

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

BRUNA PETERSON LUQUE PESSOTI

**APLICAÇÃO DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DAS FACES CENTRADAS
PARA SIMULAR O TRANSPORTE DE MATERIAL EM SUSPENSÃO E
DISSOLVIDO EM SUPERFÍCIE IMPERMEÁVEL SOB CHUVA ARTIFICIAL**

Poços de Caldas/MG

2018

BRUNA PETERSON LUQUE PESSOTI

**APLICAÇÃO DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DAS FACES CENTRADAS
PARA SIMULAR O TRANSPORTE DE MATERIAL EM SUSPENSÃO E
DISSOLVIDO EM SUPERFÍCIE IMPERMEÁVEL SOB CHUVA ARTIFICIAL**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos obrigatórios para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Planejamento e gestão de recursos hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Silveira

Co-orientador: Prof. Dr. Flávio Aparecido Gonçalves

Poços de Caldas/MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca campus Poços de Caldas

P475a Pessoti, Bruna Peterson Luque.

Aplicação do delineamento experimental das faces centradas para simular o transporte de material em suspensão e dissolvido em superfície impermeável sob chuva artificial / Bruna Peterson Luque Pessoti . -- Poços de Caldas/MG, 2018.

84 f. –

Orientador(a): Alexandre Silveira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2018.
Bibliografia.

1. Engenharia sanitária. 2. Recursos hídricos. 3. Escoamento. 4. Transporte de sedimento. 5. Sedimentos em suspensão. 6. Chuvas – Métodos de simulação. I. Silveira, Alexandre. II. Título.

CDD – 628.1

BRUNA PETERSON LUQUE PESSOTI

**APLICAÇÃO DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DAS FACES CENTRADAS
PARA SIMULAR O TRANSPORTE DE MATERIAL EM SUSPENSÃO E
DISSOLVIDO EM SUPERFÍCIE IMPERMEÁVEL SOB CHUVA ARTIFICIAL**

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.

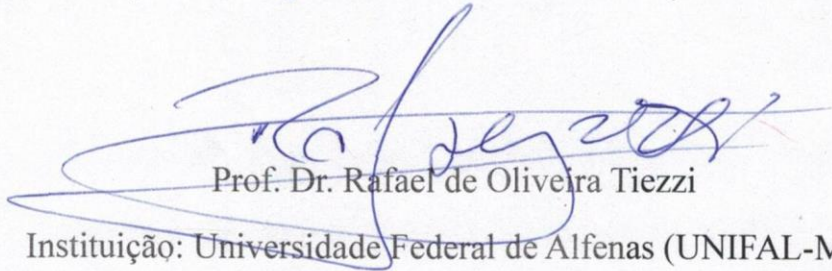
Área de Concentração: Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

Aprovada em: 27 de abril de 2018.



Prof. Dr. Alexandre Silveira

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)



Prof. Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)



Prof.^a Dra. Ana Letícia Pilz de Castro

Instituição: Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Dedico aos meus pais, Silvia e Eduardo, a quem devo a vida. Agradeço por todos os momentos de paciência, compreensão, apoio e amor.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Alexandre Silveira, pela orientação, ensinamentos e apoio durante todo o período de trabalho.

Ao professor Rafael Brito, pela ajuda, participação e disposição nas últimas, mas não menos significativas, etapas deste trabalho.

Ao professor Flávio Aparecido Gonçalves, pelas sugestões e contribuições.

À minha família, sendo sempre minha maior fonte de motivação, sou grata pelo amor incondicional.

Aos amigos que aqui fiz agradeço pela ajuda e amizade que foram sempre presentes, obrigada pelos momentos de paciência, incentivo e distração.

A todos os técnicos do laboratório de Engenharia: Mansueto, Guilherme, Bruno, Marcel e Luana, cuja ajuda e empenho foi essencial para realização de todo o trabalho.

A aluna de iniciação científica, Ana Flávia e a aluna de mestrado, Eliane Zaparoli, obrigada pela ajuda fundamental para realização dos experimentos. Agradeço ao auxílio e companhia nos momentos de laboratório.

Aos alunos de mestrado Everton Santos e Bruno Lima, pelo apoio na realização de trabalhos e dúvidas frequentes, deixo aqui minha sincera gratidão.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho acontecesse.

RESUMO

O aumento de cidades e o crescimento populacional causaram alterações no meio ambiente, com grandes mudanças nos sistemas naturais, modificando os processos hidrológicos envolvidos, como escoamento superficial e qualidade da água. O estudo do escoamento superficial e transporte de poluentes é de grande importância, pois ajuda na prevenção de impactos ambientais, auxiliando em planejamentos a serem realizados pelo poder público. Este trabalho teve o objetivo de estudar o transporte de material em suspensão (areia) e material dissolvido (cloreto de sódio) em relação a alteração de três variáveis independentes, declividade, intensidade de precipitação e posição do material, utilizando de um simulador de chuva e superfície impermeável em laboratório. No trabalho foi feito um delineamento experimental (Delineamento de Faces Centradas), em que foram propostos diferentes cenários para realização dos experimentos. Foi obtido hidrogramas e polutogramas para os diferentes cenários estudados, onde foi avaliada a influência das variáveis independentes em respostas as variáveis dependentes (tempo de transporte, valor de pico, tempo de pico e massa total). Com análise dos dados foi possível perceber que a presença de material (em suspensão ou dissolvido) na superfície não influenciou no escoamento, contudo percebeu-se forte influência da declividade e intensidade de precipitação, onde os cenários de maiores declividades e intensidades, produziram maior volume escoado. Pelos dados de polutogramas foi possível perceber grande diferença do transporte para os dois tipos de materiais estudados. O material dissolvido possui tempo de transporte mais rápido, maiores valores de pico, tempos de pico atingidos mais rapidamente e ainda maior massa total transportada, quando comparado com o material em suspensão. No material em suspensão, pelos resultados obtidos, foi possível perceber efeito da declividade e da posição do material em todas as variáveis dependentes estudadas, e ainda efeito quadrático da declividade para o valor de pico, seu respectivo tempo e massa total. A intensidade de precipitação para o material em suspensão mostrou-se significativa para todas as variáveis dependentes estudadas exceto para o tempo de pico. Para os resultados obtidos de material dissolvido percebeu-se efeito da declividade e posição do material para todas as variáveis dependentes estudadas, e ainda efeito quadrático da declividade para o tempo de transporte e massa total transportada, enquanto que a intensidade de precipitação possui influência apenas para o tempo de transporte.

Palavras-chave: Simulador de chuva, Escoamento superficial, Transporte de material em suspensão, Transporte de material dissolvido, Delineamento experimental, DFC.

ABSTRACT

Increased cities and population growth have caused changes in the environment, with major changes in natural systems, modifying the hydrological processes involved, such as surface runoff and water quality. The study of the surface runoff and transport of pollutants is of big importance, as it helps in the prevention of environmental impacts, aiding in planning to be carried out by the public authorities. The objective of this work was to study the transport of suspended material (sand) and dissolved material (sodium chloride) in relation to the change of three independent variables, slope, precipitation intensity and material position, using a rainfall simulator and surface in the laboratory. In the work was done an experimental design (Face Centered Design), in which different scenarios were proposed to perform the experiments. Hydrographs and pollutograms were obtained for the different scenarios, where the influence of the independent variables on the dependent variables (transport time, peak value, peak time and total mass) was evaluated. With data analysis, it was possible to notice that the presence of suspended or dissolved material on the surface did not influence the flow, however, it was observed a strong influence of the precipitation slope and intensity, where the scenarios of greater slopes and intensities, produced higher volume drained. From the data of pollutograms it was possible to perceive great difference of the transport for the two types of materials studied. The dissolved material has faster transport time, higher peak values, faster peak times and even higher total mass transported when compared to suspended material. In the suspended material, it was possible to observe the effect of slope and position of the material on all the dependent variables studied, as well as the quadratic effect of the slope for the peak value, its respective time and total mass. The precipitation intensity for the suspended material was significant for all the dependent variables studied except for the peak time. For the obtained results of dissolved material we noticed an effect of the slope and position of the material for all the dependent variables studied, as well as the quadratic effect of the slope for the transport time and total mass transported, whereas the intensity of precipitation influences only for the transport time.

Key words: Rainfall simulator, Surface runoff, Transport of suspended material, Transport of dissolved material, Experimental design, DFC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico e seus principais processos.	18
Figura 2 - Área de drenagem em relação a produção de sedimento e atividade de construção.	21
Figura 3 - Possibilidades de conduzir os experimentos para 3 variáveis. A) Método tradicional, matriz com todas combinações possíveis. B) Análise de uma variável por vez. C) Exemplo de delineamento fatorial (DCCR).	27
Figura 4 - Fluxograma simplificado representativo das atividades realizadas.	29
Figura 5 - Aparato experimental utilizado composto de simulador de chuva e superfície impermeável.	30
Figura 6 - Foto dos aparatos utilizados. (a) Reservatório de coleta do material em suspensão e quantificação do escoamento superficial. (b) Macaco hidráulico para alteração da declividade.	31
Figura 7 - Coletores dispostos na superfície impermeável com finalidade de caracterização espacial da precipitação e definição da intensidade média.	35
Figura 8 - Intensidade de precipitação (mm.h^{-1}) distribuída espacialmente, intensidade média de precipitação e coeficiente de uniformidade de Christiansen para as intensidades utilizadas e suas respectivas declividades.	36
Figura 9 - Superfície impermeável com delimitação da área com finalidade de aplicação do material em suspensão e dissolvido.	37
Figura 10 - Curva de calibração da relação entre condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) e concentração de sólidos totais dissolvidos (mg.L^{-1}).	40
Figura 11 - Hidrogramas referentes a todos os cenários propostos no planejamento.	41
Figura 12 - Polutogramas do material em suspensão para todos os cenários previstos no planejamento.	43
Figura 13 - Valores experimentais do T_{transp} em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.	46
Figura 14 - Superfície de resposta para o T_{transp} em relação a declividade (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3).	48

Figura 15 - Valores experimentais do <i>Pico</i> em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.	50
Figura 16 - Superfície de resposta para o <i>Pico</i> , em relação a declividade (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3).	51
Figura 17 - Valores experimentais do <i>Tp</i> em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.	53
Figura 18 - Superfície de resposta para o <i>Tp</i> em relação a declividade (x_1) e posição do material (x_3).	54
Figura 19 - Valores experimentais da <i>Massa Total</i> em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.	56
Figura 20 - Superfície de resposta para o <i>Massa Total</i> em relação a intensidade de declividade (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3).	57
Figura 21 - Polutogramas do material dissolvido para todos os cenários do planejamento.	58
Figura 22 - Valores experimentais do <i>Ttransp</i> em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.	62
Figura 23 - Superfície de resposta para o <i>Ttransp</i> em relação a declividade (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3).	63
Figura 24 - Valores experimentais do <i>Pico</i> em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.	65
Figura 25 - Superfície de resposta para o <i>Pico</i> em relação a declividade (x_1) e posição do material (x_3).	66
Figura 26 - Valores experimentais do <i>Tp</i> em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.	68
Figura 27 - Superfície de resposta para o <i>Tp</i> em relação a declividade (x_1) e posição do material (x_3).	68
Figura 28 - Valores experimentais da <i>Massa Total</i> em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.	70
Figura 29 - Superfície de resposta da <i>Massa Total</i> relacionada a declividade (x_1) e posição do material (x_3).	71

Figura 30 - Análise de comportamento dos valores experimentais e do modelo para o material em suspensão.	74
Figura 31 - Análise de comportamento dos valores experimentais e do modelo para o material dissolvido.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação do balanço hídrico em ambiente pré-urbanizado e urbanizado.	19
Tabela 2 - Variáveis independentes utilizadas neste estudo e seus respectivos níveis.	32
Tabela 3 - Experimentos propostos pelo delineamento de faces centradas para otimização dos resultados.	33
Tabela 4 - Variáveis dependentes obtidas para cada combinação de experimento proposto com material em suspensão.	44
Tabela 5 - Coeficientes de regressão para reposta <i>Ttransp</i>	45
Tabela 6 - ANOVA para <i>Ttransp</i>	46
Tabela 7 - Coeficientes de regressão para reposta <i>Pico</i>	49
Tabela 8 - ANOVA para o <i>Pico</i>	50
Tabela 9 - Coeficientes de regressão para reposta <i>Tp</i>	52
Tabela 10 - ANOVA para o <i>Tp</i>	53
Tabela 11 - Coeficientes de regressão para reposta <i>Massa Total</i>	55
Tabela 12 - ANOVA para o <i>Massa Total</i>	56
Tabela 13 - Variáveis dependentes obtidas para cada combinação do experimento proposto com material dissolvido.	60
Tabela 14 - Coeficientes de regressão para reposta <i>Ttransp</i>	61
Tabela 15 – ANOVA para o <i>Ttransp</i>	61
Tabela 16 - Coeficientes de regressão para reposta <i>Pico</i>	64
Tabela 17 - ANOVA para o <i>Pico</i>	64
Tabela 18 - Coeficientes de regressão para reposta <i>Tp</i>	67

Tabela 19 - ANOVA para o <i>Tp</i>	67
Tabela 20 - Coeficientes de regressão para reposta <i>Massa Total</i>	69
Tabela 21 - ANOVA para a <i>Massa Total</i>	70
Tabela 22 - Valores previstos pelo modelo proposto e os valores encontrados experimentalmente para o material em suspensão.	72
Tabela 23 - Erros encontrados entre os valores do modelo e os obtidos experimentalmente para material em suspensão.	73
Tabela 24 - Valores previstos pelo modelo proposto e os valores encontrados experimentalmente para o material dissolvido.	75
Tabela 25 - Erros encontrados entre os valores do modelo e os obtidos experimentalmente para material dissolvido.	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	BACIA HIDROGRÁFICA, CICLO DA ÁGUA E DRENAGEM URBANA	17
3.2	POLUIÇÃO NO ESCOAMENTO SUPERFÍCIAL URBANO	19
3.3	SIMULAÇÃO EM LABORATÓRIO	22
3.4	DELINAMENTO EXPERIMENTAL	26
4	METODOLOGIA	29
4.1	APARATO EXPERIMENTAL	29
4.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	31
4.2.1	Validação do Modelo	34
4.3	CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO	35
4.4	CONFIGURAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	37
4.4.1	Hidrogramas	38
4.4.2	Polutogramas – Material em Suspensão	39
4.4.3	Polutogramas – Material Dissolvido	39
5	RESULTADOS	41
5.1	HIDROGRAMAS	41
5.2	POLUTOGRAMAS – MATERIAL EM SUSPENSÃO	42
5.3	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL – MATERIAL EM SUSPENSÃO	44
5.3.1	Tempo de Transporte – T_{transp} (s)	45
5.3.2	Valor de Pico – $Pico$ ($mg.s^{-1}$)	48
5.3.3	Tempo de Pico – T_p (s)	52
5.3.4	Massa Total Transportada – $Massa Total$ (mg)	54
5.4	POLUTOGRAMAS – MATERIAL DISSOLVIDO	58
5.5	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL – MATERIAL DISSOLVIDO	59
5.5.1	Tempo de Transporte - T_{transp} (s)	60
5.5.2	Valor de Pico – $Pico$ ($mg.s^{-1}$)	63
5.5.3	Tempo de Pico – T_p (s)	66
5.5.4	Massa Total Transportada – $Massa Total$ (mg)	69
5.6	VALIDAÇÃO DO MODELO	71

5.6.1 Material em Suspensão	72
5.6.2 Material Dissolvido.....	74
6 CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS	80
ANEXO A – MATERIAL EM SUSPENSÃO UTILIZADO	83

1 INTRODUÇÃO

Na primeira metade do século XX a urbanização possuía índices muito baixos de crescimento e as cidades eram pequenas, produzindo apenas impactos hidrológicos e climáticos de baixa proporção (BERRY, 2008). De acordo com Kabish e Haase (2009), no início do século XXI, pela primeira vez na história, mais da metade da população mundial passou a viver em áreas urbanas.

O número de cidades aumentou de forma rápida, sendo que, aproximadamente 400 cidades já haviam ultrapassado a população de 1 milhão de habitantes no ano de 1950 (BERRY, 2008). Atualmente no Brasil aproximadamente 80% da população total vive em cidades (IBGE, 2010) e mais de 12 cidades possuem mais de 1 milhão de habitantes (CAMPANA; TUCCI, 2001).

O crescimento descontrolado das cidades modificou o meio ambiente, transformando as áreas de práticas agrícolas e florestais em centros urbanos. Essa alteração produziu consequências hidrológicas como: redução da infiltração da água no solo e recarga da água subterrânea; aumento de volumes escoados superficialmente e do transporte de cargas poluidoras (BURIAN; SHEPHERD, 2005; ALI; BONHOMME; CHEBBO, 2016; BRUNO; AMORIN; SILVEIRA, 2013).

Os problemas relacionados ao escoamento superficial e ao transporte de poluentes são cada vez mais agravantes. O aumento de resíduos gerados pela população, com descargas industriais e esgotos, contaminam rios e lagos. Nas cidades mais antigas, os escoamentos de água pluvial e residuais são misturados, causando eventos agudos de poluição nos corpos receptores (GRIMM et al., 2008). No início do escoamento há uma maior concentração de poluentes, que diminui ao longo do tempo até serem totalmente transportados. A maneira como este evento ocorre depende, por exemplo, da intensidade da chuva e do volume escoado (KIM et al., 2005).

A impermeabilização do solo, com rodovias, estacionamentos e passeios torna as inundações cada vez mais frequentes, provocando grandes danos a população. Não há uma regulamentação para controle de água urbana e as soluções adotadas são geralmente o transporte da água precipitada por meio de canais, que possuem baixa eficiência para solucionar o problema além de alto custo. Os custos para controlar as inundações em áreas que já são

urbanizadas é muito alto, e a maioria das cidades não possui recursos financeiros necessários para construir estas obras. Para controle destas situações é importante investir em uma etapa inicial, prevendo os impactos ocasionados, estas previsões são incorporadas num plano de desenvolvimento urbano, minimizando os danos e custos futuros (CAMPANA; TUCCI, 2001).

O escoamento superficial é um fenômeno natural do ciclo hidrológico, sendo o deslocamento de água sobre a superfície do solo, é fundamental o estudo deste segmento para obras de engenharia, pois seus conhecimentos permitem o aproveitamento de água e proteção contra fenômenos de enchentes e inundações provocados pelo escoamento. Em projetos de controle de enchentes e erosão é necessário o conhecimento sobre o escoamento superficial, uma vez que pretendesse conduzir o excesso de água de um lugar para outro, assim utiliza-se de dados de vazão e volume escoado (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2014).

Uma maneira tradicional para estudar o processo precipitação-escoamento, é pelo monitoramento de bacias hidrográficas, contudo devido à grande quantidade de elementos envolvidos, como: topografia; variação temporal da precipitação; uso da terra e tipo de solo, torna-se difícil o estudo do processo hidrológico em campo (SILVEIRA et al., 2017). Neste sentido, os simuladores de chuvas são essenciais para investigar o processo de hidrologia na superfície do ambiente urbano (ISERLOH et al., 2013), pois facilita a obtenção dos dados diminuindo o tempo e os custos associados. O custo por cada unidade de informação coletada é muito menor em relação aos custos de longo prazo de experimentos que dependem de chuva natural nos cenários de bacias hidrográficas (FERNANDEZ – GÁLVEZ; BARAHONA; MINGORANCE, 2008).

Deste modo, é importante o entendimento do processo precipitação – escoamento, visto as consequências que afetam o meio ambiente e a população. Assim, neste trabalho, utilizou-se de chuva artificial para estudo do transporte de materiais, que simulam poluente, em uma superfície impermeável.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é caracterizar o transporte de material em suspensão e dissolvido, em superfície impermeável sob chuva simulada, utilizando do delineamento experimental fatorial das faces centradas, verificando a validade do delineamento, comparando os valores produzidos pelo modelo estatístico-matemático com os valores obtidos experimentalmente.

O objetivo específico é estudar o transporte dos materiais (em suspensão e dissolvido), em relação ao tempo de transporte, valor de pico, tempo de pico e massa total transportada, em consequência da alteração da:

- Declividade da superfície impermeável;
- Intensidade de precipitação produzida pelo simulador de chuva;
- Posição em que os materiais em suspensão e dissolvido foram dispostos

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado os temas bibliográficos relacionados ao trabalho, dividido em quatro partes: primeira sobre a água no meio ambiente, segunda a poluição da água no escoamento urbano, terceira apresenta estudos desenvolvidos com simuladores de chuva e a quarta parte sobre a utilização de delineamento experimental para organização dos experimentos.

3.1 BACIA HIDROGRÁFICA, CICLO DA ÁGUA E DRENAGEM URBANA

O conceito de bacia hidrográfica é um dos primeiros passos para entendimento dos processos hidrológicos. A Política Nacional de Recursos Hídricos adota as bacias hidrográficas como unidade de estudo para sub-bacias. Cada bacia hidrográfica é conectada a uma outra bacia de ordem hierárquica superior, sendo assim a primeira, uma sub-bacia (TEODORO et al., 2007). A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação, delimitada espacialmente pelos divisores topográficos de água, onde o escoamento superficial converge-se para um único ponto de saída, denominado exutório da bacia. A bacia é composta por uma rede de drenagem e superfícies vertentes, sendo parte da água captada e parte da água convertida em escoamento, formando os cursos de água que fluem até um único leito. (PORTO; PORTO, 2008) (MELLO; SILVA, 2013).

O ciclo da água representa todo o processo que a água se submete no meio ambiente, como atmosfera, oceano, solo, leitos naturais de escoamento entre outros, sendo a radiação solar a principal fonte de energia do ciclo. Os processos envolvidos dentro do ciclo podem ser avaliados por uma escala global, correspondendo as bacias hidrográficas internacionais, ou ainda bacias hidrográficas nacionais (área de drenagem de milhares de km²), bacias hidrográficas de médio e pequeno porte (área de drenagem de centenas de hectares à alguns km² e bacias com dezenas de hectares, respectivamente). O principal componente de entrada da água no ciclo é a precipitação. A chuva pode ser interceptada por cobertura vegetal e/ou atingir

a superfície, que pode infiltrar no solo ou gerar escoamento superficial (MELLO; SILVA, 2013). Na Figura 1 estão apresentados os principais componentes do ciclo hidrológico.



Figura 1 - Ciclo hidrológico e seus principais processos.

Fonte: MELLO; SILVA (2013, p.22).

A parcela de água infiltrada é de grande valia para o meio ambiente, pois abastece as reservas subterrâneas e alimenta as plantas, por meio da parcela retida na matriz do solo. Há ainda uma parcela de água retida na copa das plantas que favorece o processo de evapotranspiração, que é a transferência de água para a atmosfera em forma de vapor. Outra fração de água é escoamento superficial, sendo escoada pela superfície por força da gravidade, esta parcela é a principal responsável pelo transporte de materiais, que eventualmente causam poluição nos corpos d'água, e aumenta a possibilidade de cheias na bacia hidrográfica (MELLO; SILVA, 2013).

O crescimento dos centros urbanos modifica a cobertura vegetal fazendo com que as interações entre os componentes do ciclo hidrológico se alterem. A cobertura da bacia hidrográfica, composta anteriormente por plantas e solo natural é substituída por pavimentos impermeáveis, sendo estes responsáveis pela redução de infiltração e pelo aumento do volume retido na superfície, causando problemas de cheias e inundações. A diminuição da infiltração afeta o aquífero, que tende a diminuir o nível do lençol freático. Há ainda diminuição da evapotranspiração, visto que a superfície urbana não retém água ao comparada com a cobertura

vegetal (TUCCI, 1997). Na Tabela 1 estão apresentados os principais elementos do ciclo hidrológico e a diferença em seu balanço hídrico causada pelo processo de urbanização.

Tabela 1 - Variação do balanço hídrico em ambiente pré-urbanizado e urbanizado.

