

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

JÉSSICA GIACCHETTO FELICE

**TRANSPORTE DE MATERIAL EM SUSPENSÃO E DISSOLVIDO EM MODELO
FÍSICO COM SUPERFÍCIE IMPERMEÁVEL UTILIZANDO CHUVA SIMULADA**

Poços de Caldas/MG
2017

JÉSSICA GIACCHETTO FELICE

TRANSPORTE DE MATERIAL EM SUSPENSÃO E DISSOLVIDO EM MODELO FÍSICO COM SUPERFÍCIE IMPERMEÁVEL UTILIZANDO CHUVA SIMULADA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL–MG. Linha de pesquisa: Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Silveira.

Coorientador: Prof. Dr. Flávio Aparecido Gonçalves.

F314t Felice, Jéssica Giacchetto.

Transporte de material em suspensão e dissolvido em modelo físico com superfície impermeável utilizando chuva simulada / Jéssica Giacchetto Felice. – Poços de Caldas, 2017.

57 f. –

Orientador: Alexandre Silveira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2017.
Bibliografia.

1. Engenharia sanitária.
2. Recursos hídricos.
3. Modelagem física.
4. Chuvas – Métodos de simulação. I. Silveira, Alexandre. II.

Título.

CDD: 628.1



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas. UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental -
PPGCEA
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999. Cidade Universitária
CEP: 37715-400. Poços de Caldas, MG - Brasil



JÉSSICA GIACCHETTO FELICE

TRANSPORTE DE MATERIAL EM SUSPENSÃO E DISSOLVIDO EM MODELO
FÍSICO COM SUPERFÍCIE IMPERMEÁVEL UTILIZANDO CHUVA SIMULADA

A banca examinadora abaixo-assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia Ambiental, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas.

Área de Concentração: Ciência e Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 24/02/2017

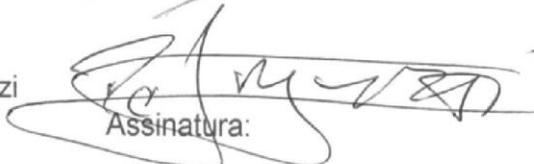
Professor Dr.: Alexandre Silveira
Instituição: UNIFAL-MG


Assinatura:

Professor Dr.: Rodrigo Braga Moruzzi
Instituição: UNESP – Rio Claro


Assinatura:

Professor Dr.: Rafael de Oliveira Tiezzi
Instituição: UNIFAL - MG


Assinatura:

Dedico aos meus pais, meu irmão e
minha avó, com todo meu amor!

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por iluminar todos os dias o meu caminho nessa jornada,

Ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental e a CAPES, pela oportunidade oferecida e apoio na realização da pesquisa,

Aos professores Alexandre Silveira, Flávio Gonçalves, Antônio Marciano e Jorge Isidoro, pela orientação, ensinamentos oferecidos, contribuições e paciência,

Aos técnicos do laboratório, pela colaboração na realização de ensaios,

Aos meus colegas mestrandos e todos os amigos que de alguma forma me incentivaram, aconselharam e ajudaram na realização deste trabalho.

“Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje, mas continue em frente de qualquer jeito”.

(Martin Luther King Jr.)

RESUMO

O acelerado processo de urbanização permitiu notar, a partir da segunda metade do século XX, várias alterações do território natural em consequência do desenvolvimento de atividades antrópicas. Essas mudanças são capazes de comprometer o equilíbrio e a qualidade dos recursos naturais, em especial, os recursos hídricos. A diminuição da evapotranspiração e da infiltração, o aumento da frequência das cheias urbanas e a degradação dos corpos d'água são alguns dos exemplos de impactos encontrados. O desenvolvimento de atividades antrópicas e a ocupação desordenada do solo contribuem para a introdução e o acúmulo de materiais contaminantes no ecossistema os quais, em períodos chuvosos, são transportados através do escoamento superficial – caracterizando fonte de poluição difusa. Portanto, objetivou-se com este trabalho estudar experimentalmente o transporte de poluentes originados de uma fonte difusa, tendo como fator de variação a localização da fonte de poluição em relação ao exutório de uma superfície impermeável e a forma dos poluentes, em suspensão e dissolvidos, representados por partículas de areia fina e cloreto de sódio, respectivamente. A configuração experimental consistiu num simulador de chuva sobre uma superfície acrílica impermeável com 8,40 m², que foi dividida em quatro posições, onde foram distribuídos a areia fina e o cloreto de sódio. Os resultados apresentaram maiores valores de pico de descarga mássica para o transporte de material dissolvido, bem como um tempo menor para atingir esses valores, quando comparados ao transporte de poluentes em suspensão. O efeito do *first flush* foi observado para todas as posições quando ensaiado o transporte de cloreto de sódio, enquanto que, para o transporte de areia, apenas as posições mais próximas da saída da superfície apresentaram o fenômeno. Devido a aproximação do transporte de poluentes em suspensão e dissolvido, para as posições mais próximas ao exutório, conclui-se que estes são dependentes da energia do escoamento, a qual foi suficiente para arrastar as partículas dispostas na superfície impermeável.

Palavras-chave: Chuva simulada. Processo chuva-escoamento. Transporte de poluentes. Modelagem física.

ABSTRACT

The accelerated process of urbanization has given to perceive, from the second half of XX century, several land changes as a consequence of the development of anthropic activities. These changes are capable of compromising the balance and quality of natural resources, in particular, of water resources. The decrease in evapotranspiration and infiltration, the increased frequency of floods in urban areas and the degradation of water bodies are some examples of these impacts. The development of anthropic activities and the disorganized occupation of the soil contributes to the introduction and accumulation of contaminant materials in the ecosystems, which, in rainy periods, are transported by surface runoff –a major cause of diffuse pollution. Therefore, the objective of this work is to study experimentally the transport of pollutants from diffuse sources, by testing several origin-points of pollution in relation to the outlet of an impervious surface, as well as testing suspended and dissolved pollutants, represented by particles of fine sand and sodium chloride, respectively. The experimental setup consists of a rainfall simulator placed over a rectangular acrylic impervious surface with 8,40 m², divided into four regions, where fine sand and sodium chloride are placed. The results showed higher peak mass discharges for the transport of dissolved material, as well as a shorter time to peak, when compared to the transport of pollutants in suspension. The first-flush effect was observed in all the regions for the transport of sodium chloride, while the transport of fine sand led to this effect only in the regions closest to the outlet of the surface. The similarity in the behaviour of the transport of suspended and dissolved pollutants in the regions closer to the outlet, shows the dependence of these processes from the energy of runoff, which in this experiments was enough to drag the particles placed in the impervious surface.

Keywords: Simulated rainfall. Rainfall-runoff process. Pollutant transport. Physical modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do ciclo hidrológico.....	17
Figura 2 – Evolução da proporção da população urbana, por região, no Brasil.....	20
Figura 3 – Representação esquemática de um hidrograma gerado após um evento de precipitação.....	21
Figura 4 – Hidrogramas gerados para a mesma precipitação em duas bacias de mesmas dimensões e com diferentes usos do solo.....	22
Figura 5 – Simulador de chuvas portátil desenvolvido para aplicação em estudos de campo.....	28
Figura 6 – Aparato experimental utilizado em estudos de erosão hídrica.....	29
Figura 7 – Montagem experimental do simulador de chuvas e superfície com sedimentos utilizada no desenvolvimento da pesquisa.....	29
Figura 8 – Superfície do telhado montada sobre suporte em formato de tesoura com altura ajustável.....	31
Figura 9 – Montagem experimental utilizada no desenvolvimento da pesquisa para estudo do processo chuva-escoamento.....	31
Figura 10 – Aparato experimental: simulador de chuvas, superfície impermeável e coletores do escoamento.....	32
Figura 11 – Configuração experimental utilizada em laboratório para a coleta do deflúvio e da massas de material em suspensão e dissolvido transportas pela superfície.....	34
Figura 12 – Amostragem da disposição de coletores na superfície acrílica impermeável para a captação da lâmina d'água precipitada.....	35
Figura 13 – Divisão em plano da superfície acrílica impermeável em quatro posições de avaliação (P1, P2, P3 e P4).....	36
Figura 14 – Curva de calibração da relação entre condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e concentração de sólidos totais dissolvidos ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).....	38
Figura 15 – Distribuição espacial da precipitação na superfície total de escoamento..	39
Figura 16 – Intensidade média de precipitação (I_{med}), coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e distribuição espacial da precipitação para cada posição do modelo experimental (P1 a P4).....	40
Figura 17 – Hidrogramas médios (cinco repetições) observados dos experimentos sem adição de partículas (P0) e com adição de partículas (P1, P2, P3 e	

P4); as barras de erro referem-se aos desvios-padrão dos volumes escoados para cada momento de quantificação do escoamento.....	41
Figura 18 – Particulogramas médios observados para as quatro posições da superfície impermeável (P1, P2, P3 e P4); as barras de erro referem-se aos desvios-padrão da descarga mássica de areia fina no momento de quantificação do escoamento superficial.....	42
Figura 19 – Polutogramas médios observados para as quatro posições estudadas (P1, P2, P3 e P4).....	43
Figura 20 – Comparação entre hidrogramas, particulogramas e polutogramas para as posições P1, P2, P3 e P4.....	45
Figura 21 – Relação entre o tempo de pico dos particulogramas (T_{sus}) e polutogramas (T_{dis}) e o tempo de pico dos hidrogramas (T_h) para as quatro posições estudadas (P1, P2, P3 e P4).....	46
Figura 22 – Relação entre a quantidade de material transportado em suspensão (à esquerda) e dissolvido (à direita) e o volume escoado superficialmente....	48
Figura A. 1: Simulador de chuvas sobre superfície impermeável composto por três bocais do tipo cone completo.....	56
Figura A. 2: Bocal <i>FullJet 1/4HH-14W</i> , <i>Spraying Systems Co.</i>	56
Figura A. 3: Curva característica do bocal tipo cone completo <i>FullJet 1/4HH-14W</i>	56
Figura A. 4: Pesagem do recipiente plástico utilizado na captação da lâmina precipitada durante os ensaios de calibração do simulador de chuvas.....	56
Figura A. 5: Reservatório de coleta de escoamento superficial e tudo com diâmetro reduzido e perfurado para posicionamento do sensor de nível.....	57
Figura A. 6: Amostras coletadas durante os ensaios de transporte de material em suspensão (areia fina).....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - <i>FullJet 1/4HH-14W, Spraying System Co</i>	33
Tabela 2 – Valores do pico da descarga mássica de areia fina e os respectivos tempos de pico.....	43
Tabela 3 – Valores do pico da descarga mássica de cloreto de sódio e os respectivos tempos de pico.....	44
Tabela 4 – Valores dos tempos de pico (s), descarga mássica máxima de areia fina e cloreto de sódio ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$) encontrados para os hidrogramas, particulogramas e polutogramas para as posições avaliadas (P1, P2, P3 e P4).....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivo específico	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	OS RECURSOS HÍDRICOS	16
2.2	URBANIZAÇÃO E IMPACTOS AMBIENTAIS	19
2.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E POLUENTES.....	23
2.4	MODELAGEM FÍSICA E SIMULADORES DE CHUVA	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	SIMULADOR DE CHUVA	32
3.2	SUPERFÍCIE IMPERMEÁVEL.....	33
3.3	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO	334
3.4	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	35
3.4.1	Ensaio com material em suspensão.....	37
3.4.2	Ensaio com material dissolvido.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO	39
4.2	INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA FONTE POLUIDORA NO COMPORTAMENTO DOS HIDROGRAMAS	41
4.3	TRANSPORTE DE MATERIAL EM SUSPENSÃO (PARTICULOGRAMAS). 42	
4.4	TRANSPORTE DE MATERIAL DISSOLVIDO (POLUTOGRAMAS).....	43
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE PARTICULOGRAMAS E POLUTOGRAMAS	44
5	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS	51

APÊNDICE A – Configuração experimental, materiais e métodos56

1 INTRODUÇÃO

Neste tópico é apresentada a justificativa para elaboração do trabalho e seus objetivos, abordando as mudanças adversas causadas ao meio ambiente devido ao crescimento da taxa de urbanização e desenvolvimento das atividades antrópicas.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

Não só no Brasil mas, em todo mundo, tem-se verificado um acelerado processo de urbanização e crescimento das cidades. Estima-se que, em 1800, apenas 2% da população mundial ocupavam áreas urbanizadas; porém, a partir das recentes transformações, é previsto que, em 2050, este percentual se aproxime dos 70% (UNS, 2008).

Essa urbanização vem ocorrendo de forma desordenada, desencadeando alterações nas etapas do ciclo hidrológico, tais como, o aumento do escoamento superficial, a diminuição do tempo de concentração nas bacias urbanas e da recarga de águas subterrâneas. Os eventos de alta intensidade de precipitação quando ocorridos em áreas urbanizadas têm suas consequências intensificadas – por exemplo, eventos de cheias urbanas - podendo causar perdas econômicas, sociais e ambientais.

Além dessas mudanças no comportamento chuva-escoamento, a comunidade científica tem-se preocupado também com a geração e transporte de sedimentos e poluentes acumulados em superfícies impermeáveis, seja por processos de deposição atmosférica ou também de desgaste da pavimentação e disposição de resíduos sólidos. A caracterização do sedimento desagregado do solo e transportado pelas forças erosivas das gotas de chuva e pela ação do escoamento superficial sobre o solo é importante para compreender o processo de acumulação de poluentes, já que grande quantidade desses materiais encontrados no escoamento superficial é transportada em associação aos sedimentos. Esses materiais podem ainda estar

presentes em suspensão ou na forma dissolvida, o que irá determinar a facilidade de ser movido pela superfície e transportado pela rede de drenagem, bem como as técnicas para sua remoção. Dessa forma, a poluição difusa decorrente da drenagem urbana consiste em uma importante fonte de poluição dos corpos hídricos de bacias urbanas, devido ao fato de que quando associados aos eventos de precipitação, os poluentes são carregados para as águas de superfície, podendo trazer alterações químicas, físicas e biológicas ao meio ambiente.

