 23. Intervalo e valores médios das concentrações de T (CTC) nos substratos S1, S2 e S3, em $\text{cmolc/dm}^3$ .....                                     | 77 |
| Gráfico 24. Capacidade de retenção dos substratos S1, S2 e S3 em sucessivas irrigações com intensidade de 8,77 mm/h.....   | 80 |
| Gráfico 25. Capacidade de retenção dos substratos S1, S2 e S3 em ensaio com simulações de precipitação igual 42 mm/h.....  | 81 |
| Gráfico 26. Precipitação x Escoamento (mm; volume acumulado).....  | 82 |
| Gráfico 27. Valores médios de pH durante os ensaios com intensidade de precipitação de 8,77 mm/h e 42 mm/h.....  | 85 |
| Gráfico 28. Valores médios de condutividade elétrica durante os ensaios com intensidade de precipitação de 8,77 mm/h e 42 mm/h.....                              | 86 |
| Gráfico 29. Valores médios de fósforo (P) para os substratos durante os ensaios com intensidade de precipitação de 8,77 mm/h e 42 mm/h.....                      | 87 |
| Gráfico 30. Valores médios de Nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) para os substratos durante o ensaio com intensidade de precipitação de 42 mm/h.... | 88 |
| Gráfico 31. Valores médios de Nitrato ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) para os substratos durante o ensaio com intensidade de precipitação de 42 mm/h.....             | 88 |
| Gráfico 32. Valores médios das concentrações de cálcio (Ca) para os substratos durante os ensaios com intensidade de precipitação de 8,77 mm/h e 42 mm/h.....    | 89 |
| Gráfico 33. Valores médios das concentrações de magnésio (Mg) para os substratos durante os ensaios com intensidade de precipitação de 8,77 mm/h e 42 mm/h.....  | 90 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1. Composição das colunas do pré-ensaio.....  | 54 |
| Tabela 2. Volume percolado por coluna (mL) no pré-ensaio.....                                      | 63 |
| Tabela 3. Composição dos substratos utilizados no teste de colunas.....                            | 66 |
| Tabela 4. Padrões estabelecidos pela FLL (2002) para substratos de telhados verdes extensivos..... | 78 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |  |
|------|--|
| FLL  | Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung—Landschaftsbau |
| DQO  | Demanda química de oxigênio                                  |
| DBO  | Demanda bioquímica de oxigênio                               |
| LWA  | Lightweight aggregate  |
| LECA | Lightweight expanded clay aggregate                          |
| CTC  | Capacidade de troca catiônica                                |
| TV   | Telhado Verde  |

## SUMÁRIO

|         |   |    |
|---------|---|----|
|         | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                     | 15 |
|         | <b>Problemática e Justificativa</b> .....                   | 15 |
|         | <b>Objetivos Geral e Específicos</b> .....                  | 16 |
|         | <b>Organização da Dissertação</b> .....                     | 17 |
| 1       | <b>TELHADOS VERDES</b> .....                                | 18 |
| 1.1     | <b>Caracterização dos telhados verdes</b> .....             | 18 |
| 1.2     | <b>Benefícios do uso de telhados verdes</b> .....           | 20 |
| 2       | <b>COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS</b> .....                       | 25 |
| 3       | <b>MATERIAIS UTILIZADOS</b> .....                           | 34 |
| 3.1     | <b>Biomassa de coco</b> .....                               | 34 |
| 3.1.1   | <u>Aplicações</u> .....                                     | 35 |
| 3.1.1.1 | Produtos “verdes” .....                                     | 35 |
| 3.1.1.2 | Biossorvente.....   | 36 |
| 3.2     | <b>Zeolita</b> .....  | 38 |
| 3.3     | <b>Gel retentor de umidade</b> .....                        | 39 |
| 3.4     | <b>Condicionador de solo</b> .....                          | 40 |
| 3.5     | <b>Fertilizante de liberação lenta</b> .....                | 40 |
| 4       | <b>ESPÉCIE VEGETAL _ <i>Arachis pinto</i></b> .....         | 42 |
| 4.1     | <b>Uso de <i>Arachis Pinto</i> em Telhados Verdes</b> ..... | 44 |
| 5       | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....                             | 48 |
| 5.1     | <b>Matérias-primas dos substratos</b> .....                 | 48 |
| 5.1.1   | <u>Componentes principais</u> .....                         | 49 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 5.1.1.1 | Solo.....   | 49 |
| 5.1.1.2 | Fibra de coco.....  | 49 |
| 5.1.2   | <u>Componentes comerciais</u> .....   | 51 |
| 5.2     | <b>Metodologia</b> .....  | 51 |
| 5.2.1   | <u>Caracterização dos componentes principais</u> .....                            | 51 |
| 5.2.1.1 | Caracterização físico-química do solo.....  | 51 |
| 5.2.1.2 | Caracterização química da palha de coco.....                                      | 52 |
| 5.2.2   | <u>Pré-ensaio de colunas</u> .....  | 53 |
| 5.2.2.1 | Caracterização dos substratos com melhor desempenho no pré-ensaio de colunas..... | 55 |
| 5.2.3   | <u>Estudo da Retenção Hídrica e Lixiviação</u> .....                              | 55 |
| 5.2.3.1 | Teste de colunas.....   | 56 |
| 5.2.3.2 | Análise do Lixiviado.....   | 58 |
| 5.3     | <b>Tratamento Estatístico</b> .....   | 58 |
| 6       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....   | 59 |
| 6.1     | <b>Caracterização dos componentes principais</b> .....                            | 59 |
| 6.1.1   | <u>Caracterização físico-química do solo</u> .....                                | 59 |
| 6.1.2   | <u>Caracterização química da palha de coco</u> .....                              | 61 |
| 6.2     | <b>Pré-ensaio de colunas</b> .....  | 62 |
| 6.2.1   | <u>Caracterização dos substratos S1, S2 e S3</u> .....                            | 66 |
| 6.3     | <b>Estudo da Retenção Hídrica e Lixiviação</b> .....                              | 81 |
| 6.3.1   | <u>Teste de colunas</u> .....   | 81 |
| 6.3.2   | <u>Análise do Lixiviado</u> .....   | 84 |
| 7       | <b>CONCLUSÕES</b> .....   | 97 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 8 | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b> | 100 |
|   | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                     | 102 |
|   | <b>ANEXO I .....</b>                         | 113 |
|   | <b>ANEXO II .....</b>                        | 114 |

## INTRODUÇÃO

### Problemática e Justificativa

Os reflexos da urbanização intensa sobre os processos hidrológicos têm evidenciado os limites das soluções tradicionais de drenagem urbana. Isso decorre da tendência das soluções tradicionais em agravar ou intensificar tais efeitos. Os sistemas tradicionais de drenagem são pouco flexíveis e adaptáveis a mudanças de uso do solo, frequentes em processos intensos de urbanização (NASCIMENTO, 2009). Um dos impactos mais sérios das inundações devido à impermeabilização de superfícies é a deterioração da qualidade da água (superficial e subterrânea) devido à lavagem de ruas, transporte de resíduos sólidos, ligações clandestinas e contaminação de aquíferos (PEREIRA, 2009). Os problemas podem ser anunciados como prejuízos econômicos, prejuízos ao transporte urbano, prejuízos ambientais, proliferação de doenças de veiculação hídrica e perda de vidas humanas.

Telhados verdes, ou ecoroofs, podem ser uma alternativa interessante para a mitigação deste problema dada a enorme quantidade de área de telhados não utilizada, cerca de 40 a 50% das superfícies impermeáveis nas áreas urbanas (DUNNETT e KINGSBURY, 2004). Graças a sua capacidade de armazenagem de água, telhados verdes podem reduzir significativamente o pico de escoamento dos eventos de maior pluviosidade. A redução consiste em retardar o momento inicial de escoamento devido à absorção de água no sistema telhado verde, reduzindo, portanto, o escoamento total pela retenção de parte da precipitação e distribuição do escoamento ao longo de um período de tempo através de uma comunicação relativamente lenta do excesso de água que está temporariamente armazenado nos poros do substrato (MENTENS, 2006).

Os benefícios da utilização de telhados verdes investigados até o momento podem ser agrupados em três categorias: a gestão de águas pluviais, a conservação de energia e a disposição de habitat urbano. Estas funções proporcionadas pelos telhados verdes atuam diretamente sobre os ecossistemas e derivam de três principais componentes do sistema: vegetação, meio de crescimento e membranas impermeáveis. As plantas sombreiam a superfície do telhado e evapotranspiram

água, resfriando a superfície das folhas e reintroduzindo-a ao ciclo hidrológico. O meio de cultivo também contribui para a retenção das águas pluviais e as membranas são responsáveis pela impermeabilização do telhado e impedem a penetração de raízes no telhado (OBERNDORFER et al., 2007).

No Brasil esta tecnologia ainda pouco difundida carece de estudos quanto à composição de substratos que explorem a matérias-primas disponíveis regionalmente. Conhecendo-se a boa capacidade de retenção de umidade da fibra de coco este estudo pretende avaliar seu desempenho quando misturado com outros componentes adicionados com a intenção de otimizar não somente sua capacidade de retenção hídrica como sua função de substrato para a sustentação física e nutricional para o bom desenvolvimento de espécie vegetal.

### **Objetivos Geral e Específicos**

O objetivo principal deste estudo é avaliar a capacidade de retenção hídrica e a qualidade da água de escoamento de diferentes substratos para uso em telhados verdes extensivos.

Os objetivos específicos são:

- ✓ Realizar uma revisão bibliográfica sobre telhados verdes com ênfase na composição de substratos e seu papel no sistema;
- ✓ Realizar uma revisão bibliográfica sobre o uso da *arachis pintoii* em sistemas telhado verde para emprego em futuro experimento em escala piloto viabilizado pelo projeto de pesquisa SANEAMENTO-MCT-MCIDADES-FINEP/CNPq: “REDE MAPLU - Manejo de Águas Pluviais”.
- ✓ Quantificar através de um teste de colunas o volume de água retido por diferentes composições de substratos baseados em biomassa de coco seca e triturada adicionadas a uma mix de solo, turfa, zeolita e gel hidrorretentor;
- ✓ Realizar a caracterização físico-química dos substratos com melhor desempenho no pré-ensaio de colunas;

- ✓ Avaliar qualitativamente a água de escoamento captada na saída das colunas.

## **Organização da Dissertação**

Na introdução são feitas as considerações gerais e relevância do tema além da apresentação dos objetivos geral e específicos.

O Capítulo 1 aborda as características acerca dos telhados verdes e os benefícios do seu uso.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a composição de substratos utilizados em telhados verdes, enquanto o Capítulo 3 aborda a importância da biomassa de coco e suas aplicações.

Uma revisão bibliográfica sobre a utilização da *arachis pinto* em telhados verdes é apresentada no Capítulo 4.

O Capítulo 5 descreve os materiais adotados neste estudo, assim como as metodologias utilizadas para sua caracterização e avaliação do desempenho do sistema construído.

O Capítulo 6 discute os resultados obtidos e os demais capítulos, 7 e 8, finalizam a dissertação com os tópicos: Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros.

## 1. TELHADOS VERDES

### 1.1 Caracterização dos telhados verdes

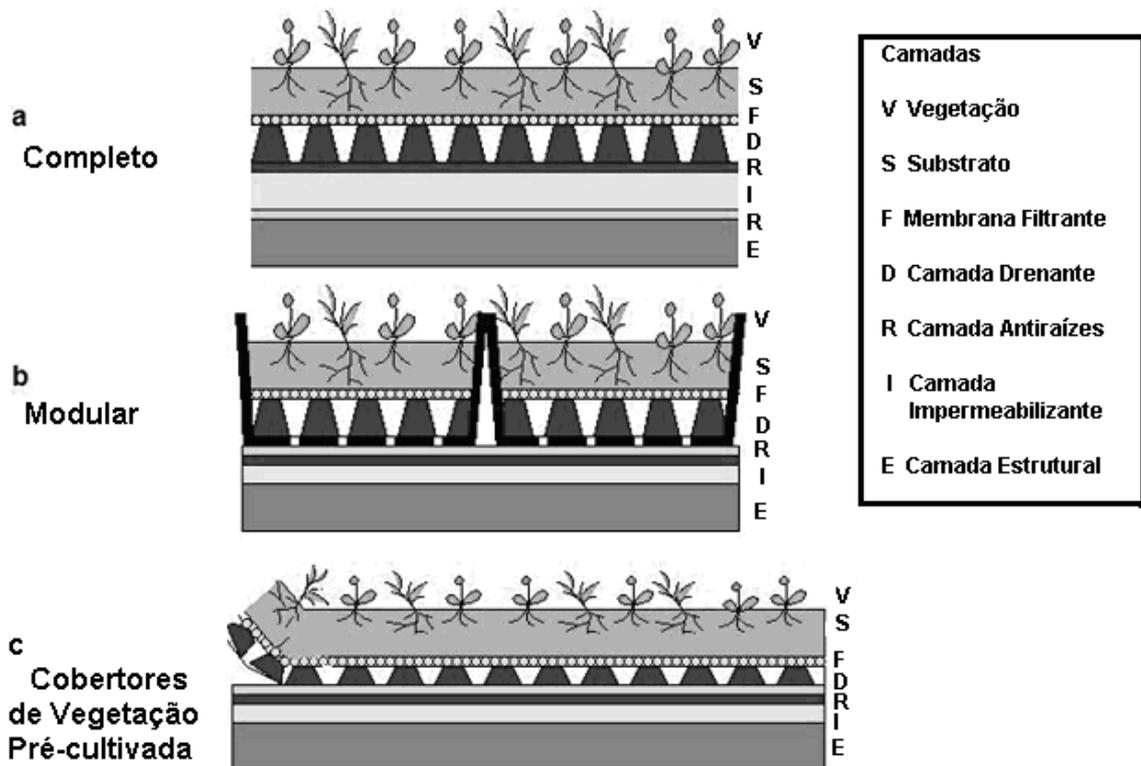
Os telhados verdes são divididos em duas categorias: intensivos e extensivos que diferem entre si principalmente quanto ao porte das espécies vegetais, requisitos de manutenção e profundidade do meio de crescimento.

Os telhados verdes extensivos representam uma sobrecarga na estrutura do telhado de 70 a 170 Kg/m<sup>2</sup> (DUNNETT e KINGSBURY, 2004) sendo adequados para coberturas com pequenas cargas a serem suportadas. A camada de substrato é leve, de alta porosidade, baixa concentração de matéria orgânica e tem profundidade de cerca de 150 mm o qual permite o estabelecimento de espécies vegetais de pouco desenvolvimento radicular. Geralmente empregam-se plantas da espécie *sedum* para a composição predominante e outras comunidades de plantas resistentes ao estresse hídrico e de baixo crescimento. Telhados verdes extensivos podem ser empregados em superfícies inclinadas, com ângulos de até 45° segundo MENTENS *et al.* (2006). Requerem pouca ou nenhuma manutenção, apenas uma capina ou roçada quando necessário. A maioria deste tipo de telhado necessita de pouca ou nenhuma irrigação, dependendo do clima regional. Além da gestão de águas e isolamento térmico também funciona como isolamento ao fogo (OBERNDORFER *et al.*, 2007).

Os telhados verdes intensivos têm uma camada de substrato superior a 150 mm e por suportar espécies vegetais de maior porte necessitam de planejamento em fase de projeto ou de melhorias estruturais na edificação existente, pois representam uma carga adicional de 290 a 970 kg/m<sup>2</sup>. Gramíneas, ervas e arbustos perenes compõem a vegetação (MENTENS *et al.*, 2006), mas não há restrições, exceto aquelas impostas pela profundidade do substrato, o clima, a altura de construção e exposição, e instalações de irrigação. Necessita dos mesmos requisitos de manutenção que um jardim ao nível do solo e a irrigação e fertilização tornam-se indispensáveis na maioria dos casos. Telhados verdes intensivos são funcionais e estéticos, normalmente instalados em telhados com inclinação inferior a 10° (MENTENS *et al.*, 2006), representam um aumento do espaço verde urbano, e,

dependendo do design e acesso, servem como jardins e áreas de recreação, restritos apenas ao limite de carga suportável pela estrutura de sustentação do telhado (OBERNDORFER *et al.*, 2007). Por fim, telhados verdes intensivos têm maior custo de implantação e manutenção do que telhados verdes extensivos.

Um telhado verde é uma estrutura em camadas. A membrana de impermeabilização fica imediatamente sobre a plataforma estrutural do telhado para evitar a entrada de umidade na edificação. Acima desta membrana há uma camada de drenagem que geralmente tem a aparência de uma caixa de ovo perfurada e é projetada para transportar o excesso de escoamento para o telhado, e em alguns sistemas armazena água para as plantas em períodos de seca. Em seguida, uma camada filtrante é instalada para evitar o carregamento de partículas do substrato que comprometam o sistema de drenagem do telhado. Por fim, o substrato e o cultivo associado completam o telhado verde. A Figura 1 (OBERNDORFER, 2007) ilustra os tipos de tecnologia convencional de cobertura verde extensiva. O substrato é muitas vezes um material leve e sintético, que é poroso e inerentemente inerte, com adição de nutrientes para as plantas (BLISS *et al.*, 2009).



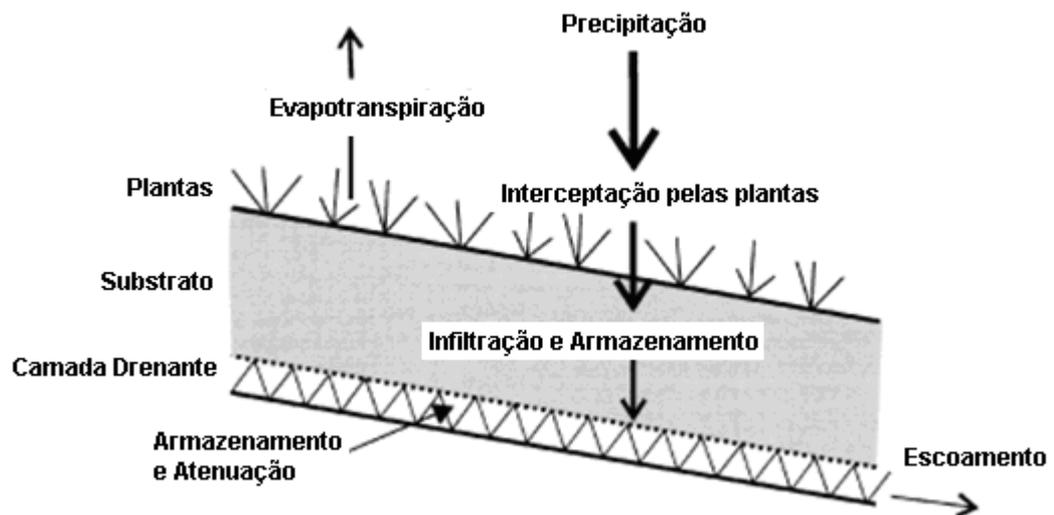
**Figura 1.** (a) Sistemas Completos: cada componente, incluindo a membrana do telhado, é instalado como parte integrante do telhado. (b) Sistemas Modulares:

bandejas de vegetação cultivadas *ex situ* são instaladas acima da cobertura do sistema existente. **(c)** Cobertores de Vegetação Pré-cultivada: meio de cultura, plantas, tapetes de drenagem, e as barreiras de raiz são rolados para a cobertura existente. Fonte: adaptado de OBERNDORFER (2007).

## 1.2 Benefícios do uso de Telhados Verdes

Telhados verdes são ideais para a gestão da água pluvial urbana porque fazem uso da área do telhado existente e evitam o escoamento antes da saída do lote. Os telhados verdes armazenam água durante os eventos de chuva, atrasando o escoamento após o pico de precipitação e retornando para a atmosfera por evapotranspiração (MENTENS *et al.*, 2006; MORAN *et al.*, 2005; OLIVEIRA, 2009). O esquema na figura 2 ilustra este mecanismo de retenção.

Deve-se considerar que fatores como a profundidade do substrato, a inclinação do telhado, o tipo de comunidade vegetal e os padrões de precipitação afetam a taxa de escoamento (DUNNETT e KINGSBURY, 2004; MENTENS *et al.*, 2006; VANWOERT *et al.*, 2005) e apesar de telhados verdes reduzirem o escoamento superficial, eles não resolvem o problema da recarga de águas subterrâneas reduzida em áreas urbanas devido à impermeabilização das superfícies (OBERNDORFER *et al.*, 2007).



**Figura 2.** Processos hidrológicos em um sistema telhado verde. Fonte: adaptado de STOVIN (2010).

Os telhados verdes desempenham uma função de arrefecedores naturais em ambientes construídos. Sob temperaturas elevadas o telhado verde reduz a transmissão de calor através da cobertura vegetal e do substrato para o interior do ambiente. A vegetação diminui o fluxo de calor através da evapotranspiração atuando como uma barreira física da incidência de radiação solar direta e difusa promove o sombreamento do telhado, otimizando o isolamento e a inércia térmica do telhado como um todo. Telhados verdes promovem uma diminuição do fluxo de calor transmitido para o ambiente proporcionando uma poupança de energia elétrica durante o verão (WONG, 2003; CARTER, 2008).

A impermeabilização das superfícies e substituição de áreas vegetadas por construções fornecem as condições necessárias para o efeito Ilha de Calor Urbano que resulta em altas temperaturas e umidade do ar baixa em relação ao das áreas circundantes. Este desconforto é considerado como uma redução da qualidade de vida nas cidades (NIACHOU *et al.*, 2001). Telhados verdes podem reduzir este efeito através do aumento da cobertura vegetal que promoverá o aumento da umidade relativa do ar devido à evapotranspiração (OBERNDORFER *et al.*, 2007).

Telhados verdes proporcionam também benefícios estéticos e psicológicos para as pessoas em áreas urbanas. Mesmo quando os telhados verdes são acessíveis apenas como aspecto visual, os benefícios podem incluir descanso e

restauração do bem estar aos seus frequentadores (HARTIG *et al.* 1991). Outros usos para os telhados verdes incluem a agricultura urbana: a produção de alimentos pode trazer benefícios econômicos e educacionais para os moradores urbanos (PIMENTEL DA SILVA *et al.* 2008). Telhados verdes também reduzem a poluição sonora, absorvendo as ondas sonoras no exterior de edifícios e evitando a transmissão para dentro (DUNNETT e KINGSBURY, 2004; RETERGGHEM e BOTTELDOOREN, 2009).

O papel de telhados verdes na retenção de água da chuva é bem compreendido, mas algumas pesquisas demonstram que o escoamento de telhados verdes inclui aumento dos níveis de nitrogênio e fósforo na água percolada devido à lixiviação do substrato (DUNNETT e KINGSBURY, 2004; MORAN *et al.*, 2005). A matéria orgânica, nutrientes e contaminantes no meio de cultura ou nas membranas dos telhados podem causar uma nova fonte de poluição das águas superficiais (BERNDTSSON, 2009). Investigação sobre substratos mais inertes, e em sistemas de reuso integrado de água cinza, pode levar à redução desses efeitos. Reduzir a adubação de cobertura da vegetação também deve melhorar a qualidade da água da enxurrada, mas pode reduzir o crescimento das plantas ou sua sobrevivência. Logo, a seleção de plantas que otimizam a absorção de nutrientes e contaminantes pode ajudar a reduzir os poluentes presentes no escoamento superficial (OBERNDORFER *et al.*, 2007).

Telhados verdes extensivos, pobres em biomassa, têm pouco potencial para compensar as emissões de carbono das cidades, mas os jardins do telhado verde intensivo, que suportam vegetação lenhosa, podem contribuir de forma significativa como um sumidouro de carbono urbano e outros contaminantes do ar (OBERNDORFER *et al.*, 2007). Estudos comprovaram o efeito de um telhado verde sobre a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> como fator de redução de 2% na região de entorno (LI, 2010), e a capacidade de retenção de carbono pela biomassa e substrato, com o sequestro de 375 g C.m<sup>-2</sup> (GETTER, 2009).

A fauna também é afetada pela utilização de telhados verdes que são geralmente habitados por várias espécies de insetos, incluindo besouros, formigas, moscas, abelhas, aranhas e cigarrinhas (COFFMAN e DAVIS, 2005). O registro de espécies raras de besouros e aranhas em telhados verdes (BRENNEISEN, 2006; GRANT, 2006), sua utilização por aves de nidificação e comunidades nativas aviárias (BAUMANN, 2006), o estabelecimento frequente de plantas raras e líquens

espontaneamente em telhados antigos (BRENNEISEN, 2006; KÖHLER, 2006) representam resultados que têm mobilizado organizações conservacionistas para promover o habitat telhado verde, especialmente na Suíça e no Reino Unido. Além disso, estes resultados têm incentivando a discussão de estratégias de projetos de telhado verde para maximizar a biodiversidade.

A promoção da agricultura urbana e periurbana nos espaços vazios, como telhados e terraços, pode adaptar estas áreas para uso como 'parcelas' de cultivo de alimentos. Todos os resíduos orgânicos podem ser compostados, processados e distribuídos para uso local, criando um ciclo de vida mais saudável. Resíduos alimentares são reduzidos ao mínimo, e a aplicação de métodos sustentáveis orgânicos na agricultura urbana traz benefícios valiosos para a saúde. A população urbana será capaz de se reconectar com a terra, a fonte de nosso sustento diário.

No Reino Unido estima-se que, se eficientemente planejados, até 25% das necessidades alimentares urbanas poderiam realmente ser produzidas localmente (VILJOEN, 2005). Nos climas mais quentes, como em Havana, 50% dos alimentos são produzidos dentro do perímetro da cidade. Entre os benefícios da introdução da agricultura urbana as vantagens de tais políticas são muitas: o alimento localmente crescido viaja uma curta distância da fonte ao descarte, sendo, portanto, mais fresco e mais nutritivo; as pessoas que vivem nas cidades podem cultivar os alimentos de sua escolha em hortas comunitárias; crianças urbanas têm a oportunidade de aprender em primeira mão sobre hortaliças e frutas, em especial se as escolas adotarem a idéia de hortas “suspensas” em suas edificações. Resíduos de cozinha, em vez de acabarem no aterro, como acontece atualmente, podem ser compostados localmente. E o mais importante, a saúde física e mental das populações urbanas melhoraria, como ficou evidente nos últimos anos em Cuba (COMMUNITY SOLUTIONS, 2006).

A revisão bibliográfica sobre telhados verdes com ênfase na composição de substratos permitiu uma visão geral acerca das características que os substratos devem atender para aplicação sobre coberturas. As referências presentes no capítulo “Composição de Substratos”, distribuem-se nas categorias: caracterização; benefícios térmicos; gestão de águas pluviais; benefícios estético-psicológicos; qualidade do ar; aumento da biodiversidade; qualidade da água na saída do lote; geração de renda; conservação de energia e agricultura urbana. Foram observadas orientações sobre: pH, carga adicional sobre a estrutura do telhado; influência da

inclinação; teor de matéria orgânica; porosidade; profundidades da camada de substrato; lixiviação de metais e nutrientes; capacidade de retenção de água; materiais e espécies vegetais utilizadas.

## 2. COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS

De uma forma geral os principais critérios para composição de sistemas de substratos são: a granulometria; a proporção do material orgânico; resistência mínima às intempéries, estabilidade estrutural, permeabilidade de água, máxima capacidade de retenção de água, nutrientes satisfatórios, boa aeração e um pH ideal para o cultivar a ser introduzido (em média entre 6,0 e 7,0). Geralmente, um substrato não é adequado para todos os locais. Uma mistura adequada deve ser escolhida com referência à localização, clima e espécies que serão plantadas. Disponibilidade e custo de materiais são outros fatores a considerar (MOLINEUX, 2009; HUERTA, 2009; LATSHAW, 2009).

JOHNSTON (1996) em seu livro 'Building Green: A guide to using plants on roofs, walls and pavements', afirma que para melhorar a retenção de água e a estrutura do substrato, outros materiais podem ser acrescentados como materiais orgânicos (vários substitutos de turfa) ou materiais inorgânicos como perlita ou vermiculita. No entanto, SCRIVENS (1989) adverte que a estrutura do substrato pode ser danificada no transporte ou por excesso de mistura com outros materiais. Logo, o substrato deve ser manuseado com cuidado em todas as etapas e os materiais orgânicos e inorgânicos devem ser adicionados em quantidades mínimas. Cuidado também é necessário para garantir que os substratos permaneçam suficientemente pesados para proporcionar bom ancoradouro para as plantas, reter a água, segurar nutrientes e não susceptíveis a ventos fortes.

Alto teor de matéria orgânica no substrato pode levar à contaminação considerável de nutrientes na água de escoamento. Vale lembrar que a vegetação que morre a cada ano forma húmus e aumenta o nível de nutrientes, mas este processo é muito lento. A poeira e a chuva absorvida pela vegetação do telhado irão conter vários minerais o que também aumenta lentamente os níveis de nutrientes do substrato. Os possíveis efeitos negativos da adubação em telhados verdes devem ser levados a sério, a fim de não danificar a imagem positiva dos telhados verdes devido à contaminação da água de escoamento (EMILSSON, 2007).

Substratos com níveis baixo a médio de fertilidade podem encorajar uma comunidade vegetal mais diversificada, reduzindo a probabilidade de espécies dominantes agressivas (DUNNETT e KINGSBURY, 2004). Segundo JOHNSTON

(1996), o substrato ideal será composto de 30-40% de partículas sólidas, 60-70% do volume de poros, sendo 35-45% para incorporar água e 15-25% para aeração. O pH deve ser ligeiramente ácido, com um valor de cerca de 6,0. Os substratos que são muito ricos podem ser misturados com uma proporção de areia. Os substratos pesados podem ser atenuados por meio da adição de uma proporção de grânulos de argila leve. Ao se utilizar solo para composição do substrato as camadas superficiais devem ser evitadas para misturas, pois tendem a ser infestadas com sementes de ervas daninhas, portanto deve ser utilizada terra de camadas mais profundas.