Elementos dos Balanços	Pré – Urbano (%)	Urbano (%)
Evapotranspiração	40	25
Escoamento superficial	10	43
Escoamento subterrâneo	50	32
Total do escoamento	60	75

Fonte: TUCCI (1997, p. 7)

A engenharia responsável pela drenagem urbana solucionou o problema de perda de armazenamento natural com a construção de obras de canalização, que aumentam a velocidade dos escoamentos. Esta atitude apenas transferiu o problema para a jusante, pois torna o escoamento mais rápido, diminuindo o tempo de concentração, e elevando o valor de pico de vazão à jusante, o que, com frequência, ocasiona os problemas de inundações. Após a ocorrência destes eventos diversas leis foram formuladas para a proteção dos atingidos, principalmente nos países mais desenvolvidos (CANHOLI, 2014).

A atitude tomada, em geral, são os planos diretores de drenagem, em que se recomenda as obras de galerias e canalizações que sobrecarregam os rios e os córregos que possuem maior capacidade de absorção ou afetam a população à jusante. (CANHOLI, 2014). Isto reflete a falta de planejamento de drenagem na etapa inicial do desenvolvimento urbano, pois soluções em áreas já urbanizadas são de pouca eficiência com grandes gastos para os cofres públicos.

3.2 POLUIÇÃO NO ESCOAMENTO SUPERFÍCIAL URBANO

A poluição dos corpos hídricos não é proveniente apenas dos esgotos domésticos e industriais. Sabe-se que parte da poluição é gerada no escoamento superficial dos grandes centros urbanos. A origem da poluição no escoamento superficial é dita como poluição difusa, uma vez que é derivada de diferentes atividades, com produção de poluentes distintos, que se

dispersam sobre a área de contribuição da bacia hidrográfica em locais variados (CARDOSO et al., 2003).

O transporte de cargas poluidoras em bacias urbanizadas é complexo, pois há diversos fatores que influenciam na geração do material e na maneira como o transporte acontece. Ainda é difícil avaliar a importância de cada fator e como este se modifica ao longo do tempo no meio ambiente (HERNGREN et al., 2005)

Os tipos de uso de solo é uma variável que influencia no poluente gerado, assim como a declividade, clima e precipitação, que são variáveis do meio ambiente que modificam o transporte do poluente. A precipitação altera a concentração de poluente transportado por meio da intensidade da chuva e do volume escoado (KIM et al., 2005). A urbanização pode aumentar a erosão, resultando em altas cargas de sedimento transportado, o que modifica a morfologia do escoamento e características do canal (HOUSE et al., 1993).

Os problemas causados pelas cargas difusas e as medidas mitigadoras a serem implantadas são bloqueadas pelo agrupamento de outras cargas poluidoras, que camuflam o efeito separado das cargas difusas devido as variações temporais e espaciais dos impactos e pela dificuldade de coleta de dados (CARDOSO et al., 2003).

A qualidade da água pluvial possui características semelhantes à de um tratamento secundário, sendo que a quantidade de material suspenso na drenagem pluvial é maior em relação ao esgoto *in natura*, e ainda mais elevado no início de enchentes (TUCCI, 1997).

Na etapa de construção do meio urbano ocorre o aumento dos sedimentos, visto a grande quantidade de obras de edifícios, limpezas de terrenos, obras de ruas, avenidas e rodovias. Na Figura 2 encontra-se a tendência de produção de sedimentos na bacia nos diferentes estágios de desenvolvimento (TUCCI, 1997).

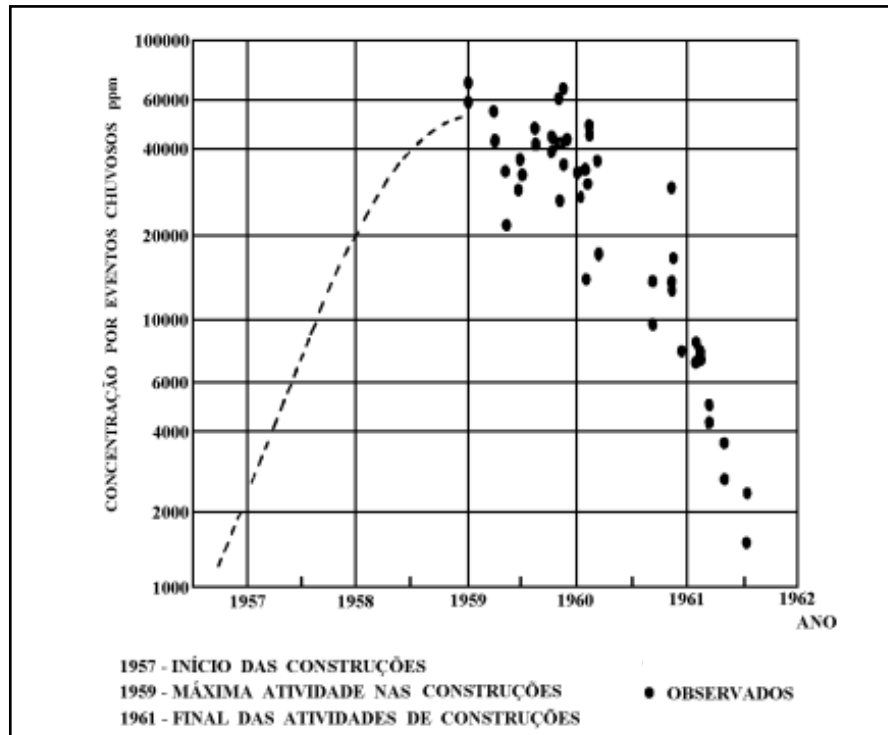


Figura 2 - Área de drenagem em relação a produção de sedimento e atividade de construção.

Fonte: TUCCI (1997, Adaptado)

O aumento de sedimentos no meio ambiente acarreta problemas de assoreamento da drenagem, diminuição da capacidade de escoamento em condutos, até mesmo em rios e lagos. Os sedimentos tendem a reduzir uma vez que a etapa de construção é consolidada, contudo outro problema torna-se agravante, a geração de resíduos sólidos. Este acarreta condições ambientais ainda piores com prejuízos maiores para a drenagem (TUCCI, 1997).

Quimicamente, é difícil caracterizar o escoamento urbano, pois os constituintes dependem dos tipos e uso do solo (HOUSE et al., 1993). Os usos de solo variados, produzem diferentes materiais como; Sedimentos Orgânicos e Inorgânicos (provindos de erosão, floretas, estradas e construções), Metais (que são oriundos de minas, indústrias, processos geológicos, tratamento de esgoto e escoamento urbano), Nutrientes (provindos do escoamento urbano e agrícola e tratamento de água e esgoto), Componentes Orgânicos (pesticidas, herbicidas, hidrocarbonetos, dioxinas) (oriundos do tratamento de esgoto, indústria e agricultura) e os Radionuclídeos (provindos de energia nuclear, ações militares e agricultura) (TAYLOR; OWENS, 2009).

Diferentes estudos são realizados para caracterizar a poluição do escoamento superficial para as cidades, no Brasil estes estudos encontram-se numa etapa inicial. Na cidade de São

Paulo foram levantados dados sobre alguns poluentes provenientes dos telhados e das ruas (amônia (NH_3), chumbo (Pb), cobre (Cu), zinco (Zn), óleos, graxas, cor, patógenos e DBO e DQO), e os percentuais de valores de poluentes foram menores que os limites normalizados em classificação superiores, classe 1 e 2, em relação as normas vigentes (BISCAINO NETO; FREIRE; RABELO, 2016).

Em estudo realizado para a cidade de Brasília, onde foi determinado a acumulação superficial de contaminantes em superfícies típicas do Distrito Federal, foi medido a vazão do escoamento superficial avaliada juntamente com o pH, DQO e concentrações de material particulado: cobre (Cu), sulfatos, sódio (Na), zinco (Zn) e chumbo (Pb). Neste caso houve relação entre as concentrações de cargas dos poluentes e tempo de recorrência da chuva e ainda com a qualidade da água do escoamento superficial urbano, pois o grau de comprometimento da qualidade da água é diretamente proporcional ao tempo sem chuva antecedente (BISCAINO NETO; FREIRE; RABELO, 2016).

Para a cidade de Presidente Prudente -SP, onde foi monitorado os aspectos quantitativos e qualitativos do escoamento superficial para áreas residenciais, comerciais e urbanas, foi verificado elevadas cargas possivelmente poluidoras da porção urbana na estação verão, decorrentes de sólidos totais, DQO e fosforo total. Tais cargas mostraram que a poluição urbana com áreas de influência industrial, comercial e residencial contribuem fortemente para a degradação e redução da qualidade dos corpos hídricos receptores (BISCAINO NETO; FREIRE; RABELO, 2016).

3.3 SIMULAÇÃO EM LABORATÓRIO

A dificuldade de coleta de informação em ambiente já urbanizado tornou os simuladores de chuva cada vez mais populares para o estudo do comportamento da precipitação-escoamento e transporte de material, visto sua facilidade, menor custo, maior quantidade e rapidez na coleta de dados.

Lima e Singh (2003) conduziram uma experiência em laboratório sobre a influência do movimento de chuvas intensas no escoamento superficial. O estudo investigou o efeito da movimentação da tempestade a respeito do escoamento superficial em condições controladas

de laboratório. Foi feito em uma superfície plana impermeável, utilizando um bocal para simular a chuva que produziu uma variação das gotas distribuídas aleatoriamente fazendo com que esta seja semelhante à chuva natural. Utilizou-se uma estrutura com rodas e motor elétrico que moveu a tempestade para baixo e para cima, simulando um único ciclo, seco – molhado – seco. O escoamento gerado por cada evento foi feito pela coleta de água em um recipiente colocado na extremidade inferior do canal para construção dos hidrogramas. Foi possível perceber diferenças de volumes de escoamento e picos do hidrograma, isto é, diferentes repostas hidrológicas, para as tempestades que deslocam-se para baixo (jusante) e para cima (montante) do plano à diferentes velocidades. Tempestade com movimento a jusante quando comparada a tempestade com movimento a montante, possui um pico do hidrograma mais rápido, menor vazão de pico e maior tempo de base.

Herngren et al. (2005) utilizou de simulador de chuva em superfícies pavimentadas para estudo de qualidade das águas pluviais. O simulador de chuva utilizado teve como princípio facilidade de montagem e operação, distribuição uniforme da chuva sob a área operada e velocidade cinética semelhante a chuva natural, com três bocais, espaçados em 1m e distantes 2,4m da superfície, sendo uma distância adequada para produzir velocidades semelhantes à de chuva natural. Com intuito de produzir a precipitação de forma mais natural possível foi investigado os parâmetros de qualidade de água da chuva natural, e foram avaliadas de acordo com pH, condutividade elétrica e concentração de carbono orgânico dissolvido, sendo importantes, pois estes parâmetros podem alterar as características físico – químicas do poluente no escoamento. Assim a chuva produzida pelo simulador foi submetida a inserção de ácido sulfúrico (para mudança do pH), metanol (para concentração de carbono orgânico dissolvido) e sal comum (para condutividade elétrica). O trabalho evidenciou que a simulação de chuva é apropriada para pesquisa de qualidade de água urbana, e ainda que embora seja impossível replicar completamente a chuva natural o simulador de chuva é capaz de proporcionar uma boa semelhança com a chuva natural, e como a característica química da chuva influência no transporte de poluente, é importante dar atenção a qualidade química da água utilizada na simulação.

Egodawatta, Thomas e Goonetilleke (2007), trabalharam no estudo de transporte de poluentes em rodovias urbanas, utilizando de simulador de chuva com controle da intensidade e duração da chuva. O trabalho analisou três rodovias diferentes com alteração da intensidade e da duração da precipitação, sendo possível avaliar que o transporte do poluente foi interferido

mediante a estas duas variáveis. Os eventos de chuva possuem capacidade específica de transporte, assim utilizou-se do fator “capacidade” na equação do transporte, onde este variou de 0 a 1. Os resultados mostraram que precipitações de até 40 mm.h^{-1} locomoveu até 50% dos poluentes (variando de 0 a 0,5), enquanto eventos acima de 90 mm.h^{-1} obtiveram alta capacidade de locomoção para os poluentes sólidos, com valores que variaram de 0,5 a 1.

Fernández-Galvéz, Barahona e Mingorance (2008) estudaram a mobilidade de material transportados em pequenas parcelas de solo avaliando a quantidade de poluentes que podem alcançar as águas subterrâneas pela drenagem do solo com a utilização de um simulador portátil. O simulador utilizado é facilmente transportado, não prejudica a estrutura do solo e mede com precisão as taxas de escoamento e infiltração. O simulador foi projetado para que as quedas das gotas caíam em uma parcela de solo de $50 \times 50 \text{ cm}$. O escoamento e os sedimentos transportados foram coletados na parte inferior por uma placa de alumínio e armazenados em garrafas na saída da calha. O solo utilizado para análise foi do Vale de Guadiamar, após a remoção de lodo um ano após o derramamento tóxico de uma mina de pirita em Aznalcóllar (sudeste da Espanha). A contaminação afetou mais as camadas superiores de solo embora houvesse material tóxico infiltrado no solo, sendo estudados neste trabalho o *As*, *Cu* e *Zn*. Foi determinado no trabalho que a alta precisão da intensidade de precipitação e distribuição de precipitação uniforme sobre a área sugerem adequação para o estudo, contudo, a pequena área utilizada de solo e a limitada altura do simulador são considerados desvantagens. O resultado mostrou a grave poluição na camada superficial do solo e que esta diminuiu-se ao longo da profundidade do perfil do solo. Os experimentos de infiltração revelaram que apenas o *Zn* é presente em profundidades abaixo de 50 cm . Há, também, alta quantidade de cascalhos abaixo desta profundidade, ocasionando um aumento da drenagem e conseqüentemente os riscos de poluição em águas subterrâneas.

A pesquisa de Souza Junior e Siqueira (2011) teve como propósito construir, calibrar e avaliar a precipitação de um simulador para estudo da hidrologia urbana, atendendo alguns requisitos, sendo estes, a portabilidade, montagem e operação fácil, possuir distribuição de tamanho de gota, velocidades terminais e energia cinética semelhantes a chuva natural, possibilidade de produzir intervalo de precipitação e intensidade semelhantes aos do estado de Goiás, Brasil, e capacidade de aplicar chuvas de maneira uniforme sobre uma área do terreno. Para isto utilizou-se de 2 bocais *FullJet 1/2 HH SS 40* espaçados $1,06 \text{ m}$, com altura de $2,80 \text{ m}$, simulando chuvas que cobrem uma área de 3 m^2 ($1,5 \times 2,0 \text{ m}$) com diâmetro médio de gotas (D_{50}) de $2,12 \text{ mm}$ e energia cinética de $22,53 \text{ J.mm}^{-1}.\text{m}^{-2}$, representando $90,12\%$ da energia

cinética de eventos de chuva natural. As intensidades de precipitação que podem ser simuladas são de 40 mm.h⁻¹ a 182 mm.h⁻¹, estas intensidades enquadram-se em períodos de retorno de 1 a 10 anos com duração de 60 minutos, que são estimados para o local de estudo, cidade de Goiânia, Estado de Goiás.

Felice (2017) estudou o transporte de poluente dissolvido (cloreto de sódio) e em suspensão (areia), alterando sua posição inicial. O modelo físico utilizado foi simulador de chuva e superfície impermeável, com área de 8,40 m², dividida em quatro posições diferentes (próximas e distantes do exutório), onde foram distribuídos os dois tipos de poluente, separadamente. A intensidade média de precipitação utilizada no trabalho foi de 69,0 mm.h⁻¹. Os resultados apresentaram maiores valores de pico de descarga mássica para o material dissolvido e menor tempo para atingir estes valores, quando comparados ao material em suspensão. Evidenciou-se que as posições próximas ao exutório apresentaram mesmo tempo de pico, independente do material estudado, devido ao fato da energia de escoamento, sendo suficiente para arrastar as partículas nesta região da superfície impermeável.

Lima (2017) investigou o efeito da densidade de ocupação de edifícios em relação ao transporte de material solúvel (cloreto de sódio) no escoamento superficial, utilizando de simulador de chuva com 16 bocais (*Sparying System, FullJet HH-w 14*), espaçados de 2,5 em 2,5 m, que produz seu efeito sobre uma superfície impermeável de concreto revestida de tinta Epóxi com área de 100 m², e inclinação transversal de 2,5% e longitudinal de 5%. Os resultados foram analisados pelo uso do Delineamento Central Composto Rotacional (DCCR), que utilizou como variável independente a posição inicial do poluente e a densidade de ocupação de edifícios. A análise mostrou que todas as variáveis dependentes (tempo inicial e final do transporte, tempo em que foi atingido o pico do polutograma, valor desse pico e massa transportada) são influenciadas pela posição do poluente, contudo a densidade de ocupação não possuiu influência para o tempo final. Concluiu-se também que a presença dos edifícios teve influência no tempo de início dos hidrogramas.

Abrantes et al. (2018) estudaram uma nova abordagem para determinação da velocidade do escoamento superficial, visto a importância da velocidade para entender o comportamento do transporte de poluentes. Neste trabalho utilizou de três traçadores distintos (água aquecida, corante e sal) para verificar sua passagem e analisar a velocidade do escoamento. Câmeras de vídeo óptico, infravermelho e sensor de condutividade elétrica, foram instalados no aparato experimental e utilizados para detectar a passagem do traçador (que simula um poluente) no

fluxo. Os experimentos foram realizados para diferentes vazões ($32 - 1813 \text{ mL.s}^{-1}$) em superfícies distintas de acrílico, areia, pedras e leitos sintéticos com declividades que variaram entre 0,8; 4,4; e 13,2%. Os resultados permitiram concluir que os traçadores térmicos podem ser usados para estimar velocidades de escoamento, visto a pouca diferença entre os valores encontrados para as técnicas utilizadas. O rastreador térmico tem como vantagem a boa detecção ao longo de toda a seção, sendo mais visível em relação ao vídeo de imagem real e ao detector de sal, que apresenta apenas um único valor de velocidade.

3.4 DELINAMENTO EXPERIMENTAL

Para melhor execução e interpretação de processos, utiliza-se da metodologia de otimização, que visa o aumento do rendimento das operações sem elevar seu custo. Considera-se como prática tradicional a mudança de apenas um parâmetro por vez (mantendo os demais em níveis constantes), produzindo uma resposta demorada para otimização dos processos. A resposta real de processos, geralmente é resultado da influência de diversas variáveis que interagem ao mesmo tempo. Portanto a metodologia tradicional pode ignorar essa interação, sendo uma grande desvantagem (COSTA, 2016).

Rodrigues e Iemma (2014) apresentam três diferentes caminhos para resolução de um problema experimental. Um dos métodos é o da prática tradicional, sendo construído uma matriz, em que todas as combinações possíveis são estudadas, até encontrar a melhor solução final. Este método investiga todo o espaço experimental, possuindo um número muito elevado de experimentos. Outro método analisado é o “*one-at-a-time*”, onde estuda-se uma variável por vez. Enquanto as demais variáveis são fixadas, o melhor resultado encontrado para esta primeira batelada de experimentos é fixado, e assim varia-se as condições antes fixadas. Mesmo que este procedimento seja utilizado atualmente nota-se grande deficiência, pois podem existir interações entre as variáveis que não foram exploradas pelo método. E o terceiro procedimento estudado é o do planejamento experimental fatorial, sendo que nos últimos 60 anos tornou-se muito difundido, visto a diminuição do número de ensaios e aumento da precisão dos resultados. Na Figura 3 estão apresentadas as ilustrações de três métodos com as possibilidades de condução experimental para três variáveis.

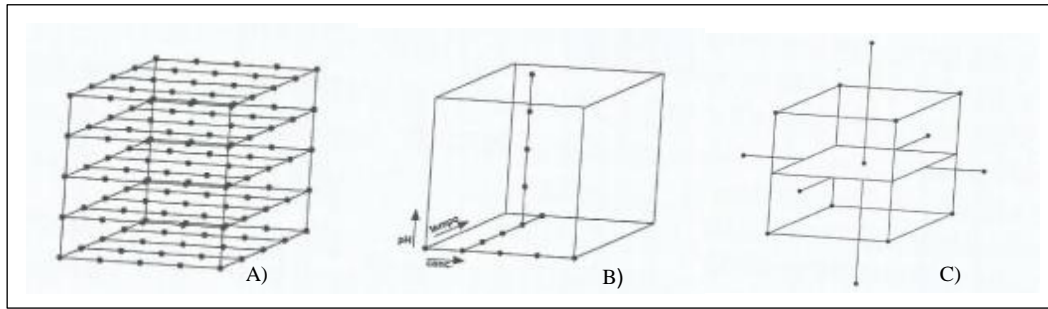


Figura 3 - Possibilidades de conduzir os experimentos para três variáveis. A) Método tradicional, matriz com todas combinações possíveis. B) Análise de uma variável por vez. C) Exemplo de delineamento fatorial (DCCR).

Fonte: RODRIGUES; IEMMA (2014, Adaptado)

Os três procedimentos foram exemplificados para uma situação com três variáveis independentes que modificaram em cinco níveis. Ao analisar os procedimentos, o primeiro (tradicional), Figura 3A, necessitaria de 125 experimentos totais ($5 \times 5 \times 5$) que investigaria os 3 fatores para as 5 combinações, sendo muito demorado e com alto custo. O segundo procedimento (*one-at-a-time*), seria necessário no mínimo 13 experimentos, contudo limita-se a uma pequena região espacial estudada, o que não detecta os efeitos de interação entre elas, obtendo um resultado aquém do valor otimizado, Figura 3B. Para o procedimento do planejamento fatorial completo, Figura 3C, é necessário a realização de 17 ensaios, sendo 8 ensaios fatoriais para o vértice do cubo, 6 ensaios para os pontos axiais e 3 ensaios repetidos na região central para garantia dos resultados, com uma maior área espacial de estudo, podendo-se calcular o erro experimental pela repetição, de no mínimo três vezes, no ponto central. Torna-se possível ainda produzir um modelo matemático, que validado estatisticamente, produz uma superfície de resposta, onde determina-se as condições otimizadas para o trabalho (RODRIGUES; IEMMA, 2014).

Os sistemas hidrológicos envolvem diferentes variáveis que relacionadas entre si, produzem resultados distintos. Quando esses efeitos são ignorados no processo de otimização o valor obtido pode não ser representativo.

Para solução deste problema a otimização de processos adota desenhos experimentais e a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), que é um conjunto de técnicas avançadas de planejamento de experimentos que auxiliam no entendimento e otimizam a resposta, avaliando os efeitos de diferentes variáveis e suas interações no processo. Para os cientistas, a atividade estatística mais importante é o planejamento dos experimentos, quando este não é feito de

maneira correta os resultados podem ser uma grande quantidade de dados sem possibilidade de extrair uma conclusão efetiva (COSTA, 2016; LIYANAPATHIRANA; SHAHIDI, 2005).

Assim a utilização do planejamento experimental fatorial para o processo hidrológico é de grande importância, por ser um estudo que abrange muitas variáveis, facilita a realização de maneira organizada dos experimentos, com uma quantidade mínima necessária diminuindo tempo e custos.

4 METODOLOGIA

Na Figura 4 é apresentado um fluxograma simplificado das etapas realizadas neste trabalho, para melhor visualização das tarefas produzidas.

