

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CTEC- CENTRO DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento



VALQUERNEI JESUS DA SILVA

Modelagem de biorretenção com uso de modelo concentrado

Maceió - AL
2018

VALQUERNEI JESUS DA SILVA

Modelagem de biorretenção com uso de modelo concentrado

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves

Maceió - AL
2018

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Marcelino de Carvalho

S586m Silva, Valquernei Jesus da.
Modelagem de biorretenção com uso de modelo concentrado / Valquernei Jesus da Silva. – 2019.
112 f. : il. color.

Orientador: Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves.
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2018.

Bibliografia: f. 90-93.
Apêndices: f. 94-112.

1. Jardim de chuva (Biorretenção). 2. Método de Puls. 3. Solos - Percolação. I. Título.

CDU: 556.14

Folha de Aprovação

VALQUERNEI JESUS DA SILVA

Modelagem de biorretenção com uso de modelo concentrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.



Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves (Orientador)

Dissertação defendida e aprovada em 26/06/2018, pela banca examinadora:



Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza (Examinador interno)



Prof. Dr. Rutinéia Tassi (Examinador externo - UFSM)

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo amparo, cuidado e compreensão durante todo o tempo.

Ao professor Marllus, pela orientação, dedicação e comprometimento.

Ao professor Vladimir, pelo suporte e valorosas contribuições.

À Marina, Tardelly, Clébson, e Geiza pela ajuda direta.

Ao professor Christopher pelos incentivos e ensinamentos.

À professora Rutinéia pelas contribuições.

À Cinthia, Thiago e Heitor pelos muitos momentos bons juntos.

*Aos colegas das turmas de 2015, 2016 e 2017 pelas oportunidades de descontração,
conhecimentos e experiências compartilhadas e apoio dado.*

À UFAL, ao PPGRHS e a todos os professores, técnicos e alunos envolvidos.

À FAPEAL pela concessão da bolsa de mestrado.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O conceito de LID (*Low Impact Development*) recomenda o uso das técnicas compensatórias que buscam suprimir ou mitigar o efeito da urbanização através da restauração do ciclo hidrológico, sendo uma delas a biorretenção. No contexto da modelagem, há várias opções para a biorretenção, sendo uma delas investigada nesta pesquisa para fins quantitativos: o método Puls com vazão de saída determinada em função da velocidade de infiltração/percolação. Este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento de um dispositivo de biorretenção com o uso do método de Puls, sendo o código escrito em linguagem Python. A metodologia englobou a caracterização da área de estudo, a descrição dos aspectos construtivos e do monitoramento hidrológico e investigou três condições para a modelagem: velocidade de infiltração/percolação K constante; velocidade de infiltração/percolação K variável em função do nível da água no interior da biorretenção e 2 valores de velocidade de infiltração/percolação K_1 e K_2 constantes, um antes e outro após o ponto de saturação solo definido pela curva de infiltração local. No primeiro caso, há um parâmetro K , no segundo caso há dois parâmetros a e b que definem a função $K \times$ nível da água, e no terceiro caso há dois parâmetros K_1 e K_2 . A calibração foi realizada por tentativa e erro, sendo também realizada a validação, ambas avaliadas pela diferença percentual de volume e pelo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). Na etapa de calibração do modelo, as três configurações apresentaram desempenho semelhantes em relação ao NSE, com valores próximos a 0,92. Quanto à diferença de volume, a configuração com K variável obteve resultados em média 46% superior as outras duas configurações. Na etapa de validação, a configuração com K variável apresentou a maior parte dos eventos com resultados considerados bons, bem com o maior valor médio para o coeficiente NSE, 0,41. Concluiu-se que o modelo conseguiu representar bem a biorretenção para as três configurações e que a configuração com K variável foi a mais adequada, embora tenha apresentado erro relativamente grande na etapa de calibração.

Palavras chave: biorretenção, método de Puls, velocidade de infiltração/percolação

ABSTRACT

The concept of LID (Low Impact Development) recommends the use of compensatory techniques that seek to suppress or mitigate the effect of urbanization through the restoration of the hydrological cycle, one of them being biorretention. In the context of the modeling, there are several options for biorretention, one of them being investigated in this research for quantitative purposes: the Puls method with output flow determined as a function of infiltration / percolation velocity. This study aims to evaluate the behavior of a biorretention device with the use of the Puls method, being the code written in Python language. The methodology involved the characterization of the study area, the description of the constructive aspects and the hydrological monitoring and investigated three conditions for the modeling: infiltration / percolation velocity constant K ; infiltration / percolation velocity K as a function of the water level inside the biorretention and 2 constant infiltration / percolation velocity values K_1 and K_2 , one before and after the soil saturation point defined by the local infiltration curve. In the first case, there is a parameter K , in the second case there are two parameters a and b that define the function $K \times$ water level, and in the third case there are two parameters K_1 and K_2 . The calibration was performed by trial and error, and validation was also performed, both evaluated by the percentage difference in volume and by the Nash-Sutcliffe (NSE) efficiency coefficient. In the calibration step, the three configurations showed similar performance compared to the NSE, with values close to 0.92. As for the volume difference, the variable K configuration obtained results on average 46% higher than the other two configurations. In the validation stage, the variable K configuration presented most of the events with good results, as well as the highest mean value for the NSE coefficient, 0.41. It was concluded that the model was able to represent well the biorretenção for the three configurations and that the variable K configuration was the most adequate, although it presented a relatively large error in the calibration step.