Esse carregamento se torna complexo diante do uso e ocupação do solo, da deposição de sedimentos e resíduos sólidos e também da dinâmica de transporte pelo escoamento. Com isso, na busca por respostas rápidas e de baixo custo acerca da qualidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, dos corpos hídricos receptores, o desenvolvimento de estudos multidisciplinares relacionados à hidrologia urbana tem aumentado nas últimas décadas, e. g., Brezonik e Stadelmann (2002), Cea *et al.* (2010) e Wu *et al.* (2012), a fim de ligar a qualidade à quantidade dos recursos hídricos.

É nessa perspectiva que se justifica a introdução de modelos físicos, os quais são capazes de estimar eventos pluviométricos, deflúvios e também cargas de poluentes transportadas pelo escoamento superficial. A modelagem física é, assim, um exemplo de ferramenta de apoio à criação de modelos simuladores de processos hidrológicos, que têm fundamental importância no estabelecimento de estratégias de controle, buscando a melhoria da qualidade do meio ambiente. Novas tecnologias têm sido estudadas em laboratório para o fornecimento de dados com maior nível de precisão, tanto espacial como temporal, com vistas a suprir possíveis falhas nos dados ou também as limitações da experimentação em campo. A exemplo dessas ferramentas tem-se a aplicação dos simuladores de chuva em laboratório os quais, segundo Bowyer-Bower and Burt (1989) e Clarke and Walsh (2007), têm sua utilização justificada pelos seus benefícios, como podem ser citados: o controle das condições ambientais, das características da precipitação e reprodutibilidade dos experimentos em pequenos intervalos de tempo.

Diante disto, este trabalho propõe a análise do processo chuva-escoamento e do transporte de poluentes originados de uma fonte de poluição difusa, sob a aplicação de chuva simulada em um modelo físico com superfície impermeável.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho são divididos em dois tópicos: o objetivo geral e o objetivo específico.

1.2.1 Objetivo geral

Caracterizar a resposta hidrológica de uma superfície impermeável e o transporte de material em suspensão e dissolvido sob condições de chuva simulada.

1.2.2 Objetivo específico

Analisar e comparar o comportamento do transporte de material em suspensão e dissolvido tendo como fator de variação a localização da fonte de poluição na superfície impermeável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo foi dividido em quatro partes para melhor organização do texto, sendo: a) Os recursos hídricos; b) Urbanização e impactos ambientais; c) Transporte de sedimentos e poluentes; d) Modelagem física do escoamento superficial e simuladores de chuva. São apresentados os conceitos relacionados ao tema principal e, ao final do capítulo, apresentou-se o estado da arte acerca da modelagem física para os estudos relacionados ao processo chuva-escoamento.

2.1 OS RECURSOS HÍDRICOS

A água é o recurso natural encontrado em maior quantidade no planeta Terra, ocupando cerca de 70% de sua superfície (POLETO, 2014); não é um recurso infinito e, sim, um recurso natural reciclável, cuja movimentação ocorre através de um sistema fechado - chamado de ciclo hidrológico - como apresentado na Figura 1. Este ciclo é uma representação física que descreve o movimento e armazenamento de água entre a biosfera, atmosfera, litosfera e hidrosfera. Nele estão envolvidos uma série de processos físicos que dão origem ao movimento da água como, por exemplo, evaporação, condensação, precipitação e armazenamento. É dentro dessa perspectiva que a Hidrologia está envolvida - uma ciência que, por meio de uma abordagem interdisciplinar, estuda as propriedades e os processos que interferem na distribuição e ocorrência da água na natureza (MELLO; SILVA, 2013).

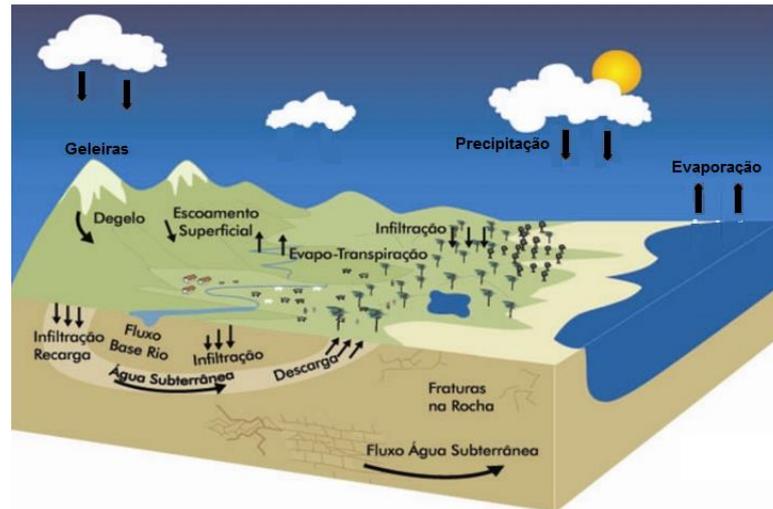


Figura 1 – Representação esquemática do ciclo hidrológico.
Fonte: MMA, 2015.

Iniciando o estudo desse ciclo pelo processo de evaporação, salienta-se que a energia solar é a responsável pelo aquecimento das águas que passam do estado líquido para o gasoso, sendo depende também da temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Além da evaporação das águas dos oceanos, rios, lagos e solos tem-se ainda a quantidade que é liberada pela atividade biológica das plantas por meio da respiração – a evapotranspiração. Devido a menor densidade em comparação ao ar, o vapor d’água formado acende na atmosfera e, na medida em que se encontra com temperaturas mais baixas, inicia-se o processo de transformação para o estado líquido (condensação), dando origem às nuvens.

A seguir, para que ocorra o processo de precipitação é necessário que as gotículas de água formadoras das nuvens atinjam tamanho suficiente para vencer as forças de sustentação e caiam em direção à superfície solo na forma de chuva (SOARES; RENNÓ, 2003) – forma mais comum de precipitação, porém, existem outros tipos, os quais sejam a neve e o granizo. Assim, neste caminho até o solo, parte da água precipitada volta para a atmosfera na forma de vapor, antes mesmo de atingir a superfície. Outra parte desta água pode ter o seu movimento interrompido pela presença de cobertura vegetal, depressões e poços, ficando retida e disponível para a evaporação ou infiltração no solo – processo intitulado de interceptação. Ainda, uma outra quantidade se dispersa por meio da infiltração, ou seja, da penetração de água no solo, movendo-se através das camadas mediante a ação da força gravitacional, dependendo de fatores interferentes como as características do material

da cobertura, o tipo de vegetação, a umidade do solo, as condições de uso e topografia do solo. Também existe o processo de percolação, no qual a água infiltrada atinge as camadas mais profundas, podendo entrar na circulação subterrânea e contribuir para a alimentação de reservatórios. Dependendo do tipo de formação geológica, a água percolada pode voltar a superfície do solo ou então recarregar escoamento de rios e lagos em períodos de estiagem. Neste contexto, se a precipitação for superior à capacidade de acumulação na superfície do solo, o volume excedente precipitado é convertido em escoamento superficial; o mesmo acontece quando a precipitação atinge uma superfície impermeável (CASTRO *et al.*, 2013).

Assim, o escoamento em corpos d'água é o resultado de uma soma de parcelas, sejam elas o escoamento superficial, sub-superficial e o subterrâneo.

Em relação à qualidade, a água apresenta características naturais diferentes, uma vez que a sua composição pode ser influenciada diretamente pela circulação, percolação e armazenamento na superfície.

Dessa forma, em se tratando da escassez hídrica, é necessário atentar-se às questões não só quantitativas, mas também qualitativas. Em termos quantitativos, do total de água disponível na superfície da Terra, 97% compõem as águas salgadas e são inadequadas ao consumo; o restante compõe as águas doces, do qual apenas 0,3% se encontra disponível (MARANHÃO, 2007). No Brasil, existe uma disponibilidade abundante em relação aos recursos hídricos, mas, vale ressaltar que estes não se distribuem de maneira uniforme pelo território nacional – aproximadamente, 81% das reservas estão concentradas na região norte, a qual possui menos de 5% da população nacional; em contrapartida, a região sudeste - com maior índice de desenvolvimento - sofre com problemas relacionados à falta de planejamento e manejo adequado dos recursos hídricos, enfrentando problemas de poluição e escassez de água potável (MARINHO, 2007).

Nos últimos trinta anos, além do aumento da demanda que tem gerado muitos problemas de uso, houve um crescimento alarmante em relação à degradação da qualidade das águas dos corpos hídricos, devido à intensificação das atividades antrópicas como, por exemplo, industriais, agropecuárias (em termos mundiais, 70% da água é destinada a irrigação) e de mineração. Assim, mesmo em locais em que não há restrições de natureza quantitativa, a perda da qualidade dos recursos tem inviabilizado o seu uso para fins mais nobres - essa é a situação nos grandes centros

urbanos brasileiros exemplificada, em 2014, pela maior crise hídrica vivida pela região metropolitana de São Paulo desde 1930 (JACOBI; CIBIM e LEÃO, 2015).

Diante do cenário de recursos hídricos e devido aos elevados custos para tratamento e recuperação de corpos d'água, fica evidente a necessidade de serem elaborados projetos para a conservação dos recursos bem como a criação de normas legais, em âmbito municipal, estadual e/ou federal, tendo como metas a redução da demanda hídrica, a minimização de perdas e desperdícios, a utilização de práticas agrícolas econômicas, a preservação de mananciais e a redução dos níveis de poluição (TOMAZ, 2001). A exemplo disso tem-se a implantação da Lei Federal nº 9.433/97 (Lei das Águas), que trata os recursos hídricos como bens de domínio público, além de lhe atribuir valor econômico, pois quanto mais escasso forem, maior será seu valor. Essa lei estabelece entre seus instrumentos a outorga e a cobrança de direito de uso dos recursos hídricos, com a finalidade de conscientizar a sociedade de que a água não é um recurso natural ilimitado devendo-se, portanto, utilizá-la de forma racional, garantindo a sua disponibilidade quantitativa e qualitativa para a atual e as futuras gerações (BRASIL, 1997).

2.2 URBANIZAÇÃO E IMPACTOS AMBIENTAIS

Analisando o histórico da humanidade, constata-se que os homens se estabeleciam, desde as primeiras grandes civilizações, em locais com elevada disponibilidade hídrica, como aconteceu ao longo dos vales dos rios Nilo, Tigre e Eufrates (OLIVEIRA, 2010). Essa disponibilidade favorecia a irrigação das culturas, gerando uma quantidade suficiente de alimentos para abastecê-las. Com o desenvolvimento dessas civilizações, obras de engenharia foram sendo criadas para o melhor aproveitamento dos recursos como, por exemplo, aquedutos e fontes públicas de abastecimento. Essas civilizações foram se modificando e com elas também os ecossistemas naturais. O crescimento populacional acelerado e o processo de industrialização fizeram com que a população do campo migrasse para as áreas urbanas, de forma a intensificar o crescimento das cidades, as quais,

segundo Moraes (2014), são a maior forma de interferência do homem no ambiente natural, podendo desencadear problemas sociais, econômicos e ambientais.

A distribuição geográfica da população tem passado por grandes mudanças nos últimos 50 anos e irá continuar experimentar outras transformações durante as próximas décadas. Segundo a UNS (2011), em 2010, 3,5 bilhões de pessoas viviam em áreas urbanas e, em 2050, a previsão é de que este número chegue aos 5,2 bilhões. O Brasil também segue essa tendência, tendo atingido a porcentagem de 84,9% de população urbana no ano de 2010, como pode ser visto na Figura 2.

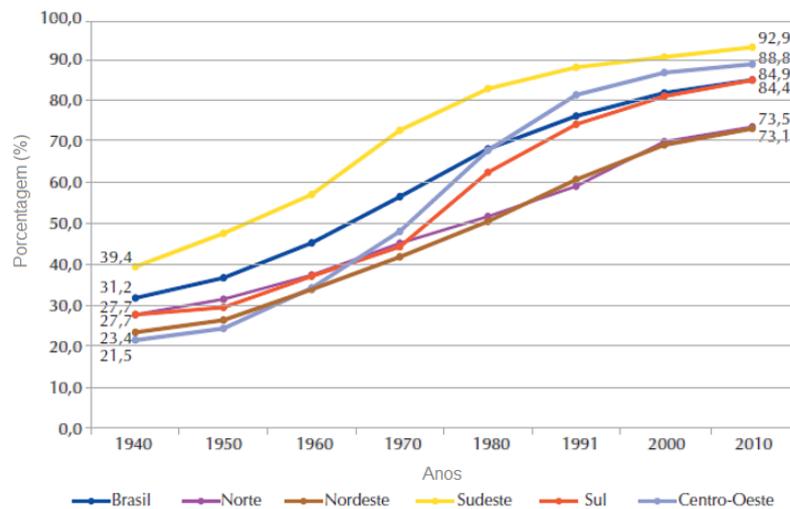


Figura 2 – Evolução da proporção da população urbana, por região, no Brasil.
Fonte: FIGUEIREDO, 2016.

Apesar das inúmeras vantagens trazidas pelo processo de urbanização como a melhoria na economia, as oportunidades de emprego e a promoção do desenvolvimento sustentável, existem também problemas relacionados ao comprometimento dos compartimentos alterados pela intervenção antrópica, quais sejam o ar, a água, os sedimentos, os solos, além dos organismos vivos (GRIMM *et al*, 2008). No ambiente natural, uma das primeiras modificações para a implantação das cidades trata do desmatamento de grandes áreas com cobertura vegetal e, conseqüente, impermeabilização do solo, para dar origem a um ambiente antropizado, composto por hospitais, escolas, vias de acesso, parques industriais e etc (WENG, 2001).

Após um evento de precipitação, o escoamento superficial que atinge uma determinada seção de controle pode ser representado por hidrogramas, isto é, representações gráficas da vazão de um corpo hídrico ao longo do tempo, como mostrado na Figura 3.