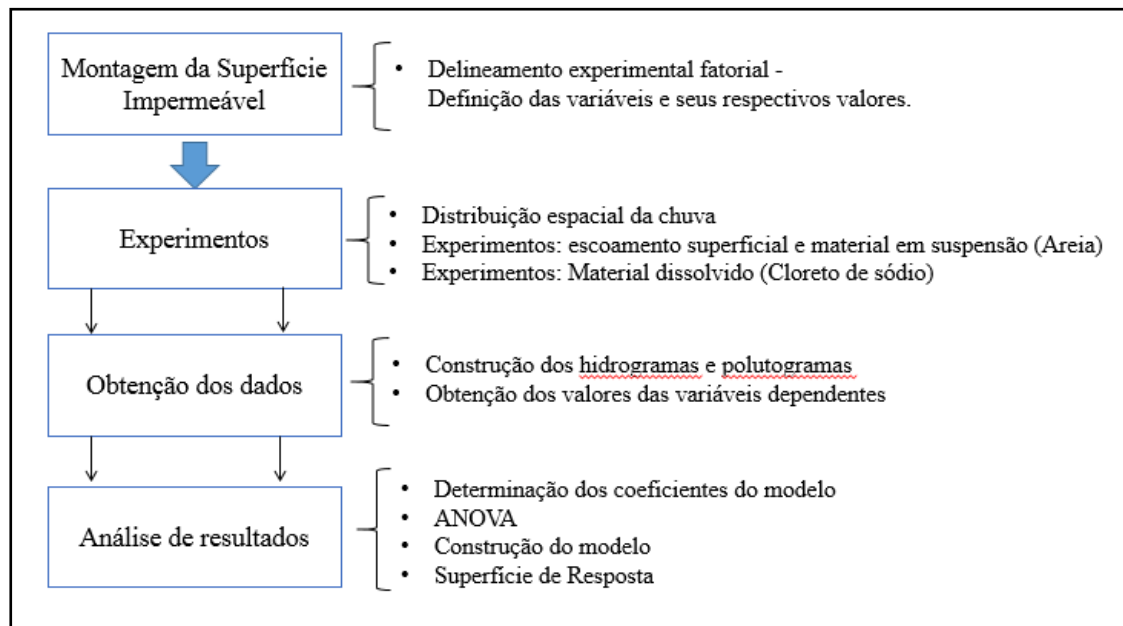


Figura 4 - Fluxograma simplificado representativo das atividades realizadas.

Fonte: Da autora.

4.1 APARATO EXPERIMENTAL

O trabalho foi conduzido dentro de laboratório com aparato experimental composto de: simulador de chuva e superfície impermeável (Figura 5). O simulador de chuva possui três bocais do tipo cone completo (*FullJet 1/4HH – 14W*, Spraying System Co.), localizados centralmente no eixo longitudinal com distância de 1,3 m entre bocais e posicionados a 2,4 m de altura do centro da superfície impermeável. A tubulação de cloreto de polivinil (PVC), em que os bocais estão instalados, possui 12,5mm de diâmetro. No simulador, próximo aos bocais, encontram-se uma válvula solenoide, com finalidade de fechamento e abertura automática do

sistema, e também um manômetro digital, que tem como função possibilitar o monitoramento da pressão em que os ensaios foram realizados.

Para alimentação há um conjunto motor-bomba, com potência de 1 CV, conectado, por uma tubulação de PVC, com diâmetro de 25mm, à um reservatório (310 litros), cujo nível de água foi mantido constante durante os experimentos.

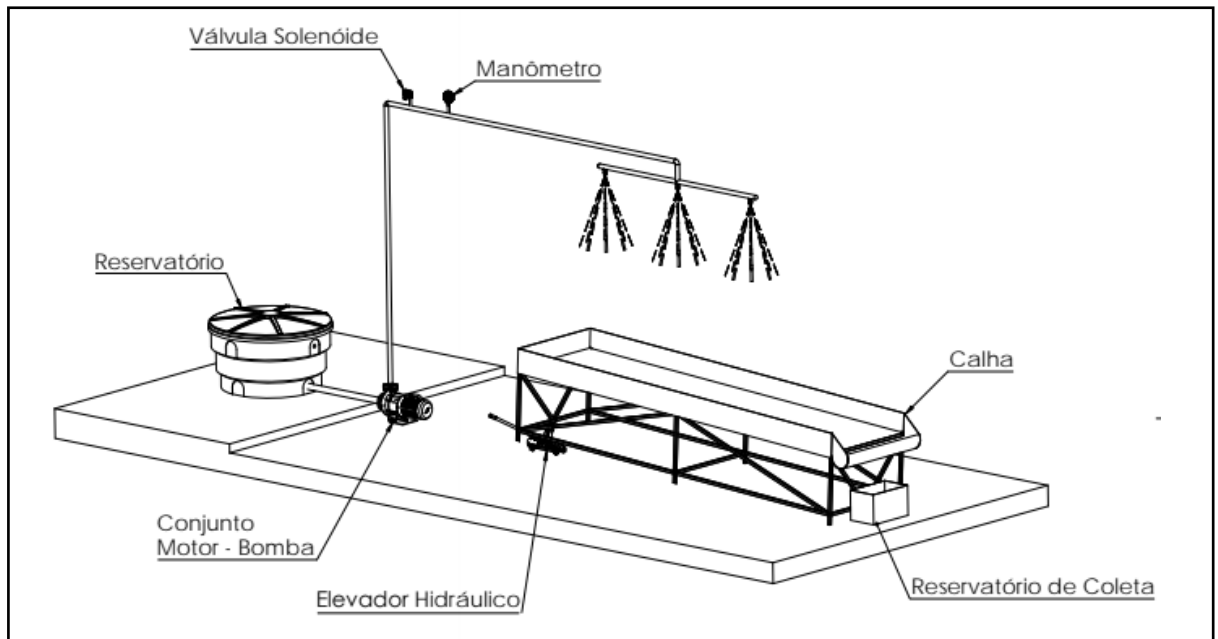


Figura 5 – Esquema do aparato experimental utilizado composto de simulador de chuva e superfície impermeável.

Fonte: Da autora.

A superfície impermeável, onde as águas do simulador escoam, tem área de $4,305\text{m}^2$ ($4,1 \times 1,05 \text{ m}$), revestida de concreto, para representar áreas impermeabilizadas urbanas.

Na parte inferior da superfície foi instalado uma calha de PVC, considerado o exutório, onde era feita a coleta do material transportado e quantificação do escoamento, através de uma abertura circular central na calha. Na parte superior da superfície foi possível ajustar a declividade, com auxílio de uma ferramenta de ajuste de declividade (elevador hidráulico) (Figura 6).



Figura 6 - Foto dos instrumentos utilizados. (a) Reservatório de coleta do material em suspensão e quantificação do escoamento superficial. (b) Elevador hidráulico para alteração da declividade.

Fonte: Da autora.

4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Para melhor interpretação dos resultados obtidos e correlacionar as diferentes variáveis envolvidas, decidiu-se fazer um planejamento experimental fatorial, Delineamento Experimental das Faces Centradas (DFC). Neste trabalho foram avaliados o efeito de três variáveis independentes: declividade da superfície impermeável (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3).

Foi necessário definir, também, os níveis que as variáveis independentes foram avaliadas, sendo três níveis, que são os pontos codificados (-1), (0) e (+1). Assim delimitou-se a maior distância da posição do material (+1), sendo 3,5m do exutório, representando 85,4% do comprimento da superfície, definiu-se o ponto inferior (-1) de 0,78m, representando 19,0% do comprimento da superfície impermeável e para produzir amplitudes iguais de distâncias o ponto central (0) foi de 2,14m, com representação de 52,2% do comprimento da superfície impermeável.

A intensidade de precipitação foi estabelecida em função do limite de funcionamento do simulador. Com isto fez-se experimentos com as possíveis precipitações produzidas pelo

simulador. A melhor combinação, que resultou em amplitudes iguais, para os três níveis codificados (-1) (0) e (+1), foram as intensidades de 54, 64 e 74 mm.h⁻¹, respectivamente.

Os níveis de declividades foram definidos pela capacidade do equipamento de ajuste de declividade (macaco hidráulico), utilizando seu limite que representava maior declividade em 8,1% (+1), isto definiu-se os pontos codificados (-1) e (0) que foram 2,7% e 5,4%, respectivamente. Na Tabela 2 estão apresentadas as variáveis independentes e seus respectivos níveis.

Tabela 2 - Variáveis independentes utilizadas neste estudo e seus respectivos níveis.

Variáveis independentes	Unidade	Níveis		
		-1	0	+1
Declividade (x₁)	(%)	2,7	5,4	8,1
Intensidade de precipitação (x₂)	(mm.h ⁻¹)	54	64	74
Posição do Material (x₃)	(m)	0,78	2,14	3,5

Fonte: Da autora.

Os experimentos propostos pelo planejamento formaram uma combinação de 17 experimentos, sendo oito ensaios com todas possibilidades possíveis nos níveis (-1) e (1), 6 ensaios com os pontos centrais (0), (-1) e (1), e 3 ensaios de repetição apenas entre os pontos centrais (0), como indica Rodrigues e Iemma (2014). Todo o planejamento experimental foi realizado considerando o transporte de um material em suspensão e um material dissolvido. Ou seja, foram realizados 17 experimentos para cada tipo de material a ser transportado. A Tabela 3 ilustra as combinações necessárias propostas pelo delineamento.

Tabela 3 - Experimentos propostos pelo delineamento de faces centradas para otimização dos resultados

Experimentos	Níveis codificados			Níveis decodificados		
	x_1	x_2	x_3	Declividade (x_1)	Intensidade de precipitação (x_2)	Posição do material (x_3)
1	-1	-1	-1	2,7	54	0,78
2	1	-1	-1	8,1	54	0,78
3	-1	1	-1	2,7	74	0,78
4	1	1	-1	8,1	74	0,78
5	-1	-1	1	2,7	54	3,5
6	1	-1	1	8,1	54	3,5
7	-1	1	1	2,7	74	3,5
8	1	1	1	8,1	74	3,5
9	-1	0	0	2,7	64	2,14
10	1	0	0	8,1	64	2,14
11	0	-1	0	5,4	54	2,14
12	0	1	0	5,4	74	2,14
13	0	0	-1	5,4	64	0,78
14	0	0	1	5,4	64	3,5
15	0	0	0	5,4	64	2,14
16	0	0	0	5,4	64	2,14
17	0	0	0	5,4	64	2,14

Fonte: Da autora.

Os fatores avaliados (declividade, intensidade de precipitação e posição do material), ou seja, as variáveis independentes, possuem efeitos sobre as variáveis dependentes, que são: tempo total para o transporte do material (T_{transp}), valor de pico ($Pico$), tempo em que ocorre pico de descarga mássica (T_p), e total de massa transportada ($Massa\ Total$), informações obtidas por meio dos resultados experimentais.

Foi feita uma análise de regressão múltipla dos dados, para estimar os coeficientes do modelo de regressão pelo método dos mínimos quadrados. Com isso, foi ajustado um modelo estatístico – matemático que relacionou variáveis independentes e variáveis dependentes, seguindo a metodologia proposta por Rodrigues e Iemma (2014).

O modelo estatístico-matemático gerado foi de segunda ordem, com interação dos fatores, como apresentado Equação (1). Esta equação tem uma resposta (y), referente as variáveis dependentes, (b_0) é o coeficiente relativo a interseção do plano com o eixo resposta, (b_1), (b_2) e

(b_3) são os coeficientes lineares relacionados a cada variável independente (x_1), (x_2) e (x_3), (b_{11}), (b_{22}) e (b_{33}) são os coeficientes quadráticos das variáveis independentes e os coeficientes de interação entre as variáveis independentes são (b_1b_2), (b_1b_3) e (b_2b_3).

$$y = b_0 + b_1.x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}.x_2^2 + b_{33}.x_3^2 + b_1b_2.x_1.x_2 + b_1b_3.x_1.x_3 + b_2b_3.x_2.x_3 \quad (1)$$

Produziu-se uma equação para cada variável dependente estudada, totalizando quatro equações ($y_1 = Ttransp$, $y_2 = Pico$, $y_3 = Tp$ e $y_4 = Massa Total$). Os modelos produzidos foram validados pela análise de variância (ANOVA), sendo confiáveis a nível de 95% (p-valor < 0,05).

Os resultados foram representados graficamente, produzidos pelo *software* *PROTIMIZA EXPERIMENTAL DESIGN*®, em superfície de resposta, relacionando a influência de duas variáveis independentes com uma variável dependente.

4.2.1 Validação do Modelo

O método utilizado neste trabalho foi feito para reproduzir um modelo estatístico-matemático capaz de representar o comportamento das variáveis dependentes estudadas, dentro dos limites investigados da declividade, intensidade de precipitação e posição do material.

Os resultados obtidos pelas equações produzidas, análogas a Equação (1) para cada variável dependente estudada, foram comparados aos valores encontrados experimentalmente, por meio de gráficos e análises de erros, feitos para o material em suspensão e material dissolvido.

4.3 CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO

Após a construção da superfície impermeável foram feitos os ensaios para a caracterização espacial da precipitação e determinação da intensidade média de precipitação. No planejamento estatístico foi definido a utilização de três intensidades diferentes e três declividades diferentes, com isto foram feitos nove ensaios para caracterização espacial da precipitação e definição da intensidade média, combinando as declividades com as intensidades.

Os ensaios foram feitos com precipitações com duração de cinco minutos, que aferiam pressões de 1,0bar ($\sim 74\text{mm.h}^{-1}$), 0,7bar ($\sim 64\text{mm.h}^{-1}$) e 0,5bar ($\sim 54\text{mm.h}^{-1}$), aplicadas sobre a superfície impermeável, onde foram dispostos 100 coletores (com altura de 8,9cm e diâmetro de 7,6cm) de forma equidistante (Figura 7).

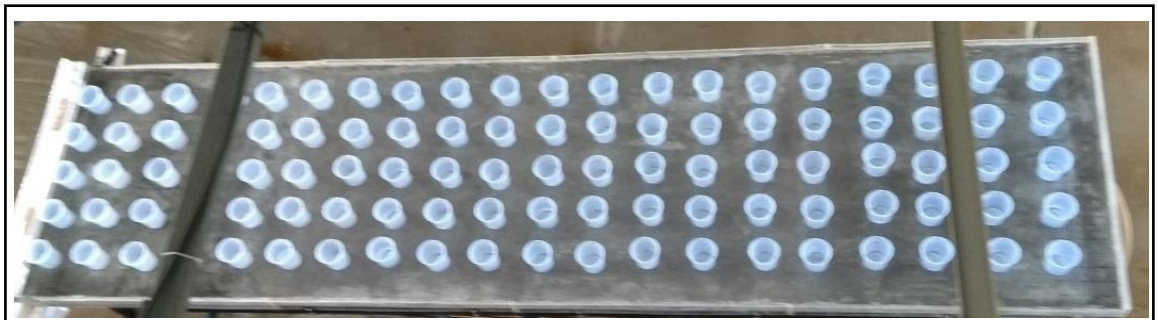


Figura 7 - Coletores dispostos na superfície impermeável com finalidade de caracterização espacial da precipitação e definição da intensidade média.

Fonte: Da autora.

Após o ensaio, os coletores foram secados em sua parte externa e pesados novamente, obtendo a massa da água. Considerando a massa específica da água de 1g.cm^{-3} , calculou-se o volume de água em cada coletor e dividindo-se pela área do coletor, obteve-se a intensidade de precipitação de cada coletor. Calculou-se a intensidade média de precipitação da superfície, cuja a uniformidade pode ser expressa pelo Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), calculado pela Equação (2).

$$CUC = 1 - \left(\frac{\sum_{c=1}^n |x_c - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right) \quad (2)$$

em que; x_c à intensidade de cada coletor; \bar{x} a intensidade média de todos os coletores; e n o número de coletores utilizados ($n = 100$).

A Figura 8 é referente a distribuição espacial dos ensaios de precipitação para cada declividade e intensidade, assim como suas intensidades médias de precipitação e CUC. As imagens foram obtidas por meio do *software* SURFER®, utilizando de interpolação de dados, que faz uso de um método de regressão, pois considera que os pontos vizinhos são mais próximos e ao passo que se distanciam espacialmente seus valores diferem-se.

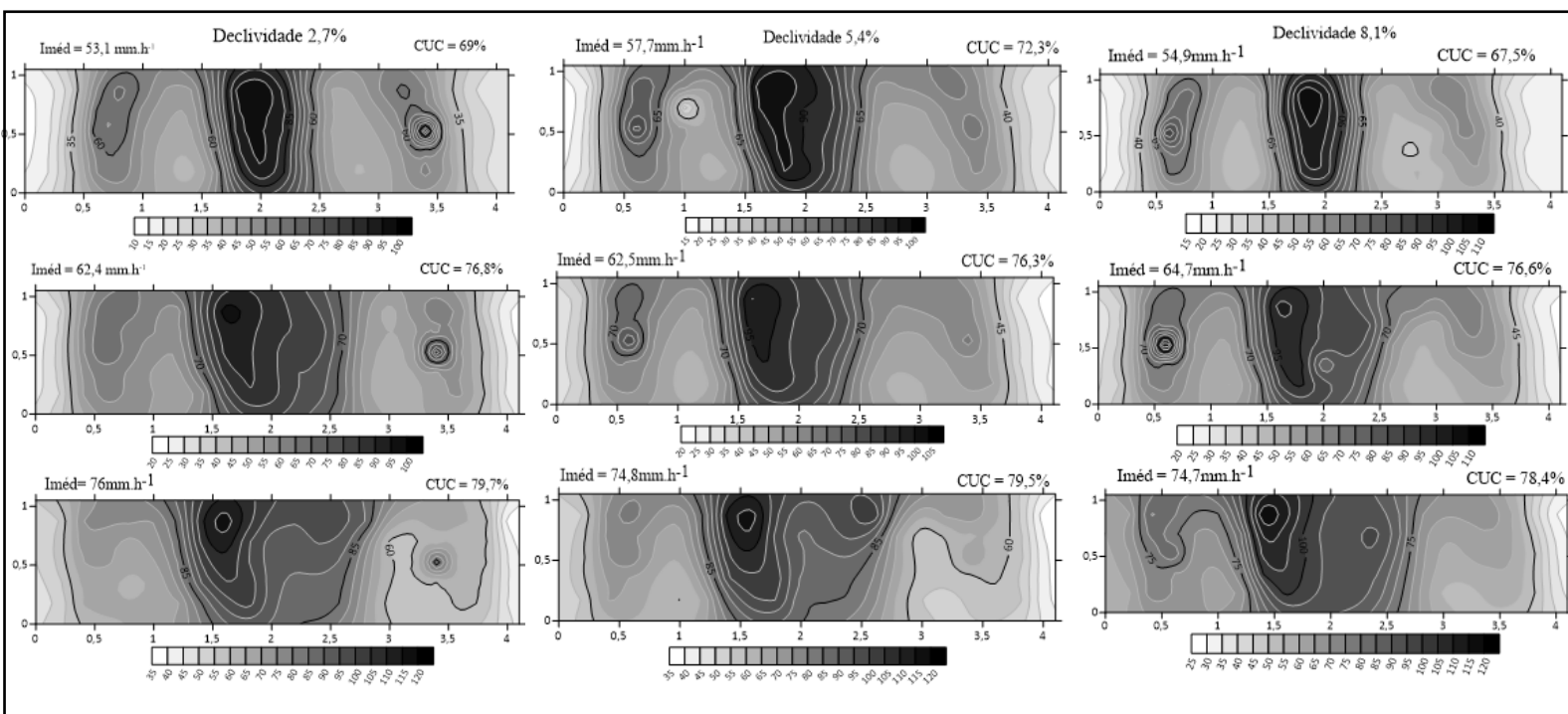


Figura 8 - Intensidade de precipitação (mm.h^{-1}) distribuída espacialmente, intensidade média de precipitação e coeficiente de uniformidade de Christiansen para as intensidades utilizadas e suas respectivas declividades.

Fonte: Da autora.

Pode-se perceber pela Figura 8 que o comportamento foi o mesmo, em todos os casos, para as três intensidades e para as três declividades, a maior intensidade ocorre na região central da superficial, apresentando valores menores de intensidade nas posições mais distantes e mais próximas ao exutório. Nota-se que os valores maiores de intensidade são na maior pressão ($\sim 74\text{mm.h}^{-1}$) variando de 25 a 120 mm.h^{-1} , enquanto as menores pressões (~ 54 e 64mm.h^{-1})

apresentaram menores valores de intensidade, que variaram de 10 a 110 mm.h⁻¹ e 20 a 110 mm.h⁻¹, respectivamente.

4.4 CONFIGURAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

No delineamento experimental definiu-se como variável independente a posição inicial em que o material (em suspensão e dissolvido) se encontrava. Com isto, delimitou-se na superfície impermeável três áreas diferentes, que representam as distâncias definidas pelo delineamento estatístico, onde em cada uma destas áreas houve a delimitação de 10 posições circulares equidistantes, local onde foi inserido o material em suspensão e dissolvido, em experimentos independentes (Figura 9).

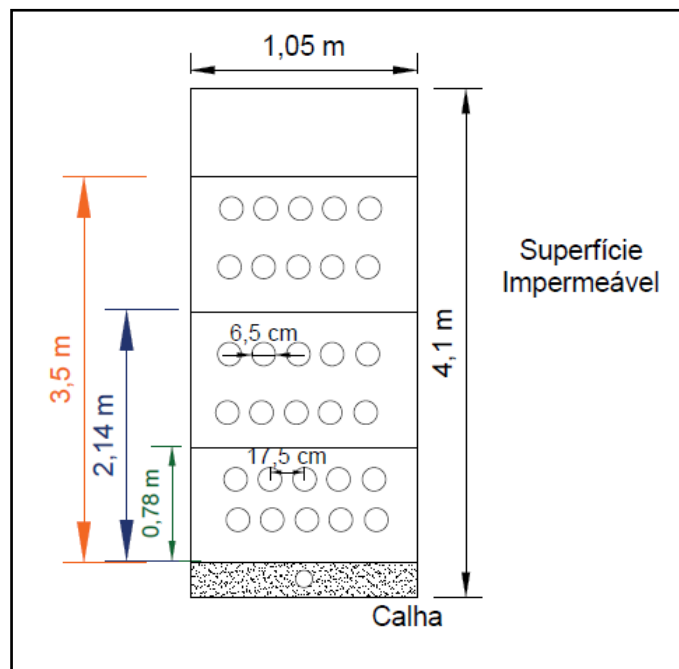


Figura 9 - Superfície impermeável com delimitação da área com finalidade de aplicação do material em suspensão e dissolvido.

Fonte: Da autora.

Para cada experimento a duração de precipitação foi de dois minutos, e para que a superfície apresentasse mesma característica de umidade, oito minutos anteriormente aos experimentos houve a aplicação de chuva durante um minuto.

4.4.1 Hidrogramas

O escoamento foi quantificado na calha da superfície impermeável. O tempo que se iniciou a coleta foi definido pelo momento em que ocorreu um filete contínuo de água nos primeiros experimentos (16 segundos após o início da precipitação), e o fim do escoamento, momento em que houve a pausa da coleta, foi quando o filete deixou de ser contínuo e passou a ser intermitente.

Foram feitos experimentos preliminares, onde o escoamento foi medido nos experimentos de material em suspensão e material dissolvido, contudo não foi evidenciado diferença acentuada entre eles, com isto os valores obtidos no hidrograma foram feitos apenas pelos experimentos de material em suspensão, por uma questão de logística, visto que é possível quantificar o escoamento e o transporte do material em suspensão com o mesmo recipiente de coleta.

Os hidrogramas foram construídos pelo método volumétrico. Houve a quantificação do escoamento coletando-se amostras, em dez recipientes, em intervalos de tempo suficiente para representar a ascensão, o pico e recessão do hidrograma, sendo os pontos médios dos tempos de coleta iguais a: 16,0; 19,5; 26,5; 33,5; 48,0; 74,0; 96,0; 124,0; 146,0; 163,5; 183,5 s. Após os ensaios os recipientes foram secados externamente e pesados, a massa de água anotada, e seu valor convertido em volume escoado e posteriormente em vazão por intervalo de tempo.

4.4.2 Polutogramas – Material em Suspensão

A areia (*Quarzsand Frechen F36*) foi o material em suspensão utilizado para a obtenção dos polutogramas. Este material possui granulometria variando de 0,090 a 0,355mm e suas características físicas e químicas estão apresentadas no Anexo I. Foram inseridos, sobre a superfície impermeável, para cada experimento, 7g do material, divididos em quantidades (0,7g) iguais em cada círculo delimitado.