JOHNSTON (1996) defende o uso de materiais já disponíveis no local, tanto por razões ecológicas quanto econômicas. Substratos como areia e cascalho, ou resíduos de tijolo esmagados, entulho e concreto, podem ser usados para complementar os materiais orgânicos utilizados no telhado. Isso permite a reutilização de materiais descartados como entulho, reduzindo assim os custos de transporte, os requisitos de aterro e produção de novos materiais. Os materiais típicos adicionados à mistura de substratos são: solo superficial estéril, subsolo, areia, grânulos de argila, pedregulho ou cascalho (16 a 32 mm), "clinker" (tijolo vermelho moído, concreto etc), substitutos de turfa (cascas e folhas compostadas, fibra de coco, etc). JOHNSTON (1996) recomenda profundidades de: 10 a 20 mm para vegetação auto-estabelecida e musgo; 30 a 50 mm para suculentas e outras plantas de baixo desenvolvimento radicular; 50 a 200 mm para gramíneas, herbáceas e flores silvestres. Como consequência das camadas finas, os sistemas permanecem secos por longos períodos e, portanto, só podem suportar as espécies tolerantes à seca (MONTERUSSO *et al.*, 2005).

KÖLB (1983) testou mais de 50 diferentes misturas para substratos e identificou várias que são particularmente adequadas para uso em telhados: 50% de compostagem + 50% de grânulos de argila; 60% de grânulos de argila (4-8 mm) + 25% de grânulos de argila (<4 mm) + 10% de Vermiculita + 5% de bentonita de cálcio; 100% Hygromix (substrato alemão pré-misturado). Este autor também sugere uma cobertura de 20 mm de tijolo, pedra ou grãos de lava (2-5mm) na superfície para ajudar a dissuadir as plantas não desejadas, especialmente plantas daninhas agressivas ou mudas de árvores. A palha também é útil para reduzir a perda de água por evaporação do substrato. Também é boa prática regar o substrato com água várias vezes antes do plantio para estimular a sedimentação, isso é

particularmente importante para os substratos com teor de matéria orgânica substancial.

Até mesmo areia pura pode ser utilizada como substrato. Esta tem sido empregada com sucesso em telhados verdes, em Berlim, onde 100 mm de areia são colocados sobre as camadas de impermeabilização adequadas, isolamento e feltros, e então encharcada. A areia é mantida úmida durante algumas semanas enquanto a cultura se enraíza, depois, ela é autossustentável. A carga adicional sobre o telhado é outro fator importante que deve ser considerado na composição do substrato, pois cada telhado tem uma capacidade particular de carga. A adição de vegetação e todas as camadas associadas de impermeabilização e isolamento irão adicionar peso considerável. Em alguns casos, o telhado já estará suficientemente forte, em outros, o telhado precisa de reforço. JOHNSTON (1996) exemplifica algumas cargas associadas com telhados verdes (para cada centímetro de profundidade do substrato saturado, em  $\text{kg/m}^2$ ): de 16-20 para solo; de 20-22 para areia; de 16-18 para cascalho; de 7-9 para solos normais; 3 para argila expandida (com diâmetro de 8-16 mm); 5 para turfas.

Quanto à retenção hídrica pesquisas mostram que a profundidade do substrato é o principal determinante da retenção de enxurrada (MENTENS *et al.*, 2005). No entanto, a disponibilidade de água e a estação afetam a capacidade do meio de cultura para reter água. Quando a água é facilmente disponível, as taxas de evapotranspiração são muito maiores nos telhados com vegetação do que em telhados com meio de cultura por si só, especialmente no verão (FARZANEH, 2005).

Embora as plantas sejam um componente importante de telhados verdes, trabalho de VANWOERT (2005) mostra que o substrato sozinho pode reduzir bastante o volume de escoamento de um telhado verde. Neste estudo o substrato sozinho reduziu o escoamento em aproximadamente 50% em comparação com um telhado de cascalho convencional; o acréscimo de vegetação resultou em reduções insignificantes.

VANWOERT (2005) avaliou em dois estudos a capacidade de retenção de águas pluviais através de diferentes composições de coberturas. No primeiro estudo foi utilizado um telhado comercial padrão com cascalho, um telhado verde extensivo sem vegetação e um telhado verde extensivo com vegetação. Para todos os tipos de cobertura a capacidade de retenção hídrica variou de 48,7% (cascalho) a 82,8% (telhado vegetado). No segundo estudo foi analisado a influência da inclinação

(entre 2 e 6,5%) e profundidade da camada de substrato (2,5, 4,0 e 6,0 cm) em plataformas com telhados verdes extensivos vegetados instalados. Plataformas com 2% de inclinação e 4,0 cm de profundidade mostraram maior eficiência na retenção hídrica, 87%, embora a diferença para os outros tratamentos tenha sido mínima. Neste experimento o substrato era composto de 40% de argila expandida, 40% de areia, 10% de turfa, 5% de dolomita, 3,33% de compostagem de resíduos de jardim e 1,67% de compostagem de cama de frango, em volume. O peso saturado foi igual a 150 kg.m<sup>2</sup>. Na época do plantio, a condutividade elétrica e pH dos substratos foram 0,33 S.m<sup>-1</sup> e 7,9 respectivamente. Todas as seções das plataformas, com exceção a de cascalho, continham 100 g.m<sup>2</sup> de Nutricote Tipo 100 (20N - 7P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 10K<sub>2</sub>O), fertilizante de liberação controlada aplicado à mão no momento do plantio. As demais camadas constituintes do sistema telhado verde utilizado (impermeabilização, drenagem, filtro de partículas) foram produtos comerciais disponíveis.

DRAMSTAD *et al.* (1996) demonstraram que as propriedades físicas e químicas do substrato de cultivo, bem como a cobertura vegetal ajudam a controlar o nitrogênio, fósforo e poluentes gerados por atividades industriais que se depositem na superfície do telhado. Em alguns casos, essas substâncias podem ser assimiladas pelas próprias plantas (Johnston, 1996), mas na maioria das vezes os metais pesados e nutrientes que existem em águas pluviais são ligados no substrato do telhado verde ao invés de serem lançadas no segundo turno.

JOHNSTON (1996) concluiu que mais de 95% de cádmio, cobre e chumbo e 16% de zinco podem ser removidos do escoamento de águas pluviais através de ligação e captação no substrato. No entanto, BERNDTSSON *et al.* (2006) concordam que, teoricamente, telhados verdes podem atuar como filtros, adsorvendo poluentes, mas também podem vir a contribuir com os poluentes liberados para a água do solo, plantas e fertilizantes. As alterações dos parâmetros físico-químicos, como pH, podem influenciar a adsorção de, por exemplo, alguns metais pesados, causando sua liberação para a água de escoamento. Durante os períodos de maior evapotranspiração a carga de poluição proveniente de telhados verdes será reduzida, no entanto, as chuvas seguintes podem causar a liberação das substâncias precipitadas no telhado verde. De acordo com os resultados de um estudo realizado em dois modelos de telhados com vegetação em Karlsruhe,

Alemanha (STEUSLOFF, 1998), a capacidade de retenção de metais pesados depende essencialmente da capacidade de retenção de água.

No estudo realizado por BERNDTSSON (2006) os seguintes metais e nutrientes foram investigados a fim de se analisar a qualidade da água percolada por um telhado verde: Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Pb, Zn, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, Tot-N, PO<sub>4</sub>-P, e Tot-P. O substrato utilizado foi uma mistura disponível comercialmente de lava triturada, solo calcário natural, argila e turfa desfiada, concebido para as normas German FLL, 2002 (FLL, 2002: Orientações para o planejamento, execução e manutenção de telhados verdes).

NICHOLSON (2009) comparou a qualidade da água captada de um telhado verde e uma cobertura galvanizada. Ele demonstrou que uma quantidade substancial e significativa de lançamentos de zinco e cobre é proveniente do telhado galvanizado e de dois telhados revestidos de madeiras, respectivamente. A concentração no escoamento do telhado durante o primeiro ano de vida indica potencial preocupação com toxicidade de zinco e cobre tanto na água quanto potencial acúmulo no solo. Na avaliação da qualidade da água captada pelo telhado verde verificou-se uma pequena contribuição de poluentes na enxurrada. Neste estudo o substrato foi constituído de 42,5% de xisto expandido de grau médio, 42,5% de xisto expandido de grau fino, 10% de turfa e 5% de carvão ativado granular.

ASLUP (2010) realizou estudos de lixiviação de metais de substratos a fim de verificar se estes são fontes de Cr, Cu, Cd, Fe, Mn, Ni, Zn e Pb, na água de escoamento. Coletivamente, os resultados sugeriram que as mudanças nas condições biogeoquímicas nos sistemas de telhado verde podem alterar a solubilidade dos metais, diminuindo a lixiviação de alguns elementos e aumentando a lixiviação dos outros. O primeiro objetivo de Aslup foi caracterizar o conteúdo e a intercambialidade de metais e micronutrientes em vários substratos considerados para inclusão em sistemas de telhado verde. Esses substratos foram: cinzas de carvão, rocha de lava, Lassenite, ardósia expandida e argila expandida. Lassenite e cinza de carvão são os materiais que foram doados por fornecedores interessados em determinar se estes materiais seriam substratos adequados para os sistemas de telhado verde. O segundo objetivo foi examinar o potencial de lixiviação dos elementos destes substratos para começar a avaliar se estes materiais podem ser fontes de poluentes em sistemas de telhado verde. O experimento de lixiviação simultaneamente dirigiu-se ao terceiro objetivo, que considerou se a presença de

uma planta, *Sedum "immergrauch" hybridum*, alterou as características de lixiviação desses elementos dos substratos. Também está incluído neste experimento um composto de casca de pinus, que é um material orgânico prontamente disponível acrescentado a alguns sistemas de cobertura verde, como um condicionador do solo para aumentar o teor de matéria orgânica e capacidade de retenção de água do substrato.

EMILSSON (2007) investigou os efeitos da adubação em telhados verdes extensivos. Seu estudo mostra claramente que os adubos convencionais devem ser evitados a menos que a água seja reciclada ou reutilizada nos telhados ou outras superfícies vegetadas na primeira semana após adubação. Os sistemas utilizados tiveram 3-5cm de substrato de crescimento composto de material inorgânico de baixa densidade com capacidade de retenção de água de grande porte, tais como escória, pedra-pomes ou lava (ROTH-KLEYER, 2001).

TEEMUSK (2007) a fim de estudar a quantidade e a qualidade da água de escoamento em um telhado verde extensivo durante eventos pluviométricos de curta duração utilizou uma camada de substrato de 100 mm com 66% de LWA (lightweight aggregate \_ agregados leves), 30% de húmus e 4% de argila. O LWA no telhado verde teve um efeito considerável - positivos e negativos - sobre a qualidade da água da enxurrada. Isto depende claramente do caráter do segundo turno: quanto mais lento o ritmo do escoamento superficial, maior a concentração de N-total,  $\text{NH}_4\text{-N}$  e material orgânico (após  $\text{DBO}_7$  e DQO) na água da enxurrada. A concentração de P total não variou significativamente em relação à descarga de água. O LWA no telhado verde geralmente atua como um dispositivo de armazenamento: os poluentes se acumulam na camada de substrato e são liberados quando a água da chuva intensa os lava. É também evidente que o material utilizado na camada de substrato tem uma influência importante na qualidade do escoamento. Como as medições mostraram o escoamento do telhado verde sempre contém mais sulfatos e sal Ca-Mg, devido à presença do material LWA.

Em BLISS *et al.* (2009) o meio crescente sintético utilizado foi de 14 cm de espessura, feito principalmente de xisto expandido, perlita, e casca de coco. Os vegetais foram principalmente *sedums* para um telhado verde extensivo. Seu estudo utilizou um protótipo de telhado verde extensivo a fim de demonstrar a diminuição do volume da água de escoamento em eventos de tempestade combinados com eventos de transbordamento de esgotos. O protótipo reteve 70% do volume de

enxurrada para chuvas de 15 mm ou de menor intensidade. O telhado verde neutralizou ligeiramente a chuva ácida e na maioria dos eventos atrasou o pico de enxurrada, embora níveis de fósforo e DQO (demanda química de oxigênio) tenham sido elevados na água de escoamento.

Em DUNNETT *et al.* (2008a) o substrato de 100 mm utilizado era composto de tijolo vermelho esmagado e 10% de composto de resíduos verdes. Seu estudo avaliou a influência da composição da vegetação sobre a retenção do escoamento em dois experimentos simulados de telhado verde. Em ambos os casos, a composição da vegetação afetou significativamente tanto quantidades de água retida como água liberada do sistema.

Em outro trabalho de DUNNETT *et al.* (2008b) um meio de crescimento simples e leve foi usado, composto por 50% LECA (Lightweight expanded clay aggregate \_ grânulos de argila expandida leve), em volume, 35% de composto de resíduos verdes e 15% de argila média. Uma estrutura de madeira simples foi usada para construir seis camas de teste (cada medindo 1,5 x 3,0 m) que continham o substrato de crescimento. Neste estudo o autor avaliou a influência da profundidade da camada de substrato sobre o desenvolvimento de quinze espécies de gramíneas perenes herbáceas ao longo do período de 2001 a 2006 utilizando parcelas de 100 mm e 200 mm de profundidade. Verificou-se sobrevida maior, diversidade, tamanho e desempenho de floração das espécies plantadas ocorreram nos 200 mm de profundidade. Solo nú e cobertura de musgo foram maiores a 100 mm, assim como a diversidade de espécies colonizadoras.

GIBBS (2006) avaliou o desempenho de sistemas telhado verde com diferentes espécies sedum, substratos e tratamentos com fertilizantes. Foram quatro os substratos utilizados: argila expandida, ardósia expandida, pedra-pomes e lava. O meio de cultura teve pouco efeito sobre o índice de crescimento da planta, mas teve algum efeito sobre a percentagem de cobertura vegetal do telhado. Em 10 semanas, o substrato composto de pedra-pomes teve a melhor cobertura de telhado e desenvolvimento das plantas.

TEEMUSK (2009) avaliou o potencial de um telhado verde extensivo para a redução das flutuações de temperatura de uma membrana de telhado na Estônia. Neste estudo a camada de substrato de 100 mm era constituída de 66% de LWA (agregados leves), 30% de húmus e 4% de argila. Seus resultados demonstraram

que sistemas telhado verde diminuem consideravelmente as flutuações de temperatura no interior de um ambiente.

OLIVEIRA (2009) utilizou uma camada de 100 mm de substrato agrícola comercial BIOMIX<sup>®</sup> (composto orgânico, casca de pinus compostada, vermiculita expandida, enriquecida e neutralizada quimicamente). Seu experimento utilizou uma tecnologia adaptada dos telhados verdes para edificação popular (telhado de fibrocimento), com o objetivo de verificar aspectos construtivos, possíveis espécies com potencial de geração de renda, custos, efeitos no retardo do escoamento superficial das águas pluviais e outros benefícios associados a questões climáticas locais e de conforto do ambiente interno.

CHEN (2009) avaliou o desempenho de telhados verdes como uma adaptação às mudanças climáticas. A mistura de substrato de 125 mm no telhado verde experimental foi desenvolvida pela Universidade de Melbourne e consistiu de dois tipos de escória, areia e compostagem de coco e turfa.

PHILIPPI (2006) investigou os custos ligados à adoção de sistemas telhados verdes e verificou que a maior diferença está nos preços do substrato. Na Alemanha os preços mais baixos dos meios de crescimento são devido à disponibilidade dos recursos naturais, materiais leves como a rocha de lava e produtos de pedra-pomes e também de reciclados como tijolos esmagados. A mídia é o único material onde as distâncias de transporte realmente importam. Mesmo se o sistema TV está localizado próximo ao seu projeto, o transporte é um fator crucial, já que a maioria dos componentes tem que ser transportados a longa distância até chegar ao seu local de fabricação.

MOLINEUX *et al.* (2009) caracterizaram quatro materiais residuais recicláveis para uso como substratos em telhados verdes extensivos: tijolo vermelho esmagado (substrato padrão na indústria do Reino Unido, portanto, utilizado como controle) e três pellets alternativos feitos a partir de barro e lodo de esgoto (resíduos provenientes de escavações de argila, cinzas e lamas), cinzas de papel (de jornais reciclados) e agregados calcários carbonatados (resíduos de pedreira). Investigações sobre o teor ótimo de matéria orgânica \_ compostagem de casca de árvores para nutrir as plantas\_ e características como pH, distribuição granulométrica, densidade global, densidade das partículas e análises dos lixiviados foram realizadas. Experimentos em estufa mostraram interações significativas entre os quatro agregados e a quantidade de material orgânico adicionado, o que significa

que a adição de orgânicos não têm o mesmo efeito sobre o crescimento da planta em cada agregado. A adição de compostos orgânicos também reduziu significativamente o pH dos agregados reciclados, aumentando as condições mais favoráveis para as plantas nesses substratos. Resultados de densidade mostraram que todos os materiais foram classificados como agregados leves e análise de lixiviação confirmou que todos os substratos foram executados dentro de limites legais de lixiviados para a água potável.

HUERTA (2009) testou a adequação de substratos para telhados verdes utilizando materiais locais: solo local adicionado de composto orgânico, argila expandida adicionada de xisto e concreto reciclado moído adicionado de composto. Foram utilizadas parcelas experimentais com profundidades de 12,0 e 21,0 cm. HUERTA (2009) analisou dados de temperatura e características relacionadas ao crescimento vegetal. Seus resultados indicam que estes substratos podem ser utilizados como suporte para o estabelecimento de vegetação sobre telhados, além de fornecerem informações sobre design sustentável de telhados verdes.

NELSON (2010) testou três substratos para avaliar qual se adaptaria melhor a espécies sedum. Foram utilizados módulos Aqualok<sup>®</sup> que é composto de um material polietileno de alto peso molecular derivado de plástico reciclado; módulos comerciais da Skyland<sup>®</sup>, cujo substrato visa principalmente a retenção hídrica e é composto de material granular derivado de fontes naturais; e o terceiro substrato foi um material granular produzido pela Roofscapes Inc. of Philadelphia. Seus resultados mostraram que as espécies sedum utilizadas se desenvolveram melhor em substratos de maior granulometria e com maior teor de matéria orgânica.

### 3. MATERIAIS UTILIZADOS

#### 3.1 Biomassa de coco

O coqueiro (*cocos nucifera*) é um membro da família *Arecaceae*. É cultivado em todo o mundo nas regiões de clima tropical e sustenta milhões de pessoas nas áreas costeiras. Também é chamado de “árvore da vida” pela grande variedade de usos da planta e fruto. O óleo de coco é o sétimo óleo vegetal mais importante do mundo utilizado em produtos alimentares, bem como para outros fins (BHATNAGAR *et al.*, 2010).

Nos principais países produtores, Índia e Sri Lanka, por exemplo, o coqueiro é explorado basicamente para produção de copra (albúmen sólido desidratado a 6%) e óleo. Já no Brasil, a produção de coco é empregada quase que exclusivamente para consumo humano (uso doméstico e água de coco) ou através de produtos industrializados (coco ralado, leite de coco, etc.).

Como subprodutos do uso e da industrialização da água de coco ou da parte carnosa comestível, as cascas de coco verde são resíduos com alto potencial de aproveitamento. A obtenção de produtos a partir desta biomassa tem encontrado espaço e vem sendo desenvolvida, ainda que muito mais por questões econômicas do que ambientais. Mas, com poucas ações implementadas no Brasil as cascas de coco verde são correntemente designadas aos aterros ou deixadas para trás como cobertura do solo ou por vezes utilizadas como fertilizantes devido ao seu elevado teor de potássio.

O consumo de coco vem aumentando no país: só na cidade do Rio de Janeiro foi constatado um consumo diário médio (inverno/verão) de 420 mil cocos. Cerca de 80 a 85% do peso bruto do coco verde é considerado lixo. Logo, se cada coco gera 1,5 kg de lixo, 630 toneladas/dia deste “lixo” são geradas e descartadas inadequadamente, com o agravante de ser um resíduo de difícil decomposição, levando mais de oito anos para sua completa biodegradação (Projeto COCO VERDE, 2011).

### 3.1.1 Aplicações

#### 3.1.1.1 Produtos “verdes”

Segundo PASSOS (2005) a fibra da casca de coco verde possui características peculiares que pode, por exemplo, ser usada na formulação de compósitos de grande valor ambiental, como os bioplásticos ou fornecer matéria prima para obtenção de resinas naturais. O autor elaborou um produto composto de papel reciclado e de fibras de coco e impermeabilizado com cimento asfáltico, com o objetivo de uso como cobertura em ambientes construídos. O produto foi denominado de “telha ecológica”. Neste estudo foi investigada ainda a possibilidade de utilização das fibras de coco verde em chapas de partículas, com substituição parcial da madeira de pínus por fibras de coco verde e os resultados foram promissores.

CARRIJO (2002) defende o uso da fibra da casca de coco verde como substrato de boa qualidade para a produção de mudas, devido a sua facilidade de produção, baixo custo e alta disponibilidade. Em seu trabalho o uso do substrato da fibra de coco verde na produção de tomate em casa de vegetação, alcançou, em termos absolutos, 13,2 kg m<sup>-2</sup> de frutos comerciais (média de 3 anos) cerca de 7,3% mais que o segundo melhor substrato, o pó de serra com 12,3 kg.m<sup>-2</sup>. Existem diversos trabalhos que estudaram o papel da fibra ou pó de coco verde na composição de substratos para a produção de mudas (LOPES, 2004a; ARAÚJO, 2010; KRATZ, 2011).

No Rio de Janeiro o Projeto Coco Verde, onde são desenvolvidos produtos cuja matéria prima é o coco verde reciclado, produz em escala industrial mais de 100 produtos, entre os quais: vasos, placas e palitos para paisagismo, forragem, substrato, material de decoração, placas acústicas e térmicas, etc. Alguns dos produtos do coco verde reciclado substituem, com inúmeras vantagens, artefatos produzidos com o xaxim, que em extinção, tem sua extração regulamentada por lei. Neste caso, o Projeto Coco Verde contribui com a preservação ambiental e oferece alternativa vantajosa para vários segmentos que têm o xaxim como componente de seus produtos. Outro produto interessante deste projeto são os componentes para coberturas vegetadas que são bandejas em fibra de coco fornecidas nas medidas

40x40x7 cm com 5,0 cm de profundidade e 40x40x11cm com 9,0 cm de profundidade.

Outra possibilidade para o uso de fibra de coco é a fabricação de briquetes. Os briquetes são fabricados a partir da compactação a alta pressão e/ou alta temperatura de resíduos ricos em lignina a qual sofre “plastificação” e atua como aglomerante natural dos resíduos ligno celulósicos. SILVEIRA (2008) realizou uma estimativa dos custos de coleta e disposição das cascas de coco verde em uma determinada região turística da orla de Salvador, Bahia, e verificou o potencial aproveitamento destes resíduos para a produção de briquetes neste município. A produção de briquetes de cascas de coco verde implicaria não somente a redução dos impactos causados com a disposição destas cascas como também contribuiria para a preservação da vegetação nativa devido à substituição da lenha por este produto.

As fibras de coco verde podem produzir mantas retentoras de sedimentos, sendo trançadas em malhas de nylon, telas de polipropileno, jutas ou borrifadas com látex. São usadas em superfícies sujeitas a erosão provocada pela ação de chuvas e ventos, suportando até quatro vezes o seu peso em água, ajudam no controle da erosão até o estabelecimento completo da vegetação.

### 3.1.1.2 Biossorvente

O carvão ativado é considerado como o adsorvente universal para o tratamento de efluentes sendo comumente usado na remoção de vários poluentes da água. No entanto seu uso generalizado é restrito devido ao seu alto custo.

Entre os resíduos agrícolas pesquisados para a produção de carbono ativado, a palha de coco apresentou grande potencial para a remoção de diversos poluentes aquáticos (BHATNAGAR, 2010). As cascas de coco podem ser utilizadas de forma eficiente na produção de carvão ativado. A carbonização de uma tonelada de cascas de coco produz 300 Kg de carvão, o que pode ser convertido em 120 Kg de carvão ativado (BHATNAGAR, 2010).

A produção mundial de fibra de coco varia entre 5 e 6 milhões de toneladas ao ano e menos de 10% deste rendimento é direcionado para a comercialização

(VAN DAM, 2002). A utilização do coco verde como material sorvente apresenta grande potencial devido à sua composição. A palha de coco consiste em 35,0% de celulose, 25,2% de lignina, 7,5% de pentosanas, 1,8% de gorduras e resinas, 8,7% de cinzas, 11,9% teor de umidade e 10,6% de outras substâncias (DAN, 1993).

Segundo PINO (2005), a capacidade de remoção de metais pelas fibras de coco depende da composição química da sua superfície, onde grupos funcionais ativos são responsáveis pela sorção. PINO (2005) determinou a capacidade de adsorção da casca de coco para diferentes metais pesados e obteve altas percentagens de remoção para o Cd, Cr (III) e Cr(VI) dentre as seis espécies metálicas estudadas (As(V), Cd, Cr(III), Cr(VI), Ni e Zn). Seus resultados mostraram que a casca de coco apresenta as características apropriadas para o processo de biossorção de cádmio, cromo (III) e cromo (VI) e que pode ser utilizada como uma alternativa aos processos clássicos de destoxificação de efluentes. Diversos trabalhos apontam a viabilidade da utilização do coco verde como material adsorvente para a adsorção de metais pesados presentes nos efluentes industriais (SANTOS *et al.*, 2005; YAMAURA *et al.*, 2007; SOUSA *et al.*, 2007).

SCHNEIDER (2008) avaliou em seu estudo a capacidade de adsorção de fenóis em solução aquosa sobre carvão ativado preparado quimicamente a partir do endocarpo de coco. O carvão utilizado mostrou-se um adsorvente promissor e em comparação com o carvão ativado comercial apresentou resultados próximos, com o benefício adicional de ser uma matéria-prima de baixo custo.

O coco verde pode ser ainda utilizado como material adsorvente na remoção de corantes (LEAL, 2003), fármacos poluentes (BELISÁRIO *et al.*, 2009) e no tratamento de água para a remoção de compostos orgânicos e inorgânicos presentes nas águas de abastecimento público conforme estudado por FERNANDES (2010).

BHATNAGAR (2010) revisou a literatura sobre o desempenho da casca de coco como adsorvente de diversos poluentes da água. Seu estudo oferece uma visão geral das capacidades de sorção de vários biossorbentes baseados em coco focando diferentes poluentes (metais, corantes, poluentes fenólicos, ânions inorgânicos, radionuclídeos e outros poluentes, como PAHs e atrazina, que é um herbicida).

O processamento da casca de coco diminui, consideravelmente, os transtornos ambientais provocados pelo seu descarte em lixões ou aterros

sanitários, reduzindo o acúmulo de resíduos sólidos que contribuem na transmissão de doenças por meio de vetores como moscas, mosquitos, baratas e roedores os quais encontram nos resíduos as condições adequadas para proliferação.

Esta pequena revisão sobre a biomassa de coco e suas aplicações permite um melhor entendimento sobre o descarte das cascas de coco e as formas de reciclagem/reuso deste material. Além dos benefícios ambientais proporcionados com a promoção dos produtos baseados em cascas de coco, a capacidade de adsorver determinadas substâncias poluentes permite o uso deste material como bioadsorvente e devido a estas propriedades as cascas de coco têm sido utilizadas no tratamento de efluentes industriais como matéria-prima de baixo custo para a fabricação de carvão ativado.

### 3.2 Zeolita

Segundo o *Subcommittee on Zeolites of the International Mineralogical Association*, zeolita é definida como toda substância cristalina com estrutura caracterizada pela presença de tetraedros interligados, cada consistindo de quatro átomos de oxigênio envolvendo um cátion. Essa estrutura contém cavidades e canais normalmente ocupados por moléculas de água e cátions trocáveis (MONTE et al., 2005).

Dentre as características importantes das zeolitas destaca-se que, quando desidratadas, possuem baixa densidade e grande volume de vazios, com canais relativamente uniformes, além de, em geral, manterem a estabilidade da sua estrutura cristalina. Essas propriedades favorecem seu uso como peneiras moleculares, isto é, podem, seletivamente, separar moléculas de acordo com suas formas e/ou tamanhos (RESENDE et al., 2008).

Uma das principais propriedades das zeolitas é a elevada capacidade de troca catiônica (CTC). A CTC é uma medida do número de cátions, por unidade de peso, disponíveis para troca por outros cátions. É normalmente expressa em miliequivalentes por 100 g de material.

Segundo Resende (2008) a elevada CTC e o alto poder de adsorção conferem às zeolitas, entre outras aplicações, a capacidade de recuperar áreas

contaminadas por petróleo, óleo combustível e gasolina; tratar águas contaminadas por metais pesados; tratar águas de drenagens ácidas de minas; solidificar e estabilizar rejeitos venenosos, além de tratar águas poluídas por material orgânico.

As zeolitas podem ainda desempenhar a função de condicionadores de solos, devido sua habilidade para retenção de água e a capacidade de armazenar nutrientes como nitrogênio, potássio e fósforo, liberando-os lentamente, além de proporcionarem maior aeração do solo. Logo, por apresentar boa capacidade de adsorção e dessorção de nutrientes as zeolitas podem ser empregadas na agricultura, pois reduzem a perda por lixiviação de nutrientes para o subsolo, representando conseqüentemente uma economia com fertilizantes e proteção ambiental.

Neste estudo foram utilizadas 50,0 g de zeolita cubana para cada dm<sup>3</sup> de composição de substrato.

### **3.3 Gel retentor de umidade**

Trata-se de um copolímero orgânico retentor de água que deve ser incorporado ao solo ou substrato, aumentando a capacidade de retenção de água e nutrientes, armazenando e liberando-os de forma gradativa para a planta. Este produto quando em contato com a água, se expande rapidamente, resultando na formação de um gel.

Esta importante característica de poder armazenar a solução do solo (água e nutrientes) e liberá-la por um longo período confere ao gel hidretentor benefícios como a diminuição da evaporação de água do solo, que conseqüentemente mantém a temperatura e a umidade do solo mais constante com menor variação entre o excesso e a baixa disponibilidade de água. Além de diminuir o estresse hídrico, o gel limita as perdas de água e nutrientes por lixiviação, e com a redução da necessidade de irrigação, economiza-se com equipamentos e mão de obra.

Outras vantagens obtidas com o uso do gel hidretentor são: a diminuição da compactação do solo na região tratada, aumento da CTC (capacidade de troca catiônica) e o aumento do enraizamento das plantas proporcionando um sistema radicular mais volumoso e estendido.

Neste estudo utilizaram-se doses de 4,0 g de gel Stockosorb<sup>®</sup> para cada dm<sup>3</sup> de composição de substrato. O gel foi misturado à composição dos substratos na forma não hidratada.