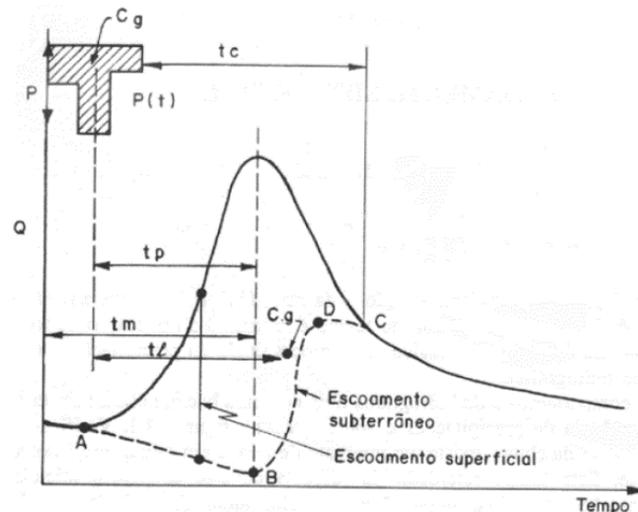


Figura 3 – Representação esquemática de um hidrograma gerado após um evento de precipitação. Fonte: TUCCI, 2004.

Na figura verifica-se que, após o início da precipitação, há um tempo de retardo (t_i – intervalo entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma) para o começo do escoamento superficial (ponto A). Isso se deve ao fato da interação de outros processos do ciclo hidrológico como a interceptação vegetal, acúmulo de água em vales e depressões e até mesmo devido ao tempo de resposta da bacia em avaliação. O tempo que leva para o hidrograma atingir o pico desde o início da precipitação é chamado de tempo de ascensão e o seu tempo de pico (t_p) é definido como intervalo entre o centro de massa da precipitação e o tempo de vazão máxima. Após atingir o tempo de pico e a vazão máxima, o tempo que leva para a precipitação do ponto mais distante se deslocar até a seção principal é chamado de tempo de concentração (t_c). No momento seguinte, a etapa que se inicia é a chamada recessão, ou seja, o tempo para que a vazão baixe até o ponto final do escoamento superficial, representado no gráfico por um ponto de inflexão (ponto C). A continuação da linha do gráfico representa o escoamento de base (TUCCI, 2004).

A forma dos hidrogramas depende de fatores como o relevo, cobertura vegetal, além da distribuição, duração e intensidade de precipitação sobre a bacia hidrográfica. A Figura 4 mostra a diferença de comportamento entre hidrogramas gerados para a mesma precipitação em bacias de mesmas dimensões, mas com usos do solo diferentes – uma rural e, outra, urbana.

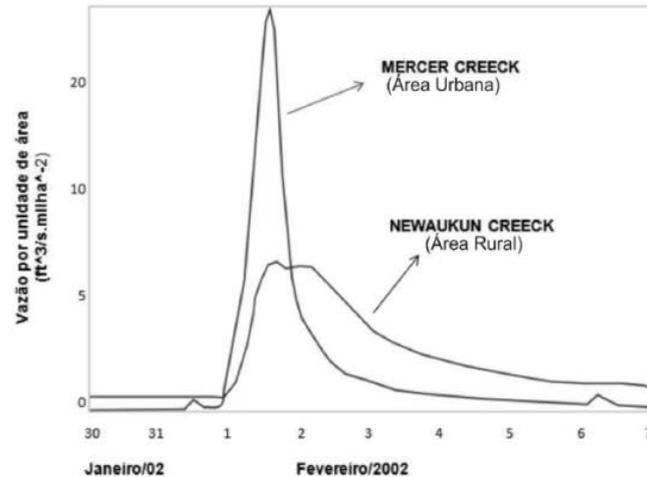


Figura 4 – Hidrogramas gerados para a mesma precipitação em duas bacias de mesmas dimensões e com diferentes usos do solo.

Fonte: ILHA, 2014.

Segundo Haase (2009), a modificação que merece maior destaque é o aumento da cobertura impermeável trazida pelo processo de crescimento das cidades, a qual afeta os cálculos de balanço hídrico pela redução do contato do solo natural com a água precipitada – as coberturas vegetais retardam o escoamento superficial, enquanto que as áreas impermeáveis favorecem o volume e a velocidade do escoamento (RIGHETTO, 1998). Assim, devido a esse selamento da superfície, alterações presentes nos hidrogramas podem ser exemplificadas pela diminuição do tempo de concentração da bacia, redução do tempo de pico da vazão e maiores valores de vazão máxima (LIU, 2015).

Como consequência dessas alterações no ambiente natural tem-se o aumento da intensidade e frequência de cheias urbanas. Em algumas cidades existe um conjunto de infraestrutura, dividido em microdrenagem e macrodrenagem, que tem a finalidade de coletar e transportar as águas pluviais que escoam superficialmente. Segundo Pinto e Pinheiro (2006), a microdrenagem é composta por estruturas (rede coletora, poços de visita, sarjetas e bocas de lobo) que conduzem as águas do escoamento para as galerias e canais urbanos, enquanto que, o sistema de macrodrenagem é constituído por fundos de vale e cursos d'água e se responsabilizam pelo escoamento final das águas pluviais. Todas essas águas são então encaminhadas para os corpos hídricos, que faz com o que o seu volume seja aumentado. O instante em que a capacidade máxima dos rios é atingida e o volume extravasa para as suas margens, alagando as áreas que o contornam, tem-se o que se caracteriza de inundação, fenômeno que pode trazer prejuízos econômicos, sociais

e ambientais. Segundo uma estimativa de 1983, os prejuízos médios com inundações nos Estados Unidos chegaram próximo a 7 bilhões de dólares anuais (NRC, 1993) e, no Brasil, uma pesquisa publicada pelo The International Disaster Database (EM-DAT), em 2014, mostrou que, no período de 1990 a 2013, as inundações foram o tipo de desastre natural com maior frequência e capaz de causar o maior número de mortos, tendo registrado uma média de 42 mortes por evento.

Na maioria das cidades, as áreas da planície de inundação ou também chamadas de áreas de várzea são ocupadas durante o processo de urbanização, colocando em risco a saúde e a sobrevivência da população residente nesta área. Dessa forma, a administração dos municípios são constantemente pressionados para aumentar a proteção dessa parcela da população, buscando soluções estruturais. Algumas dessas soluções como a canalização, além de necessitarem de altos investimentos, nem sempre garantem o resultado esperado, apenas transferem o problema para a jusante do rio. Em geral, o governo não está preparado de maneira técnica e financeira para planejar e arcar com os gastos desencadeados pelas inundações, uma vez que os recursos hídricos são tratados de maneira individual (energia elétrica, abastecimento urbano, tratamento de esgoto, etc), sem que haja uma interação entre esses setores. Alguns municípios estabelecem em seus planos diretores instruções adequadas para a preservação ambiental, porém, em muitos casos, não tratam sobre a prevenção contra a ocupação dos espaços vulneráveis às ocorrências de cheias urbanas.

2.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E POLUENTES

A devastação da cobertura original, o desenvolvimento de atividades agrícolas, a implantação de ferrovias e rodovias ao longo dos divisores de água possibilitaram a implantação das primeiras vilas as quais, posteriormente, se transformaram em cidades. A expansão e ocupação desordenada desses centros urbanos provocam prejuízos incalculáveis ao ecossistema natural, em consequência dos processos erosivos. Segundo Visch Filho (2008), uma estimativa feita pela Organização das Nações Unidas (ONU) calcula que o total de solos degradados no mundo é

aproximadamente dois bilhões de hectares, sendo o avanço da degradação igual a 20 milhões de hectares por ano.

Apesar desses processos ocorrerem de forma e intensidade diferentes em funções das características do solo (geologia, geomorfologia, pedologia, biota e condições climáticas), a erosão deixou de ser um processo inteiramente natural, passando a ser reconhecida como acelerada ou antrópica. Esse processo consiste na desagregação de partículas do solo e de rochas por meio do impacto das gotas de chuva e pelas forças de cisalhamento do escoamento superficial; no transporte desses materiais e, por fim, na sua sedimentação (SHI *et al.*, 2012). É considerado um processo modelador das paisagens geográficas, o qual pode ocorrer sob a ação do vento, das geleiras e da chuva. No território brasileiro, a erosão hídrica é o tipo mais relevante, podendo ser pluvial, fluvial, de superfície ou marinha.

Em áreas urbanas, as primeiras ocorrências registradas de erosões datam de cerca de 70 anos no oeste do estado de São Paulo, como consequência do processo de colonização, cultivo de café, algodão e amendoim e da instalação de núcleos urbanos e ferrovias (POLETO, 2008); além disso são resultado da ineficiência e das más condições do sistema de drenagem e das alterações nas condições hidrológicas em decorrência da impermeabilização do solo. A ocorrência desses processos está relacionada às questões de erodibilidade do solo e erosividade das chuvas. Fatores como a granulometria, a porosidade do solo e a presença de matéria orgânica interferem na resistência à desagregação e ao transporte de partículas do solo (erodibilidade), enquanto que, a topografia e o uso do solo alteram a habilidade das chuvas em provocar processos erosivos devido ao impacto das gotas de chuva sobre o solo, desprendendo as partículas e, posteriormente, transportando-as por meio do escoamento superficial (erosividade) (POLETO, 2014).

As partículas desprendidas do solo e carregadas pelo escoamento superficial são depositadas nas cotas mais baixas do terreno quando há a redução da velocidade do escoamento. Esse processo tem como consequências o aumento da turbidez dos corpos hídricos e o assoreamento de redes de drenagem e fundos de vale, reduzindo a capacidade de escoamento de condutos, rios e lagos urbanos e favorecendo à ocorrência de enchentes, além do transporte de substâncias poluentes agregadas aos sedimentos.

Com isso, segundo Ledford and Lautz (2015), a urbanização não só é capaz de causar a redução da conexão solo-água, alterando as condições hidrológicas da

bacia, mas também promove a degradação da qualidade das águas de corpos receptores.

Tang *et al.* (2013) aponta em sua pesquisa que o escoamento superficial é considerado uma fonte de poluição difusa, pelo fato de lavar as superfícies impermeáveis dos centros urbanos (superfícies de edificações e estradas), as quais acumulam grande quantidade de sedimentos e poluentes durante os períodos de estiagem, desenvolvimento de atividades antrópicas, deposição atmosférica e processos de ressuspensão e, posteriormente, transportar esses materiais até os corpos hídricos. Esse lançamento de poluentes, ao contrário das cargas pontuais, é um fenômeno aleatório, cuja intensidade depende de fatores meteorológicos e do tipo de uso e ocupação do solo.

Dessa forma, estudos acerca da geração, transporte e consequências de sedimentos e poluentes têm sido estudados largamente nos últimos anos devido ao surgimento de novos materiais. Há 20 anos, a preocupação era com sedimentos, matéria orgânica e metais, hoje, poluentes emergentes como, por exemplo, sintéticos, hormônios e pesticidas têm despertado grande interesse da comunidade científica (ALI *et al.*, 2016). Esses materiais podem aparecer de várias formas, dentre as quais estão dissolvido e particulado, o que irá influenciar na facilidade de transporte pela rede de coleta. Segundo Vaze e Chiew (2003), grande quantidade de poluentes presentes no escoamento superficial são transportados em associação aos sedimentos, de forma que o estudo acerca da granulometria dos sedimentos é importante para o entendimento do processo de acumulação de poluentes em função da geração de sedimentos na bacia.

Prever a concentração e a carga de poluentes no escoamento superficial tem sido um desafio para a hidrologia nos últimos anos, como afirma Fletcher *et al.* (2013) em sua pesquisa. Os estudos desenvolvidos sobre este tema têm tentado relacionar a concentração desses contaminantes com as condições de uso do solo e fenômenos hidrológicos e hidráulicos, considerando a variabilidade temporal e espacial, na tentativa de explicar a presença desses componentes no ambiente e prever os impactos ambientais ao meio ambiente, assegurando a proteção e conservação dos corpos hídricos.

Em superfícies impermeáveis, Dotto (2006), descreveu o processo de acúmulo de sedimentos/poluentes através de um equilíbrio dinâmico, o qual alterna entre a acumulação e o carreamento do material acumulado na superfície. Dessa forma, a

carga de poluentes acumulada na superfície é lavada mais rapidamente no início do evento de precipitação, tendendo, no decorrer do processo, ao esgotamento e diminuição das concentrações.

Contudo, a qualidade das águas, atualmente, tem sido um aspecto considerável em diversos setores da sociedade, devido a indissociabilidade entre a qualidade e a quantidade de água, ou seja, mesmo que exista grande quantidade de água disponível, se a sua qualidade estiver comprometida, o uso deste recurso é inviabilizado, agravando o problema da escassez. Assim, um conjunto de normas estabelece uma lista de parâmetros para as características químicas, físicas e biológicas apresentadas pelos recursos hídricos, definindo valores máximos para essas variáveis, a fim de direcionar para o uso adequado, sejam estes uso doméstico, abastecimento humano, lazer, entre outros – Resolução CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005).

2.4 MODELAGEM FÍSICA E SIMULADORES DE CHUVA

Por volta do ano de 1930, pesquisadores norte-americanos desenvolveram os primeiros simuladores de chuva para a modelagem física e aplicação em estudos de erosão do solo. Mais tarde, viram a possibilidade de utilização também para a reprodução de partes do ciclo hidrológico de forma experimental (CERDÀ, 1999).

Desde então, modelos físicos de bacia hidrográfica e simuladores de chuva têm sido utilizados com sucesso, em escala de laboratório, na investigação do comportamento do processo de chuva-escoamento e, mais recentemente, para estudos sobre a dinâmica e concentração de sedimentos e poluentes nas fases do escoamento superficial. A justificativa para aplicação dessas ferramentas se faz pelos benefícios, quais sejam, segundo Mutchler and Moldenhauer (1963) e Carvalho (2014), o controle das condições interferentes no processo (intensidade de precipitação e declividade do terreno, por exemplo), a possibilidade de repetição dos experimentos em pequenos intervalos de tempo, além do fornecimento de réplicas dos processos do ciclo hidrológico, quando o modelo é calibrado e validado para utilização.

