**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**
Centro Biomédico
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes

Pedro Henrique Medeiros Rajão

# O efeito do folhiço nos processos de escoamento superficial e potencial erosivo: uma abordagem funcional em busca de mecanismos

Rio de Janeiro
2018

Pedro Henrique Medeiros Rajão

# O efeito do folhiço nos processos de escoamento superficial e potencial erosivo: uma abordagem funcional em busca de mecanismos

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. André Tavares Corrêa Dias

Rio de Janeiro

2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC-A

R161 Rajão, Pedro Henrique Medeiros.

O efeito do folhiço nos processos de escoamento superficial e potencial erosivo: uma abordagem funcional em busca de mecanismos/ Pedro Henrique Medeiros Rajão. - 2018.

75f.. : il.

Orientador: André Tavares Côrrea Dias

Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes.

1. Ecologia florestal - Teses. 2. Hidrologia - Teses. I. Dias, André Tavares Côrrea. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes. III. Título.

CDU 574

Ficha catalográfica elaborada por Patricia Bello Meijinhos - CRB7/5217

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

_____ _____

Assinatura Data

Pedro Henrique Medeiros Rajão

**O efeito do folhiço nos processos de escoamento superficial e potencial erosivo: uma abordagem funcional em busca de mecanismos**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 26 de abril de 2018.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. André Tavares Côrrea Dias (Orientador)

Universidade Federal do Rio de Janeiro

_____

Prof. Dr. Bruno Henrique Pimentel Rosado

Instituto de Biologia Roberto Alcantara Gomes - UERJ

_____

Prof. Dr. Nelson Ferreira Fernandes

Universidade Federal do Rio de Janeiro

_____

Prof.ª Dra. Eugenia Zandonà

Instituto de Biologia Roberto Alcantara Gomes - UERJ

_____

Prof. Dr. Eduardo Arcoverde de Mattos

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2018

**AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Maria Affonso Penna! Ao nascimento de Marieta!

André Dias! Muito obrigado por todo o carinho. Você me ensinou muito!

Bruno Rosado, obrigado demais pela revisão do meu trabalho!

Rapaziada do LEV (UERJ), especialmente Lucas, Sarah, Thiago, Ilaíne, Yan e Lidiane.

À Sônia e Verusca!

E por fim, à CAPES!

# RESUMO

RAJÃO, P.H.M.*O efeito do folhiço nos processos de escoamento superficial e potencial erosivo:* uma abordagem funcional em busca de mecanismos. 2018. 77f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) - Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

A serapilheira desempenha um papel fundamental na geração de escoamento superficial e potencial erosivo. Evidências apontam que esse papel é determinado pelas propriedades hidrológicas de armazenamento e drenagem, que, por sua vez, são reguladas principalmente pelas propriedades da camada de serapilheira e das características do folhiço das diferentes espécies. Propriedades estruturais da camada de serapilheira, como massa e profundidade, foram observadas influenciando a geração de escoamento superficial. No entanto, ainda não sabemos quais características das espécies determinam as propriedades hidrológicas da serrapilheira e seu impacto nos processos hidrológicos e erosivos. Aqui, abordamos essa questão revendo a literatura (Capítulo 1) e conduzindo um experimento de simulação de chuva (Capítulo 2). Com base em nossa revisão da literatura, nossa hipótese é que as características do folhiço das espécies podem alterar significativamente os processos hidrológicos. Mais especificamente, esperávamos que a área foliar (espectro do tamanho e forma - ETF) afetasse a capacidade de estoque (C) negativamente e a drenagem lateral positivamente, que consequentemente, determina negativamente a geração de escoamento e a produção de sedimentos, bem como a repelência foliar (aqui proposto espectro hidrológico - EH), enquanto que retenção foliar e capacidade de retenção de água (também EH) relação inversa.

Nossos resultados mostraram que serapilheira de diferentes espécies de plantas diferem fortemente em sua capacidade de estoque (C), escoamento superficial (RUNOFF) e produção de sedimentos (SEDIM). Também mostramos que as características das espécies podem explicar a variação em C ($R^2 = 0,60$, $p < 0,0001$), drenagem lateral ($R^2 = 0,54$, $p < 0,001$), RUNOFF ($R^2 = 0,59$, $p < 0,001$) e SEDIM ($R^2 = 0,17$ $p = 0,01$). Nossos modelos confirmam, em parte, nossa hipótese, com exceção da esperada para a repelência foliar. Estes resultados demonstram o desempenho das forças de capilaridade e coesão/adesão concomitantemente sobre o escoamento em diferentes espécies. Além disso, apenas o EH, mais especificamente a retenção foliar e a capacidade de retenção de água, afeta o SEDIM (negativo).

Compreendendo o efeito dessas características nos processos hidrológicos e erosivos, é possível prever o comportamento de diferentes comunidades vegetais no funcionamento hidrológico em diferentes ecossistemas. Desta forma, nossas descobertas podem ter importantes implicações como ferramenta de gestão para programas de restauração florestal, conservação da biodiversidade e engenharia de ecossistemas.



**Palavras-chave:** Serapilheira. Processos hidrológicos. Escoamento superficial. Propriedades hidrológicas. Estoque e drenagem. Processos erosivos. Deslocamento de sedimentos. Abordagem funcional. Ecohidrologia.

## ABSTRACT

RAJÃO, P.H.M. *The effects of leaf litter in runoff and erosive potential process:* trait-basead approach on discovery mechanisms. 2018. 77f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) - Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

The litter plays a fundamental role in the generation of surface runoff and erodibility. There is evidence that this role is determined by the hydrological properties of storage and drainage, which, in turn, are regulated mainly by properties of the litter layer and leaf traits of the present species. Structural properties of the litter layer, such as mass and depth, were observed influencing the generation of surface runoff. However, we still do not know which species traits determine litter hydrologic properties and their impact on hydrological and erosive processes. Here, we addressed this question by reviewing the literature (Chapter 1) and by conducting a rain simulation experiment (Chapter 2). Based on our literature review, we hypothesized that species leaf traits can significantly alter hydrological processes. More specifically, we expected leaf area (size and shape spectrum - SSS) to negatively affect storage capacity (C) and to positively affect lateral drainage, with consequent negative effects on runoff and sediment yield. Additionally, we expect leaf water repellency (as part ot the hydrological spectrum - HS) to affect runoff and sediment yield in the same direction of leaf area, while leaf water retention and water-holding capacity (also HS) inverse relationship.

Our results showed that litter from different plant species strongly differ in their storage capacity (C), surface runoff (RUNOFF) and sediment yielding (SEDIM). We also showed that species traits can explain the variation in C ($R^2 = 0.60$, $p < 0.0001$), lateral drainage ($R^2 = 0.54$, $p < 0.001$), RUNOFF ($R^2 = 0.59$, $p < 0.001$) and SEDIM ($R^2 = 0.17$, $p = 0.01$). Our models confirm, in part, our hypotheses except for our predictions for leaf water repellency. These results demonstrate the action of capillarity and cohesion / adhesion forces concomitantly on the generation runoff in different litter layers with contrasting functional composition. In addition, only traits from the HS, more specifically leaf retention and water-holding capacity, affected SEDIM, reducing the amount of sediment yield.

Understanding of the effect of these traits on hydrological and erosive processes makes it possible to predict the behavior of different plant communities in hydrological functioning in different ecosystems. In this way, our discoveries can have important implications as management tool for forest restoration programs, conservation of biodiversity and ecosystem engineering.



**Keywords**: Litter, hydrological processes. Surface runoff. Hydrological properties. Storage and dranaige. Erosive processes. Sediment displacement. Functional approach. Ecohydrology.

## LISTA DE FIGURAS


Figura 1 – Esquema conceitual dos fluxos terrestres (*overland flow*) que ocorrem sobre uma encosta. ..... 20

Figura 2 – Modelo conceitual dos fluxos terrestres de água (*overland flow*) sobre a serapilheira. ..... 23

Figura 3 – Diagrama mostrando as relações entre as características do folhiço, propriedades estruturais e hidrológicas da serapilheira e processos hidrológicos e erosivos..... 26

Figura 4 – Quadro conceitual sobre os efeitos do ETF e do EH sobre o fluxos e processos hidrológicos terrestres. ..... 30

Figura 5 - Estação experimental montada e em pleno funcionamento. ..... 36

Figura 6 - Escoamento superficial, Estoque, Tempo de inicio do escoamento e deslocamento de partículas por espécie. ..... 41

Figura 7 - PCA entre as variáveis hidrológicas (RUNOFF, TINICIAL e C) e potencial erosivo (SEDIM). Cada ponto representa uma réplica do experimento. ..... 43

Figura 8 - Correlação entre características do ETF e EH..... 44

Figura 9 - Efeitos marginais no modelo entre característica do ETFF (verde) e EH (azul) sobre a magnitude do escoamento superficial (RUNOFF). ..... 45

Figura 10 – Efeitos marginais no modelo entre característica do ETFF (verde) e EH (azul) sobre a direção do escoamento superficial ($T_{INICIAL}$). ..... 46

Figura 11 – Efeitos marginais no modelo entre característica do ETFF (verde) e EH (azul) sobre o estoque de água na serapilheira (C). ..... 47

Figura 12 - Efeitos marginais no modelo entre característica do EH (azul) sobre o deslocamento de sedimentos (SEDIM). ..... 48

Figura 13 – Croqui (esquema) do simulador de chuva de baseado em Tossel et al. (1987). ..... 70

Figura 14 - Delineamento experimental da avaliação da homogeneidade da precipitação simulada (pluviômetros são os quadrados pretos). ..... 71

Figura 15 - Relação pressão (kg $cm^{-3}$)-altura (m) na intensidade da chuva simulada. ..... 74

Figura 16 - Variação real (pontos) e modelo (linha) da intensidade (mm $h^{-1}$) da chuva simulada entre as alturas (m) por cada pressão (kg $cm^{-3}$). ..... 75

## LISTA DE TABELAS


Tabela 1 – Definições dos fluxos terrestres destacados na literatura que são influenciados diretamente pela serapilheira. ..... 25

Tabela 2 – Espécies lenhosas selecionadas para o experimento de escoamento superficial. O folhiço destas espécies foi coletado no Parque Nacional da Floresta da Tijuca..... 31

Tabela 3 – Características do folhiço pertencentes ao espectro de tamanho e forma (ETF) e ao espectro hidrológico (EH). A tabela mostra as abreviações, significado ecológico, a unidade de medida e um resumo da metodologia operacional de mensuração e a referência desse método..... 34

Tabela 4 – Média, desvio padrão e Teste Tukey (alfa = 0.05) do coeficiente de escoamento superficial (RUNOFF e TINICIAL), coeficiente de estoque (C) e deslocamento de partículas (SEDIM) entre as espécies. 42

Tabela 5 - Valor médio das características do Espectro de Tamanho e Forma (ETF) e do Espectro Hidrológico (EH) para as espécies estudadas..... 66

Tabela 6 - Média, erro padrão e, no caso da intensidade (mm h-1), resultado do Teste de Tukey (alfa = 0.95) seguido do valor-F e valor-p (ANCOVA) da intensidade (mm h-1) e CUC (%) entre as alturas (m) por cada pressão (kg cm-3). Código de significância valor-p: *** < 0.001; ** ≤ 0.01; * ≤ 0.05. ..... 74

# SUMÁRIO


| | | |
|---|---|---|
| | **INTRODUÇÃO** | 13 |
| 1 | **REVISÃO DA LITERATURA** | 16 |
| 1.1 | **A Face Ecohidrológica da Serapilheira** | 16 |
| 1.2 | **Fluxos Hidrológicos Terrestres e o papel da serapilheira** | 18 |
| 1.3 | **Propriedades hidrológicas da serapilheira como resultado de suas propriedades estruturais e características do folhiço** | 21 |
| 1.4 | **Uma abordagem funcional na busca pelos mecanismos ecohidrológicos da serapilheira** | 27 |
| 2 | **METODOLOGIA** | 31 |
| 2.1 | **Coleta de folhiço** | 31 |
| 2.2 | **Características do folhiço** | 32 |
| 2.3 | **Experimento de escoamento superficial e potencial erosivo** | 32 |
| 2.4 | **Simulação da chuva** | 32 |
| 2.5 | **Flume (caixa de sedimento)** | 35 |
| 2.6 | **Variáveis hidrológicas** | 37 |
| 2.7 | **Análise dos dados** | 38 |
| 3 | **RESULTADOS** | 39 |
| 3.1 | **Diferenças nos processos hidrológicos entre as espécies** | 39 |
| 3.2 | **Relações entre variáveis hidrológicas** | 39 |
| 3.3 | **Relação entre ETF e EH** | 43 |
| 3.4 | **Efeito das características do ETF e EH sobre os processos hidrológicos** | 44 |
| 4 | **DISCUSSÃO** | 49 |
| 4.1 | **Serapilheira e os mecanismos de geração de escoamento superficial** | 49 |
| 4.2 | **Características que determinam os mecanismos hidrológicos** | 50 |
| 4.3 | **Serapilheira e seu papel no potencial erosivo de solos** | 51 |
| 4.4 | **Perspectivas teóricas** | 52 |
| 4.4.1 | O Espectro Hidrológico (EH) | 53 |
| 4.4.2 | Implicações: os mecanismos hidrológicos da serapilheira a serviço da restauração de ecossistemas | 55 |
| | **CONCLUSÃO** | 57 |
| | **REFERÊNCIAS** | 58 |

**ANEXO** ..... 66
**APÊNDICE -** Desenvolvimento e Calibração de um simulador de chuva de baixo custo..... 67

# INTRODUÇÃO

Como as espécies afetam o funcionamento dos ecossistemas? Como regulam os mais variados processos e, consequentemente, os serviços prestados por eles? Essas perguntas podem ser respondidas utilizando a abordagem funcional. Sua premissa é que as características das espécies, sejam elas morfológicas, fisiológicas, fenológicas e/ou comportamentais, revelam seus papéis na estruturação das comunidades e no funcionamento dos ecossistemas (Rosado et al. 2016). Utilizando ferramentas conceituais e analíticas cada vez mais robustas, ecólogos têm revelado os mecanismos pelos quais as espécies afetam o funcionamento dos ecossistemas (Wright et al. 2004, Dias et al. 2013, Díaz et al. 2016; Dias et al. 2017).

Essa dissertação é, essencialmente, fruto do meu interesse em investigar essas questões. Com a cada vez mais concreta perda da biodiversidade em diferentes escalas, fruto das mudanças climáticas e deterioração dos ecossistemas naturais, vários processos ecossistêmicos estão sendo alterados (Hooper et al. 2005, Díaz et al. 2016), tornando essas questões não só do interesse acadêmico, mas de boa parte dos tomadores de decisão e da opinião pública (Díaz et al 2015). Minha intenção com esse trabalho foi então fazer esse elo, desvendando como o folhiço pode afetar processos hidrológicos essenciais para a produção de água em quantidade e qualidade. O conhecimento gerado nesta dissertação poderá auxiliar na escolha de espécies para programas de reflorestamento que maximizem determinados processos, como infiltração de água no solo, minimizando o escoamento superficial e o potencial a erosão.

Estudar os fatores que geram os fluxos terrestres de água é importante para compreender os processos de escoamento superficial, infiltração de água no solo e erosão (Helvey, 1964,Walsh & Voigt, 1977, Sidle et al. 2007, Liu et al. 2017). Em diversos ambientes, mesmo após a senescência, partes das plantas depositam-se sobre o solo, constituindo a serapilheira, uma barreira porosa (Dias et al. 2017) capaz de interceptar a precipitação e redirecionar os fluxos terrestres. A interceptação depende de fatores abióticos,como a intensidade da chuva,e fatores bióticos, como quantidade de serapilheira depositada e a composição das comunidades de plantas no local (Walsh & Voigt, 1977,Sato et al. 2004).

A interceptação é determinada pelas propriedades de estoque e drenagem da serapilheira alterando e promovendo um fluxo preferencialmentelateral (i.e *litter flow*; Coelho Netto, 1987,Gomi et al., 2008). Estudos apontam que a composição da serapilheira determina a ocorrência e a magnitude dessefluxo (Sato et al. 2004, Guevara-Escobarl et al. 2007), a partir de diferentes capacidades de estoque (Putuhena & Cordery 1996, Sato et al. 2004, Zhang et al. 2014) e drenagem (Walsh & Voigt, 1977,Dunkerley 2015, Gerke et al. 2015). Esses estudos sugerem que propriedades, como a densidade (compactação) da serapilheira, e características do folhiço, como o tamanho, a forma e a hidrofobicidade das folhas, podem determinar os mecanismos que originam esse fluxo. Porém,ainda não sabemos o quanto o folhiço produzido por diferentes espécies que co-ocorrem em um ecossistema podem diferir em seus efeitos sobre o *litter flow*, nem as características que são responsáveis por esse efeito.

Recentemente, Dias et al. (2017) propôs um quadro conceitual a partir de uma abordagem ecológica funcional para investigar o efeito da serapilheira em múltiplos processos do ecossistema incluindoos processos hidrológicos. Dentro dessa abordagem,dois espectros de variação de características têm tido bastante reconhecimento científico: o espectro econômico foliar (Wright et al. 2004) e o espectro de tamanho e forma foliar (Cornelissen et al. 2017, Dias et al. 2017). O espectro econômico foliar (EEF) tem sido amplamente utilizado para explicar e prever o efeito das espécies, por exemplo, sob processos biogeoquímicos emdiferentes ecossistemas (Cornelissen et al. 1999,Cornelissen et al. 2017). Em contrapartida, o recente e ainda pouco estudado, espectro de tamanho e forma (ETF) aparenta grande potencial em afetar os fluxos e processos hidrológicos (Dias et al. 2017). Partículas (folhas, galhos, etc.) menores e de forma mais simples formam uma camada de serapilheira mais compacta, quando comparada com a serapilheiracomposta departículas maiores de forma intrincada (Cornwell et al 2015). Evidências apontam que propriedades da serapilheira como acompactação determinam a geração de *litter flow*determinando sua magnitude e direção, configurandoassim os processos hidrológicos de infiltração e escoamento superficial (Sato et al. 2004, Sidle et al. 2007, Li et al. 2014,Kim et al. 2014), além de erosivos, como o arraste de partículas minerais (Gomi et al. 2008,Nankko et al. 2008).

Nesse trabalho propomos um novo espectro de variação de características relacionadas a aspectos da hidrofobicidade da superfície e do tecido das folhas e folhiço (Walsh & Voigt, 1977, Park et al. 2010). O espectro hidrológico (EH): um gradiente de hidrofobicidade – variando de espécies que produzem folhiço com alta capacidade de absorção e adesão de água na sua superfície a espécies de características de baixa absorção/adesão. Compõe esse

espectro características como: repelência e retenção foliar, que refletem a habilidade da superfície do folhiço em espalhar e segurar as gotículas de água, respectivamente (Rosado& Holder, 2013), e absorção hídrica foliar,que reflete a capacidade do folhiço emabsorver e armazenar água no interior de seus tecidos (Makkonen et al. 2013). Dessa forma, folhiços com maior repelência e menor retenção e absorção poderiam diminuir a capacidade de estoque de água aumentando a intensidade e a direção lateral do *litterebiomat flow*, gerando maior escoamento superficial, sub-superficial e capacidade de gerar erosão (i.e potencial erosivo). Porém, a relação entre tais características e seus efeitos sobre essesprocessos hidrológicos e erosivos permanecem não testada.

Diante disso, nosso estudo pretende investigar se o folhiçode espécies com características contrastantes afeta distintamente o escoamento superficial e opotencialerosivo.Nesse estudo visamos identificar quais mecanismos são preponderantes sobre esses processos e quais características do ETF e/ou EH do folhiço afetam a direção e magnitude dosfluxos e processos hidrológicos.Nossa hipótese prevêque folhiços menores e menos complexos e mais hidrofílicos (menor repelência e maior retenção e capacidade de absorção – EH)promovem menor escoamento superficial. Isso porque folhiços pequenos encurtam a distância de transporte das gotas de água da precipitação, favorecendo um *litter flow* mais vertical, direcionado ao solo aumentando as taxas de infiltração. Somado a isso, a baixa hidrofobicidade pode potencializar um aumento na capacidade de estoque de água na serapilheira,diminuindoa magnitude do *litter flow* o que implica em um fluxo de baixa potencial erosivo.

# 1 REVISÃO DA LITERATURA

## 1.1 A Face Ecohidrológica da Serapilheira

A maior parte da biomassa vegetal produzida nos ecossistemas terrestres acaba sendo depositada no solo como detrito (Cebrian, 1999). É o legado deixado pelas plantas (Dias et al.2017), que em diversos ecossistemas, de áridos arbustivos a florestas tropicais, acumula-se na forma de uma camada, majoritariamente de folhas, denominada folhiço ou serapilheira. Essa "barreira porosa" atua diretamente sobre diversos processos ecossistêmicos entre eles os processos hidrológicos (Sayer et al. 2006). Ela é capaz de interceptar a precipitação controlando o movimento inicial da água sobre o solo. Esse processo de interceptação afeta diretamente a direção e magnitude dos fluxos geradores do escoamento superficial e infiltração de água no solo influenciando na tensão de desagregação das partículas de solo, que levam a erosão (Meginnis, 1935, Horton, 1940, Sato et al. 2004, Sidle et al. 2007, Li et al. 2014, Kim et al. 2014, Dunkerley, 2015, Liu et al. 2017). Ainda que essas relações entre folhiço e hidrologia desperte o interesse de ecólogos e hidrólogos há tempos, muitos modelos hidrológicos gerais não as incluem (ver Dunkerley, 2015).

Estudos apontam que fatores climáticos e topográficos determinam o efeito serapilheira sobre os processos de escoamento, infiltração e erosão (Walsh & Voigt, 1977, Pitman 1989, Putuhena & Cordery 1996, Cerdà 1999, Sato et al. 2004, Sidle et al. 2007, Li et al. 2013, Li et al. 2014, Dunkerley 2015).Porém, propriedades como massa, profundidade e composição de espécies da serapilheirasão tão ou mais relevantes sobre esses processos (Putuhena& Cordery, 1996, Sato et al. 2004,Li et al. 2014, Kim et al. 2014,Liu et al. 2017). É possível encontrar várias evidências dispersas na literatura indicando quea interceptação da precipitação provocada pela serapilheiraatravés daspropriedadeshidrológicas de estoque e drenagempromovem e alteram os fluxosde água geradores do escoamento superficial e infiltração (Sato et al, 2004, Kim et al. 2014, Li et al 2014,Zhang et al. 2014, Ilek et al. 2015,Dunkerley, 2015,Chang et al. 2015). Essas propriedades hidrológicas são altamente dependentes das características das espécies (Sato et al 2004, Sidle et al. 2007, Kim et al. 2014, Zhang et al. 2014), sendo imprescindívelnovos modelos com abordagens que levem em consideração essascaracterísticas e o efeito delas sobre tais processos hidrológicos (Ilek et al. 2015, Dias et al.2017).