### 3.4 Condicionador de solo

Foi utilizado o Solomax<sup>®</sup>, um condicionador de solo para desenvolvimento e recuperação composto de vermiculita, turfa e corretivo de acidez, fornecido em embalagens de 25 kg. Segundo o fabricante, deve ser aplicado via solo de 1,5 a 3,0 kg/m<sup>2</sup> de área, ou de 20 a 30% em volume para covas de plantio, de acordo com as características da cultura, do solo e do clima da região. Sua capacidade de retenção de água é de 150% (peso/peso), a capacidade de troca catiônica é de 200 mmol.c/dm<sup>3</sup> e a umidade, 55% (peso/peso).

Foram utilizados 30% (volume/volume) para a composição de substratos neste estudo, isto é, 300 mL de Solomax<sup>®</sup> para cada dm<sup>3</sup> de composição de substrato.

### 3.5 Fertilizante de liberação lenta

Utilizou-se o Osmocote Plus<sup>®</sup> (N-P-K: 15-9-12), 5 - 6 meses (período de liberação), fornecido em embalagem de 22 Kg. Trata-se de um fertilizante mineral misto de liberação lenta e controlada que trabalha através do sistema de osmose, liberando seus nutrientes de forma progressiva durante aproximadamente 180 dias. O fertilizante tipo Osmocote<sup>®</sup> é sólido granulado e consiste de um único revestimento de resina biodegradável que encapsula uma esfera de NPK – nitrogênio, fósforo e potássio. Esta cápsula promove a completa absorção e durabilidade do efeito.

Como a liberação dos nutrientes é lenta e progressiva, este tipo de fertilizante é recomendado para a fase de crescimento da planta reduzindo-se a queima das raízes pelo excesso de nitrogênio ou outros componentes encontrados em adubos tradicionais. O Osmocote<sup>®</sup> uma vez aplicado só absorve a umidade do solo sob

temperatura de 50°C, fora desta condição, a única forma de absorção de umidade é a irrigação aplicada sobre os grãos. A tecnologia deste produto promove a adequada absorção de água e nada mais que o necessário, isto é, mesmo que imerso em um recipiente com água, a quantidade absorvida por cada cápsula será a mesma de uma irrigação normal.

Dados do fabricante informam que além de 15% N, 9% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 12% K<sub>2</sub>O, o Osmocote Plus<sup>®</sup> é composto ainda de 1% Mg, 2,3% S, 0,05% Cu, 0,45% Fe, 0,06% Mn e 0,02% Mo. Neste estudo utilizou-se a dose de incorporação alta igual a 8,6 g de Osmocote / dm<sup>3</sup> de substrato.

#### 4. ESPÉCIE VEGETAL \_ *Arachis pintoi*

A vegetação desempenha um importante papel no uso de tecnologias verdes para o controle de inundações urbanas. A cobertura do solo diminui o impacto das gotas de chuva e agrega as partículas controlando a erosão, diminui o escoamento superficial de águas e melhora a infiltração. Além de reduzir a compactação do solo e acrescentar valor estético ao cenário, é uma forma mais econômica de manejo de águas quando comparada com as soluções tradicionais de engenharia civil.

Na América do Norte e Europa, seduns e outras plantas suculentas são as escolhas de planta inquestionável para telhados verdes extensivos. São bonitas, de rápido crescimento e em pouco tempo formam uma cobertura verde uniforme. No México, até o sul de Guadalajara e Cidade do México, seduns e outras suculentas ainda têm um bom desempenho em telhados verdes, mas mais ao sul, onde a diferença entre as estações é marcada somente por períodos secos e períodos chuvosos, as espécies nativas da região devem ser recomendadas.

É certo que as pesquisas sobre telhados verdes têm um longo histórico nas regiões temperadas, no entanto existe uma carência em informação sobre os tipos de plantas para telhados verdes que melhor se adaptem ao clima das regiões tropicais. O uso de plantas adequadas é um fator importante que influencia a necessidade de manutenção e que, literalmente, determina se um telhado verde permanecerá verde.

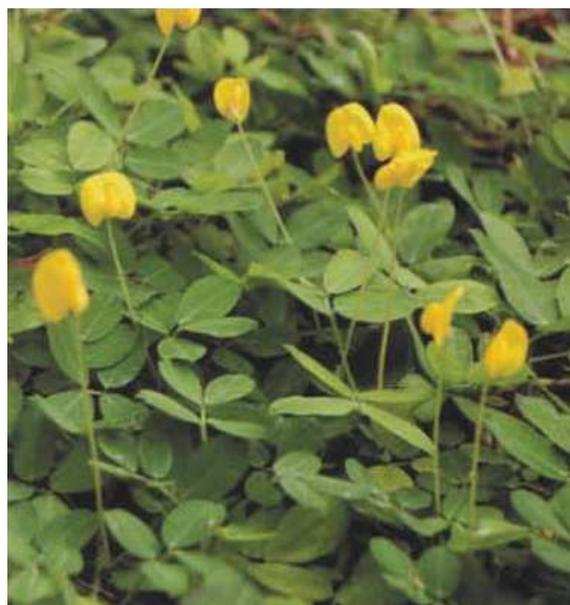
A leguminosa *Arachis pintoi*, com ciclo de vida perene e hábito de crescimento estolonífero, tem mostrado grande potencial como cobertura do solo. A *Arachis pintoi* apresenta boa adaptação em áreas de alta precipitação, com solos de moderada fertilidade e com restrições à seca e encharcamento demasiado. Por ser ainda uma leguminosa perene, age como fixadora de nitrogênio e controla plantas invasoras (BAPTISTA, 2007). Comumente denominada de amendoim forrageiro, encontra-se difundida nas zonas tropicais e subtropicais do Brasil e do mundo. Cresce bem desde o nível do mar até 1800 m de altitude (NASCIMENTO, 2006).

A planta floresce várias vezes ao ano, geralmente entre a 4ª e 5ª semana após a emergência das plântulas. Em condições de sombreamento, as plantas apresentam crescimento mais vertical, com maior alongamento do caule, maior

tamanho e menor densidade de folhas (BAPTISTA et al., 2007). Seu crescimento é rasteiro, atingindo de 20 a 40 cm de altura e a raiz é pivotante, crescendo em média até 30 cm de profundidade. Suas folhas são alternadas, com pêlos sedosos nas margens e seu caule é ramificado e cilíndrico. A floração é indeterminada e contínua e o fruto se desenvolve dentro do solo. O plantio do amendoim forrageiro deve ser feito no início do período chuvoso, quando as condições de umidade são favoráveis e não houver riscos de ocorrência de veranicos (GOUVEA, 2008). Após o crescimento inicial, nas raízes que emergem dos estolões ocorre grande capacidade de nodulação, em torno de 200 nódulos por planta, fato que favorece a capacidade de fixação de nitrogênio por ação natural da espécie (SIMPSON et al., 1994). A capacidade de fixação de nitrogênio aos 152 dias pós-plantio é de 27 kg/ha/ano (THOMAS, 1994).

No Brasil o *Arachis pintoii* tem sido utilizado como cobertura verde permanente em diversas culturas: citrus, abacate, figo, pomares mistos, etc. Também é utilizado em paisagismo com grande frequência e aceitação.

Esta espécie está selecionada entre as plantas recomendadas para uso em telhados verdes segundo YOK & SIA (2008). Estes autores indicam 76 espécies de plantas com potencial para uso em telhados verdes em regiões tropicais, onde grande parte das plantas recomendadas foi selecionada através de experimentos controlados.



**Figura 3.** *Arachis Pintoii*. Fonte: YOK & SIA (2008).

#### 4.1 Uso de *Arachis Pinto* em Telhados Verdes

NAZYRA *et al.* (2011) avaliaram a capacidade de retenção de água por três diferentes espécies vegetais em experimento com camas de teste para o manejo de águas pluviais. Entre as espécies avaliadas a *arachis pinto* foi adotada. Neste estudo foram utilizadas caixas de 1,5 x 0,4 m preenchidas com 15 cm de camada de substrato (Figura 4). A inclinação adotada foi de 1V:2H (27°) e o sistema de irrigação foi posicionado a 0,6 m acima da superfície do solo para simular uma velocidade de impacto das gotas semelhante a de uma chuva natural. Foram simulados eventos de precipitação de baixa intensidade e de alta intensidade sobre os quatro tratamentos.

Os resultados mostraram que a *arachis pinto* reteve 75,4% do volume de água aplicado em evento de baixa intensidade e 54%, em evento de alta intensidade. Embora as outras duas espécies, *Hemigraphis alternate* e *Axonopus compressus*, tenham obtido melhores resultados, 79% e 85,4% para evento de baixa intensidade, respectivamente, e 68,8% e 83,3% para evento de alta intensidade, respectivamente. As diferenças de retenção para cada tipo de vegetação podem ser devido à técnica de plantio e características inerentes a cada espécie vegetal. O controle, solo nu, como era esperado obteve desempenho inferior aos demais tratamentos.



**Figura 4.** Experimento em escala piloto para a avaliação da retenção hídrica utilizando três diferentes tipos de vegetação e controle. Fonte: NAZYRA *et al* (2011).

Na cidade de Hong Kong, um telhado verde de 200 m<sup>2</sup> foi instalado na cobertura de um edifício da University of Hong Kong para fins de pesquisa. O telhado verde foi dividido em três parcelas iguais, 6 x 6m, plantadas com *Zoysia tenuifolia*, *Arachis pintoii* e *Duranta repens*. Seis parâmetros foram avaliados: resfriamento evaporativo da temperatura do ar, redução da temperatura da superfície, efeito do isolamento térmico, orçamento de energia da radiação, fluxo de calor para o ambiente abaixo do telhado e conservação de energia (TOWNSHEND, 2006).



**Figura 5.** Telhado verde experimental instalado na Universidade de Hong Kong. Fonte: TOWNSHEND (2006).

Ao projetar um telhado verde para uma eco residência na Costa Rica, O'CONNOR (2010) não encontrou espécies suculentas que atendessem satisfatoriamente as condições climáticas impostas pelo ambiente. Mas, observou na região e em outros países da América do Sul a presença constante da *arachis pintoii* que chamou a atenção por tolerar condições extremas de plantio (solos arenosos, encostas verticais, severa insolação ou sombreamento). Observou-a em Porto Rico, Nicarágua, República Dominicana e Brasil.

O projeto instalado foi de um telhado verde extensivo com 10 cm de substrato, camada de drenagem, membrana anti-raízes, membrana de impermeabilização, inclinações de 2% a 12%, terraços individuais com áreas de

232m<sup>2</sup> a 465 m<sup>2</sup> (Figura 6). Foi utilizado ainda um sistema automatizado de irrigação superficial por gotejamento. Um grande número de mudas de *arachis pinto* foi produzido no local do projeto através da reprodução de estacas em bandejas de fibra de coco moído.



**Figura 6.** Telhado verde com *arachis pinto* em inclinações de até 12% instalado em residência na Costa Rica. Fonte: O'CONNOR (2010).

Apostando no desempenho da *arachis pinto* com base na sua durabilidade aparente, facilidade de propagação e sobrevivência durante a época seca, a planta se desenvolveu bem em apenas um mês. O plantio foi realizado na época chuvosa, mas, três meses mais tarde, na estação seca, a planta apresentou deficiência, como se tivesse sucumbido devido a algum fator não previsto ou considerado, e ainda devido a problemas técnicos do sistema de irrigação, que ficou inativo por dois meses. No entanto, uma observação mais próxima verificou que na base das plantas secas havia pequenos brotos verdes à espera para ressurgir, e ainda, que as raízes haviam se enraizado firmemente. Com o re-estabelecimento do fornecimento de água a planta voltou a se desenvolver plenamente em apenas duas semanas deixando novamente o telhado verde, verde.

Os resultados deste experimento podem indicar a *arachis pinto* como planta adequada para telhados verdes em regiões semitropicais e tropicais, livres de congelamento, onde espécies *seduns* não podem ser uma opção de plantio efetivo.

A revisão sobre a *arachis pintoii* tem como objetivo o uso desta espécie vegetal para futuro experimento em telado com unidades piloto de telhados verdes, viabilizado pelo mesmo projeto de pesquisa que permitiu a realização do experimento base para a presente dissertação (MAPLU).

Foram apresentadas características gerais da *arachis pintoii* e algumas experiências de telhados verdes com uso da espécie vegetal.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Matérias-primas dos substratos

Para a determinação da fração de cada componente no substrato, testes manuais foram conduzidos misturando-se frações, em volume, de cada material e verificando-se o comportamento do substrato na presença de água. Esta primeira experiência indicou certa dificuldade de se trabalhar com a palha de coco na maneira como foi obtida após seu processamento. Logo, verificou-se a necessidade de uma classificação granulométrica da fibra de coco e um pré-ensaio com diferentes granulometrias deste material na composição do substrato para a avaliação da capacidade de retenção hídrica de cada fração e sua relação com os demais componentes.

A determinação dos materiais para a composição do substrato teve base na revisão da literatura sobre telhados verdes e os substratos comumente adotados. Grande parte dos estudos realizados na avaliação do desempenho de sistemas telhado verde tem origem na Europa e a constituição dos substratos apresenta semelhanças em diversos trabalhos. Porém, no Brasil existem poucos estudos acerca desta tecnologia, especificamente sobre composição de substratos.

A fim de se formular uma composição de substrato com características que resistam ao clima da região de estudo, que requeira o mínimo de manutenção para uso em telhados verdes extensivos, que suporte satisfatoriamente uma determinada espécie vegetal, que maximize a vida útil do sistema e, ainda, que atenda ao objetivo de se mitigar o volume de águas de escoamento pluvial, chegou-se à seguinte escolha de materiais: solo franco-argiloso, biomassa seca de coco, condicionador de solo, gel retentor de umidade, zeolita e um fertilizante de liberação lenta. Cada um destes materiais tem uma função específica a desempenhar na mistura como substrato.

### 5.1.1 Componentes principais

#### 5.1.1.1 Solo

O solo utilizado neste estudo foi coletado na Embrapa Agrobiologia, mais precisamente na área denominada como Terraço, na cidade de Seropédica, Rio de Janeiro. Trata-se de um planossolo coletado até 15 cm de profundidade após a retirada da camada superficial contendo vegetação rasteira.

O solo foi ensacado para transporte até a Embrapa Solos, Jardim Botânico, Rio de Janeiro, onde prosseguiu para a sala de preparação. Na preparação o solo foi espalhado em bandejas forradas com jornal e seguiu para a secagem em estufa durante 48 horas. Após a secagem, o solo foi destorroado e peneirado (peneira de 2 mm) estando pronto para seguir para as análises.

#### 5.1.1.2 Fibra de coco

As cascas de coco verde foram coletadas em quiosques na praia do Leblon, orla da zona sul da cidade do Rio de Janeiro. Seu processamento foi realizado nas dependências da Embrapa Solos e consta das seguintes etapas:

- *Lavagem*: as cascas foram lavadas uma a uma em água corrente de boa qualidade para a remoção de areia, lixo (resíduos de embalagens plásticas e canudos) e insetos.

- *Corte*: cada casca de coco verde foi cortada em quatro ou mais pedaços para permitir um diâmetro adequado à entrada da máquina trituradora a fim de se evitar o embuchamento da lâmina (travamento por acúmulo de material). Nesta etapa as cascas foram cortadas manualmente com o auxílio de um machadinho.

- *Trituração*: os pedaços de casca de coco foram triturados em uma máquina trituradora para galhos verdes (marca CID). Mesmo a máquina não sendo específica para a trituração de cascas de coco, a mesma mostrou-se eficiente para esta finalidade.



**Figura 7.** Máquina trituradora para galhos verdes

- *Secagem:* as cascas de coco verde trituradas foram espalhadas em bandejas metálicas e colocadas em estufa a 40°C para a remoção de umidade durante aproximadamente 48 horas.



**Figura 8.** Cascas de coco trituradas e espalhadas em bandejas para secagem em estufa

- *Peneiramento*: após a secagem a palha de coco foi peneirada em jogo de peneiras de 19 mm, 6,65 mm, 3,35 mm e 2 mm.

- *Armazenamento*: cada fração da palha de coco foi acondicionada em sacos plásticos e classificada de acordo com a granulometria (>19 mm, 19 mm, 6,35 mm, 3,35 e 2 mm).

### 5.1.2 Componentes comerciais

Foram utilizados os seguintes produtos disponíveis comercialmente: zeolita cubana (50,0 g/dm<sup>3</sup> de substrato), gel retentor de umidade (Stocksorb®, 4,0 g/dm<sup>3</sup> de substrato), condicionador de solo (Solomax®, 30% volume) e fertilizante de liberação lenta (Osmocote®, 8,6 g/dm<sup>3</sup> de substrato).

## 5.2 **Metodologia**

### 5.2.1 Caracterização dos componentes principais

#### 5.2.1.1 Caracterização físico-química do solo

As análises para a caracterização física e química do solo foram realizadas nos Laboratórios da Embrapa Solos conforme a metodologia preconizada no Manual de Métodos de Análises de Solo da Embrapa Solos (1997).

As análises físicas realizadas no solo foram:

- a) Composição granulométrica da terra fina: dispersão com NaOH/ calgon e quantificação da areia grossa, areia fina, silte e argila;
- b) Argila dispersa: grau de dispersão da argila em água;
- c) Grau de floculação da argila: relação entre argila naturalmente dispersa em água e a argila total obtida após a dispersão;
- d) Relação silte/argila (%): cálculo da relação entre o teor de silte e de argila;
- e) Densidade do solo, partícula e porosidade;

f) Condutividade hidráulica e retenção de umidade a 0,006 MPa, 0,033 MPa e 1,5 MPa.

Análises químicas realizadas no solo:

a) pH em água e KCl 1N, com relação solo:solução de 1:2,5;

b) Acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ): extração do  $H^+ + Al^{3+}$  pelo acetato de cálcio ( $CaO\text{Ca } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) a pH 7;

c) Cátions trocáveis ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  e  $Na^+$ ): extração dos elementos com Mehlich-1 e leitura no ICP-AES ( $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ ) e fotômetro de chama ( $K^+$  e  $Na^+$ ).

Cujos resultados fornecem:

- Soma de bases (Valor S) =  $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$ ;

- CTC efetiva (CTCe) = S + Al;

- CTC total (CTCt) = S +  $H^+ + Al^{3+}$ ;

- Saturação por bases (V%) =  $(S/CTC \text{ total}) \times 100$ ;

- Saturação por alumínio (Al%) =  $(Al^{3+} \times 100)/CTC \text{ efetiva}$ .

d) Carbono orgânico (C): oxidação da matéria orgânica com solução de dicromato de potássio em presença de ácido sulfúrico e titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal;

e) Fósforo (P): extração dos teores biodisponíveis de P por Mehlich-1 e quantificação por colorimetria;

f) Nitrogênio (N): metodologia de arraste a vapor;

g) Condutividade elétrica (CE): relação solo:solução (1:1,5) e quantificação realizada por condutímetro.

h) Micronutrientes: Método Água Régia (Berrow & Stein, 1983).

### 5.2.1.2 Caracterização química da fibra de coco

Foram realizadas as seguintes análises químicas nas fibras de coco verde foram: nutrientes (Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Co, Ni, Cd, Pb, P) pela metodologia EPA 3052, nitrogênio, hidrogênio e carbono.

### 5.2.2 Pré-ensaio de colunas

O pré-ensaio de colunas foi conduzido a fim de se verificar que fração granulométrica da fibra de coco apresentaria melhores resultados de retenção hídrica. Esta fase do estudo foi realizada no Laboratório de Contaminantes e Resíduos (LCR) da Embrapa Solos conforme TAVARES (2009).

Para tanto foram montadas colunas segmentadas construídas com anéis de PVC de 6" com 5 cm de altura cada anel, totalizando colunas com 15cm de altura (10 cm para preenchimento com substrato e 5 cm para bacia de captação).

A união de cada anel foi feita com silicone entre os segmentos e fita adesiva na parte externa. No fundo de cada coluna um cap perfurado, também de 6", e uma manta de drenagem tipo "bidim" sobre esse cap evitam a perda de partículas junto com o percolado.

Abaixo do último anel com cap, um funil de 8" direciona o percolado para os recipientes de coleta. As colunas são apoiadas sobre suportes em estrutura metálica afixados na parede, os quais permitem a regulagem da altura conforme a altura das colunas. A figura 5 apresenta este esquema.

Foram construídas 15 colunas, onde cada fração granulométrica da palha de coco foi testada com proporções de 15, 30 e 60% de solo e demais componentes. As frações dos componentes comerciais (gel, osmocote e zeolita) foram fixas para todas as colunas, assim como a fração de turfa (condicionador de solo, 30% em volume). A tabela 1 apresenta esta composição.



**Figura 9.** Pré-ensaio de colunas: avaliação da capacidade de retenção hídrica de quinze substratos compostos com cinco diferentes granulometrias de palha de coco testadas em três proporções.

**Tabela 1.** Composição das colunas do pré-ensaio.

| Coluna     | Granulometria<br>coco | Relação volume/L |        |        | Fixo (g/L) |          |         |
|------------|-----------------------|------------------|--------|--------|------------|----------|---------|
|            |                       | %Solo            | % coco | %turfa | Gel        | Osmocote | Zeolita |
| <b>C1</b>  | >19mm                 | 15               | 55     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C2</b>  | >19mm                 | 30               | 40     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C3</b>  | >19mm                 | 60               | 10     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C4</b>  | 19mm                  | 15               | 55     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C5</b>  | 19mm                  | 30               | 40     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C6</b>  | 19mm                  | 60               | 10     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C7</b>  | 6.35mm                | 15               | 55     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C8</b>  | 6.35mm                | 30               | 40     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C9</b>  | 6.35mm                | 60               | 10     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C10</b> | 3.35mm                | 15               | 55     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C11</b> | 3.35mm                | 30               | 40     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C12</b> | 3.35mm                | 60               | 10     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C13</b> | 2mm                   | 15               | 55     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |
| <b>C14</b> | 2mm                   | 30               | 40     | 30     | 4,0        | 8,6      | 50,0    |

|            |     |    |    |    |     |     |      |
|------------|-----|----|----|----|-----|-----|------|
| <b>C15</b> | 2mm | 60 | 10 | 30 | 4,0 | 8,6 | 50,0 |
|------------|-----|----|----|----|-----|-----|------|

Cada coluna foi regada com 250 mL de água, equivalente a 13,7 mm de lâmina, em diferentes intervalos de tempo, e o percolado coletado e quantificado em proveta.

O percolado foi coletado individualmente e após a avaliação da capacidade de retenção hídrica de cada coluna procedeu-se a coleta de amostras indeformadas daquelas que apresentaram melhores resultados, isto é, escoaram menor volume de água.

#### 5.2.2.1 Caracterização dos substratos com melhor desempenho no pré-ensaio de colunas

As colunas foram pesadas quando secas e após o pré-ensaio para a determinação da relação peso seco x peso úmido. As amostras foram coletadas, em triplicatas para as análises de micronutrientes, carbono, nitrogênio, fertilidade e granulometria para cada composição. A metodologia para a determinação dos parâmetros citados segue a descrita no item 5.2.1.1 (caracterização do solo).

#### 5.2.3 Estudo da Retenção Hídrica e Lixiviação

Esta fase do estudo pretende avaliar através de um teste de colunas a capacidade de retenção hídrica de substratos com 20 cm de espessura e a qualidade do percolado.

A realização do pré-ensaio permitiu determinar a fração granulométrica da palha de coco com melhor desempenho na retenção hídrica. Desta forma, otimizou-se a composição dos substratos para o teste de colunas.

A intensidade da irrigação aplicada sobre as colunas seguiu o estudo realizado por OLIVEIRA (2009). Sobre um telhado verde experimental em Vargem

Grande, Rio de Janeiro, OLIVEIRA (2009) simulou chuva em duas condições básicas, uma com intensidade máxima do sistema de microaspersão disponível que era de 42 mm/h, a fim de simular uma chuva característica da época chuvosa do ano, e outra com intensidade mínima de 8,77 mm/h, como parâmetro para análise da capacidade de retenção e o tempo de retardo nos tratamentos.

### 5.2.3.1 Teste de Colunas

Foram construídas 9 (nove) colunas de 25 cm de altura (20 cm preenchidos com substrato e 5 cm para a bacia de captação) seguindo a metodologia adotada para o pré-ensaio (TAVARES, 2009). Uma fração de cada composição de substrato foi separada para a determinação de micronutrientes, carbono, nitrogênio, fertilidade e granulometria.



**Figura 10.** Aparato experimental para o teste de colunas.

Foram realizadas duas simulações de precipitação. Um evento mais crítico, com intensidade de 42 mm/h e outro de 8,77 mm/h, conforme OLIVEIRA (2009). Em ambos os ensaios foi utilizada água destilada. O experimento foi conduzido no LABIFI\_UERJ (Laboratório de Biorremediação e Fitotecnologias) sob temperatura controlada (21°C).

A água foi distribuída sobre cada coluna utilizando-se gotejadores da marca CLABER<sup>®</sup>. A água destilada foi armazenada em barrilete de 5 litros e bombeada através de uma bomba submersa da marca JEBAO<sup>®</sup>, modelo WP 350. O percolado foi coletado individualmente em béckers ao final de cada rega e transferido para tubos falcon de 50 mL para análises (figuras 11 e 12).



**Figura 11:** Sistema de irrigação das colunas (gotejamento).



**Figura 12.** Coleta do lixiviado.

### 5.2.3.2 Análise do Lixiviado

Para a avaliação da qualidade do percolado as seguintes análises foram realizadas:

pH \_ Quantificação realizada por pHmetro (ORION 8102BN);

CE \_ Quantificação realizada por condutivímetro (ORION 013005MD);

NH<sub>4</sub>-N \_ Quantificação realizada por eletrodo seletivo de amônia (ORION 9512BNWP) e medidor multiparâmetros (ORION 5 STAR);

NO<sub>3</sub>-N \_ Quantificação realizada por eletrodo seletivo de nitrato (ORION 9707 BNWP);

Cátions (Ca, Mg, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn, Co, Ni, Cd, Pb e P) \_ (ICP-OES) da marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000 pertencente ao LASP da Embrapa Solos.

### 5.3 Tratamento Estatístico

Foi utilizado o Teste F (análise de variância) com nível de significância de 5% e somente para os casos em que a diferença entre os tratamentos se apresentou significativa foi utilizado o Teste Tukey para a comparação das médias de tratamentos tomadas duas a duas. O teste consiste em, para cada comparação entre duas médias, comparar a diferença entre elas, em valor absoluto, com a diferença mínima significativa (DMS) calculada com o critério de Tukey. Se a diferença for maior que a DMS, o teste será significativo e as duas médias consideradas estatisticamente diferentes, caso contrário, a diferença entre as médias não será significativa.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização dos componentes principais

#### 6.1.1 Caracterização físico-química do solo

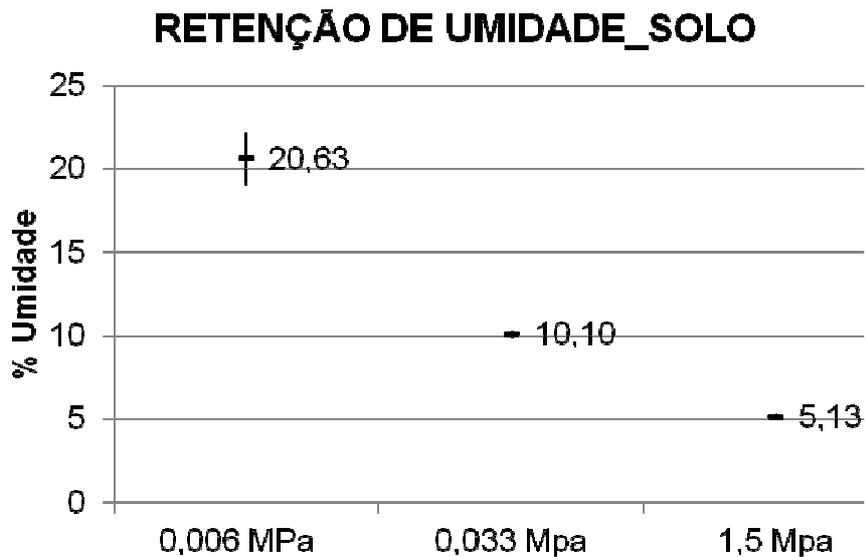
Os resultados da composição granulométrica da terra fina mostraram que 64% do solo são compostos de areia (diâmetro 2,0 a 0,20 mm), 23% de areia fina (0,2 a 0,05 mm). Silte (0,05 a 0,002 mm) e argila (< 0,002 mm) somaram 7% e 6%, respectivamente.

A relação silte/argila foi em média igual a 1,14. A análise do grau de dispersão da argila em água apresentou resultados nulos.

O grau de flocculação da argila em todas as amostras foi 100 %, característica benéfica do ponto de vista agrícola e de controle da erosão.

O resultado de densidade do solo foi de 1,63 g/cm<sup>3</sup> e para a densidade da partícula foi de 2,73 g/cm<sup>3</sup>. A porosidade total foi de aproximadamente 40% indicando boas condições de aeração e espaço disponível para armazenamento de água. Densidade e porosidade estão diretamente relacionadas e são parâmetros importantes para a verificação de compactação das camadas do solo. Normalmente, os solos formados por partículas maiores, são mais dificilmente compactados, apresentando boa macroporosidade. O solo utilizado neste estudo apresentou 20% de macroporosidade e 20% para microporosidade.

O teste de condutividade hidráulica foi conduzido durante 8 horas e a velocidade média de infiltração foi de 16 cm/hora. A capacidade de retenção de umidade a 0,006 MPa, 0,033 MPa e 1,5 MPa é apresentada no gráfico a seguir (gráfico 1).



**Gráfico 1.** Retenção de umidade do solo quando submetido a pressões de 0,006 MPa, 0,033 MPa e 1,5 MPa. Foram analisadas triplicatas das amostras de solo para cada pressão.

Com relação às análises químicas realizadas no solo, o pH foi de 5,8 em água e 4,7 em KCl 1N, encontrando-se na faixa ácida. A análise não detectou  $\text{Al}^{3+}$  na solução do solo e a acidez potencial ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ) foi de 0,50 cmolc/Kg. É importante que a acidez potencial tenha baixo valor, pois é ela que limita o crescimento das raízes e ocupa espaços nos colóides possibilitando que os nutrientes livres na solução do solo sejam lixiviados.