Key words: biorretention, Puls method, infiltration / percolation velocity

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Alagoas
BMP	<i>Best Management Practices</i>
CEENG	Conhecer e Experimentar Engenharia
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastre Naturais
CN	Curva Número
CTEC	Centro de Tecnologia
DN	Diâmetro Nominal
EUA	Estados Unidos da América
FAPEAL	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
LID	<i>Low Impact Development</i>
MHB	Modelo Hidrológico de Biorretenção
NRCS	<i>(Natural Resources Conservation Service)</i>
NSE	Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
PPGRHS	Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento
PVC	Policloreto de Vinila
RS	Rio Grande do Sul
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Parâmetro da equação da velocidade de infiltração/percolação variável
A	Área do fundo da biorretenção
A_t	Até total da biorretenção
b	Parâmetro da equação da velocidade de infiltração/percolação variável
C	Grupo de solo proposto pelo modelo CN-SCS
C_b	Comprimento da biorretenção
C_g	Coefficiente de escoamento da grama
C_t	Coefficiente de escoamento do telhado
ΔNA	Diferença percentual de nível
∂H	Potencial total de água no solo (L)
∂L	Comprimento da coluna de solo (L)
CV	Coefficiente de variação
ψ_z	Potencial matricial (L)
f_m	Fator multiplicativo da vazão de entrada na biorretenção
$f_{TC,t}$	Percolação da água no solo (L^3/T)
H	Nível da água no interior da biorretenção (L)
h_v	Diferença entre o nível da água e a crista do vertedor (L)
ia	Perdas inicial da precipitação (L)
I	Infiltração acumulada (L)
K	Velocidade de infiltração/percolação (L/T)
$K_{\text{calculado}}$	Velocidade de infiltração/percolação calculada (L/T)
K_s	Condutividade hidráulica saturada do solo (LT^{-1})
K_1	Velocidade de infiltração/percolação média antes da saturação do solo (L/T)
K_2	Velocidade de infiltração/percolação média após a saturação do solo (L/T)
L_b	Largura da biorretenção (L)
NA	Nível de água (L)
NA_{obs}	Nível medido pelos sensores do fundo da biorretenção no instante (L)
NA_{Puls}	Nível de água calculado no tempo (L)
P	Precipitação (L)
q	Densidade de fluxo (LT^{-1})
Q_e	Vazão de entrada (L^3/T)

$\overline{Q_e}$	Vazão média de entrada (L^3/T)
Q_{ep}	Vazão de pico de entrada (L^3/T)
Q_s	Vazão de saída (L^3/T)
$\overline{Q_s}$	Vazão média de saída (L^3/T)
Q_v	Vazão de entrada na biorretenção medida pelo vertedor (L/T^3)
R^2	Coefficiente de determinação
S	Volume armazenado dentro da biorretenção (L^3)
t	Tempo (T)
θ_i	Umidade do solo na condição inicial (L^3L^{-3})
θ_s	Umidade do solo na condição saturada (L^3L^{-3})
V_a	Volume de água oriundo da área adjacente (L^3)
V_e	Volume de água que entrou na biorretenção (L^3)
V_t	Volume de água proveniente do telhado (L^3)
V_s	Volume de água que saiu pelo fundo e pelas paredes da biorretenção (L^3)
z_f	Frente de umedecimento (L)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de retenção de água no solo	19
Figura 2 – Representação dos elementos e processos de um sistema de biorretenção	21
Figura 3 – Localização da área de estudo no campus da UFAL	29
Figura 4 – Planta do local onde foi construída a biorretenção.....	30
Figura 5 – Componentes do sistema de biorretenção.....	30
Figura 6 – Planta baixa e corte da biorretenção.....	31
Figura 7 – Localização dos pluviômetros da biorretenção do CEMADEN.....	33
Figura 8 – Vertedor utilizado no monitoramento da vazão de entrada.....	34
Figura 9 – Modelagem da biorretenção.....	36
Figura 10 – Curva de infiltração para o solo do local da biorretenção	43
Figura 11 – Evento 12, ocorrido no dia 03/04/2017	46
Figura 12 – Evento 9, ocorrido no dia 02/06/2016	46
Figura 13 – Demonstração dos 20 cm descontados em cada evento (Ex. evento 20).....	47
Figura 14 – Extravasamento de água em uma das calhas do telhado	48
Figura 15 – Calibração do evento 1, ocorrido no dia 22/07/2015.....	51
Figura 16 – K(h) calculado e ajustado para o evento 1.....	51
Figura 17 – Calibração do evento 2, ocorrido no 18/08/2015	52
Figura 18 – K(h) calculado e otimizado para o evento 2.....	53
Figura 19 – Calibração do evento 5, ocorrido no 24/04/2016	53
Figura 20 – K(h) calculado e otimizado para o evento 5.....	54
Figura 21 – Calibração do evento 6, ocorrido no 22/05/2016	55
Figura 22 - K(h) calculado e otimizado para o evento 6	55
Figura 23 – Calibração do evento 7, ocorrido no 24/05/2016	56
Figura 24 – K(h) calculado e otimizado para o evento 7.....	56
Figura 25 – Calibração do evento 8, ocorrido no dia 29/05/2016.....	57
Figura 26 – K(h) calculado e otimizado para o evento 8.....	58
Figura 27 – Calibração do evento 9, ocorrido no dia 02/06/2016.....	59
Figura 28 – K(h) calculado e otimizado para o evento 9.....	59
Figura 29 – Calibração do evento 12, ocorrido no dia 03/04/2017	60
Figura 30 – K(h) calculado e otimizado para o evento 12.....	61
Figura 31 – Calibração do evento 14, ocorrido no dia 13/04/2017	62