Neste contexto, a abordagem funcional (*trait-based approach*) tem sido utilizada com sucesso para avaliar os efeitos das espécies (*effect traits*) em processos e serviços ecossistêmicos como decomposição e flamabilidade (Cornelissen, 1996, Lavorel, 2013, Dias et al. 2013, Cornelissen et al. 2017). A maior vantagem desta abordagem é determinar as características responsáveis pelo efeito das espécies em um dado processo (*effect traits*), permitindo assim uma visão determinística (mecanística) e maior capacidade de generalização. Atualmente, dentro desse contexto conceitual, dois espectros de características foliares tem sido utilizado: o mais consagrado e amplamente utilizado "espectro econômico" – EE (Wright et al. 2004) permite localizar a espécies em um espectro de estratégias de utilização de recursos, variando entre estratégias aquisitivas econservadoras no uso de recursos. Recentemente foi proposto o "espectro de tamanho e forma" - ETF (Cornelissen et al. 2017, Dias et al. 2017);que reflete a variação do tamanho e forma dos órgãos distais das plantas, variando de folhas e ramos pequenos e sem ramificações a folhas e ramos grandes e com maior ocupação tridimensional. Esse espectropode ser estendido ao folhiço e parece afetar diversos processos e serviços do ecossistema (Cornelissen et al. 2017,Dias et al. 2017). Por exemplo, evidências apontam que espécies de folhiços pequenosformamserapilheira mais compacta podendofavorecer a interceptação, alterando as propriedades de estoque e drenagemgerando menos escoamento superficial e potencializando a infiltraçãoatravés de mecanismosdecapilaridade e gravitacional(Walsh & Voigt, 1977;Putuhena & Cordery, 1996,Sidle et al. 2007, Li et al. 2013, Kim et al. 2014, Dunkerley 2015). Outros têm especulado que características relacionado a hidrofobicidade(i.e capacidade de repelir) e higroscopicidade (i.e capacidade de absorver) também tem relação com a geração de escoamento superficial, através de mecanismos de coesão/absorção de água (Coelho Netto, 1987; Sato et al. 2004; Park et al. 2010). Portanto, é preciso, de fato, determinar o efeito das propriedades da serrapilheira e das características do folhiço entre espécies que modulam os processos hidrológicos na busca de um modelo geral capaz de descrever e predizer o papel da serapilheira no funcionamento da geração de escoamento superficial e potencial erosivo em qualquer ecossistema.

Diante desse panorama, nosso estudo revisitou e buscou artigos de revistas e jornais científicos disponíveis na base Scopus a partir dos termos "*ecohydrology*", "*hydrological process*", "*runoff*", "*overland flow*", "*hortonian flow*", "*biomat flow*", "*flow*" e "*water storage*" combinado ao termo "*litter*" com a intenção de (a) sintetizar os conceitos hidrológicas que envolvem a serapilheira; (b) descrever suas funções e possíveis mecanismos

hidrológicos do folhiço, (c) concatenar evidências do papel ecohidrológico do folhiço e (d) propor um quadro conceitual que auxilie futuras indefinições e oriente os testes desses mecanismos. Revisamos o papel da serapilheira nos fluxos e processos hidrológicos e contextualizaremos com uma abordagem mais ecológica e funcional desenvolvendo uma ferramenta conceitual e operacional importante para desvendar definitivamente suasfunções e mecanismos hidrologicos. Pois afinal:

- Qual papel da serapilheiranos fluxos de água terrestres gerados dos processos hidrológicos de interceptação e escoamento superficial? Quais características do folhiço que formam a serapilheira estão relacionados a esses processos? E quais são os mecanismos do efeito dessa característica sobre determinado processo do ciclo hidrológico?
- Como as ferramentas conceituais e operacionais da abordagem de ecologia funcional poderiam explicar deterministicamente (mecanisticamente) o efeito de diferentes espécies sobre os fluxos hidrológicos? Como essa abordagem poderia aperfeiçoar os modelos hidrológicos levando em conta características funcionais e escalando o efeito das espécies a partir da composição e diversidade funcional?

## 1.2 Fluxos Hidrológicos Terrestres e o papel da serapilheira

O modelo original de hidrologia de encosta proposto por Horton (1919) assume que a capacidade de infiltração do solo divide a chuva em dois componentes: um que infiltra, percola e recarrega as águas subterrâneas e parcialmente retorna à atmosfera via evapotranspiração e o outro que flui sobre solo contribuindo diretamente para o fluxo de água superficial (fluxos terrestres – *overland flow*). Esses fluxos superficiais ocorrem de duas maneiras: i) em solo não saturado (fluxo Hortoniano), podendo ser determinado a qualquer momento durante um evento de precipitação medindo a infiltração e subtraindo do total precipitado (Hortonian flow = Precipitation – Infiltration) (Horton, 1919), e ii) em solos saturados, que ocorre posteriormente a saturação do solo (fluxo Hewlettiano; Hewlett, 1964; Figura 1).

A geração do fluxo Hortoniano é definido como o fluxo de água gerado sobre a superfície do solo quando o volume de água de água precipitado transcende sua capacidade de infiltração. Esse fluxo é muitas vezes extrapolado uniformemente ao longo de toda encosta,

chegando a ser proposto como o principal fluxo na geração de escoamento superficial levando a desestruturação e erosão superficial do solo (Horton, 1940, Netto, 1987, Onda et al. 2006, Sidle et al. 2007, Kim et al. 2014, Gerke et al. 2015).Porém, esse fluxo é mais comumente observado sobre a porção média da encosta. Mesmo assim, os métodos empregados para medir o fluxo Hortoniano se baseiam na instalação de algum tipo de coletor no final da parte de baixo de uma encosta ou em trecho dela (Sidle et al. 2007). Esse coletor é tipicamente uma calha “conectada" ao solo por folha de metal, madeira ou plástico que é inserido no solo, geralmente em profundidades de 2-5 cm. Mas, alguns estudos têm verificado que em ambientes florestais, com solo amplamente coberto por serapilheira, esse fluxo nem sempre ocorre sozinho e esses métodos de medição podem mascará-lo.

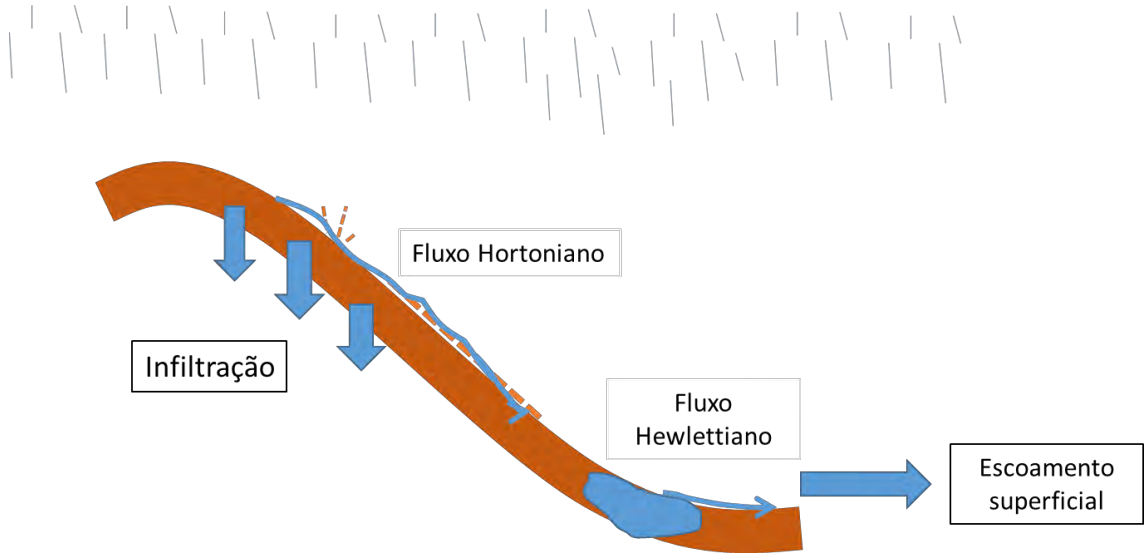
Em contrapartida, o fluxo Hewlettiano só ocorre depois que o solo, ou uma porção dele, encontra-se saturado, geralmente na porção mais baixa da encosta onde toda água acumula-se. Conforme mais água infiltra acontece o movimento inverso ao de percolação até esse volume de água transbordar pela superfície. Esse fluxo também é conhecido pelo nome de fluxo saturado, com grande importância em florestas onde o grande volume de infiltração favorecido pela presença de serapilheira leva a uma rápida saturação do solo.

Porém, na maior parte dos ecossistemas terrestres, cria-se uma camada porosa sobre o solo, conhecida como serapilheira, que intercepta e redistribui a água precipitada, redirecionando lateralmente os fluxos terrestres de água (Figura 2; McDonnell et al. 1991, Noguchi et al. 1999, Kim et al. 2005, Sayer 2006, Sidle et al. 2006, Sidle et al. 2007; Gomi et al. 2008, Kim et al. 2014, Gerke et al. 2015). Durante a interceptação é gerado um fluxo lateral que funciona como um amortecedor contra o fluxo Hortoniano e Hewlettiano. A interceptação éentão entendida comoo saldo final entre a quantidade de água que é estocada e drenada pela serapilheira. Estoque e drenagem são propriedades hidrológicas inerente a serapilheira capaz de alterar todos os fluxos hidrológicos sobre e sob a superfície do solo.

Historicamente, estudos têm se preocupado em quantificar o impacto da interceptação de água pela serapilheira no balanço hídrico de diferentes ecossistemas (Walsh & Voigt, 1977, Sato et al. 2004, Wu et al. 2014, Zhang et al. 2014, Liu et al. 2017).Após medições de campo, Helvey (1964) estimou que, em Coweeta, cerca de 3% da precipitação anual foi interceptada pela serrapilheira. No Texas, Thurow et al. (1987) relataram que a interceptação de serapilheira sob florestas de carvalho foi de 20.7% da precipitação anual. Sato et al. (2002) relataram um intervalo de 1.3 a 9.9% da precipitação bruta mensal em florestas de carvalho e

pinheiro, enquanto Bulcock & Jewitt (2012) encontraram 6.6-12.1%. Em ambientes tropicais. Tsiko et al. (2012) relataram uma retenção de 19% de água precipitada pelo folhiço em florestas no Zimbabwe e, no sudeste da China, Sun et al. (2013), de 10-19% de interceptação de chuvas brutas pelo folhiço de diferentes estágios de sucessão (floresta jovem, mediana e madura) que apresentaram valores de interceptação distintos. Park et al. (2010), estudando florestas nativas e plantadas no Panamá, observou interceptação entre 50 e 80% em relação a precipitação. Em pradarias, Brye et al. (2000) relataram interceptação de quase 70% da precipitação bruta, sendo o resultado mais elevado encontrado em estudos dessa natureza. Tais resultados são evidências da grande variação do efeito de diferentes tipos de serapilheira no balanço hídrico do ecossistema.

Figura 1 - Esquema conceitual geral dos fluxos terrestres (*overland flow*) que ocorrem sobre uma encosta desconsiderando a presença de serapilheira.




Diante disso, outros estudos avaliaram o impacto da interceptação sobre processos hidrológicos finais no balanço hídrico, como o escoamento superficial, e processos erosivos, como o potencial erosivo (capacidade de deslocamento de partículas do solo). Coelho Netto (1987), Pannkuk & Robichaud (2003), Findeling et al (2003), Cerdà & Doerr (2008), Li et al (2014) e Liu et al.(2017) registraram que a serapilheira de diferentes espécies levara a uma redução de 0.12 a 55.6% do escoamento superficial total quando comparado áreas de solo descoberto. Assim como outros estudos retrataram a perda de solo de 0.3 a cerca de 2 ton ha$^{-}$

[1]em áreas com cobertura de serrapilheira enquanto áreas descobertas ultrapassam 5 ton $ha^{-1}$ (Hashim et al. 1995, Myata et al. 2009, Sidle et al., 2006; Gholami et al. 2013, Li et al. 2014, Liu et al. 2017). A interceptação altera a rotina de percolação da água sobre a serapilheira até a superfície do solo, mediandoo início da infiltração, geração do escoamento superficial e suas implicações na erosão (Nankko et al. 2008,Sidle et al. 2007, Li et al. 2013, Kim et al. 2014; Gerke et al. 2015, Dunkerley, 2015).

## 1.3 **Propriedades hidrológicas da serapilheira como resultado de suas propriedades estruturais e características do folhiço**

A interceptação é determinada pelas propriedades hidrológicas da serapilheira a partirdas suas propriedadesde estoque e drenagemda água da chuva (propriedades hidrológicas),análoga ao que ocorre na copa das árvores (Helvey & Patrick, 1965, Guevara-Escobar et al. 2007, Putuhena & Cordery, 1996, Sato et al. 2004, Li et al. 2013, Dunkerley, 2015). O estoque e drenagemdeterminam a forma como a água se movimenta sobre e através da serapilheira modulando a ocorrênciados fluxos hidrológicos na superfície do solopotenciais geradores deescoamento e erosão. O estoque se refere à quantidade de água retida pela serapilheira durante e/ou após chuva, enquanto quea drenagem é toda a água que permeia pela camada de serapilheira e não fica estocada durante e depois da chuva (Putuhena & Cordery, 1996; Sato et al. 2004; Dunkerley, 2015; Gerke et al. 2015; Kim et al. 2015; Zhang et al. 2014).Ao que tudo indica, essas propriedades hidrológicas são determinadas pelas características do folhiço e propriedades estruturais da serapilheira.

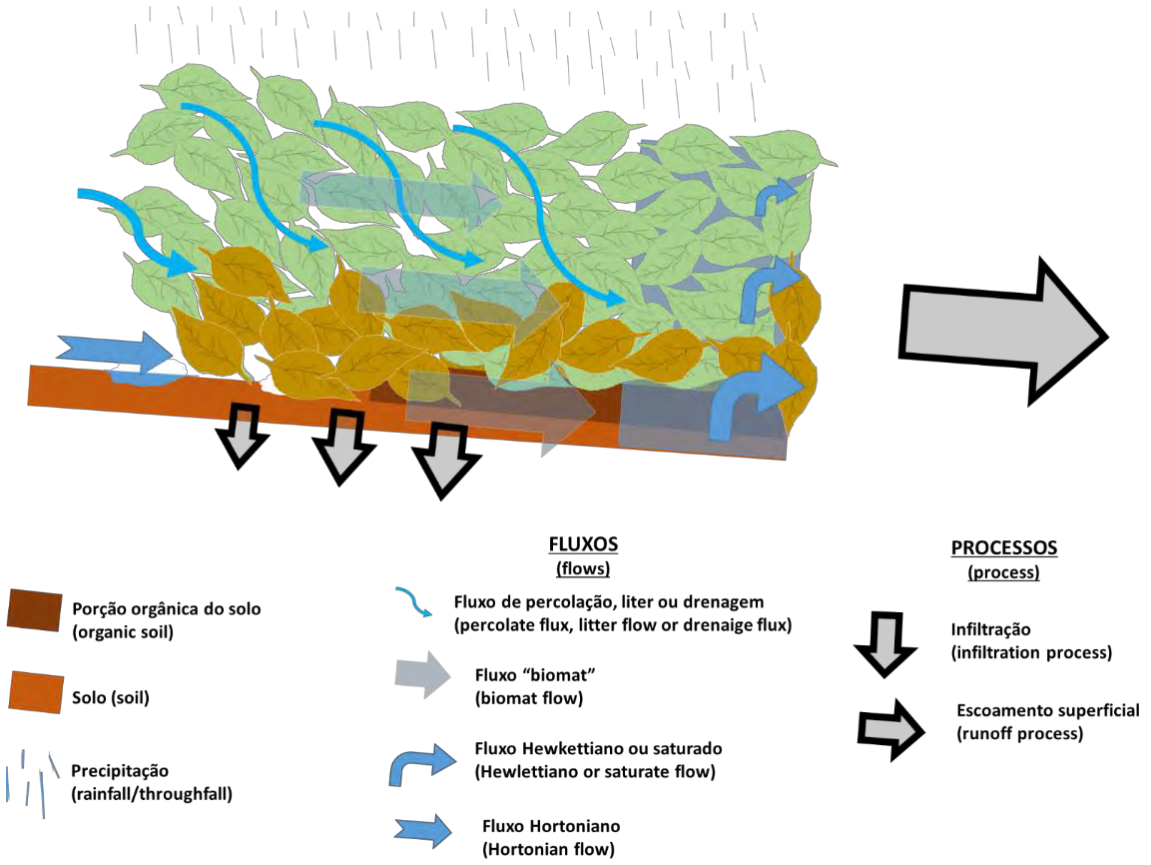
Estudos dispersos na literaturamensuraram o estoque de água (*interceptation storage capacity*) da serapilheira de diferentes grupos de espécies de plantas (Sato et al. 2004, Park et al. 2010, Li et al. 2013, Wu et al. 2014, Zhang et al. 2014), em diferentes estágios de sucessão florestal (Zhang et al. 2009, Silva et al. 2013, Sun et al. 2013) e ecossistemas (Walsh & Voigt, 1977). Devido às dificuldades técnicas em fazer medições precisas e a indefinição conceituais a capacidade de estoque tem sido amplamente subestimada e muitas vezesdesconsiderada nos modelos hidrológicos. Sabendo disso, vários estudos anteriores foram conduzido focados principalmente no cálculo de três parâmetros sem metodologia padronizada: a capacidade máxima de armazenamento de água (S), a intercepção máxima (Cmax) e a interceptação mínima (Cmin). S é definido como a quantidade de água retida pela serrapilheira quando a

superfície da folhiço está completamente molhada e, assim, a serapilheira está totalmente saturada (Sato et al. 2004). Esse parâmetro é geralmente expresso em percentual de umidade em relação ao peso seco, como relataram Helvey e Patric (1965) em florestas de pinheiros do leste e Silva et al. (2013) em florestas tropicais pioneiras e secundárias. Enquanto isso, Pitman (1989) e Putuhena & Cordery (1996) definiram o estoque em *Cmax* e *Cmin* como sendo, respectivamente,a quantidade de água retida na amostra imediatamente antes a interrupção da precipitação, incluindo água drenável por causa da gravidade, e após essa água ser drenada. No caso de *Cmin*, a água estocada só será removidapor evaporação. *Cmin*, por sinal, parece ser o melhor parâmetro para expressar o estoque de água entre serapilheiras. *S* e *Cmax* são parâmetros dificeis de se mensurar, além de aparentemente não expressarem a realidade: *S* porque muito dificilmente se consegue obter condição de completa saturação e *Cmax* porque exige do mensurador capacidade de medição logo após a chuva.

Enquanto isso, a capacidade de drenagem ainda é pouquíssimo explorada na literatura sendo os estudos de Sato et al. (2004), Sidle et al. (2007), Dunkerley (2015) e Kim et al. (2014) bastante relevantes. Basicamente, os autores concluiram que composição da serapiheira determina a magnitude e a direção da drenagem. O saldo do entre magnitude e direção gera um fluxo interno da serapilheira com diversas denominações (Tabela 1). Por exemplo, *biomat flow*(Figura 2) é definido como um fluxo que ocorre dentro da camada de folhas soltas, da porção em decomposição da camada de serapilheira, da parte superior do solo permeado por redes de raízes finas e densas e do horizonte misto de materiais orgânicos já bem decompostos e minerais do solo depositados sobre a matriz mineral do solo (Sidle et al. 2007, Gerkey et al. 2015). Já o *litter flow* é comumente mais associado ao fluxo que se dá única e exclusivamente na porção não decomposta da serapilheira, composta majoritariamente por folhiço (Walsh & Voigt, 1977, Coelho Netto, 1987, Liu et al. 2017). Outros nomes ainda também são utilizados como: percolate flux (Dunkerley 2015), dranaige flux (Sato et al. 2004) ou lateral flux (Park et al. 2010).Conceitualmente eles se sobrepõem, e na prática, são difíceis de se medir separadamente. Esses fluxos já foram quantificados em estudos de hidrologia de encostas florestadas, impactando na geração de fluxo Hortoniano e Hewlettiano, responsáveis principais pelos processos de escoamento e infiltração de água no solo (Horton, 1940, Sidle et al. 1995, Kim et al. 2005, Onda et al. 2006, Kim et al. 2014). Nós recomendamos utilizar basicamente dois termos: *litter flow* quando tratar do fluxo de água que percola sobre o folhiço ainda sem ter sofrido efeito da decomposição e *biomat flow* para o fluxo sobre o folhiço decomposto e parte orgânica do solo. Apesar dos mecanismos que determinam a

magnitude e direção desses fluxos serem possivelmente semelhantes, *litter flow* parece ser mais associado a aspectos físicos do escoamento, enquanto que o biomat flow influencia também sobre aspectos químicos, como inteperização e lixiviação, relacionados ainda com a forma de decomposição do folhiço em questão.

Figura 2 - Modelo conceitual dos fluxos superficiais água (*overland flow*) sobre e dentro da serapilheira.




Nota: O esquema mostra o solo coberto por serrapilheira onde os diferentes fluxos são representados por setas azuis e setas com transparência, enquanto que os processos gerados por esses fluxos são as setas azuis com contorno preto.