A quantificação da passagem de material em suspensão foi feita na calha da superfície impermeável, e assim como no hidrograma, utilizou-se de dez recipientes onde a massa de areia transportada foi capturada e determinada pelo processo de filtração à vácuo. Os tempos determinados para coleta das amostras no recipiente variaram para cada experimento, visto que seu tempo inicial, pico e fim eram influenciados pelas variáveis independentes envolvidas. Desta forma, optou-se por utilizar tempos distintos que produziram uma análise representativa para cada experimento.

Os filtros utilizados no processo de filtração possuíam poros de abertura entre 0,7 e 1,6 μm , que foram submetidos a aquecimento de 100 °C, antes e depois da filtração, por um período mínimo de uma hora. Uma vez determinada a massa de areia transportada foi possível construir os polutogramas, sendo a concentração de massa de areia transportada em relação ao tempo (*massa de areia/tempo x tempo*).

4.4.3 Polutogramas – Material Dissolvido

O cloreto de sódio foi o material dissolvido utilizado para a obtenção dos polutogramas. A massa total de material dissolvido aplicado sobre a superfície foi de 2g, sendo 0,2g inserido em cada círculo demarcado na superfície impermeável.

Para quantificação da passagem de material dissolvido foi instalado na calha da superfície impermeável um condutivímetro (Verbier LabQuest) que monitorava a condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), em intervalos de 1 segundo. A concentração de sólidos totais dissolvidos foi

encontrada por um teste de calibração feito por Felice (2017), que converte os valores de condutividade elétrica (Figura 10).

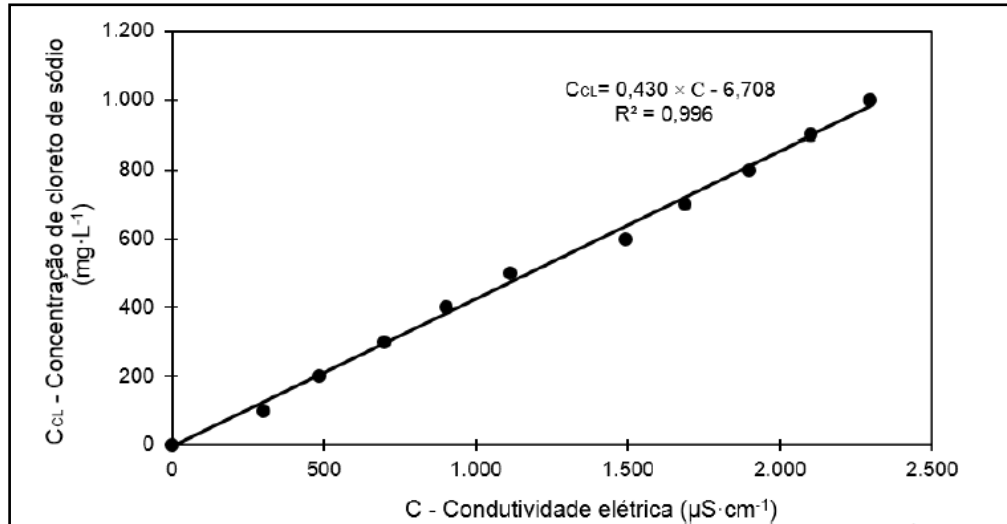


Figura 10 - Curva de calibração da relação entre condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e concentração de sólidos totais dissolvidos ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Fonte: Felice (2017, p. 38)

Antes de utilizar a equação apresentada na Figura 10 foi necessário descontar o valor de condutividade elétrica da água de abastecimento do simulador ($113,0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), para que assim a condutividade utilizada na conversão fosse somente àquela referente ao cloreto de sódio inserido na superfície. Uma vez feita a conversão de condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) pela concentração de cloreto de sódio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) tornou-se possível calcular a massa de material dissolvido transportado pelo escoamento superficial. A concentração de cloreto de sódio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) multiplicada pela vazão obtida no hidrograma resulta a descarga mássica cujo gráfico em função do tempo é aqui denominado de polutograma (*massa de cloreto de sódio/tempo x tempo*).

5 RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado todos os resultados obtidos nos experimentos, sendo estes os hidrogramas e polutogramas para material em suspensão e dissolvido e análise do delineamento experimental para cada variável dependente estudada para os dois materiais.

5.1 HIDROGRAMAS

Foram construídos hidrogramas para cada experimento realizado. A Figura 11 apresenta os hidrogramas obtidos para os 17 cenários estabelecidos no planejamento estatístico. Percebe-se que a posição inicial onde o material foi inserido, não interfere no escoamento superficial, as variáveis mais relevantes no escoamento são a declividade e intensidade de precipitação.

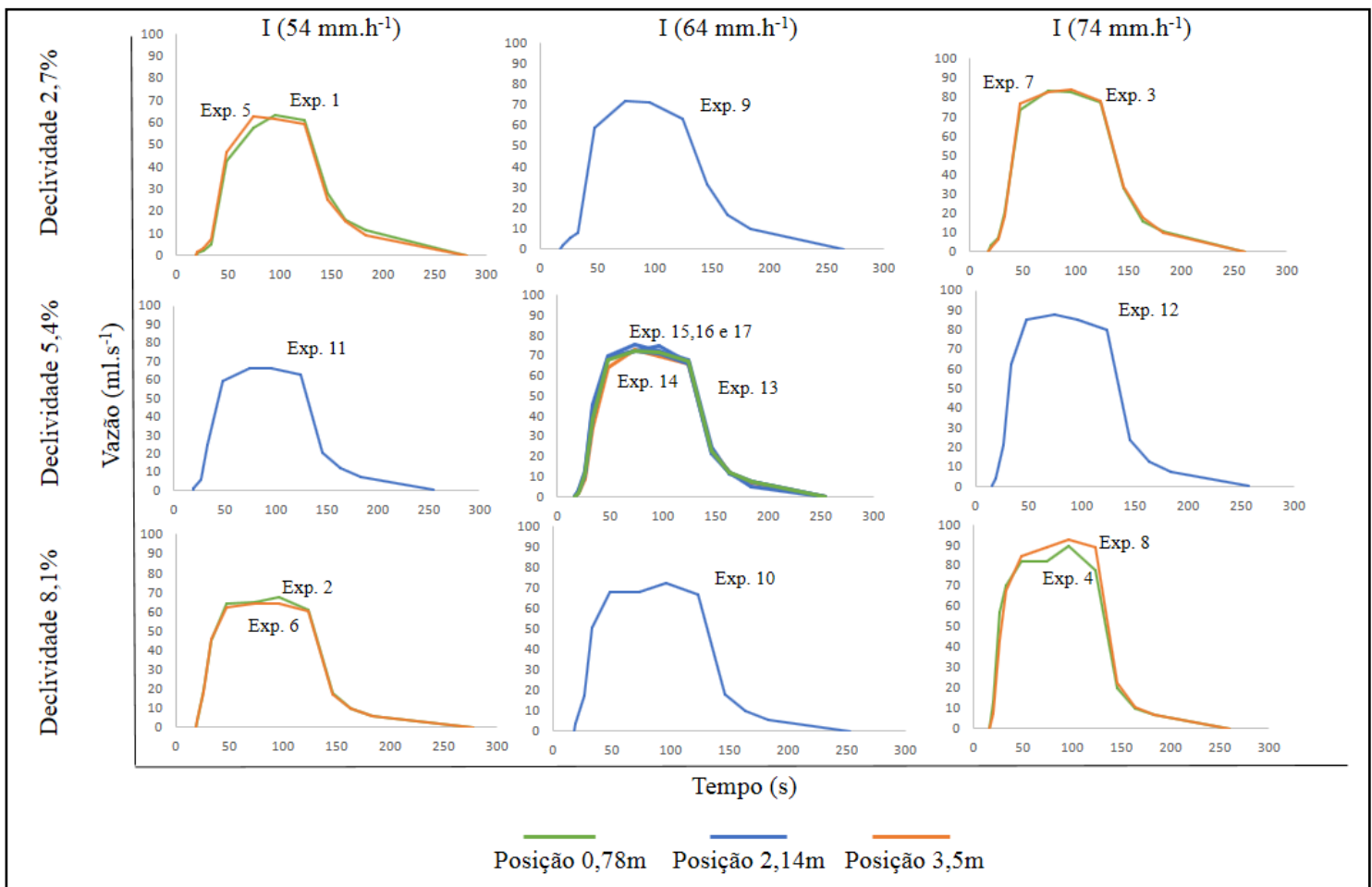


Figura 11 - Hidrogramas referentes a todos os cenários propostos no planejamento.

Fonte: Da autora.

Os hidrogramas mostraram que a presença de material na superfície não influencia no escoamento superficial. Os volumes totais de água escoado durante os experimentos foi calculado integrando-se os hidrogramas. Percebeu-se que os maiores volumes totais transportados foram para os experimentos 4 e 8, sendo os totais iguais a 9,9L e 10,0L respectivamente. Estes são os experimentos com cenários críticos para a declividade (8,1%) e intensidade de precipitação (74 mm.h⁻¹). Os menores volumes transportados foram exatamente para as menores declividades (2,7%) e menores intensidades (54 mm.h⁻¹), correspondente aos experimentos 1 e 5, com volumes iguais à 6,9L e 6,8L, respectivamente.

É possível avaliar pelos hidrogramas que os valores de pico (patamar) foram menores, para a menor intensidade (54mm.h⁻¹), sendo seus valores variando de 57,5 até 67,3 ml.s⁻¹, na Figura 11 é possível perceber que o patamar se mantém próximo a uma vazão de 60ml.s⁻¹, enquanto que para a intensidade de 64mm.h⁻¹ as vazões variaram de 58,9 a 75,3ml.s⁻¹, com valores de patamar próximo a 70ml.s⁻¹. A maior intensidade estudada (74mm.h⁻¹) apresentou valores de pico que variaram de 73 a 92,7 ml.s⁻¹, com valor de patamar próximo a 80ml.s⁻¹.

5.2 POLUTOGRAMAS – MATERIAL EM SUSPENSÃO

Foram feitos polutogramas com o material em suspensão para todos os 17 cenários definidos pelo delineamento estatístico. Os polutogramas geram os dados das variáveis dependentes estudadas no trabalho, que foram avaliadas em relação as variáveis independentes (declividade, intensidade de precipitação e posição do material). Todos os polutogramas do material em suspensão estão dispostos na Figura 12.

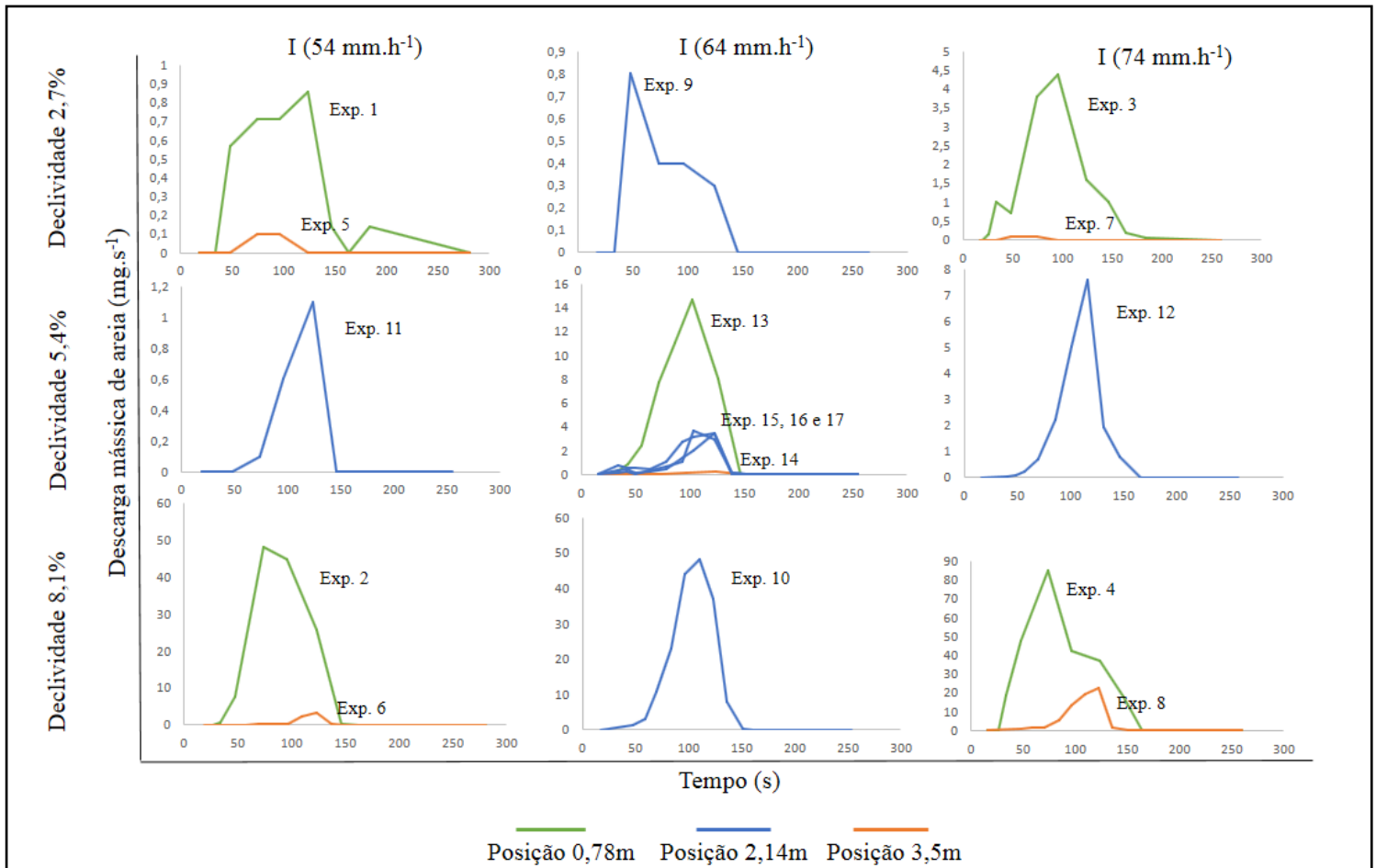


Figura 12 - Polutogramas do material em suspensão para todos os cenários previstos no planejamento.

Fonte: Da autora.

É possível perceber que a posição do material tem forte influência no transporte, diferentemente do escoamento. Pela Figura 12 é visto que não só a posição do material influencia o transporte do material em suspensão, como também as outras variáveis independentes estudadas, declividade e intensidade de precipitação. Analisando os polutogramas observa-se que o tempo inicial é mais tardio para todos os cenários em que o material se encontra mais distante ao exutório. É nítido, ainda, que os totais transportados, e os valores de pico são maiores para aquelas posições mais próximas ao exutório.

Os menores valores de descargas mássicas e de totais transportados, foram para as situações mais críticas, em que o material se encontrava na posição mais distante e com menor declividade, variando a intensidade de precipitação baixa e alta (experimento 5 e 7, respectivamente). Os maiores valores de descargas mássicas e total transportado também foram para a posição mais próxima do exutório e com maior declividade, com intensidade de precipitação baixa e alta (experimento 2 e 4, respectivamente).

5.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL – MATERIAL EM SUSPENSÃO

Na Tabela 3 foi apresentado os experimentos propostos pelo DFC, totalizando os 17 experimentos realizados. Com os polutogramas obtiveram-se os valores das variáveis dependentes estudadas, que são: tempo total para o transporte do material (T_{transp}), maior valor de descarga mássica transportada ($Pico$), tempo em que ocorre o maior valor mássico (T_p) e total transportado de massa ($Massa\ Total$), estes valores encontrados foram avaliados utilizando o *software* *PROTIMIZA EXPERIMENTAL DESIGN*®, onde foram relacionados com as variáveis independentes estudadas: declividade da superfície impermeável (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3). Na Tabela 4 estão apresentados os valores das variáveis dependentes obtidas pelos experimentos.

Tabela 4 - Variáveis dependentes obtidas para cada combinação de experimento proposto para material em suspensão.

Experimentos	x_1	x_2	x_3	T_{transp} (s)	$Pico$ ($mg.s^{-1}$)	T_p (s)	$Massa\ Total$ (mg)
1	2,7	54	0,78	130,0	0,8	124,0	70,8
2	8,1	54	0,78	112,5	48,3	74,0	3091,4
3	2,7	74	0,78	164,0	4,4	96,0	291,2
4	8,1	74	0,78	137,0	84,8	74,0	5567,5
5	2,7	54	3,5	76,0	0,1	85,0	4,9
6	8,1	54	3,5	104,0	3,43	124,0	94,2
7	2,7	74	3,5	62,5	0,1	61,0	4,4
8	8,1	74	3,5	103,0	22,3	123,0	856,7
9	2,7	64	2,14	112,5	0,8	48,0	43,3
10	8,1	64	2,14	103,0	48,0	110,0	2285,6
11	5,4	54	2,14	98,0	1,1	124,0	44,9
12	5,4	74	2,14	125,5	7,6	116,0	281,1
13	5,4	64	0,78	119,5	14,6	102,5	805,2
14	5,4	64	3,5	72,0	0,2	124,0	7,5
15	5,4	64	2,14	118,5	3,6	103,0	138,1
16	5,4	64	2,14	118,5	3,4	123,0	124,5
17	5,4	64	2,14	118,5	3,5	123,0	178,9

Fonte: Da autora.

5.3.1 Tempo de Transporte – T_{transp} (s)

O valor do T_{transp} , é o tempo total do transporte do material, a partir do momento em que ele se iniciou até seu término. O maior tempo encontrado (transporte mais lento) foi de 164 segundos (experimento 3), enquanto que o tempo de transporte mais rápido foi com 62,5 segundos (experimento 7). A partir dos resultados obtidos de T_{transp} foram calculados os coeficientes de regressão, observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficientes de regressão para reposta T_{transp} .

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t calculado	p - valor
Média	111,1	4,1	27,3	$2,2 \cdot 10^{-8}$
x₁	1,4	3,0	0,5	0,6
x₁²	2,2	5,8	0,4	0,7
x₂	7,1	3,0	2,4	$4,9 \cdot 10^{-2}$
x₂²	6,21	5,8	1,1	0,3
x₃	-24,5	3,0	-8,2	$7,0 \cdot 10^{-5}$
x₃²	-9,8	5,8	-1,7	0,1
x₁ · x₂	0,4	3,4	0,1	0,9
x₁ · x₃	14,1	3,4	4,2	$4,0 \cdot 10^{-3}$
x₂ · x₃	-9,1	3,4	-2,7	$3,0 \cdot 10^{-2}$

Fonte: Da autora

Os fatores significativos para o T_{transp} , considerando um nível de significância de 5%, observados na Tabela 5, foram o coeficiente da intersecção com o eixo de resposta (b_0), o efeito linear da intensidade de precipitação (b_2) e da posição do material (b_3), e os coeficientes de interação entre as intensidades com posição do material (b_2b_3) e declividade com posição do material (b_1b_3). A Equação (3) apresenta os coeficientes produzidos pelo modelo, recalculados após exclusão dos fatores não significativos, capaz de explicar 90,4% da variabilidade dos dados (R^2), dentro do intervalo de estudo definido.

$$y_1 = 110,3 + 7,1x_2 - 24,5x_3 + 14,1x_1x_3 - 9,1x_2x_3 \quad (3)$$

Foi feita a análise de variância (ANOVA) para a variável dependente estudada (T_{transp}). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - ANOVA para *Ttransp*.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F cálc.	p - valor
Regressão	8800,5	4	2200,1	28,2	$5,1 \cdot 10^{-6}$
Resíduos	937,0	12	78,1	-	-
Falta de Ajuste	937,0	10	93,7	Infinity	NaN
Erro Puro	0	2	0	-	-
Total	9737,5	16	-	-	-

Fonte: Da autora.

A tabela da ANOVA (Tabela 6) mostra um F calculado altamente significativo (p-valor modelo $<0,05$). O modelo não consegue calcular falta de ajuste pois não há diferença entre os dados obtidos das repetições, Tabela 4, apresentado um erro puro igual a zero. O modelo é considerado adequado visto o alto valor de R^2 , e ainda a boa representação dos dados (Figura 13), em que há similaridade entre os resultados obtidos experimentalmente versus os valores previstos pelo modelo estatístico-matemático (Equação 3).

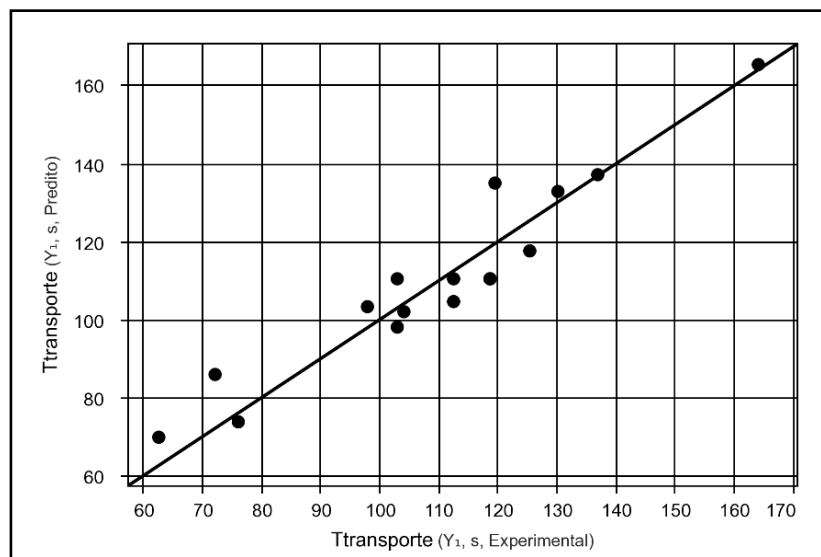


Figura 13 - Valores experimentais do *Ttransp* em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.

Fonte: Da autora.

Na Figura 14 encontra-se a superfície de resposta para *Ttransp*. Ao analisar a Figura 14(a), interação entre declividade (x_1) e intensidade de precipitação (x_2), nota-se, principalmente, que a declividade não interfere no *Ttransp*, apenas a intensidade de

precipitação, e um tempo de transporte de material mais rápido nas menores intensidades. Isto pode ser explicado pelo fato de que as menores intensidades não são capazes de transportar todo o material, ficando grande parte do material retido na superfície. A superfície de resposta representa a Equação (3), na qual observa-se que a declividade só interfere no tempo de transporte quando considera sua interação com a posição do material (x_3).

Ao analisar a superfície de resposta da posição do material (x_3) com a declividade (x_1), Figura 14(b), percebe-se que a posição mais próxima ao exutório combinada com a declividade mais baixa produzem tempos de transporte do material maiores. Esse tempo de transporte lento se deve principalmente à baixa declividade e ao fato do escoamento demorar para conseguir arrastar o material. O material localizado nas posições mais distantes ao exutório com declividade mais baixa produziram tempos menores, pois parte ficou retida na superfície. Fato interessante a ser observado é que, para as posições mais próximas do exutório, o aumento da declividade de 2,7% para 8,1% diminui o tempo de transporte de 149s para 120s, enquanto este mesmo aumento de declividade nas posições mais distantes produziram um aumento do tempo de transporte de 69s e 98s. Isto ocorre, provavelmente, porque na posição mais distante do exutório, o aumento da declividade reduz o tempo de transporte porque grande parte do material não é arrastado. Quando o material está localizado na posição mais próxima o aumento da declividade, acelera o escoamento e, provavelmente, fornece energia suficiente para o transporte. Esses resultados indicam que o aumento da declividade produz respostas inversas no tempo de resposta, dependendo da posição do material.

Ao analisar o tempo de transporte a partir da intensidade de precipitação (x_2) e a posição do material (x_3), Figura 14(c), percebe-se que maiores intensidades combinadas com posições próximas ao exutório, produzem transporte mais lento ($T_{transp} \sim 151s$).

Pela Equação (3) nota-se que as variáveis intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3) possuem maior influência no tempo de transporte se comparada com a declividade (x_1), pois possuem coeficiente linear e de interação, enquanto que a posição do material apresenta apenas coeficiente de interação quando comparada com a posição do material.