Figura 32 - K(h) calculado e otimizado para o evento 14	62
Figura 33 - Calibração do evento 15, ocorrido no dia 02/05/2017.....	63
Figura 34 – K(h) calculado e otimizado para o evento 15.....	63
Figura 35 – Calibração do evento 17, ocorrido no dia 24/05/2017	64
Figura 36 – K h) calculado e otimizado para o evento 17	65
Figura 37 – Calibração do evento 18, ocorrido no dia 08/06/2017	66
Figura 38 – K(h) calculado e otimizado para o evento 18.....	66
Figura 39 – Calibração do evento 19, ocorrido no dia 17/06/2017	67
Figura 40 – K(h) calculado e otimizado para o evento 19.....	68
Figura 41 – Calibração do evento 21, ocorrido no dia 18/08/2017	68
Figura 42 – K(h) calculado e otimizado para o evento 21.....	69
Figura 43 – Explicação dos picos existentes no cálculo de K variável (Ex. Evento 1).....	70
Figura 44 – Relação NSE e diferença de volume <i>versus</i> o nível máximo da água	71
Figura 45 – Relação NSE e diferença de volume <i>versus</i> intensidade média da precipitação	72
Figura 46 – Relação NSE e diferença de volume <i>versus</i> duração nos eventos	72
Figura 47 – Relação K <i>versus</i> nível máximo de água no interior da biorretenção	73
Figura 48 – Distribuição de K otimizado para os eventos calibrados	74
Figura 49 – Distribuição do parâmetro <i>a</i> otimizado nos eventos calibrados.....	74
Figura 50 – Distribuição do parâmetro <i>b</i> otimizado nos eventos calibrados.....	75
Figura 51 – Distribuição do parâmetro K_1 otimizado nos eventos calibrados.....	75
Figura 52 – Distribuição do parâmetro K_2 otimizado nos eventos calibrados.....	76
Figura 53 – Validação do evento 3, ocorrido no dia 20/08/2015	78
Figura 54 – Validação do evento 4, ocorrido no dia 29/01/2016	78
Figura 55 – Validação do evento 10, ocorrido no dia 19/06/2016	79
Figura 56 – Validação do evento 11, ocorrido no dia 28/06/2016	80
Figura 57 – Validação do evento 13, ocorrido no dia 07/04/2017	80
Figura 58 – Validação do evento 16, ocorrido no dia 21/05/2017	81
Figura 59 – Validação do evento 20, ocorrido no dia 28/06/2017	82
Figura 60 – Diagrama <i>Box Plot</i> para o coeficiente NSE na calibração do modelo.....	85
Figura 61 – Diagrama <i>Box Plot</i> para a diferença de volume na calibração do modelo ...	86
Figura 62 – Diagrama <i>Box Plot</i> para o coeficiente NSE na validação do modelo	87
Figura 63 – Diagrama <i>Box Plot</i> para a diferença de volume na validação do modelo.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eventos utilizados na fase de calibração do modelo	40
Tabela 2 – Eventos utilizados na fase de validação do modelo.....	41
Tabela 3 – Características dos eventos monitorados.....	45
Tabela 4 – Resumo dos resultados da etapa de calibração do modelo.....	50
Tabela 5 – Resumo dos resultados da etapa de validação do modelo	77
Tabela 6 – Desempenho do modelo para cada configuração	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO GERAL	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	16
3.1.1	Infiltração de água no solo.....	17
3.1.2	Colmatação	20
3.2	O DISPOSITIVO DE BIORRETENÇÃO.....	20
3.2.1	Aspectos gerais	20
3.2.2	Dimensionamento	23
3.3.4	Modelagem hidrológica.....	25
3.3	MODELAGEM ATRAVÉS DO MÉTODO DE PULS	26
4	METODOLOGIA.....	28
4.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	28
4.2	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	31
4.3	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO	32
4.3.1	Precipitação	32
4.3.2	Vazão de entrada.....	33
4.3.3	Nível de água no interior da biorretenção	35
4.4	MODELAGEM DA BIORRETENÇÃO	36
4.4.1	Calibração e validação com K constante	37
4.4.2	Calibração e validação com K variável	42
4.4.3	Calibração e validação com 2 K's constantes	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	EVENTOS MONITORADOS	44
5.3	CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	48
5.3.1	Considerações sobre os resultados da calibração do modelo	69