Mas quais fatores causam a variação nas taxas de estoque e drenagem? Walsh & Voigt (1977) pioneiramente apontam como sendo fatores abióticos (intensidade e duração da precipitação, relevo, vento) e da natureza, ou composição, da serapilheira (Figura 3). Por exemplo, intensidade e duração da chuva são possíveis causas dessa variação no estoque (Putuhena e Cordery 1996, Sato et al. 2004, Li et al. 2013, Kim et al. 2014) e na drenagem

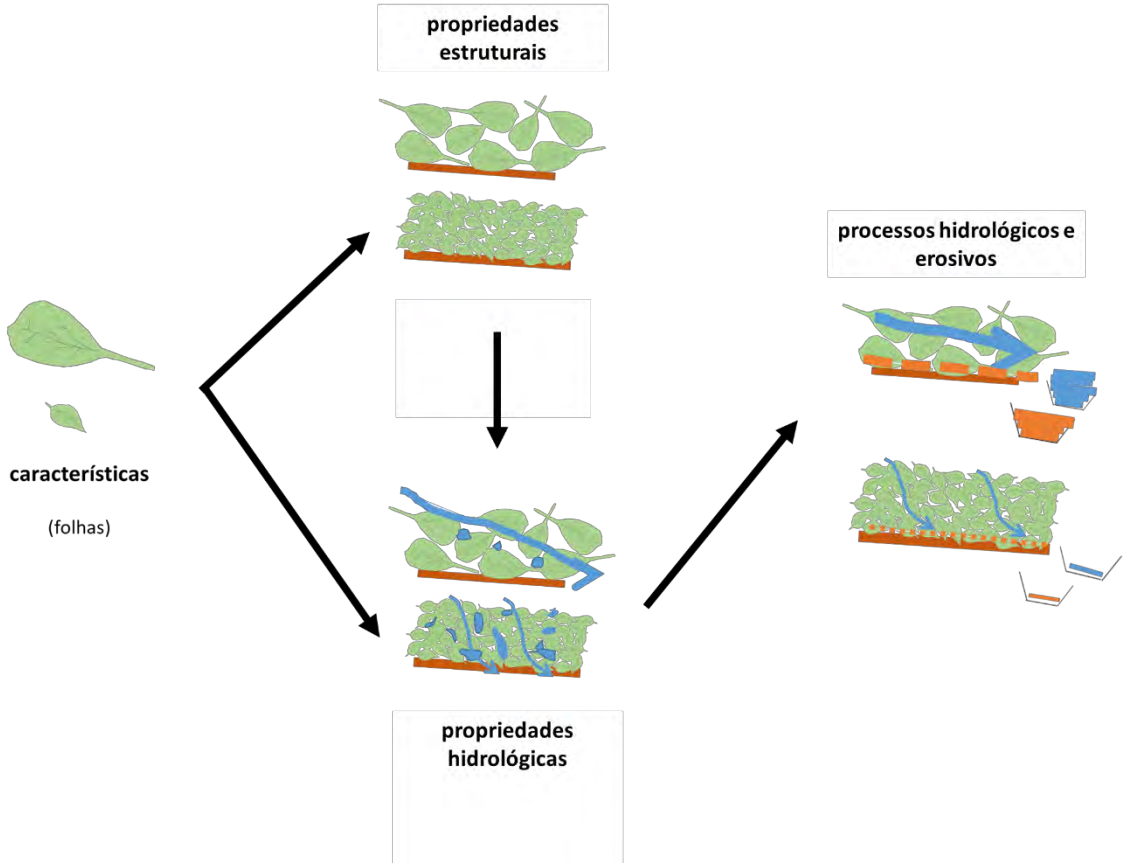
(Dunkerley 2015), embora Guevara-Escobar et al. (2007) apontem que *Cmin* não tenha sido influenciado pela intensidade das chuvas. Concomitantemente, propriedades estruturais da serapilheira e as características do folhiço das espécies que compõe a serapilheira também podem determinar as propriedades hidrológicas (Figura 3). Putuhena e Cordery (1996), por exemplo, relataram que o *Cmin* era proporcional a massa de serapilheira por unidade de área (kg $m^{-2}$) sob uma intensidade de chuva de 34-75 mm $h^{-1}$. Se associarmos esse resultado aos encontrados por Guevara-Escobar et al. (2007), podemos inferir que o fator-chave atuante sobre o estoque é a propriedade estrutural da serapilheira configurada a partir da sua composição de espécies. Assim como a drenagem, que sofre efeito da massa e porosidade da serapilheira (Sato et al. 2004, Li et al. 2014, Kim et al. 2014,Dunkerley 2015). Mesmo assim, quando essas propriedades foram testadas experimentalmente foram observadas diferenças no estoque e drenagem entre as espécies. Esses resultados ressaltam que, apesar de constatar a relevância das propriedades estruturais da serapilheira, como a massa (Sato et al. 2004, Li et al. 2014) e compactação (Park et al. 2010, Dunkerley 2015), essas diferenças devem estar associadas às diferentes características do folhiço, como a morfologia do folhiço (folhiços largos ou tipo agulha), além de outras, como a rugosidade e hidrofobicidade da superfície e higroscopicidade (capacidade de absorver água).

Por exemplo, os resultados de Sato et al. (2004) e Li et al. (2014) sugerem que serapilheiras de tipos de folhiços diferentes armazenam e drenam a precipitação de modo distinto. Os resultados desses trabalhos apontam que camadas de folhiços de espécies de "folhas largas" (Angiospermas) armazenam e drenam lateralmente (sentido paralelo ao solo) mais água do que folhiços de espécies de "folhas tipo agulha" (Gmnospermas). Esses trabalhos especulam que essas diferenças estão atreladas diretamente a características como a morfologia e, possivelmente, a hidrofobicidade (i.e repelência e retenção superficial) e higrocospicidade (i.e capacidade de absorção de água) do folhiços entre as espécies de plantas. Essas características determinam os mecanismos que indiretamente (configuração das propriedades estruturais) e diretamente afetam as propriedades hidrológicas da serapilheira influenciando a geração de escoamento e potencial erosivo. Mas, até o presente momento desta revisão, nenhum estudo testou de fato o papel dessas características nas propriedades hidrológicas, sendo esse ainda um ponto a ser investigado.

Tabela 1 - Definições dos fluxos terrestres destacados na literatura que são influenciados diretamente pela serapilheira.

| FLUXO | DEFINIÇÃO | ONDE OCORRE? | REFERÊNCIA |
|---|---|---|---|
| *Overland Flow* | todo e qualquer fluxo de água terrestre que ocorre sobre o solo, serapilheira e nessa interface. | serapilheira e solo | Helvey (1964) |
| Fluxo Hortoniano (*Hortonian flow*) | fluxo superficial gerado quando o volume de água precipitado sobre o solo ultrapassa a sua capacidade de infiltração. | solo | Horton (1919) |
| Fluxo Hewlettiano ou saturado (*Hewlettian flow*) | fluxo superficial de água sobre o solo saturado. Percolação de água sobre solo saturado gera movimento ascendente dessa água escoa sobre a superfície. | solo | Hewlett (1964) |
| *Litter flow* | fluxo único e exclusivamente sobre a porção não decomposta da serapilheira, composta majoritariamente por folhiço | porção não decomposta da serapilheira | Sato et al. (2004) |
| *Biomat flow* | fluxo que ocorre dentro da camada de folhiço, da porção em decomposição da camada de serapilheira, da parte superior do solo permeado por redes de raízes finas e densas e do horizonte misto de materiais orgânicos já bem decompostos e minerais do solo depositados sobre a matriz mineral do solo | porção orgânica do solo e na serapilheira | Sidle et al. (2007) |
| *Drainage flow* | fluxo de drenagem lateral interna a serapilheira/folhiço. Movimento de água durante e depois de evento de chuva após a saturação da capacidade de estoque de água da serapilheira. | serapilheira | Guevara-Escobar et al. (2007) |
| *Percolate flux* | fluxo lateral de água sobre a serapilheira. | serapilheira | Walsh & Voigt (1977); Dunkerley (2015) |

Figura 3 - Diagrama mostrando as relações entre as características do folhiço, propriedades estruturais e hidrológicas da serapilheira e processos hidrológicos e erosivos.




Legenda: Folhas maiores promovem a formação de camadas de serrapilheira menos compacta, ao passo que folhas menores formam camadas de serrapilheira mais compacta. O grau de compactação da serrapilheira, por sua vez, determina suas propriedades hidrológicas modificando a intensidade e direção dos fluxos de água dentro da serrapilheira. As setas pretas representam o sentido do efeito. As propriedades hidrológicas distinguem-se em estoque (manchas azuis) e drenagem (setas azuis), representando a magnitude (espessura da seta azul) e sua direção (direção e sentido da seta azul). Nos processos hidrológicos e erosivos, setas azuis mais espessas e mais horizontais e linha tracejada mais espessa indica mais geração de escoamento superficial (balde azul) e erosão (balde marrom).

Ecomo esses fatores influenciam as propriedades hidrológicas da serapilheira? Basicamente três mecanismos têm sido especulados: coesão/adesão, capilaridade egravitacional. O mecanismo de coesão/adesão está mais associado ao estoque, onde características e propriedades estruturais com maior propensão em aderir e absorver água, além de retardar e dificultar seu movimento interno (geração de *litter* ou *biomat flow*)

potencializaria seu estoque (Sato et al. 2004, Park et al. 2010, Li et al. 2014, Kim et al. 2014). Por outro lado, os mecanismos gravitacional e de capilaridade estão mais associados a drenagem, uma vez que características e propriedades estruturais da serapilheira criam canais preferenciais que favorecem a canalização da água facilitando a geração de *litter* e *biomat flow* (Walsh & Voigt, 1977, Campbell et al. 2004, Sato et al. 2004, Park et al. 2010, Dunkerley 2015). Esses mecanismos ocorrem concomitantemente já que estoque e drenagem são propriedades hidrológicas inerentes a toda serapilheira independente da sua composição. A questão é que dependendo da composição de espécies há o predomínio da ocorrência de um mecanismo ou outro que irá impactar na geração do escoamento e potencial erosivo.

## 1.4 **Uma abordagem funcional na busca pelos mecanismos ecohidrológicos da serapilheira**

A abordagem funcional tem tido bastante sucesso em explicar o efeito do folhiço de diferentes espécies de plantas sobre processos biogeoquímicos e, mais recentemente na flamabilidade (Frescht et al. 2012,Cornelissen et al. 2017,Dias et al. 2017). Porém, como vimos acima, fortes evidências indicam que esse tipo de abordagem também pode ser utilizado para explicar os mecanismos por trás do efeito das diferentes espécies na geração dos fluxos e processos hidrológicos terrestres. Estudos como de Walsh & Voigt (1977), Putuhena & Cordery (1996), Sato et al. (2004), Sidle et al. (2007), Li et al. (2014) e Kim et al. (2014) observaram que diferentes formas do folhiço podem determinarseu efeito em processos hidrológicos, além de outros(Dunkerley, 2015, Ilek et al. 2014, Gholami et al. 2013, Nakko et al. 2008, Guerrava-Escobar et al. 2007). Portanto, evidências apontam que com base no espectro de tamanho e forma das folhas – ETF – (Dias et al. 2017), é possível entender os mecanismos que determinam as propriedades hidrológicas daserapilheira, influenciando seu efeito sobre os processos hidrológicos, como escoamento, e processos erosivos.

Mas não somente o tamanho e a forma do folhiço atuam sobre esses processos, outras características relacionadas a adesão e absorção de água na superfície do folhiço pode ser determinante no papel hidrológico da serapilheira. A rugosidade da superfície das folhas, provocada pela presença de tricomas, ceras, cutículas e outras substâncias, além de características do seu tecido, como maior ou menor razão parênquima paliçádico/lacunoso, conferem a elas diferentes capacidades de repelência,retenção e absorção de água (Holder,

2012,Rosado & Holder, 2013, Makkonen et al. 2013, Wang et al. 2014). A repelência e retenção hídrica tem relação com a hidrofobicidade da superfície das folhas/folhiços, ou seja, o quanto superfície da folhaé capaz de reter ou repelira água(Holder, 2012,Rosado& Holder, 2013).Já a absorção e adsorçãoestão relacionados com a higroscopicidade. Essas características têm sido utilizadas na investigação do efeito das espécies no processo de interceptação pela copa de árvores, por exemplo (Wang et al. 2014, Holder, 2012; Li et al. 2016, Holder& Gibbies. 2017). Estudosdemonstram que espécies com baixa hidrofobicidade das folhas são capazes de interceptar e estocar uma maior quantidade de água proveniente da chuva em suas copas, uma vez que a velocidade com que a água escoa pela superfície da folha é menor(Holder, 2012, Holder& Gibbies 2017). Da mesma forma, essas característicasparecem também modular a capacidade de estoque e drenagem de água da serapilheira afetando os fluxos e processos hidrológicos e erosivos.

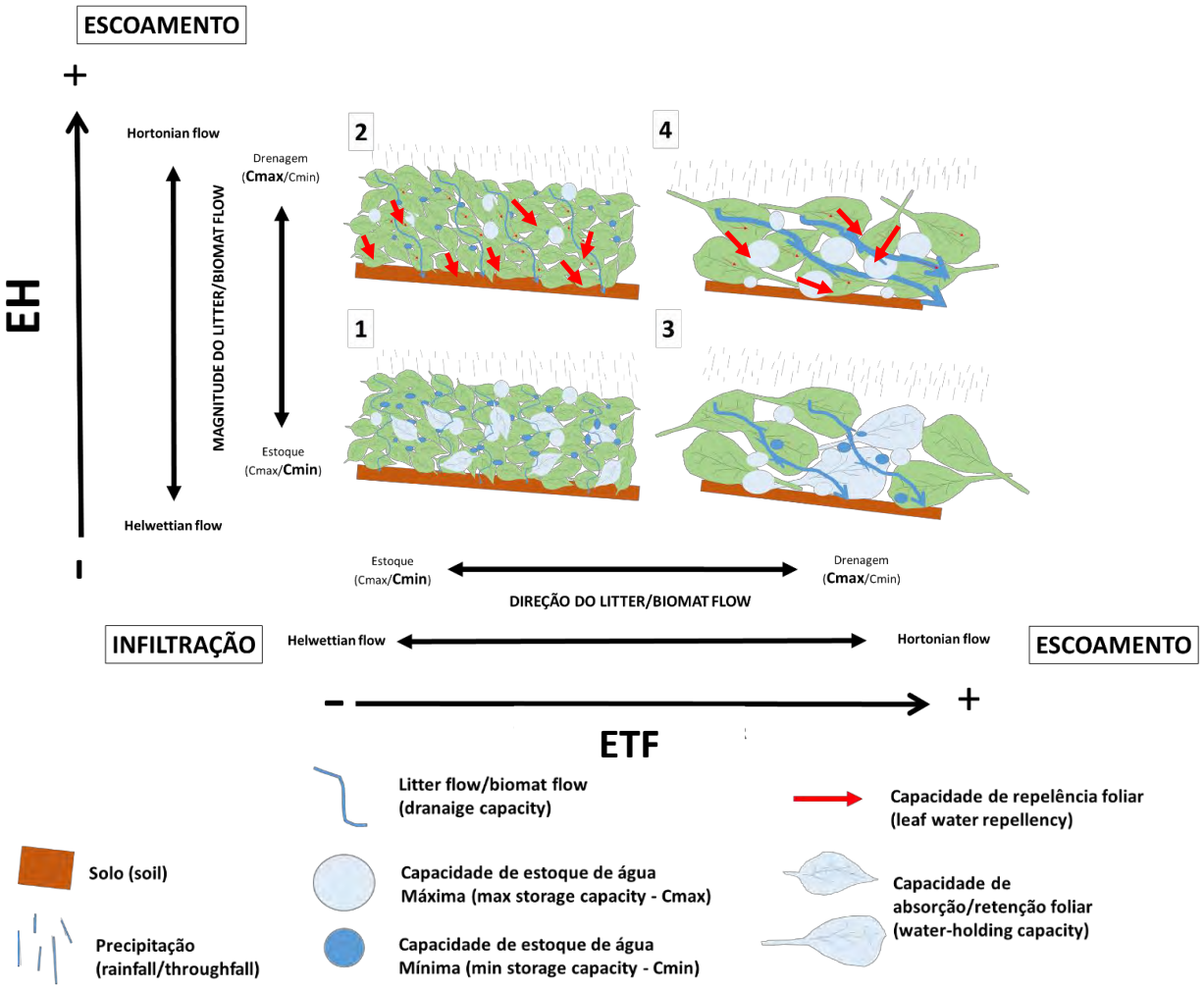
Diante de todas as evidências apresentadas, podemos formular quatro cenários conceituais extremosque constituem uma representação do efeito da composição de espécies da serapilheira sobre suas propriedades hidrológicas e, consequentemente, a geração de fluxos e processos hidrológicos, onde as espécies estariam posicionadas ao longo do gradiente das características do tamanho e forma e hidrofobicidade do folhiço. O cenário (1) representa serapilheiras de folhiços menores(ETF) e combaixa hidrofobicidade(i.e alta retenção hídrica na superfície foliar e baixa repelência hídrica foliar) e alta higroscopicidade (i.e alta capacidade de absorção); (2) folhiços menorese com alta hidrofobicidade e baixa higroscopicidade foliar; (3) folhiços maiorese baixa hidrofobicidade e alta higroscopicidade foliar e por fim (4)folhiços maiorese altamente hidrofóbicos(Figura 4).

Nesses extremos de características do ETF e EH esperamos determinado efeito nos fluxos e processos hidrológicos. Por exemplo, espécies que produzem folhiços menores (cenário 1 e 2)tendem a promover maior estoque de água na serrapilheira, e consequentemente, menor magnitude do *litter flow*. Nos folhiços menores a água é transportada pelo seu limbo numa distância mais curta, favorecendo um fluxomais vertical do *litter flow*.Quando osfolhiços tem baixa hidrofobicidade foliar (1) atenua-se a capacidade de permear (baixa repelência), retendo(alta retenção) e absorvendo(alta absorção) mais águana serapilheira, aumentando a capacidade de estoque final, verticalizando ainda mais o *litter flow*. Assim, nessas condições (1) observa-se baixo escoamento superficial, provocado principalmente, possivelmente, por fluxos Hortonianos, e altas taxas de infiltração, que podem desencadear em escoamento sub-superficial decorrente da saturação do solo e, assim, gerando

também fluxo Hewlettiano. Enquanto que em condições de alta hidrofobicidade foliar (2) a tendência apermeabilidade das sobre e entre aos folhiços dificultariam ainda mais a retenção e absorção da água drenada pela serapilheira, direcionando menos verticalizado o *litter flow*. Somado a isso, aumenta-se a possibilidade de formar pequenas películas de água no solo favorecendo o surgimento de fluxos Hortonianos, aumentando no final as taxas de escoamento superficial.

Em casos de folhiços grandes e complexos (cenário 3 e 4) é esperado o contrário: maior potencial em transportar a água drenada sobre essa maior superfície do folhiço, direcionando lateralmente o *litter flow*. Junto a isso, em casos de folhiços pouco hidrofóbicos (3) a dificuldade na permeabilidadeda água sobre a superfície do folhiço, possibilitaria maior retenção e absorção, aumentando sua capacidade de estoque e drenando menos lateralmente o *litter flow*. Assim ocorreriam taxas um pouco menores de escoamento superficial, impulsionadas tanto pelo *litter flow* quanto por fluxos Hortonianos. Em contrapartida, quando os folhiços são hidrofóbicos (4), grande parte da água que penetra pela camada de folhiço é drenada no sentido lateral, sendo pouco estocado. Essas condições favorecem a geração de alta taxas de *litter flow* e fluxos Hortonianos, promovendo taxas mais altas de escoamento superficial e baixas de infiltração, assim como escoamento sub-superficial.

Figura 4 - Quadro conceitual sobre os efeitos do espectro de tamanho e forma (ETF) e do espectro hidrológico (EH) sobre o fluxos e processos hidrológicos terrestres.




Nota: As setas azuis indicam a magnitude (espessura) e a direção (sentido mais lateral ou mais vertical) do *litter e/ou biomat flow*. Oscírculos azul claro representam a capacidade de estoque máximo (logo após o fim da precipitação) enquanto que o azul escuro a capacidade de estoque mínimo (ao fim da drenagem total dos fluxos dentro e sobre a serapilheira). Quanto maior os círculos, maior é o estoque (máximo ou mínimo).

# 2 METODOLOGIA

## 2.1 Coleta do folhiço

Selecionamos 17 espécies lenhosas com amplitude de variação nas características de tamanho e forma e hidrológicas. Além disso, a seleção das espécies buscou abarcar também espécies de diferentes famílias (Tabela 2). Coletamos folhas íntegras sobre o solo no Parque Nacional Floresta da Tijuca. As folhas foram espalhadas em uma bancada e secas ao ar sobre temperatura ambiente, mantendo suas características morfológicas e armazenadas em caixas de papelão.

Tabela 2 - Espécies lenhosas selecionadas para o experimento de escoamento superficial. O folhiço destas espécies foi coletado no Parque Nacional da Floresta da Tijuca.

| **Família** | **Nome científico** | **Autor** | **Nome popular** |
|---|---|---|---|
| Euphorbiaceae | *Alchornea triplinervia* | (Spreng.) Müll.Arg. | tapiá, moquequeira |
| Moraceae | *Artocarpus heterophyllus* | Lam. | jaqueira |
| Poaceae | *Bambusa* sp. | - | bambú |
| Fabaceae | *Centrolobium tomentosum* | Guillem. ex Benth. | araribá |
| Myrtaceaae | *Eucalyptus robusta* | Sm. | eucalipto |
| Myrtaceae | *Eugenia brasiliensis* | Lam. | grumixama |
| Moraceae | *Ficus insipida* | Willd. | figueira-brava |
| Euphorbiaceae | *Hyeronima alchorneoides* | Allemao | hieronima |
| Fabaceae | *Inga vera* | Willd. | ingá-de-metro |
| Euphorbiaceae | *Joannesia princeps* | Vell. Ducke | cutieira, boleira |
| Lythraceae | *Lafoensia glyptocarpa* | Koehne | mirindiba |
| Melastomataceae | *Miconia dodecandra* | (Dcsr.) Cogn. | pixirica |
| Myrtaceaae | *Myrcia spectabilis* | DC. | ameixa-amarela |
| Euphorbiaceae | *Ophthalmoblapton macrophyllum* | Allemao | |
| Malvaceae | *Sterculia curiosa* | (Vell.) Taroda | xixá |
| Melastomataceae | *Tibouchina estrellensis* | (Raddi) Cogn. | quaresmeira |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Vochysiaceae | *Vochysia laurifolia* | Warm. | pau-tucano |

## 2.2 **Características do folhiço**

Para cada espécie, medimos cinco características do folhiço pertencentes aos dois espectros de características (ETFF e EH). Doespectro de tamanho e forma foliar (ETF) medimos(i) área foliar (LA – Leaf area)e(ii) curvatura (CURL - curliness). Do espectro hidrológico foliar (EH), medimos(iii) capacidade foliar de absorção de água (WHCv – Water Holding Capacity), (iv) repelência hídrica foliar ($L_{REP}$ – leaf water repellency) e (v) retenção hídrica superficial ($L_{RET}$ – leaf water retention). Detalhes do método de medição de cada característicae referências metodológicas podem ser encontradasna Tabela 3. O valor médio da característica de cada espécie pode ser encontrado na Tabela 5 no Anexo A.