Em consequência desses fatores, uma série de simuladores de chuva foram desenvolvidos adotando as mais diversas técnicas, tendo como fator de variação, por exemplo, os bocais formadores das gotas de chuva. A seguir, apresentam-se alguns experimentos realizados com a utilização dessas ferramentas.

Pesquisadores como Pall *et al.* (1983) e Neto *et al.* (1986) apresentaram em suas pesquisas a montagem e calibração de simuladores de chuva. No primeiro trabalho, o simulador de chuvas era composto por bocais com grandes ângulos de abertura e um disco rotativo para variação das aberturas; assim, os testes de calibração realizados mostraram que além da pressão do bocal e a velocidade angular do disco, a abertura angular do bocal apresentava maior influência sobre a intensidade de precipitação obtida. Além disso, constatou-se também que a pressão exercida pelo bocal afeta significativamente a uniformidade de distribuição da chuva simulada, bem como o tamanho dos coletores considerados na determinação do coeficiente de uniformidade. A pesquisa de Neto *et al.* (1986) contou com um simulador de chuvas de braços rotativos em duas séries com 15 e 30 bocais e variando-se as pressões de serviço, a fim de determinar a influência sobre a intensidade e distribuição da precipitação. A intensidade de precipitação desejada era igual a 60,0 e 120,0 mm·h⁻¹, respectivamente, para os dois bocais citados. A área de captação tinha dimensões iguais a 38,5 m² e 96 recipientes, utilizados como pluviômetros, foram distribuídos por toda superfície. A pressão de trabalho para atingir as intensidades desejadas foi igual a 50,0 kPa, sendo que com esses valores o Coeficiente de Uniformidade (CUC) atingido foi 94,0%.

Também foi avaliado por Montebeller *et al.* (2001) a influência do diâmetro das gotas de chuva, intensidade e a uniformidade de distribuição da precipitação variando-se o tipo de bocal e a pressão de serviço. A melhor combinação obtida foi para bocais do tipo *VeeJet* 80.150, pressão igual a 27,2 kPa, o que levou a uma precipitação de 160,0 mm·h⁻¹ e CUC igual a 80,0%.

Sobrinho *et al.* (2002) desenvolveu um simulador de chuvas a fim de atingir características de precipitação como, por exemplo, diâmetro e energia cinética das gotas semelhantes àquelas apresentadas pela precipitação natural. Para a escolha dos bocais a serem utilizados, realizaram-se testes com esses posicionados a uma altura de 2,0 m e submetidos à pressões de 142,2, 28,4 e 35,6 kPa. Para a distribuição da precipitação, aplicaram-se chuvas durante três minutos e 25 recipientes foram distribuídos em 1,0 m² para a coleta da lâmina precipitada. Os resultados mostraram

que, quando o simulador foi equipado com dois bocais *VeeJet* 80.100, as gotas produzidas apresentaram diâmetro médio e velocidade de impacto semelhante às condições naturais para intensidades de precipitação até $40,0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, sendo que, para intensidades maiores, recomenda-se os bocais *VeeJet* 80.150. Além disso, o aparato experimental permitiu a aplicação de chuvas contínuas para intensidades entre $19,0$ e $308,0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, apresentando valores de CUC entre 82,0 e 87,0%.

Humphry *et al.* (2002) desenvolveram um simulador de chuvas portátil que atendessem as características desejadas como, por exemplo, diâmetro de gotas, velocidade e energia cinética, intensidade e uniformidade da precipitação. O simulador foi desenvolvido para a aplicação de chuvas em uma área de captação de dimensões igual a $1,5 \times 2,0 \text{ m}$, sendo a pressão de serviço no bocal igual a $30,0 \text{ kPa}$, como visto na Figura 5. Utilizando-se o bocal do tipo *FullJet* HH50WSQ, centralizado e distante de $3,0 \text{ m}$ da superfície, a intensidade de precipitação obtida foi igual a $70,0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ e um CUC igual a 93,0%, sendo suficiente para atingir as características esperadas. Os pesquisadores constataram que, além de fornecer valores comparáveis aqueles obtidos por simuladores não portáteis, a facilidade de operação e o baixo custo para a montagem do aparato experimental, viabilizam sua utilização.

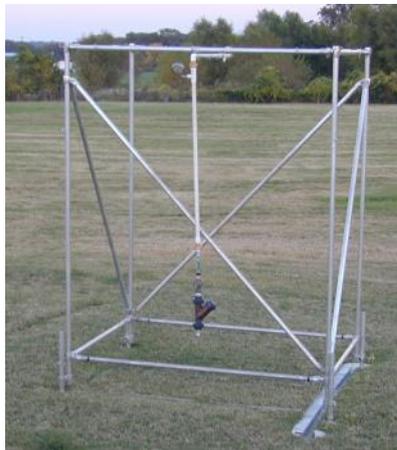


Figura 5 – Simulador de chuvas portátil desenvolvido para aplicação em estudos de campo.
Fonte: HUMPHRY *et al.*, 2002.

Utilizando o simulador de chuva mostrado na Figura 6, de Lima *et al.* (2008) realizaram a caracterização granulométrica dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial, avaliando a influência do movimento dos eventos de precipitação (à montante e à jusante) e a declividade do canal principal no tamanho do grão transportado. Os resultados obtidos no estudo mostraram que a direção e a velocidade das precipitações influenciam fortemente no processo de erosão hídrica,

sendo que a perda de solos é maior quando as precipitações se movem em direção à jusante, bem como aumentam os valores de volume escoado superficialmente e, conseqüentemente, as forças erosivas, fazendo com que materiais com granulometrias mais grosseiras sejam transportados.

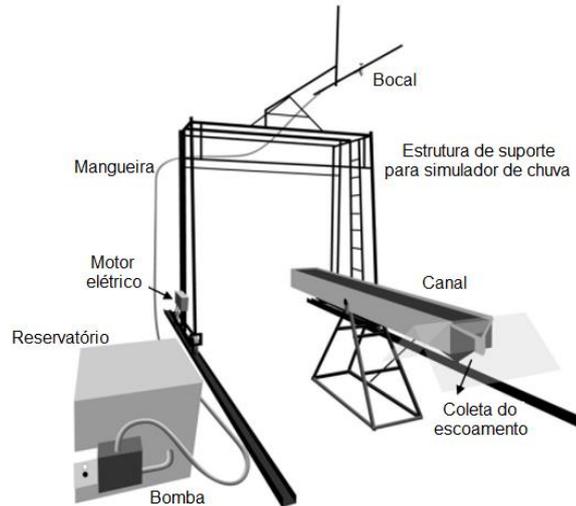


Figura 6 – Aparato experimental utilizado em estudos de erosão hídrica.
Fonte: Adaptado de LIMA *et al.*, 2008.

Aksoy *et al.* (2012) avaliaram a reprodutibilidade do comportamento do transporte de sedimentos utilizando-se de um simulador de chuvas em escala laboratorial, apresentado na Figura 7. O material analisado foi disposto sobre uma calha variando-se a inclinação em até 20,0% de maneira bidimensional, sendo a coleta do escoamento realizada em dois pontos. O diâmetro das gotas de chuva obtidas pelos bocais do tipo *VeeJet* variou entre $2,2 \times 10^{-3}$ e $3,1 \times 10^{-3}$ m, enquanto a intensidade de precipitação, entre 45,0 e 105,0 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Os resultados apresentaram um CUC entre 82,0 e 89,0%, de forma que os hidrogramas e sedimentogramas foram comparáveis aqueles obtidos em condições naturais.

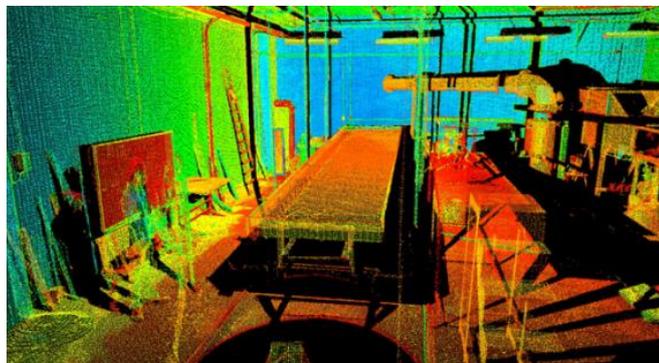


Figura 7 – Montagem experimental do simulador de chuvas e superfície com sedimentos utilizada no desenvolvimento da pesquisa.
Fonte: AKSOY *et al.*, 2012.

Levando em consideração o fato de que sedimentos podem ser fontes transportadoras de nutrientes e contaminantes do solo para corpos hídricos, Shi *et al.* (2012), estudou o processo de erosão do solo, considerando as mudanças temporais ocorridas na distribuição do tamanho de partículas para chuva simulada durante uma hora, a uma taxa de $90,0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, variando-se a inclinação do canal em 10° , 15° , 20° e 25° . Os resultados mostraram que, conforme há um aumento da declividade do terreno, a concentração de sedimentos na saída do escoamento também aumenta. Além disso, no início do processo de escoamento, existia uma maior concentração de sedimentos finos, enquanto que, ao final, de sedimentos eram mais grosseiros. Tal fato permite concluir que diferentes mecanismos de transportes atuam no processo de erosão, quais sejam a saltação - mais predominante no início dos experimentos, transportando partículas mais finas – e o rolamento, o qual é capaz de movimentar as partículas mais grossas, devido ao aumento do potencial de escoamento superficial.

Nesta mesma perspectiva, Egodawatta *et al.* (2009) investigaram o processo de acúmulo e lavagem de matéria particulada em superfícies de telhados residenciais por meio da aplicação de chuva simulada. Pequenos blocos ($3,0 \text{ m}^2$) de aço e de concreto foram utilizados como réplica das superfícies reais de telhado e colocados sobre um suporte com altura ajustável, como visto na Figura 8. A área de estudo era predominantemente residencial, sendo que parte do local não apresentava pavimentação. O simulador de chuvas equipados com três bocais do tipo *VeeJet* 80.100 foram posicionados a $2,4 \text{ m}$ acima do nível do solo. As amostras de acúmulo foram coletadas variando-se os dias secos antecedentes, com a hipótese de que o acúmulo variava conforme os dias, e também a intensidade de precipitação. Os resultados obtidos mostraram que a maior concentração de partículas foi notada durante o período inicial do escoamento e que partículas muito finas aderem à superfície do telhado, sendo mobilizadas apenas durante os eventos de alta intensidade.

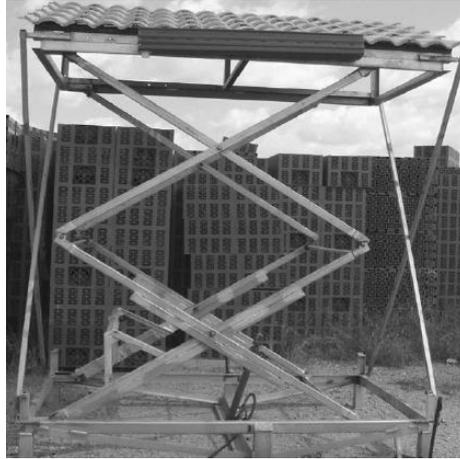


Figura 8 – Superfície do telhado montada sobre suporte em formato de tesoura com altura ajustável. Fonte: EGODAWATTA *et al.*, 2009.

Silveira *et al.* (2016) analisaram o comportamento do modelo da onda cinemática na simulação do escoamento superficial em superfícies de telhado. O simulador de chuvas composto por um bocal do tipo *FullJet* HH-14W- ¼, posicionado na região central do telhado e distante de 2,2 m da superfície, foi utilizado para a aplicação de chuvas em uma superfície de telhado cerâmico com área de 4,2 m², como visto na Figura 9. Os experimentos foram conduzidos considerando três diferentes inclinações. Os resultados mostraram que a declividade do telhado influencia no comportamento dos hidrogramas gerados e da onda cinemática de baseia é adequado para a análise, uma vez que os valores simulados, quando comparados aos experimentais, apresentam resultados aproximados.

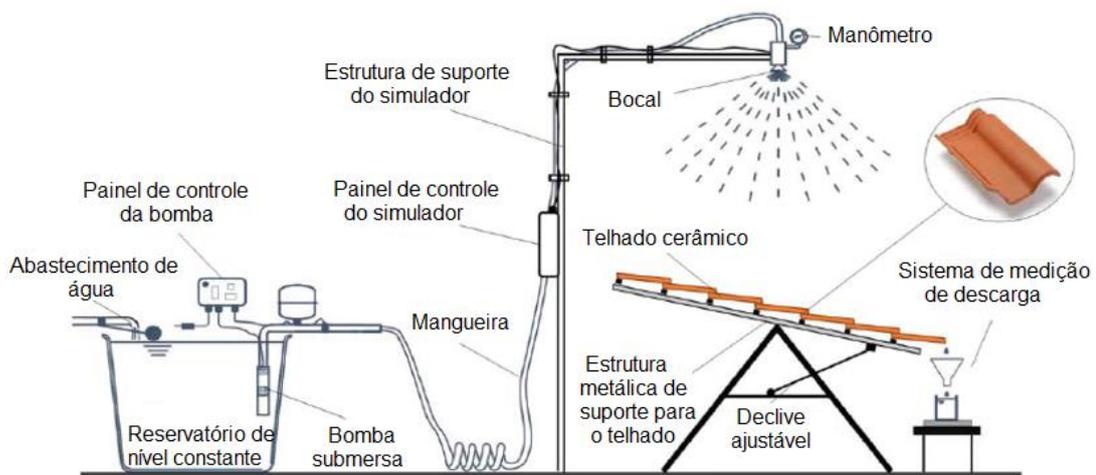


Figura 9 – Montagem experimental utilizada no desenvolvimento da pesquisa para estudo do processo chuva-escoamento. Fonte: Adaptado de SILVEIRA *et al.*, 2016.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O aparato experimental utilizado neste trabalho foi adaptado de Reis (2015). A montagem consiste em um simulador de chuva sobre superfície acrílica impermeável.