5.4	VALIDAÇÃO DO MODELO	76
5.4.1	Considerações sobre os resultados da validação do modelo	82
5.5	DESEMPENHO DO MODELO.....	83
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	89
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A – CÓDIGO COMPUTACIONAL DA CONFIGURAÇÃO COM K CONSTANTE.....	95
	APÊNDICE B – CÓDIGO COMPUTACIONAL DA CONFIGURAÇÃO COM K VARIÁVEL	100
	APÊNDICE C – CÓDIGO COMPUTACIONAL DA CONFIGURAÇÃO COM 2 K's CONSTANTES	105

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de biorretenção, assim como reservatórios de detenção, telhados verdes, pavimentos impermeáveis, trincheiras de infiltração e outros, inserem-se no contexto das práticas que visam minimizar os efeitos negativos do crescimento das cidades no escoamento, através da tentativa de restaurar as condições iniciais dos ciclos hidrológicos. Busca-se, por intermédio da preservação da vegetação natural e a manutenção de espaços abertos, e por meio dos serviços de ecossistema, controlar as principais características das cheias (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2011).

Estudos são desenvolvidos na busca de encontrar alternativas para a ineficiência da forma de drenagem tradicional. Tem-se, por exemplo, procurado avançar na implantação da integração entre drenagem e o meio paisagístico, análise dos efeitos da qualidade e quantidade da água, adoção dos rios como elementos urbanos, etc. Precisa-se, contudo, de maiores progressos, como por exemplo, na modelagem e monitoramento a fim de se compreender o real funcionamento dos sistemas (SOUZA, 2013).

A eficiência das BMPs (*Best Management Practices*) na redução do escoamento superficial e dos poluentes precisa ser mais explorada para ajudar a facilitar o desenvolvimento de planos de manejo de bacias hidrográficas apropriados. A modelagem é fator importante às necessidades ainda existentes neste contexto, sobretudo na eficiência de longo prazo dos dispositivos de drenagem sustentável (LIU et al., 2017)

O método de Puls tem se mostrado bastante promissor devido a sua simplicidade e boa capacidade de representação do comportamento hidrológico, na modelagem de técnicas compensatórias. Lucas, Barbassa e Muruzzi (2013), Barbassa, Angelini Sobrinha e Moruzzi (2014), Tecedor et al. (2015), Ferreira (2016) e Ferreira (2017) fizeram o uso desse método na simulação numérica de diferentes estruturas.

O dispositivo modelado por Ferreira (2017) foi uma biorretenção construída no Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Avaliou-se o comportamento da estrutura considerando a taxa de infiltração da água no solo constante. Essa hipótese, entretanto, não é a ideal, uma vez que a infiltração depende da altura lâmina da água no seu interior da estrutura, dado que as paredes da mesma não são impermeáveis, bem como é variável em função do grau de umidade do solo. Portanto, justifica-se a necessidade de adoção de hipóteses mais próximas da realidade para a infiltração no modelo.

Essa pesquisa propõe avaliar o desempenho da modelagem hidrológica de um dispositivo de biorretenção, a partir da modelagem prévia realizada por Ferreira (2017),

reproduzindo-a, agora utilizando a linguagem Python (o autor utilizou a ferramenta Microsoft Excel), bem como adotando-se duas novas hipóteses: velocidade de infiltração/percolação variando com a altura da lâmina da água no interior da biorretenção e duas velocidades de infiltração/percolação constantes, uma antes outra após a saturação do solo. O ponto de saturação do solo foi extraído da curva de infiltração do solo local.

O texto foi estruturado da seguinte forma: a introdução contextualiza os problemas e apresenta a justificativa do trabalho; posteriormente, apresentam-se os objetivos; a revisão bibliográfica aborda as técnicas compensatórias e a modelagem de biorretenção, a metodologia detalha como foi realizada a pesquisa; na sequência são apresentados os resultados e as discussões das etapas de calibração e validação do modelo, respectivamente; as conclusões e recomendações exibem as percepções sobre o desempenho do modelo, além de apresentar sugestões para melhoria do mesmo; a referências apresentam as obras consultadas; e, finalmente, o apêndice exhibe o código computacional desenvolvido para o modelo.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar o comportamento de uma estrutura de biorretenção submetida a eventos de chuva, considerando-se esvaziamento unicamente por infiltração/percolação, através da modelagem pelo método de Puls com três configurações distintas: admitindo-se velocidades de infiltração/percolação (K) constantes e variável em função da lâmina de água (h) no interior da biorretenção, e ainda adotando duas velocidades de infiltração/percolação, K_1 e K_2 , constantes para o mesmo evento, uma antes e outra após a saturação do solo, respectivamente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

De acordo com Fletcher et al. (2014) a drenagem urbana experimentou mudanças significativas ao longo da última década, alterando-se a abordagem direcionada sobretudo a mitigação das cheias e proteção à saúde, para uma visão que leva em consideração questões ambientais, sanitárias, sociais e econômicas.