## 2.3 **Experimento de escoamento superficial e potencial erosivo**

Para testar o efeito das características do folhiço no escoamento superficial e seu potencial erosivo (arraste de partículas de solo), submetemos um *flume* (caixa com sedimento) recoberto com folhiço a uma simulação de chuva. A cada rodada experimental, o *flume*foi coberto com o folhiço de uma das espécies estudadas e foram medidas variáveis de estoque, escoamento superficial e potencial erosivo (ver 2.6 **Variáveis hidrológicas**).

## 2.4 **Simulação da chuva**

Foi utilizado um simulador de chuva que consiste em uma cisterna de 50 000 litros conectada a uma bomba de água que direciona a água com pressão praticamente constante por uma tubulação de PVC de 0,5” (polegada) até chegar ao bico pulverizador FULLJET GG-30W (Sprayng Systems Co.). Este bico pulveriza gotas de água com aproximadamente 3 mm (Tossel et al. 1990), produzindo um cone cheio que cobre uma área de cerca de 15 m². Esse desenho de simulador de chuva foi desenvolvido por Tossel et al. (1987) e, apesar da simples montagem e operacionalização, pode ser utilizado para simular chuvas com certa amplitude

de intensidade com bastante eficiência (Tossel et al. 1990). Nós testamos e calibramos o simulador de chuva em função da altura do bico em relação ao flumee a pressão (kPa) de entrada de água no bico. A intensidade e uniformidade da chuva gerada no simulador que montamos e nossos resultados estão expostos no artigo **Apêndice** dessa dissertação.

Para realizar o experimento desse estudo, utilizamos pressão de entrada em torno de 2.0 kPa com bico a uma altura de 1.70 metros do *flume*, gerando uma precipitação uniforme com intensidade entre 90 e 100 $mm.h^{-1}$.

## 2.5 **Flume (caixa de sedimento)**

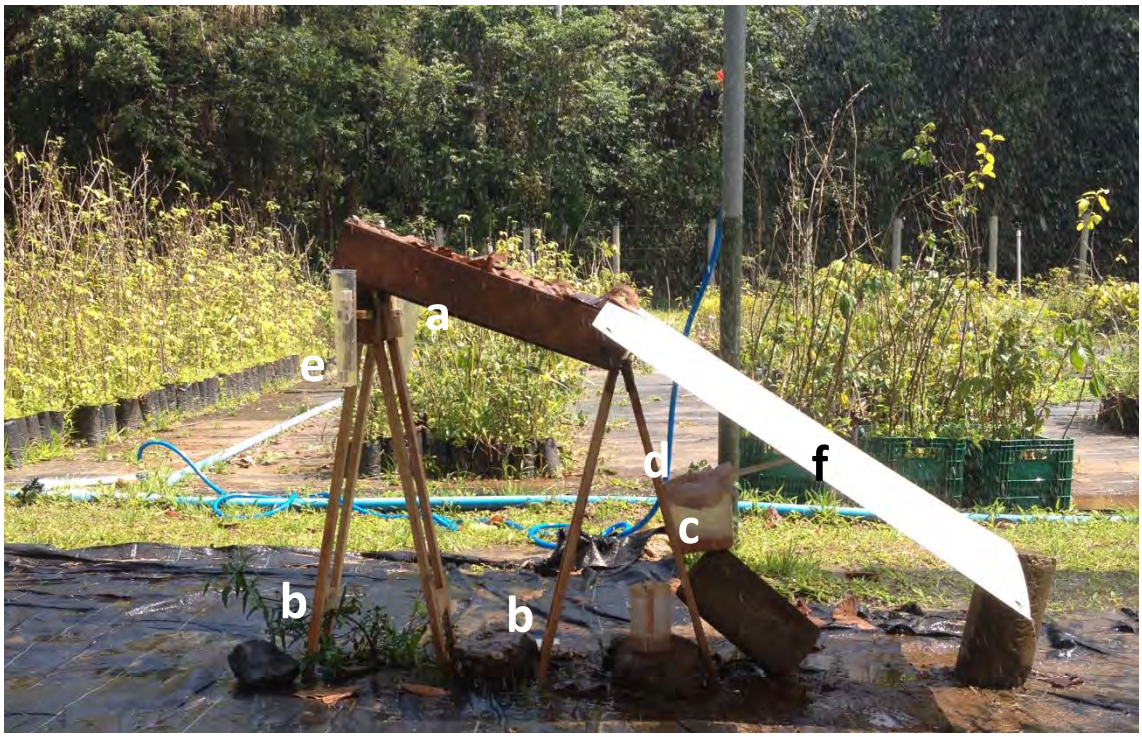
O *flume* consiste em uma caixa de compensado naval medindo 60x40x10 cm (comprimento-largura-altura) (Figura 5-a). O flume foi posicionado sobre cavaletescom uma inclinação de 20º(Figura 5-b). A inclinação do flume simula o efeito topográfico, como relevo. Denominamos a parte do módulo experimental mais alta no plano inclinado de montante e a mais baixa, jusante. A parede do módulo experimental a jusante possui a metade da altura (5 cm) das demais paredes. Preso a essa parede está uma calha de alumínio (calha coletora) que direciona a água escoada para um coletor-medidor. Esse coletor-medidor (Figura 5-c) consiste num recipiente plástico cilíndrico graduado em milímetros (mm) para quantificar a água escoada. Na entrada deste coletor foi colocado um filtro de tecido murim (malha aproximadamente 0.5x0.5mm) (Figura 05-d). As partículas de solo arrastadas e retidas no filtro foram secas e tiveram sua massa quantificada.

Tabela 3 – Características do folhiço pertencentes ao espectro de tamanho e forma (ETF) e ao espectro hidrológico (EH). A tabela mostra as abreviações, significado ecológico, a unidade de medida e um resumo da metodologia operacional de mensuração e a referência desse método.

| Característica | Abreviação | Significado Ecológico | Espectro | Unidade | Método de medida | Referência |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Áreafoliar (leaf area) | LA | Grau de ocupação bidimensional dos folhiços | ETF | cm² | Escanear folhas de cada espécie e medir a área foliar com auxílio do software de edição de imagens digitais ImageJ. | Cornelissen et al. (1999) |
| Curvatura foliar (leaf curliness) | CUR | Grau de tridimensionalidade dos folhiços | ETF | cm | É medida a maior altura (cm) da folha apoiada em uma superfície plana. | Esse estudo |
| Capacidade de absorção de água (storage capacity) | WHCv | Relaciona-se com a capacidade e velocidade de ganho de água. | EH | % | Folhas são submersas em água e retiradas após 1h. WHC1 é calculado como a diferença entre o peso seco e saturado, expresso em porcentagem do peso seco: [(PU1 - PS)/PS]. | Makkonen et al. (2013) |
| Repelência hídrica foliar (leaf water repellency) | LREP | Capacidade da folha de repelir água em sua superfície | EH | Grau (°) | Bate-se uma foto de uma gota de água destilada (5µL) sobre a folha. Utilizando o programa Image J, o ângulo formado entre a gota e a folha é medido. A repelência foi calculada como a média dos valores das superfícies abaxial e adaxial. | Matos & Rosado (2016) |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Retenção hídrica foliar (leaf water retention) | LRET | Capacidade da folha em reter água através da superfície. | EH | Grau (°) | Uma gota de água destilada (50µL) é depositada na folha em superfície horizontal. A folha é inclinada progressivamente de 0 a 90°. O ângulo de inclinação no ponto em que a gota começa a se mover representa a medida de retenção hídrica. A retenção foi calculada como a média dos valores das superfícies abaxial e adaxial. | Matos & Rosado (2016) |

Figura 5 - Estação experimental montada e em pleno funcionamento.




Legenda: (a) *flume* (caixa), (b) cavaletes de suporte, (c) reservatório de armazenamento do escoamento, (d) filtro de sedimentos, (e) pluviômetros, (f) placa de proteção da calha coletora e do reservatório de escoamento.

Para a realização de cada medida, o *flume* foi preenchido com solo desestruturado e peneirado. A camada de solo foi padronizada com uma profundidade de seis centímetros, ficando um centímetro acima do nível da calha coletora. Por cima do solo foi colocada a camada de folhiço de uma das espécies estudadas com quatro centímetros de altura de modo aformar uma camada que preenchia todo volume restante do módulo, sem que as folhas ultrapassem os limites do módulo. O coletor-medidor foi posicionado na extremidade da calha coletora que foi coberta com uma placa de PVC impedindo a entrada de água na calha diretamente pela precipitação (Figura 5-e). Três pluviômetros foram colocados ao lado do módulo experimental para monitorar a intensidade e volume de entrada de água (Figura 5-f).

Após uma série de testes, adotamos a configuração entre inclinação do flume e intensidade da chuva de modo a maximizar a variação da geração de escoamento superficial e potencial erosivo entre as espécies. Assim, será possível determinar as causas dessa variação.

## 2.6 **Variáveis hidrológicas**

Ao todo, fizemos cinco réplicas para cada espécie, totalizando 90 rodadas experimentais (17 espécies maiso controle sem cobertura de folhiço). Cada simulação de chuva durou 15 minutos. Foram medidas as seguintes variáveis hidrológicas: (i) coeficiente de escoamento superficial (RUNOFF - *runoff coefficient*) (Equação 1); (ii) tempo inicial do escoamento ($T_{INICIAL}$); (iii) capacidade de estoquedo folhiço (C – *litter water storage coefficient*) (Equação 2). Adicionalmente, para avaliar o potencial de arraste de sedimento foi medido o (iv) peso secode sedimento encontrado no filtro do coletor (SEDIM).

$$\boldsymbol{RUNOFF}(\%) = \left(\frac{\boldsymbol{E}}{\boldsymbol{P}}\right) \boldsymbol{x}\ \mathbf{100} \qquad \textbf{(1)}$$

Onde: $E$ = escoamento (água coletada no coletor-medidor (mm)) e $P$ = precipitação (mm).

O RUNOFF é a variável que representa a magnitude dos fluxos no interior do folhiço no sentido lateral (*litter* ou *biomat flow*), sendo essa medida do potencial do escoamento superficial. O $T_{INICIAL}$é o tempo decorrido entre o início da precipitação e o início do escoamento. Esta variável nos dá a dimensão da direção preponderante do *litter* ou *biomat flow* sobre o folhiço de cada espécie. Quanto menor o $T_{INICIAL}$, mais rápido a água atravessa a camada de folhiço no sentido lateral, sendo assim, maior é a drenagem nesse sentido. Essa variável relaciona-se de acordo com o modelo proposto (Figura 4) com a direção da drenagem. Sendo assim, ambas as variáveis estão associadas ao processo de escoamento superficial.

Para a capacidade de estoque (C) de água no folhiço, não detectamos diferença entre *Cmax* e *Cmin*. Assim que a precipitação simulada cessava a drenagem lateral era interrompida. Com isso, denotamos o estoque apenas como C, sendo essa uma única medida feita logo após o encerramento da precipitação, onde pesamos a camada de folhiço antes (peso seco) e depois da precipitação (peso úmido) sendo a diferença entre peso úmido e seco o volume total de água estocado. Ponderamos o volume total de água estocada com a precipitação (Equação 2). Opotencial erosivo foi medido como a massa (g) de sedimento

deslocada pelo fluxo superficial depositada sobre a filtro (Figura 5-d), representando o potencial de erosão superficial.

$$\boldsymbol{C}\ (\%) = \left(\frac{\boldsymbol{Cmin}}{\boldsymbol{P}}\right)\ \boldsymbol{x}\ \mathbf{100} \qquad \textbf{(2)}$$

Onde: *Cmin*= quantidade (mm) de água armazenada no folhiço pós-precipitação simulada e *P* = precipitação (mm)

## 2.7 Análise dos dados

Utilizamos ANOVA para testar a diferença das variáveis hidrológicas entre as espécies seguido do Teste Tukey (alfa = 0.05).

Analisamos a estrutura de correlação entre as características do ETF e EH através de PCA (*Principal Components Analysis*) com base na correlação de Pearson (r). Selecionamos as variáveis menos correlacionadas, afim de evitar a colinearidade das variáveis preditoras inserindo ruído nos nossos modelos.

Geramos modelos para testar o efeito das características não-colineares sobre os processos de escoamento superficial de água (RUNOFF), direção do *litter flow* ($T_{INICIAL}$) estoque (C) e arraste de partículas de solo (SEDIM). Selecionamos o melhor modelo com base no AIC (*Aikaike Information Criteria*) (Johnson& Omland 2004) efizemos regressões lineares múltiplas ajustando o modelo através do $R^2$ ajustado e dadistribuição dos resíduos. Por fim, particionamos o $R^2$ dos modelos através da métrica*lmg*obtida com o pacote *relaimpo* (Gromping, 2006) para destacar o papel, em termos percentuais, de cada característica no modelo. Com isso podemos avaliar a importância relativa dos efeitos dos dois espectros de características, ETF e EH, sobre as variáveis hidrológicas e potencial erosivo.

As análises foram executadas no software R Studio v. 1.1 (R Core Team, 2016) e atenderam as premissas exigidas por cada análise, que basicamente consistia em testar a normalidade dos dados com Teste Shapiro-Wilk. Para as variáveis que não apresentaram uma distribuição normal, foi realizada uma transformação logarítmica.

# 3 RESULTADOS

## 3.1 Diferenças nos processos hidrológicos entre as espécies

Houve uma grande diferença do RUNOFF (valor-F = 21.32, valor-p < 0.0001; Figura 6-A e 6-E) e SEDIM (valor-F = 2.12, valor-p < 0.001; Figura 6-D e 6-F) entre os tratamentos com e sem (controle) camada de folhiço, confirmando a importância da serrapilheira na determinação dos fluxos hidrológicos. Além disso, nossos resultados indicam que o folhiço das espécies 17 espéciestambém afetam diferentementeo processode escoamento superficial: RUNOFF (valor-F = 14.37, valor-p < 0.0001; Figura 6-A e Tabela 4);a direção do *litter flow*: $T_{INICIAL}$ (valor-F = 11.46, valor-p < 0.0001, Figura 6-B e Tabela 4); a capacidade de estoque: C (valor-F=15.92, valor-p < 0.0001; Figura 6-C e Tabela 4);além dopotencial erosivo: SEDIM (valor-F=2.78, valor-p < 0.002; Figura 6-D e Tabela 4).

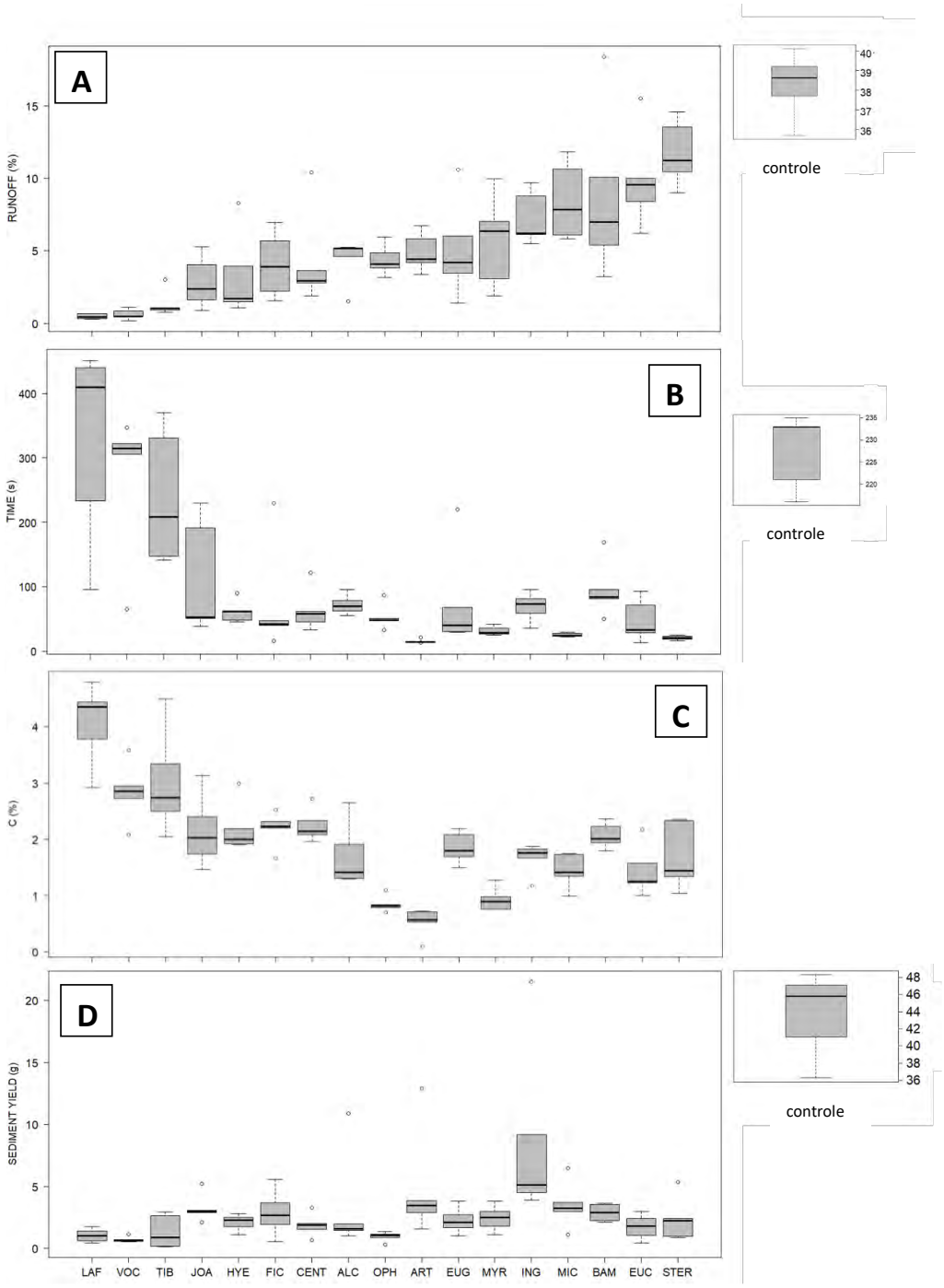
O RUNOFF variou, em espécies como *Vochysia* e *Lafoensia*,de 0.4 a 0.6 %,a mais de 11 % em *Sterculia* – ver Tabela 4. Enquanto que para $T_{INICIAL}$, *Artocarpus*, com cerca de 15.2 segundos, foi a espécie que mais rapidamente iniciava o escoamento, enquanto que *Lafoensia* só iniciava após os 300 segundos de iniciado o experimento. A*Lafoensia* apresenta também a maior capacidade de estoque, tendo armazenado 4.0% de toda precipitação, enquanto que *Artocarpus* tem cerca de 0.5% de estoque. O deslocamento de sedimentos (SEDIM) também mostrou uma grande variação de acordo com a presença de folhiço das diferentes espécies, com espécies com taxas inferiores a 3.0 g $m^{-2}$, caso de *Vochysia*, até taxas superiores a 30.0 g $m^{-2}$, como em *Inga*. Todos os detalhes estão expostos na Figura 6 e Tabela 4.

## 3.2 Relações entre variáveis hidrológicas

A análise do padrão de correlações entre as variáveis hidrológicas e potencial erosivo os dois primeiros eixos do PCA foram capazes de explicar 78.04% da variação total dos dados, sendo 56.42% da variação explicada pelo eixo 1 (PC1) e 21.62% da variação explicada pelo eixo 2 (PC2) (Figura 07). O eixo 1 (PC1) é capaz de explicar a alta correlação positiva (valor-p < 0.0001) entre $T_{INICIAL}$ (PC1 = 0.88) e C (PC1 = 0.83) e negativa de ambas variáveis (RUNOFF-$T_{INICIAL:}$ valor-p < 0.001 e RUNOFF-C: valor-p < 0.001) com RUNOFF (PC1 = - 0.74), enquanto que explica menos as relações com SEDIM (PC1 = - 0.47), sendo baixa

correlação negativa com $T_{INICIAL}$ e C (SEDIM-TINICIAL: valor-p < 0.03 e SEDIM-C: valor-p < 0.03) e positiva com RUNOFF (valor-p < 0.03). O eixo 2 (PC2), é capaz de explicar com mais eficiência a variação em torno de SEDIM (PC2 = 0.87), onde nesse eixo SEDIM está relacionado positivamente com $T_{INICIAL}$ (PC2 = 0. 21) e C (PC2 = 0.20) e negativamente com RUNOFF (PC = - 0.07), que é pouco explicado pelo eixo 2 (PC2).

Figura 6–Escoamento superficial, Estoque, Tempo de início do escoamento e deslocamento de partículas entre as espécies.

