

INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA INCLINAÇÃO NO DESEMPENHO DE INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL PILOTO DE TELHADO VERDE EXTENSIVO

Rodrigo Braga Moruzzi¹; Cinthia Cristine de Moura; Ademir Paceli Barbassa

Resumo – O efeito da inclinação e da umidade antecedente do solo nas lâminas escoadas, armazenadas e percoladas foram avaliados em telhados verdes extensivos construídos em escala piloto. Inclinações (i) de 10, 20 e 30% foram avaliadas. A capacidade dos módulos em atenuar o escoamento superficial direto foi medida em termos do coeficiente de escoamento superficial experimental (C_{exp}). Os dados empíricos foram ajustados por meio de regressão multilinear e o ajuste foi verificado por meio dos coeficientes de explicação (R² e R²-Ajustado). Medidas de cor aparente e turbidez foram feitas nas lâminas escoadas e percoladas e os valores foram correlacionados para cada inclinação. Os resultados indicaram que a inclinação e a umidade antecedente são decisivas tanto na redução do escoamento gerado quanto no transporte de material do telhado para o sistema de drenagem.

Palavras-Chave – telhado-verde, técnica compensatória, simulação de chuva.

MOISTURE AND SLOPE INFLUENCES ON EXTENSIVE GREEN-ROOF PERFORMANCE IN PILOT PLANT SCALE

Abstract – The effect of slope and antecedent soil moisture on the water depth stored and percolated on extensive green roofs built in pilot scale was investigated. For this purpose, slopes of 10, 20 and 30% were investigated. The empirical data were adjusted by means of multiple linear regression and they were verified by means of R², R²-adjusted. Apparent color and turbidity were measured on runoff and percolated flow for each one of the modules. The mass transport was indirectly evaluated by means of the N number. The results pointed out that slope and antecedent moisture are all crucial for runoff reduction and for transport of material.

Keywords – green roof, best management practices, rainfall simulation.

INTRODUÇÃO

Sob o ponto de vista hidrológico, o telhado verde pode ser empregado como estruturas de detenção e retenção apresentando, no entanto, diferenças significativas na sua operação e manutenção quando comparados às demais técnicas compensatórias tais como trincheiras, valas, poços de infiltração, pavimentos permeáveis e microrreservatórios. Suas principais diferenças decorrem das características inerentes a sua função primordial, a qual constitui a cobertura de prédios residenciais e comerciais. No que se refere especificamente as funções hidrológicas do telhado verde, a inclinação da cobertura e a condição de umidade antecedente são fatores fundamentais. Moran, Hunt e Jennings (2004) concluíram que o telhado verde é capaz de exercer as funções de retenção de água de chuva e redução da vazão de pico. No período analisado, o telhado verde reteve os primeiros 15 mm de precipitação, e, em média, foi capaz de reter 63% da precipitação. A redução do pico de vazão variou entre 78% e 87%. Robertson et al. (2005) estimou que a redução do escoamento superficial varia entre 40% e 80%, em situações extremas de chuva e em condições normais, respectivamente. Teemusk e Mander (2007) investigaram valores que variam entre 70-90 % de retenção de águas pluviais no verão, e entre 25-40% no inverno, fatores relacionados diretamente com a taxa de evapotranspiração.

Acrescentam-se a esses dados os obtidos por Köhler et al. (2001) no qual é mostrada a diferença do volume retido nos telhados verdes de climas temperados (Berlim, Alemanha) e de climas tropicais (Rio de Janeiro, Brasil). Enquanto que em Berlim a porcentagem de água retida varia de 50-75% da precipitação anual total, no Rio de Janeiro essa porcentagem é de 65%, devido principalmente à alta taxa de evapotranspiração. Essa variação da porcentagem de retenção merece especial atenção, segundo os autores, principalmente devido às condições do clima local, e também devido a influência do tipo e densidade da vegetação instalada. Por fim, concluem que devem ser desenvolvidos estudos que investiguem a diferenciação entre retenção temporária e evapotranspiração.