Com o desenvolvimento dos centros urbanos, os padrões de escoamento superficial foram consideravelmente alterados em virtude da impermeabilização das superfícies. Tais alterações provocam a redução dos processos de retenção, evapotranspiração e infiltração, o que acarreta o aumento do volume e pico dos escoamentos a jusante, evidenciando assim, a necessidade de alternativas que venham auxiliar ou substituir as técnicas tradicionais de manejo de águas pluviais (MELO, 2011)

Nesse sentido, Pompêo (2000) afirma que a partir da década de 1960 os sistemas tradicionais de drenagem passaram a ser questionados, pelo fato de apenas transferir volumes acumulados para jusante e provocarem problemas futuros. Surgem, então, as técnicas compensatórias. Ainda segundo Melo (2011), as técnicas compensatórias se enquadram no conceito de *Best Management Practices* (BMP's), práticas que pretendem minimizar o escoamento superficial, os níveis de erosão e a poluição das águas do escoamento superficial, e tem como objetivo reduzir os efeitos provocados pela urbanização, diminuir os volumes escoados superficialmente a jusante, maximizar o controle na fonte, promover a restauração do ciclo hidrológico e intensificar o controle da qualidade da água bem como a recarga de aquíferos.

Para Daniel Junior (2013), às técnicas LIDs (*Low Impact Development*) e BMPs são alternativas sustentáveis para o controle e tratamento de efluentes pluviais que se opõem às ideias convencionais de drenagem urbana, onde seu objetivo não mais é se livrar o mais rápido e para mais longe possível o escoamento superficial, mas sim, hidrológicamente falando, retardar e/ou infiltrar o escoamento, onde se minimiza os efeitos da urbanização. Existem, no entanto, duas classificações para estas estruturas, de acordo com as funções que exercem sobre o ciclo hidrológico: as que atuam sobre o volume e as que atuam sobre a vazão. No caso das que atuam sobre o volume tem-se, por exemplo, as estruturas de infiltração, no caso das que atuam sobre a vazão tem-se, por exemplo, os reservatórios de retenção.

Tais técnicas, no entanto, precisam de um planejamento integrado com o planejamento urbano como destaca Silva e Bueno (2013), ou seja, a incorporação das mesmas com práticas, tais como: desenho de malhas urbanas e sua expansão, sistemas viário e de transporte, aspectos paisagísticos, zoneamento, etc. A autora destaca ainda a importância da valorização da bacia hidrográfica na sua função com a paisagem urbana, que contribui para diminuição dos problemas urbanos, melhoria da qualidade da água e outros benefícios, inclusive econômicos.

3.1.1 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Em se tratando de estudos acerca do desenvolvimento urbano e seus impactos no ciclo hidrológico pensa-se muito no uso e ocupação do solo, no entanto quando a análise é direcionada para as técnicas LID o mesmo precisa receber um maior detalhamento, uma vez que o processo de infiltração agora é o mais importante.

De acordo com Melo (2011), é fundamental o estudo do solo quando da implantação de um dispositivo como a biorretenção, uma vez que os processos envolvendo a água nesses sistemas estão diretamente relacionados com as propriedades químicas, físicas e mineralógicas do mesmo.

O solo não saturado se divide nas frações sólida, líquida e gasosa. A sólida corresponde ao conjunto das partículas de areia, silte e argila. A líquida é composta pela água e também ocorre a junção de sais minerais e substâncias orgânicas. A gasosa, por sua vez, é estabelecida a partir do ar do solo ou da atmosfera do solo (MELO, 2011).

De acordo com Carvalho (2013) vários são os fatores que influenciam a capacidade de infiltração do solo, como por exemplo: clima, cobertura vegetal, relevo e topografia e o próprio solo e seu grau de intemperismo. E, para o entendimento desse processo, deve-se considerar a geometria da estrutura de infiltração, as condições iniciais e de contorno, bem como a caracterização do perfil do solo e uma série de análises.

Ainda segundo Carvalho (2013), solos argilosos possuem pouca capacidade de infiltração, apesar de possuírem maior capacidade de armazenamento de água. Nos solos tropicais, o modo como se dá o armazenamento de água no seu interior é determinado pela distribuição dos poros. A autora concluiu que a estrutura do solo pode exercer influência mais significativa na taxa de infiltração do que a textura como partículas isoladas, para as condições brasileiras.

O processo de infiltração corresponde a passagem da água para o interior do solo e ocorre em função da mudança repentina das condições de umidade e pressão quando da

presença de água na superfície. Pode ainda ser considerado uma perturbação do perfil hídrico (zona de saturação, zona de transmissão e zona de molhamento) que se propaga de cima para baixo, sendo dada em função das características hidrodinâmicas, da vazão de alimentação, das condições iniciais e da estrutura e textura do solo (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

A modelagem da infiltração de água no solo é essencial, dado que a infiltração influencia preponderantemente o escoamento superficial. A infiltração é representada por duas variáveis: a taxa de infiltração e a infiltração acumulada. A primeira é igual a densidade de fluxo (volume de água que infiltra por unidade de área e de tempo), a segunda corresponde ao volume de água infiltrado ao longo do tempo por unidade de área (LIMA, 2009)

A taxa de infiltração máxima depende da condutividade hidráulica e do gradiente de energia da água, sendo ambos dependentes do conteúdo de água no perfil do solo, e prescinde de fornecimento de água necessário para manter uma fina lâmina de água superficial no solo, ao menos. Em caso do não estabelecimento dessa condição, a taxa de infiltração depende somente da taxa de fornecimento da água. (OLIVEIRA, 2015).