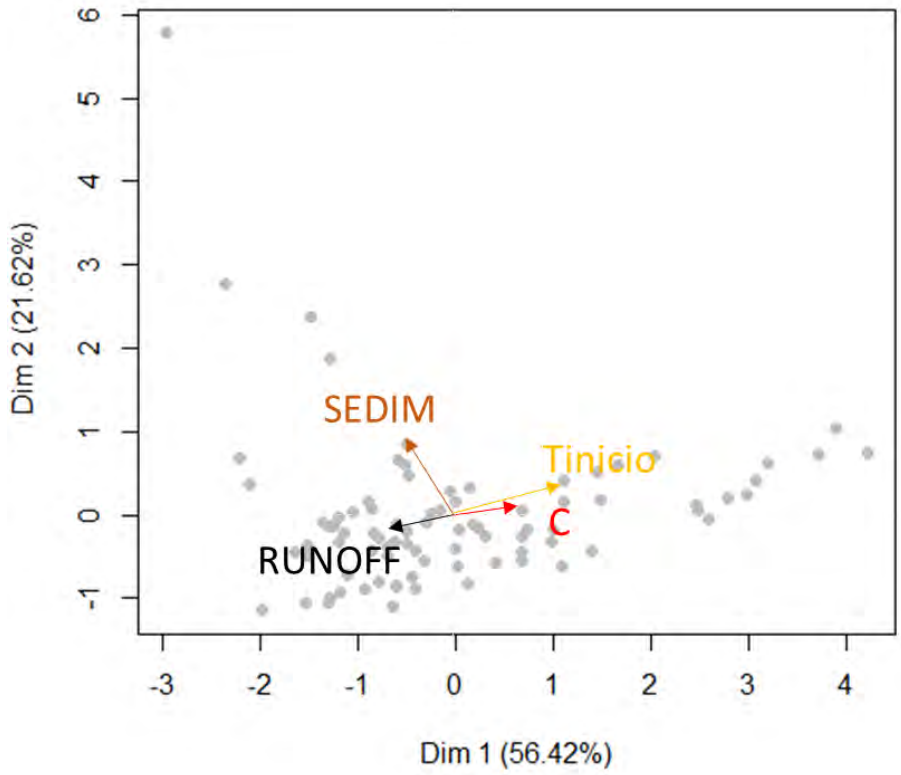



Legenda: Boxplot do (A)RUNOFF – média em ordem crescente -;(B) $T_{INICIAL}$; (C) C e (D) SEDIM entre as espécies.ALC = *Alchornea triplinervia*; ART = *Artocarpus heterophyllus*; BAM = *Bambusa* sp.; CENT = *Centrolobium tomentosum*; EUC = *Eucalyptus* sp.; EUG = *Eugenia brasiliensis*; FIC = *Ficus insipida*; HYE = *Hyeronima alchorneoides*; ING = *Inga vera*; JOA = *Joannesia princeps*; LAF = *Lafoensiaglyptocarpa*; MIC = *Miconia dodecandra*; MYR = *Myrcia spectabilis*; OPH = *Ophtamoblapton macrophyllum*; STER = *Sterculia curiosa*; TIB = *Tibouchina estrellensis*; VOC = *Vochysia laurifolia*.

Tabela 4 -Média, desvio padrão e Teste Tukey (alfa = 0.05) docoeficiente de escoamento superficial (RUNOFF e $T_{INICIAL}$), coeficiente de estoque (C) e deslocamento de partículas (SEDIM) entre as espécies.

| ESPÉCIE | RUNOFF (%) | | $T_{INICIAL}$ (segundo) | | C (%) | | SEDIM (g) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Lafoensia glyptocarpa* | 0.466 ± 0.082 | d | 325.8 ± 69.8 | a | 4.05 ± 0.32 | a | 1.05 ± 0.24 | b |
| *Vochysia laurifolia* | 0.604 ± 0.165 | d | 271.0 ± 51.9 | ab | 2.83 ± 0.23 | bc | 0.71 ± 0.11 | b |
| *Tibouchina estrellensis* | 1.362 ± 0.415 | cd | 239.4 ± 47.2 | abc | 3.02 ± 0.42 | ab | 1.35 ± 0.59 | b |
| *Joannesia princeps* | 2.834 ± 0.804 | bc | 112.4 ± 40.6 | abcde | 2.15 ± 0.28 | bcd | 3.25 ± 0.51 | ab |
| *Hyeronima alchorneoides* | 3.282 ± 1.345 | bc | 61.2 ± 7.9 | def | 2.20 ± 0.20 | bcd | 2.09 ± 0.30 | b |
| *Ficus insipida* | 4.056 ± 1.020 | abc | 75.0 ± 39.1 | defg | 2.18 ± 0.14 | bcd | 2.87 ± 0.84 | b |
| *Centrolobium tomentosum* | 4.328 ± 1.541 | abc | 63.6 ± 15.2 | def | 2.24 ± 0.13 | bcd | 1.88 ± 0.42 | b |
| *Alchornea triplinervia* | 4.336 ± 0.713 | abc | 71.8 ± 6.9 | bcde | 1.71 ± 0.25 | de | 3.38 ± 1.87 | ab |
| *Eugenia brasiliensis* | 5.140 ± 1.555 | ab | 77.4 ± 36.3 | def | 1.85 ± 0.12 | cde | 2.26 ± 0.47 | b |
| *Ophtamoblapton macrophyllum* | 4.366 ± 0.479 | ab | 53.0 ± 8.8 | defg | 0.85 ± 0.06 | ef | 0.96 ± 0.17 | b |
| *Artocarpus heterophyllus* | 4.904 ± 0.601 | ab | 15.2 ± 1.4 | g | 0.52 ± 0.11 | f | 4.92 ± 2.02 | ab |
| *Myrcia spectabilis* | 5.662 ± 1.440 | ab | 31.2 ± 3.2 | defg | 0.93 ± 0.09 | ef | 2.44 ± 0.46 | b |
| *Inga vera* | 7.260 ± 0.832 | ab | 68.6 ± 10.2 | cdef | 1.66 ± 0.12 | de | 8.83 ± 3.30 | a |
| *Bambusa* sp. | 8.814 ± 2.640 | ab | 95.8 ± 19.7 | abcd | 2.06 ± 0.10 | bcd | 2.88 ± 0.31 | b |
| *Miconia dodecandra* | 8.442 ± 1.201 | ab | 25.0 ± 1.3 | efg | 1.44 ± 0.13 | def | 3.50 ± 0.86 | ab |
| *Eucalyptus robusta* | 9.928 ± 1.542 | a | 47.6 ± 14.8 | defg | 1.44 ± 0.20 | def | 1.73 ± 0.45 | b |
| *Sterculia curiosa* | 11.756 ± 1.020 | a | 20.4 ± 1.6 | fg | 1.70 ± 0.26 | de | 2.37 ± 0.80 | b |

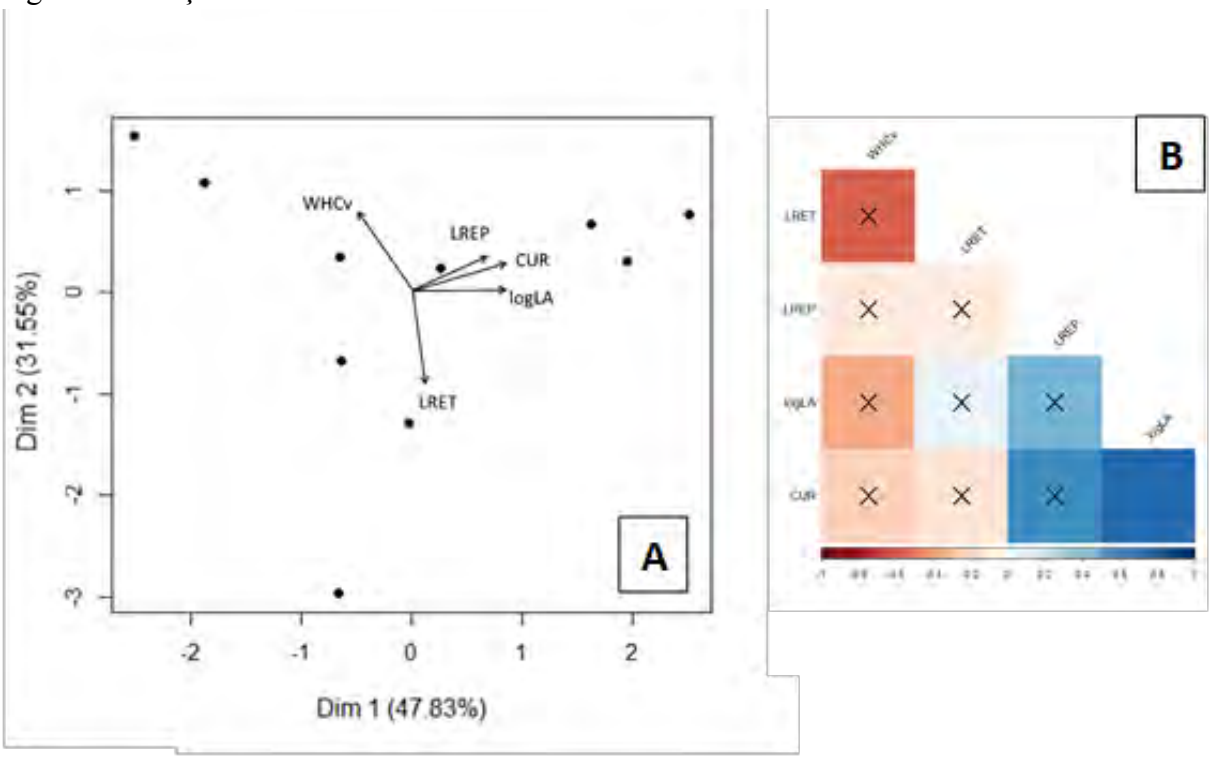
Figura 7 - PCA entre as variáveis hidrológicas (RUNOFF, $T_{INICIAL}$ e C) e potencial erosivo (SEDIM).Cada ponto representa uma réplica do experimento.




3.3 **Relação entre ETF e EH**

Na análise do padrão de correlação entre as característicasdo ETFF e EH, através da PCA, o eixo 1 (PC 1) foi capaz de explicar 47.8% da variação dos dadosenquanto que o eixo 2 (PC 2), 31.6%, totalizando 79.4% (Figura 8-A). Esse eixo explica a maior parte da variação das características de CUR (PC1 = 0.58; PC2 = - 0.22; Figura 8-A),associada positivamente a logLA (PC1 = 0.57; PC2 = - 0.005; Figura 8-A) e LREP (PC1 = 0.47; PC2 = - 0.26; Figura 8-A). Com exceção de LREP, sob esse eixo relacionam-se estritamente as características do ETF. Osegundo eixo(PC 2) está mais relacionado com características do EH, como WHCv (PC1 = - 0.32; PC2 = - 0.60; Figura 8-A) e LRET (PC1 = 0.08; PC2 = 0.72; Figura 8-A),associadas negativamente (Figura 8-A).

Figura 8–Relação entre as características do ETF e EH.




Legenda: (A) PCA com as características do espectro de tamanhoe forma (ETF)e do espectro hidrológico (EH) do folhiço. Cada ponto representa uma das 10 espécies. (B) Matriz de correlação de Pearson (r) entre as variáveis do ETF e EH. Correlações grifado (com um X) são aquelas com $p > 0.05$. Quanto mais escura a cor, maior o r.

No segundo passo preliminar à geração dos modelos para testar o efeito das características do ETF e EH sobre os processos hidrológicos e potencial erosivo, avaliamos o teor de correlação entre as características com base na Correlação de Pearson (r) (Figura 8-B). Notamos que a maior parte das características não tem correlação significativa entre elas, com exceção de logLA e CUR ($r = 0.77$, $p < 0.05$; Figura 8-B). Portanto, os modelos avaliados consideravam uma ou outra variável, mas nunca as duas juntas.

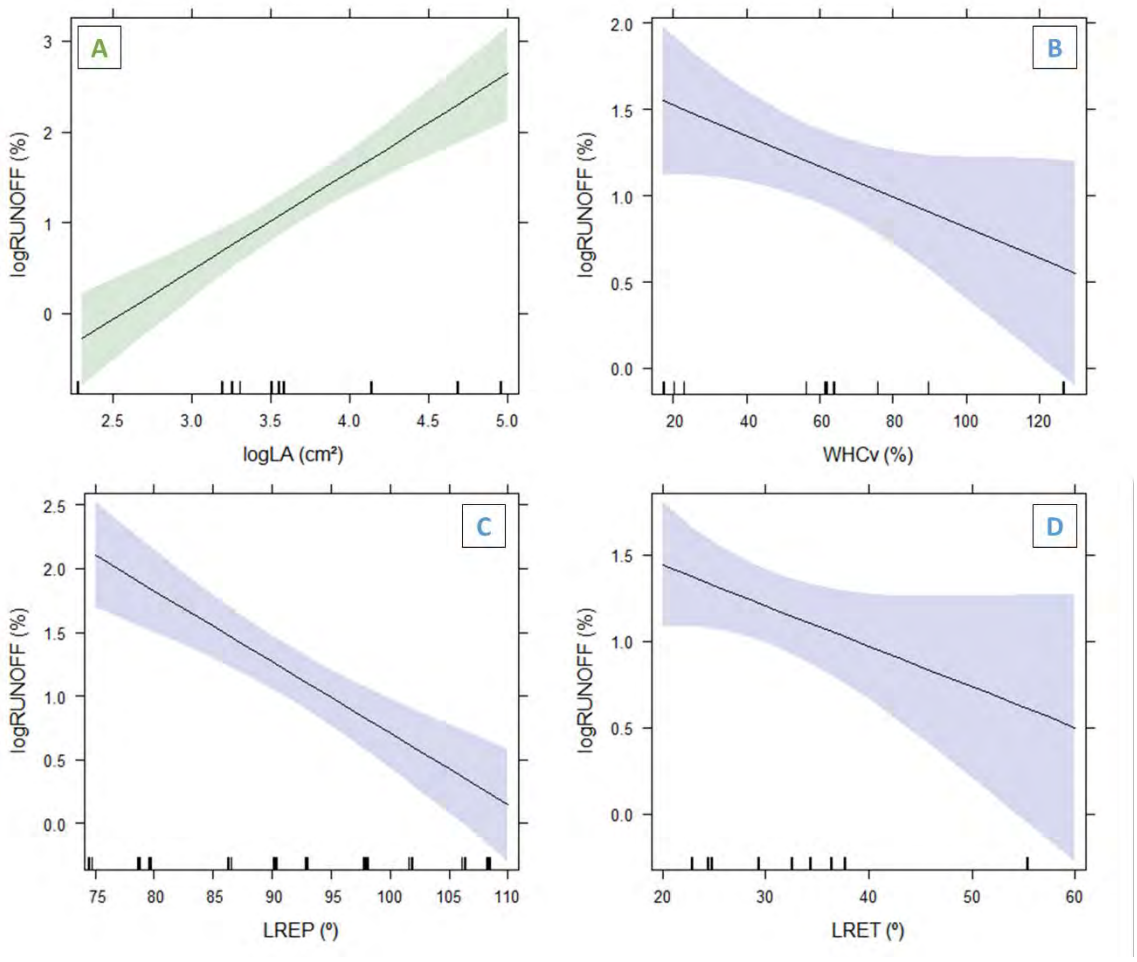
### 3.4 **Efeito das características do ETF e EH sobre os processos hidrológicos**

A umidade do solo medida (foi feita pesagem antes e depois de uma amostra de solo ser posta dentro de uma estufa à 60ºC por 3 dias) no início de cada simulação foi similar, variando de 10 a 15%. Para ter certeza que esta variação não afetou nossos resultados, testamos seu impacto sobre o escoamento superficial e potencial erosivoe não detectamos qualquer evidência de influência nessas variáveis(RUNOFF: valor-F = 0.4, valor-p = 0.53 e

$T_{INICIAL}$:valor-F = 0.6, valor-p = 0.41 e SEDIM: valor-F = 0.43, valor-p = 0.51). Dessa forma essa variável não foi incluída nos demais modelos.

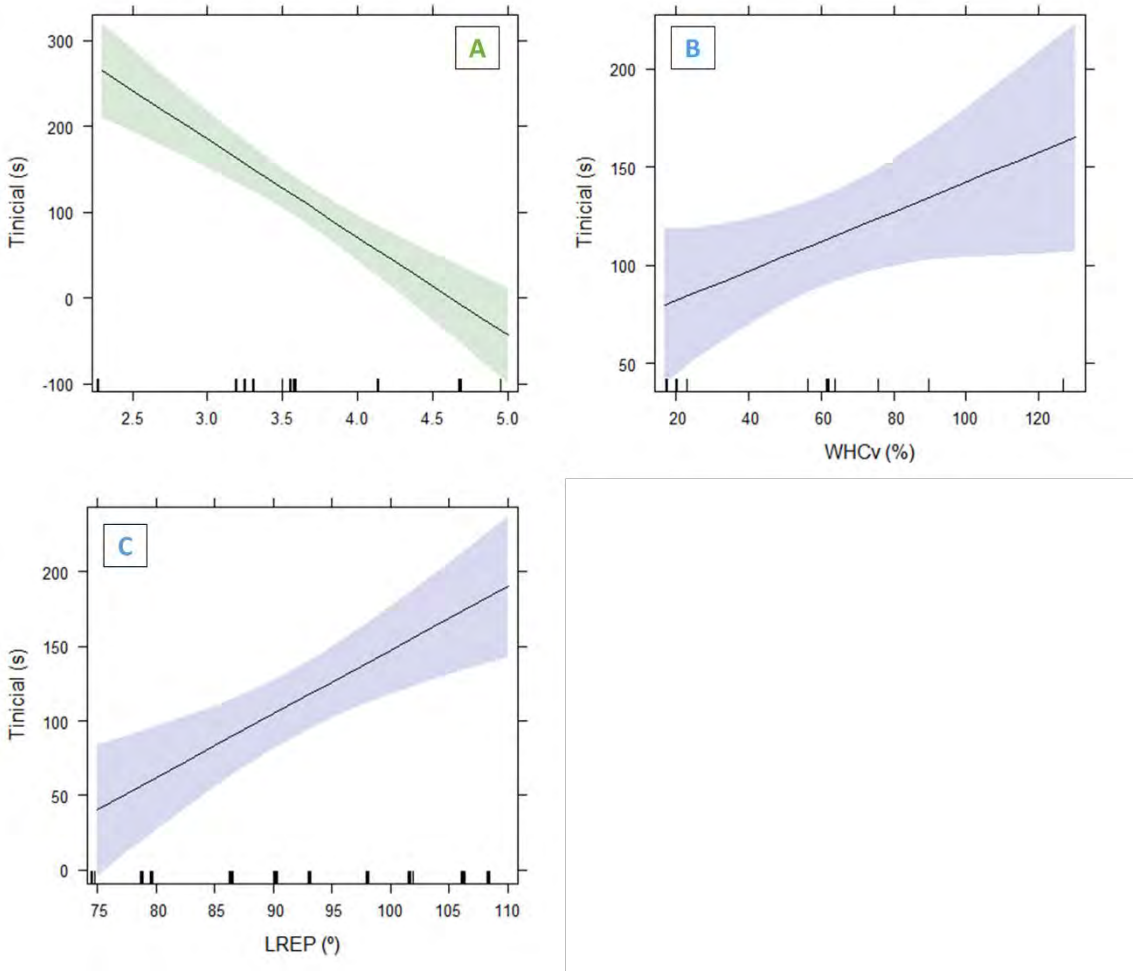
O melhor modelo explicando oescoamento superficial (RUNOFF), apresentou AIC = 116.5, $R^2$ = 0.59, $R^2$ ajustado = 0.55 e p < 0.001. Este modelo inclui relação positiva comlogLA(x = 1.08, valor-p <0.001; Figura 9-A), negativa comWHCv (x = - 0.008, valor-p < 0.05; Figura 9-B),LREP (x = -0.06, valor-p < 0.001; Figura 9-C) e LRET (x = - 0.02, valor-p < 0.08; Figura 9-D). Nesse modelo, o ETF (logLA) explicou cerca de 34% da variação, enquanto as características do EH combinadas explicaram os demais, 25% da variação do escoamento(WHCv = 8.3%; LREP = 14.9% e LRET = 1.7%).

Figura 9 -Efeitos marginais no modelo entre característica do ETFF (verde) e EH (azul) sobre a magnitude do escoamento superficial (RUNOFF).



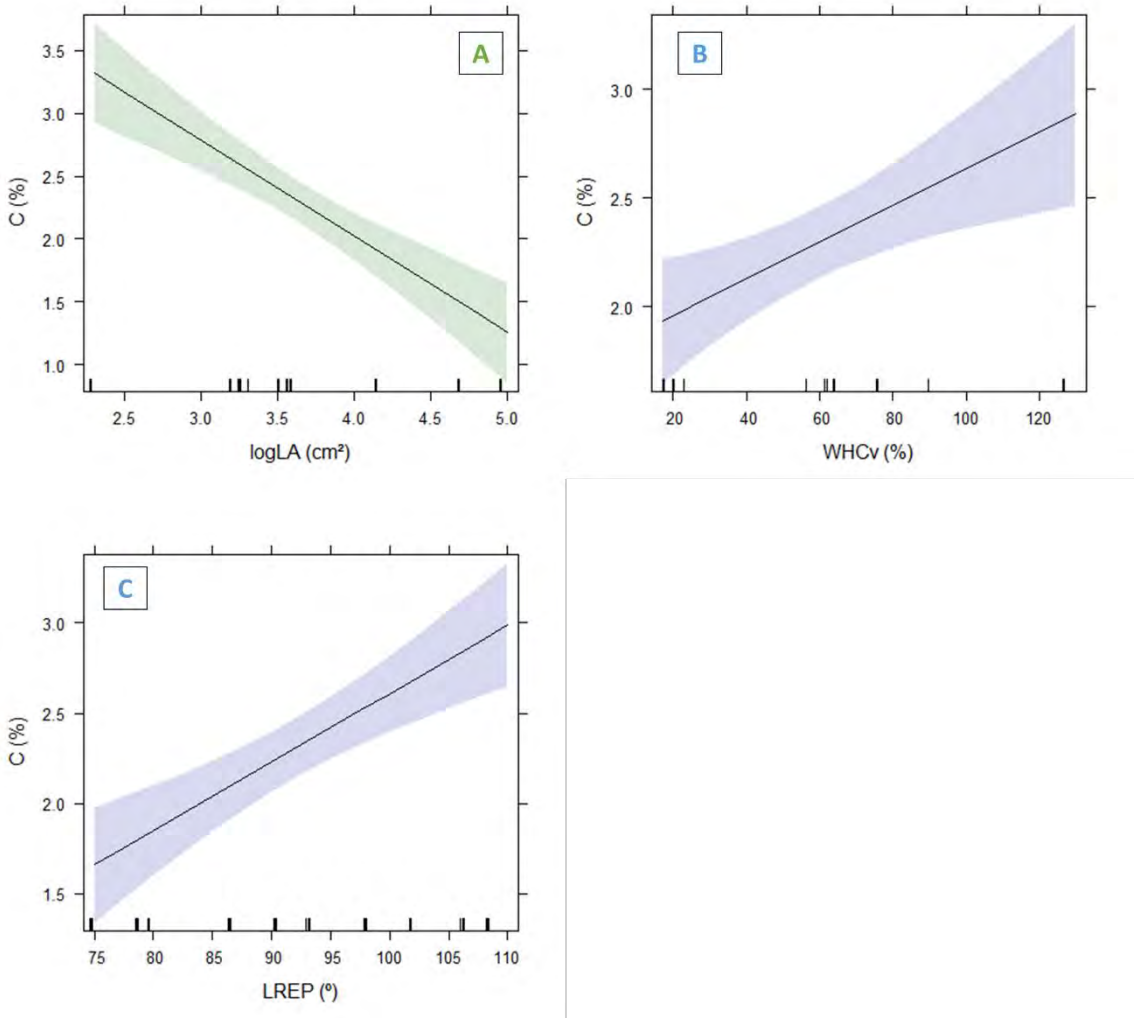
O melhor modelo para explicar o tempo inicial de escoamento ($T_{INICIAL}$) (AIC = 440.7, $R^2$ = 0.57, $R^2$ ajustado = 0.54 e valor-p < 0.001) mostra uma relação negativa com logLA (x = - 114.1 e valor-p < 0.001; Figura 10-A) e WHCv (x = 0.7 e valor-p = 0.05; Figura 10-B) e LREP (x = 4.3 e valor-p < 0.001; Figura 10-C). Segundo a partição de variância, o ETF (logLA) explicou 37% do $R^2$ enquanto que as características do EH explicaram cerca de 20% (LREP = 7.3% e WHCv = 11.9%).