Mentes et al. (2005) citados por Ferreira e Moruzzi (2007), reforçaram a idéia de que em épocas de clima quente a evapotranspiração é maior devido a maior capacidade de regeneração da retenção de água no substrato. Os autores quantificaram o volume de escoamento em uma camada de substrato com espessura entre 50 e 150 mm, obtendo os seguintes valores de redução de escoamento: épocas quentes 30%, épocas frescas 51%, e épocas frias 67%. As alturas de chuva e tempos de recorrência não foram mencionadas.

Da mesma forma que à análise da redução de volume escoado, a verificação da alteração da qualidade da água que passa pelo TV e através deste é fundamental para avaliar seu efeito na incorporação ou atenuação de poluentes.

Embora decisivos para o desempenho do telhado verde extensivo, poucos trabalhos avaliaram o efeito da inclinação e da umidade antecedente nas lâminas escoadas, percoladas e armazenadas em telhado verde e suas relações com aspectos de qualidade.

O presente trabalho apresenta uma avaliação dessas variáveis e suas correlações, em instalação construída em escala piloto, constituída por três módulos independentes, submetidos as mesmas condições de ensaios.

MÉTODOS

Os protótipos de 1m² de área em planta consistem em 3 reservatórios cortados a 18 cm a partir da base. As caixas foram furadas para a passagem de um dreno, constituído por um tubo de PVC perfurado com saída central, permitindo a coleta da água percolada pelo substrato. Na mesma extremidade dreno, onde está localizado o tubo perfurado, foi feito o preenchimento com brita (900 mm de largura e 100 mm de altura) com a finalidade de servir de camada suporte do solo, evitando seu carreamento e facilitando a drenagem da água percolada. Sobre o restante da caixa foi adicionada uma camada de 130 mm de solo. Ainda na mesma extremidade (parte baixa da estrutura) e a 170 mm da base da caixa foi instalada a calha de coleta de água proveniente do escoamento superficial (Figura 1). Na saída do dreno de coleta de água percolada e da calha (coleta de água escoada superficialmente) foram posicionados recipientes de 20L para a coleta dos efluentes.



Figura 1 Vista Frontal dos módulos-pilotos de telhado verde logo após o plantio das mudas de *Callisia repens* com diferentes inclinações, correspondentes a 10, 20 e 30%, da esquerda para direita, respectivamente.

Para controle das precipitações foi desenvolvido um simulador de chuva constituído micro aspersores do tipo M50, instalados em tubulação. O arranjo dos aspersores do simulador de chuva foram adaptados a partir da proposta de Silva et. al (2009).

O melhor arranjo dos aspersores foi investigado variando-se diâmetros de tubos, número de aspersores e distância entre aspersores.

Foram realizados 14 ensaios, com 30 minutos de duração para cada configuração investigada. Para assegurar a regularidade da vazão de entrada, as vazões foram aferidas antes e após cada ensaio. Em cada condição investigada avaliou-se o valor do coeficiente de dispersão espacial, por meio do coeficiente de uniformidade de Christiansen. (CUC), conforme Equação 1. Os testes para estimar o CUC consistiram em simular precipitações sobre uma plataforma de 1m x 1m, com recipientes posicionados a cada 0,225m, dispostos conforme uma malha quadrada (Figura 2).

$$CUC(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{S_x}{\bar{X}}\right) \quad (1)$$

Em que: \bar{X} e S_x representam à média e o desvio padrão dos volumes precipitados em todos os recipientes instalados na superfície de coleta, respectivamente.

Para cada ensaio foi determinada a intensidade da chuva correspondente, conforme Equação 2.

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{Vb_i}{Ab_i \cdot t} \quad (2)$$

Em que: I é a intensidade média ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$), Vb é o volume armazenado em cada recipiente (béquer) posicionado sobre a superfície de análise (L), Ab é a área da seção transversal da boca do béquer (m^2), t é o tempo por ensaio e n é o número de recipientes instalados na superfície.