Os modelos que representam a infiltração da água no solo podem ser empíricos, como os de Kostiakov e de Horton, ou teóricos, como o de Green-Ampt. De acordo com Netto (2011) os modelos empíricos apresentam como vantagem a possibilidade de relacionar os parâmetros do modelo as características do solo e como principal desvantagem o fato do ajuste ser válido apenas para as condições às quais foram determinadas, impossibilitando assim o extrapolamento para outros tipos de solos.

O modelo de Green-Ampt é um dos modelos teóricos de estimação de infiltração no solo que mais apresentam potencial de utilização por se apoiar no processo físico da infiltração e também pela sua simplicidade (RODRIGUES e PRUSKI, 1997). Como uma desvantagem, os parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt não caracterizam exatamente as condições reais da infiltração (NETTO, 2011).

De acordo com Libardi (2005) o modelo de Green-Ampt é baseado na teoria do escoamento em meios porosos e emprega a equação de Darcy, decorrente da solução da equação de Richard para o caso exclusivo de solo saturado.

A Equação de Darcy, Equação 1, considera que o fluxo de água ocorre somente em uma direção, sendo que a mesma só é válida para uma condição onde haja diferença de potencial, ou seja, condição que permite a água fluir de um ponto a outro.

$$q = -K_s \frac{\partial H}{\partial L} \quad (1)$$

onde: q ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) é a densidade de fluxo; K_s ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) a condutividade hidráulica saturada do solo; ∂H (cm) o potencial total de água no solo e ∂L (cm) o comprimento da coluna de solo.

O modelo de infiltração de Green-Ampt (1911), muito empregado na modelagem de biorretenção, é dado pela Equação 2, a mais empregada para representar o modelo (BRANDÃO et al., 2006), não sendo permitido explicitar de forma exata o volume acumulado por infiltração em função do tempo.

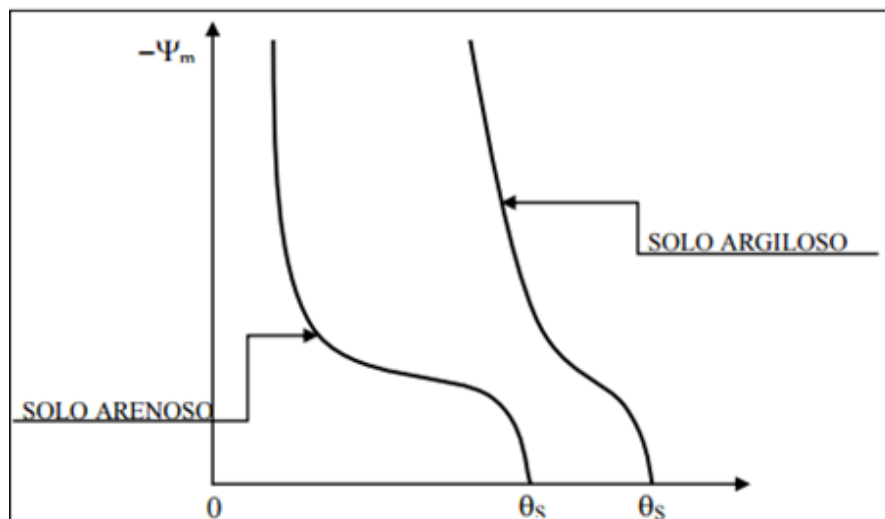
$$i = K_s \left[\psi_z + \frac{(\theta_s - \theta_i)}{I} + 1 \right] \quad (2)$$

onde: K_s ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) é a condutividade hidráulica saturada; ψ_z (cm) é o potencial matricial; θ_s e θ_i ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$) dizem respeito a umidade na condição saturada e inicial, respectivamente; e I (cm) é a infiltração acumulada, Equação 3, obtida através da profundidade da frente de umedecimento z_f (cm).

$$I = (\theta_s - \theta_i)z_f \quad (3)$$

Para a obtenção de K_s e estimativa de ψ_z em função de θ_i , pode-se lançar mão de métodos embasados fisicamente, os quais utilizam uma curva para estimar a condutividade hidráulica em função do potencial matricial ou da umidade, resultante da curva de retenção de água no solo (VAN GENUCHTEN, 1980; BRANDÃO et al., 2006), Figura 1

Figura 1 – Curva de retenção de água no solo



Fonte: Melo (2011)

3.1.2 COLMATAÇÃO

A colmatação é um aspecto importante no que tange à vida útil das estruturas de infiltração. Consiste na deposição de partículas do solo nos vazios do mesmo. É um processo progressivo que acontece em função do tamanho das partículas, pois as menores alcançam maiores profundidades e as maiores se acumulam mais próximo das superfícies. Pode ainda, estar associado ao surgimento de algas e bactérias. (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

De acordo com Baptista, Nascimento e Barraud (2011) ainda, esses fenômenos podem diminuir a condutividade hidráulica do solo e por consequência a taxa de infiltração das estruturas. No entanto, a retenção dos poluentes é favorecida nessas condições, em virtude da redução dos vazios. A representação da colmatação não é fácil porque os experimentos se distinguem muito em razão das diferentes características de água, solo, períodos de observação, etc.