3.1 SIMULADOR DE CHUVA

Na Figura 10 é apresentado o esquema da configuração experimental.

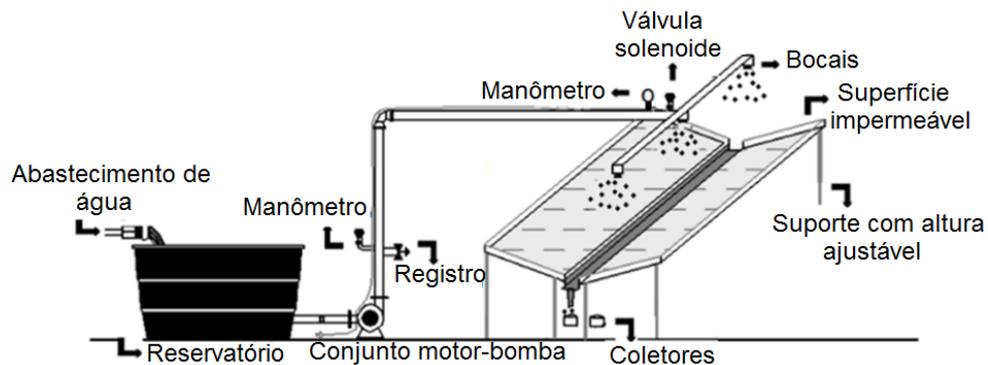


Figura 10 - Aparato experimental: simulador de chuvas, superfície impermeável e coletores do escoamento.

Fonte: Da autora.

O simulador de chuva utilizado é composto por três bocais do tipo cone completo (*FullJet 1/4HH-14W, Spraying System Co.*). Os bocais foram instalados em uma tubulação com 0,0125 m de diâmetro, confeccionada em cloreto de polivinil (PVC) e posicionada no sentido longitudinal do modelo experimental. Foram instalados um bocal na posição central, distante na vertical de 2,5 m em relação à superfície impermeável e, outros dois, nas extremidades da tubulação, distantes entre si de 1,3 m.

A válvula solenoide instalada próxima aos bocais foi utilizada para a abertura e fechamento automático do sistema hidráulico. Na tubulação de recalque da bomba também foi instalado um manômetro digital, o qual permitiu o monitoramento da pressão de trabalho, garantindo que os experimentos fossem realizados sob as

mesmas condições de pressão e vazão. Durante os ensaios, a pressão na tubulação medida pelo manômetro foi igual a 160 kPa com os três bocais em operação.

Para a alimentação e pressurização da tubulação e os bocais foi utilizado um conjunto motor-bomba (potência de 745,7 W), o qual foi conectado a um reservatório por uma tubulação de sucção, também confeccionada em PVC e com 0,025 m de diâmetro. O reservatório utilizado para o abastecimento tem capacidade igual a 310 litros e, durante os experimentos, o nível d'água em seu interior foi mantido sempre constante.

Os bocais utilizados nos ensaios apresentam as características mostradas na Tabela 1, fornecidas pelo fabricante. Com essa especificação e também por meio da curva característica que relaciona a vazão e a pressão do bocal, determinou-se a vazão do simulador de chuva sendo igual a $0,1 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ para cada um dos bocais.

Tabela 1 – *FullJet 1/4HH-14W, Spraying System Co.*

Capacidade (W)	Diâmetro do orifício (mm)	Diâmetro máximo de passagem livre (mm)	Pressão (bar)	Vazão ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)
12,0	3,2	1,3	1,5	6,5

Fonte: Catálogo *Spraying System Co.*, p.B19.

3.2 SUPERFÍCIE IMPERMEÁVEL

A superfície impermeável foi confeccionada em polimetil-metacrilado PPMA (acrílico) com 0,006 m de espessura e corresponde a duas placas planas com dimensões de 4,0 m × 1,0 m cada uma. A escolha do material justifica-se pela simplicidade de uso e absorção nula, minimizando as perdas do volume de água precipitado. As placas foram montadas sobre um suporte metálico em formato de “V”, ou seja, possuem declive longitudinal e transversal ajustável.

Na região central da superfície impermeável foi posicionada uma calha metálica com 0,09 m de profundidade e 0,1 m de largura, para captar e direcionar o escoamento gerado nas vertentes das placas acrílicas e também na própria calha até a saída do modelo físico (exutório da superfície impermeável). Considerando as dimensões das

duas placas (8,0 m²) e da calha (0,1 m × 4,0 m), a área total da superfície de escoamento é igual a 8,4 m².

A coleta e a quantificação do escoamento e do material em suspensão e dissolvido transportados pelo escoamento superficial foram realizadas na seção final da calha metálica, como apresentado na Figura 11.



Figura 11 – Configuração experimental utilizada em laboratório para a coleta do deflúvio e da massas de material em suspensão e dissolvido transportas pela superfície.

Fonte: Da autora.

3.3 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO

Após a montagem do aparato experimental, a etapa seguinte consistiu na caracterização da distribuição espacial da precipitação. Para isso, foram realizados três ensaios com aplicação de chuva durante 15 minutos (cada ensaio) sobre a superfície impermeável com declividade nula nos dois sentidos. Para quantificar a precipitação em cada ensaio, 200 coletores com área igual à 0,007 m² e massas conhecidas foram distribuídos de forma equidistante por toda a área de captação, como mostrado na Figura 12.

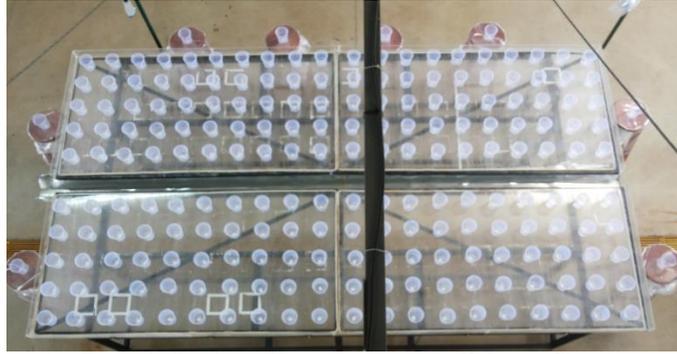


Figura 12 – Amostragem da disposição de coletores na superfície acrílica impermeável para a captação da lâmina d'água precipitada.

Fonte: Da autora.

Os valores das lâminas precipitadas em cada posição foram convertidos em intensidade média de precipitação, cuja uniformidade de distribuição foi expressa pelo CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (1941) - o qual foi calculado conforme a equação abaixo:

$$\text{CUC (\%)} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right) \times 100 \quad (1)$$

em que: x_i é a altura da lâmina precipitada nos recipientes, \bar{x} é a altura média das lâminas e n é o número de observações.

A intensidade média de precipitação foi calculada pelo somatório das intensidades de precipitação (I_{med}) de cada recipiente amostrado, conforme a equação a seguir:

$$I = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\overline{Vp}_i}{A \times t} \right) \quad (2)$$

em que: \overline{Vp}_i é a média dos volumes precipitados, A é a área de abertura dos recipientes e t é o tempo de duração da precipitação.

3.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho abrangeu a análise do transporte de poluentes difusos em um arranjo fatorial: localização da fonte de poluição em relação ao exutório da área de drenagem (4); forma de transporte: em suspensão - areia fina, e, dissolvido - cloreto de sódio (2), resultando, então, em oito combinações.

A disposição das posições de localização das fontes de poluentes estão apresentadas na Figura 13.

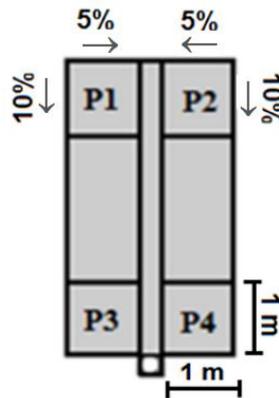


Figura 13 – Divisão em plano da superfície acrílica impermeável em quatro posições de avaliação (P1, P2, P3 e P4).

Fonte: Da autora.

Para as combinações estudadas foram realizadas cinco repetições em cada uma das posições (P1 a P4), a fim de garantir a repetibilidade dos resultados experimentais, perfazendo, assim, um total de 40 ensaios considerando os dois tipos de poluentes analisados. Nestes ensaios, as declividades da superfície foram ajustadas para 10% no sentido longitudinal e 5% no sentido transversal.

Para assegurar a semelhança da condição inicial em cada ensaio, procedeu-se a aplicação de chuva simulada durante dois minutos e, seguindo-se um intervalo de cinco minutos, para o início dos ensaios. Neste intervalo foi realizada a distribuição do material (areia fina ou cloreto de sódio) através de um peneiramento uniforme sobre a superfície impermeável de cada uma das quatro posições analisadas.

Cada ensaio teve a aplicação de chuva simulada com três minutos de duração, sendo que o deflúvio foi quantificado no exutório da calha metálica. Vale referir também que, nos ensaios, as medições se iniciaram no momento em que um filete contínuo de água começou a escoar no exutório da calha e, o final do escoamento superficial foi considerado no instante em que esse filete deixou de ser contínuo e passou a ser intermitente.

3.4.1 Ensaios com material em suspensão

Foram distribuídos uniformemente, na superfície de cada posição avaliada (P1 a P4), a quantidade de 20,0 g de areia fina (areia quartzosa industrial AQ 90-500 SE, Mineração Jundu) com granulometria entre 0,106 e 0,425 mm para estudar o transporte de poluentes em suspensão.

O deflúvio gerado pela precipitação foi quantificado em dez instantes distintos através de coletores plásticos, sendo os pontos médios dos tempos de coleta iguais a 13; 15,5; 21; 26; 31; 105,5; 145,5; 185,5; 223; 263; 313 s - de forma que os instantes compreendessem a ascensão, o tempo de pico e a recessão do hidrograma do escoamento superficial.

Após a coleta das dez amostras do escoamento superficial, os recipientes passaram pelo processo de secagem da superfície externa e, posteriormente, a pesagem, para que então a massa de água coletada fosse transformada em volume escoado e, então, vazão por intervalo de tempo. Feito isso, as amostras passaram pelo processo de filtração à vácuo, utilizando filtros com abertura de poros entre 4,0 e 12,0 μm (Unifil®) e, a seguir, foram submetidas à secagem a uma temperatura de 100°C durante um período de 24 horas para a determinação da massa de material em suspensão transportada pelo escoamento superficial.

Com as informações do deflúvio – volume escoado e vazão – construíram-se os hidrogramas e, com a massa de material transportada, os particulogramas.

3.4.2 Ensaios com material dissolvido

Para a condução dos experimentos, 10,0 g de cloreto de sódio foram utilizados para estudar o transporte de poluentes na forma dissolvida, os quais foram distribuídos uniformemente por peneiramento na superfície de cada posição avaliada (P1 a P4).

Um sensor de condutividade elétrica (Vernier Conductivity Probe), localizado no final da calha metálica, permitiu mensurar a condutividade elétrica no escoamento

superficial a cada segundo. Para a conversão desses valores em concentração de sólidos totais dissolvidos foi realizado um teste de calibração cujo resultado é apresentado na Figura 14. Para este teste utilizou-se um litro de água amostrado do reservatório de alimentação do simulador de chuva e, a cada um miligrama de cloreto de sódio adicionado, mediu-se a condutividade elétrica (C).

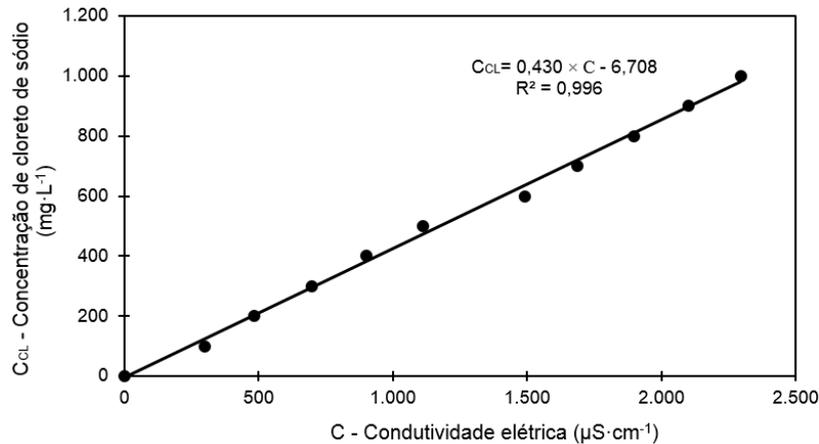


Figura 14 – Curva de calibração da relação entre condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e concentração de sólidos totais dissolvidos ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Fonte: Da autora.

Para o cálculo da relação entre condutividade elétrica e a concentração de sólidos totais dissolvidos nos experimentos, primeiramente, foi descontado o valor da condutividade elétrica já presente na água do reservatório ($50,3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) - já que este valor se refere a condutividade média já existente na água utilizada nos ensaios - para que então fosse obtida apenas a condutividade induzida pela concentração de cloreto de sódio (C_{CL}). Posteriormente, pela equação apresentada na Figura 14, foi feita a conversão dos valores de condutividade em concentração de sólidos. Cada um desses valores de concentração foi multiplicado pela vazão correspondente obtendo, assim, a massa de material dissolvido transportada pelo escoamento superficial. Com essas informações acerca da massa de material transportada no tempo foi possível a construção dos polutogramas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos durante os ensaios experimentais. Apresentou-se o mapa da uniformidade da precipitação, os hidrogramas e a análise do comportamento do transporte de massa de material dissolvido e em suspensão.

4.1 DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO

A Figura 15 mostra a uniformidade de distribuição espacial da precipitação obtida pelo software SURFER, o qual utiliza método de *krigagem* para interpolação de dados – é um método de regressão que considera que pontos próximos tender a ter valores mais parecidos e, à medida que se afastam, distanciam-se dos valores, já que a correlação espacial pode deixar de existir. A intensidade média de precipitação obtida foi igual $69,0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ e, o CUC, 77,0 %.