Para estimativa do período de retorno correspondente a intensidade média aplicada, utilizou-se a Equação 3, obtida por Moruzzi e Oliveira (2009), para a cidade de Rio Claro-SP.

$$I = \frac{560,9 \cdot T^{0,141}}{(7,4 + d)^{0,65}} \quad (3)$$

Em que: I é a intensidade de chuva (mm.h^{-1}), T é o período de retorno (anos) e d é a duração da chuva (minutos)

As análises físico-químicas foram realizadas nas dependências do Laboratório de Geoquímica Ambiental - LAGEA, e no Laboratório de Tratamento e Reuso de Água e Efluentes – LATARE, ambos pertencentes ao Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento da Unesp, Campus de Rio Claro. Os ensaios em laboratório foram conduzidos em amostras do percolado e do escoamento superficial direto (ESD), em cada um dos 3 protótipos investigados. Os ensaios para a determinação dos valores de cor aparente e turbidez, foram obtidos por meio de espectrofotômetro HACH Dr-4000 com comprimento de onda de 455nm e de turbidímetro previamente calibrados no LATARE, seguindo os procedimentos do Standard Methods 21th.

Os parâmetros turbidez e cor aparente monitorados foram correlacionados com as lâminas escoadas e percoladas. O material transportado por unidade de área do telhado verde foi avaliado indiretamente por meio do número (N), definido pelo produto das lâminas escoadas e percoladas pelos parâmetros de qualidade, cor aparente (NC) e turbidez (NT).

RESULTADOS

Os resultados estatísticos permitiram verificar que a intensidade das chuvas simuladas apresentaram valores entre $91,3 \leq I(\text{mm/h}) \leq 115,7$. Assumindo \bar{I} como o I_{entrada} , para todos os ensaios, tem-se lâmina total média de 51,75 mm para os 30 minutos de duração de cada ensaio. Utilizando a Equação (3), pode-se estimar o período de retorno equivalente dessa chuva para a cidade de Rio Claro, obtendo o valor correspondente a T de 0,81anos. Vale mencionar que o período de retorno obtido constitui apenas valor de referência o qual, juntamente com o volume total precipitado, permite inferir a respeito do desempenho dos módulos. Tal resultado é influenciado pela distribuição espacial da chuva simulada, bem como pela duração do ensaio. Assim, pode-se inferir que as condições investigadas referem-se a chuvas recorrentes na região e não a eventos extremos.

A variação da umidade do solo (Δu) antes e após cada ensaio, para as diferentes inclinações (i) de 10, 20 e 30%, foi registrada e seus valores podem ser observados na Tabela 1. Esses dados foram utilizados para análise de correlação com lâmina armazenada.

Tabela 1 Cálculo do Δu , com base na diferença entre umidade posterior e antecedente. Os dados foram colhidos no aparelho da Solotest, para cada ensaio realizado nos módulos com inclinações de 10, 20 e 30%.

Módulos piloto	Umidade Antecedente (%)	Umidade Posterior (%)	Δu
i10%	1,1	18,8	17,7
	18,4	20,4	2
	18	20,8	2,8
	19,6	24	4,4
	21,2	28,8	7,6
i20%	1,1	17,6	16,5
	15,2	19,6	4,4
	12,4	13,6	1,2

	17,2	20,4	3,2
	18,4	26	7,6
i30%	1,1	20,12	19,02
	19,6	20,4	0,8
	13,6	14,4	0,8
	16	18,8	2,8
	17,6	20	2,4

Na Figura 2 apresenta-se o comportamento das lâminas escoadas e percoladas para os três módulos investigados em diferentes condições de umidade antecedente. Verifica-se que as lâminas escoadas sofrem menor interferência no módulo com valor de i de 10%, quando comparado aos demais. Para esse módulo (i de 10%), as lâminas percoladas foram sempre muito maiores que a escoada. O mesmo não ocorre nos demais módulos (i de 20 e 30%) para os quais a umidade antecedente influenciou mais decisivamente nas lâminas.