Os cátions trocáveis apresentaram as seguintes concentrações:  $\text{Ca}^{2+}$  0,80 cmolc/Kg,  $\text{Mg}^{2+}$  0,70 cmolc/Kg,  $\text{K}^+$  0,08 cmolc/Kg e  $\text{Na}^+$  0,01 cmolc/Kg. Logo, a soma de bases (Valor S =  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$ ) foi de 1,6 cmolc/Kg. A CTC efetiva ( $\text{CTCe} = \text{S} + \text{Al}$ ), que é a CTC no pH em que o solo se encontra no momento da amostragem, foi de 1,6 cmolc/Kg. A CTC total ( $\text{CTCt} = \text{S} + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ), que é a CTC da amostra quando colocada em meio de pH 7, foi de 2,1 cmolc/Kg.

A saturação por bases ( $\text{V}\% = (\text{SB}/\text{CTC total}) * 100$ ) foi de 76,7%. Este valor representa a participação das bases trocáveis em relação ao total de cátions no complexo.

A saturação por alumínio ( $\text{Al}\% = (\text{Al}^{3+} * 100)/\text{CTC efetiva}$ ) foi igual a zero, uma vez que a concentração de  $\text{Al}^{3+}$  foi nula.

A análise para quantificação de carbono orgânico (C) identificou 4,3 g/Kg. Fósforo (P) igual a 7,0 mg/Kg e Nitrogênio (N) igual a 0,50 g/Kg.

A condutividade elétrica (CE) foi de 0,24 mS/cm.

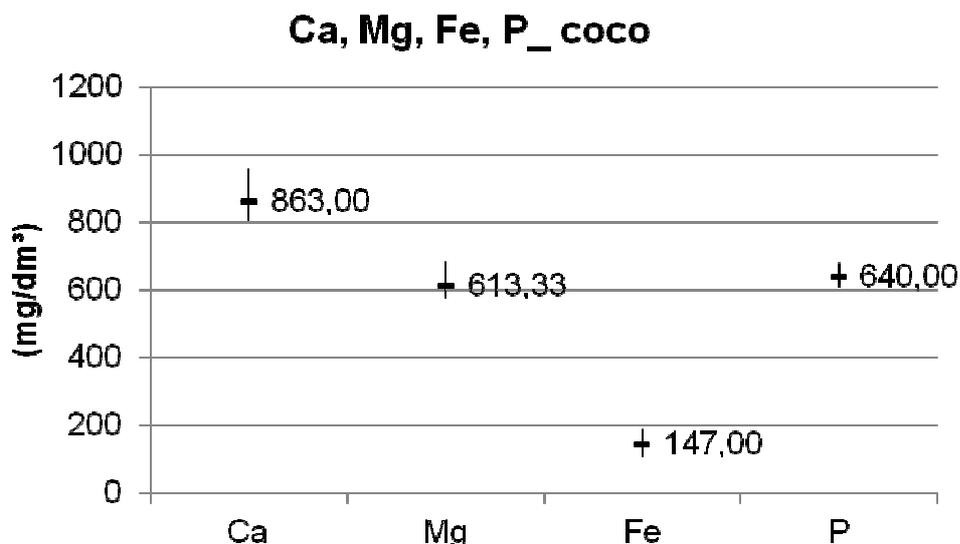
Os Micronutrientes encontrados no solo foram: Cu\_0,8 mg/Kg , Fe\_4292,0 mg/Kg, Mn\_115,1 mg/Kg, Zn\_5,6 mg/Kg, Cr\_3,4 mg/Kg e Co\_3,4 mg/Kg. Teores de Ni, Cd e Pb ficaram abaixo do limite de detecção da técnica utilizada. A concentração decrescente dos elementos é Fe>Mn>Zn>Cr>Co>Cu.

O objetivo do uso de solo na composição foi maximizar a vida útil dos substratos, uma vez que se trata de material de origem mineral.

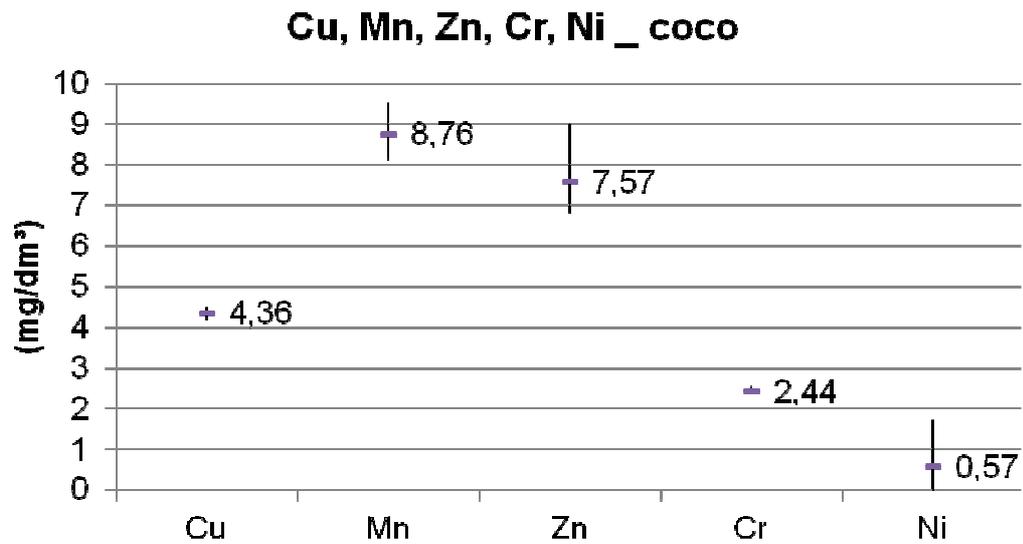
### 6.1.2 Caracterização química da fibra de coco

Análises de micronutrientes, carbono, hidrogênio e nitrogênio foram realizadas.

Ca foi o elemento presente em maior quantidade, 863 mg/Kg, em média, seguido dos elementos: P\_ 640,0 mg/Kg; Mg \_ 613 mg/Kg; Fe\_ 147,0 mg/Kg; Mn\_ 8,76 mg/Kg; Zn\_ 7,57 mg/Kg; Cu\_ 4,36 mg/Kg; Cr\_ 2,44 mg/Kg e Ni\_ 0,57 mg/Kg. Co, Cd e Pb não foram detectados pela técnica utilizada (EPA 3052). Carbono constitui 18,02% do material; hidrogênio, 2,41% e nitrogênio, 0,25%.



**Gráfico 2.** Intervalo e valores médios da concentração dos nutrientes Ca, Mg, Fe e P na palha de coco, em mg/dm<sup>3</sup>.



**Gráfico 3.** Intervalo e valores médios da concentração dos nutrientes Cu, Mn, Zn, Cr e Ni na palha de coco, em mg/dm<sup>3</sup>.

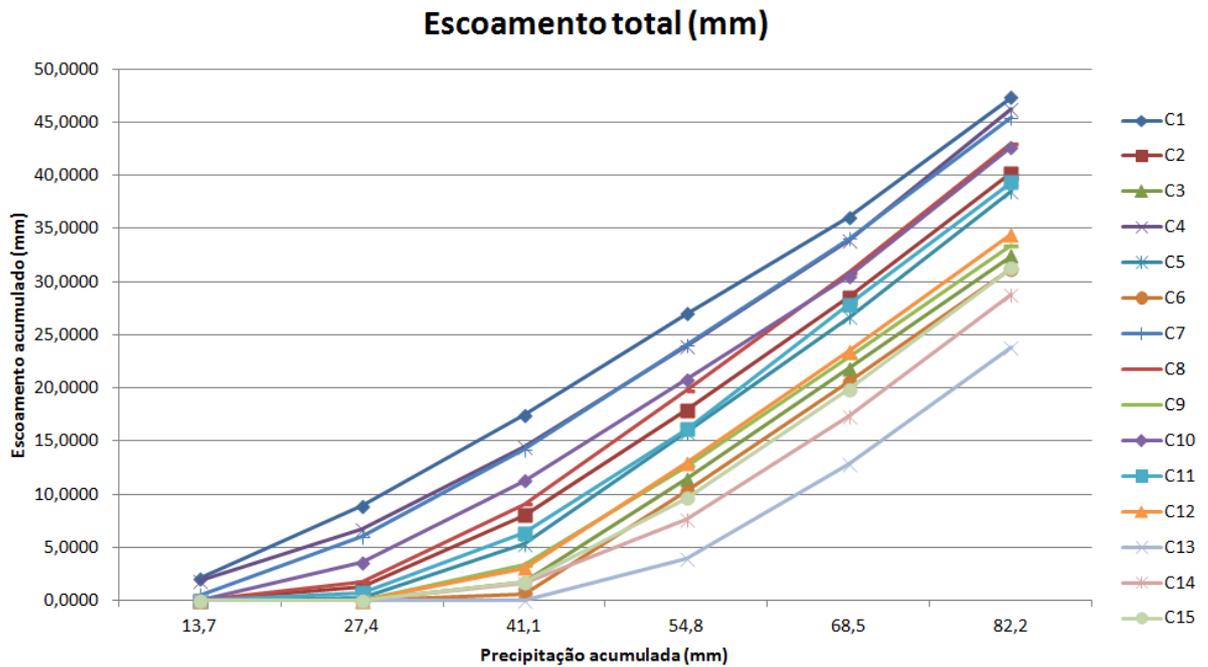
A fibra de coco foi escolhida para inclusão na composição, pois além de representar uma opção para o descarte em aterros, sua capacidade de retenção de umidade e adsorção de poluentes é bem conhecida. A fibra de coco também foi escolhida por ser de difícil biodegradação, em média 8 anos.

## 6.2 Pré-ensaio de colunas

Foram aplicadas regas de 250 mL de água de forma ao acaso em cada coluna em diferentes intervalos de tempo conforme a tabela 2. O gráfico 4 permite uma melhor visualização do volume escoado *versus* volume aplicado ao longo do pré-ensaio.

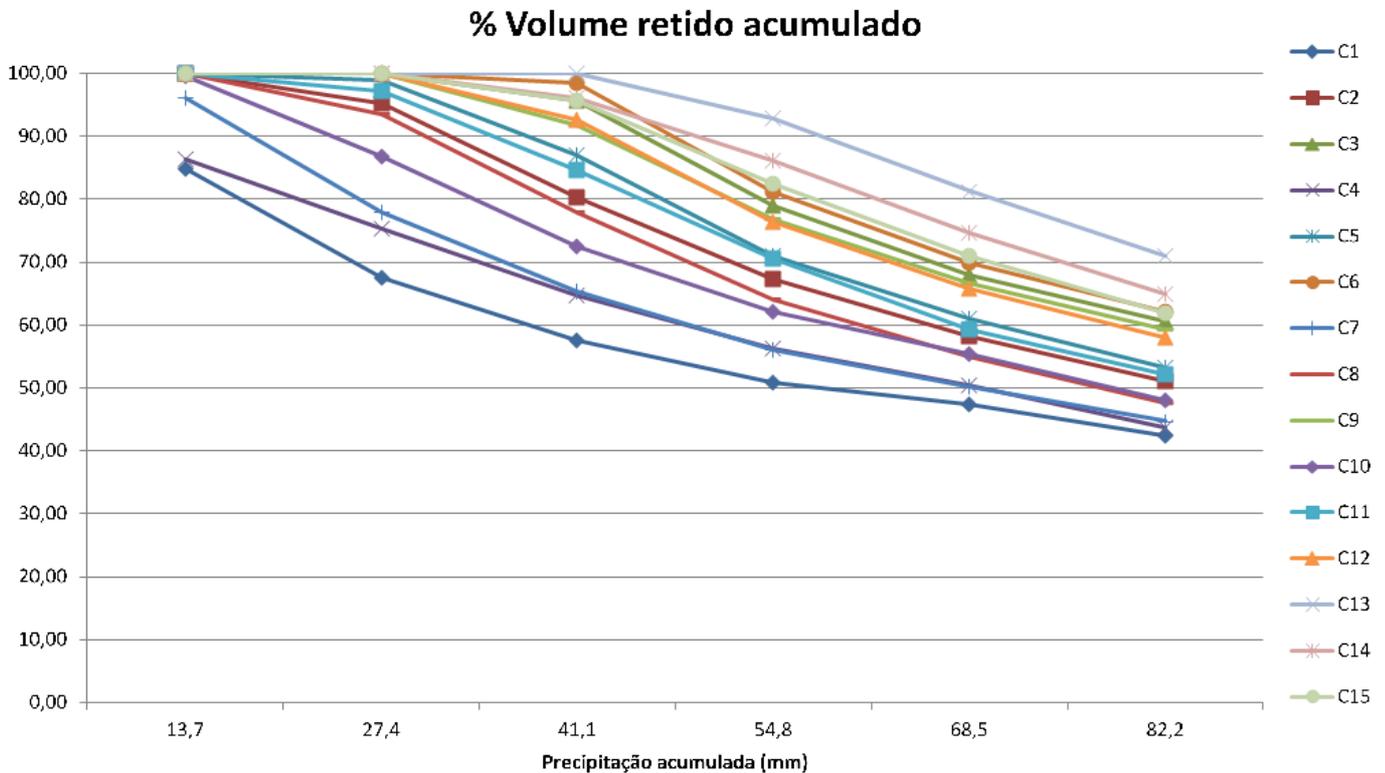
**Tabela 2.** Volume percolado (mL) por coluna no pré-ensaio.

| Coluna     | 1ªrega<br>(13,7mm) | 2ªrega<br>(+13,7mm) | 3ªrega<br>(+13,7mm) | 4ªrega<br>(+13,7mm) | 5ªrega<br>(+13,7mm) | 6ªrega<br>(+13,7mm) |
|------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|            | 27/05/2011         | 30/05/2011          | 02/06/2011          | 03/06/2011          | 6/06/2011           | 7/06/2011           |
|            | 1ª leitura         | 2ª leitura          | 3ª leitura          | 4ª leitura          | 5ª leitura          | 6ª leitura          |
|            | 30/05/2011         | 02/06/2011          | 02/06/2011          | 03/06/2011          | 7/06/2011           | 13/06/2011          |
| <b>C1</b>  | 38                 | 124                 | 156                 | 174                 | 166                 | 205                 |
| <b>C2</b>  | 0                  | 24                  | 123                 | 180                 | 194                 | 212                 |
| <b>C3</b>  | 0                  | 0                   | 32                  | 177                 | 190                 | 192                 |
| <b>C4</b>  | 34                 | 89                  | 141                 | 172                 | 182                 | 225                 |
| <b>C5</b>  | 0                  | 5                   | 92                  | 192                 | 197                 | 216                 |
| <b>C6</b>  | 0                  | 0                   | 12                  | 176                 | 187                 | 194                 |
| <b>C7</b>  | 10                 | 100                 | 149                 | 180                 | 182                 | 208                 |
| <b>C8</b>  | 0                  | 32                  | 134                 | 194                 | 203                 | 221                 |
| <b>C9</b>  | 0                  | 0                   | 62                  | 169                 | 186                 | 192                 |
| <b>C10</b> | 1                  | 65                  | 140                 | 173                 | 178                 | 221                 |
| <b>C11</b> | 0                  | 14                  | 102                 | 178                 | 214                 | 209                 |
| <b>C12</b> | 0                  | 0                   | 56                  | 180                 | 192                 | 200                 |
| <b>C13</b> | 0                  | 0                   | 0                   | 72                  | 162                 | 200                 |
| <b>C14</b> | 0                  | 0                   | 30                  | 109                 | 178                 | 208                 |
| <b>C15</b> | 0                  | 0                   | 32                  | 144                 | 187                 | 207                 |



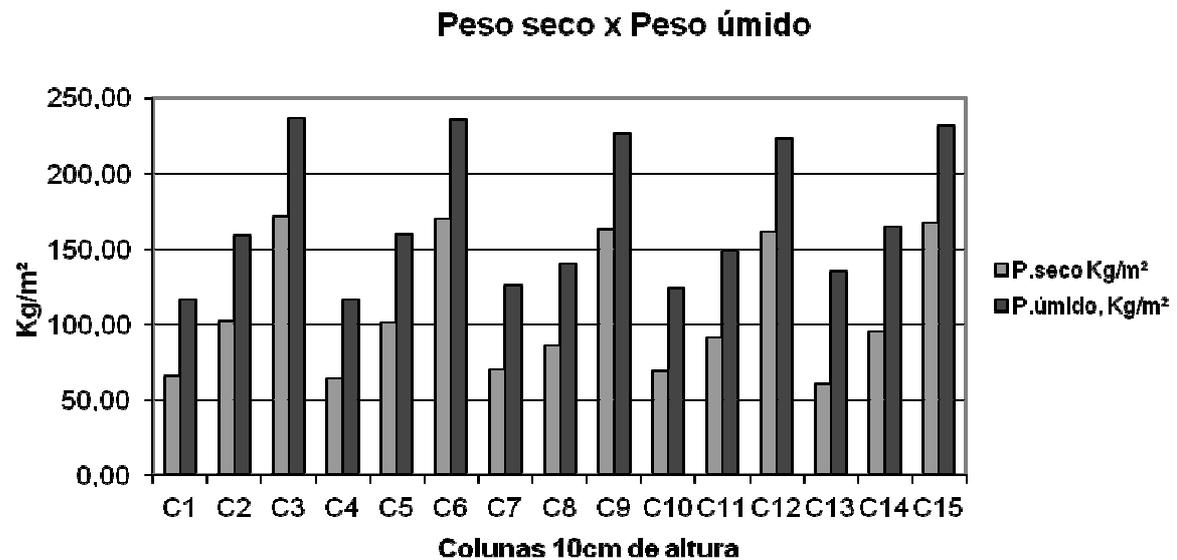
**Gráfico 4.** Volume escoado *versus* volume aplicado (mm).

Na primeira rega, com substrato seco, as colunas com as três maiores granulometrias da palha de coco escoaram maior volume de água para composições com 15% de solo (C1, C4 e C7). Nas regas subsequentes observou-se que os substratos com menor proporção de solo e maior proporção de coco de menor granulometria apresentaram melhores resultados, isto é, retiveram maior volume de água no meio. Conforme o gráfico 4 observa-se que C13 com substrato composto de 15% de solo e 55% de coco\_2mm apresentou o melhor desempenho, retendo 100% do volume aplicado até a terceira irrigação. Aplicando-se seis vezes o volume inicial esta composição de substrato atingiu 71% de retenção.



**Gráfico 5.** Desempenho da capacidade de retenção hídrica (%) das colunas no Pré-ensaio.

As colunas foram pesadas antes da primeira rega e após o pré-ensaio para se estabelecer uma relação peso seco x peso úmido. Quanto maior a proporção de palha de coco na composição dos substratos menor é a carga resultante sobre a estrutura do telhado verde. Segundo DUNNETT (2004) a carga adicional de um telhado verde extensivo está entre 70 e 170 kg.m<sup>-2</sup>. As colunas C1, C4, C7, C10 e C13, por serem as colunas de maior proporção de palha de coco na composição, apresentam peso seco de até 70 kg.m<sup>-2</sup>. As demais colunas ultrapassaram este valor, mesmo para peso seco. Com relação ao peso úmido, todas as colunas com 60% de solo na composição ultrapassaram o valor de 170 kg.m<sup>-2</sup>.



**Gráfico 6.** Relação peso seco x peso úmido das colunas no Pré-ensaio.

A palha de coco com granulometria de 2 mm foi adotada para a composição dos substratos, daqui em diante denominados S1, S2 e S3, por apresentar melhores resultados na avaliação da retenção hídrica no pré-ensaio.

### 6.2.1 Caracterização dos substratos S1, S2 e S3

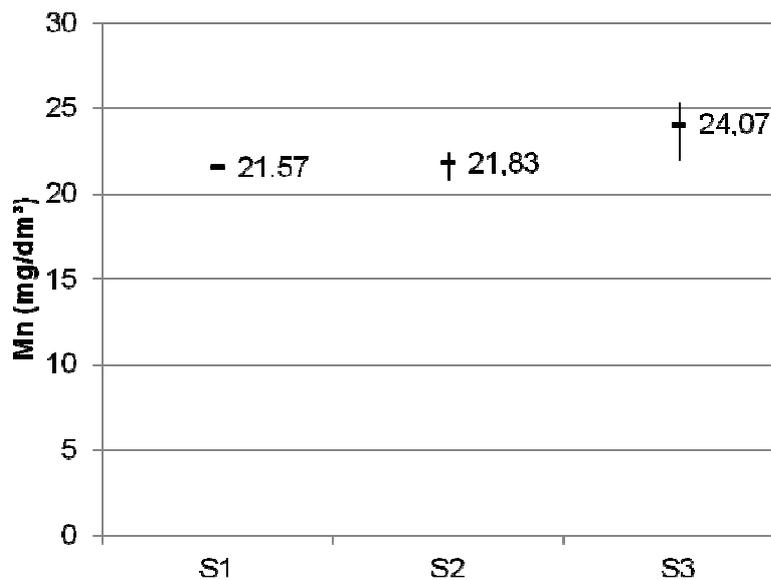
Foram construídas nove colunas preenchidas com os substratos S1, S2 e S3, em triplicata, em camadas de 20 cm. Estas colunas foram utilizadas na etapa seguinte do experimento para a avaliação da retenção hídrica e qualidade da água de escoamento. A tabela 3 apresenta a composição dos substratos S1, S2 e S3.

**Tabela 3.** Composição dos substratos utilizados no teste de colunas.

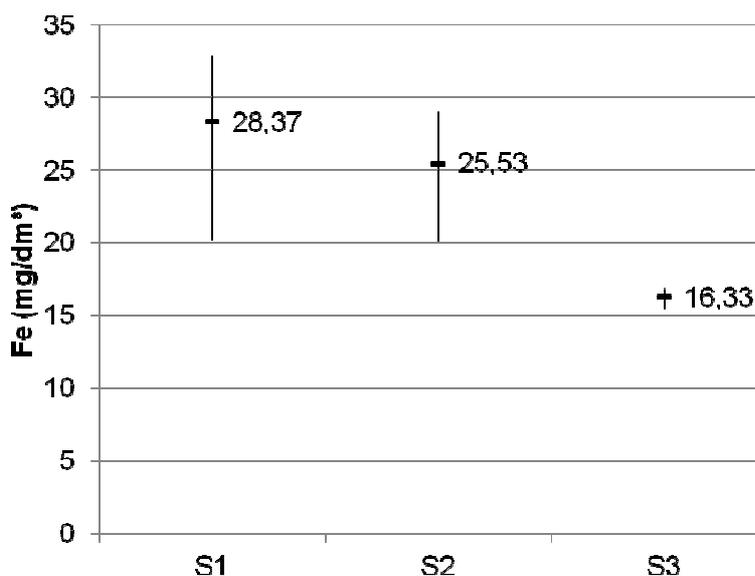
| Substratos | Ø coco | Relação volume/L |        |        | Fixo    |          |          |
|------------|--------|------------------|--------|--------|---------|----------|----------|
|            |        | %Solo            | % coco | %turfa | Gel     | Osmocote | Zeolita  |
| <b>S1</b>  | 2 mm   | 15               | 55     | 30     | 4,0 g/L | 8,6 g/L  | 50,0 g/L |
| <b>S2</b>  | 2 mm   | 30               | 40     | 30     | 4,0 g/L | 8,6 g/L  | 50,0 g/L |
| <b>S3</b>  | 2 mm   | 60               | 10     | 30     | 4,0 g/L | 8,6 g/L  | 50,0 g/L |

Os seguintes micronutrientes analisados foram mais proeminentes nas amostras e comum a todas às composições de substratos: Cu, Fe, Mn e Zn.

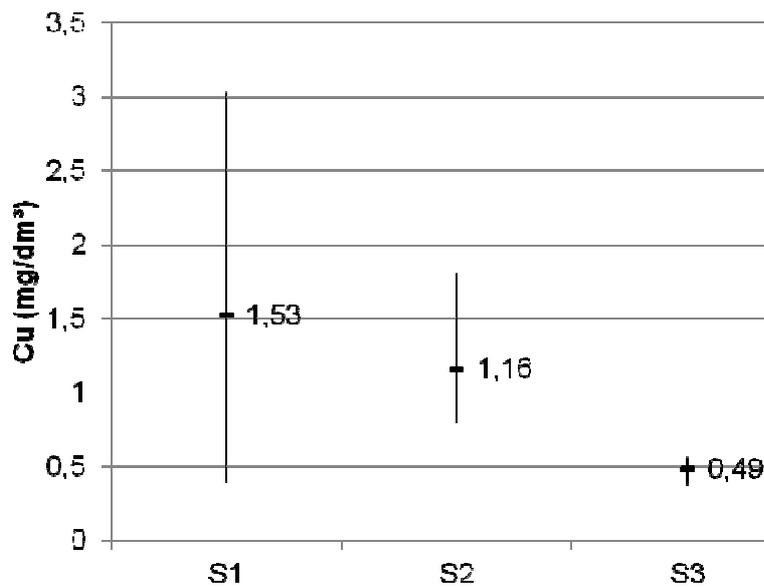
Os gráficos a seguir, 6 a 9, apresentam os valores médios de concentração encontrados para Cu, Fe, Mn e Zn. Segundo o teste F, as médias não apresentaram diferença significativa entre as composições dos substratos para Cu ( $F_{3,6} = 1,1545$ ,  $p < 0,05$ ), Fe ( $F_{3,6} = 4,9267$ ,  $p < 0,05$ ), Mn ( $F_{3,6} = 0,7136$ ,  $p < 0,05$ ) e Zn ( $F_{3,6} = 3,4420$ ,  $p < 0,05$ ).



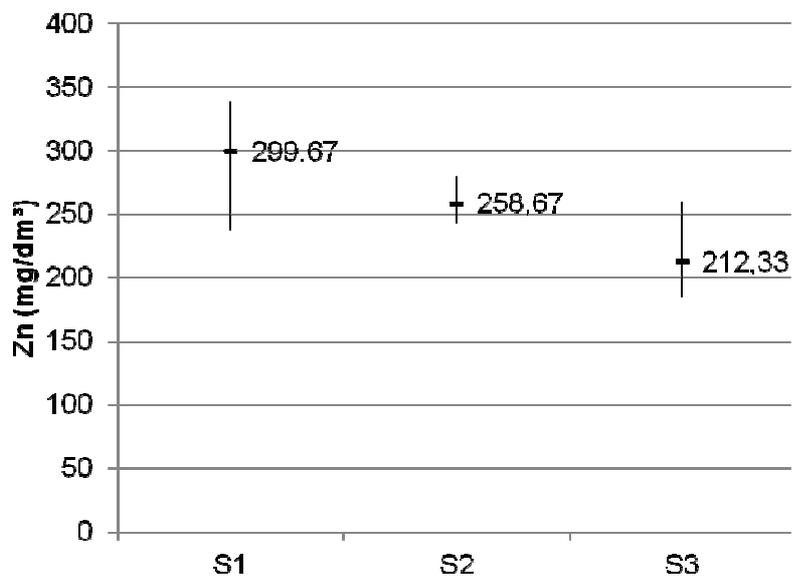
**Gráfico 7.** Intervalo e valores médios da concentração Mn nos substratos S1, S2 e S3, em mg/dm³.



**Gráfico 8.** Intervalo e valores médios da concentração Fe nos substratos S1, S2 e S3, em mg/dm³.

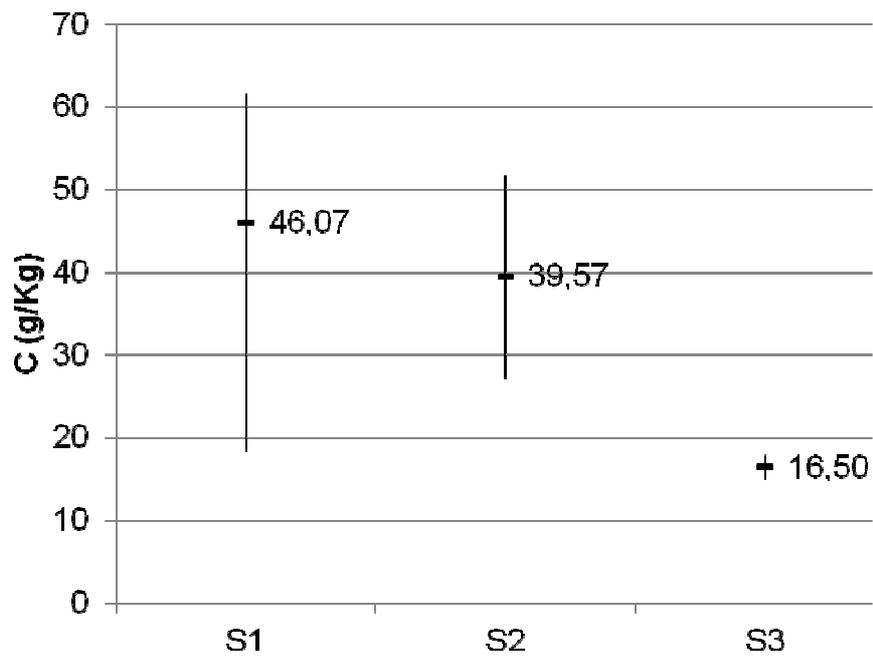


**Gráfico 9.** Intervalo e valores médios da concentração Cu nos substratos S1, S2 e S3, em mg/dm<sup>3</sup>.

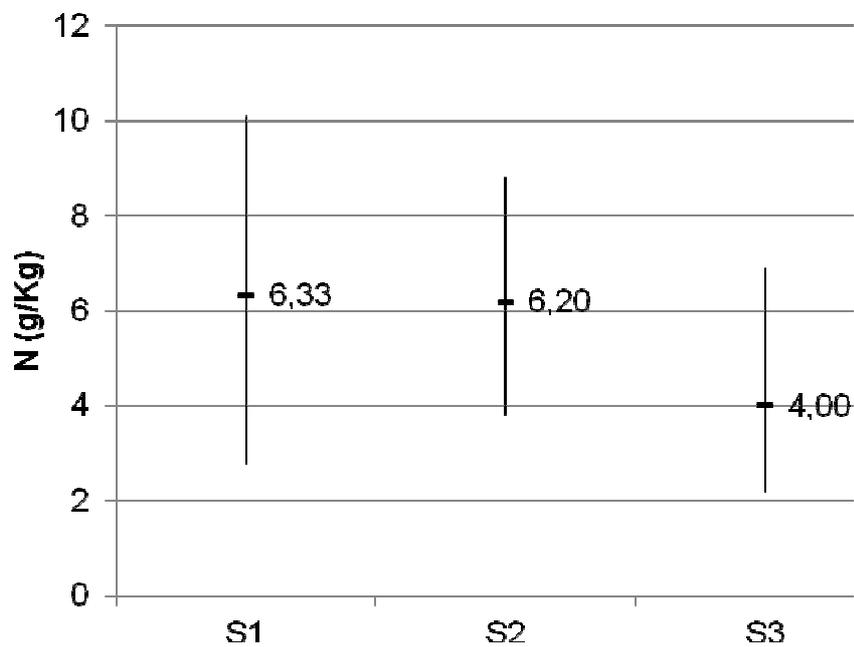


**Gráfico 10.** Intervalo e valores médios da concentração Zn nos substratos S1, S2 e S3, em mg/dm<sup>3</sup>.

Os valores médios da concentração de carbono não apresentaram diferença significativa ( $F_{3,6} = 3,008$ ,  $p < 0,05$ ). O mesmo para as concentrações de nitrogênio ( $F_{3,6} = 0,5927$ ,  $p < 0,05$ ). Os gráficos 10 e 11 apresentam os valores médios encontrados para as concentrações de C e N.