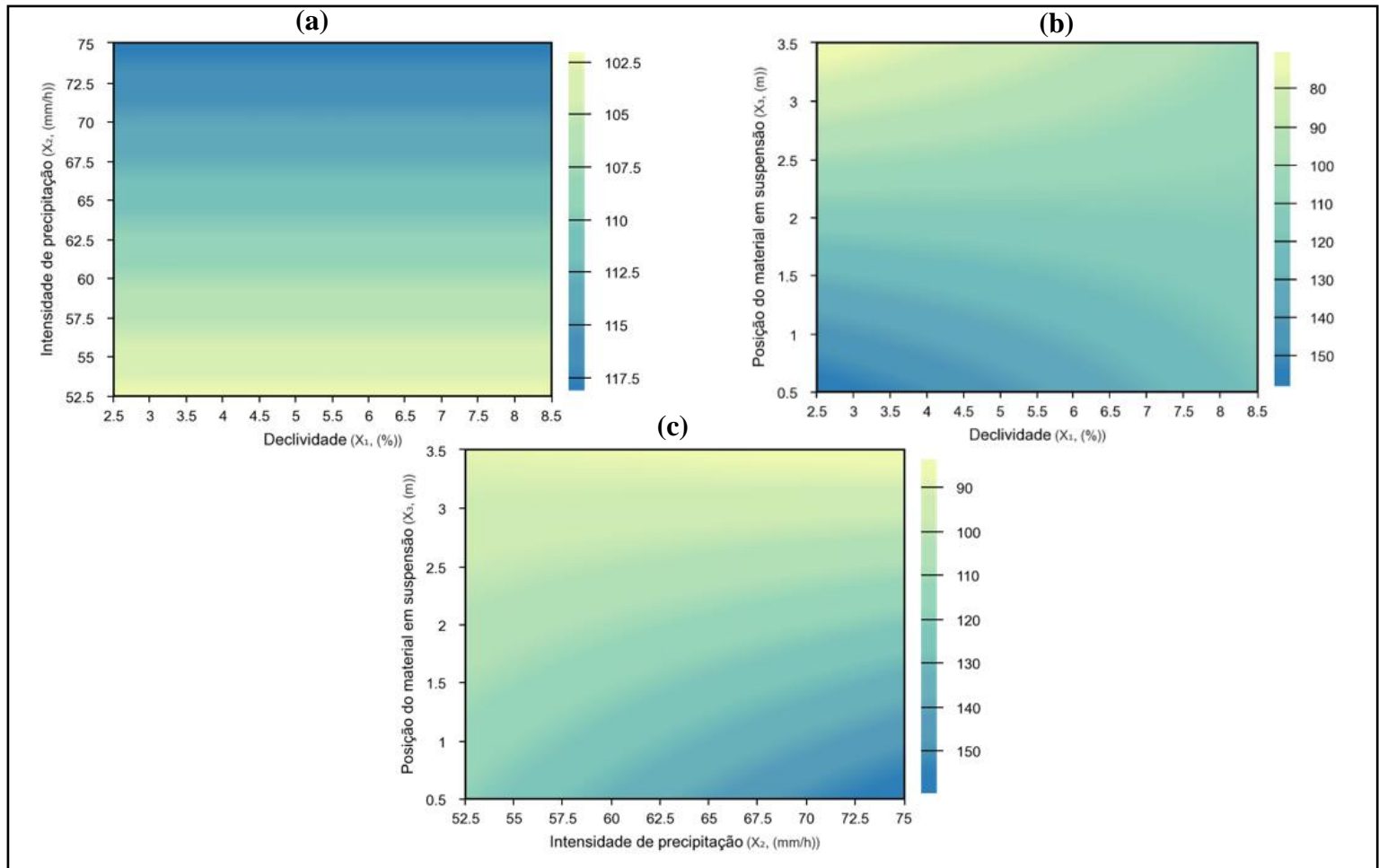


Figura 14 - Superfície de resposta para o T_{transp} em relação a declividade (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3).

Fonte: Da autora.

5.3.2 Valor de Pico – $Pico$ ($mg.s^{-1}$)

O valor de $Pico$ representa a maior descarga mássica de material transportada ($mg.s^{-1}$), sendo que a maior descarga mássica observada nos experimentos realizados foi de $84,8 mg.s^{-1}$, nas condições de maiores intensidade e declividade, e posição próxima ao exutório. Houve dois valores iguais para a menor descarga mássica transportada, $0,1 mg.s^{-1}$ obtidos nos experimentos com maior distância do exutório e menor declividade, o que dificultou o transporte, mesmo para menor ou maior intensidade de precipitação. Com os resultados obtidos dos valores de $Pico$ foi possível calcular os coeficientes de regressão, que estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficientes de regressão para reposta *Pico*.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t calculado	p - valor
Média	5,4	2,2	2,5	$4,1 \cdot 10^{-2}$
x₁	20,1	1,6	12,4	$5,0 \cdot 10^{-6}$
x₁²	17,5	3,1	5,6	$8,0 \cdot 10^{-4}$
x₂	6,5	1,6	4,0	$4,0 \cdot 10^{-3}$
x₂²	-2,6	3,1	-0,8	0,4
x₃	-12,7	1,6	-7,8	$1,0 \cdot 10^{-3}$
x₃²	0,5	3,1	0,2	0,9
x₁ · x₂	6,5	1,8	3,6	$8,0 \cdot 10^{-3}$
x₁ · x₃	-12,8	1,8	-7,1	$1,0 \cdot 10^{-4}$
x₂ · x₃	-2,6	1,8	-1,5	0,2

Fonte: Da autora.

Ao analisar a Tabela 7 percebe-se que os fatores significativos para o *Pico*, considerando nível de significância de 5%, foram o coeficiente relativo a intersecção do plano com o eixo de resposta, (b_0), coeficiente linear relacionados com todas variáveis independentes estudadas declividade, intensidade e posição do material, (b_1), (b_2) e (b_3), coeficiente quadrático para a declividade (b_{11}) e coeficientes de interação entre a declividade com a intensidade de precipitação (b_{1b_2}) e declividade com posição do material (b_{1b_3}), apresentados na Equação (4), sendo seus valores referentes à correção do coeficiente após exclusão dos fatores não significativos. O modelo é capaz de explicar 97,2% da variabilidade dos dados (R^2), dentro do intervalo de estudo.

$$y_2 = 4,9 + 20,1x_1 + 16,4x_1^2 + 6,5x_2 - 12,7x_3 + 6,5x_1x_2 - 12,8x_1x_3 \quad (4)$$

Tabela 8 - ANOVA para o *Pico*.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F cálc.	p - valor
Regressão	8822,53	6	1470,4	57,3	$3,6 \cdot 10^{-7}$
Resíduos	256,73	10	25,7	-	-
Falta de Ajuste	256,70	8	32,1	2052,5	$4,8 \cdot 10^{-4}$
Erro Puro	0,03	2	0,015	-	-
Total	9079,26	16	-	-	-

Fonte: Da autora.

Os valores da análise estatística (Tabela 8) apresentam boa adequação do modelo, apesar de apresentar p-valor falta de ajuste fora do estabelecido ($p\text{-valor} > 0,05$), devido aos valores das repetições serem muito próximos entre si, observa-se um p-valor do modelo altamente significativo ($p\text{-valor} < 0,05$) e alto valor de R^2 , sendo capaz de explicar 97,2% da variabilidade dos dados. Ainda é possível perceber a alta representatividade do modelo, em que há similaridade dos valores obtidos nos experimentos versus os previstos pelo modelo, como mostra a Figura 15.

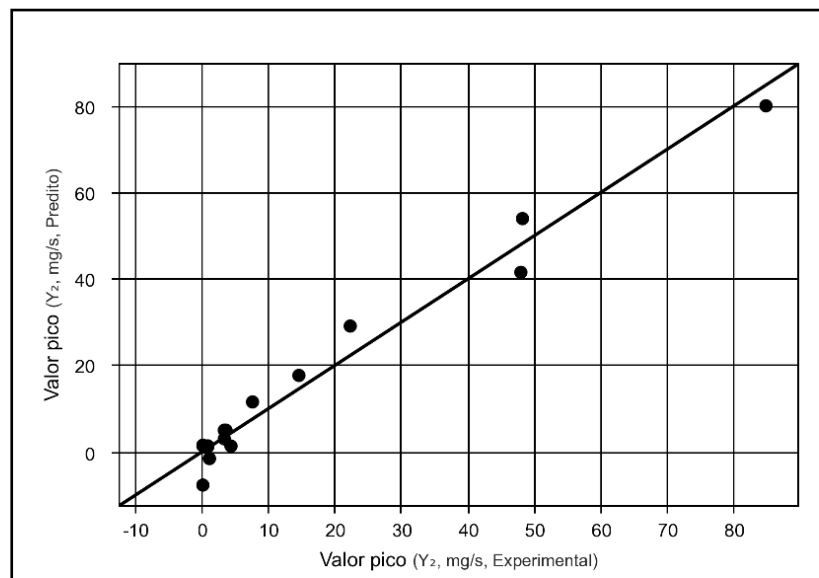


Figura 15 - Valores experimentais do *Pico* em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.

Fonte: Da autora.

As superfícies de respostas geradas pelo modelo são apresentadas na Figura 16. Pode-se destacar grande influência da declividade para o *Pico*, em relação as outras variáveis (intensidade e posição do material), devido a seu efeito quadrático (Equação (4)). Quando a declividade é considerada, Figura 16(a) e 16(b), os valores obtidos para o *Pico* são os mais altos observados. Na Figura 16(a) observa-se que *Pico* é maior nas maiores declividades e maiores intensidades atingindo até 60 mg.s^{-1} enquanto na Figura 16(b) o *Pico* atinge valores de até 80 mg.s^{-1} nas maiores declividades e nas posições mais próximas do exutório. Na Figura 16(c) é observado que o *Pico* é maior nas maiores intensidades de chuva e nas posições mais próximas do exutório.

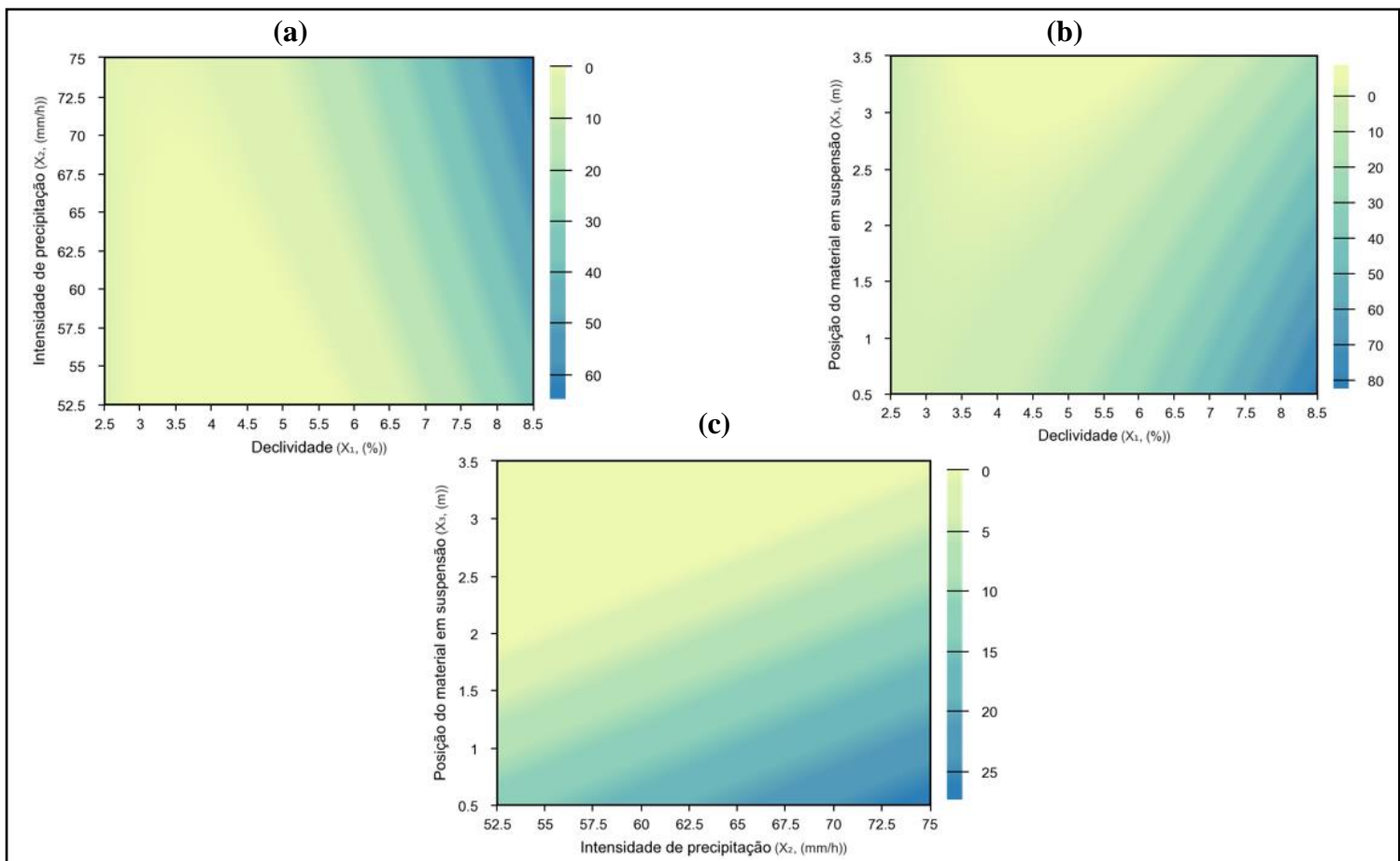


Figura 16 - Superfície de resposta para o *Pico*, em relação a declividade (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3).

Fonte: Da autora.

5.3.3 Tempo de Pico – T_p (s)

O tempo de pico T_p é o instante em que ocorreu a maior descarga mássica (*Pico*). Os valores de T_p variaram de 48 a 124 segundos. Os coeficientes de regressão para o T_p encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Coeficientes de regressão para reposta T_p .

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t calculado	p - valor
Média	112,8	6,6	17,1	$5,6 \cdot 10^{-7}$
x_1	9,1	4,9	1,9	0,1
x_1^2	-31,2	9,4	-3,3	$1,2 \cdot 10^{-2}$
x_2	-6,1	4,9	-1,2	0,2
x_2^2	9,8	9,4	1,0	0,3
x_3	4,6	4,9	0,9	0,4
x_3^2	3,0	9,4	0,3	0,7
$x_1 \cdot x_2$	6,4	5,4	1,2	0,3
$x_1 \cdot x_3$	21,6	5,4	4,0	$5,3 \cdot 10^{-3}$
$x_2 \cdot x_3$	0,4	5,4	0,1	0,9

Fonte: Da autora.

Na Tabela 9 os coeficientes relevantes, a um nível de significância de 5%, para o T_p , foram: o (b_0), o coeficiente quadrático da variável declividade (b_{11}), e o coeficiente de interação entre a declividade e posição do material (b_{13}). Como é possível perceber pela Equação (5), os coeficientes apresentados foram recalculados após exclusão dos fatores não significativos, onde o modelo é capaz de explicar 62,3% da variabilidade dos dados (R^2) para os intervalos estudados.

$$y_3 = 116,5 - 24,6x_1^2 + 21,6x_1x_3 \quad (5)$$

Tabela 10 - ANOVA para o T_p .

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F cálc.	p - valor
Regressão	6232,9	2	3116,5	11,5	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Resíduos	3777,3	14	269,8		
Falta de Ajuste	3510,6	12	292,5	2,2	0,3
Erro Puro	266,7	2	133,3		
Total	10010,2	16			

Fonte: Da autora

A Tabela 10 apresenta valores dentro do estabelecido para o p-valor da falta de ajuste (p-valor $>0,05$) e p – valor do modelo (p-valor $<0,05$) e ainda uma representação aceitável da capacidade de explicação do modelo (62,3%). Na Figura 17 observa-se os valores produzidos pelo modelo (Equação 5) versus os valores obtidos no experimento.

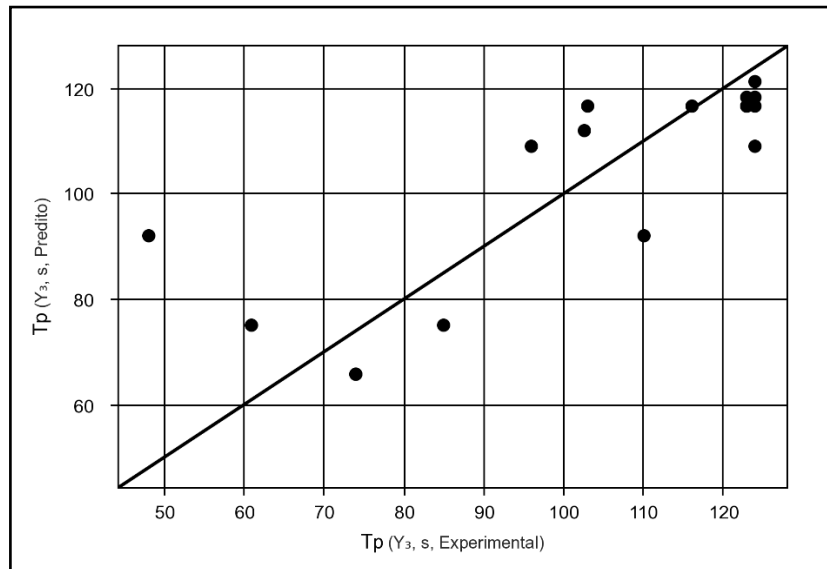


Figura 17 - Valores experimentais do T_p em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.

Fonte: Da autora.

A única superfície de resposta gerada pelo modelo (Figura 18) apresenta a relação entre a declividade e posição do material. Pela Equação (5) pode-se observar que a intensidade de precipitação não influencia no T_p . A Figura 18 ilustra a interação entre a posição do material (x_3) e declividade (x_1), observa-se que os menores valores de T_p , pico atingido mais rapidamente, encontra-se nas regiões com a posição do material próximo ao exutório

combinado com maiores declividades. Contudo destaca-se também, na Figura 18, que nas baixas declividades, o aumento da posição do material apresenta menores tempos de pico. Isto deve-se ao fato de que quando o material encontra-se mais distante do exutório apenas pequena quantidade de material é transportada, ficando grande parte retida na superfície e consequentemente atingindo o valor de T_p mais rapidamente.

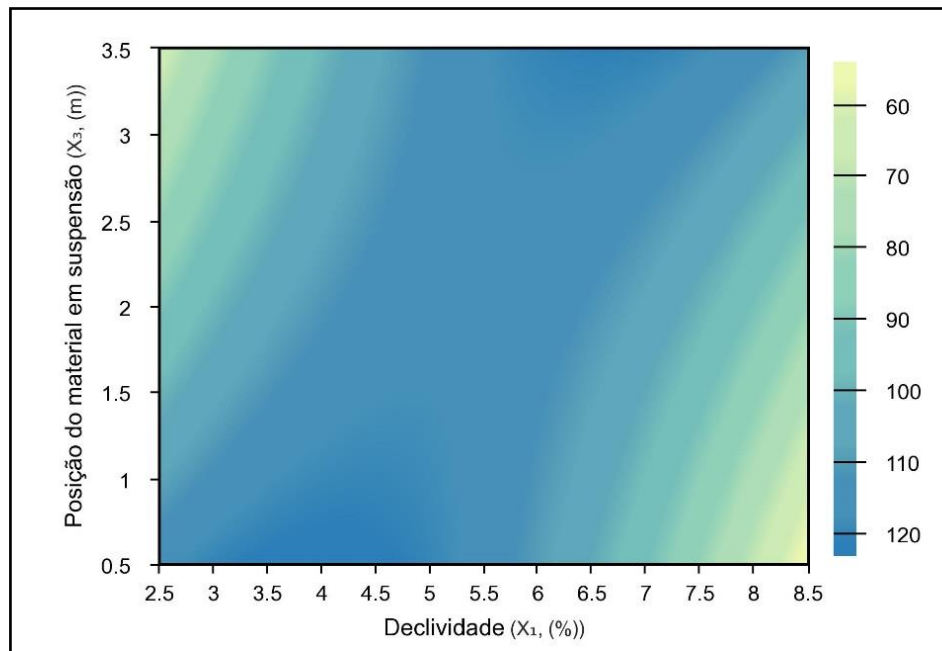


Figura 18 - Superfície de resposta para o T_p em relação a declividade (x_1) e posição do material (x_3).

Fonte: Da autora.

5.3.4 Massa Total Transportada – *Massa Total (mg)*

A *Massa Total* é a massa que foi transportada durante todo o escoamento, obtida pela integral dos polutogramas. A maior massa transportada, 5,5g, ocorreu nos experimentos em que a intensidade de precipitação e declividade eram maiores e posição do material mais próximo ao exutório (experimento 4). Neste caso, passou pelo exutório cerca de 80% da massa disposta na superfície. As menores massas transportadas foram de aproximadamente 0,005g, o que mostra que menos de 1% da massa disposta na superfície foi transportada pelo escoamento. Estas situações, de pouco transporte ocorreram nas situações com declividade mais baixa,

posição do material mais distante do exutório e intensidade alta e baixa, isto pelo fato da posição do material ser distante e a intensidade não ter capacidade de transporte (experimento 5 e 7). Os coeficientes de regressão encontrados para a *Massa Total* apresentam-se na Tabela 11.

Tabela 11 - Coeficientes de regressão para reposta *Massa Total*.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t calculado	P - valor
Média	190,4	165,3	1,1	0,3
x₁	1148,1	122,2	9,4	3,0.10 ⁻⁵
x₁²	941,6	236,1	4,0	5,0.10 ⁻³
x₂	369,5	122,2	3,0	2,0.10 ⁻²
x₂²	-59,8	236,1	-0,2	0,8
x₃	-885,8	122,2	-7,2	1,0.10 ⁻⁴
x₃²	183,5	236,1	0,8	0,5
x₁ · x₂	377,3	136,6	2,8	2,0.10 ⁻²
x₁ · x₃	-919,4	136,6	-6,7	2,0.10 ⁻⁴
x₂ · x₃	-241,8	136,6	-1,8	0,1

Fonte: Da autora.

A Tabela 11 apresenta os coeficientes significativos para a *Massa Total*, com nível de significância de 5%, estes foram: o coeficiente de intersecção com o eixo de resposta (b₀), coeficiente linear para declividade, intensidade de precipitação e posição do material, (b₁), (b₂) e (b₃), coeficiente quadrático para declividade (b₁₁), e coeficiente de interação entre declividade e intensidade de precipitação (b_{1b2}) declividade e posição do material (b_{1b3}) apresentados na Equação (6), em que os coeficientes significativos foram recalculados após exclusão dos fatores não significativos. O modelo, dentro do intervalo estudado, é capaz de explicar 95,5% da variabilidade dos dados (R²).

$$y_4 = 225,7 + 1148,1x_1 + 1005,3x_1^2 + 369,5x_2 - 885,8x_3 + 377,3x_1x_2 - 919,4x_1x_3 \quad (6)$$

Tabela 12 - ANOVA para o *Massa Total*.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F cálc.	p - valor
Regressão	34455680,2	6	5742613,3	35,8	$3,0 \cdot 10^{-6}$
Resíduos	1603257,9	10	160325,8		
Falta de Ajuste	1601654,9	8	200206,9	249,8	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Erro Puro	1602,9	2	801,5		
Total	36058938,1	16			

Fonte: Da autora.

Pela análise estatística, ANOVA, (Tabela 12) nota-se um p-valor (modelo) altamente significativo ($<0,05$), e alta porcentagem de variação explicada pelo modelo, dentro dos intervalos estudados, ($R^2 = 95,5\%$), apesar de apresentar um p-valor de falta de ajuste fora do estabelecido, o modelo é considerado adequado, visto a similaridade dos valores experimentais versus os valores obtidos com o modelo estatístico-matemático (Figura 19).