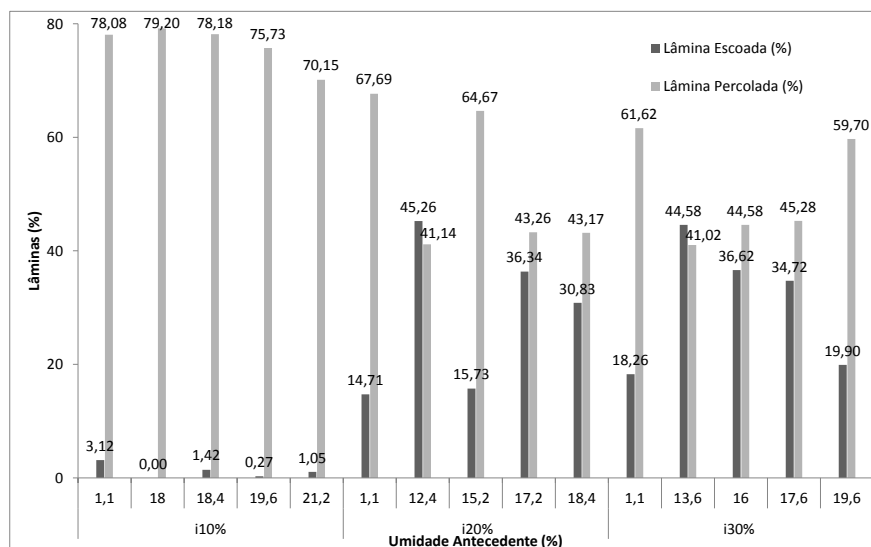


Figura 2 Lâminas escoadas e percoladas para diferentes condições de umidade antecedente e inclinações (i) de 10, 20 e 30%.

Na Tabela 2 apresentam-se os valores de C_{exp} para cada módulo em condições distintas de umidade antecedente. Com exceção do primeiro ensaio, em que o solo estava bastante seco em relação aos demais, verifica-se que o abatimento, representado pelo C_{exp} , foi da ordem de 1% para o módulo com inclinação de 10% e de 35% para os demais. Khan (2001), citado por Tomaz (2003) apresentam valores de coeficientes de runoff da ordem de 0,27 para telhados verdes, sem menção à inclinação ou ao período de retorno relacionado. Para superfícies descobertas, o mesmo autor apresenta coeficientes de runoff variando de 0,22 a 0,37, para declividades de 0,5% a 5%, respectivamente, novamente sem menção ao período de retorno associado. As lâminas armazenadas foram da ordem de $11,6 \pm 1,4$ mm para o módulo com i de 10%, de $10,0 \pm 1,2$ mm para o módulo com i de 20% e de $9,5 \pm 1,1$ mm para o módulo com i de 30%, com 95% de confiança para a média nas diferentes condições de umidade investigadas, corroborando com os resultados apresentados por Persch et al. (2012), os quais obtiveram valores de armazenamento da ordem de 14mm. Fica evidente, portanto, que o módulo com menor inclinação é capaz de reter maiores valores de precipitação, quando comparados aos demais. Embora esses resultados já esperados, destaca-se a importância do parâmetro inclinação quando se deseja reter parcela da precipitação. Tem sido

recorrente a instalação de telhados verdes extensivos, por meio da montagem desse sistema sobre a cobertura convencional de telhas cerâmicas (valores de i de até 30%).

Tabela 2 Coeficiente de escoamento superficial experimental (Cexp.) para cada umidade antecedente e valor de ΔU nos três módulos investigados com inclinações de 10, 20 e 30%.

Umidade inicial (%)	ΔU	Lâmina escoada (mm)	Prec. Total (mm)	Cexp.	mm arm/m2*
i=10%					
1,1	17,7	0,8	51,75	1,55%	9,70±1,4
18	2,8	0	51,75	0,00%	10,51±1,4
18,4	2	1	51,75	1,93%	10,711±1,4
19,6	4,4	0,2	51,75	0,39%	12,36±1,4
21,2	7,6	0,9	51,75	1,74%	14,83±1,4
i=20%					
1,1	16,5	5	51,75	9,66%	9,06±1,2
12,4	1,2	22	51,75	42,51%	10,09±1,2
15,2	4,4	9	51,75	17,39%	7,00±1,2
17,2	3,2	21	51,75	40,58%	10,50±1,2
18,4	7,6	20	51,75	38,65%	13,39±1,2
i=30%					
1,1	19,0	8	51,75	15,46%	10,36±1,1
13,6	0,8	25	51,75	48,31%	10,50±1,1
16	2,8	23	51,75	44,44%	7,41±1,1
17,6	2,4	23	51,75	44,44%	9,68±1,1
19,6	0,8	11	51,75	21,26%	10,30±1,1