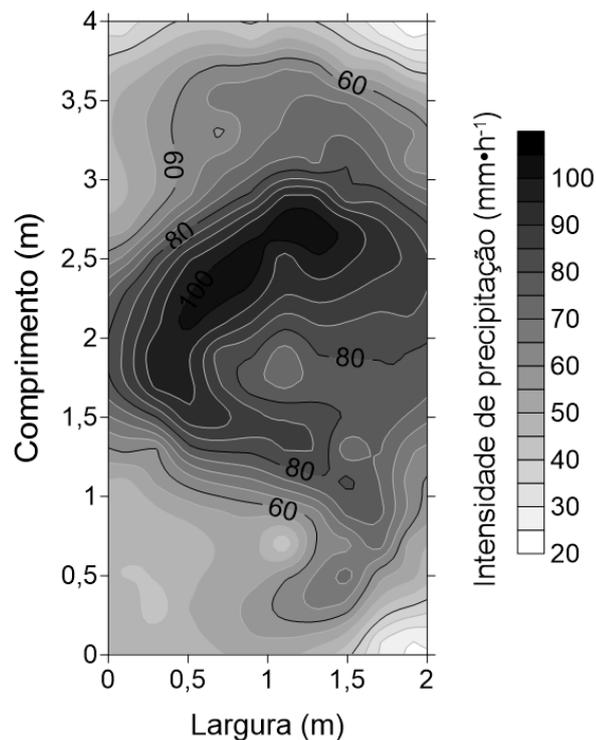


Figura 15 – Distribuição espacial da precipitação na superfície total de escoamento.
Fonte: Da autora.

Pela Figura 15 percebe-se que a região central apresenta maiores valores de intensidade de precipitação quando comparados àqueles observados nas extremidades, o que acontece devido a sobreposição dos cones formados pelos bocais do simulador de chuvas.

Para um maior detalhamento dos possíveis fatores interferentes no processo de escoamento e de transporte de material em suspensão e dissolvido, a intensidade média de precipitação e a distribuição espacial foram calculadas também para cada uma das posições a serem analisadas – P1 a P4, observadas na Figura 16. Segundo Mantovani (2001), os valores de CUC obtidos (acima de 70%) são considerados razoáveis, estando dentro dos valores aceitáveis para que se considere uma distribuição espacial uniforme de precipitação.

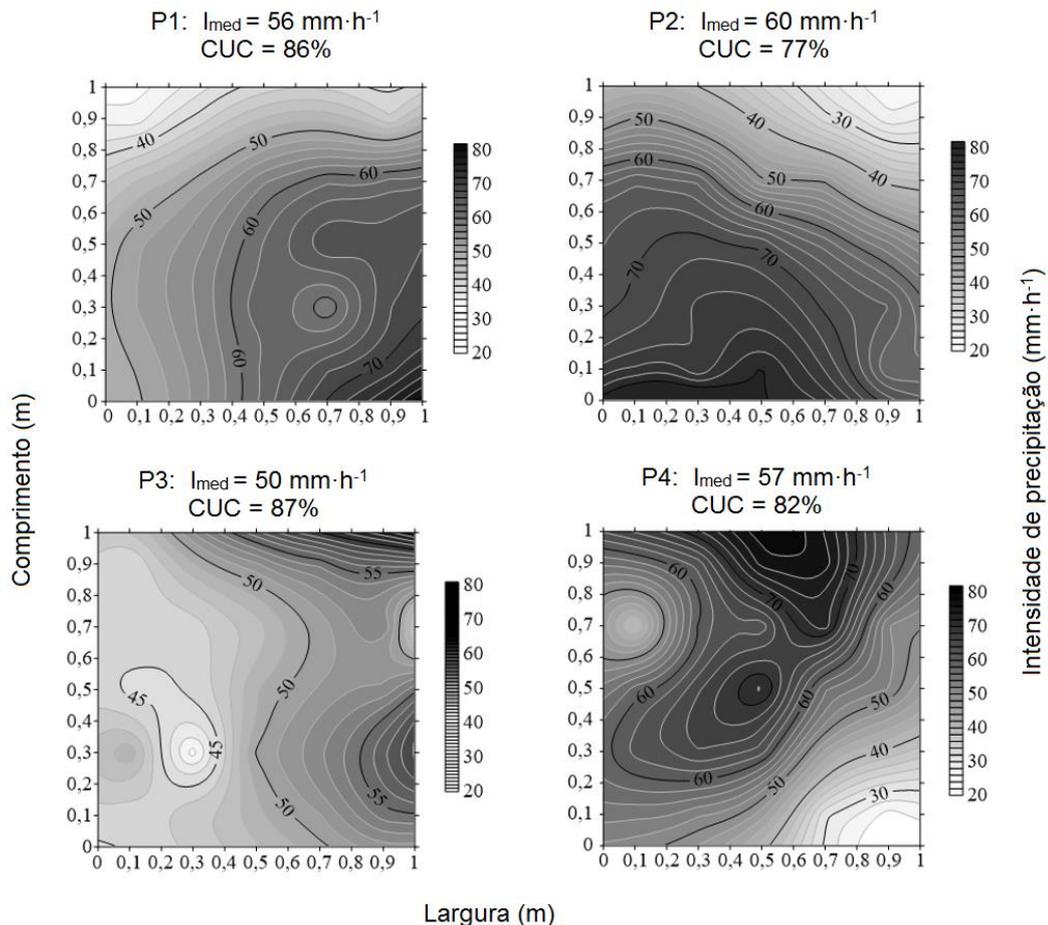


Figura 16 – Intensidade média de precipitação (I_{med}), coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e distribuição espacial da precipitação para cada posição do modelo experimental (P1 a P4).
Fonte: Da autora.

4.2 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA FONTE POLUIDORA NO COMPORTAMENTO DOS HIDROGRAMAS

Considerando as quatro posições estudadas (P1 a P4) foram levantados os hidrogramas médios de cinco repetições nos experimentos com a fonte difusa de material particulado bem como para os hidrogramas médios para o experimento sem adição de areia fina (P0), com os desvios-padrão para cada momento de quantificação do deflúvio conforme mostra a Figura 17. Cada ensaio contou com a aplicação de chuva durante três minutos.

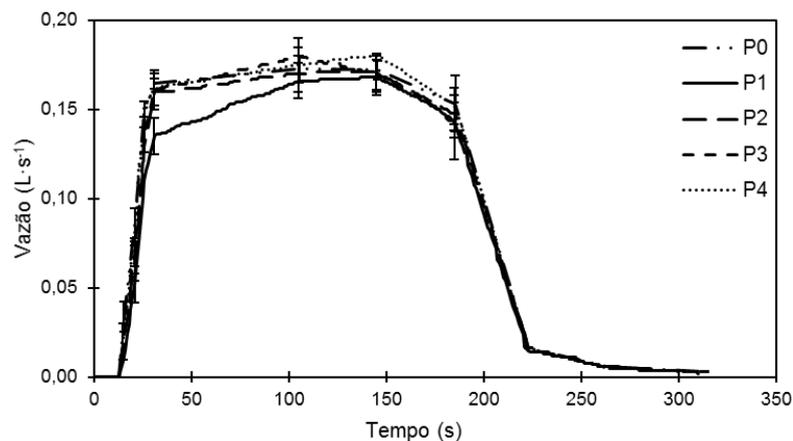


Figura 17 – Hidrogramas médios (cinco repetições) observados dos experimentos sem adição de partículas (P0) e com adição de partículas (P1, P2, P3 e P4); as barras de erro referem-se aos desvios-padrão dos volumes escoados para cada momento de quantificação do escoamento.

Fonte: Da autora.

O volume escoado teórico foi obtido através da multiplicação da intensidade de precipitação pela área total da superfície de escoamento e pelo tempo de duração da precipitação, resultando em 30,4 L. Experimentalmente, o volume escoado foi obtido pela integração de cada hidrograma e apresentou como resultado $31,54 \pm 0,92$ L; $28,89 \pm 0,92$ L; $30,63 \pm 0,92$ L; $31,07 \pm 0,92$ L e $31,76 \pm 0,92$ L para as posições P0, P1, P2, P3 e P4, respectivamente. Considerando as distintas posições da fonte de poluição, os resultados obtidos de volume escoado evidenciam que a presença de areia fina na superfície impermeável, representando o poluente na forma em suspensão, não interferiu no escoamento superficial gerado em decorrência da aplicação da precipitação. Também, as vazões de pico obtidas foram iguais a $0,18 \pm 0,01$ L·s⁻¹; $0,17 \pm 0,01$ L·s⁻¹; $0,17 \pm 0,01$ L·s⁻¹; $0,18 \pm 0,01$ L·s⁻¹ e $0,18 \pm 0,01$ L·s⁻¹ para

P0, P1, P2, P3 e P4, respectivamente, não apresentando, no teste de análise de variância, diferenças estatísticas significativas entre si com 95% de confiança.

Vale ressaltar que, devido à presença de um patamar nos hidrogramas observados, o tempo para atingir a vazão de pico foi considerado igual a 31,0 segundos para todos os ensaios, já que a partir deste instante as vazões são caracterizadas pelo patamar de equilíbrio.

4.3 TRANSPORTE DE MATERIAL EM SUSPENSÃO (PARTICULOGRAMAS)

Na Figura 18 estão apresentados os particulogramas médios (descarga mássica de areia fina x tempo) para as posições estudadas (P1 a P4).

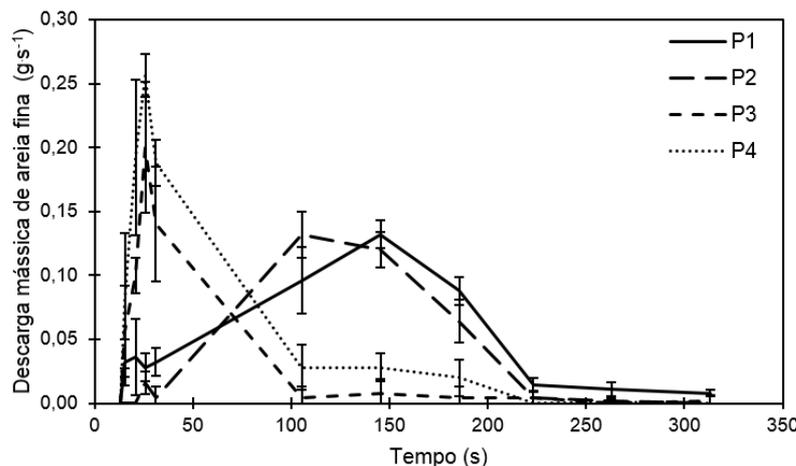


Figura 18 – Particulogramas médios observados para as quatro posições da superfície impermeável (P1, P2, P3 e P4); as barras de erro referem-se aos desvios-padrão da descarga mássica de areia fina no momento de quantificação do escoamento superficial.

Fonte: Da autora.

Os resultados obtidos nestes ensaios sinalizam a influência localização da fonte de poluentes em suspensão não só no tempo em que ocorre o pico do transporte de material, mas também no valor do pico da descarga mássica de partículas, o que pode ser visto na Tabela 2. Os valores de pico da descarga mássica é aproximadamente o dobro para as posições mais próximas do exutório (P3 e P4), quando comparados aos valores das posições mais distantes (P1 e P2). Além disso, verifica-se que, o instante em que o transporte de areia atinge seu valor máximo é superior a quatro vezes para as posições mais distantes do exutório.

Tabela 2 – Valores do pico da descarga mássica de areia fina e os respectivos tempos de pico.

Posições	Valor de pico da descarga mássica de areia fina ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)	Tempo de pico da descarga mássica de areia fina (s)
P1	$0,13 \pm 0,01$	$137,50 \pm 15,70$
P2	$0,13 \pm 0,01$	105,50*
P3	$0,20 \pm 0,04$	26,00*
P4	$0,26 \pm 0,01$	$24,00 \pm 2,70$

*Os valores dos desvios-padrão referentes ao tempo de pico da descarga mássica de areia fina é menor que o valor de discretização.

Fonte: Da autora.

4.4 TRANSPORTE DE MATERIAL DISSOLVIDO (POLUTOGRAMAS)

Na Figura 19 estão apresentados os polutogramas médios (descarga mássica de cloreto de sódio x tempo) para as posições P1, P2, P3 e P4. Dela observa-se a diferença na forma dos gráficos quando comparados as quatro posições; P3 e P4 apresentam picos de descarga mássica mais pronunciados, enquanto que, P1 e P2 são caracterizadas por um patamar de equilíbrio.

Por convenção, considerou-se o instante em que ocorre o pico da descarga mássica como o início do patamar para as posições P1 e P2. Dessa forma, observa-se que há um atraso no tempo de pico de P1 e P2 quando comparados os valores obtidos em P3 e P4.

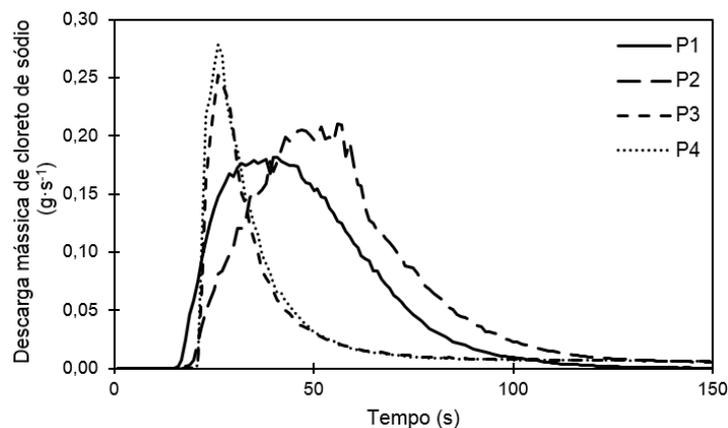


Figura 19 – Polutogramas médios observados para as quatro posições estudadas (P1, P2, P3 e P4).
Fonte: Da autora.