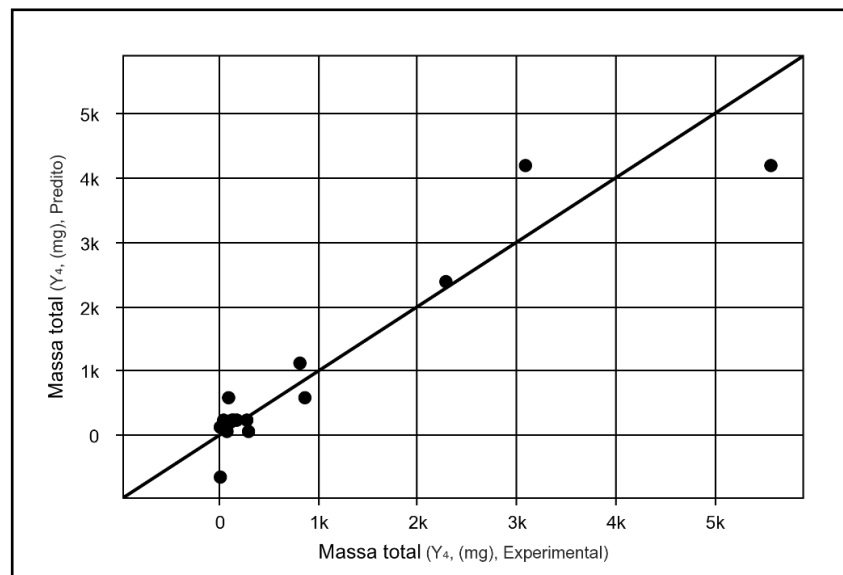


Figura 19 - Valores experimentais da *Massa Total* em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.

Fonte: Da autora.

A superfície de resposta (Figura 20), gerada pelo modelo relaciona a *Massa Total* com as variáveis independentes, declividade, intensidade e posição do material. Ao aumentar a declividade, Figura 20(a), obtém-se maior *Massa Total*, com o aumento da intensidade de chuva, obtendo-se valores máximos de ordem de 3500mg aproximadamente. Percebe-se

semelhante comportamento quando comparado a posição do material e a declividade, Figura 20(b), em que o transporte de massa é maior para maiores declividades e nas posições próximas do exutório, obtendo-se valores próximos de 5000mg. Estes valores são máximos transportado, evidenciam que a massa transportada depende fortemente da declividade e posição do material (efeito quadrático da declividade), com pouca influência da intensidade de chuva.

A relação entre intensidade de precipitação e posição do material, Figura 20(c), apresenta interação entre seus efeitos, as posições mais próximas ao exutório combinados com a maior intensidade, transportam maior quantidade de material, com máximos de até 1500mg.

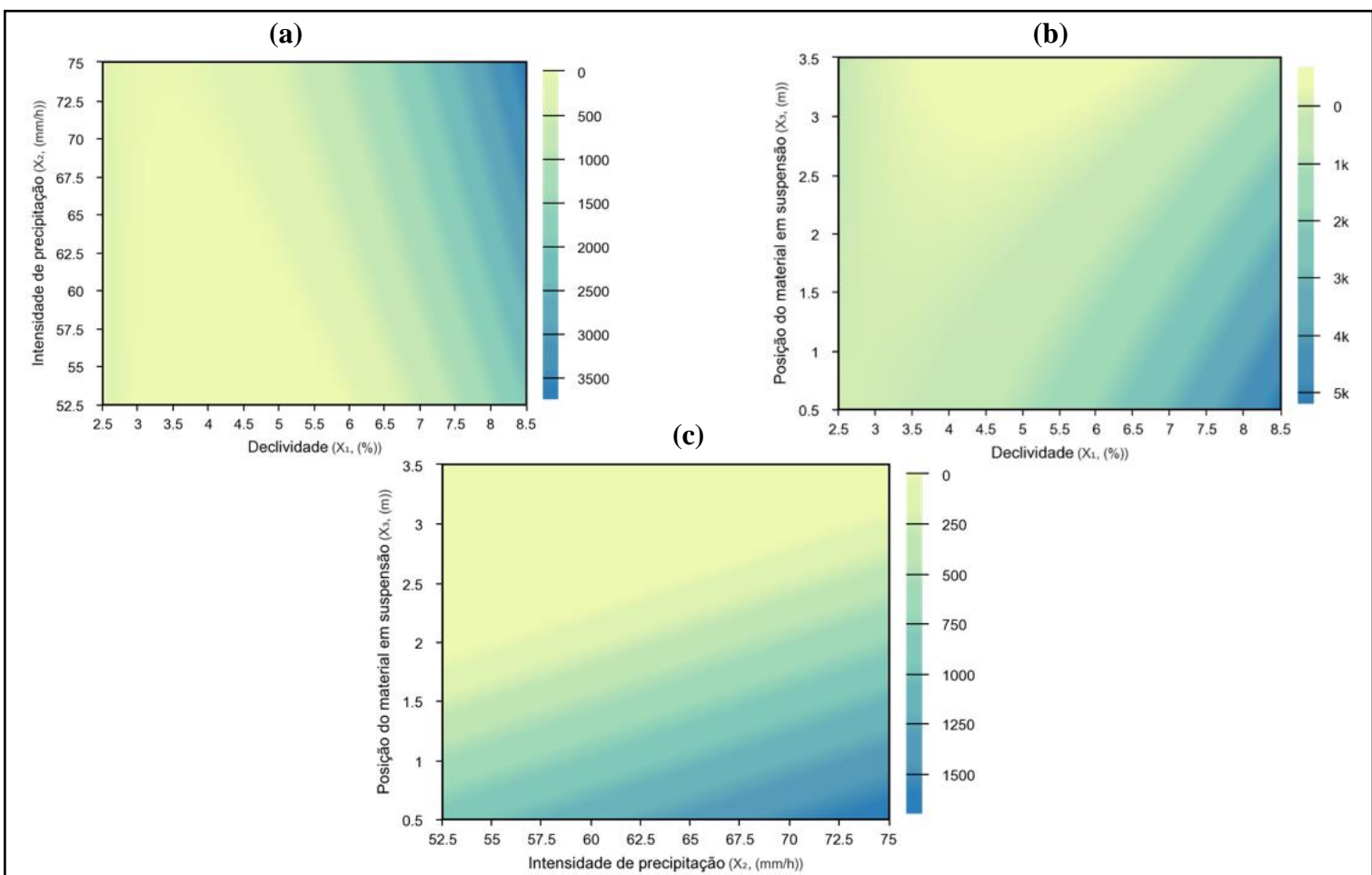


Figura 20 - Superfície de resposta para o *Massa Total* em relação a intensidade de declividade (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3).

Fonte: Da autora.

5.4 POLUTOGRAMAS – MATERIAL DISSOLVIDO

Foram feitos polutogramas para todos os cenários com o material dissolvido, e a partir dos dados obtidos dos polutogramas realizou-se as análises das variáveis dependentes, que foram definidas no delineamento experimental. Os polutogramas para todos os cenários estão dispostos na Figura 21.

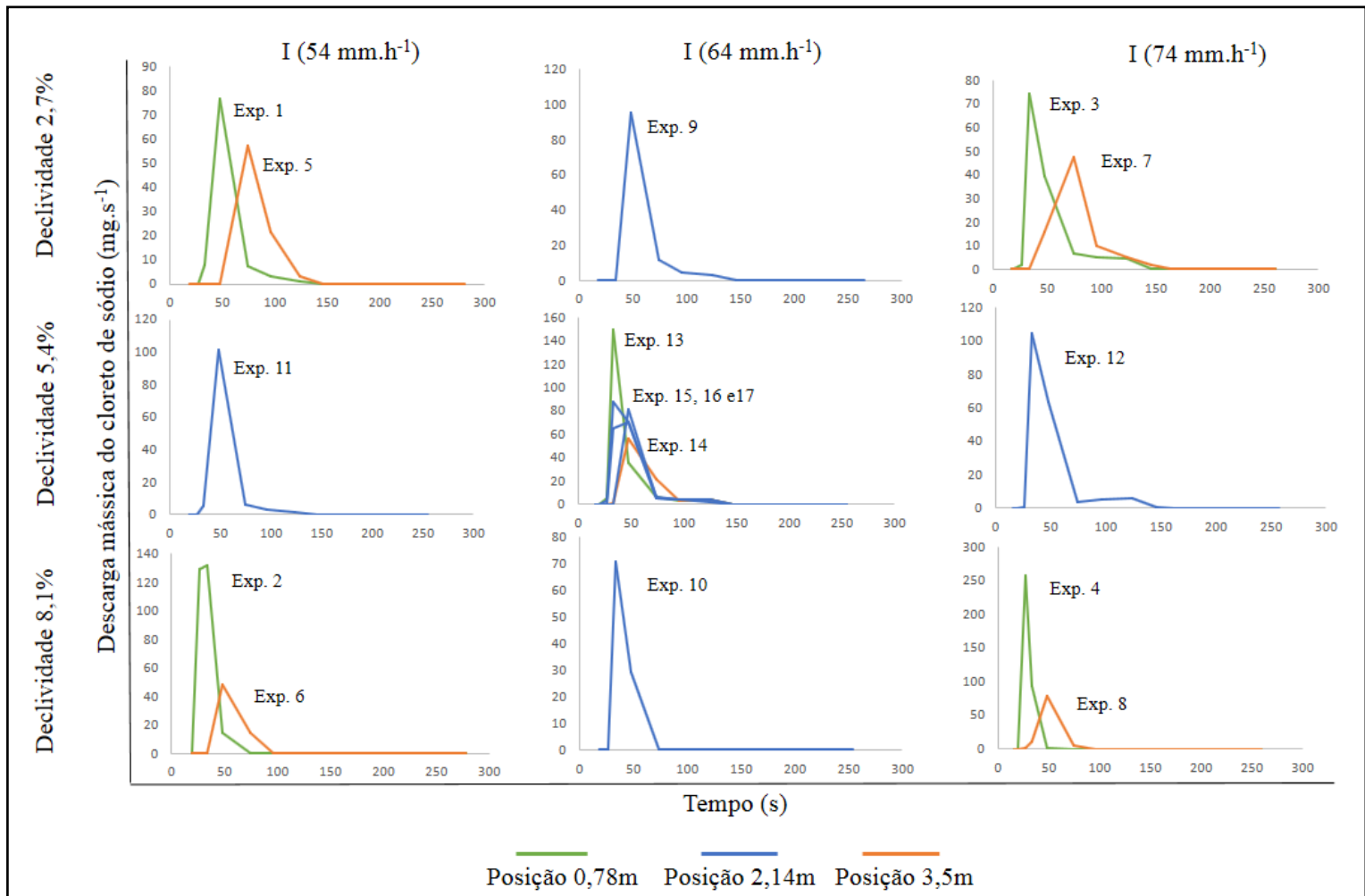


Figura 21 - Polutogramas do material dissolvido para todos os cenários do planejamento.

Fonte: Da autora.

Como para o material em suspensão e diferentemente do escoamento superficial, a posição do material dissolvido possui forte influência no transporte. Ao analisar a Figura 21 percebe-se que não somente a posição do material influencia no transporte como também a intensidade de precipitação e a declividade. Avaliando os cenários estudados é possível perceber que o tempo de transporte para as posições mais distantes ao exutório são mais

demorados quando comparados a posições próximas. É possível observar ainda que os valores de descarga mássica e os totais transportados são maiores para as posições mais próximas ao exutório, e que os maiores valores de descarga mássica são atingidos mais rapidamente para as posições próximas.

O maior valor de descarga mássica ($257,3 \text{ mg.s}^{-1}$) e a maior massa total transportada (1,98g) corresponde a situação mais crítica, em que a posição é a mais próxima ao exutório, maior intensidade de precipitação e maior declividade (Experimento 4). O menor valor de pico ($47,4 \text{ mg.s}^{-1}$) observado ocorre na situação com menor declividade, posição mais distante ao exutório, apresentando maior intensidade (Experimento 7). Enquanto que a menor massa total transportada (0,93g) ocorreu na menor intensidade de precipitação, posição mais distante ao exutório com maior declividade (Experimento 6).

5.5 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL – MATERIAL DISSOLVIDO

O delineamento experimental utilizado no trabalho propôs os cenários necessários para obtenção dos resultados, como apresenta a Tabela 3. Assim como para o material em suspensão, utilizou-se do *software* *PROTIMIZA EXPERIMENTAL DESIGN*®, para a análise das variáveis dependentes com as variáveis independentes. Na Tabela 13 apresenta-se os resultados para as variáveis dependentes em cada cenário relacionadas com a declividade (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3).

Tabela 13 - Variáveis dependentes obtidas para cada combinação do experimento proposto.

Experimentos	x1	x2	x3	<i>T</i>transp (s)	<i>Pico</i> (mg.s⁻¹)	<i>Tp</i> (s)	<i>Massa Total</i> (mg)
1	2,7	54	0,78	112,5	76,5	48,0	1329,0
2	8,1	54	0,78	54,5	132,1	33,5	1825,0
3	2,7	74	0,78	126,5	74,3	33,5	1407,0
4	8,1	74	0,78	54,5	257,3	26,5	1980,0
5	2,7	54	3,5	72,0	56,9	74,0	1381,0
6	8,1	54	3,5	62,5	48,4	48,0	933,0
7	2,7	74	3,5	115,5	47,4	74,0	1304,0
8	8,1	74	3,5	69,5	78,1	48,0	1244,0
9	2,7	64	2,14	112,5	95,3	48,0	1682,0
10	8,1	64	2,14	47,5	70,5	33,5	943,0
11	5,4	54	2,14	112,5	101,6	48,0	1652,0
12	5,4	74	2,14	137,0	104,6	33,5	1923,0
13	5,4	64	0,78	119,5	149,1	33,5	1859,0
14	5,4	64	3,5	112,5	56,1	48,0	1262,0
15	5,4	64	2,14	112,5	70,3	48,0	1699,0
16	5,4	64	2,14	98,0	81,1	48,0	1325,0
17	5,4	64	2,14	119,5	87,2	33,5	1871,0

Fonte: Da autora

5.5.1 Tempo de Transporte - *T*transp (s)

O *T*transp para o material dissolvido variou de 47,5s (experimento 10), até o maior tempo de transporte 137s (experimento 12). Os resultados obtidos produziram coeficientes de regressão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Coeficientes de regressão para reposta *Ttransp*.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t calculado	p - valor
Média	113,9	3,9	29,4	$1,9 \cdot 10^{-12}$
x₁	-25,1	2,8	-8,8	$5,0 \cdot 10^{-5}$
x₁²	-36,8	5,5	-6,7	$3,0 \cdot 10^{-4}$
x₂	8,9	2,9	3,1	$2,0 \cdot 10^{-2}$
x₂²	7,9	5,5	1,4	0,2
x₃	-3,5	2,9	-1,2	0,2
x₃²	-0,8	5,5	-0,1	0,9
x₁ · x₂	-6,3	3,2	-2,0	$9,0 \cdot 10^{-2}$
x₁ · x₃	9,3	3,2	2,9	$2,0 \cdot 10^{-2}$
x₂ · x₃	4,6	3,2	1,4	0,2

Fonte: Da autora.

Analisando a Tabela 14 percebe-se que o *Ttransp* foi influenciado, considerando nível de significância de 5%, pelo coeficiente da intersecção com o eixo de resposta (b_0), coeficientes lineares para a declividade e intensidade de precipitação (b_1) e (b_2), respectivamente, coeficiente quadrático da declividade, (b_{11}), e coeficiente de interação da declividade com a posição do matéria (b_1b_3), como é apresentado na Equação 7, onde os coeficiente foram corrigidos após exclusão dos fatores não significativos. A porcentagem de variação explicada pelo modelo é de 90% (R^2), dentro dos intervalos de estudo.

$$y_1 = 115,9 - 25,1 x_1 - 33,2x_1^2 + 8,9x_2 + 9,3x_1x_3 \quad (7)$$

Tabela 15 - ANOVA para o *Ttransp*.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F cálc.	p - valor
Regressão	12293,7	4	3073,4	27,1	$6,3 \cdot 10^{-7}$
Resíduos	1361,9	12	113,4		
Falta de Ajuste	1121,4	10	112,1	0,9	0,6
Erro Puro	240,5	2	120,2		
Total	13655,6	16			

Fonte: Da autora.

A ANOVA (Tabela 15) apresenta boa adequação do modelo, visto os valores adequados de p-valor do modelo ($<0,05$) e p-valor da falta de ajuste ($>0,05$), e ainda uma alta capacidade

de explicação do modelo (90%). Na Figura 22 é possível observar a similaridade dos valores obtidos experimentalmente versus os valores do modelo estatístico-matemático.

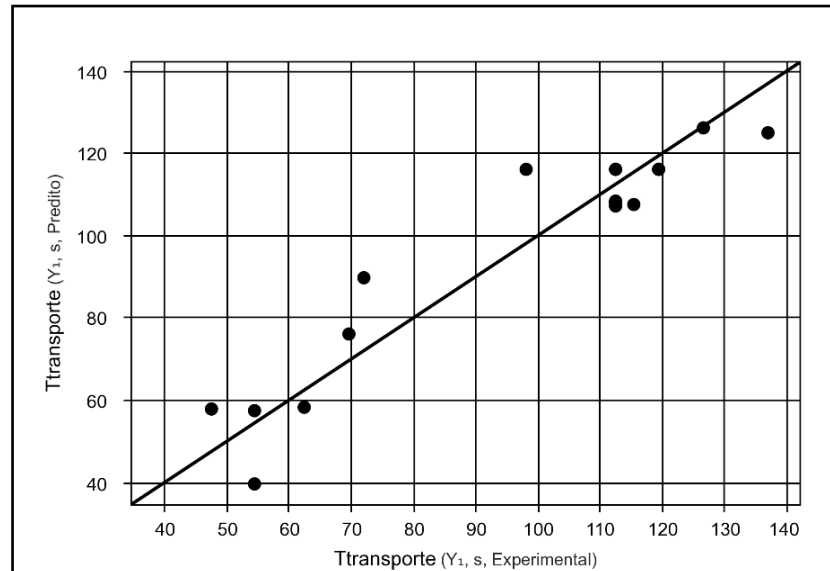


Figura 22 - Valores experimentais do T_{transp} em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.

Fonte: Da autora.

As superfícies de respostas geradas pelo modelo para o T_{transp} são apresentadas na Figura 23. Verifica-se que T_{transp} diminui com o aumento da declividade, o que era esperado, porém para uma declividade fixa, o T_{transp} é aproximadamente constante com o aumento da intensidade, Figura 23(a). Comportamento semelhante é observado na Figura 23(b), em que o T_{transp} diminui com o aumento da declividade, porém se mantém aproximadamente constante, para uma declividade fixa, independentemente da posição do material. Na Figura 23(c) observa-se aumento do T_{transp} com o aumento da intensidade de precipitação, para uma mesma posição do material. Nota-se assim maior influência da intensidade, em relação a posição do material, visto o coeficiente linear presente na Equação 7.

Deste modo, verifica-se que a declividade possui maior influência sobre as outras variáveis independentes estudadas (intensidade de precipitação e posição do material) devido ao seu efeito quadrático.

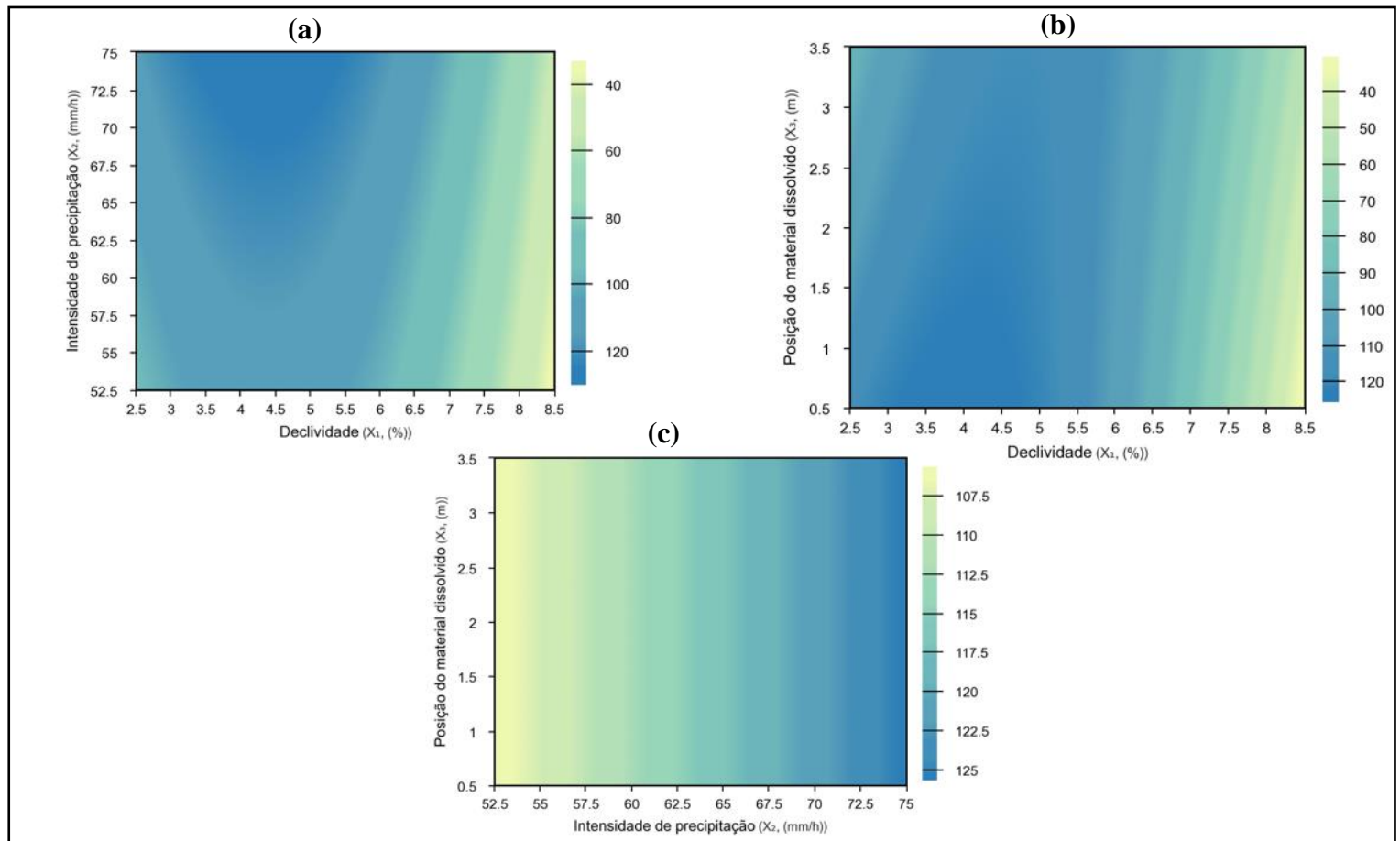


Figura 23 - Superfície de resposta para o T_{transp} em relação a declividade (x_1), intensidade de precipitação (x_2) e posição do material (x_3).

Fonte: Da autora.

5.5.2 Valor de Pico – Pico ($mg.s^{-1}$)

O valor de pico corresponde a maior descarga mássica de material transportado. Os experimentos de material dissolvido apresentaram valor máximo de $257,3 mg.s^{-1}$ no experimento 4, nos casos de maior declividade, intensidade e proximidade do exutório. A menor concentração encontrada nos ensaios foi de $47,4 mg.s^{-1}$, e corresponde ao experimento 7, em que a declividade era mais baixa e posição mais distante, contudo com maior intensidade de precipitação. Os coeficientes de regressão para o Pico estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Coeficientes de regressão para reposta *Pico*.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t calculado	p - valor
Média	87,1	11,7	7,4	$1,0 \cdot 10^{-4}$
x₁	23,6	8,7	2,7	$3,0 \cdot 10^{-2}$
x₁²	-9,7	16,7	-0,6	0,6
x₂	14,6	8,7	1,7	0,1
x₂²	10,5	16,7	0,6	0,5
x₃	-40,3	8,7	-4,6	$2,0 \cdot 10^{-3}$
x₃²	9,9	16,7	0,6	0,6
x₁ · x₂	20,8	9,7	2,1	$7,0 \cdot 10^{-2}$
x₁ · x₃	-27,0	9,7	-2,8	$3 \cdot 10^{-2}$
x₂ · x₃	-12,9	9,7	-1,3	0,2

Fonte: Da autora.