* mm de precipitação armazenada por unidade de área

Na Tabela 2, fica evidente, portanto, que a umidade antecedente e a inclinação do telhado são fatores decisivos para a eficiência (1-RA) da retenção nos telhados verdes (TV). A avaliação do comportamento dessas variáveis com as lâminas escoadas e armazenadas foram avaliadas por meio de regressão multilinear, para os resultados obtidos nesse estudo. Os valores de R^2 -Ajustado foram sempre maiores que os obtidos pela regressão utilizando somente uma das variáveis (R^2), sugerindo uma melhor explicação das curvas quando as variáveis foram combinadas. Para a lâmina armazenada o valor de R^2 obtido foi de 0,75 para uma variável e de R^2 -Ajustado foi de 0,87, enquanto que para a lâmina escoada esses valores variaram de 0,66 para 0,81, respectivamente para R^2 e R^2 -Ajustado.

Nas Figuras 3 e 4 foram plotados os valores calculados versus os resultados experimentais, juntamente com as retas de ajuste perfeito (1:1) e o valor de R^2 correspondente ao ajuste linear dos pontos experimentais. Verifica-se que para os dois casos a reta ajustada se aproxima da reta de ajuste perfeito (1:1), correspondente a função $f(x)=x$. As Equações 4 e 5 explicitam as relações entre umidade e inclinação por meio do ajuste multilinear.

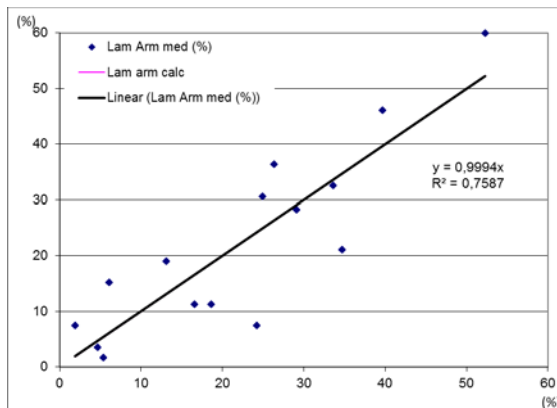


Figura 3 Lâminas armazenadas calculadas e medidas em relação a inclinação e a umidade antecedente para todos os ensaios realizados nos módulos piloto de telhado verde extensivo. No gráfico: Lam Arm med = lâmina armazenada medida; Lam arm calc = lâmina armazenada calculada regressão, segundo a equação de regressão multilinear (equação 3); Linear (Lam Arm med) = regressão linear dos valores de lâmina armazenada medida nos ensaios com os três módulos piloto.

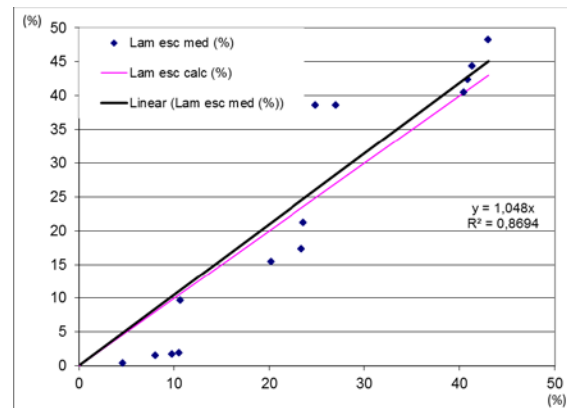


Figura 4 Lâminas escoadas calculadas e medidas em relação a inclinação e a umidade antecedente para todos os ensaios realizados nos módulos piloto de telhado verde extensivo. No gráfico: Lam esc med = lâmina escoada medida; Lam esc calc = lâmina escoada calculada regressão, segundo a equação de regressão multilinear (equação 4); Linear (lam esc med) = regressão linear dos valores de lâmina escoada medida nos ensaios com os três módulos piloto.

$$\text{Lam arm (\%)} = -104,97 \cdot (i) + 1,74 \cdot (\Delta u) + 32,01 \quad (3)$$

$$\text{Lam esc (\%)} = 155,43 \cdot (i) - 1,08 \cdot (\Delta u) - 2,75 \quad (4)$$

Na Tabela 5 pode-se observar a correlação entre as lâminas escoadas e percoladas e seus respectivos valores de cor aparente e turbidez. Vale mencionar que esses parâmetros de qualidade não foram avaliados para as lâminas armazenadas. Observa-se claramente as correlações inversas obtidas para a maioria das medidas, indicando que maiores valores de lâminas incorrem em menores valores de cor aparente e turbidez.