De acordo com Daniel Junior (2013) é recomendável que a água pluvial passe por um pré-tratamento, visando a remoção de partículas maiores, de modo a evitar o processo de colmatação das estruturas. Carvalho et al. (2012) recomendam a pré-filtragem da água para evitar a colmatação do material de enchimento de poços de infiltração. Lucas, Barbassa e Moruzzi (2013) utilizaram uma camada de 10 cm de areia na parte superior da trincheira de infiltração estudada, com o objetivo de auxiliar na remoção de finos e prevenir a colmatação da estrutura.

Carvalho (2008) afirma que, nas estruturas do tipo poços de infiltração, a infiltração ocorre através das paredes e do fundo da estrutura, com é o caso da biorretenção objeto de estudo deste trabalho. No entanto, para fins de projeto, a infiltração no fundo pode ser desprezada devido ao processo de colmatação.

3.2 O DISPOSITIVO DE BIORRETENÇÃO

3.2.1 ASPECTOS GERAIS

Biorretenção é uma prática de gestão e melhoria da qualidade das águas pluviais escoadas superficialmente, constituída do emprego de solo associado com espécies vegetais, onde há compatibilização de processos de filtragem e adsorção de modo que se incentivam alguns fenômenos cruciais, tais como: degradação, decomposição, nitrificação, desnitrificação,

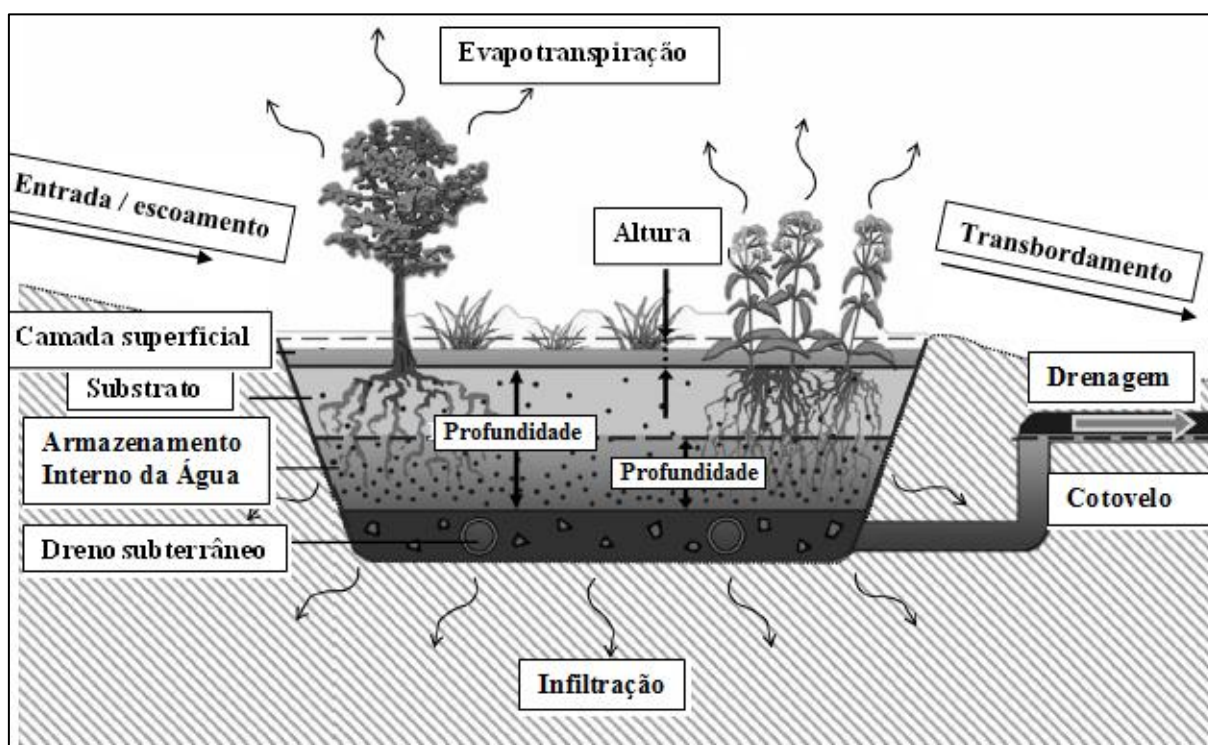
transpiração, evapotranspiração, volatilização, deposição de sólidos suspensos e partículas, atenuação termal, etc. (SOUZA, 2005).

De acordo com Davis et al. (2009), a biorretenção consiste de acessórios para entrada, saída e transbordamento de água, uma camada de 0,7 m a 1 m de areia, solo e material orgânico para o tratamento da água que infiltra e diversas formas de vegetação.

Para Melo et al. (2014), os sistemas de biorretenção consistem do preenchimento de áreas escavadas com materiais de alta permeabilidade e ainda materiais orgânicos, de modo que se possa permitir essencialmente retenção, filtração e infiltração.