Figura 10 - Efeitos marginais no modelo entre característica do ETFF (verde) e EH (azul) sobre a direção do escoamento superficial ($T_{INICIAL}$).



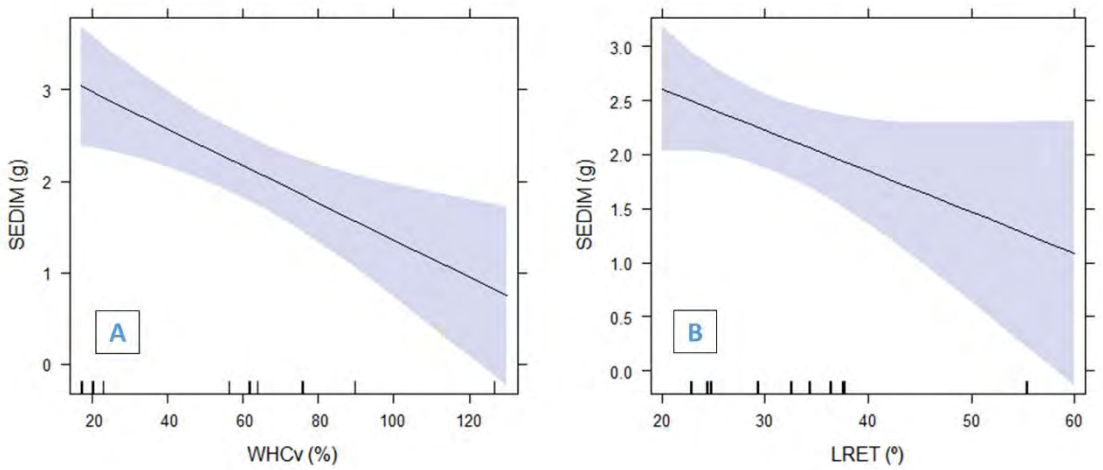
Omelhor modelo selecionado que contempla a variação da capacidade de estoque do folhiço (C) (AIC = -52.9, $R^2$ = 0.60, $R^2$ ajustado = 0.57 e valor-p < 0.0001)indica que esta variável tem uma relação negativa com logLA (x = -0.76, valor-p < 0.001; Figura 11-A), do ETF, e positiva com WHCv (x = 0.008, valor-p < 0.001; Figura 11-B) e LREP (x = 0.04, valor-p < 0.001; Figura 11-C), ambas do EH. 30% do $R^2$ do modelo refere-se ao ETF (logLA) e 30% ao EH (18% do WHCv e 12% do LREP).

Figura 11 - Efeitos marginais no modelo entre característica do ETFF (verde) e EH (azul) sobre a capacidade de estoque de água no folhiço (C).



Em relação aopotencial erosivo (SEDIM), o melhor modelo (AIC = 163.3, $R^2$ = 0.17, $R^2$ ajustado = 0.14 e valor-p = 0.01) é explicadonegativamente tanto por WHCv (x = - 0.02 e valor-p < 0.003; Figura 12-A) e LRET (x = - 0.04 e valor-p < 0.07; Figura 12-B), ambas pertencentes ao EH. Com isso, o EH contempla todo o $R^2$ do modelo, sendo 14% do WHCv e apenas 3% da LRET.

Figura 12 - Efeitos marginais no modelo entre característica do EH (azul) sobre a potencial erosivo (SEDIM).



# 4 **DISCUSSÃO**

Nesse estudo demonstramos as características do folhiço que determinamo papelda serapilheira na geração dos fluxos hidrológicos atuando nos processos de escoamento superficial e erosão. Nossos resultados apontam que o efeito da serapilheira sobre essesprocessos não depende apenas da sua presença e quantidade, mas também da composição de espéciese suas características (Walsh & Voigt, 1977, Sato et al. 2004, Sidle et al. 2007, Park et al. 2010, Li et al. 2013, Kim et al. 2014, Gerke et al. 2015, Liu et al. 2017). Mesmo espécies que podem co-ocorrer em determinada localidadeestocam e drenam a água de modo distinto, determinandoo escoamento superficial e potencial erosivo. Esse efeito distinto foiexplicadopelas características das espécies como tamanho e forma do folhiço (ETF) e dehabilidade em absorver (higroscopicidade), reter e repelir água (hidrofobicidade) (EH).

## 4.1 **Serapilheira e os mecanismos de geração de escoamento superficial**

A interação entre as propriedades hidrológicas de estoque e drenagem pela serapilheira determinam os mecanismos envolvidos na geração do escoamento superficial e erosão (Walsh & Voigt, 1977,Sato et al. 2004, Li et al. 2014). Estudos já demonstraram diferenças na capacidade de estoque e drenagem da serrapilheira entre diferentes ambientes, como: florestas e campos, florestas decíduas e florestas de pinheiros(Putuhena & Cordery, 1996, Sato et al. 2004, Sidle et al. 2007, Park et al. 2010, Li et al. 2013; Kim et al. 2014, Gerke et al. 2015).Nossos resultados vão além e demonstram que espécies que co-ocorrem em um mesmo ambiente podem ter efeitos distintos nestes processos. Como esperado, serapilheiras que possuem uma maior capacidade de estoque de água são aquelas que direcionam o *litter flow* mais verticalmente, geralmente com baixa velocidade. As espécies que produzem este tipo de serrapilheira geram pouco escoamento superficial, chegando até menos de 1% do total precipitado. Por outro lado, em serrapilheiras com menor capacidade de estoque, o *litter flow* é direcionado mais lateralmente, no sentido superficial, rapidamente gerando escoamento podendo chegar a 15% do total precipitado.

## 4.2 **Características que determinam os mecanismos hidrológicos**

Recentemente Dias et al. (2017) reuniu evidências em que tanto características do ETF quanto do EH poderiam ser a causa dos mecanismos de geração dos processos de escoamento superficial e erosão. Nosso estudo desvendou, até onde temos conhecimento, de forma original as características do folhiço que atuam sobre esses mecanismos. Descobrimos, assim como esperado, que o tamanho (ETF) e características hidrológicas (EH) do folhiço tem forte participação causal no estoque e drenagem na serapilheira. Especificamente, nossos modelos demonstram que dentro do espectro de tamanho (ETF) do folhiço (Cornelissen et al. 2017,Dias et al. 2017) espécies de folhiços maiores (alto valor de LA),aumentam a distância com que a água percorre por dentro do serapilheira, facilitando fortemente a ocorrência da drenagem, direcionando o*litter flow*mais lateralmente. Esse direcionamento do*litter flow*favorece o surgimento de forças (mecanismos) gravitacionais, impulsionando a drenagem edificulta o estoque de água na serapilheira. Em folhiços menores (baixo LA), a distância de carreamento do folhiço é menor, formando um efeito "escada" no interior da serapilheira, diminuindo a velocidade da água e direcionando o *litter flow* sentido ao solo. Sendo assim, esse fluxo mais verticalmente, diminui a ocorrência da drenagem e, consequentemente, favorece o estoque através do mecanismo de capilaridade.

A drenagem e mais especificamente o estoque não são determinadosapenas pelo tamanho (ETF), mas também pela hidrofobicidade (EH) do folhiço como prevíamos. A capacidade em absorver água (WHCv), a retenção e a repelência hídrica superficial (LRET e LREP, respectivamente), juntas determinam os mecanismos de coesão e adesão da serapilheira que influenciam no processo de escoamento superficial. Folhiços com mais habilidade em absorver e reter e repelir água pela superfície são capazes de estocar mais água dificultando a drenagem no sentido que favoreça lateralmente o *litter flow*e consequentemente o escoamento superficial. Em superfícies de alta repelência as gotas de chuva no momento do contato com o folhiço se mantém estruturadas. Se, adicionado a isso, esses folhiços tivessem ceras, tricomas, entre outras estruturas capazes de reter mais agua sobre sua superfície, as gotas de chuva inalteradas estruturalmente e mantidas na mesma posição criam uma condição hidrofóbica sobre a superfície da folha. Em folhiços com habilidade para absorver água pelos tecidos (higroscópico), essas gotas são então absorvidas em boa parte onde só será perdida via processo de evaporação. Em condições contrárias, a baixa absorção, repelência e retenção,

espalham e fluidificam as gotas de chuva que pouco são absorvidas favorecendo o surgimento do *litter flow,* num mecanismo análogo a ocorrência do fluxo Hortoniano sobre a superfície do solo.

## 4.3 **Serapilheira e seu papel nopotencial erosivo de solos**

Geralmente, estudos apontam que opotencial erosivo do solo se relaciona positivamente com escoamento superficial, onde maiores fluxos superficiais decorrente de maior intensidade da precipitação e menor cobertura da serrapilheira levam a uma maior força de desagregação ("splash erosion"; Gholami et al. 2013) e arraste de partículas do solo ("*rill erosion*"; Gomi et al. 2008, Li et al. 2013, Liu et al. 2017). Aqui demonstramos que as espécies também afetam diferencialmente opotencial erosivo, porémsurpreendentemente, nossos resultados não demonstram haver relação evidente com escoamento superficial, embora haja uma tendência a relação positiva (Figura 6 e 7). Isso ocorre provavelmente porque serapilheiras de baixo estoque e que favorecem o surgimento do*litter flow* mais lateral geram, em alguns casos, o que chamamos de "escoamento limpo", isso é, altos valores de escoamento com pouco deslocamento de partículas de solo. Nesses casos, a água segue caminhos por dentro da serapilheira havendo pouco contato com a superfície do solo. Consequentemente, sem esse contato, a água escoa sem que exerça pressão, fricção ou cisalhamento sobre a estrutura do solo.

Dando suporte a esta interpretação, segundo nossos modelos, o efeito distinto sobre opotencial erosivo entre as espécies ocorre devido as características do EH, particularmente, WHCv e LRET, ambas com relação negativa com esse processo. As gotas de chuva devem chegar ao solo com velocidade (energia cinética) suficiente para deslocar partículas de solo, engrenando o processo de erosão. Em folhiços mais hidrofóbicos as gotas de água tocam o folhiço e rapidamente caem em direção ao solo. Esse movimento potencializado faz com que a água impacte o solo com mais força desagregando o solo (*splash erosion*; Gholami et al. 2013)e, com a continuidade das chuvas, seja forçada a deslocar-se no sentido superficial (Gomi et al. 2008, Li et al. 2013). Esses resultados são inovadores porque ressalta a importância do EH no mecanismo de geração de erosão em ambientes florestais, por exemplo,

com presença geralmente abundante de serapilheira. Portanto, essas descobertas têm implicações fundamentais para conservação e restauração dos solos nesses ecossistemas.

## 4.4 **Perspectivas teóricas**

Nosso estudo desvendou questões relevantes para determinar definitivamente os mecanismos por trás do efeito das espécies sobre os processos de interceptação, escoamento e erosão. Porém, algumas questões ainda precisam ser melhor entendidas. Por exemplo, no nosso estudo, geramos precipitações elevadas, acima de 90 mm $h^{-1}$. Nestas condições, observamos um maior determinou impacto do tamanho do folhiço (ETF) quando comparado com características hidrológicas (EH) ao determinar os processos estudados. Porém, em precipitações mais amenas, é possível que o ETF impacte em menor proporção o estoque e a drenagem sendo o EH protagonista nos modelos. Nessas condições de precipitação as gotas de chuva são menores e menos frequentes. Isso favorece a habilidade do folhiço em absorver, reter e repelir a água, sem que haja interrupções pela chegada de novas gotas de água. Em precipitações com alta intensidade, a frequência, o tamanho e a velocidade das gotas de chuva são maiores, dificultando a absorção e retenção.

Outro ponto importante se refere a observação de que algumas espécies provocaram o excesso da infiltração, ou seja, da verticalização do *litter/biomat flow*. Essas espécies, de folhiços pequenos e alta repelência e absorção foliar, são capazes de em casos de chuvas continuas, direcionar constantemente o fluxo de água até o solo acelerando sua saturação. Ao saturar o solo, a água direcionada a infiltrar transborda sobre o solo, gerando um fluxo sub e superficial sobre o solo. Esse fluxo saturado, dito também de fluxo Hewlettiano, é tão ou mais determinante para o aumento dopotencial erosivo dos solos. Sendo assim, se faz extremamente necessário investigar, se de fato, características das espécies de plantas são capazes de alterar o ritmo desse fluxo, assim como já foi relatado e aqui corroborado no caso do fluxo Hortoniano e *litter flow*.

Por fim, nosso estudo detectou as características que determinam os mecanismos responsáveis pelas variações no estoque, escoamento e potencial erosivo entre serapilheiras de diferentes espécies. A partir dessas descobertas é preciso agora ampliar a escala nessa abordagem ao nível de comunidades. Dois componentes da composição funcional de

comunidades têm sido amplamente relacionados a todos os processos que citamos ao longo desse trabalho: CWM (*community weight-mean*) – atributo médio da característica funcional de uma comunidade – e FD (*functional diversity*) – diversidade funcional. O CWM, média do atributo das espécies ponderado pelas suas abundâncias na comunidade, se baseia na hipótese das massas (Grime, 1998), onde o efeito das espécies sobre determinado processo ecossistêmico é proporcional a sua biomassa (Dias et al. 2013). Enquanto que FD, grau de dissimilaridade dos atributos das características das espécies que coexistem em uma comunidade, se baseia na hipótese da complementariedade, que promove efeitos não aditivos nos processos ecossistêmicos, isto é, efeitos não previsíveis a partir dos efeitos individuas das espécies, que resultam em interações antagônicas ou sinérgicas entre espécies (Dias et al. 2013, Mouillot et al. 2011). Nossos resultados podem ser expandidos a comunidades através do CWM, onde comunidades com CWM do ETF maiores e EH menores tenderiam a estocar pouca água na serapilheira gerando taxas mais elevadas de escoamento superficial e potencial erosivo. Em contrapartida, é preciso testar possíveis efeitos da diversidade sobre esses processos. Por exemplo, é possível que serapilheiras com folhiços grandes e pequenos tenderiam a direcionar a água lateralmente, porém com baixa velocidade, com boa parte estocada, gerando taxas de escoamento intermediárias, porém "escoamento limpo".

### 4.4.1 O Espectro Hidrológico (EH)

Neste trabalho propomos a existência do Espectro Hidrológico (EH) descrevendo um gradiente de hidrofobicidade foliar. Mostramos que características hidrológicas das folhas podem afetar processos ecossistêmicos, como escoamento superficial e erosão, mesmo após a senescência das folhas (i.e. folhiços). Este legado das características das plantas (Dias et al. 2017) vem sendo relacionado com outros processos como decomposição (Cornelissen et al. 2017), mineralização de nutriente e mais recentemente flamabilidade (Grootemaat et al. 2015). Essas características determinam a estratégia de uso da água das plantas (Rosado & Holder, 2013) podem, depois de sua senescência afetar o funcionamento do ecossistema devido aos seus nos fluxos hidrológicos da serrapilheira.

Esse espectro reflete o modo com que as folhiços interagem com a água sendo um extremo de espécies com alta higroscopicidade e baixa hidrofobicidade foliar, com habilidade

para absorver e reter água, sendo esse um modo arrojado de captar e armazenar água, até o outro extremo de espécies com baixa higroscopicidade e alta hidrofobicidade foliar, onde não captam/acumulam água nas folhas e/ou folhiços, sendo esse um modo mais conservador de lidar com a água disponível (Rosado & Holder, 2013, Mattos & Rosado, 2016). A pressão seletiva para aumentar a hidrofobicidade das superfícies das folhas tem uma base fisiológica (Rosado & Holder, 2013). As gotas de água na superfície podem restringir a troca de carbono fotossintético, porque o dióxido de carbono se difunde mais lentamente na água do que no ar. Desta forma, folhas mais hidrofóbicas permitem a manutenção das taxas de fotossíntese (Letts e Mulligan, 2005, Rosado & Holder, 2013). Higroscopicidade e hidrofobicidade foliar podem também ter efeito na redução da incidência de doenças agrícolas em várias culturas, uma vez que folhas em estado mais úmida, ou seja, mais hidrofílicas, tendem a sofrer maior ação de organismos microbianos e fungícos (Huber e Gillespie, 1992). Porém esse é um tópico ainda pouquíssimo explorado.

O entendimento da funcionalidade da hidrofobicidade e higroscopicidade das folhas e folhiços pode também explicar o efeito das espécies sobre processos ecossistêmicos. As características do EH podem elucidar, por exemplo, processos de captação de água foliar, uma importante fonte de água para plantas (Zimmermann et al., 2007, Rosado & Holder, 2013), decomposição (Makkonen et al. 2013) e flamabilidade (Grootemaat et al. 2015), além de interceptação e escoamento superficial, como destacamos aqui nesse estudo. As características do EH são pouco correlacionadas com características do ETF (Figuras 9 e 10), que sugere que tais características do folhiço não são dependentes do seu tamanho e forma e atuam concomitantemente sobre determinado processo ecossistêmico. Em todos nossos modelos as características do EH tiveram papel relevante destacando sua importância para os processos hidrológicos e erosivos.

Ainda assim, essas observações precisam ser mais profundamente estudadas. Incluir um grupo maior de espécies dentro do EH, testá-lo em outros diversos processos ecossistêmicos e na estruturação de comunidades de plantas, definindo as estratégias das espécies em um local com base na sua aquisição hídrica são alguns dos passos seguintes que precisam ser melhor elucidados.

### 4.4.2 Implicações: os mecanismos hidrológicos da serapilheira a serviço da restauração de ecossistemas

O histórico de conversão de ecossistemas naturais tem feito consequências em diversos processos e serviços dos ecossistemas, sendo entre eles o aumento na geração de escoamento superficial e na susceptibilidade a erosão dos solos. Constantemente, diversas tentativas em recuperar e/ou restaurar o funcionamento dos ecossistemas naturais baseiam-se na simples reestruturação da vegetação. Caso emblemático é o do Parque Nacional Floresta da Tijuca, onde a simples reestruturação da vegetação reconfigurou os processos hidrológicos garantindo novamente a produção de água. Porém, como esses projetos de recuperação/restauração são limitados geralmente por custos econômicos, é necessário repensar a lógica (modelos) de reestruturação da vegetação para propor metas e objetivos especificamente voltados para ajustar o balanço hidrológico e a proteção do solo à erosão com maior eficiência. Nesse estudo, propormos e testamos um quadro conceitual que determina o efeito do folhiço sobre os fluxos e processos hidrológicos terrestres que pode ser incluído nos modelos de restauração.

Como observamos, a combinação de características do ETF e EH do folhiços das espécies altera consideravelmente o estoque de água na serapilheira, o processo de escoamento superficial (a magnitude e direção do *litter/biomat flow* e a existência de fluxos Hortonianos e, possivelmente, Hewlettiano/saturado) e potencial erosivo. Sendo assim, é possível então projetar a reestruturação da vegetação sobre esse quadro conceitual, combinando espécies com determinadas características de acordo com o objetivo a ser alcançado com a recuperação/restauração.

Por exemplo, áreas que sofrem diretamente com frentes de umidade e chuvas torrenciais com alta intensidade, é necessário inserir espécies ou já diretamente *topsoils* com folhas menores e de baixa hidrofobicidade afim de potencializar a interceptação, atenuando o impacto do fluxo Hortoniano gerador de escoamento superficial e decorrente erosão, tipicamente formador de ravinas e voçorocas (Onda et al. 2006,Gholami et al. 2008,Li et al. 2013). Porém, em algumas encostas com solos rasos, é preciso moderar a interceptação, uma vez que potencializando esse processo, há maior infiltração de água no solo, favorecendo e acelerando sua saturação. Em casos de chuvas persistentes ou frequentes, serapilheiras capazes de favorecer altas taxas de infiltração fomentam a ocorrência do fluxo

saturado/Hewlettiano, gerador de processos de escoamento sub-superficial e até superficial com grande capacidade de um tipo específico de erosão: os deslizamentos e movimentos de massa.

Portanto são necessários estudos que de fato testem essas ideias e hipóteses que propomos diante nas nossas descobertas. Com isso, é possível estruturar uma ferramenta com base na abordagem de ecologia funcional para projetos de restauração capaz de reconstruir processos ecossistêmicos como os hidrológicos em escalas locais e regionais.

## CONCLUSÃO

Nosso experimento investigoucomoserapilheiras de espécies que co-ocorrem apresentam propriedades hidrológicas de estoque e drenagem diferentes implicando na geração distinta de escoamento superficial e potencial erosivo. Nós descobrimos que serapilheiras de espécies com alta capacidade de estoque (C), chegando a 8 vezes mais do que espécies de baixo estoque, retardavam a drenagem lateral (altos valores de $T_{INICIAL}$). Esse saldo de alto estoque e baixa drenagem lateral implicou em baixos valores de magnitude do escoamento superficial (RUNOFF), chegando a uma diferença de mais de 20 vezes. Apesar de não termos detectado relação significativa entre escoamento superficial e deslocamento de partículas (SEDIM), foi possível detectar diferenças entre as espécies sobre esse processo.