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados obtidos para o pico de descarga mássica de cloreto de sódio e os respectivos tempos de pico. Nota-se que há uma diferença não expectável no comportamento dos polutogramas para P1 e P2, já que ambos estão localizados à mesma distância em relação à saída da superfície de escoamento. Tal fato pode ser explicado pela diferença da intensidade e da distribuição espacial da precipitação nestas posições (ver Figura 16). Na posição P1, a intensidade de precipitação ($56 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) é menor do que aquela encontrada em P2 ($60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$), porém a distribuição espacial da precipitação em P1 é mais uniforme.

Tabela 3 – Valores do pico da descarga mássica de cloreto de sódio e os respectivos tempos de pico.

Posições	Valor de pico da descarga	Tempo de pico da descarga
	mássica de cloreto de sódio ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)	mássica de cloreto de sódio (s)
P1	$0,18 \pm 0,02$	$39,40 \pm 4,70$
P2	$0,21 \pm 0,02$	$50,30 \pm 1,79$
P3	$0,26 \pm 0,02$	$26,40 \pm 1,20$
P4	$0,27 \pm 0,02$	$26,20 \pm 2,00$

Fonte: Da autora.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE PARTICULOGRAMAS E POLUTOGRAMAS

Na Figura 20 estão apresentados os hidrogramas, particulogramas e polutogramas para as posições P1, P2, P3 e P4.

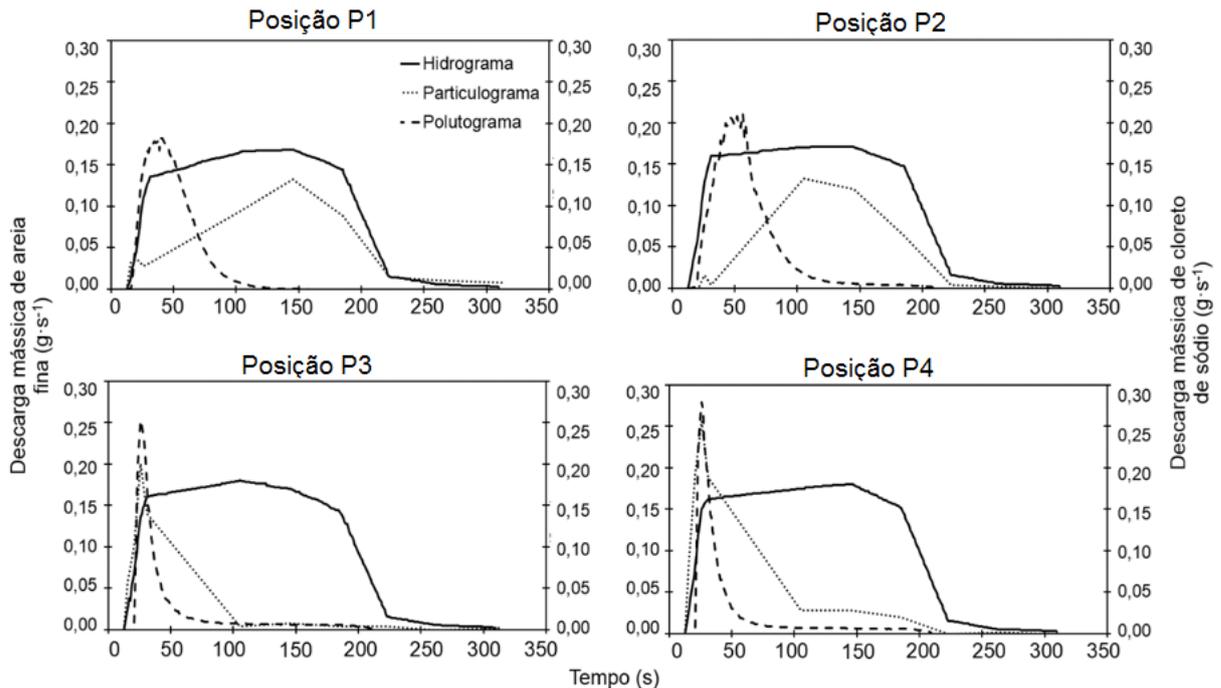


Figura 20 – Comparação entre hidrogramas, particulogramas e polutogramas para as posições P1, P2, P3 e P4.

Fonte: Da autora.

Para as posições P1 e P2, observa-se que o transporte de material em suspensão é mais lento do que o transporte de material dissolvido, o que explica a maior diferença entre os valores do pico de descarga mássica em relação a P3 e P4; contudo, a velocidade de transporte tanto do material em suspensão quanto do material dissolvido foram semelhantes para P3 e P4. Tal fato sinaliza que o transporte de poluentes em suspensão é dependente da energia do escoamento superficial, o qual neste estudo, é variável e crescente ao longo da calha coletora devido ao regime variado do escoamento.

Nota-se também que nas posições P3 e P4 houve um adiantamento do tempo de pico em relação à P1 e P2 para ambos os transportes. Estes resultados podem ser explicados: a) pela distância do centro de massa de P3 e P4 ao exutório (0,7 m) ser menor do que a distância de P1 e P2 (3,5 m) e, b) nas posições P1 e P2, os poluentes estão sujeitos, principalmente, ao efeito da precipitação, enquanto que, nas posições P3 e P4, além da precipitação, os poluentes sofrem o efeito da altura da lâmina do escoamento. Assim, a combinação desses fatores faz com que os poluentes dispostos nas posições mais próximas ao exutório sejam mais rapidamente transportados, resultando em valores de pico de descarga mássica mais pronunciados (maior concentração das partículas de areia fina e cloreto de sódio no escoamento).

Na Figura 21 estão apresentadas as relações entre os tempos de pico dos particulogramas (T_{sus}) e dos polutogramas (T_{dis}) com o tempo de pico dos hidrogramas (T_h). Nos particulogramas, os tempos de pico foram definidos no momento em que foi alcançado o valor máximo da descarga mássica de areia fina, enquanto que, nos polutogramas, quando a concentração de sólidos totais dissolvidos atingiu o valor do patamar.

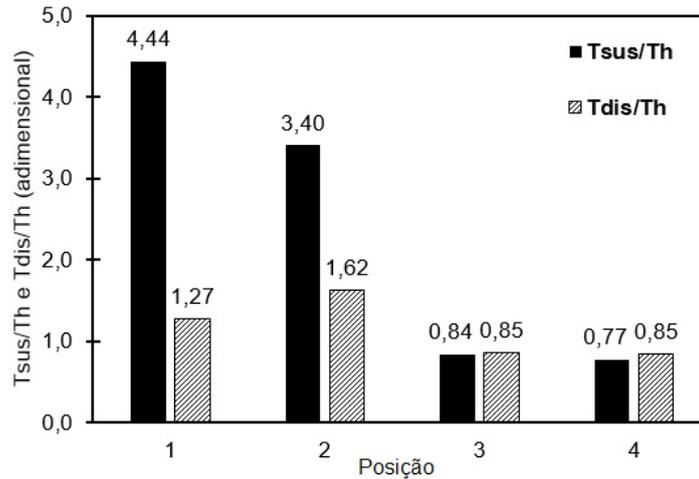


Figura 21 – Relação entre o tempo de pico dos particulogramas (T_{sus}) e polutogramas (T_{dis}) e o tempo de pico dos hidrogramas (T_h) para as quatro posições estudadas (P1, P2, P3 e P4).

Fonte: Da autora.

Os valores médios dos tempos de pico dos particulogramas, polutogramas e hidrogramas, assim como as descargas mássicas máximas dos poluentes estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores dos tempos de pico (s), descarga mássica máxima de areia fina e cloreto de sódio ($g \cdot s^{-1}$) encontrados para os hidrogramas, particulogramas e polutogramas para as posições avaliadas (P1, P2, P3 e P4).

Posição	Tempo de pico dos hidrogramas (s)	Tempo de pico dos particulogramas (s)	Tempo de pico dos polutogramas (s)	Descarga máxima de areia ($g \cdot s^{-1}$)	Descarga máxima de cloreto de sódio ($g \cdot s^{-1}$)
1	31,0	137,5 ± 15,70	39,4 ± 4,70	0,13 ± 0,01	0,18 ± 0,02
2	31,0	105,5	50,3 ± 1,79	0,13 ± 0,01	0,21 ± 0,02
3	31,0	26,0	26,4 ± 1,20	0,20 ± 0,04	0,26 ± 0,02
4	31,0	24,0 ± 2,70	26,2 ± 2,00	0,26 ± 0,01	0,27 ± 0,02

Fonte: Da autora.

Observa-se a partir dos resultados apresentados na Figura 21 e na Tabela 4 que a relação T_{sus}/T_h diminui com as partículas de areia fina se aproximando do

exutório, assim como, a relação T_{dis}/T_h diminui à medida que as partículas de cloreto de sódio são dispostas nas posições mais próximas do exutório (P3 e P4).

Para P1 e P2, a diferença entre o transporte de areia fina e o cloreto de sódio é evidente, pois a relação T_{sus}/T_h é igual a 4,44 e 3,40, respectivamente, enquanto que, T_{dis}/T_h , 1,27 e 1,62. Nestas posições o transporte de cloreto de sódio é muito mais rápido quando comparado ao comportamento do transporte de areia fina.

Para as posições mais próximas ao exutório, P3 e P4, essa diferença diminui sendo T_{sus}/T_h igual a 0,84 e 0,77, respectivamente e, T_{dis}/T_h , 0,85 e 0,85. Por análise de variância com 95% de confiança, os resultados obtidos para o transporte de material em suspensão e dissolvido apresentaram diferenças estatísticas significativas para P1 e P2, enquanto que, para as posições P3 e P4, os transportes de poluentes difusos em suspensão e dissolvidos podem ser considerados estatisticamente iguais. Tais resultados mostram novamente que, quando as fontes de poluição estão localizadas próximas a saída da superfície de escoamento, o transporte de areia fina e de cloreto de sódio possuem características semelhantes.

Na Figura 22 está apresentada a relação entre a fração da massa de poluente transportada para cada fração do volume escoado superficialmente. A massa acumulada normalizada M^* é a relação entre a massa transportada acumulada até determinado instante e a massa total transportada, enquanto que, V^* representa o volume normalizado, ou seja, a relação entre o volume escoado acumulado até determinado instante e o volume total escoado. Para a quantificação da massa de material transportada foi utilizado o conceito de *Mass First Flush* (MFF), a qual pode ser calculada em qualquer ponto da curva dividindo-se a massa acumulada normalizada das partículas transportada pelo escoamento acumulado normalizado ($MFF = \frac{M^*}{V^*}$). Por definição, a *MFF* é igual a zero no início do evento de precipitação e sempre igual a um no final. Os valores superiores a um indicam que o material é lavado mais rapidamente do que o escoamento, indicando a existência de um primeiro efeito de descarga.

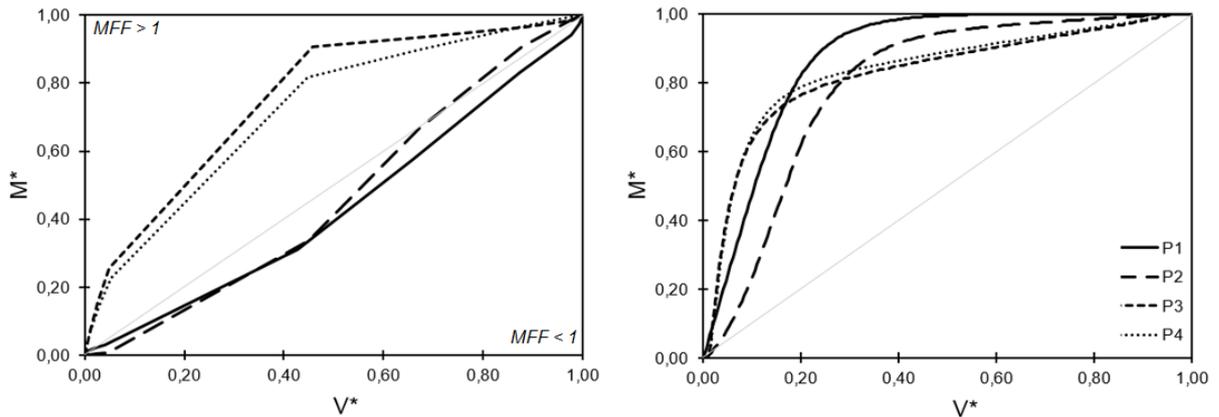


Figura 22 – Relação entre a quantidade de material transportado em suspensão (à esquerda) e dissolvido (à direita) e o volume escoado superficialmente.

Fonte: Da autora.

Na Figura 24 observa-se que o transporte de material em suspensão é diferente para as posições mais próximas e mais distantes do exutório. Para P1 e P2, o transporte de areia fina é igual a $MFF < 1$ (abaixo da curva de 45°), enquanto que, P3 e P4, $MFF > 1$ (acima da curva de 45°), sinalizando o efeito do *first flush* nestas últimas. Já para o material dissolvido, o comportamento do transporte apresentou-se uniforme independentemente da posição da fonte de poluição. Para o transporte de material dissolvido observa-se que, por exemplo, para 20% do escoamento superficial ocorrido, 70 a 80% da massa de cloreto de sódio disposta na superfície impermeável já passou pelo exutório do modelo experimental ($MFF \sim 4$).

5 CONCLUSÕES

Desde a revolução industrial, as cidades têm se tornado o centro das relações econômicas, sociais e ambientais. O crescimento populacional e o acelerado processo de urbanização desencadearam (e ainda desencadeiam) uma vasta quantidade de problemas, incluindo àqueles relacionados ao meio ambiente como, por exemplo, é o caso da poluição. As alterações nas etapas do ciclo hidrológico, a degradação da qualidade dos corpos hídricos e a emissão de poluentes tóxicos na atmosfera são os principais desafios a serem enfrentados para a garantia da qualidade de vida das cidades e também da preservação do meio natural.