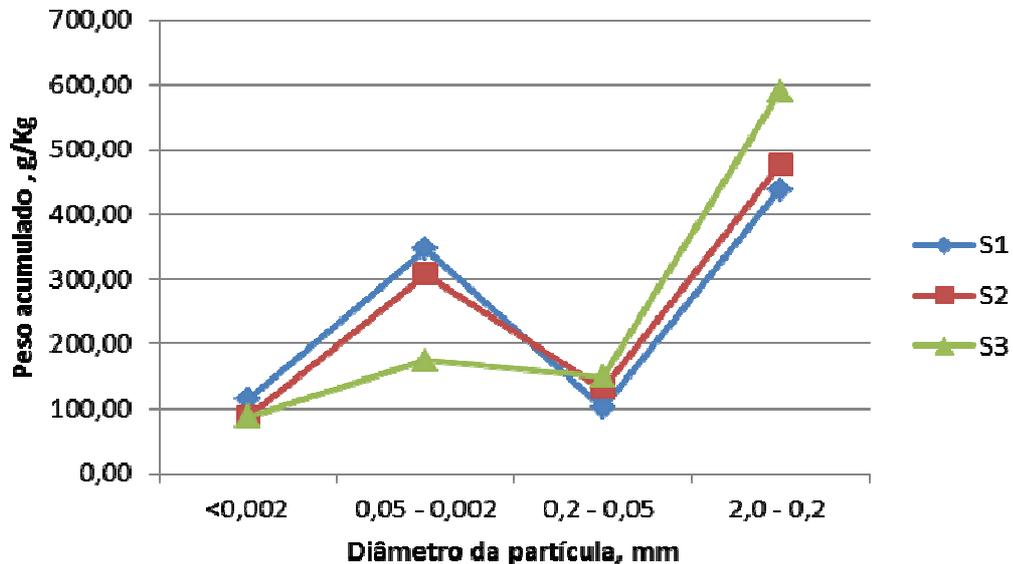
**Gráfico 11.** Intervalo e valores médios da concentração C nos substratos S1, S2 e S3, em g/Kg.



**Gráfico 12.** Intervalo e valores médios da concentração N nos substratos S1, S2 e S3, em g/Kg.

A determinação da distribuição do tamanho de partículas presentes nos substratos mostrou que o substrato constituído por uma maior fração de solo, S3,

apresentou uma maior quantidade de partículas de maior tamanho as quais possuem peso mais elevado. O substrato S1 apresentou o menor valor de partículas de 2,0-0,2 mm e maior valor para partículas de 0,05-0,002, cujo peso acumulado é inferior, conforme mostra o gráfico 13.

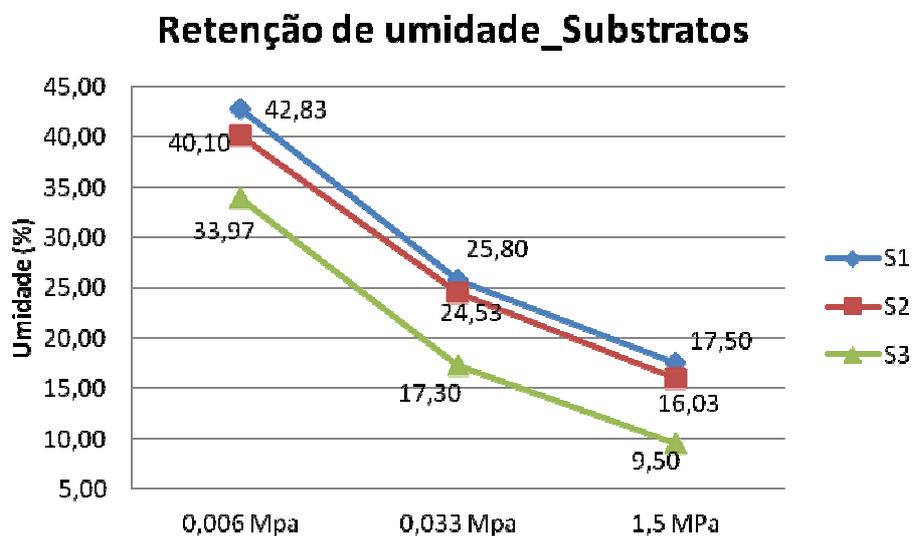


**Gráfico 13.** Distribuição de tamanho de partícula, onde o peso cumulativo foi calculado para 1 kg de amostra para cada substrato.

As partículas com diâmetro de 2,0-0,2 mm apresentaram valores médios significativamente diferentes para os substratos ( $F_{3,6} = 5,2764$ ,  $p < 0,05$ ). Na comparação entre os substratos S1 e S3, a diferença entre as médias, em valor absoluto, é superior ao valor da DMS ( $S1 - S3 = 151,33 > DMS = 148,9$ ), indicando que a quantidade de partículas deste diâmetro é superior em S3. Os substratos S1 e S2 não apresentaram diferença significativa ( $S1 - S2 = 37,33 < DMS = 148,9$ ) assim como S2 e S3 ( $S2 - S3 = 114,00 < DMS = 148,9$ ). As partículas com diâmetro de 0,05-0,002 mm apresentaram diferença significativa entre as médias de S1 e S3 ( $F_{3,6} = 6,4964$ ,  $p < 0,05$ ;  $S1 - S3 = 172,00 > DMS = 153,46$ ), indicando que a quantidade de partículas de 0,05-0,002 mm é superior em S1. As médias para os demais diâmetros de partículas não diferiram significativamente entre os substratos. O estudo realizado por MOLINEUX (2009), que avaliou as características físico-químicas de quatro composições de substratos baseados em materiais locais reciclados, apresentou na distribuição do tamanho de partículas resultados na faixa de 5,0 a 11,0 mm de diâmetro. O substrato baseado em tijolo vermelho moído

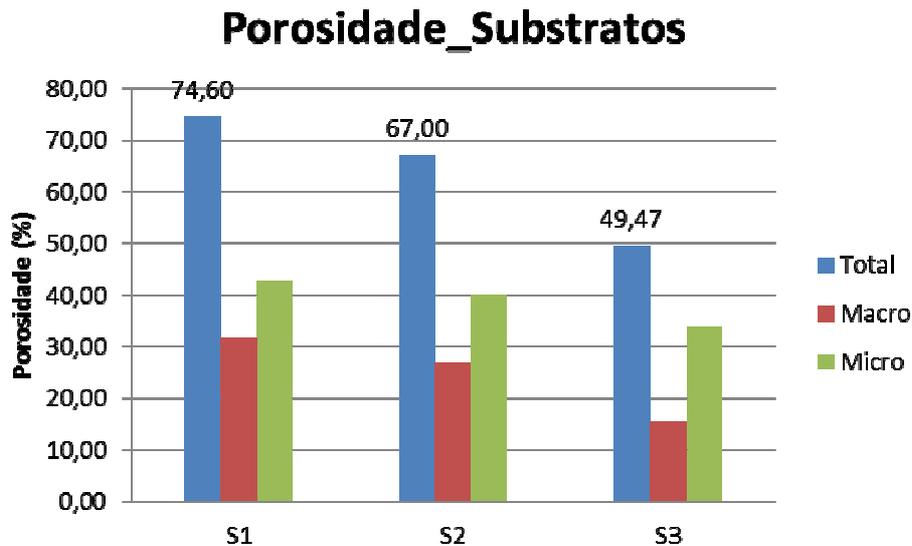
apresentou as concentrações mais elevadas de partículas menores, 5,0 a 9,0 mm; pellets de cinza de papel apresentaram concentrações maiores na faixa de 7,0 a 11,0 mm; a distribuição das concentrações mais elevadas para os pellets de argila ficou entre partículas de 6,0 a 9,0 mm; enquanto os pellets carbon8® tiveram a mais ampla faixa de concentrações de partículas maiores, com tamanhos variando de 5,0 a 11,0 mm.

Traçando a curva de retenção para os substratos S1, S2 e S3 foi possível uma comparação com a curva de retenção do solo e investigar mais precisamente a influência da adição da fibra de coco nos substratos no que se refere à capacidade de retenção hídrica.



**Gráfico 14.** Retenção de umidade dos substratos S1, S2 e S3.

Segundo JOHNSTON (1996) um substrato deve possuir entre 60 e 70% de volume poroso. A análise de porosidade dos substratos revelou que S2 encontra-se nesta faixa. S1 apresentou maior porosidade, certamente, devido a maior concentração de palha de coco na sua composição, enquanto S3 apresentou porosidade total inferior a 50%. A diferença é significativa entre os valores médios para os três substratos. MOLINEUX (2009) encontrou valores de porosidade entre 44,5% e 64%. LATSHAW (2009) ao avaliar a porosidade de um substrato específico para uso em telhados verdes encontrou valores entre 42 e 53,3%.

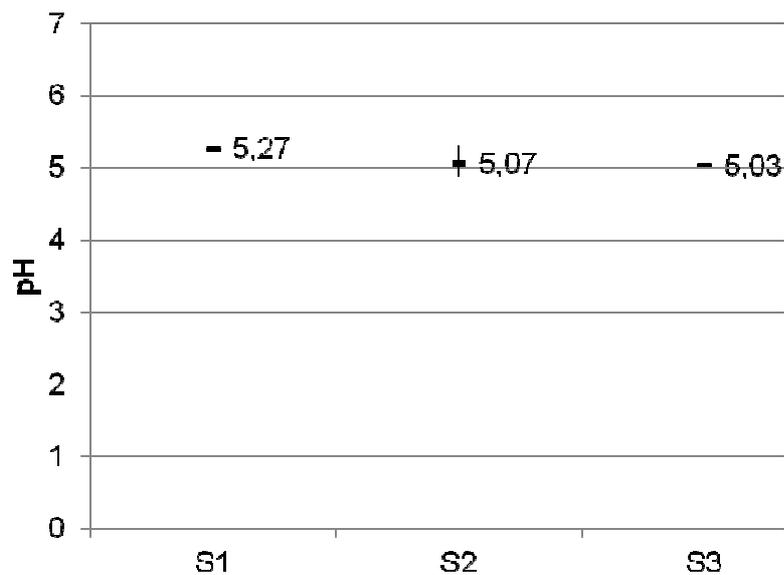


**Gráfico15.** Porosidade total, macro e micro para os substratos S1, S2 e S3.

Os resultados de densidade aparente foram de 0,48 g/cm<sup>3</sup> (S1), 0,76 g/cm<sup>3</sup> (S2) e 1,32 g/cm<sup>3</sup> (S3), todos significativamente diferentes entre si. A FLL (2002) recomenda valores de densidade aparente entre 0,70 e 1,35 g/cm<sup>3</sup>, enquadrando-se a esta faixa S2 e S3. Para a densidade da partícula os valores médios encontrados foram: 1,89 g/cm<sup>3</sup> (S1), 2,31 g/cm<sup>3</sup> (S2) e 2,60 g/cm<sup>3</sup> (S3). O substrato S1 apresenta diferença significativa entre S2 e S3 (S1 – S2 = 0,42 > DMS = 0,36; S1 – S3 = 0,71 > DMS = 0,36). S2 e S3 não diferem significativamente entre si (S2 – S3 = 0,29 < DMS = 0,36).

A condutividade hidráulica dos substratos S1 e S2 foi superior a 25 cm/h, enquanto a de S3 foi de 5 cm/h. Lembrando que a condutividade hidráulica do solo somente, foi de 16 cm/h, observou-se que uma maior proporção de palha de coco adicionada aos substratos aumenta o valor deste parâmetro e está coerente com os valores de porosidade encontrados.

As análises de fertilidade determinaram o pH, concentrações de Al, Ca, Mg, Na, K e P. Os valores de acidez potencial, CTC, soma de bases e saturação por bases foram calculados.



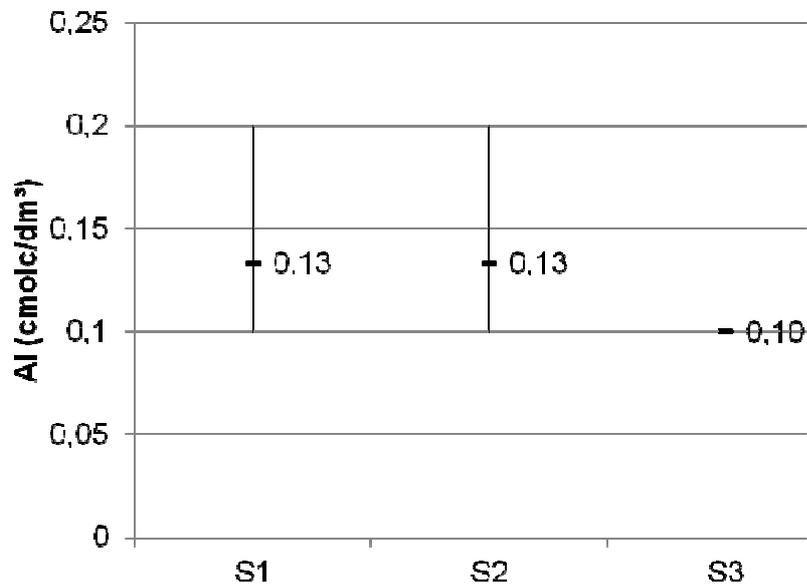
**Gráfico 16.** Intervalo e valores médios de pH nos substratos S1, S2 e S3.

O gráfico acima indica que o pH dos substratos se apresentou na faixa ácida. Não houve diferença significativa entre as médias ( $F_{3,6} = 0,2515$ ,  $p < 0,05$ ). Segundo as diretrizes estabelecidas pela FLL (2002) o pH do substrato para uso em telhados verdes deve estar entre 6,0 e 8,5. HUERTA (2009) na avaliação do desempenho de três substratos baseados em matérias-primas locais (solo superficial local com composto orgânico, xisto expandido com composto orgânico e concreto moído reciclado com composto orgânico) constatou que o pH adquiriu acidez ao longo do tempo: o substrato baseado em concreto passou de pH 8,73 para 7,86; o substrato baseado em xisto passou de pH 8,19 para 7,34; e o baseado em solo passou de pH 7,25 para 6,66, ambos em um período de um mês.

O pH do solo utilizado na composição dos substratos S1, S2 e S3 foi de 5,8 e o pH médio da fibra de coco é de 5,4 (CARRIJO, 2002) podendo variar conforme a procedência das cascas; e sendo os dois principais componentes dos substratos, o solo e a palha de coco, o pH resultante se apresentou ácido. Embora não esteja muito distante da recomendação internacional alemã (FLL, 2002) o parâmetro pH não deve ser universalizado, pois no presente estudo avaliamos composições de substratos diferentes daqueles de uso comercial difundido.

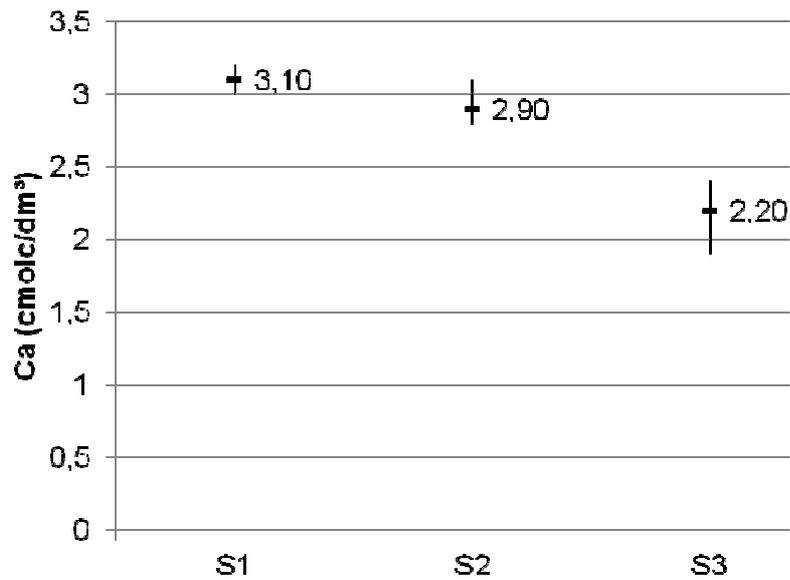
O Alumínio é um elemento classificado como tóxico para a maioria das culturas (MALAVOLTA, 2006). Os substratos S1, S2 e S3 não apresentaram

diferenças significativas entre os valores médios deste elemento ( $F_{3,6} = 0,5$ ,  $p < 0,05$ ).

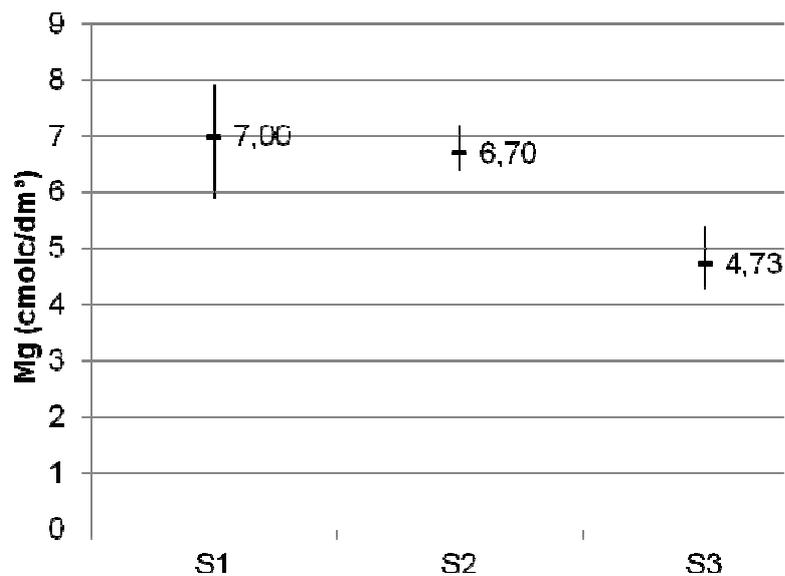


**Gráfico 17.** Intervalo e valores médios das concentrações de Al nos substratos S1, S2 e S3, em cmolc/dm<sup>3</sup>.

As médias das concentrações de cálcio apresentaram diferenças significativas entre S1 e S3 ( $S1 - S3 = 0,9 > DMS = 0,47$ ), S2 e S3 ( $S2 - S3 = 0,7 > DMS = 0,47$ ), indicando que a concentração deste elemento é significativamente menor em S3. A presença de Ca diminui a absorção e reduz o efeito tóxico do Al (MALAVOLTA, 2006). Magnésio também apresentou diferença significativa ( $F_{3,6} = 8,7271$ ,  $p < 0,05$ ) nos valores médios entre S1 e S3 ( $S1 - S3 = 2,27 > DMS = 1,81$ ), entre S2 e S3 ( $S2 - S3 = 1,97 > DMS = 1,81$ ). O teste indicou que a concentração média de Mg em S1 e S2 é superior à concentração média encontrada em S3. Magnésio é um componente importante da molécula de clorofila, pigmento vegetal essencial à fotossíntese (MALAVOLTA, 2006).

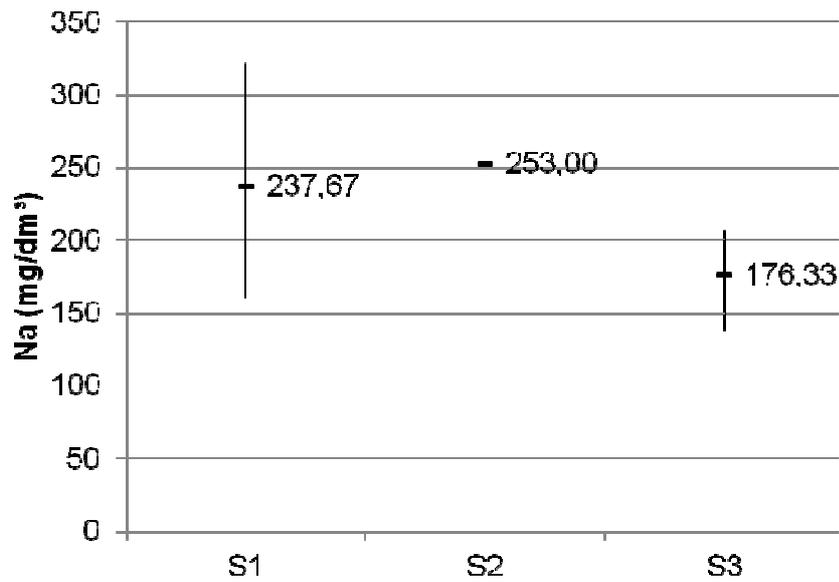


**Gráfico 18.** Intervalo e valores médios das concentrações de Ca nos substratos S1, S2 e S3, em cmolc/dm<sup>3</sup>.

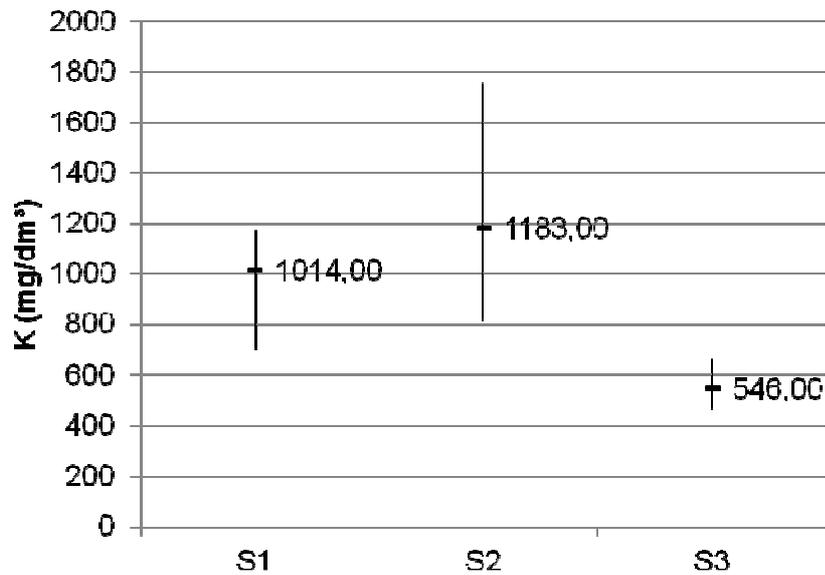


**Gráfico 19.** Intervalo e valores médios das concentrações de Mg nos substratos S1, S2 e S3, em cmolc/dm<sup>3</sup>.

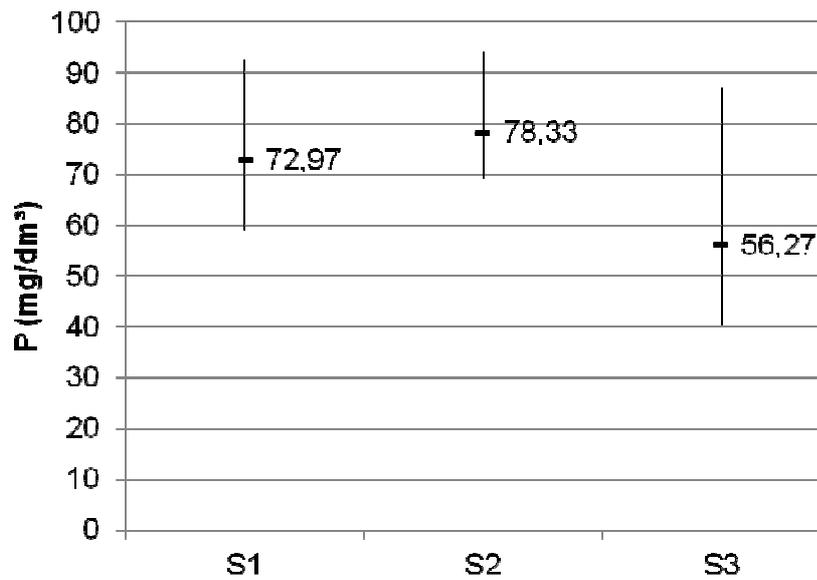
Não ocorreram diferenças significativas entre as concentrações médias de Na ( $F_{3,6} = 1,5$ ,  $p < 0,05$ ), K ( $F_{3,6} = 2,9$ ,  $p < 0,05$ ) e P ( $F_{3,6} = 0,99$ ,  $p < 0,05$ ). Concentrações mais elevadas desses elementos podem ser atribuídas à composição das cascas de coco.



**Gráfico 20.** Intervalo e valores médios das concentrações de Na nos substratos S1, S2 e S3, em mg/dm<sup>3</sup>.

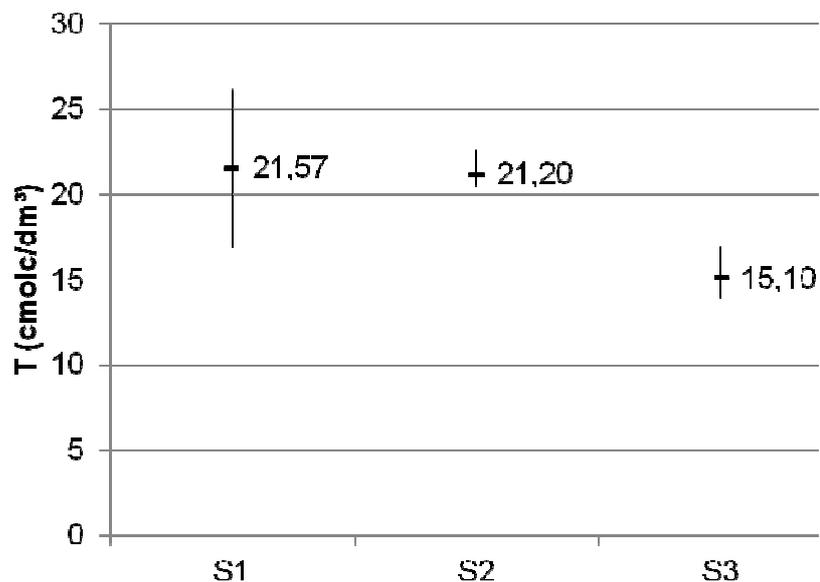


**Gráfico 21.** Intervalo e valores médios das concentrações de K nos substratos S1, S2 e S3, em mg/dm<sup>3</sup>.



**Gráfico 22.** Intervalo e valores médios das concentrações de P nos substratos S1, S2 e S3, em  $\text{mg/dm}^3$ .

Segundo LOPES (2004b) solos com CTC de 6 a 25  $\text{cmolc/dm}^3$  têm alta porcentagem de argila ou alto teor de matéria orgânica; uma maior quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH; possuem maior capacidade de retenção de nutrientes e uma maior capacidade de retenção de umidade.



**Gráfico 23.** Intervalo e valores médios das concentrações de T (CTC) nos substratos S1, S2 e S3, em  $\text{cmolc/dm}^3$ .

É possível comparar a concentração de alguns parâmetros com os padrões estabelecidos pela legislação alemã (FLL, 2002). A FLL é uma organização alemã formada em 1977 e seus padrões são referência para a maioria das indústrias de telhados verdes. A tabela a seguir foi extraída de NELSON (2010) e contém alguns valores padrinizados pela FLL (2002).

**Tabela 4.** Padrões estabelecidos pela FLL (2002) para substratos de telhados verdes extensivos. Fonte: extraído de NELSON (2010).

| Item  | unidade           | Recomendação FLL |
|---|-------------------|------------------|
| Distribuição do tamanho de partículas ( $\leq 0,05$ mm) | %                 | $\leq 15$        |
| Densidade aparente                                      | g/cm <sup>3</sup> | 0,70-1,35        |
| Porosidade total  | %volume           | $\geq 65$        |
| Condutividade hidráulica                                | cm/seg            | 0,00-0,12        |
| pH  | -                 | 6,0-8,5          |
| Fósforo   | mg/L              | $\leq 200$       |
| Potássio  | mg/L              | $\leq 700$       |
| Magnésio  | mg/L              | $\leq 200$       |

Com relação ao tamanho das partículas, os substratos atendem ao critério estabelecido pela FLL (2002): partículas com diâmetro  $\leq 0,05$  mm devem representar  $\leq 15\%$  da massa de substrato. S1, S2 e S3 apresentaram 44, 48 e 59% da massa composta por partículas com tamanho superior a 0,05 mm, respectivamente.

As concentrações de fósforo atendem ao critério quantidade  $\leq 200$  mg/L. A faixa de concentração deste elemento em S1, S2 e S3 está entre 56,27 e 78,33 mg/dm<sup>3</sup>. É importante que este nutriente não esteja presente em elevadas concentrações nos substratos para telhados verdes, pois podem representar uma fonte de contaminação para as águas de escoamento (BERNDTSSON, 2006; BERNDTSSON, 2010).

Os substratos S1 e S2 não se encaixam nos padrões da FLL com relação ao teor de potássio (K)  $\leq 700$  mg/L; S3, com 546 mg/dm<sup>3</sup>, atende ao critério. Embora, a análise dos nutrientes na palha de coco não tenha incluído as concentrações de K, os teores mais elevados de K nos substratos com maior quantidade de palha de

coco na composição, S1 e S2, podem ter relação com a concentração deste elemento na biomassa utilizada.

O critério estabelecido pela FLL para concentrações de Mg nos substratos estabelece quantidades  $\leq 200$  mg/L. S1, S2 e S3 ultrapassaram este limite: S1 apresentou aproximadamente 851 mg/dm<sup>3</sup>; S2, 815 mg/dm<sup>3</sup> e S3, 575 mg/dm<sup>3</sup>. Ambos componentes principais dos substratos, solo e palha de coco, contêm elevados teores de Mg. Observa-se que quanto mais palha de coco na composição do substrato, maior é a concentração deste nutriente. Todos os resultados (valores médios) das análises físico-químicas realizadas para a caracterização dos substratos são apresentados na tabela do anexo I presente no final desta dissertação.