Nossosmodelos foram capazes de retratar como as características do ETF e EH modulam as propriedades e processos hidrológicos e potencial erosivo. Descobrimos que ETF tem relação negativa com o estoque e positiva com drenagem lateral e magnitude do escoamento superficial. Enquanto que EH, tem efeito contrário sobre todas as variáveis hidrológicas. Em todos esses modelos, ETF teve maior importância relativa, indicando possível preponderância de mecanismos de capilaridade sobre esses processos. Em termos de potencial erosivo, somente EH tem efeito no deslocamento de partículas, sendo esse um efeito negativo, indicando a relevância de mecanismos de coesão/adesão.

O entendimento do efeito dessas características das espécies em processos hidrológicos e erosivos é um dos fatores-chave no funcionamento desses processos. Conhecendo esse funcionamento é possível dizer e predizer o comportamento de diferentes comunidades e de suas mudanças ao longo do espaço e do tempo sobre o funcionamento hidrológico em diferentes ecossistemas. Essas nossas descobertas poderão servir também como ferramentas de manejo, subsidiando, por exemplo, programas de restauração florestal, conservação de mananciais e conservação da biodiversidade.

# REFERÊNCIAS

Alves-Sobrinho T, Ferreira PA & Pruski FF. 2002. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil.Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 6(2):337-344.

Brye KR, Norman JM, Bundy LG & Gower ST. 2000. Water-budget evaluation of prairie and maize ecosystems. Soil Science Society of American Journal. 64:715–724.

Bulcock HH & Jewitt GPW. 2012. Modelling canopy and litter interception in commercial forest plantations in South Africa using the variable storage Gash model and idealized drying curves. Hydrol. Earth Syst. Sci. 16:4693–4705.

Cebrian J. 1999. Patterns in the fate of production in plant communities. The American Naturalis. 154:449–468.

Campbell CG, Garrido F & Ghodrati M. 2004. Role of leaf litter in initiating tracer transport pathways in a woodland hillslope soil.Soil Sci. 169:100–114.

Cerdà A. 1999. Parent material and vegetation affect soil erosion in eastern Spain. Soil Science Society of America Journal. 63:362–368.

Cerdà A & Doerr SH. 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. Catena. 74:256–263.

Chang Y, Yu XX, Chen LH, Fan DX, Liang HR & Sun JM. 2014. Effects of undergrowth litter layer on runoff and sediment reduction under simulated rainfall conditions. Journal of Beijing Forestry University. 36:69-74.

Christiansen JP. 1942. Irrigation by sprinkling. Berkeley: University of California. Agricultural Experiment Station.

Cornelissen JHC. 1996. An experimental comparison of leaf decomposition rates in a wide range of temperate plant species and types. Journal of Ecology. 84:573–582.

Cornelissen JHC, Grootemaat S, Verheijen LM, Cornwell WK, van Bodegom PM, van der Wal R & Aerts R. 2017. Area litter decomposition and fire linked through plant species traits?New Phytologist.

Cornwell WK, Elvira A, Van Kempen L, et al. 2015.Flammability across the gymnosperm phylogeny: the importance of litter particle size. New Phytologist. 206:672-681.

Dias ATC, Berg MP, Bello F, Van Oosten AR, Bílá K & Moretti M. 2013. An experimental framework to identify community functional components driving ecosystem processes and services delivery. Journal of Ecology. 101:29–37.

Dias ATC, Cornelissen JHC & Berg MP. 2017. Litter for life: assessing the multifunctional legacy of plant traits. Journal of Ecology. 105:1163-1168.

Díaz S, Demissew S, Joly C, Lonsdale WM & Larigauderie A. 2015. A Rosetta Stone for nature's benefits to people. PLoS Biology.13:1–8.

Díaz S, Kattge J, Cornelissen JHC, Wright IJ, Lavorel S, Dray S, Reu B Kleyer M, Wirth C, Prentice IC, Garnier E, Bönisch G, Westoby M, Poorter H, Reich PB, Moles AT, Dickie J, Gillison AN, Zanne AE Chave J, Wright SJ, Sheremet'ev SN, Jactel H, Baraloto C, Cerabolini B, Pierce S, Shipley B, Kirkup D, Casanoves F, Joswig JS, Günther A, Falczuk V, Rüger N, Mahecha MD & Gorné LD. 2016. The global spectrum of plant form and function. Nature. 259: 167-171.

Dunkerley DL. 2015. Percolation through leaf litter: What happens during rainfall events of varying intensity? Journal of Hydrology 525:737–746.

Freschet GT, Aerts R & Cornelissen JHC. 2012. A plant economics spectrum of litter decomposability. Functional Ecology. 26:56–65.

Findering A, Ruy S & Scopel E. 2003. Modeling the effects of a partial residuemulch on runoff using a physically based approach. J Hydrol. 275:49–66.

Gerke K, Sidle RC & Mallants D. 2015. Preferential flow mechanisms identified from staining experiments in forested hillslopes. Hydrol. Process. 29:4562–4578.

Guevara-Escobar A, Gonzalez-Sosa E, Ramos-Salinas M & Hernandez-Delgado GD. 2007. Experimental analysis of drainage and water storage of litter layers.Hydrol. Earth Syst. Sci. 11:1703–1716.

Gholami L, Sadeghi SH & Homaee M. 2013. Straw Mulching Effect on Splash Erosion Runoff and Sediment Yield from Eroded Plots. Soil Science Society of America Journal 77:268–278.

Gomi T, Sidle RC, Miyata S, Kosugi K & Onda Y. 2008. Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: Scale effects and runoff transfer.Water Resources Research 44.

Grime JP. 2001. Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties,2nd edn. Chichester:Wiley.

Grootemaat S, Wright IJ, van Bodegom PM, Cornelissen JHC,Cornwell WK.2015. Burn or rot: leaf traits explain why flammability and decomposability aredecoupled across species. Functional Ecology. 29:1486–1497.

Grömping U. 2006. Relative Importance for Linear Regression in R: The Package relaimpo. Journal of Statistical Software. 17(1):1--27.

Hashim GM, Ciesiolka CAA, Abdullah Yusoff W, Wahab Nafis A, Radzali Mispan M, Rose CW & Coughlan KJ. 1995. Soil erosion processes in sloping land in the east coast of Malaysia. Soil Technol. 8:215–233.

Helvey JD. 1964. Rainfall Interception by Hardwood Forest Litter in the Southern Appalachians. US Forest Service Research Paper SE-8. Asheville NC: USDA Forest Service Southeastern Forest Experiment Station.

Helvey JD & Patrick JH. 1965. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States. Water Resour. Res. 1:193–206.

Holder CD. 2012. Effects of leaf hydrophobicity and water droplet retention on canopy storage capacity. Ecohydology.

Holder CD. 2013. Effects of leaf hydrophobicity and water droplet retention on canopy storage capacity. Ecohydrology. 6(3):483-490.

Holder CD &Gibbes C. 2017. Influence of leaf and canopy characteristics on rainfall interception and urban hydrology.Hydrological Sciences Journal.62(2):182.

Horton RE. 1919. Rainfall interception. Mon. Weather Rev. 47:603–623.

Horton RE. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society of America Proceedings. 5:399-417.

Huber L, Gillespie TJ. 1992. Modeling leaf wetness in relation to plantdisease epidemiology. Annual Review of Phytopathology.30:553–577.

Ilek A, Kucza J & Szostek M. 2015. The effect of stand species composition on water storage capacity of the organic layers of forest soils. European Journal Forestry Research. 134:187–197.

Hooper DU, Chapin FS, Ewel JJ, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton JH, Lodge DM, Loreau M, Naeem S, Schmid B, Setälä H, Symstad AJ, Vandermeer J & Wardle DA. 2005. Effects of Biodiversity on Ecosystem Functioning: A consensus of current knowledge. Ecological Monographs 75: 3–35.

Johnson JB& Omland KS. 2004. Model selection in ecology and evolution. Trends in Ecology Evolution. 19.

Kim HJ, Sidle RC & Moore RD. 2005. Shallow lateral flow from a forested hillslope:influence of antecedent wetness. Catena. 60:293-306.

Kim JK, Onda Y & Yang DY. 2014. Plot-scale study of surface runoff on well-covered forest floors under different canopy species. Quaternary International. 344:75-85.

Letts MG, Mulligan M. 2005. The impact of light quality and leaf wetnesson photosynthesis in north-west Andean tropical montane cloud forest.Journal of Tropical Ecology 21: 549–557.

Lavorel S. 2013. Plant functional effects on ecosystem services. Journal of Ecology. 101:4–8.

Li X, Niu J & Xie B. 2013. Study on hydrological functions of litter layers in north China. PLoS ONE. 8:1–11.

Li X, Niu J & Xie B. 2014. The effect of leaf litter lover on surface runoff and soil erosion in Northern China. PLoS ONE. 9(9).

Li X,Xiao Q Niu J,Dymond S,Van Doorn NS,Yu X,Xie B,Lv X, Zhang K,Li J. 2016. Process-based rainfall interception by small trees in Northern China: The effect of rainfall traits and crown structure characteristics. Agricultural and Forest Meteorology. 65:218-219.

Liu W,Luo Q,Lu H&Duan W. 2017. The effect of litter layer on controlling surface runoff and erosion in rubber plantations on tropical mountain slopes SW China. Catena. 149:167–175.

Makkonen M, Berg MP, Van Logtestijn RSP, Van Hal JR & Aerts R. 2013. Do physical plant litter traits explain non-additivity in litter mixtures? A test of the improved microenvironmental conditions theory. Oikos. 122:987–997.

Mattos IS & Rosado BHP. 2016. Retain or repel? Droplet volume does matter when measuring leaf wetness traits. Annals of Botany. 117:1045–1052.

McDonnell JJ, Owns JF & Stewart MK. 1991. A case study of shallow flow paths in a steep zero-order basin. Water Resources Research. 27.

McGill BJ, Enquist BJ, Weiher E & Westoby M. 2006. Rebuilding community ecology from functional traits. Trends in ecology & evolution.21:178–85.

Meginnis HG. 1935.Influence of forest litter on surface run-off and soil erosion. J. Soil Water Conserv. Soc. 16:115–118.

Meyer LD. & Harmon WC. 1979. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. Transactions of the ASAE. 22(1):100-103.

Meyer LD. & Mccune DL. 1958. Rainfall simulator for runoff plots. Agricultural Engineering. 39(1):644-648.

Miyata S, Kosugi K, Gomi T & Mizuyama T. 2009. Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests.Water Resour. Res. 45.

Montebeller CA, Carvalho DF, Alves-Sobrinho T, Nunes AS & Rubio E. 2001. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 5(1):1-5.

Mouillot D, Villeger S, Scherer-Lorenzen M & Mason NWH. 2011. Functional structure of biological communities predicts ecosystem multifunctionality.PLoS ONE.6:174-176.

Morin J, Goldberg D & Seginer I. 1967. A rainfall simulator with a rotating disk. Transacions of the ASAE. 10:74-79.

Nanko K, Mizugaki S & Onda Y. 2008. Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of na unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities. Catena. 72:348–361.

Noguchi S, Tsuboyama Y, Sidle RC& Hosoda I. 199. Morphological characteristics of macropores and the distribution of preferential flow pathways in a forested slope segment. Soil Science Society of America Journal. 63:1413-1423.

Coelho Netto ALC. 1987. Overlandflow production in a tropical rainforest catchment: The role of litter cover. Catena 14: 213–231.

Onda Y, Tsujimura M, Fujihara J & Ito J. 2006. Runoff generation mechanisms in high-relief mountainous watersheds with different underlying geology. Journal of Hydrology.331:659-673.

Pannkuk CD & Robichaud PR. 2003.Effectiveness of needle cast at reducing erosion after forest fires. Water Resour Res. 39(12):1–9.

Park A, Friesen P & Serrud AAS. 2010. Comparative water fluxes through leaf litter of tropical plantation trees and the invasive grass *Saccharum spontaneum* in the Republic of Panama. J. Hydrol.383:167–178.

Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, Bret-Harte MS, Cornwell WK, Craine JM, Gurvich DE, Urcelay C, Veneklaas EJ, Reich PB, Poorter L, Wright IJ, Ray P, Enrico L, Pausas JG, De Vos AC, Buchmann N, Funes G, Quétier F, Hodgson JG, Thompson K, Morgan HD, Ter Steege H, Van Der Heijden MGA, Sack L, Blonder B, Poschlod P, Vaieretti MV, Conti G, Staver AC, Aquino S & Cornelissen JHC. 2013. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. Australian Journal of Botany. 61:167–234.

Pitman JL. 1989. Rainfall interception by bracken litter --Relationship between biomass storage and drainage rate. Journal of Hydrology. 111:281 291.

Putuhena WM & Cordery I. 1996. Estimation of interception capacity of the forest floor. Journal of Hydrology. 180:283–299.

RStudio Team. 2016. RStudio: Integrated Development for R. RStudio. Inc., Boston, MA http://www.rstudio.com/.

Rosado BHP & Holder CD. 2013. The significance of leaf water repellency in ecohydrological research: a review. Ecohydrology. 6:150–161.

Rosado B, Figueiredo MSL, Mattos EA & Grelle CEV. 2016. Eltonian shortfall due to the Grinnellian view: functional ecology between the mismatch of niche concepts. Ecography. 39(11): 1034-1041.

Roth CH, Meyer B, Frede HG. 1985. A portable rainfall simulator to study factors affecting runoff infiltration and soil loss. Catena. 12:79-85.

Sato Y, Otsuki K & Ogawa S. 2002. Experimental studies on litter interception of *Cryptomeriajaponica* and *Lithocarpus edulis*. Proc. Int. Congress Interpraevent.2:973–980.

Sato Y, Kumagai T, Kume A, Otsuki K & Ogawa S. 2004. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers – the effects of rainfall conditions and leaf shapes. Hydrol. Process. 18:3007–3018.

Sayer EJ. 2006.Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. Biol. Rev. 81:1–31.

Sidle RC, Ziegler AD, Negishi JN, Nik A,Siew R& Turkelboom F. 2006. Erosion processes in steep terrain-truths myths and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. For. Ecol. Manag. 224:199–225.

Sidle RC, Hirano T, Gomi T & Terajima T.2007. Hortonian overland flow from Japanese forest plantations—an aberration the real thing or something in between?Hydrological Processes. 21:3237–3247.

Silva FA, Miranda CC, Valcarcel R & Figueiredo PHA. 2013. Estoque e Capacidade de Retenção Hídrica da serrapilheira acumulada na restauração florestal de Áreas Perturbadas na Mata Atlântica. Floresta e Ambiente. 20(3):336-343.

Smith RE. 1976. Approximations for vertical infiltration rate patterns. Transactions of the ASAE. 19(3):505-509.

Souza MD. 2004. Desenvolvimento e utilização de um simulador de chuvas para estudos de atributos físicos e químicos do solo relacionados a impactos ambientais. Embrapa Meio Ambiente. 37:1-20.

Sun X, Wang G, Lin Y, Liu L &Gao Y. 2013. Intercepted rainfall in Abies fabri forest with different-aged stands in southwestern China. Turkish Jorunal Agri. Forestry. 37:495–504.

Thurow TL, Blackburn WH, Warren SD & Taylor CA. 1987. Rainfall interception by midgrass shortgrass and live oak mottes. J. Range Manage. 40:455–460.

Tossell RW, Dickinson WT, Rudra RP & Wall GJ. 1987. A portable rainfall simulator. Canadian Agricultural Engineering. 29(2):155-162.

Tossell RW, Wall GJ, Rudra RP & Groenevelt PH. 1990. The Guelph rainfall simulator II: A comparison of natural and simulated rainfall characteristics. Canadian Agricultural Engineering. 32(2):215-223.

Tsiko CT, Makurira H, Gerrits AMJ & Savenije HHG.2012. Measuring forest floor and canopy interception in a savannah ecosystem. Phys. Chem. Earth. 47–48:122–127.

Walsh RPD. & Voigt PJ. 1977. Vegetation litter: an underestimated variable in hydrology and geomorphology. Journal of Biogeography. 4:253–274.

Wang H,Shi H,Li Y,Wang Y &Gan Y. 2014. The Effects of Leaf Roughness Surface Free Energy and Work of Adhesion on Leaf Water Drop Adhesion. PLoS ONE. 9.

Wright IJ, Reich PB Westoby M, et al. 2004. The worldwide leaf economics spectrum. Nature. 428:821–7.

Wu D, Xin XB, Zhao MY, Pei SX & Kong Y.2014. Hydrological effects of litters and soil under different forests in Jiulongshan of Beijing.27:417-422.

Zhang Z, Lei Y, Su K, Wang G, Wang D & Ma H. 2009. Hydrological characteristics of litter in different forest succession stages at Liuxihe watershed southern China. Front. Forestry China. 4:317–322.

Zhang TD, Tao JP & Wang YP. 2014. Storage characteristics of leaf litter from different life-form plants in two habitats. 33:310-315.

Zimmermann D, Westhoff M, Zimmermann G, Geßner P, Gessne A,Wegner LH, Rokitta M, Ache P, Schneider H, Vásquez JÁ, Kruck W, Shirley S, Jakob P, Hedrich R, Bentrup FW, Bamberg E, ZimmermannU. 2007. Foliar water supply of tall trees: evidence for mucilagefacilitatedmoisture uptake from the atmosphere and the impact onpressure bomb measurements. Protoplasma. 232:11–34.

**ANEXO** - Valor médio das características do Espectro de Tamanho e Forma (ETF) e do Espectro Hidrológico (EH) para as espécies estudadas.

Tabela 5 - Valor médio das características do Espectro de Tamanho e Forma (ETF) e do Espectro Hidrológico (EH) para as espécies estudadas.

| | EH | | | ETF | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Espécie** | **WHCv** | **LRET** | **LREP** | **CUR** | **LA** |
| Bambusa sp. | 89,72 | 16,20 | 78,65 | 1,38 | 27,24 |
| Centrolobium tomentosum | 61,95 | 24,40 | 90,22 | 1,79 | 33,16 |
| Eucalyptus robusta | 61,48 | 36,35 | 74,62 | 2,65 | 35,87 |
| Eugenia brasiliensis | 20,11 | 55,35 | 79,60 | 1,32 | 34,92 |
| Ficus insipida | 22,94 | 24,80 | 97,96 | 4,15 | 62,50 |
| Hyeronima alchorneoides | 75,77 | 32,50 | 101,73 | 3,41 | 108,01 |
| Joannesia princeps | 17,26 | 37,60 | 93,02 | 2,05 | 25,71 |
| Lafoensua glyptocarpa | 126,66 | 22,85 | 86,39 | 1,67 | 9,70 |
| Sterculia curiosa | 56,26 | 29,30 | 106,20 | 3,96 | 141,88 |
| Tibouchina estrellensis | 63,82 | 34,35 | 108,29 | 2,37 | 24,20 |

Legenda: WHCv = capacidade de absorção foliar (%); LRET = retenção foliar – leaf water retention (grau - º); LREP = repelência foliar – leaf water repellency (grau - º); CUR = curvatura - curliness (cm); LA = área foliar – leaf area (cm²).

**APÊNDICE -** Desenvolvimentoe Calibração de um simulador de chuva de baixo custo

## 1 **Introdução**

A chuva é o tipo de precipitação mais importante dentro do ciclo e balanço hidrologia. Estudos que dependem de seus efeitos são difíceis de serem realizados em condições naturais, uma vez que não se tem controle sobre sua forma, duração, intensidade, energia e distribuição (Souza 2004). Uma maneira de contornar esse problema é a utilização de simuladores de chuvas que permitem controlar essas características sem depender das condições climáticas. Nesse estudo avaliamos o desempenho de um simulador de chuva proposto por Tosselet al. (1987).

Para que um simulador de chuvas seja considerado satisfatório, é necessário que ele: a) apresente relação entre a energia cinética da precipitação simulada e aquela da chuva natural acima de 75% (Meyer &McCune 1958), b) aplique água de modo contínuo na parcela experimental ou, no mínimo, execute duas aplicações por segundo compondo, assim, uma aplicação não intermitente (Morin et al. 1967) e (c) cubra uma área superior a 0,50 m², caracterizada como área alvo de precipitação, pois experimentos cuja área útil é inferior a 0,50 $m^2$ , estão sujeitos a resultados tendenciosos (Smith 1976). Vários modelos de equipamentos de simulação de chuva vêm sendo desenvolvidos e testados há bastante tempo (Morin et al. 1967, Meyer& Harmon 1979, Montebeller et al. 2001, Alves-Sobrinho et al. 2002, Souza 2004). Um modelo bem simples foi desenvolvido, baseado no funcionamento do sistema de simulação por aspersão descrito por Meyer& Harmon (1979) e adaptado por Tossel et al. (1987). Ele é composto, basicamente, por bicos aspersores de precisão apontados/direcionados para o solo e suspensos a determinada altura e sob pressão controlada.

Esse modelo de simulador vem sendo testado ao longo dos anos que constataram a semelhança em intensidade ($mmh^{-1}$), simulando eventos de chuvas branda (5 $mmh^{-1}$) a intensa (400 $mmh^{-1}$); diâmetro das gotas, variando de 1.00 a 3.00 mm; velocidade, em média de 6 m $s^{-1}$); distribuição/uniformidade (75-85 %) e energia cinética da chuva simulada com a natural (Tossel et al. 1987; Tossel et al. 1990; Alves Sobrinho et al. 2002; Souza, 2004). Isso torna esse modelo de simulador promissorem estudos que tem a chuva como uma variável preditora.

Ainda assim, variáveis como altura do bico aspersor em relação ao solo, tipo e aspectos da bomba-motor, incidência e direção dos ventos, entre outros afetam a eficiência da chuva simulada. Portanto, esse trecho do nosso trabalho, busca especificar as características de intensidade e uniformidade da chuva artificial gerada no nosso simulador. Descreveremos e avaliaremos esses parâmetros sob combinação de 3 (três) pressões de entrada e 3 (três) alturas do bico aspersor. Nosso objetivo aqui, além de avaliar as características testadas é desenvolver um modelo que sirva no planejamento ao se replicar esse simulador de chuva.