Ao analisar a Tabela 16 percebeu-se que os fatores importantes, para um nível de significância de 5%, foram o coeficiente de intersecção com o eixo, (b_0), coeficiente linear para a declividade e posição do material (b_1) e (b_3), respectivamente, e coeficiente de interação entre a declividade e posição do material (b_1b_3), após a exclusão dos fatores não significativos os coeficientes foram recalculados e apresentados na Equação 8. O modelo produzido é capaz de explicar 67,9% da variabilidade dos dados (R^2), dentro dos intervalos de estudo.

$$y_2 = 93,3 + 23,6x_1 - 40,2x_3 - 27,1x_1x_3 \quad (8)$$

Tabela 17: ANOVA para o *Pico*.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F cálc.	p - valor
Regressão	27619,7	3	9206,6	9,2	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Resíduos	13031,9	13	1002,5		
Falta de Ajuste	12885,3	11	1171,4	16,0	$6,0 \cdot 10^{-2}$
Erro Puro	146,6	2	73,3		
Total	406516,0	16			

Fonte: Da autora.

A análise estatística para o *Pico* (Tabela 17) possui valores adequados para o p-valor (modelo) ($<0,05$) e p-valor (falta de ajuste) $>0,05$, e ainda valor satisfatório de R^2 (67,9%), na

Figura 24 é possível observar os valores obtidos experimentalmente versus os valores do modelo estatístico-matemático.

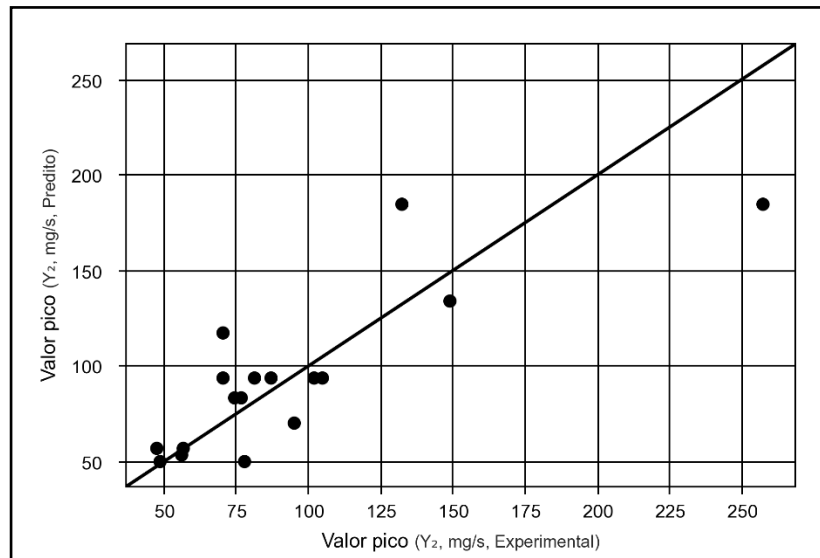


Figura 24 - Valores experimentais do *Pico* em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.

Fonte: Da autora.

A superfície de resposta (Figura 25) gerada pelo modelo para estudar o *Pico* relaciona a declividade com a posição do material. Observa-se que a intensidade de precipitação não influencia o valor de descarga mássica, conforme modelo obtido (Equação 8). A combinação de maior declividade com posição mais próxima ao exutório resulta em maiores valores de concentração de *Pico*.

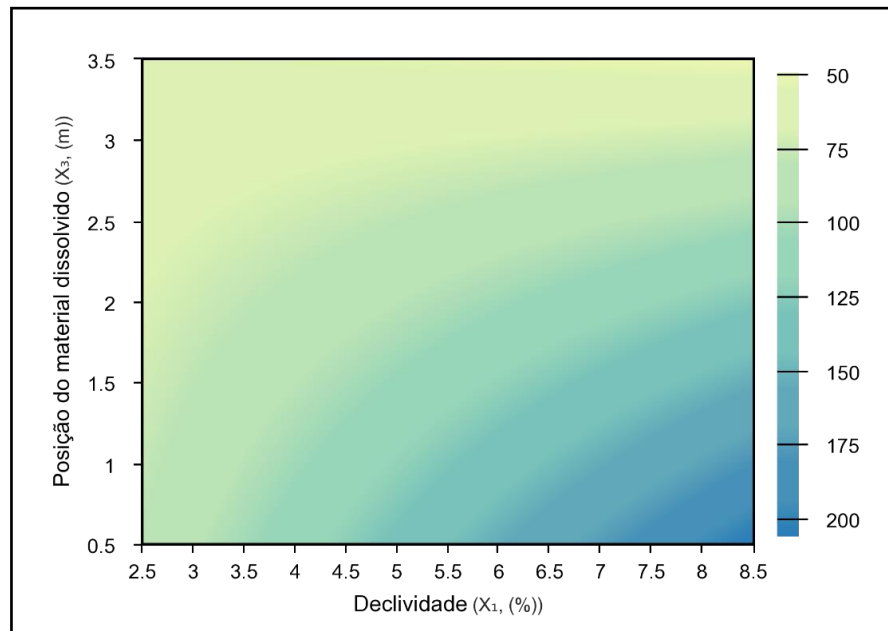


Figura 25 - Superfície de resposta para o *Pico* em relação a declividade (x_1) e posição do material (x_3).
Fonte: Da autora.

5.5.3 Tempo de Pico – T_p (s)

O tempo de pico é o instante em que ocorre o maior valor de descarga mássica. Os valores de pico variaram entre 26,5 a 74 segundos, para os experimentos 4 e 5 respectivamente. A Tabela 18 apresenta os valores dos coeficientes de regressão encontrados pelos resultados para o T_p .

Tabela 18: Coeficientes de regressão para reposta Tp .

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	T calculado	P - valor
Média	40,4	2,7	14,7	$1,0 \cdot 10^{-6}$
x_1	-8,8	2,0	-4,3	$3 \cdot 10^{-3}$
x_1^2	2,4	3,9	0,6	0,5
x_2	-3,6	2,0	-1,8	0,1
x_2^2	2,4	3,9	0,6	0,5
x_3	11,7	2,0	5,8	$6,0 \cdot 10^{-4}$
x_3^2	2,4	3,9	0,6	0,5
$x_1 \cdot x_2$	0,9	2,3	0,4	0,7
$x_1 \cdot x_3$	-3,8	2,3	-1,7	0,1
$x_2 \cdot x_3$	2,7	2,3	1,2	0,3

Fonte: Da autora.

Os fatores relevantes para Tp , considerando um nível de significância de 5%, foram o coeficiente da intersecção com o eixo (b_0), coeficiente linear da declividade e da posição do material (b_1) e (b_3), respectivamente, apresentados na Equação 9, após recálculo feito pela exclusão dos fatores não significativos. O modelo gerou um (R^2) igual a 74,2%, sendo esta a porcentagem capaz de ser explicada pela variabilidade dos dados, dentro dos intervalos estudados para as variáveis independentes.

$$y_3 = 44,7 - 8,8x_1 + 11,7x_3 \quad (9)$$

Tabela 19 - ANOVA para o Tp .

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F cálc.	p - valor
Regressão	2143,3	2	1071,7	20,1	$8,0 \cdot 10^{-5}$
Resíduos	744,7	14	53,2		
Falta de Ajuste	604,5	12	50,4	0,7	0,7
Erro Puro	140,2	2	70,1		
Total	2888,0	16			

Fonte: Da autora.

A Tabela 19 (ANOVA) evidência valores altamente significativos para o p-valor do modelo ($<0,05$) e p-valor da falta de ajuste ($>0,05$) e ainda um valor satisfatório de R^2 (74,2%),

na Figura 26 é apresentado os valores obtidos experimentalmente versus os valores do modelo estatístico-matemático.

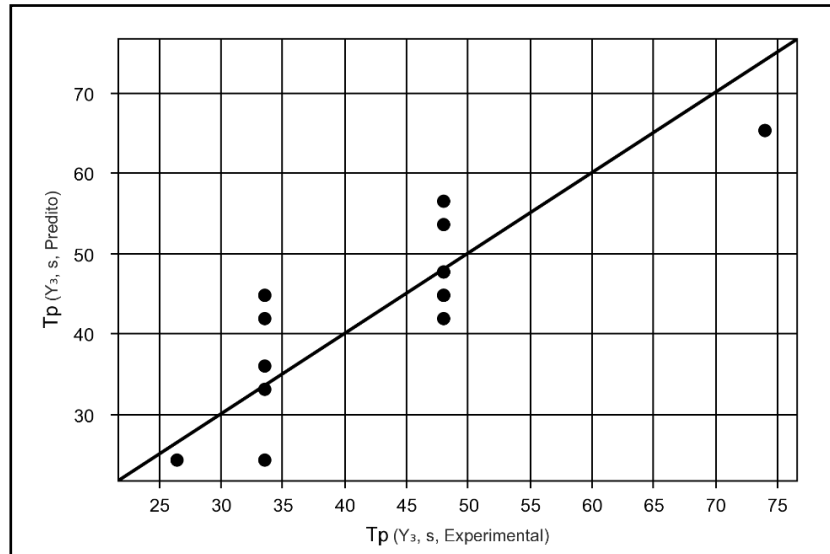


Figura 26 - Valores experimentais do Tp em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.

Fonte: Da autora.

A superfície de resposta, apresentada na Figura 27, avalia o Tp em relação a declividade (x_1) e posição do material (x_3). A medida que a declividade aumenta, nas posições mais próximas ao exutório, encontra-se Tp menores, isto é, atinge-se o pico mais rapidamente. A intensidade de precipitação não foi considerada relevante pelo modelo.

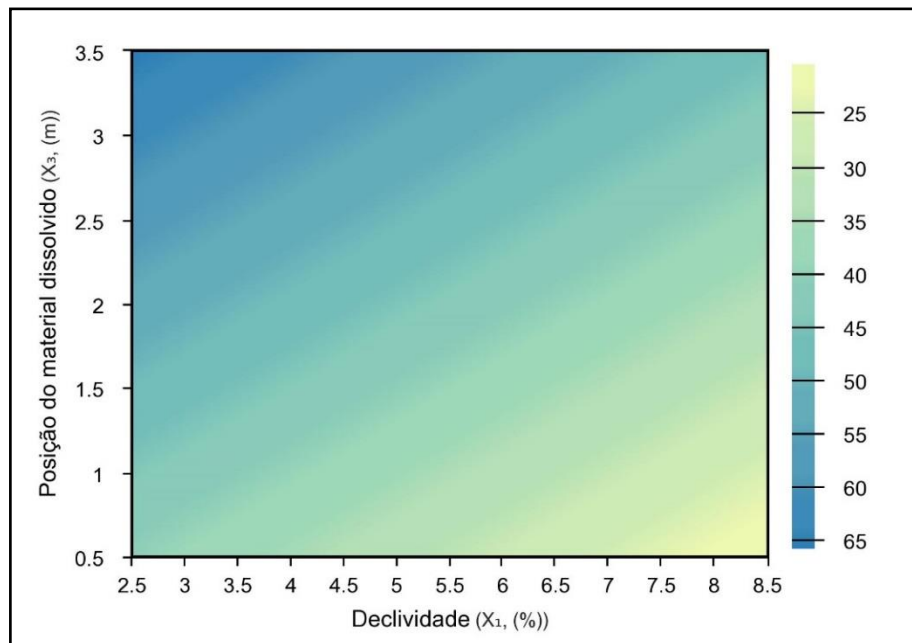


Figura 27 - Superfície de resposta para o Tp em relação a declividade (x_1) e posição do material (x_3).

Fonte: Da autora.

5.5.4 Massa Total Transportada – *Massa Total* (mg)

A *Massa Total* encontrada para os experimentos realizados foi obtida pela integração dos polutogramas, com valores que variam de 0,93 a 1,98g, referentes aos experimentos 6 e 4, respectivamente. A Tabela 20 apresenta os valores dos coeficientes de regressão para a *Massa Total*.

Tabela 20 - Coeficientes de regressão para reposta *Massa Total*.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t calculado	p - valor
Média	1625,3	114,3	14,2	$2,2 \cdot 10^{-6}$
x₁	-17,8	84,5	-0,2	0,8
x₁²	-308,4	163,2	-1,9	$4,0 \cdot 10^{-2}$
x₂	73,8	84,5	0,9	0,4
x₂²	167,0	163,2	1,0	0,7
x₃	-227,6	84,5	-2,7	$3,0 \cdot 10^{-2}$
x₃²	-60,0	163,2	-0,4	0,7
x₁ · x₂	58,1	94,4	0,6	0,6
x₁ · x₃	-197,1	94,4	-2,1	$2,7 \cdot 10^{-2}$
x₂ · x₃	0,1	94,4	0,01	0,9

Fonte: Da autora.

Ao analisar a Tabela 20 percebe-se que o modelo identificou que os fatores relevantes, para um nível de significância de 5%, foram o coeficiente da intersecção com o eixo (b_0), coeficiente linear da declividade (b_1) e da posição do material (b_3) e coeficiente de interação entre declividade e posição do material (b_1b_3), os coeficientes foram recalculados após exclusão dos fatores não significativos, apresentados na Equação 10. O modelo apresentou capacidade de explicação de 62,4% para variabilidade dos dados, dentro dos intervalos de estudo para as variáveis independentes avaliadas.

$$y_4 = 1655,7 - 253,1x_1^2 - 227,6x_3 - 197,1x_1x_3 \quad (10)$$

Tabela 21 - ANOVA para a *Massa Total*.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F calc.	p - valor
Regressão	1092569,3	3	364189,8	7,2	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Resíduos	658912,7	13	50658,6		
Falta de Ajuste	503054,1	11	45732,2	0,6	0,8
Erro Puro	155858,7	2	77929,3		
Total	1751482,0	16			

Fonte: Da autora.

Ao analisar os dados estáticos da Tabela 21 (ANOVA) é possível perceber valores adequados de p-valor (modelo) $<0,05$ e p-valor (falta de ajuste) $>0,05$, e ainda uma capacidade de explicação aceitável, de 62,4% dos dados. A Figura 28 apresenta os valores do modelo estatístico-matemático versus os valores experimentais encontrados.

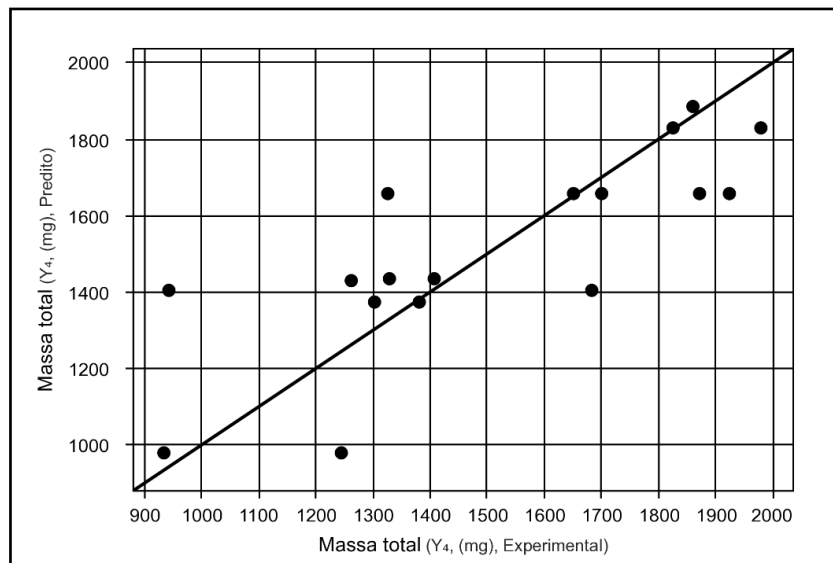


Figura 28 - Valores experimentais da *Massa Total* em função dos valores previstos pelo modelo ajustado.

Fonte: Da autora.

A superfície de resposta produzida compara a declividade em relação a posição do material, como apresenta a Figura 29. Na região em que a declividade é próxima a 6% combinada com a menor distância do material do exutório, resulta na maior *Massa Total* transportada. O valor esperado de maior massa transportada na maior declividade, 8% não foi

verificado pois, provavelmente, parte do sal tenha passado sem dissolver, não sendo registrada pelo condutivímetro.

O menor transporte de massa é observado nas situações com maior declividade e posições mais distante ao exutório, explicado possivelmente pelo fato de que parte do material tenha ficado retido na superfície.

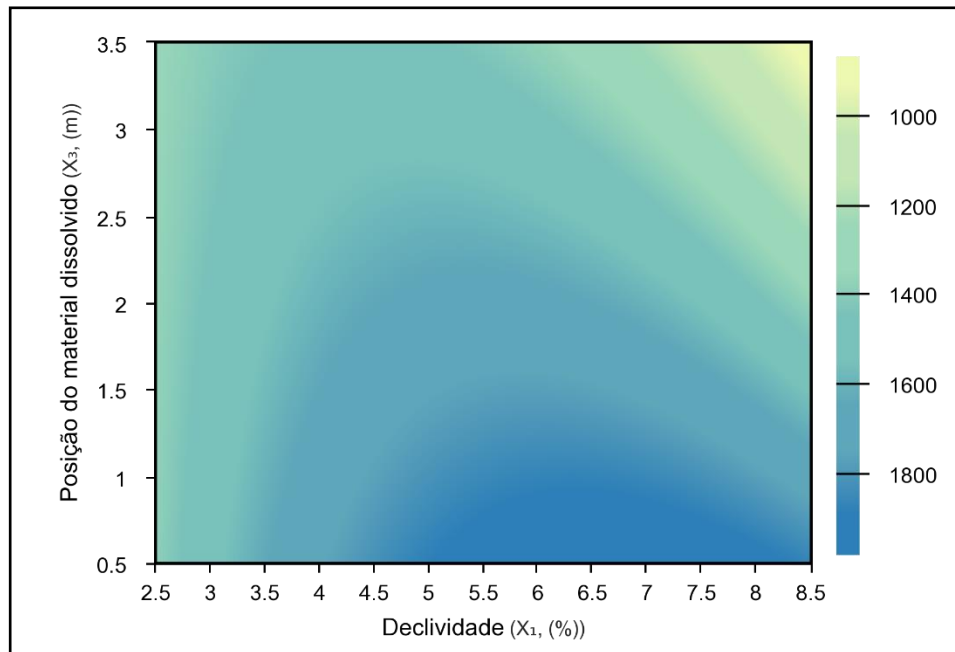


Figura 29 - Superfície de resposta da Massa Total relacionada a declividade (x_1) e posição do material (x_3).

Fonte: Da autora.

5.5 VALIDAÇÃO DO MODELO

Neste item foi feita a comparação entre os valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos na equação produzida pelo modelo, para cada experimento. A comparação foi feita com análise de erro e graficamente, para o material em suspensão e para o material dissolvido.

5.5.1 Material em Suspensão

Como descrito na metodologia foi feito uma validação do modelo. Para isto foi necessário calcular os valores das variáveis dependentes pela equação dado no modelo estatístico-matemático, para cada experimento realizado, estes foram comparados com os valores obtidos experimentalmente. A Tabela 22 apresenta os valores experimentais versus os previstos pelo modelo para o material em suspensão.

Tabela 22 - Valores previstos pelo modelo propostos e os valores encontrados experimentalmente para o material em suspensão.

Experimentos	x ₁	x ₂	x ₃	<i>T_{transp}</i> (s)		<i>Pico</i> (mg.s ⁻¹)		<i>T_p</i> (s)		<i>Massa Total</i> (mg)	
				<i>modelo</i>	<i>experimento</i>	<i>modelo</i>	<i>experimento</i>	<i>modelo</i>	<i>experimento</i>	<i>modelo</i>	<i>experimento</i>
1	2,7	54	0,78	132,7	130	1,1	0,85	113,5	124	57	70,82
2	8,1	54	0,78	104,4	112,5	53,9	48,3	70,3	74	3437,4	3091,4
3	2,7	74	0,78	165,2	164	1,1	4,4	113,5	96	41,4	291,2
4	8,1	74	0,78	136,9	137	79,9	84,8	70,3	74	4931	5567,5
5	2,7	54	3,5	73,6	76	1,3	0,1	70,3	85	124,2	4,9
6	8,1	54	3,5	101,8	104	2,9	3,43	113,5	124	-173	94,2
7	2,7	74	3,5	69,6	62,5	1,3	0,1	70,3	61	108,6	4,42
8	8,1	74	3,5	97,9	103	28,9	22,3	113,5	123	1320,6	856,7
9	2,7	64	2,14	110,3	112,5	1,2	0,8	91,9	48	82,8	43,3
10	8,1	64	2,14	110,3	103	41,4	48,0	91,9	110	2379	2285,6
11	5,4	54	2,14	103,1	98	-1,6	1,1	116,5	124	-143,8	44,9
12	5,4	74	2,14	117,4	125,5	11,4	7,61	116,5	116	595,2	281,15
13	5,4	64	0,78	134,8	119,5	17,6	14,6	116,5	102,5	1111,5	805,2
14	5,4	64	3,5	85,7	72	-7,8	0,2	116,5	124	-660,1	7,5
15	5,4	64	2,14	110,3	118,5	4,9	3,66	116,5	103	225,7	138,1
16	5,4	64	2,14	110,3	118,5	4,9	3,43	116,5	123	225,7	124,5
17	5,4	64	2,14	110,3	118,5	4,9	3,46	116,5	123	225,7	178,9

Fonte: Da autora.

Na Tabela 23 é apresentado uma análise de erro entre os valores obtidos pelo modelo e aqueles encontrados experimentalmente.

Tabela 23 - Erros encontrados entre os valores do modelo e os obtidos experimentalmente para material em suspensão

Experimentos	x ₁	x ₂	x ₃	<i>T_{transp}</i>	<i>Pico</i>	<i>T_p</i>	<i>Massa Total</i>
				(s)	(mg.s ⁻¹)	(s)	(mg)
Erro (%)							
1	2,7	54	0,78	2,06	29,4	8,5	19,5
2	8,1	54	0,78	7,16	11,6	5,0	11,2
3	2,7	74	0,78	0,76	75,0	18,2	85,8
4	8,1	74	0,78	0,01	5,8	5,0	11,4
5	2,7	54	3,5	3,17	1200,0	17,3	2434,7
6	8,1	54	3,5	2,07	15,4	8,5	288,65
7	2,7	74	3,5	11,44	1200,0	15,2	2357,0
8	8,1	74	3,5	4,94	29,6	7,7	54,1
9	2,7	64	2,14	1,96	50,0	91,5	91,2
10	8,1	64	2,14	7,09	13,7	16,4	4,1
11	5,4	54	2,14	5,26	245,4	6,0	420,3
12	5,4	74	2,14	6,41	49,8	0,4	111,7
13	5,4	64	0,78	12,85	20,5	13,7	38,0
14	5,4	64	3,5	19,10	4000,0	6,0	8901,3
15	5,4	64	2,14	6,92	33,89	13,1	63,4
16	5,4	64	2,14	6,92	42,9	5,3	81,3
17	5,4	64	2,14	6,92	41,6	5,3	26,2
Média	-	-	-	6,2	415,6	14,3	882,1

Fonte: Da autora.

Observa-se que as variáveis *Pico* e *Massa Total* apresentam valores de erro médio alto, distante dos erros médios obtidos para *T_{transp}* e o *T_p*, que possuem erros médios baixos, de 6,2% e 14,3%, respectivamente. É perceptível que o erro médio alto para o *Pico* e *Massa Total* devem-se aos valores obtidos pelo modelo que distam-se dos encontrados experimentalmente (Tabela 22). Contudo apesar dos valores do modelo produzirem resultados distantes dos obtidos experimentalmente, que pode ser atribuído ao fato do R² ser menor, sendo assim parte dos dados não representados no modelo, fica claro graficamente que o modelo representa boa tendência do comportamento, como é apresentado na Figura 30.