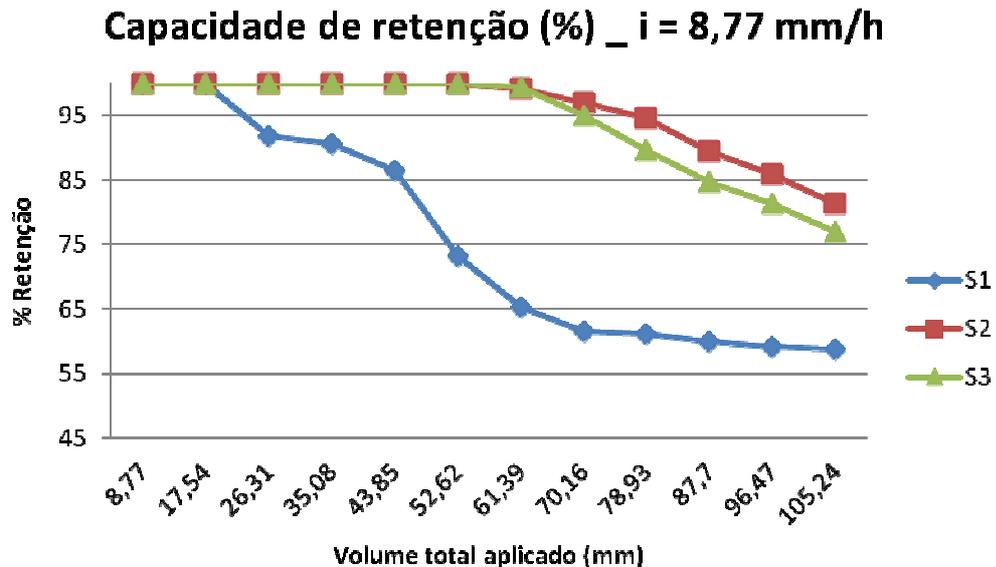
### **6.3 Estudo da Retenção Hídrica e Lixiviação**

#### **6.3.1 Teste de colunas**

Foram aplicadas duas intensidades de precipitação: 8,77 mm/h e 42,0 mm/h, conforme estudo realizado por Oliveira (2009). No primeiro ensaio, com intensidade igual a 8,77 mm/h, cada coluna foi irrigada doze vezes, totalizando aproximadamente 105 mm de lâmina aplicada. No segundo ensaio foram realizadas quatro irrigações, totalizando um volume aplicado de 168 mm. As repetições de cada intensidade de irrigação foram determinadas conforme se observou uma estabilização da capacidade de retenção. Os intervalos entre as simulações foram entre 24 e 36h para todas as colunas. Efeitos da temperatura e evaporação de água foram desconsiderados, uma vez que as colunas permaneceram cobertas por filme plástico e o experimento foi conduzido em ambiente fechado, de temperatura controlada (entre 21°C e 22°C).

Nas duas primeiras simulações de precipitação com intensidade de 8,77 mm/h não ocorreram percolações para todos os substratos avaliados. A partir da 3ª simulação, quando se aplicou um total de 26,31 mm de lâmina d'água o substrato S1 começou a apresentar rendimento inferior a S2 e S3. Os substratos S2 e S3 seguem apresentando comportamento semelhante, com retenção de 100% da precipitação

aplicada até a 7ª simulação (lâmina total de 61,39 mm). O substrato S1 continuou a percolar maior volume de lixiviado até a 8ª simulação de precipitação (lâmina de 70,16 mm), quando atingiu um patamar de escoamento. Ao mesmo tempo, os substratos S2 e S3 começaram a percolar um volume mais significativo de lixiviado neste ponto (gráfico 24).

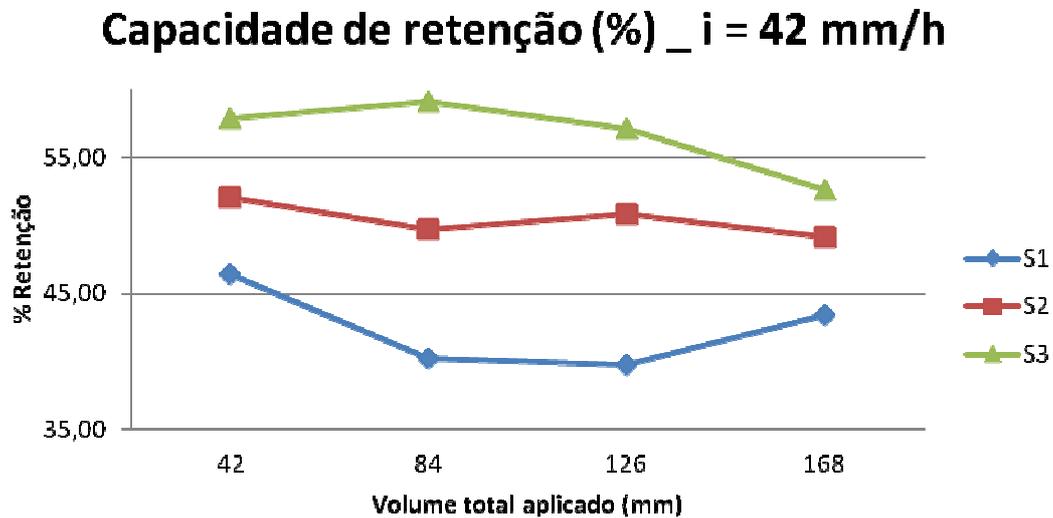


**Gráfico 24.** Capacidade de retenção dos substratos S1, S2 e S3 em sucessivas irrigações com intensidade de 8,77 mm/h.

O comportamento assimétrico do substrato S1 pode ser atribuído à maior concentração de palha de coco na sua composição. Fica claro que este material implicou no surgimento de caminhos preferenciais ao longo do perfil da coluna, por onde a água escoou mais rapidamente. Quando o substrato tendeu à saturação, S1 atingiu a estabilização da lâmina de escoamento e seu rendimento mínimo foi de 59%. Infelizmente, para se observar os pontos de estabilização das lâminas de S2 e S3 um maior número de simulações seriam necessários, mas nota-se que ambos os substratos apresentam boa capacidade de retenção hídrica, mínimo de 81% e 77%, para S2 e S3 respectivamente.

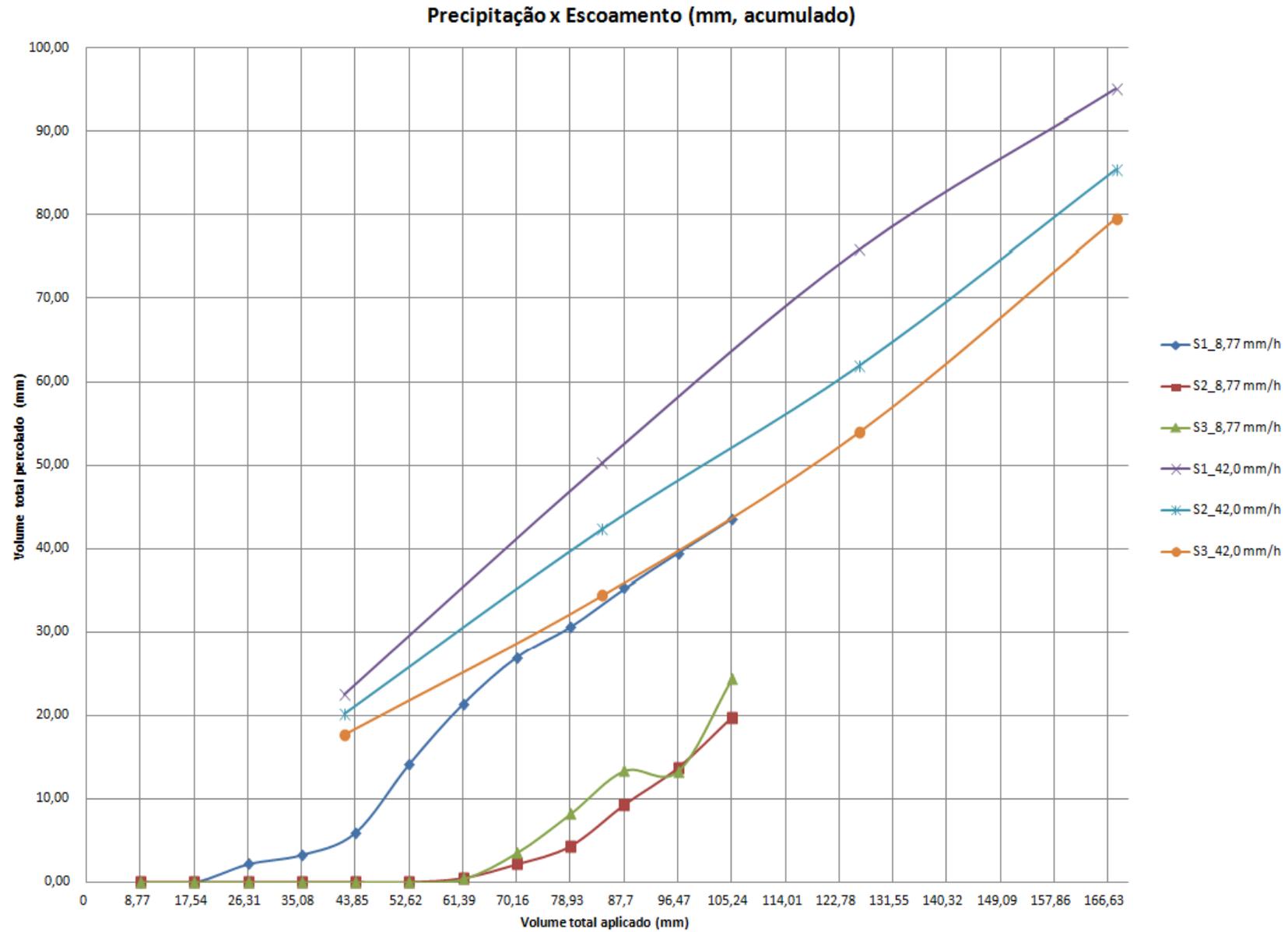
O segundo ensaio de capacidade de retenção, onde se aplicaram lâminas de 42 mm em quatro de precipitações simuladas, apresentou retenções entre 40 e 60% (gráfico 25). O substrato S1 novamente apresentou comportamento inferior aos demais, com capacidades de retenção hídrica entre 40 e 46%. S2 mantém comportamento estável ao longo das simulações, com retenções entre 49 e 52%,

enquanto S3 apresentou retenção máxima de 59% e mínima de 53%. Observou-se que os três substratos tendem a uma estabilização da lâmina de escoamento conforme se aproximam da saturação.



**Gráfico 25.** Capacidade de retenção dos substratos S1, S2 e S3 em ensaio com simulações de precipitação igual 42 mm/h.

Lembrando que o segundo ensaio, 42 mm/h, se iniciou com os substratos úmidos devido à realização do primeiro ensaio, se esperava um rendimento inferior ao observado anteriormente. Em ambos ensaios não se atingiu o ponto de saturação dos substratos, isto é, o volume aplicado não foi totalmente percolado, conforme pode-se observar no gráfico 26.



**Gráfico 26.** Precipitação x Escoamento (mm; volume acumulado).

Observa-se que o substrato S1 apresentou desempenho inferior aos demais para ambas as intensidades de precipitação. Este resultado difere do observado no pré-ensaio, onde a composição de S1 apresentou melhores resultados de retenção. Isto pode ser atribuído ao período de repouso entre a construção das colunas e a realização do experimento, uma vez que, no pré-ensaio as colunas foram construídas e irrigadas em sequência, e no teste de colunas ocorreu um intervalo de aproximadamente um ano entre a construção e o início das irrigações.

Os melhores resultados de retenção para eventos de precipitação mais leve foram obtidos por S2. Enquanto para eventos de intensidade mais forte, S3 obteve melhores resultados. Este comportamento inverso ao observado durante o pré-ensaio deve-se ao teor de umidade no momento da irrigação, uma vez que o ensaio com intensidade de 42 mm/h foi realizado com os substratos úmidos devido ao primeiro ensaio de 8,77 mm/h. Pode-se concluir que ao longo do tempo, a palha de coco retém maior umidade que o solo sozinho, e por isso, os substratos úmidos com maior proporção deste material escoaram maior volume de lixiviado. Após o encerramento das irrigações se observou que S3 perdeu umidade mais rapidamente que S1 e S2. Com o passar dos dias S1 eliminou gotas de lixiviado, não totalizando um volume significativo, mas indicando que esta composição não é capaz de reter a umidade por um longo período de tempo. A técnica de irrigação também pode ter influenciado estes resultados: no pré-ensaio a lâmina d'água foi aplicada de uma única vez e a percolação se deu por gravidade; no teste de colunas a lâmina foi aplicada por gotejamento e a percolação se deu mais lentamente.

A comparação com outros estudos aponta valores médios de retenção da precipitação por telhados verdes iguais a 46%, 45% e 49% (BENGDITSSON *et al.*, 2005; VANWOERT *et al.*, 2005; MONTERUSSO *et al.*, 2004). As taxas de retenção encontradas por MORAN *et al.* (2005) e VANWOERT *et al.* (2004) foram de 55% e 60,6%, respectivamente. VANWOERT (2004) mostrou que o substrato sozinho é capaz de reduzir o escoamento em aproximadamente 50% em comparação com um telhado de cascalho convencional e que o telhado vegetado pode reter até 87% variando com a profundidade do substrato e inclinação da plataforma. CARTER & RASMUSSEN (2006) encontraram capacidade de retenção média de 78% em seu estudo. VILLAREAL (2005) avaliou o efeito da inclinação do telhado sobre a capacidade de retenção e encontrou valores de retenção entre 10%, para telhados

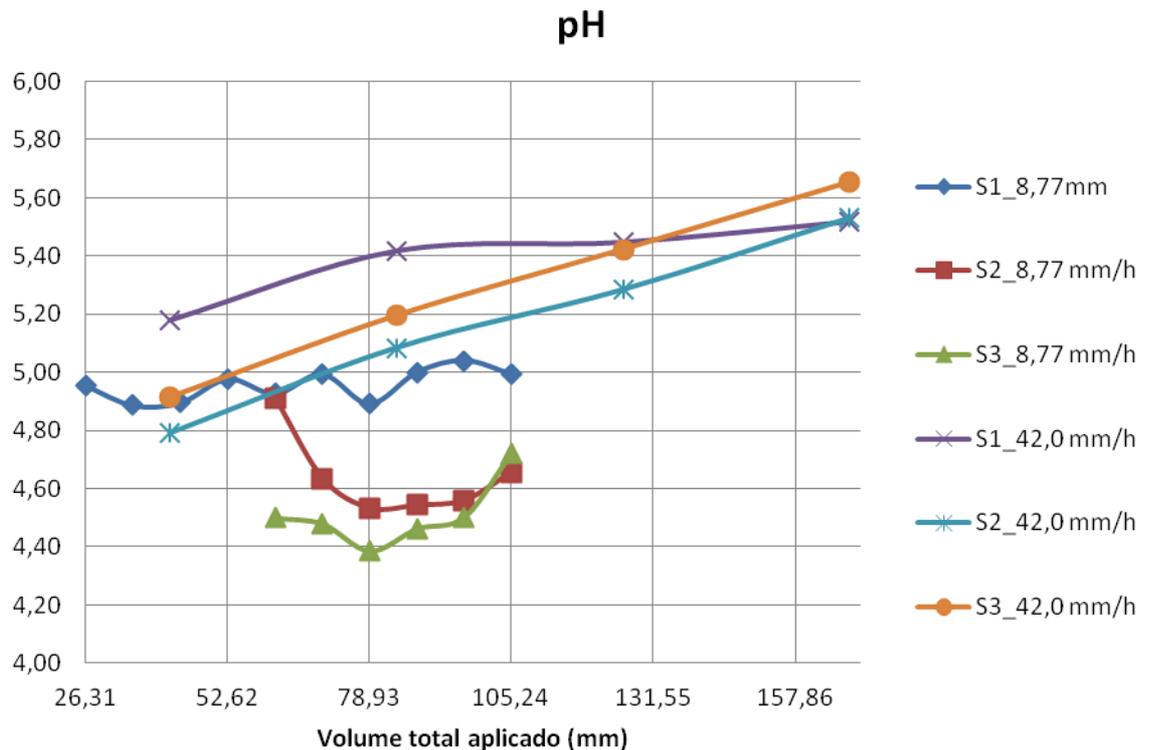
mais inclinados, e 62% para telhados com inclinação de 2%. GETTER *et al.* (2007) também avaliaram o efeito da inclinação e encontraram valores médios de retenção de 80,8%. TEEMUSK (2007) encontrou retenção de 85,7% para um evento de 2,1 mm. BLISS (2009) encontrou redução de até 70% no volume de escoamento. Os valores de retenção aqui encontrados, entre 40% e 100%, abrangem as faixas de retenção encontradas na literatura, embora um maior período de estudo seja necessário para avaliar a influência da idade do substrato, do grau de umidade do material.

Um ponto importante a se observar é a influência do gel retentor de umidade adicionado à composição dos substratos. Segundo o fabricante cada 1000g do material pode reter até 250 litros de água. Foram adicionados 4,0g de Stockosorb<sup>®</sup> por dm<sup>3</sup> de substrato para todas as composições. Logo, cada substrato é capaz de reter 1,0 litro adicional à sua capacidade de retenção hídrica. Observou-se a expansão volumétrica deste gel e o aumento da altura de coluna dos substratos em até 1,5 cm.

### 6.3.2 Análise do Lixiviado

Para a avaliação da qualidade do lixiviado os seguintes parâmetros foram analisados: pH, CE, PO<sub>4</sub>, P total, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, nutrientes e metais (Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb).

Os valores médios de pH são apresentados no gráfico a seguir (gráfico 25). Para ambos os ensaios o pH do lixiviado encontra-se na faixa ácida. No ensaio com intensidade de 8,77 mm/h, o pH de S1, igual a 4,97, é significativamente maior ( $F_{3,15} = 28,964$ ,  $p < 0,05$ ) que os valores encontrados para S2, pH = 4,64 (S1 – S2 = 0,3; DMS = 0,16402) e S3, pH = 4,51 (S1 – S3 = 0,46; DMS = 0,16402). No segundo ensaio, de 42 mm/h, o pH ficou ligeiramente acima: entre 5,17 e 5,39, e não ocorreram diferenças significativas entre os substratos ( $F_{3,15} = 0,533$ ,  $p < 0,05$ ). Observa-se que ao longo das lixiviações o pH dos substratos aqui estudados teve um pequeno aumento.

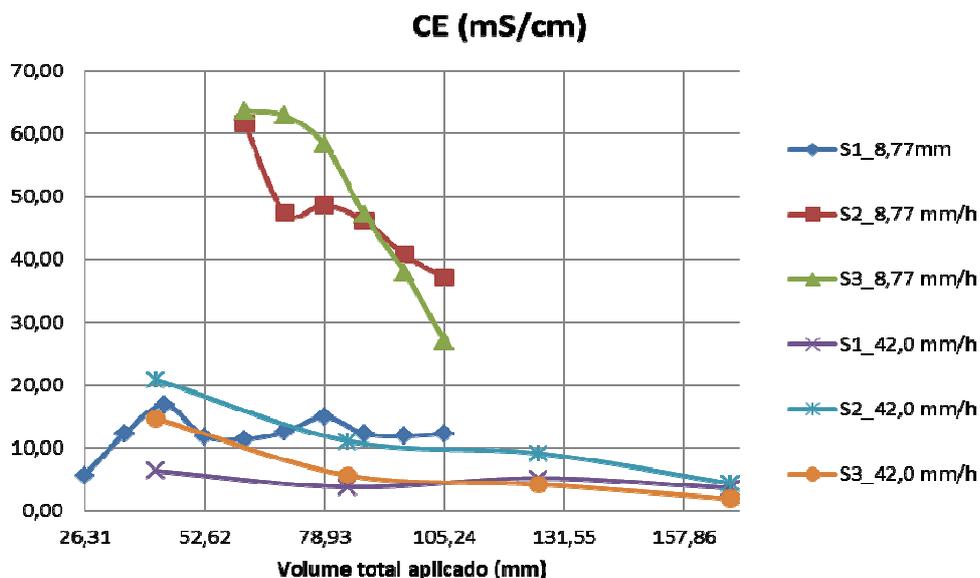


**Gráfico 27.** Valores médios de pH durante os ensaios com intensidade de precipitação de 8,77 mm/h e 42 mm/h.

A FLL (2002) recomenda valores de pH para o substrato entre 6 e 8,5. Diversos estudos apresentam valores de pH maiores aos encontrados neste estudo. MOLINEUX *et al.* (2009) analisaram o pH para quatro tipos de substratos em seu estado bruto, pH entre 8,53 e 11,8, e quando adicionados de duas diferentes proporções de matéria orgânica, 15% e 25%. Os autores confirmaram que a adição de compostos orgânicos reduziu significativamente o pH para todos os materiais, pH entre 6 e 9, aumentando as condições favoráveis para o crescimento de plantas. JOHNSTON (1996) sugere que o pH deve ser ligeiramente ácido, com um valor próximo de 6. NICHOLSON *et al.* (2009) avaliaram a qualidade da água para diversos tipos de cobertura e no telhado verde o pH encontrado foi de 7,5 aproximadamente. TEEMUSK (2007) verificou a neutralização da acidez da água da chuva pelos telhados verdes: o pH subiu de 5,2 a 5,6 para 7,2 a 8,3. BERNDTSSON *et al.* (2006) também encontraram pH nesta faixa, 7,35, ao caracterizar o substrato de um telhado verde em Malmö, Suécia. O pH encontrado nas lixiviações de todos os substratos foi ácido para ambos os ensaios, entre 4,39 e 5,65. Como a água

aplicada sobre as colunas tinha inicialmente pH entre 6,2 e 6,6, pH da água destilada, pode-se afirmar que o meio acidificou a água durante as primeiras percolações.

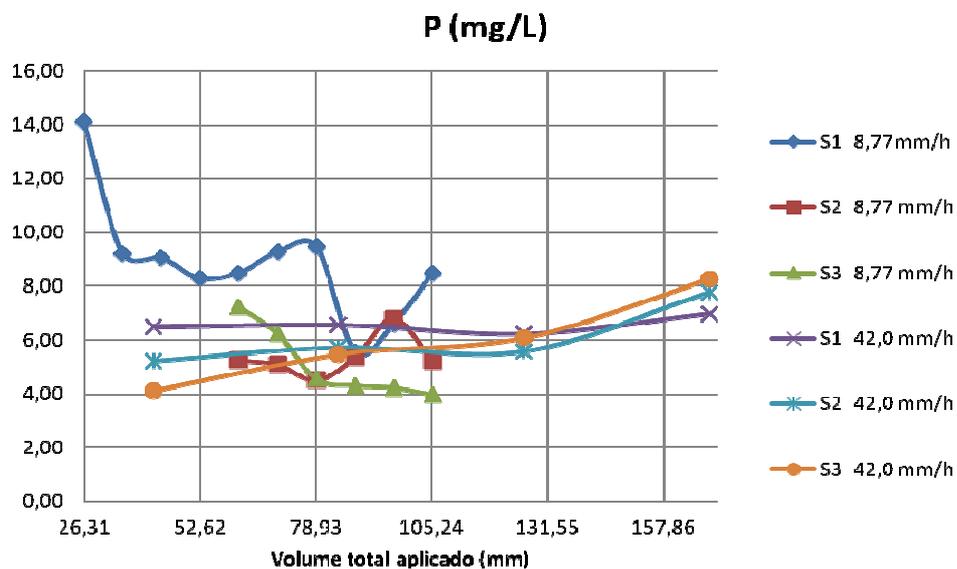
Os valores médios de condutividade elétrica diferem de acordo com a intensidade de precipitação aplicada. No ensaio com  $i = 8,77$  mm/h o substrato com maior proporção de solo na composição apresenta os valores mais elevados de C.E. durante as primeiras percolações (S1). Existe diferença significativa entre S1 e S2 e S1 e S3 ( $F_{2,15} = 26,18$ ;  $p < 0,05$ ). Para o ensaio com  $i = 42$  mm/h inicialmente S2 apresenta maior C.E., mas logo seu comportamento se assemelha aos demais. Não ocorreram diferenças significativas entre os substratos para esta variável durante o segundo ensaio ( $F_{2,9} = 1,73$ ,  $p < 0,05$ ). Os estudos que analisam a qualidade do lixiviado de telhados verdes, comumente não apresentam dados de C.E., uma vez que este parâmetro varia com o tipo de material utilizado.



**Gráfico 28.** Valores médios de condutividade elétrica para os substratos durante os ensaios com intensidade de precipitação de 8,77 mm/h e 42 mm/h.

Os valores médios de fósforo (P) presente nos lixiviados do ensaio de  $i = 8,77$  mm/h foram significativamente maiores para S1 ( $F_{2,15} = 9,58$ ;  $p < 0,05$ ), com máximo de 14 mg/L na primeira percolação. S2 e S3 apresentaram valores na mesma faixa encontrada para o ensaio de  $i = 42$  mm/h, entre 4 e 8 mg/L. Não houve diferença significativa para esta variável entre os substratos neste segundo ensaio

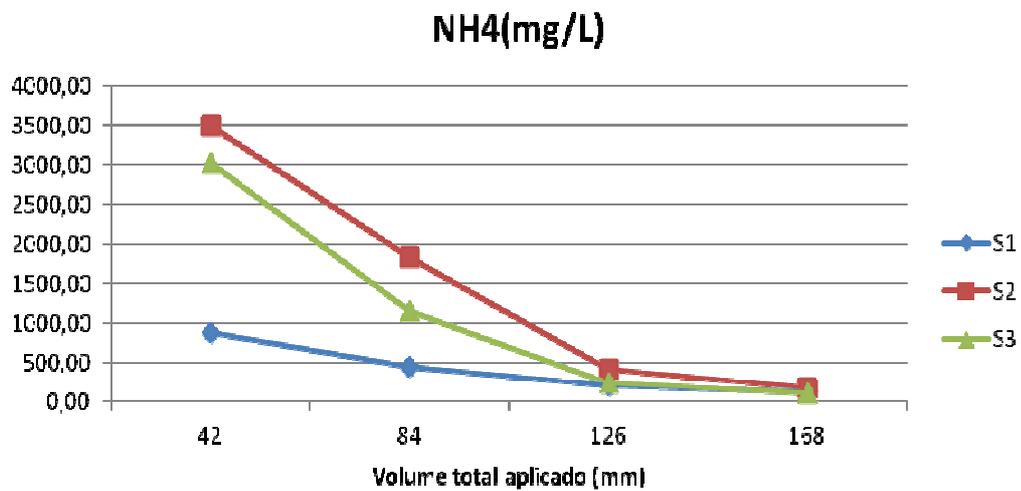
( $F_{2,9} = 0,268$ ;  $p < 0,05$ ). Estes valores de P estão muito acima do encontrado na literatura. Berndtsson (2010) apresenta em sua revisão sobre a qualidade da água percolada de telhados verdes valores de P entre 0,026 e 0,09 mg/L (TEEMUSK & MANDER, 2007); 0,6 e 1,5 mg/L (MORAN et al., 2005); 0,31 mg/L (BERNDTSSON et al., 2009). BLISS (2009) também utilizou casca de coco na composição do substrato e encontrou valores elevados de fósforo na água de escoamento, 2 a 3 mg/L. No presente estudo os níveis de P na análise da palha de coco pura foram de 640 mg/dm<sup>3</sup> e entre 56 e 78 mg/dm<sup>3</sup> na análise dos substratos em si.



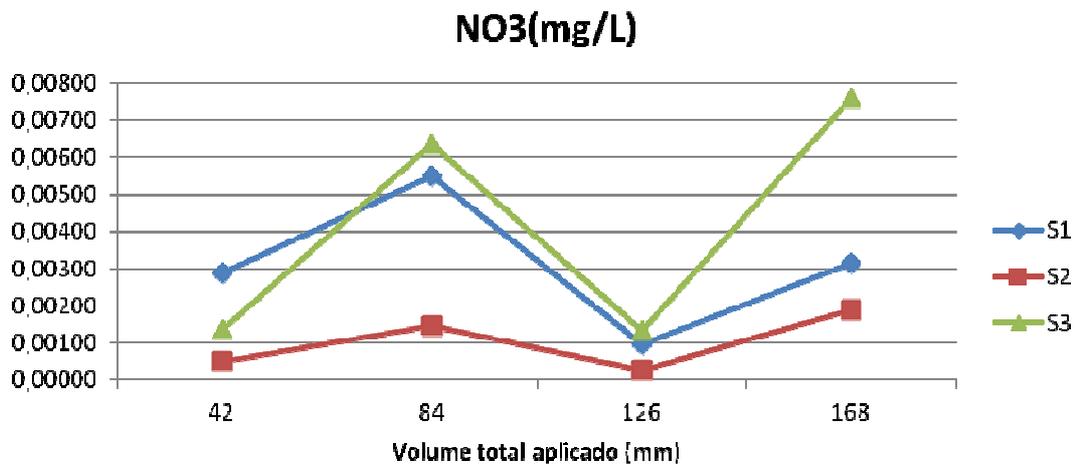
**Gráfico 29.** Valores médios de fósforo (P) para os substratos durante os ensaios com intensidade de precipitação de 8,77 mm/h e 42 mm/h.

Nitrogênio amoniacal (NH<sub>4</sub>-N) e nitrato (NO<sub>3</sub>-N) foram analisados somente nas amostras provenientes do segundo ensaio,  $i = 42$  mm/h, pois o primeiro ensaio não gerou volume suficiente de amostras para estas análises. As concentrações de NH<sub>4</sub>-N foram inicialmente maiores em S2 e S3 com diferença significativa para S1, mas conforme os substratos eram “lavados” estes níveis diminuíram e tenderam à igualdade para ambos os substratos (gráfico 30). Os valores aqui encontrados estão muito acima da faixa apresentada por outros estudos (TEEMUSK & MANDER, 2007; BERNDTSSON *et al.*, 2009), mas cabe ressaltar que estas referências analisaram telhados verdes já estabelecidos e vegetados, enquanto o presente estudo analisou a qualidade da água de escoamento dos substratos propriamente.

Conforme apresentado no gráfico 31, a concentração máxima de nitrato encontrada foi de aproximadamente 0,008 mg/L em S3. O substrato S2 apresentou os menores valores para esta variável, máximo de 0,002 mg/L. As concentrações ficaram abaixo dos níveis encontrados por Nicholson et al. (2009), TEEMUSK & MANDER (2007) e BERNDTSSON *et al.* (2009) que encontraram valores de até 1 mg/L, 0,8 mg/L e 0,07 mg/L, respectivamente. Segundo BERNDTSSON (2010) as concentrações de nitrogênio no runoff de telhados verdes estão relacionadas com o tipo de material, idade e principalmente manutenção, devido ao uso de fertilizantes.