# 2METODOLOGIA

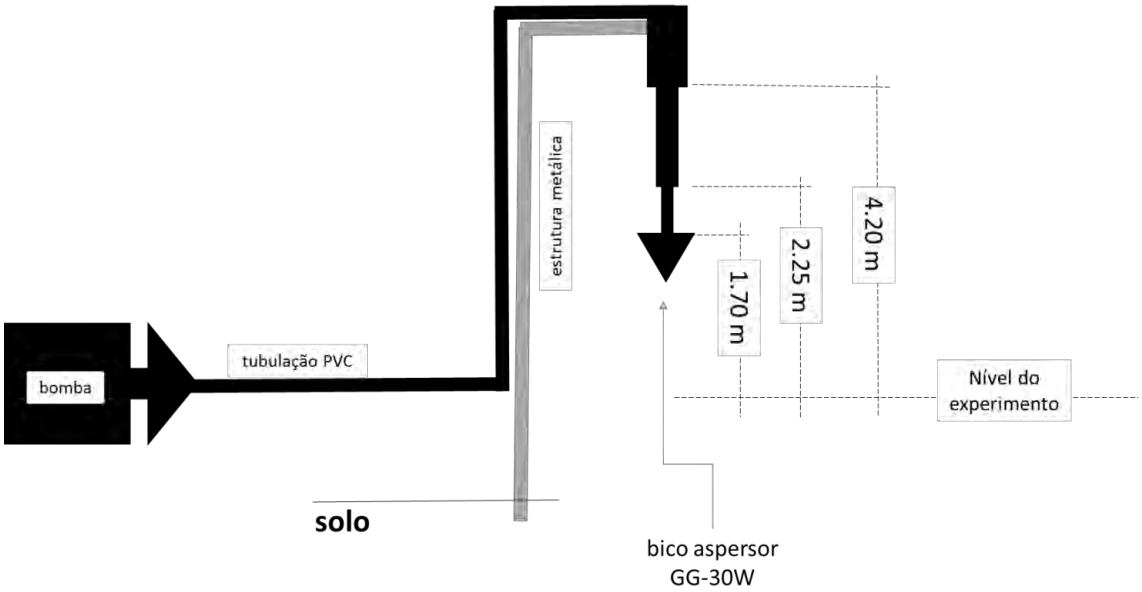
## 2.1 **Material necessário**

O simulador consiste basicamente de três componentes: (a) bomba-motor de água; (b) tubulação e conexões de PVC 16 mm, (c) bico aspersor Fulljet GG-30W Sprayng Systems Co. e (d) estrutura metálica de 4 metros de altura em forma de “L”.

## 2.2 **Montagem e funcionamento do simulador**

Conectada a uma caixa d`água de 50.000 L, a bomba-motor direciona a água da caixa através de uma tubulação de PVC de 16 mm (0,5 polegada). A tubulação é fixada acompanhando a estrutura ferro-metálica, que por sua vez, está presa no solo de modo a formar um “L” invertido com altura máxima de 4 (quatro) metros. No final dessa tubulação é então conectado o bico aspersor Fulljet GG-30 W Sprayng Systems com a saída de água apontada para o solo. Essa última conexão antes do bico aspersor tem regulagem de 3 (três) alturas: (grande) 4.20 metros; (médio) 2.25 metros e (pequeno) 1.70 metros. Antes da conexão do bico aspersor, um manômetro angular com regulagem mede a pressão da coluna de água que chega até o bico através da tubulação (Figura 13). Demarcamos 3 (três) regulagens de pressão: (alta) 3.5 kg $cm^{-3}$; (intermediária) 2.5 kg $cm^{-3}$ e (baixa) 1.8 kg $cm^{-3}$.

Figura 13 - Croqui (esquema) do simulador de chuva de baseado em Tossel et al. (1987).

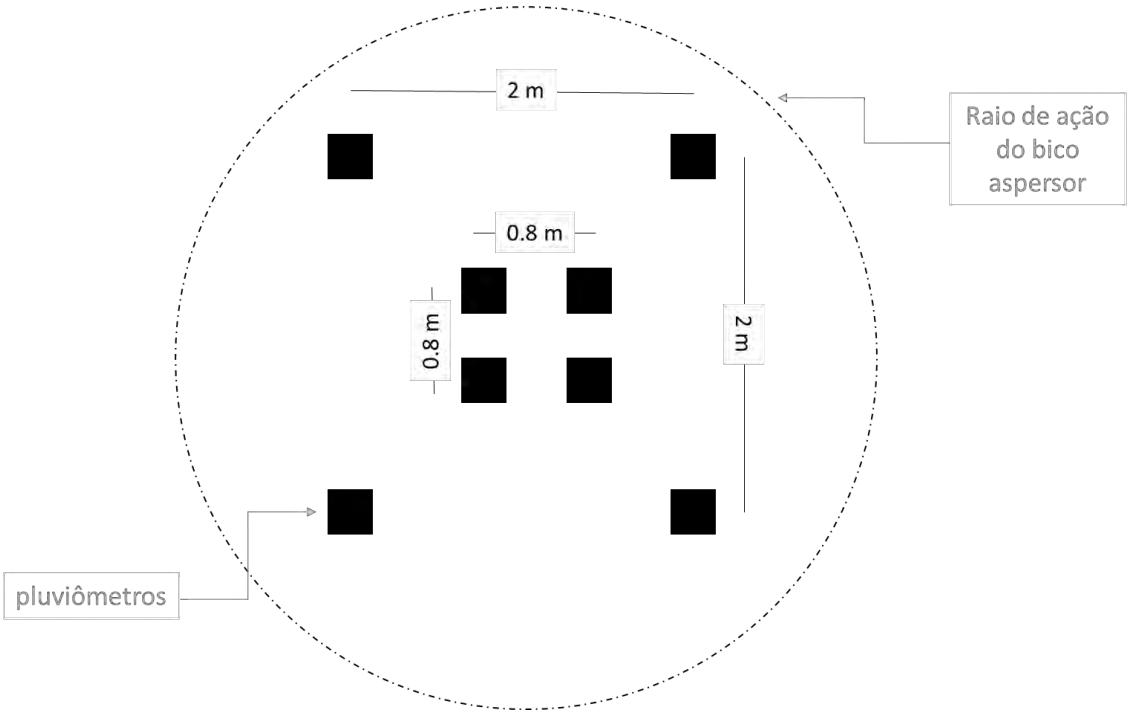



Nota: A água é pressurizada pela bomba, percorre a tubulação até chegar no braço regulável de altura, com 3 opções de altura, que se conectaao aspersor GG-30W (seta).

## 2.3 **Delineamento experimental**

Para avaliar a intensidade (mm $h^{-1}$) e distribuição (CUC %) da precipitação alocamos oito pluviômetros sistematicamente com quatro localizados na borda do raio de ação do bico aspersor e os demais no centro (Figura 14). Acionamos o simulador de chuva por cinco minutos e, ao final, medimos todos os pluviômetros. Repetimos essa rotina três vezes por cada combinação entre altura e pressão, totalizando 27 amostras.

Figura 14 - Delineamento experimental da avaliação da homogeneidade da precipitação simulada (pluviômetros são os quadrados pretos).




## 2.4 **Análise dos dados**

Calculamos intensidade (mm $h^{-1}$) a partir da média aritmética da medida lida nos pluviômetros de cada réplica. Para medir a distribuição/uniformidade (%), calculamos o coeficiente de Christiansen (CUC; Christiansen 1942; Equação 3) para cada combinação altura-pressão. Valores satisfatórios de uniformidade estão acima de 75 % (Meyer& McCune 1958, Alves-Sobrinho et al. 2001).

$$CUC = 100\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left|Xi - \overline{X}\right|}{n\overline{X}}\right) \qquad \textbf{(3)}$$

Em que:CUC = coeficiente de Christiansen;Xi = volume precipitado em cada pluviômetro;X = volume médio precipitado en = número de pluviômetros.

Na busca pelo modelo da intensidade da chuva simulada pelo controle da altura do bico aspersor e pressão de entrada, rodamos a ANCOVA (Análise de Co-variância) para detectar a significância (valor-p $< 0.05$) das variáveis isoladas e a interação. Com isso selecionamos a variável de maior efeito sobre a intensidade e modelamos essas relações controlando a variável de menor efeito. As análises atenderam as premissas da normalidade (Teste Shapiro-Wilk). Todas elas foram executadas no software R (R Core Team, 2016).

# 3 **RESULTADOS**

Nosso simulador foi capaz de gerar precipitações de 40 mm $h^{-1}$ (2.5 kg $cm^{-3}$à 4.20 metros) até 180 mm $h^{-1}$ (1.8 kg $cm^{-3}$ à 1.70 metros). Os resultados apontam que existe efeito significativo da altura (valor-F = 34.2; valor-p < 0.0001) ao contrário da pressão (valor-F = 0.13; valor-p < 0.5) e da interação entre as variáveis (valor-F = 0.92; valor-p < 0.3) na intensidade da chuva simulada. Controlamos então a pressão e notamos diferença significativa entre as 3 (três) variações de altura nas 3 (três) pressões controladas (Tabela 5**)**. O padrão geral é de uma relação negativa entre intensidade e altura, ou seja, quanto mais próximo o bico aspersor está do solo/experimento maior a intensidade da chuva artificial independente da pressão de entrada de água (Tabela 5; Figura 15).Assim, é possível estabelecer excelentes relações entre intensidade-altura do bico sob todas as pressões (pressão 2.5 kg $cm^{-}3$: y = 113.25 $x^{-0,431}$, $R^2$ = 0.9999; valor-p ≤ 0.001; 3.5 kg $cm^{-3}$: y = 166.93 $x^{-0,653}$; $R^2$ = 0.9210; valor-p ≤ 0.001; 1.8 kg $cm^{-}3$: y = 218.8x-1,013; $R^2$ = 0.8983; valor-p ≤ 0.05; Figura 16).

Enquanto isso, para uniformidade (CUC %) da distribuição da chuva artificial não existe diferença significativa da pressão (valor-F = 0.23; valor-p = 0.63), altura (valo-F = 0.87; valor-p = 0.36) e interação entre elas (valor-F = 12; valor-p = 0.73). Todas as altura-pressão tiveram CUC (%) acima de 85 %, com $CUC_{médio}$ mínimo de 85.6 %, com pressão intermediária (2.5 kg $cm^{-3}$)e altura mínima (1.7 m) e máxima de 92.3 %, pressão intermediária e altura máxima (4.2 m) (Tabela 5; Figura 15 e 16).

Tabela 6 -Média, erro padrão e, no caso da intensidade (mm $h^{-1}$), resultado do Teste de Tukey (alfa = 0.95) seguido do valor-F e valor-p (ANCOVA) da intensidade (mm $h^{-1}$) e CUC (%) entre as alturas (m) por cada pressão (kg $cm^{-3}$). Código de significância valor-p: *** < 0.001; ** ≤ 0.01; * ≤ 0.05.

| ALTURA (m)/ PRESSÃO (kg cm-3) | INTENSIDADE (mm $h^{-1}$) | | | CUC (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.8 | 2.5 | 3.5 | 1.8 | 2.5 | 3.5 |
| 1.7 | 144.5 ± 9.3 a | 90.0 ± 6.2 a | 126.5 ± 2.2 a | 88.9 ± 4.8 | 85.6 ± 4.7 | 86.5 ± 1.8 |
| 2.25 | 80.5 ± 4.1 b | 80.0 ± 2.6 a | 89.0 ± 1.8 b | 86.5 ± 3.3 | 89.7 ± 0.6 | 90.6 ± 0.6 |
| 4.2 | 54.0 ± 1.5 c | 61.0 ± 2.5 b | 67.5 ± 2.3 c | 87.0 ± 1.6 | 92.3 ± 1.6 | 88.9 ± 1.0 |
| valor-F | 15.98 | 9.689 | 25.53 | 0.0742 | 1.045 | 0.3364 |
| valor-p | 0.005 ** | 0.02 * | 0.001 ** | 0.8 | 0.3 | 0.6 |


| ALTURA (m)/ PRESSÃO (kg cm-3) | INTENSIDADE (mm $h^{-1}$) | | | CUC (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4.2 | 54.0 ± 1.5 c | 61.0 ± 2.5 b | 67.5 ± 2.3 c | 87.0 ± 1.6 | 92.3 ± 1.6 | 88.9 ± 1.0 |
| 1.7 | 144.5 ± 9.3 a | 90.0 ± 6.2 a | 126.5 ± 2.2 a | 88.9 ± 4.8 | 85.6 ± 4.7 | 86.5 ± 1.8 |
| 2.25 | 80.5 ± 4.1 b | 80.0 ± 2.6 a | 89.0 ± 1.8 b | 86.5 ± 3.3 | 89.7 ± 0.6 | 90.6 ± 0.6 |
| valor-F | 15.98 | 9.689 | 25.53 | 0.0742 | 1.045 | 0.3364 |
| valor-p | 0.005 ** | 0.02 * | 0.001 ** | 0.8 | 0.3 | 0.6 |
| 1.7 | 144.5 ± 9.3 a | 90.0 ± 6.2 a | 126.5 ± 2.2 a | 88.9 ± 4.8 | 85.6 ± 4.7 | 86.5 ± 1.8 |
| 4.2 | 54.0 ± 1.5 c | 61.0 ± 2.5 b | 67.5 ± 2.3 c | 87.0 ± 1.6 | 92.3 ± 1.6 | 88.9 ± 1.0 |
| 2.25 | 80.5 ± 4.1 b | 80.0 ± 2.6 a | 89.0 ± 1.8 b | 86.5 ± 3.3 | 89.7 ± 0.6 | 90.6 ± 0.6 |
| valor-p | 0.005 ** | 0.02 * | 0.001 ** | 0.8 | 0.3 | 0.6 |
| 4.2 | 54.0 ± 1.5 c | 61.0 ± 2.5 b | 67.5 ± 2.3 c | 87.0 ± 1.6 | 92.3 ± 1.6 | 88.9 ± 1.0 |
| valor-p | 0.005 ** | 0.02 * | 0.001 ** | 0.8 | 0.3 | 0.6 |
| valor-F | 15.98 | 9.689 | 25.53 | 0.0742 | 1.045 | 0.3364 |
| valor-p | 0.005 ** | 0.02 * | 0.001 ** | 0.8 | 0.3 | 0.6 |


Figura 15 - (A) variação da intensidade (mm $h^{-1}$) da chuva simulada entre as alturas (m) por cada pressão (kg $cm^{-3}$) com respectivos resultados do Teste Tukey (alfa = 0.95) e (B) variação da CUC (%) da chuva simulada entre as alturas (m) por cada pressão (kg $cm^{-3}$).

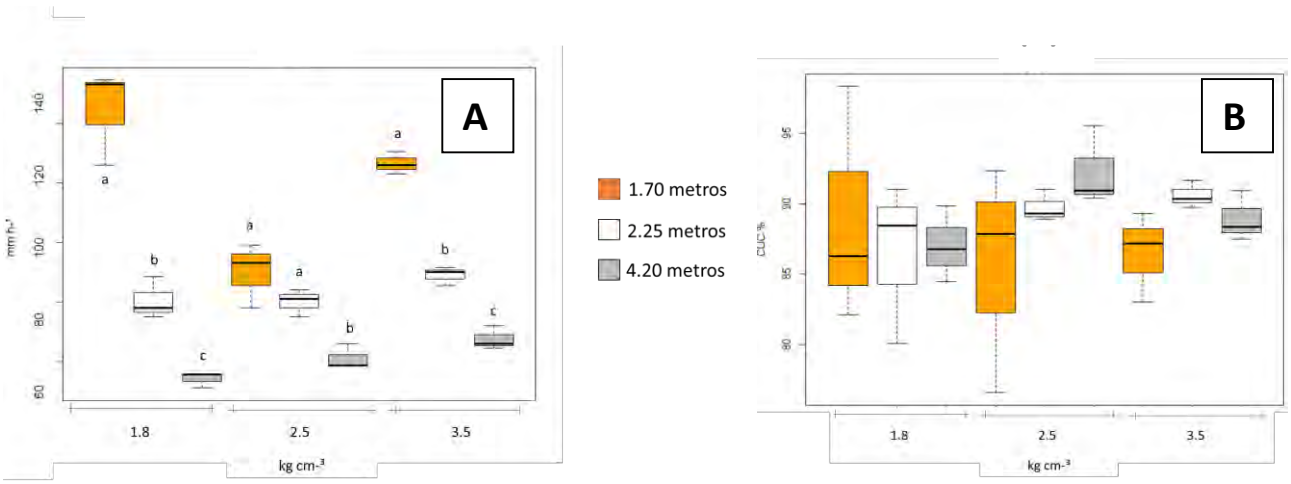
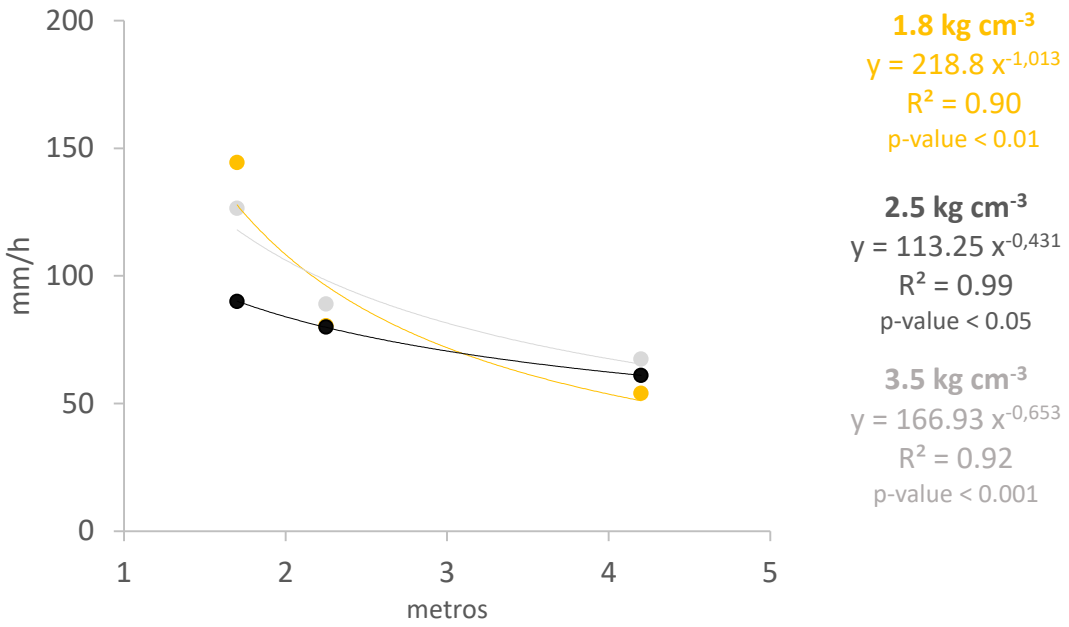


Figura 16 - Variação real (pontos) e modelo (linha) da intensidade (mm $h^{-1}$) da chuva simulada entre as alturas (m) por cada pressão (kg $cm^{-3}$).



# 4 DISCUSSÃO

De modo geral, constatamos que a intensidade da precipitação artificial gerada no nosso simulador sofre efeito de pequenas variações na altura e nenhuma (pouca) influência das alterações da pressão num intervalo entre 1.5-3.5 kg $cm^{-3}$, simulando chuvas de aproximadamente 40 mm $h^{-1}$ (2.5 kg $cm^{-3}$ à 4.20 metros) até 180 mm $h^{-1}$ (1.8 kg $cm^{-3}$ à 1.70 metros). Nossos modelos da variação da intensidade em função da altura nas 3 (três) alturas das 3 (três) pressões tiveram resultados satisfatório, com destaque para a pressão intermediária (2.5 kg $cm^{-3}$). Já em termos de uniformidade (CUC %), todas as combinações de altura e pressão são consideradas satisfatórios (> 75 %) e não há influência da altura nem da pressão de entrada na distribuição das gotas de chuva sobre determinada área.

Em termos de intensidade, chuvas consideradas brandas tem 5 a 10 mm $h^{-1}$, médias de 11 a 40 mm $h^{-1}$ enquanto que extremas acima de 40 mm $h^{-1}$. Segundo dados do relatório anual pluviométrico, eventos de pluviosidade no município do Rio de Janeiro atingem chuvas brandas, com menos de 1 mm $h^{-1,}$ até chuvas extremas, ultrapassando os 160 mm $h^{-1.}$ Dentro desse contexto, nosso simulador de chuva consegue gerar precipitações extremas, sendo capaz de representar a intensidade desses eventos extremos de ecossistemas tropicais. No estudo de desenvolvimento desse modelo de simulador, Tossel et al. (1987) e posteriormente Tossel et al. (1990), também conseguiram simular precipitações com essas intensidades e até ainda mais intensas.

Na busca pelos fatores que modificam a intensidade de simulação do nosso equipamento, percebemos que não há diferença entre pressões de entrada de água menor do que 3.5 kg $cm^{-3}$ e que já a altura do bico em relação ao nível do solo/experimento pode determinar a intensidade. Isso indica em casos de pressão de entrada pequenas a altura do bico aspersor é responsável pela calibração da chuva simulada. Geralmente, a pressão da água encanada residencial chega a uma pressão em torno de 2.0 kg $cm^{-3}$ (tubulação de 16 mm, ou 0.5 polegada) (Rajão, *dados não publicados*), porém bastante oscilante, não ultrapassando os 2.5 kg $cm^{-3}$ e, como em pressões baixa não há diferença significativa, podemos baratear o custo do simulador não utilizando a bomba-motor e ainda assim sendo possível gerar uma boa amplitude de precipitações com excelente uniformidade.

Associado a isso, o melhor modelo que isolam a pressão foi a de pressão intermediária, mas todos os demais modelos são satisfatórios para efeito de planejamento e

calibragem da precipitação que se quer alcançar. Portanto, recomendamos que para uma melhor calibragem fixe-se a pressão entre 2 e 3 kg $cm^{-3}$.

Parâmetros como a intensidade e, principalmente, uniformidade podem ainda ser mais bem calibrados se o vento também for um fator bem isolado, o que não foi necessário no nosso estudo. Como Tossel et al. (1987, 1990) já avaliaram critérios como diâmetro e velocidade terminal da gota e energia cinética da chuva simulada, nesse estudo adotamos seus resultados como referência. Mesmo recomendando que se reavaliem esses parâmetros para o mesmo bico aspersor e outros recentemente lançados pela Sprayng Systems, aqui nesse estudo, não o fizemos por acreditar que a intensidade e a uniformidade são fatores mais determinantes para avaliação da geração do escoamento superficial do que esses parâmetros. Porém, em estudos de erosão, erodbilidade e gênesis do solo, esses parâmetros passam a ser essenciais e, calibrá-los no simulador passa a ser fundamental.