Em áreas urbanas, a poluição difusa é gerada pelo escoamento superficial e é devido ao arraste de sedimentos e poluentes depositados na superfície da bacia. Dessa forma, o processo inicia-se com a lavagem dos poluentes atmosféricos pela precipitação, procedendo-se o escoamento superficial o qual carrega grande quantidade de material e transporta-os até o corpo hídrico receptor. Assim, considerando a variabilidade temporal e espacial dos eventos de precipitação, o monitoramento do escoamento bem como do seu potencial poluidor constituem os principais problemas dos estudos de hidrologia urbana nas últimas décadas.

Neste trabalho apresentou-se o estudo experimental do transporte de poluentes em suspensão e dissolvidos, representados pela areia fina e o cloreto de sódio, originados de possíveis focos de poluição, tendo como fator de variação a localização da fonte de poluição em relação ao exutório da superfície impermeável e a forma dos poluentes em suspensão e dissolvidos, sob condições de chuva simulada.

A análise dos resultados procedeu-se a partir dos valores médios obtidos de cinco experimentos para cada posição estudada, concluindo que existem diferenças significativas entre o transporte de poluentes em suspensão e dissolvidos através do escoamento superficial, tais como:

- a) A disposição de areia fina na superfície impermeável não interferiu na forma dos hidrogramas, no que diz respeito ao volume escoado e a vazão de pico, considerando as distintas localizações da fonte de poluição difusa (P1, P2, P3, P4);
- b) A massa de material em suspensão recuperada não ultrapassa os 50% da massa disposta considerando cada uma das posições, enquanto que, a massa recuperada de material dissolvido é superior a 90% em todos os ensaios. Esses

resultados mostram a dependência da energia do escoamento para o transporte de areia fina;

c) Para as posições mais próximas ao exutório (P3 e P4), o instante em que ocorre o pico do transporte de poluentes é o mesmo tanto para o material em suspensão quanto para o material dissolvido, evidenciando a semelhança no comportamento;

d) O transporte de material dissolvido é mais rápido que o transporte de material em suspensão quando a fonte de poluição está mais afastada do exutório da superfície;

e) O efeito do *first flush* é verificado durante todo o escoamento independentemente da localização da fonte difusa de poluição de material dissolvido.

Assim, os resultados sinalizam a importância do tema abordado para o estudo sobre a gestão de águas urbanas, a fim de encontrar soluções acerca do tratamento adequado para os possíveis impactos ambientais que podem decorrer da localização de atividades com potencial poluidor em relação à rede de drenagem.

Como sugestão de trabalhos futuros tem-se a variação do tipo de poluentes da localização das fonte de poluição, da declividade da superfície, do tamanho da área de superfície do escoamento, além das variáveis de precipitação como, por exemplo, a intensidade de precipitação e a duração do evento.

REFERÊNCIAS

- AKSOY, H.; UNAL, N. E.; COKGOR, S.; GEDIKLI, A.; YOON, J.; KOCA, K.; INCI, S. B.; ERIS, E. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. **Catena**, v. 98, p. 63-72, 2012.
- ALI, S. A.; BONHOMME, C.; CHEBBO, G. Evaluation of the performance and the predictive capacity of build-up and wash-off models on different temporal scales. **Water**, v. 8, n. 312, 2016.
- BOWYER-BOWER, T.A.S.; BURT, T.P. Rainfall simulators for investigating soil response to rainfall. **Soil technology**, v. 2, n. 1, p.1–16, 1989.
- BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política nacional de recursos Hídricos, cria o Sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição federal, e altera o artigo 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.HTM>. Acesso em: 01 nov. 2016.
- _____. Conselho nacional do meio ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.** Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2016.
- BREZONIK P.; STADELMANN T. H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA. **Water research**, v. 36, n. 7, p. 1743-1757, 2002.
- CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. da; MARQUES, D. da M. Avaliação da evolução do comportamento quantitativo de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial. **Revista brasileira de recursos hídricos**, v. 18, n. 1, 2013.
- Carvalho, S. C. P. **Rainfall: measurements, variability and laboratory simulations.** 2014. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.
- CEA L.; GARRIDO, M.; PUERTAS, J. Experimental validation of two-dimensional depth-averaged models for forecasting rainfall–runoff from precipitation data in urban areas. **Journal of hydrology**, v. 382 (1-4), p. 88–102, 2010.
- CERDÀ, A. Simuladores de lluvia y su aplicación a la geomorfología – Estado de la cuestión. **Cuadernos de investigación geográfica**, v. 25, p. 45-84, 1999.

CHRISTIANSEN, J. E. The uniformity of application of water by sprinkler systems. **Agricultural engineering**, v. 22, p. 89-92, 1941.

CLARKE, M.A.; WALSH, R.P.D. A portable rainfall simulator for field assessment of splash and slopewash in remote locations. **Earth surface processes and landforms**, v. 32, n. 13, p. 2052–2069, 2007.

de LIMA, J. L. M. P.; SOUZA, C. C. S.; SINGH, V. P. Granulometric characterization of sediments transported by surface runoff generated by moving storms. **Nonlinear processes in geophysics**, v. 15, p. 999–1011, 2008.

DOTTO, C.B.S.; PAIVA, E.M.C.D.; SILVA, L.F. Acumulação e caracterização dos sedimentos em superfícies asfálticas de área urbana em Santa Maria - RS. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 7, 2006, Santa Maria. **Sedimentos: o desafio da multidisciplinaridade**. Porto Alegre: ABRH, 2006.

EGODAWATTA, P.; THOMAS, E.; GOONETILLEKE, A. Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces. **Science of the total environment**, v. 407, n. 6, p. 1834 – 1841, 2009.

EMERGENCY EVENTS DATABASE (EM-DAT). **The OFDA/CRED International disaster database**. Disponível em: <www.em-dat.net/>. Acesso em: 01 nov. 2016.

FIGUEIREDO, A. H. de (Org.). **Brasil: uma visão geográfica e ambiental no início do século XXI**. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de geografia, 2016.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. **Advances in water resources**, v. 51, p. 261-279, 2013.

GRIMM, N. B.; FAETH, S. H.; GOLUBIEWSKI, N. E.; REDMAN, C. L.; WU, J.; BAI, X.; BRIGGS, J. M. Global change and the ecology of cities. **Science**, n. 319, 2008.

HAASE, D. Effects of urbanisation on the water balance – A long-term trajectory. **Environmental impact assessment review**, v. 29, p. 211-219, 2009.

HUMPHRY, J. B.; DANIEL, T. C.; EDWARDS, D. R.; SHARPLEY, A. N. A portable rainfall simulator for plot-scale runoff studies. **American society of agricultural engineers**, v.18, n. 2, p. 199-204, 2002.

ILHA, R. **Diagnóstico hidrossedimentológico da bacia do Arroio Cadena – Santa Maria/RS**. 2014.139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

JACOBI, P. R.; CIBIM, J.; LEÃO, R. S. Crise hídrica na Macrometrópole paulista e respostas da sociedade civil. **Estudos avançados**, v. 29, n. 84, 2015.

LEDFOURD, S. H.; LAUTZ, L. K. Floodplain connection buffers seasonal changes in urban stream water quality. **Hydrological processes**, v. 29, n. 6, p. 1002-1016, 2015.

LIU, R., YANG, Z., SHEN, Z., YU, S., DING, X., WU, X., LIU, F. Estimating nonpoint source pollution in the Upper Yangtze River using the export coefficient model, remote sensing and geographical information system. **Journal of hydraulic engineering**, v. 135, p. 698-704, 2015.

MANTOVANI, E. C. **AVALIA: Programa de Avaliação da irrigação por aspersão e localizada**. Viçosa: UFV, 2001.

MARANHÃO, N. **Sistema de indicadores para planejamento e gestão dos recursos hídricos de bacias hidrográficas**. 2007. 297 f. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MARINHO, E. C. de A. **Uso racional da água em edificações públicas**. 2007. 72f. Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Escola de engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas de climas no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Ciclo hidrológico**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

MONTEBELLER, C. A.; DE CARVALHO, D. F.; SOBRINHO T. A.; NUNES, A. C. S.; RUBIO, E. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v.5, n.1, p.1-5, 2001.

MORAES, I. C.; CONCEIÇÃO, F. T. da; CUNHA, G. M. L. da; MORUZZI, R. B. Comparação de metodologias na definição de fluxos acumulados a partir de modelos digitais de elevação de terreno aplicado a suscetibilidade de inundações. **Revista brasileira de recursos hídricos**, v. 19, n. 2, 2014.

MUTCHLER, C. K.; MOLDENHAUER, W. C. Applicator for laboratory rainfall simulator. **American Society of agricultural and biological engineers**, v. 6, n. 3, p. 220-222, 1963.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Board on science and technology for international development**. Vetiver grass: a thin line Green line against erosion. Washington: National academy Press, 1993, 171p.

NETO, J.F.; DE ANDRADE, J.P.; SILVA, I.F. da; DE ARRUDA, N.P. Influência da pressão na intensidade e uniformidade da distribuição de precipitação em um simulador de chuva. **Agropecuária técnica**, v. 7, 1986.

OLIVEIRA, G. G. de. **Modelos para previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do Rio Caí, RS**. 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado em sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PALL, R.; DICKINSON, W. T.; REALS, D.; MCGIRR, R. Development and calibration of a rainfall simulator. **Canadian agricultural engineering**, v. 25, n. 2, p. 181-187, 1983.

PINTO, L. H.; PINHEIRO, S. A. **Orientações básicas para drenagem urbana**. Belo Horizonte: FEAM, 2006.

POLETO, C. (Org.) **Ambiente e sedimentos**. Porto Alegre: ABRH, 2008.

_____. **Bacias hidrográficas e recursos hídricos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

REIS, S. S. dos. **Influência da densidade e da altura de edificações na transformação de precipitação-escoamento utilizando chuva simulada em modelo reduzido de bacia hidrográfica urbana com diferentes declividades**. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em ciência e engenharia ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2015.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. Escola de engenharia de São Carlos: EESC/USP, 1998.

SHI, Z. H.; FANG, N. F.; WU, F. Z.; WANG, L.; YUE, B. J.; WU, G. L. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. **Journal of Hydrology**, v. 454-455, p. 123-130, 2012.

SILVEIRA, A.; ABRANTES, J. R. C. B.; de LIMA, J. L. M. P.; LIRA, L. C. Modelling runoff on ceramic tile roofs using the kinematic wave equations. **Water science & technology**, v. 73, n. 11, p. 2824-2831, 2016.

SOARES, J. V.; RENNÓ, C. D. Conceitos e modelagem hidrológica. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Curso de introdução à modelagem dinâmica**. Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, Belo Horizonte, 2003.

SOBRINHO, T. A.; FERREIRA, P. A.; PRUSKI, F. F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 6, n. 2, 2002.

TANG, J. Y. M.; ARYAL, R.; DELETIC, A.; GERNAK, W.; GLENN, E.; McCARTHY, D.; ESCHER, B. Toxicity characterization of urban stormwater with bioanalytical tools. **Water research**, v. 47, p. 5594-5606, 2013.

TOMAZ, P. **Economia de água para empresas e residências: um estudo atualizado sobre o uso racional da água**. 2. ed. São Paulo: Navegar Editora, 2001.

TUCCI, C. E. M. (Org). **Hidrologia, ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS: ABRH, 2004.

UNITED NATIONS SECRETARIAT (UNS). **An overview of urbanization, internal migration, population distribution and development in the world**. United Nations population division - Department of economic and social affairs: New York, 2008.

_____. **Population distribution, urbanization, internal migration and development: an international perspective**. Department of economic and social affairs: New York, 2011.

VAZE, J.; CHIEW, F.H.S. Study of pollutant wash off from small impervious experimental plots. **Water resources research**, v. 39, n. 6, 2003.

VISCH FILHO (Coord.). Apresentação. In: SIMPÓSIO SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA – RUMOS E PERSPECTIVAS DA CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA PARA O ESTADO DE SÃO PAULO, 2008, Campinas. **Anais...**Campinas: CATI, CDA/Apta, 2008.

WENG, Q. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. **Environmental management**, v. 28, n. 6, p. 737 -748, 2001.

WU, J.; BUYANTUYEV, A.; JENERETTE, G. D.; LITTERAL, J.; NEIL, K.; SHEN, W. Quantifying spatiotemporal patterns and ecological effects of urbanization: a multiscale landscape approach. In: **Applied urban ecology: A global framework**. Matthias Richter and Ulrike Weiland. Blackwell Publishing Ltd, 2012.

APÊNDICE A – Configuração experimental, materiais e métodos



Figura A. 1: Simulador de chuvas sobre superfície impermeável composto por três bocais do tipo cone completo.



Figura A. 2: Bocal *FullJet* 1/4HH-14W, *Spraying Systems Co.*

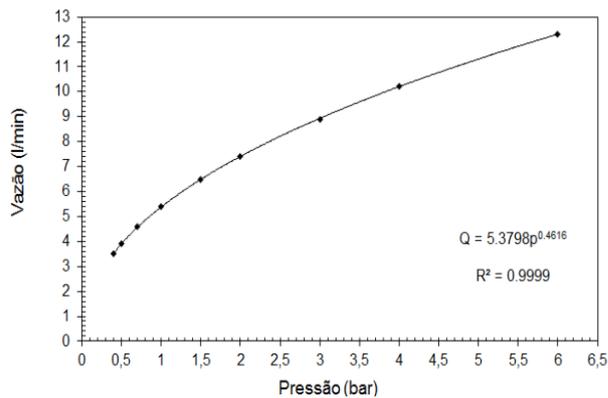


Figura A. 3: Curva característica do bocal tipo cone completo *FullJet* 1/4HH-14W.



Figura A. 4: Pesagem do recipiente plástico utilizado na captação da lâmina precipitada durante os ensaios de calibração do simulador de chuvas.



Figura A. 5: Reservatório de coleta de escoamento superficial e tudo com diâmetro reduzido e perfurado para posicionamento do sensor de nível.



Figura A. 6: Amostras coletadas durante os ensaios de transporte de material em suspensão (areia fina).