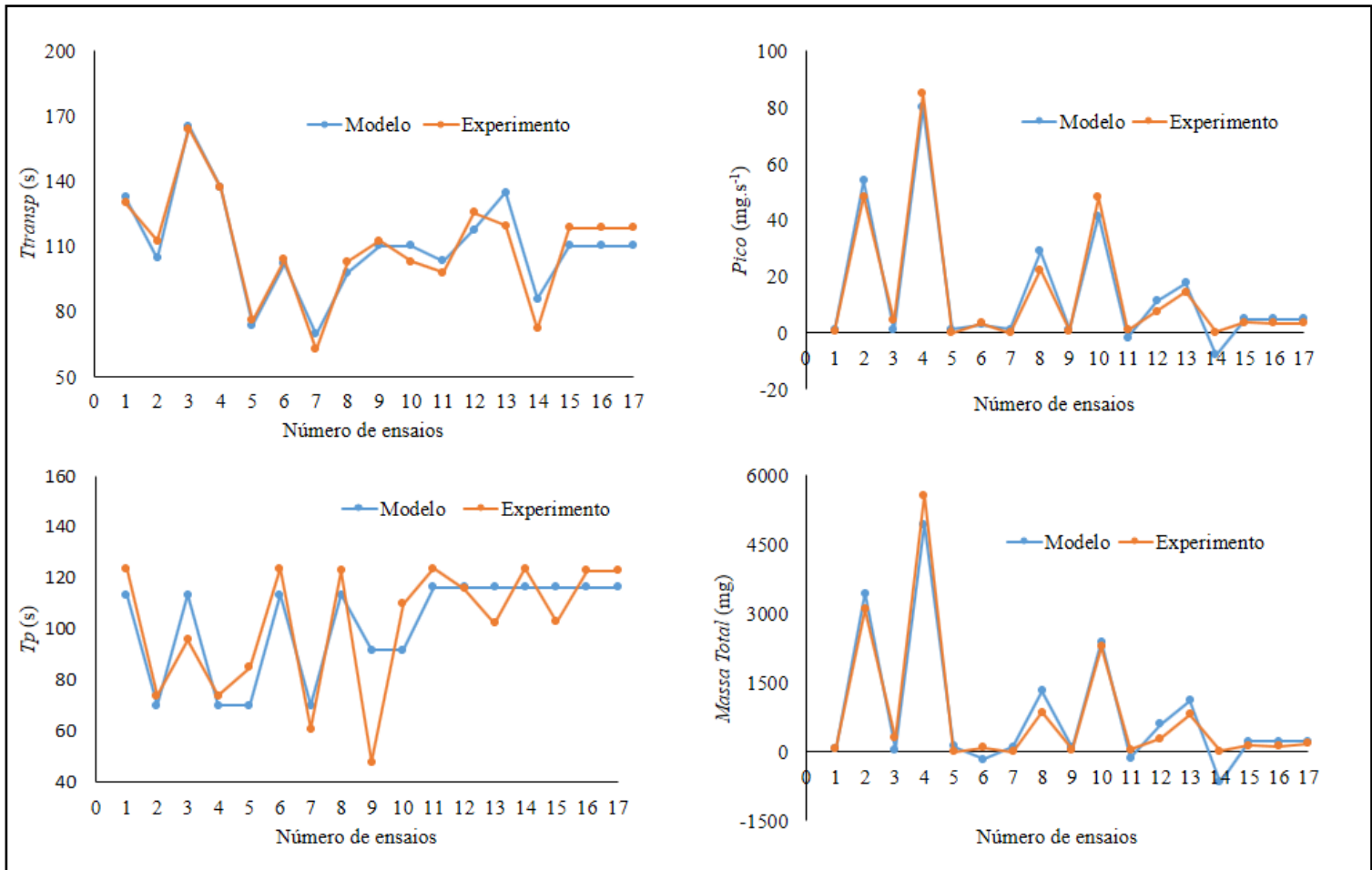


Figura 30 - Análise de comportamento dos valores experimentais e do modelo para o material em suspensão.

Fonte: Da autora.

5.5.2 Material Dissolvido

Foi feita a validação do modelo para o material dissolvido, com isto calculou-se os valores das variáveis dependentes pela equação do modelo estatístico-matemático e seus valores foram comparados com os valores obtidos experimentalmente, para os 17 experimentos definidos no delineamento experimental, como é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Valores previstos pelo modelo propostos e os valores encontrados experimentalmente para o material dissolvido.

Experimentos	x ₁	x ₂	x ₃	<i>T_{transp}</i> (s)		<i>Pico</i> (mg.s ⁻¹)		<i>T_p</i> (s)		<i>Massa Total</i> (mg)	
				<i>modelo</i>	<i>experimento</i>	<i>modelo</i>	<i>experimento</i>	<i>modelo</i>	<i>experimento</i>	<i>modelo</i>	<i>experimento</i>
1	2,7	54	0,78	108,1	112,5	82,8	76,5	41,8	48,0	1433,1	1329
2	8,1	54	0,78	39,5	54,5	184,2	132,1	24,2	33,5	1827,3	1825
3	2,7	74	0,78	125,9	126,5	82,8	74,3	41,8	33,5	1433,1	1407
4	8,1	74	0,78	57,3	54,5	184,2	257,3	24,2	26,5	1827,3	1980
5	2,7	54	3,5	89,5	72	56,6	56,9	65,2	74,0	1372,1	1381
6	8,1	54	3,5	58,1	62,5	49,6	48,4	47,6	48,0	977,9	933
7	2,7	74	3,5	107,3	115,5	56,6	47,4	65,2	74,0	1372,1	1304
8	8,1	74	3,5	75,9	69,5	49,6	78,1	47,6	48,0	977,9	1244
9	2,7	64	2,14	107,7	112	69,7	95,3	53,5	48,0	1402,6	1682
10	8,1	64	2,14	57,7	47,5	116,9	70,5	35,9	33,5	1402,6	943
11	5,4	54	2,14	107	112,5	93,3	101,6	44,7	48,0	1655,7	1652
12	5,4	74	2,14	124,8	137	93,3	104,6	44,7	33,5	1655,7	1923
13	5,4	64	0,78	115,9	119,5	133,5	149,1	33,0	33,5	1883,3	1859
14	5,4	64	3,5	115,9	112,5	53,1	56,1	56,4	48,0	1428,1	1262
15	5,4	64	2,14	115,9	112,5	93,3	70,3	44,7	48,0	1655,7	1699
16	5,4	64	2,14	115,9	98	93,3	81,1	44,7	48,0	1655,7	1325
17	5,4	64	2,14	115,9	119,5	93,3	87,2	44,7	33,5	1655,7	1871

Fonte: Da autora.

Para melhor visualização da comparação entre os valores do modelo e aqueles obtidos no experimento foi feita uma análise do erro como é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25- Erros encontrados entre os valores do modelo e os obtidos experimentalmente para material dissolvido.

Experimentos	x1	x2	x3	<i>T_{transp}</i>	<i>Pico</i>	<i>T_p</i>	<i>Massa</i>
				(s)	(mg.s ⁻¹)	(s)	Total (mg)
Erro (%)							
1	2,7	54	0,78	3,9	8,2	12,9	7,9
2	8,1	54	0,78	27,5	39,4	27,8	0,1
3	2,7	74	0,78	0,5	11,4	24,8	1,9
4	8,1	74	0,78	5,1	28,4	8,7	7,7
5	2,7	54	3,5	24,3	0,5	11,9	0,6
6	8,1	54	3,5	7,0	2,5	0,8	4,8
7	2,7	74	3,5	7,1	19,4	11,9	5,2
8	8,1	74	3,5	9,2	36,5	0,8	21,4
9	2,7	64	2,14	3,8	26,9	11,5	16,6
10	8,1	64	2,14	21,5	65,8	7,2	48,7
11	5,4	54	2,14	4,9	8,2	6,9	0,2
12	5,4	74	2,14	8,9	10,8	33,4	13,9
13	5,4	64	0,78	3,0	10,5	1,5	1,3
14	5,4	64	3,5	3,0	5,3	17,5	13,2
15	5,4	64	2,14	3,0	32,7	6,9	2,5
16	5,4	64	2,14	18,3	15,0	6,9	24,9
17	5,4	64	2,14	3,0	7,0	33,4	11,5
Média	-	-	-	9,1	19,3	13,2	10,7

Fonte: Da autora.

Observa-se que os erros médios para as variáveis dependentes do material dissolvido são baixos, quando comparados com o material em suspensão, sendo todos erros menores que 20%. O *Pico* possui o maior erro médio observado (19,3%), contudo é possível perceber que existe um valor de erro (ensaio 10) que destoa da ordem de grandeza dos outros erros tornando a média elevada, retirando este “outlier” a média cai para um valor de 16,4%.

A Figura 31 apresenta os gráficos de comportamento, das variáveis dependentes do material dissolvido para cada ensaio, comparando os valores obtidos experimentalmente e aqueles calculados pelo modelo. Nota-se que o modelo foi adequado pois a grande parte dos gráficos apresentam comportamento semelhante.

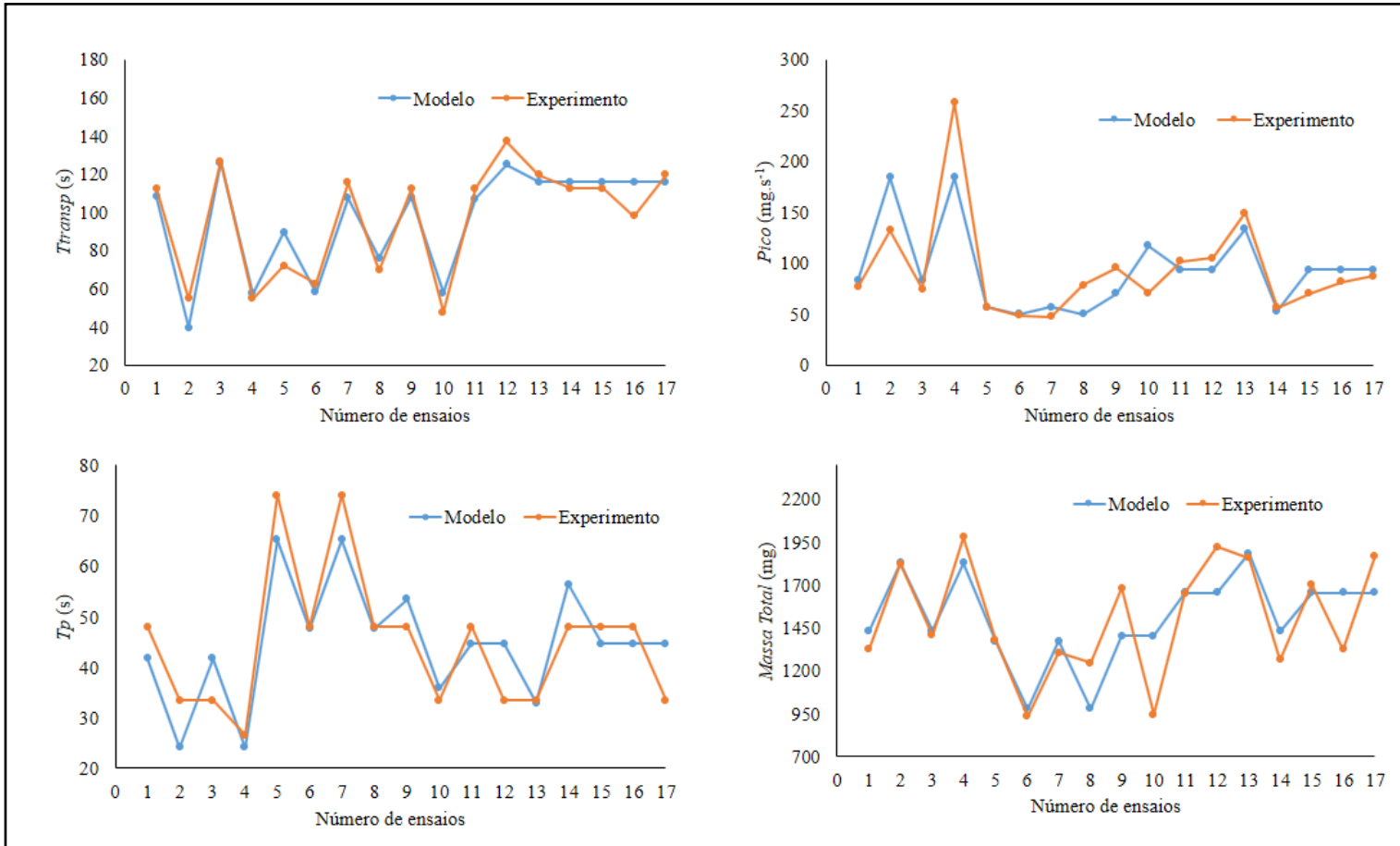


Figura 31 - Análise de comportamento dos valores experimentais e do modelo para o material dissolvido.
Fonte: Da autora.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho avaliou-se a utilização do delineamento experimental, DFC, para facilitar a interpretação de resultados de experimentos com confiabilidade estatística, diminuindo o tempo e os custos associados. Foram realizados experimentos para medição do transporte de materiais previstos pela metodologia, com repetições apenas no ponto central. Pode-se concluir que o método utilizado foi de grande importância, pois com o método tradicional seria necessária uma grande quantidade de ensaios sem a garantia de que a repetição produziria resultados consistentes. Comparando o delineamento com os polutogramas tradicionais, observa-se que o planejamento experimental proporciona maior número de análises enquanto os polutogramas seriam, em princípio, apenas visuais. Soma-se a isto o fato da metodologia do planejamento utilizar poucos experimentos, com 3 repetições apenas nos pontos centrais.

Esse tipo de delineamento se mostrou adequado para o estudo, pois permitiu uma ampla análise de resultados entre as variáveis dependentes estudadas e as independentes, dentro do intervalo dos experimentos. As análises dos resultados nas superfícies de resposta, sempre relacionando as variáveis duas a duas, permitiram verificar o efeito da tendência dos fatores na resposta, enquanto as equações completas geradas pelo modelo permitem calcular o valor da resposta considerando todas as 3 variáveis. As equações geradas pelo modelo permitem calcular as variáveis dependentes em qualquer outra situação, não experimentada, dentro do intervalo investigado.

Para o transporte de material em suspensão pode-se concluir que a declividade e posição do material, dentro dos intervalos estudados, influenciaram todas as variáveis dependentes estudadas; tempo de transporte, valor de pico e o tempo em que este ocorreu e a massa total transportada, com efeitos quadráticos da declividade para o valor de pico, tempo de pico e massa total. A intensidade de precipitação influenciou o tempo de transporte, o valor de pico e a massa total transportada. Quanto ao material dissolvido foi possível perceber que a declividade e a posição do material apresentaram influência para todas as variáveis dependentes estudadas, com destaque para o efeito quadrático da declividade para o tempo de transporte e massa total. A intensidade de precipitação influenciou apenas para o tempo de transporte.

Foi possível perceber que a intensidade de precipitação produziu pouco efeito nas variáveis dependentes estudadas tanto para o transporte em suspensão quanto para o transporte de material dissolvido.

Deste modo observou-se que a metodologia utilizada é viável nos estudos realizados permitindo, para além das análises observadas nos polutogramas dos experimentos, simular situações não experimentadas, dentro do intervalo dos experimentos realizados, utilizando a equação- modelo produzida.

Destaca-se que este trabalho é pioneiro sendo apenas uma etapa inicial que pode ser profundada em trabalhos futuros para conhecimento do processo precipitação-escoamento e transporte de material associados, que podem contribuir para solução de problemas ambientais. Assim é possível a realização de trabalhos futuros com intensidades de precipitações distintas, diferentes tipos de superfície, que modificariam na rugosidade alterando o escoamento e o transporte do material, mudança da duração da precipitação, sendo uma variável independente, que pode interferir no transporte de material, e ainda mudança do tipo de material utilizado

REFERÊNCIAS

- 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. 312, n. 8, p. 1-24, 2016.
- ABRANTES, J. R. C. B. et al. Comparison of thermal, salt and dye tracing to estimate shallow flow velocities: Novel triple-tracer approach. **Journal Of Hydrology**, v. 557, p. 362 – 377, fev. 2018.
- BERRY, B. J.L., **Urbanization**. New York: Urban Ecology, 2008.
- BURIAN, S. J.; SHEPHERD, J. M. Effect of urbanization on the diurnal rainfall pattern in Houston. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 5, p.1089-1103, 2005.
- BRUNO, L. O.; AMORIM, R. S. S.; SILVEIRA, A. Estudo da redução do escoamento superficial direto em superfícies permeáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p.237-247, 08 jan. 2013.
- BISCAINO NETO, J.; FREIRE, R.; RABELO, G. C. Efeito da poluição hídrica devido ao escoamento superficial urbano. In: FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA – SOCIEDADE, MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 12, 2016, Tupã, SP. **Anais...Tupã: ANAP**, 2016. p. 581- 595.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Conceitos de Enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014
- CARDOSO, R. S. et al. **Poluição Urbana Difusa**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PHD 2537 – Águas em Sistemas Urbanos I, nov. 2003.
- CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. M. Predictiong floods from urban development scenarios: case study of the Dilúvio Basin, Porto Alegre, Brazil. **UrbanWater**, p. 113 – 124, feb. 2001.
- COSTA, K. O. **Otimização das Condições de Cultivo do Fungo Endofítico *Phomopsis* sp. Extraído da *Bauhinia Veriegata* para produção de Metabólitos Secundários com Atividade Antioxidante**. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Farmacêutica) - Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2016.
- EGODAWATTA, P.; THOMAS, E.; GOONETILLEKE, A. Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall. **Water Research**, v. 41, n. 13, p.3025-3031, jul. 2007.
- FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J.; BARAHONA, E.; MINGORANCE, M. D.. Measurement of Infiltration in Small Field Plots by a Portable Rainfall Simulator: Application to Trace-Element Mobility. **Water Air Soil Pollut**, v. 191, n. 1-4, p.257-264, 25 jan. 2008.

FELICE, J. G. **Transporte de Material em Suspensão e Dissolvido em Modelo Físico com Superfície Impermeável Utilizando Chuva Simulada**. 2017. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL-MG, Poços de Caldas, 2017.

GRIMM, N. B. et al. Global change and the ecology of cities. **Science**, v. 319, n. 5864, p.756-760, 8 feb. 2008.

HERNGREN, L. et al. Rainfall simulation as a tool for urban water quality research. **Environmental Engineering Science**, v. 22, n. 3, p.378-383, 2005.

HOUSE, M. A. et al. Urban drainage-impacts on receiving water quality. **Water Science & Technology**, v. 27, n. 12, p. 117-158, 1993.

ISERLOH, T. et al. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. **Catena**, v. 110, p. 100-112. 15 may 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Características da população. 2010. Disponível em: <<http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-povo/caracteristicas-da-populacao.html>>. Acesso em: 18 jul. 2017.

KABISCH, N.; HAASE, D. Diversifying european agglomerations: evidence of urban population trends for the 21st century. **Population, Space And Place**, v. 17, n. 3, p.236-253, 3 dec. 2009.

KIM, L. et al. Modeling of highway stormwater runoff. **Science of the total environmental**, v. 348, n. 1-3, p. 1-18, 2005.

LIMA, J.L.M.P. de; SINGH, V.P. Laboratory experiments on the influence of storm movement on overland flow. **Physics And Chemistry Of The Earth**, v. 28, n. 6-7, p.277-282, jan. 2003

LIMA, B. O. **Transporte de Material Dissolvido pelo Escoamento Superficial Produzido por um Simulador de Chuva sobre Superfície Impermeável**. 2017. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL-MG, Poços de Caldas, 2017.

LIYANAPATHIRANA, C.; SHAHIDI, F. Optimization of extraction of phenolic compounds from wheat using response surface methodology. **Food Chemistry**, v. 93, n. 1, p.47-56, nov. 2005.

MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013. 455 p.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA D. D. **Escoamento superficial**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2014.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p.43-60, 2008.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 3. ed. Campinas: Cárita, 2014.

SILVEIRA, A. et al. Enhancing the spatial rainfall uniformity of pressurized nozzle simulators. **Management Of Environmental Quality: An International Journal**, v. 28, n. 1, p.17- 31, 9 jan. 2017.

SOUZA JUNIOR, S.F.; SIQUEIRA, E.Q. Development and Calibration of a rainfall Simulator for Urban Hydrology Research. In: 12th INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE, 12, 2011, Porto Alegre. **Proceedings ...** Porto Alegre, 2011. p. 11-16.

TAYLOR, K. G., OWENS, P. N. Sediments in urban river basins: a review of sediment-contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities. **Journal of Soils And Sediments**, v. 9, n. 4, p.281-303, 2 jul. 2009.

TUCCI, C. E. M. **Água no meio urbano**. Rio Grande do Sul: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 1997.

TEODORO, V. L. I. et al. Conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista UNIARA**, n. 20, 2007.

ANEXO A – MATERIAL EM SUSPENSÃO UTILIZADO



STOFFDATEN

Quarzsand Frechen F 32 bis F 36

Die Frechener Quarzsandsorten F 32 bis F 36 sind aufbereitete, in ihren chemischen und physikalischen Kennwerten standardisierte Produkte. Sie werden in der Glasindustrie und in der chemischen Industrie sowie von anderen Verbrauchern als Rohstoff eingesetzt.

Der Rohsand der Lagerstätte Frechen wird im Tagebau mit Schaufelradbaggern gewonnen.

Die Aufbereitung umfasst die Entschlammung, Hydroklassierung und Trocknung des Quarzsandes. Die Sorten F 32, F 34 und F 36 werden direkt produziert. Die Sorten F 33 und F 35 entstehen als Mischsorten.

Der Frechener Quarzsand zeichnet sich durch hohe chemische Reinheit aus.

Sein SiO₂-Gehalt liegt über 99%.

Alle Quarzsandsorten sind bunkerfeucht, getrocknet und gekühlt lieferbar.

Typische Korngrößenverteilung und Körnungswerte

Quarzsand Frechen	F 32	F 33	F 34	F 35	F 36
AFS	59	62	66	73	80
mittlere Korngröße in mm	0,24	0,22	0,20	0,18	0,16
Theor. spez. Oberfläche in cm ² /g	102	109	116	130	144
Kornklasse (mm)	Mengenanteil in Gew.-%				
> 0,355	5	3	1		
0,250 - 0,355	28	21	13	8	2
0,180 - 0,250	49	52	56	41	26
0,125 - 0,180	16	21	27	43	60
0,090 - 0,125	2	3	3	7	11
< 0,090				1	1

Fremdüberwacht nach DIN EN 12620

HS-Nr.: 2505 1000

Siebanalysen erfolgen mit "Vibrationssiebmaschine EML 200 digital plus" der Fa. Haver & Boecker (Siebdauer 5 Min; Amplitude 0,3 mm). Berechnungsgrundlage der Kennwerte (AFS, Oth, mK) ist das VDG-Merkblatt P27.

Quarzwerke Stoffdaten

Quarzsand Frechen F32 bis F36

Typische physikalische Eigenschaften	
---	--

Linearer Ausdehnungskoeffizient α 20° - 300 °C α 20° - 600 °C (DIN 51045)	$14 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ $24 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Sinterbeginn	1.575 °C
Umwandlungstemperatur (β Quarz \leftrightarrow α Quarz)	573 °C
Schüttwinkel für trockenen Quarzsand	$\alpha = 33^\circ$
Schüttgewicht; t/m^3	1,4
Dichte (DIN EN ISO 787-10)	2,65 g/ml
Härte nach Mohs	7

Typische chemische Analyse (Gew.-%)					
--	--	--	--	--	--

Quarzsand Frechen	F 32	F 33	F 34	F 35	F 36
SiO ₂	99,7	99,5	99,5	99,3	99,3
Al ₂ O ₃	0,2	0,25	0,25	0,5	0,5
Fe ₂ O ₃	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06
Glühverlust 1000 °C (DIN EN ISO 3262-1)	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2