Tabela 5 Correlação entre os valores de lâminas escoadas e percoladas e os parâmetros de cor aparente e turbidez para os três módulos piloto investigados, para diferentes valores de inclinação (i), correspondentes a 10, 20 e 30%.

Lâmina Escoada (%)	
10%	
Lâmina Escoada (%)	1
turbidez-escoada	-0,32
cor-escoada	0,06
20%	
Lâmina Escoada (%)	1
turbidez-escoada	-0,62
cor-escoada	-0,61
30%	
Lâmina Escoada (%)	1
turbidez-escoada	-0,70
cor-escoada	-0,93
Lâmina Percolada (%)	

10%	
Lâmina Percolado (%)	1
turbidez - percolada	-0,42
cor - percolada	0,44
20%	
Lâmina Percolado (%)	1
turbidez - percolada	-0,67
cor - percolada	-0,59
30%	
Lâmina Percolado (%)	1
turbidez - percolada	-0,69
cor - percolada	-0,46

CONCLUSÕES

Esse trabalho investigou o efeito da inclinação e umidade antecedente do solo nas lâminas escoadas, armazenadas e percoladas em telhados verdes extensivos construídos em escala piloto e seus efeitos na quantidade e na qualidade para chuvas recorrentes e consecutivas. Os resultados demonstraram que para i de 10% os menores valores de Cexp. foram registrados (média de 1,01% \pm 0,7% para 95% de confiança). Para i de 20% o valor de Cexp. médio foi de 34,7% \pm 13,2% e para i de 30% o valor de Cexp. foi de 39% \pm 15,2%, ambos para 95% de confiança. As lâminas armazenadas foram da ordem de 11,6 \pm 1,4mm para o módulo com i de 10%, de 10,0 \pm 1,2 mm para o módulo com i de 20% e de 9,5 \pm 1,1 mm para o módulo com i de 30%, com 95% de confiança para a média nas diferentes condições de umidade investigadas. A regressão multilinear para os parâmetros i e ΔU obtiveram explicação de 87% para lâmina armazenada e 81% para lâmina escoada (R^2 -Ajustado). Os resultados indicaram que a inclinação e a umidade antecedente são decisivas tanto na redução do escoamento gerado quanto no transporte de material do telhado para o sistema de drenagem.

REFERÊNCIAS

- Ferreira, C. A.; Moruzzi, R.B. Considerações sobre a aplicação do telhado verde para captação de água de chuva em sistemas de aproveitamento para fins não potáveis. ..ANAIS: IV Encontro Nacional e II Encontro Latino Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – ELECS. São Paulo. 2007.
- KÖHLER, M. et al. Urban Water Retention by Greened Roofs in Temperate and Tropical Climate. Technology Resource Management & Development – Scientific Contributions for Sustainable Development, vol.2. p.151 - 162. In: 38th IFLA (Internacional Federation of Landscape Architects) World Congress. Singapore 2001. Disponível em: <http://www.tt.fhkoeln.de/publications/ittpub301202_10.pdf> Acesso em 10 out. 2006.
- MORUZZI, R.B. & OLIVEIRA, S.C. de. Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação. Rev. Teoria e Prática na Engenharia Civil, Vol 9. N13. Maio,2009
- Persch, C.G.; Tassi, R.; Allasia, D.G. Avaliação do comportamento de um telhado verde no controle quantitativo do escoamento pluvial a partir de um modelo de balanço de volumes de longo prazo. ANAIS: In IX Encontro Nacional de Águas Urbanas – Belo Horizonte – MG, 2012.
- Silva, G. B. L. da; T. A. M Moura; Koide, S.; Campana, N. A. Influência de Aspectos Construtivos e de Uso na Eficiência de Revestimentos com Superfícies Permeáveis. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 14 n.1 Jan/Mar 2009, 123-134- 123
- Tomaz, P. Aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis. 180 p. 2003.