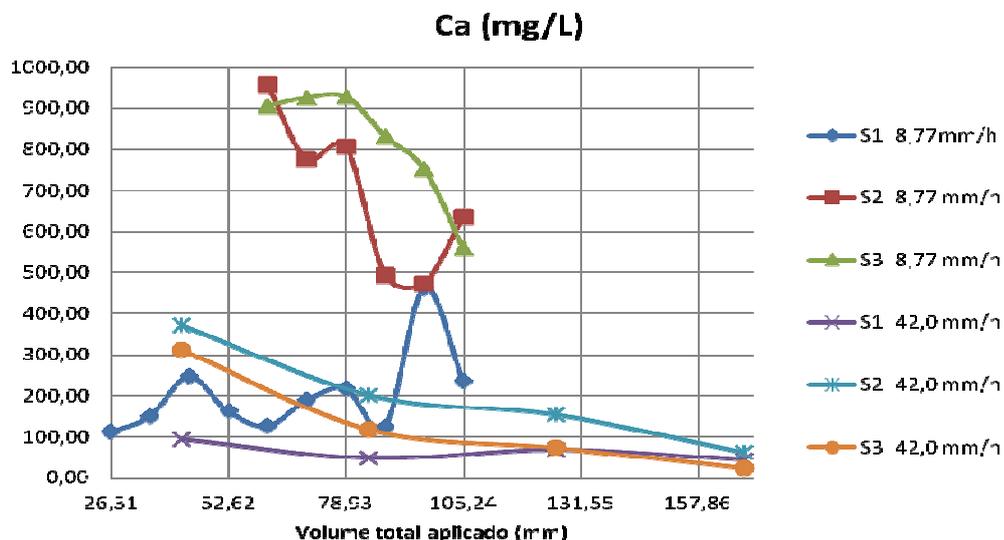


**Gráfico 30.** Valores médios de Nitrogênio amoniacal (NH<sub>4</sub>-N) para os substratos durante o ensaio com intensidade de precipitação de 42 mm/h.



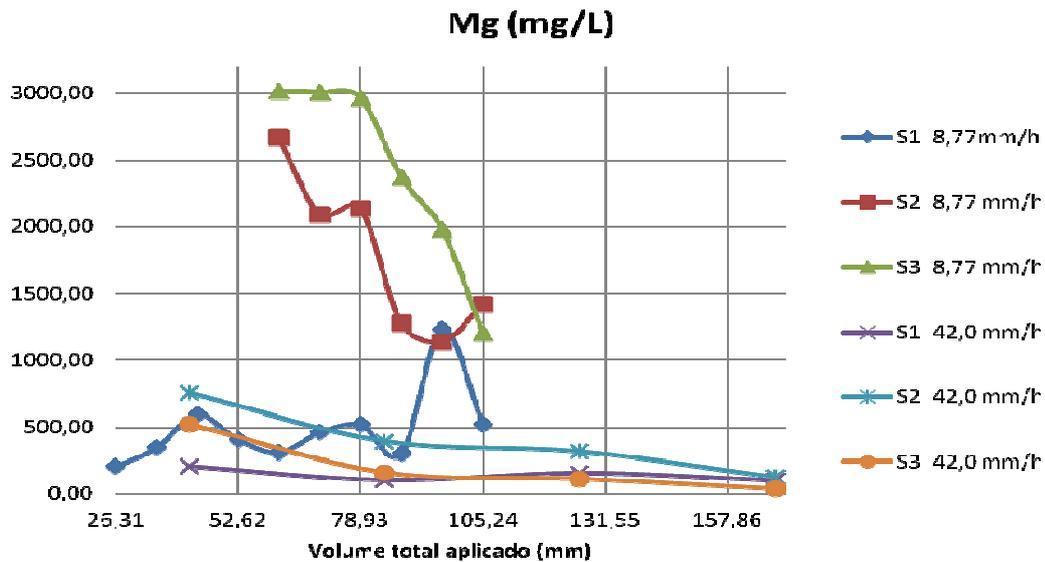
**Gráfico 31.** Valores médios de Nitrato (NO<sub>3</sub>-N) para os substratos durante o ensaio com intensidade de precipitação de 42 mm/h.

Os níveis de cálcio (Ca) no ensaio com  $i = 8,77$  mm/h foram significativamente menores em S1 comparados com S2 e S3 (gráfico 32). Enquanto S2 e S3 apresentaram valores entre 500 mg/L e 960 mg/L, S1 apresentou valores semelhantes aos encontrados no ensaio com  $i = 42$  mm/h, entre 24 e 372 mg/L. Conforme os valores encontrados na caracterização do solo e da palha de coco, que são os dois componentes em maior proporção na composição dos substratos, a palha de coco possui elevada concentração deste nutriente, 863 mg/kg, sendo muito provavelmente a fonte deste cátion. MOLINEUX *et al.* (2009) encontraram níveis de cálcio nos lixiviados de substratos baseados em tijolos vermelhos esmagados e cinzas de papel, entre 444 mg/L e 544 mg/L.



**Gráfico 32.** Valores médios das concentrações de cálcio (Ca) para os substratos durante os ensaios com intensidade de precipitação de 8,77 mm/h e 42 mm/h.

As concentrações de magnésio (Mg) encontradas apresentam o mesmo comportamento da análise de cálcio. Em comparação com o estudo realizado por MOLINEUX *et al.* (2009), os valores encontrados de Mg ficaram muito acima dos apresentados pela autora que foram de 8,4 mg/L para o lixiviado de substrato baseado em argila; e 2,4 mg/L para o lixiviado de substrato baseado em tijolo vermelho esmagado. Novamente, a fibra de coco pode ser a fonte deste nutriente, pois na análise deste material a concentração de Mg foi de aproximadamente 613 mg/kg.



**Gráfico 33.** Valores médios das concentrações de magnésio (Mg) para os substratos durante os ensaios com intensidade de precipitação de 8,77 mm/h e 42 mm/h.

Os metais presentes nas amostras foram: cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cromo (Cr), cobalto (Co) e níquel (Ni). Cádmio (Cd) e chumbo (Pb) não foram detectados pela técnica utilizada.

Cobre se apresentou mais proeminente em S1 e S2 para ambos os ensaios (figura13-a). A faixa de concentração encontrada ficou entre 0,03 mg/L e 0,17 mg/L. Os substratos com maior proporção de palha de coco na composição apresentaram, em geral, níveis mais elevados de cobre. Na análise do solo sozinho a concentração de Cu encontrada foi 0,8 mg/kg, enquanto na palha de coco a concentração foi de 4,36 mg/dm<sup>3</sup>, sendo, portanto, a palha de coco a fonte provável deste metal. Nicholson et al. (2009) encontraram valores inferiores a 25 µg/l no lixiviado de um protótipo de telhado verde. MOLINEUX *et al.* (2009) não detectaram a presença de cobre nas lixiviações de nenhum dos substratos analisados. Os valores encontrados no presente estudo são superiores ao encontrados por BERNDTSSON *et al.* (2006), que apresentaram valores inferiores a 5 ng/mL.

No ensaio com  $i = 8,77$  mm/h S1, S2 e S3 apresentam comportamentos diferentes sendo os níveis de ferro (Fe) claramente mais elevados em S3 para ambos os ensaios (figura 13-b). Logo, a possível fonte deste metal é o solo adicionado aos substratos, uma vez que S3 possui maior proporção deste material

na composição. Os valores máximos encontrados foram de 18 mg/L ( $i = 8,77$  mm/h) e 4,31 mg/L ( $i = 42$  mm/h). Na análise do solo sozinho foram encontradas concentrações médias de Fe de 4292,0 mg/kg. BERNDTSSON *et al.* (2006) encontraram valores menores que 50 ng/mL. MOLINEUX *et al.* (2009) encontraram 0,1 mg/L para os substratos baseados em argila e cinzas de papel.

A lixiviação de manganês (Mn) apresenta comportamento semelhante à lixiviação de ferro para  $i = 8,77$  mm/h: níveis mais elevados para S3. Para  $i = 42$  mm/h, S2 apresentou valores ligeiramente superiores a S3, no entanto a diferença não é significativa com o decorrer das lixiviações (figura 13-c). BERNDTSSON *et al.* (2006) encontraram valores de Mn inferiores a 5 ng/ml, enquanto MOLINEUX *et al.* (2009) não detectaram este metal em nenhum dos substratos avaliados. Os teores de Mn para a análise do solo sozinho foram de 115,1 mg/kg e de 8,76 mg/kg para a fibra de coco.

As concentrações de zinco (Zn) foram maiores em S3 para  $i = 8,77$  mm/h, com lixiviação máxima de 229 mg/L (figura 13-d). Os menores valores foram observados para S1 em ambos os ensaios. A caracterização da fibra de coco e do solo apontaram a presença deste metal na sua composição, concentrações de 7,57 mg/kg e 5,6 mg/kg respectivamente. NICHOLSON *et al.* (2009) não encontraram concentrações significativas de Zn nas lixiviações do telhado verde estudado. MOLINEUX *et al.* (2009) encontraram valores de 0,1 mg/L nas lixiviações dos substratos baseados em argila e cinzas de papel e BERNDTSSON *et al.* (2006) encontraram valores inferiores a 50 ng/mL. BLISS *et al.* (2009) encontrou 0,02 mg/L na análise do lixiviado do telhado verde em estudo.

Cromo (Cr) foi encontrado com mais frequência em S1 para  $i = 8,77$  mm/h. Para os demais, só foi detectado em alguns pontos ou não detectado pela técnica utilizada, conforme a figura 14-a. A concentração máxima encontrada foi de 0,03 mg/L. Cromo está presente na composição da palha de coco em 2,44 mg/kg e 3,45 mg/Kg de solo. Este metal está presente em concentração muito pequena no estudo de BERNDTSSON *et al.* (2006), menor que 0,5 ng/mL e no estudo realizado por MOLINEUX *et al.* (2009) só foi detectado no lixiviado proveniente dos pellets carbon8, 0,1 mg/L, que é um material baseado em calcário.

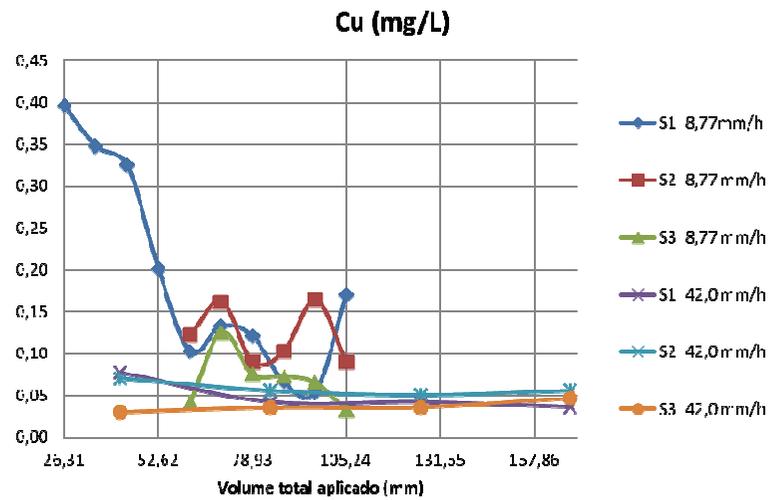
Cobalto (Co) foi detectado em concentrações máximas de 0,2 mg/L em S3 para  $i = 8,77$  mm/h. Quando aplicada intensidade mais forte de chuva as

concentrações foram menores, entre 0,01 e 0,05 mg/L, e não se apresentou em S1 neste segundo ensaio (figura 14-b). A fonte provável deste cátion é o solo adicionado à composição dos substratos, pois está presente em 3,42 mg/Kg de solo. Na análise da fibra de coco não foi detectada a presença de cobalto.

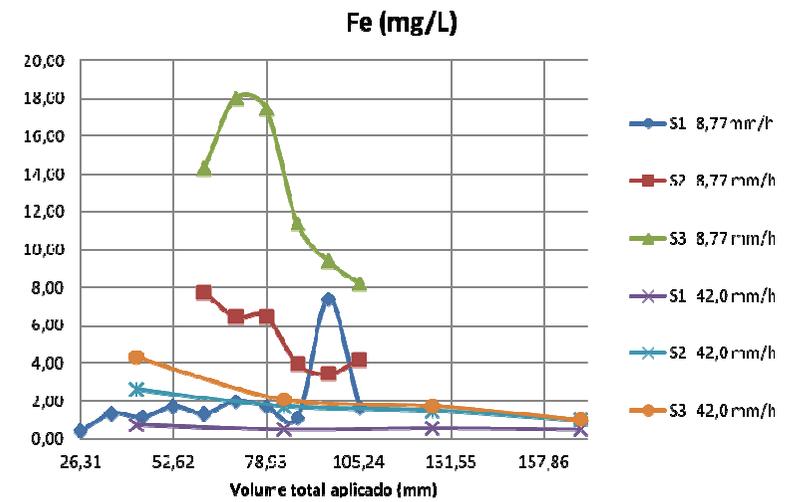
A presença de níquel (Ni) foi detectada em todas as amostras de lixiviado para ambos os ensaios com exceção à primeira lixiviação de S1 ( $i= 8,77$  mm/h) conforme a figura 14-c. Este cátion foi detectado na análise da palha de coco (concentração de 0,57 mg/kg) e constitui a provável fonte de Ni. As referências aqui utilizadas para comparação não apresentaram valores deste elemento nos estudos de lixiviação de telhados verdes.

A seguir são apresentados os gráficos demonstrativos da ocorrência dos cátions acima relatados (figuras 13 e 14).

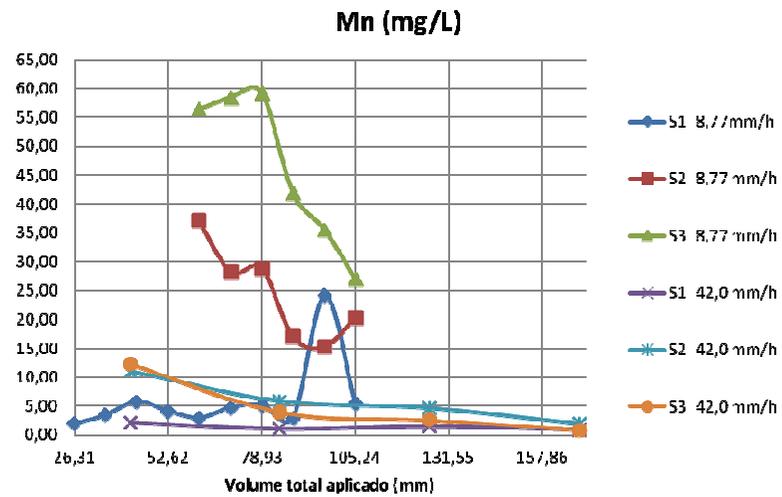
a



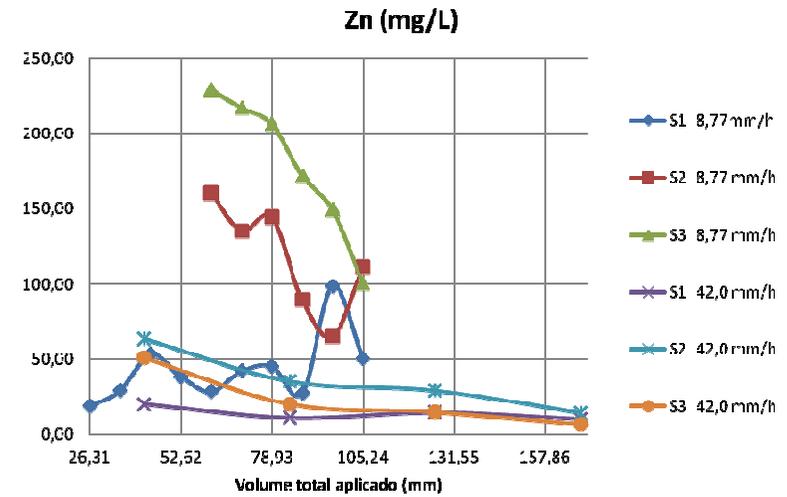
b



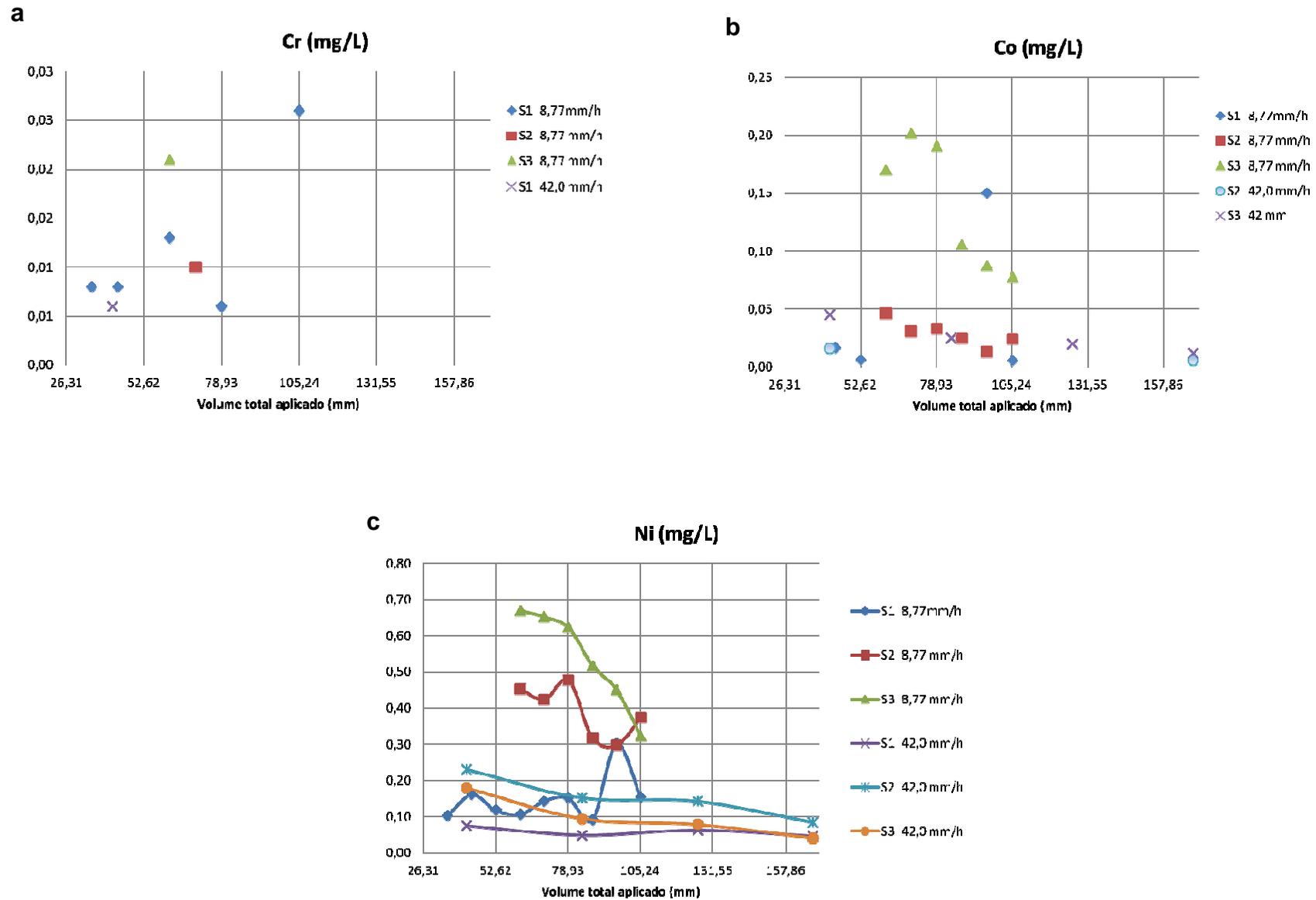
c



d



**Figura 13.** Gráficos demonstrativos da ocorrência de Cu, Fe, Mn e Zn durante as lixiviações para  $i = 8,77$  mm/h e  $i = 42$  mm/h.



**Figura 14.** Gráficos demonstrativos da ocorrência de Cr, Co e Ni durante as lixiviações para  $i = 8,77 \text{ mm/h}$  e  $i = 42 \text{ mm/h}$ .

Os valores de condutividade elétrica indicam que a lixiviação de íons de S2 e S3 no primeiro ensaio,  $i=8,77\text{mm/h}$ , é maior que a observada no segundo ensaio de intensidade mais forte. Este comportamento pode ser atribuído ao efeito first flush: quando os poluentes que se encontram no meio permanecem inertes por um longo período e uma primeira precipitação “lava” estes elementos para fora, tornando a qualidade da água lixiviada neste primeiro escoamento inferior aos subsequentes. BERNDTSSON *et al.* (2008) in BERNDTSSON (2010), encontrou concentrações maiores de alguns componentes estudados em amostras do primeiro escoamento do que em amostras dos escoamentos posteriores de intensidade mais forte. Este comportamento característico do first flush se observa para quase todos os cátions analisados (Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn e Ni), principalmente para S2 e S3 (maiores concentrações no primeiro ensaio, menores concentrações no segundo). Fósforo não segue a mesma tendência: inicialmente as concentrações de P são mais elevadas no primeiro ensaio, principalmente para S1, e no segundo ensaio os níveis tendem a aumentar conforme as precipitações seguintes são aplicadas para todos os substratos. Cobalto e cromo foram os cátions com menor frequência de ocorrência nos lixiviados ou não detectados pela técnica utilizada.

Uma variável ainda não analisada e não encontrada em nenhuma das referências mencionadas, mas que merece destaque é a cor da água de escoamento. A seguir são apresentadas as fotografias com um panorama das amostras obtidas nos ensaios de  $i = 8,77 \text{ mm/h}$  e  $i = 42 \text{ mm/h}$  (figura 15). Esta cor que vai desde o tom amarelado ao amadeirado pode ser consequência da presença de tanino e lignina presentes na composição da palha de coco. Até o momento, a presença destes compostos e a avaliação da cor das amostras não foram analisadas.

A fibra de coco e o solo, adicionados em maiores proporções na composição dos substratos, constituem fonte de muitos dos cátions analisados. Cálcio, magnésio, cobre, zinco, cromo e níquel estão presentes na composição da palha de coco; ferro, manganês, zinco, cromo e cobalto, no solo. Todos os resultados (valores médios) aqui apresentados encontram-se no final desta dissertação no anexo II.



**Figura 15.** Visualização da cor das amostras obtidas durante os ensaios no teste de colunas: a)  $i = 8,77 \text{ mm/h}$ ; b)  $i = 42 \text{ mm/h}$ .

## 7. CONCLUSÕES

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida no contexto do Projeto de Pesquisa SANEAMENTO-MCT-MCIDADES-FINEP/CNPq: “REDE MAPLU - Manejo de Águas Pluviais” o qual está associado ao uso de técnicas compensatórias para a mitigação e controle de enchentes urbanas. O experimento conduzido foi a etapa preliminar para um posterior estudo da avaliação da retenção hídrica e qualidade da água de escoamento de telhados verdes em escala piloto.

Grande parte dos estudos realizados na avaliação do desempenho de sistemas telhado verde tem origem na Europa e a constituição dos substratos apresenta semelhanças em diversos trabalhos. Porém, no Brasil existem poucos estudos acerca desta tecnologia, especificamente sobre composição de substratos. A FLL (2002) é a precursora das legislações referentes à tecnologia telhados verdes, mas é importante não se prender totalmente aos padrões europeus, pois as condições climáticas e a escolha de materiais podem interferir nos resultados esperados.

As composições de substratos apresentadas neste estudo oferecem suporte para o estabelecimento de espécies vegetais. No entanto, devem ser realizadas investigações sobre as necessidades nutricionais das plantas antes de se proceder ao plantio. A formulação da composição dos substratos considerou que o substrato almejado deve possuir características que resistam ao clima da região de estudo, que requeira o mínimo de manutenção para uso em telhados verdes extensivos, que suporte satisfatoriamente uma determinada espécie vegetal, que maximize a vida útil do sistema e, ainda, que atenda ao objetivo de se mitigar o volume de águas de escoamento pluvial.

Pode-se concluir que no pré-ensaio a fibra de coco melhora sua capacidade de retenção hídrica quando fracionada em partículas de menor tamanho. As composições com melhores resultados de retenção hídrica e relação peso seco x peso úmido foram escolhidas para compor os substratos S1(15% solo + 55% coco + 30%componentes fixos), S2 (30% solo + 40% coco + 30%componentes fixos) e S3 (60% solo + 10% coco + 30%componentes fixos). O substrato que apresentou

melhores resultados de retenção hídrica e apresentou menor peso seco e úmido foi S1.

Com relação estudo da capacidade de retenção hídrica e lixiviação, concluiu-se que:

- a) S2 e S3 apresentaram melhores resultados de retenção para ambas as intensidades de precipitação ( $i=8,77\text{mm/h}$  e  $i=42\text{mm/h}$ ). Observou-se que S1, que no pré-ensaio apresentou melhor capacidade de retenção, teve desempenho inferior aos demais o que pode ser atribuído à maior concentração de fibra de coco na sua composição. Este material pode ter implicado no surgimento de caminhos preferenciais ao longo do perfil da coluna, por onde a água escoou mais rapidamente. Mesmo assim, seu rendimento mínimo foi de 59%. Os substratos S1 e S2 apresentaram capacidade de retenção hídrica mínima entre 77% e 81%.
- b) No ensaio em que se aplicou uma intensidade de precipitação mais forte a faixa de retenção ficou entre 40% e 59%. O substrato S2 apresentou desempenho mais linear quando o teor de umidade aumentou no meio. Um maior número de simulações para ambas intensidades de precipitação é necessário para um melhor entendimento das diferenças entre os resultados obtidos no pré-ensaio e no teste de colunas. O intervalo entre as irrigações pode ter influenciado estes resultados, uma vez que a palha de coco retém umidade por mais tempo que o solo. Em ambos ensaios não se atingiu o ponto de saturação dos substratos. Isto pode ser atribuído ao uso do gel retentor de umidade. Os valores de retenção encontrados no presente estudo, entre 40 e 100%, foram muito satisfatórios.

Em geral, foram encontradas maiores concentrações dos cátions analisados em comparação com os valores encontrados pela literatura, o que pode ser atribuído ao tipo de material utilizado na composição. Muitos dos valores encontrados por outros estudos têm origem em telhados verdes já estabelecidos, onde a carga mais pesada de poluentes já foi lixiviada (efeito *first flush*). Além de se tratar de uma nova composição para substratos, os piores resultados da análise qualitativa da água no presente estudo foram obtidos nos primeiros escoamentos.

Pode-se afirmar que as variáveis analisadas para avaliar a qualidade da água de escoamento dos substratos S1, S2 e S3, para as duas intensidades de

precipitação aplicadas ficaram acima dos valores comumente encontrados na literatura, indicando que as composições aqui adotadas para os substratos podem implicar em uma fonte de poluição hídrica.

As composições de substratos para uso em telhados verdes apresentados neste estudo atenderam seu objetivo quanto à retenção hídrica, mas a qualidade da água percolada torna seu uso inviável até o momento. Chamou à atenção a coloração apresentada pelas amostras. Verifica-se a necessidade de estudar mais profundamente a qualidade da água lixiviada por cada componente dos substratos individualmente, a fim de se identificar as fontes dos elementos que presentes em concentrações elevadas são poluentes. Pode ser considerada a remoção de algum (s) dos componentes presentes na composição para se atingir um nível satisfatório de qualidade da água de escoamento.

## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas sugestões para investigações futuras:

- a) Realizar composições de substratos com a ausência e diferentes proporções de todos os componentes para investigar a influência destes materiais nas características físico-químicas e através de teste em batelada fazer a análise qualitativa da água em contato com cada componente dos substratos;
- b) Realizar mais simulações de precipitação no teste de colunas para investigar a liberação de nutrientes na água de escoamento ao longo de um período de tempo maior e analisar outros parâmetros (DBO, DQO, N-total, concentrações de tanino, cor e teste de ecotoxicologia);
- c) O estudo em escala piloto com unidades experimentais de telhados verdes deve ser conduzido testando os substratos com melhor desempenho de retenção e qualidade do runoff a fim de se observar o estabelecimento e desenvolvimento da *arachis pintoii*, espécie vegetal cuja revisão foi apresentada nesta dissertação, assim como a qualidade da água. As unidades piloto de telhados verdes devem estar sob o abrigo de um telado e receber precipitação controlada simulando diferentes intensidades e intervalos de tempo.
- d) As características referentes ao desenvolvimento e sobrevivência da vegetação devem ser observadas: taxa de crescimento, taxa de área foliar, taxa de mortalidade, biomassa aérea e subsuperficial, altura da planta, etc;
- e) Outras avaliações podem ser realizadas com as unidades piloto: efeito da inclinação do telhado, efeito da profundidade do substrato, influência da espécie vegetal sobre a retenção hídrica e remoção de poluentes, efeito do first flush, temperatura ambiente, temperatura sob o substrato e temperatura rente à vegetação; testar espécies vegetais para a geração de renda; captar a água de chuva e comparar a qualidade com a água percolada pelas unidades TV.

As sugestões aqui apresentadas fazem parte da etapa seguinte do projeto de pesquisa SANEAMENTO-MCT-MCIDADES-FINEP/CNPq: “REDE MAPLU - Manejo de Águas Pluviais”. Sub-Projeto: “*Telhado Verde (TV) e Captação e Uso de Águas Pluviais (CAP) como técnicas compensatórias em áreas de interesse social e ambiental do Estado do RJ*”. Pretende-se avaliar quali-quantitativamente o desempenho de substratos quanto à capacidade de retenção hídrica em eventos de precipitação representativos da região de estudo, cidade do Rio de Janeiro, através de unidades piloto de telhado verde.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, T. T. A.; LYRA, G. B.; FORNARO, A.; ANDRADE, M. F. *“Composição Química da Água de Chuva na Região Metropolitana do Rio de Janeiro”*. IAG/USP, 2004.

AHMED, W.; GARDNER, T.; TOZE, S. *Microbiological Quality of Roof-Harvested Rainwater and Health Risks: A Review.* ; Journal of Environmental Quality, Volume 40. 2011.

ARAÚJO, D. B. *Produção de Mudanças de Espécies Ornamentais em Substratos a Base de Resíduos Agroindustriais e Agropecuários*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias. Depto. de Ciências do solo, Fortaleza, 2010.

BAPTISTA, C. R. W.; MORETINI, C. A.; MARTINEZ, J. L. *Arachis pintoii, palatabilidade, crescimento e valor nutricional frente ao pastoreio de eqüinos adultos*. Rev. Acad., Curitiba, v. 5, n. 4, p. 353-357, 2007.

BAUMANN, N. *Ground-nesting birds on green roofs in Switzerland: Preliminary observations*. Urban Habitats 4: 37–50, 2006.

BELISÁRIO, M.; BORGES, P. S.; GALAZZI, R. M.; PIERO, P. B. D.; ZORZAL, P. B.; RIBEIRO, A. V. F. N.; RIBEIRO, J. N. *O Emprego de Resíduos Naturais no Tratamento de Efluentes Contaminados com Fármacos Poluentes*. Inter Science Place. Ano 2, nº 10, 2009.

BENGTSSON, L.; GRAHN, L.; OLSSON, J. *Hydrological function of a thin extensive green roof in Sweden*. Nordic Hydrol., 36 (3), 259-268. 2005.

BERNDTSSON, J. C.; BENGTSSON, L.; JINNO, K. *Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs*. Ecological Engineering, 35: 369–380. 2009.

BERNDTSSON, J. C.; EMILSSON, T.; BENGTSSON, L. *The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality*. Science of the Total Environment. 355 (2006) 48– 63, 2006.

BERNDTSSON, J. C.; *Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review*. Ecological Engineering 36: 351–360. 2010.

BHATNAGAR, A.; VILAR, V. J. P.; BOTELHO, C. M. S.; BOAVENTURA, R. A. R. *Coconut-based biosorbents for water treatment - A review of the recent literature*. Advances in Colloid and Interface Science. 160 (2010), 1 15, 2010.

BLISS, D. J.; NEUFELD, R. D.;RIES, R. J. *Storm Water Runoff Mitigation Using a Green Roof*. Environmental Engineering Science, Vol. 26, 2. 2009.

BRENNEISEN, S. *Space for urban wildlife: Designing green roofs as habitats in Switzerland*. Urban Habitats 4: 27–36, 2006.

CALEGARI, A. et al. *Leguminosas para adubação verde de verão no Paraná*. Londrina: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1995.

CARRIJO, O.A.; LIZ, R.S.; MAKISHIMA, N. *Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola*. Horticultura Brasileira, Brasília, v. 20, n. 4, p. 533-535, 2002.

CARTER, T. L.; RASMUSSEN, T. C. *Hydrologic behavior of vegetated roofs*. J. Am. Water Resour. Assoc. 42 (5), 1261-1274. 2006.

CARTER, T.; KEELER, A. *Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems*. Journal of Environmental Management, 87:350–363. 2008.

COMMUNITY SOLUTIONS. *“The Power of Community :How Cuba Survived Peak Oil”* Director: Faith Morgan. The Community Solutions Project. 2006. In: WALDBAUM, H. *Green Roofs for a Urban Agricultural*. 2008.

DAN, TK. *Indian Coconut Journal*, 23:12. 1993.

DRAMSTAD, W.E.; OLSON, J.D.; FORMAN, R.T.T. 1996. *Landscape ecology. Principles in landscape architecture and land-use planning*. Harvard Univ. Graduate School of Design, Island Press, and Am. Soc. of Landscape Architects, Washington, DC. 1996.

DUNNETT, N.; KINGSBURY, N. *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press, Portland. 2004.

EMILSSON, T.; BERNDTSSON, J. C.; MATTSSON, J. E. ROLF, K. *Effect of using conventional and controlled release fertilizer on nutrient runoff from various vegetated roof systems*. *Ecological Engineering*, 29, 260-271. 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2ª ed. Rio de Janeiro, 212pp. 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 1998. Embrapa Gado de Corte. livro "*Gado de corte: o produtor pergunta, a Embrapa responde*". Cap 3. Disponível em:  
<http://www.cnpqc.embrapa.br/tecnologias/quersabermis/500p/P162.html>  
21/10/2011, 15:55.

FERNANDES, K. D. N. *Uso de Carvão Ativado de Endocarpo de Coco no Tratamento de Água*. Artigo Técnico Científico. In: *Revista Eletrônica PUC-RS*. Volume 3, nº 2, 2010.

FLL, 2002. *Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of GreenRoof Sites* (English version). Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., Troisdorf, Germany. Citado em Molineux (2009).

FLUES, M.; HAMA, P.; LEMES, M. J. L.; DANTAS, E. S. K. & FORNARO, A. "Evaluation of the Rainwater Acidity of a Rural Region Due to a Coal Fired Power Plant in Brazil", in *Atmospheric Environment* 36, 2002, pp. 2397-2404.

FLUES, M.; HAMA, P. & FORNARO, A. "Avaliação do Nível da Vulnerabilidade do Solo Devido à Presença de Termelétrica a Carvão (Figueira, PR – Brasil)". *Química Nova* 26(4), 2003, pp. 479-83.

FORNARO, A. & GUTZ, I. G. R. "Wet Deposition and Related Atmospheric Chemistry in the São Paulo Metropolis, Brazil: Part 2, Contribution of Formic and Acetic Acids". *Atmospheric Environment* 37, 117- 28. 2003.

FORNARO, A. "Águas de Chuva: Conceitos e Breve Histórico. Há Chuva Ácida no Brasil?". *REVISTA USP*, São Paulo, n.70, p. 78-87. 2006.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A. *Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention*. *Ecological Engineering* 31: 225–231. 2007.

GETTER, K.; ROWE, D. B.; ROBERTSON, G. P.; CREGG, B. M.; ANDRESEN, J. A. *Carbon sequestration potential of extensive green roofs*. *Environmental Science Technology*, 43: 7564–7570. 2009.

GOUVEA, L. V.; OLIVEIRA, A. J.; LEME, F. B. P. *TETO VERDE: Uma proposta ecológica e de melhoria do conforto ambiental a partir do uso de coberturas vegetais nas edificações*. Artigo técnico digital, Programa de Pós-graduação em Desing, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

GRANT, G. *Extensive green roofs in London*. *Urban Habitats* 4: 51–65, 2006.

HARTIG, T.; MANG, M.; EVANS, G.W. *Restorative effects of natural environment experience*. *Environment and Behavior* 23: 3–26. 1991

HERNÁNDEZ, R. P. B.; PÁSZTI, Z.; MELO, H. G. de; AOKI, I. V. “*Chemical Characterization and Anticorrosion Properties of Corrosion Products Formed on Pure Copper in Synthetic Rainwater of Rio de Janeiro and São Paulo*”, in *Corrosion Science* 52, pp. 826-837. 2010.

HUERTA, A. M. *Sustainable design for a subtropical green roof with local, recyclable substrates and native plants species*. Civil Engineering Monograph, Texas A&M University. 2009.

IWASHITA, A.; ASTOLFO, R.; FORNARO, A. “*Composição Iônica de Águas de Chuva da Região Oeste da Cidade de São Paulo: 03/2005 a 02/2006*”. IAG/USP, 2006.

JAQUES, R. C. “*Qualidade da Água de Chuva no Município de Florianópolis e sua Potencialidade para Aproveitamento em Edificações*”. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2005.

JOHNSTON, J.; NEWTON, J. 1996. *Building green: A guide for using plants on roofs, walls and pavements*. The London Ecol. Unit, London. 1996.

KRATZ, D. *Substratos Renováveis na Produção de Mudas de Eucalyptus benthamii Maiden et Cambage e Mimosa scabrella Benth.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LAAR, M. et al. *Estudo de aplicação de plantas em telhados vivos extensivos em cidades de clima tropical*. In. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC, 6. Anais. São Pedro, São Paulo, 2001.

LARA, L. B. L. S.; ATAXO, P.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; CAMARGO, P. B.; KRUSCHE, A.; AYERS, G. P.; FERRAZ, E. S. B. & BALLESTER, M. V. “*Chemical Composition of Rainwater and Anthropogenic Influences in the Piracicaba River Basin, Southeast Brazil*”. *Atmospheric Environment* 35, pp. 4937-4945. 2001.

LATSHAW, K.; FITZGERALDY, J.; SUTTON, R. *Analysis of Green Roof Growing Media Porosity*. *Rurals*, Volume 4, Issue 1, Article 2. 2009.

LEAL, C.C.A. et al. *Avaliação das Condições para Remoção de Cor em Efluentes Têxteis Utilizando como Adsorvente o Mesocarpo do Coco Verde*. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Santa Catarina, 2003.

LEAL, T. F. M.; FONTENELE, A. P. G.; PEDROTTI, J. J. & FORNARO, A. *“Composição Iônica Majoritária de Águas de Chuva na Região Central de São Paulo”*. *Química Nova* 27(6), pp. 855-61, 2004.

LI, J.; WAI, O. W. H.; LI, Y. S.; ZHAN, J.; HO, Y. A.; LI, J.; LAM, E. *Effect of green roof on ambient CO2 concentration*. *Building and Environment*, 45: 2644-2651. 2010.

LOPES, J. L. W. *Produção de mudas de Eucalyptus grandis W. (Hill ex. Maiden) em diferentes substratos e lâminas de irrigação*. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004a.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. *Interpretação de análise de solo: Conceitos e Aplicações*. Boletim técnico nº2, UFLA, LAVRAS, MG. 2004b.

MALAVOLTA, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo. Ceres. 2006. 638 p.

MELLO, W. Z. de. *“Precipitation Chemistry in the Coast of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil”*, in *Environmental Pollution* 114, pp. 235-42, 2001.

MELLO, W. Z. & ALMEIDA, M. D. de. *“Rainwater Chemistry at the Summit and Southern Flank of the Itatiaia Massif, Southeastern Brazil”*, in *Environmental Pollution*, 129, pp. 63-8, 2004.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M.. *Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?* Landscape and Urban Planning 77 (2006) 217–226, 2005.

MIGLIAVACCA, D. M.; TEIXEIRA, E. C.; MACHADO, A. C. M. & PIRES, M. R. “*Composição Química da Precipitação Atmosférica no Sul do Brasil – Estudo Preliminar*”, in Química Nova 28(3), 2005, pp. 371-9.

MONTE, M. B. M.; RESENDE, N. G. A. M. *Zeolitas Naturais*. Comunicação Técnica Elaborada para Edição do Livro Rochas e Minerais: Usos e Especificações. Cap.3, 21 p., 2005.

MONTERUSSO, M. A.; ROWE, D. B., RUGH, C. L.; RUSSEL, D. K. *Runoff water quantity and quality from green roofs systems*. Acta Hort. 639, 369-376. 2004.

MORAN, A.; HUNT, B.; SMITH, J.. *Hydrologic and water quality performance from green roofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina*. Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show; 4–6 May 2005, Washington, DC. 2005.

NASCIMENTO, N.O.; BAPTISTA, M.B. *Técnicas Compensatórias em Águas Pluviais*. In: Antônio Marozzi Righetto. Manejo de Águas Pluviais Urbanas. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES; p. 150-198, 2009.

NASCIMENTO, I.S. *O Cultivo do Amendoim Forrageiro*. Revista Brasileira Agrociência, Pelotas, v. 12, n. 4, p. 387-393, 2006.

NAZYRA W.; RAMLAH M. T.; WARDAH T. *Correlation Between Physical Characteristics Of Different Plant In Urban Storm Water Management*. Universiti Malaysia Terengganu International Annual Symposium. 11-13 july, Kuala Terengganu, Malaysia, EP 34, p. 249-254, 2011.

NELSON, T. A. *A Comparative Study of Three Growing Media and Four Plant*

*Groups Under Extensive Green Roof Conditions in San Luis Obispo, California.* Thesis (Master of Science in Agriculture), California Polytechnic State University San Luis Obispo, California, USA. 2010.

NIACHOU, A.; PAPAKONSTANTINOY, K.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOYLIS, A.; MIHALAKAKOU, G. *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance.* Energy Build. N° 33, p. 719–729, 2001.

NICHOLSON, N.; CLARK, S. E.; LONG, B. V.; SPICHER, J.; STEELE, K. A. *Rainwater Harvesting for non-potable use in gardens: a comparison of runoff water quality from green vs. traditional roofs.* World Environmental and Water Resources Congress, 2009.

O'CONNOR, P. J. *Perennial Peanut: Gold for Green Roofs in the Humid Tropics.* Scientific Technical Article, UCLA Extension - Student Chapter of the American Society of Landscape Architects, 2010. Disponível em: [http://www.greenroofs.com/content/guest\\_features013.htm#top](http://www.greenroofs.com/content/guest_features013.htm#top), acesso em 21/10/2011, 13:45.

OBERNDORFER, E.; LUNDHOLM, J.; BASS, B.; COFFMAN, R.; DOSHI, H.; DUNNETT, N.; GAFFIN, S.; KÖHLER, M.; LIU, K.; ROWE, B. *Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services.* BioScience, November 2007 / Vol. 57 No. 10, 2007.

OLIVEIRA, E. W. N. *Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PEREIRA, C. A. *Drenagem Urbana.* (Monografia) - Faculdade de Engenharia de Agrimensura de Pirassununga, Pirassununga (SP): 2009.

PIMENTEL DA SILVA, L. et al. *HIDROCIDADES - Cities, Quality of Life and Water*

*Resources: Integrated Water Resources Management and Urban Planning for Low-Land Region of Jacarepaguá, Rio de Janeiro, Brazil*. 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, 2008.

PINO, G. A. H. *Biossorção de Metais Pesados Utilizando Pó da Casca de Coco Verde (Cocos nucifera)*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

RENTERGHEM, T. V.; BOTTELDOOREN, D. *Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs*. *Building and Environment*, 44, 1081-1087. 2009

RESENDE, N. G. A. M.; MONTE, M. B. M.; PAIVA, P. R. P. *Zeólitas Naturais*. Comunicação Técnica Elaborada para Edição do Livro Rochas e Minerais: Usos e Especificações. Parte 2 – Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações. Cap. 39, 2008.

ROCHA, F. R.; FRACASSI DA SILVA, J. A.; LAGO, C. L.; FORNARO, A. & GUTZ, I. G. R. *“Wet Deposition and Related Atmospheric Chemistry in the São Paulo Metropolis, Brazil: Part I. Major Inorganic Ions in Rainwater as Evaluated by Capillary Electrophoresis with Contactless Conductivity Detection”*, in *Atmospheric Environment* 37, 2003, pp. 105-15.

SANTOS, E. G.; ALSINA, O. L. S.; SILVA, F. L. H. *Adsorção de Metais  $Pb^{+2}$ ,  $Cd^{+2}$  e  $Ni^{+2}$  em uma Coluna de Leito Fixo de Biomassas*. Trabalho Técnico Científico. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2 a 5 de outubro, Salvador, 2005.

SCHNEIDER, E. L. *Adsorção de Compostos Fenólicos Sobre Carvão Ativado*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Toledo/PR, 2008.

SILVEIRA, M. S. *Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquetes em Salvador-BA*. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias

Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2008.

SIMPSON, C.E.; VALLS, J.F.M.; MILES, J.W. *Reproductive biology and potential for genetic recombination in Arachis* In: KERRIDGE, P.C.; HARDY, B. (Eds.) *Biology and agronomy of forage Arachis*. Cali: CIAT, p.43-52. 1994.

SOUSA, F. W.; MOREIRA, S.A.; OLIVEIRA, A. G.; CAVALCANTE, R. M.; NASCIMENTO, R. F.; ROSA, M. F. *Uso da Casca de Coco Verde como Adsorvente na Remoção de Metais Tóxicos*. Química Nova, Vol. 30, No. 5, 1153-1157, 2007.

SOUZA, P. A.; MELLO, W. Z.; MALDONADO, J. & EVANGELISTA, H. “*Composição Química da Chuva e Aporte Atmosférico na Ilha Grande, RJ*”, in Química Nova, 29 (3), pp. 471-6. 2006.

TAVARES, S. R. L. *Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos*. Tese de doutorado UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro. 2009.

TEEMUSK, A.; MANDER, Ü. *Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events*. Ecological engineering 30 (2007) 271–277, 2007.

TOWNSHEND, D. *Study on Green Roof Application in Hong Kong*. Final Report, Urbis Limited - Architectural Services Department. 2006.

THOMAS, R.J.U. *Requerimientos de rhizobium, fijación de nitrógeno y reciclaje de nutrientes em Arachis Forrajero*. In: KERRIDGE, P C.; HARDY, B. (Eds.) *Biology and agronomy of forage Arachis*. Cali: CIAT, p.91-101. 1994.

TRESMONDI, A. C. C. L.; TOMAZ, E.; KRUSCHE, A. V. “*Avaliação de pH e Composição das Águas de Chuva em Paulínia-SP*”, in Eng. Ambient. – Espírito Santo do Pinhal, v. 2, n. 1, 2005, p. 070-084.

VAN DAM, J.E.G. *Coir processing technologies, Improvement of drying, softening, bleaching and dyeing coir fibre/yarn and printing coir floor coverings*. Technical Paper , No. 6, Wageningen, Netherlands, FAO and CFC 2002.

VANWOERT, N. D.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A.; RUGH, C. L.; XIAO, L. *Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media depth*. Journal of Environmental Quality 34: 1036–1044, 2005.

VIEIRA FILHO, M.; PEDROTTI, J. J.; LACERDA, A. P.; FORNARO, A. “*Avaliação de Traçadores de Fontes na Composição Química de Águas de Chuva na Cidade de São Paulo*”. IAG/USP, 2010.

VIJAYARAGHAVAN, K.; JOSHI, U. M.; BALASUBRAMANIAN, R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs. Water Research 46: 1337 e 1345. 2012.

VILJOEN, A. ‘*CPULs - Continuous Productive Urban Landscapes. Designing Urban Agriculture for Sustainable Cities*’. Oxford, Architectural Press. 2005.

VILLAREAL, E. L.; BENGTSSON, L. *Response of a Sedum green-roof to individual rain events*. Ecological Engineering, 25, 1–7. 2005.

YAMAURA, M.; MONTEIRO, R. A.; COTRIM, M. E. B.; COSTA, C. H.; PIRES, M. A. F. *Caracterização do Bagaço de Cana-de-açúcar e fibras de Coco e Avaliação como Biossorventes de Pb*. Trabalho Técnico Científico. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 02 a 07 de setembro, Belo Horizonte/MG, 2007.

YOK, T. P.; SIA, A. *A Selection of Plants for Green Roofs in Singapore*. Publication of National Parks Board, Singapore, 2008.

WONG. N. H.; Tay, S. F.; Wong, R.; ONG, C. L.; SIA, A. *Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore*. Building and Environment, 38: 499 – 509. 2003.

## ANEXO I

## ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS S1, S2 E S3 (valores médios)

| Análises físicas         |                       |                       |         |        |        |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|---------|--------|--------|
| Parâmetro                | unid                  | S1                    | S2      | S3     |        |
| Diâmetro da partícula    | <0,002                | mm                    | 113,33  | 86,67  | 86,67  |
|                          | 0,05 - 0,002          |                       | 346,67  | 307,33 | 174,67 |
|                          | 0,2 - 0,05            |                       | 101,33  | 130,00 | 148,67 |
|                          | 2,0 - 0,2             |                       | 438,67  | 476,00 | 590,00 |
| Porosidade               | Total                 | %                     | 74,60   | 67,00  | 49,47  |
|                          | Micro                 |                       | 42,83   | 40,10  | 33,97  |
|                          | Macro                 |                       | 31,77   | 26,90  | 15,53  |
| Densidade                | Aparente              | g/cm <sup>3</sup>     | 0,48    | 0,76   | 1,32   |
|                          | Partícula             |                       | 1,89    | 2,31   | 2,60   |
| Condutividade hidráulica | cm/h                  | 25,00                 | 25,00   | 5,00   |        |
| Análises químicas        |                       |                       |         |        |        |
| Parâmetro                | unid                  | S1                    | S2      | S3     |        |
| Cobre                    | mg/dm <sup>3</sup>    | 1,53                  | 1,16    | 0,49   |        |
| Ferro                    |                       | 28,37                 | 25,533  | 16,333 |        |
| Manganês                 |                       | 21,57                 | 21,833  | 24,067 |        |
| Zinco                    |                       | 299,67                | 258,67  | 212,33 |        |
| Carbono                  | g/kg                  | 46,07                 | 39,567  | 16,50  |        |
| Nitrogênio               |                       | 6,33                  | 6,20    | 4,00   |        |
| pH                       |                       | 5,26                  | 5,06    | 5,03   |        |
| Alumínio                 | cmolc/dm <sup>3</sup> | 0,13                  | 0,13    | 0,10   |        |
| Cálcio                   |                       | 3,10                  | 2,90    | 2,20   |        |
| Magnésio                 |                       | 7,00                  | 6,70    | 4,73   |        |
| Sódio                    | mg/dm <sup>3</sup>    | 237,67                | 253,00  | 176,33 |        |
| Potássio                 |                       | 1014,00               | 1183,00 | 546,00 |        |
| Fósforo                  |                       | 72,97                 | 78,333  | 56,267 |        |
| T (CTC)                  |                       | cmolc/dm <sup>3</sup> | 21,57   | 21,20  | 15,10  |

## ANEXO II

## ANÁLISES QUÍMICAS DO LIXIVIADO (valores médios)

| Ensaio→              |       |    | (8,77 mm) |        |        |        |         |         |         |         |         | (42 mm) |        |        |        |        |
|----------------------|-------|----|-----------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Ppt. Acumulada (mm)→ |       |    | 26,31     | 35,08  | 43,85  | 52,62  | 61,39   | 70,16   | 78,93   | 87,7    | 96,47   | 105,24  | 42     | 84     | 126    | 168    |
| pH                   | -     | S1 | 4,95      | 4,89   | 4,90   | 4,98   | 4,93    | 4,99    | 4,89    | 5,00    | 5,04    | 4,99    | 5,18   | 5,42   | 5,45   | 5,52   |
|                      |       | S2 | -         | -      | -      | -      | 4,91    | 4,64    | 4,53    | 4,54    | 4,56    | 4,66    | 4,79   | 5,08   | 5,28   | 5,53   |
|                      |       | S3 | -         | -      | -      | -      | 4,50    | 4,48    | 4,39    | 4,46    | 4,50    | 4,72    | 4,92   | 5,20   | 5,42   | 5,65   |
| CE                   | mS/cm | S1 | 5,68      | 12,24  | 16,80  | 11,87  | 11,37   | 12,51   | 14,92   | 12,27   | 11,93   | 12,27   | 6,36   | 3,78   | 5,21   | 3,62   |
|                      |       | S2 | -         | -      | -      | -      | 61,55   | 47,45   | 48,60   | 46,17   | 40,68   | 37,10   | 20,86  | 11,09  | 9,15   | 4,37   |
|                      |       | S3 | -         | -      | -      | -      | 63,60   | 62,85   | 58,27   | 47,03   | 37,93   | 26,98   | 14,68  | 5,67   | 4,21   | 1,95   |
| P                    | mg/L  | S1 | 14,10     | 9,22   | 9,04   | 8,28   | 8,49    | 9,27    | 9,45    | 5,54    | 6,61    | 8,49    | 6,49   | 6,58   | 6,24   | 6,98   |
|                      |       | S2 | -         | -      | -      | -      | 5,24    | 5,09    | 4,50    | 5,36    | 6,79    | 5,21    | 5,23   | 5,73   | 5,59   | 7,79   |
|                      |       | S3 | -         | -      | -      | -      | 7,22    | 6,24    | 4,54    | 4,29    | 4,22    | 3,95    | 4,12   | 5,46   | 6,08   | 8,27   |
| Ca                   | mg/L  | S1 | 112,00    | 149,65 | 247,00 | 162,13 | 126,10  | 189,67  | 217,67  | 124,33  | 463,50  | 236,00  | 95,17  | 49,53  | 70,10  | 45,13  |
|                      |       | S2 | -         | -      | -      | -      | 957,50  | 775,50  | 807,33  | 492,67  | 473,00  | 635,33  | 372,67 | 202,00 | 153,33 | 62,33  |
|                      |       | S3 | -         | -      | -      | -      | 904,00  | 925,50  | 927,33  | 832,00  | 751,33  | 558,33  | 311,33 | 117,33 | 73,23  | 23,87  |
| Mg                   | mg/L  | S1 | 205,00    | 344,00 | 597,67 | 408,00 | 310,50  | 460,67  | 519,67  | 299,67  | 1235,00 | 523,50  | 204,37 | 105,47 | 156,50 | 102,27 |
|                      |       | S2 | -         | -      | -      | -      | 2666,50 | 2092,00 | 2132,67 | 1277,33 | 1141,33 | 1417,33 | 759,33 | 393,00 | 315,33 | 124,47 |
|                      |       | S3 | -         | -      | -      | -      | 3015,00 | 3006,50 | 2961,67 | 2369,33 | 1979,00 | 1203,00 | 522,00 | 158,67 | 111,20 | 35,70  |
| Cu                   | mg/L  | S1 | 0,40      | 0,35   | 0,33   | 0,20   | 0,10    | 0,13    | 0,12    | 0,07    | 0,05    | 0,17    | 0,08   | 0,04   | 0,04   | 0,04   |
|                      |       | S2 | -         | -      | -      | -      | 0,12    | 0,16    | 0,09    | 0,10    | 0,16    | 0,09    | 0,07   | 0,06   | 0,05   | 0,06   |
|                      |       | S3 | -         | -      | -      | -      | 0,04    | 0,13    | 0,08    | 0,07    | 0,07    | 0,03    | 0,03   | 0,04   | 0,04   | 0,05   |
| Fe                   | mg/L  | S1 | 0,41      | 1,35   | 1,17   | 1,71   | 1,36    | 1,99    | 1,72    | 1,09    | 7,38    | 1,66    | 0,76   | 0,51   | 0,57   | 0,50   |
|                      |       | S2 | -         | -      | -      | -      | 7,73    | 6,45    | 6,45    | 3,93    | 3,43    | 4,16    | 2,60   | 1,71   | 1,49   | 1,00   |
|                      |       | S3 | -         | -      | -      | -      | 14,30   | 18,00   | 17,47   | 11,38   | 9,39    | 8,20    | 4,31   | 2,07   | 1,71   | 1,00   |

| Ensaio→              |      |    | (8,77 mm) |       |       |       |        |        |        |        |        | (42 mm) |         |         |        |        |
|----------------------|------|----|-----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|
| Ppt. Acumulada (mm)→ |      |    | 26,31     | 35,08 | 43,85 | 52,62 | 61,39  | 70,16  | 78,93  | 87,7   | 96,47  | 105,24  | 42      | 84      | 126    | 168    |
| Mn                   | mg/L | S1 | 1,90      | 3,40  | 5,72  | 4,10  | 2,94   | 4,71   | 5,14   | 2,94   | 24,14  | 5,34    | 2,09    | 1,10    | 1,49   | 1,00   |
|                      |      | S2 | –         | –     | –     | –     | 37,05  | 28,25  | 28,77  | 16,98  | 15,29  | 20,27   | 11,08   | 5,82    | 4,60   | 1,91   |
|                      |      | S3 | –         | –     | –     | –     | 56,40  | 58,40  | 59,17  | 41,83  | 35,50  | 26,93   | 12,27   | 3,93    | 2,57   | 0,86   |
| Zn                   | mg/L | S1 | 19,00     | 29,40 | 53,50 | 38,44 | 28,65  | 42,30  | 45,37  | 27,53  | 98,90  | 50,55   | 20,34   | 11,35   | 14,77  | 10,52  |
|                      |      | S2 | –         | –     | –     | –     | 160,50 | 135,50 | 144,33 | 89,43  | 65,20  | 111,47  | 63,77   | 35,37   | 29,37  | 14,63  |
|                      |      | S3 | –         | –     | –     | –     | 229,00 | 217,00 | 206,00 | 172,00 | 149,33 | 100,50  | 50,93   | 20,13   | 14,87  | 6,99   |
| Cr                   | mg/L | S1 | –         | 0,01  | 0,01  | –     | 0,01   | –      | 0,01   | –      | –      | 0,03    | 0,01    | –       | –      | –      |
|                      |      | S2 | –         | –     | –     | –     | –      | 0,01   | –      | –      | –      | –       | –       | –       | –      | –      |
|                      |      | S3 | –         | –     | –     | –     | 0,02   | –      | –      | –      | –      | –       | –       | –       | –      | –      |
| Co                   | mg/L | S1 | –         | –     | 0,02  | 0,01  | –      | –      | –      | –      | 0,15   | 0,01    | –       | –       | –      | –      |
|                      |      | S2 | –         | –     | –     | –     | 0,05   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,01   | 0,02    | 0,02    | –       | –      | 0,01   |
|                      |      | S3 | –         | –     | –     | –     | 0,17   | 0,20   | 0,19   | 0,11   | 0,09   | 0,08    | 0,05    | 0,03    | 0,02   | 0,01   |
| Ni                   | mg/L | S1 | –         | 0,10  | 0,16  | 0,12  | 0,11   | 0,14   | 0,15   | 0,09   | 0,30   | 0,15    | 0,07    | 0,05    | 0,06   | 0,05   |
|                      |      | S2 | –         | –     | –     | –     | 0,45   | 0,42   | 0,48   | 0,32   | 0,30   | 0,37    | 0,23    | 0,15    | 0,14   | 0,08   |
|                      |      | S3 | –         | –     | –     | –     | 0,67   | 0,65   | 0,62   | 0,52   | 0,45   | 0,32    | 0,18    | 0,09    | 0,08   | 0,04   |
| NH4                  | mg/L | S1 | –         | –     | –     | –     | –      | –      | –      | –      | –      | –       | 880,65  | 445,72  | 202,86 | 132,53 |
|                      |      | S2 | –         | –     | –     | –     | –      | –      | –      | –      | –      | –       | 3487,78 | 1838,19 | 422,33 | 174,43 |
|                      |      | S3 | –         | –     | –     | –     | –      | –      | –      | –      | –      | –       | 3025,01 | 1161,33 | 243,97 | 108,06 |
| NO3                  | mg/L | S1 | –         | –     | –     | –     | –      | –      | –      | –      | –      | –       | 0,00    | 0,01    | 0,00   | 0,00   |
|                      |      | S2 | –         | –     | –     | –     | –      | –      | –      | –      | –      | –       | 0,00    | 0,00    | 0,00   | 0,00   |
|                      |      | S3 | –         | –     | –     | –     | –      | –      | –      | –      | –      | –       | 0,00    | 0,01    | 0,00   | 0,01   |