A Figura 2 exibe a representação dos elementos e processos em geral presentes em um sistema de biorretenção. O escoamento da água entra na estrutura, atingindo primeiramente a camada superficial. A partir daí ocorre a passagem da água para as camadas inferiores (camada de substrato e camada de armazenamento) e a evapotranspiração da mesma, bem com a infiltração no solo natural, a saída pelos drenos (subterrâneo lateral) e o transbordamento em caso de enchimento da biorretenção.

Figura 2 – Representação dos elementos e processos de um sistema de biorretenção



Fonte: Winston (2014)

Cadore (2016) aponta a falta de informações como um empecilho na estimativa da vida útil do dispositivo de biorretenção, assim como na determinação da perda de eficiência em

decorrência da colmatação. A autora analisou os critérios de técnicas de dimensionamento para os sistemas de biorretenção, explorando o desempenho de duas metodologias de dimensionamento, Método da Curva Envelope e Método do LID, na comparação com as dimensões da estrutura estudada. Utilizou-se uma estrutura de infiltração construída em 2010, para o estudo. Ajustaram-se curvas de infiltração de Horton a partir de ensaios, dados coletados do monitoramento e dados do teste de estresse aplicado à estrutura. O teste de estresse se deu através do enchimento da biorretenção com água até a superfície, monitorando-se o nível através de um sensor de pressão instalado.

O processo de esvaziamento se deu em 24 horas, havendo novo enchimento após esse período. No total foram 3 enchimentos em 4 dias. Os dimensionamentos apresentaram medidas maiores do que as medidas reais. A autora, Cadore (2016), sugeriu a estudos futuros investigação da área lateral, da pressão hidrostática e de caminhos preferenciais no funcionamento do dispositivo. De posse dos resultados dos referidos testes de estresse, fez-se ajuste a equação de Horton, tal ajuste é fundamental no que concerne ao dimensionamento dos dispositivos de biorretenção. Concluiu-se que não houve alterações significativas nos parâmetros da equação ao longo dos três anos de monitoramento, pois embora haja redução da taxa de infiltração em virtude da colmatação do fundo, existe um aumento da porosidade.

Daniel Junior (2013) realizou o monitoramento de um dispositivo de biorretenção durante 26 meses no campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O objetivo foi analisar o desempenho quantitativo e qualitativo da estrutura para as condições hidroclimáticas e pedológicas do município de Santa Maria-RS. Constatou-se que houve colmatação da estrutura, onde a vida útil estimada em 10 anos provavelmente não foi cumprida. Com relação ao tratamento percebeu-se que a camada superior de solo não tem capacidade de tratar a água nos padrões exigidos. No que tange ao desempenho quantitativo, este foi satisfatório, suportando a estrutura todos os eventos do período monitorado.

Melo (2011) apresentou um estudo experimental de uma biorretenção implantada na Universidade Federal de Pernambuco, denominada jardim de chuva pela autora. Objetivou-se analisar o desempenho da estrutura quanto às funções de retenção e infiltração e a capacidade de armazenamento de água em seu interior. Foram analisados 4 eventos, sendo que o monitoramento foi dividido em duas fases. A primeira considerou somente a precipitação direta sobre a estrutura, e a segunda, além da precipitação direta, considerou um volume oriundo de uma área impermeável (telhado). A função de retenção mostrou-se eficiente quando considerado somente a precipitação direta. A função de infiltração foi considerada eficiente pelo fato de seus valores terem sido consideravelmente maiores do que os do solo natural. A função

de armazenamento, por sua vez, também atendeu aos anseios de absorção dos volumes de chuva. Concluiu-se, portanto, que o jardim de chuva atendeu aos requisitos para amortecimento dos volumes de chuva escoados superficialmente

Hwang et al. (2017) verificaram experimentalmente a possibilidade de coexistência de uma biorretenção e um pavimento de concreto permeável para fins de melhoria da qualidade da água e redução do volume de escoamento de águas pluviais. Percebeu-se que é possível uma gestão alternativa da quantidade e qualidade da água através da combinação dessas duas técnicas.

Gogate, Kalbar e Raval (2016) avaliaram o uso das técnicas LID em países em desenvolvimento, através de critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais. Nesse contexto foram apontadas vantagens e desvantagens do sistema de biorretenção. Quanto às vantagens, tem-se: redução de pico e volume de escoamento, geralmente requer menos espaço e é mais econômica, requer pouca manutenção, tem valor estético, moderniza paisagens urbanas. Quanto às desvantagens, tem-se: grandes quantidades de sedimentos podem causar falha prematura e não pode ser aplicada para grandes áreas de drenagem. Por fim, foi proposta uma abordagem de tomada de decisão que pode ser empregada na seleção das melhores técnicas sustentáveis para gestão de águas pluviais urbanas.

3.2.2 DIMENSIONAMENTO

De acordo com Cadore (2016), muitos são os métodos de dimensionamento de biorretenção, destacando-se dois: Método da Curva Envelope e o Método *LID Hydrologic Analysis*. O primeiro é um método simples, onde faz-se aplicação direta dos dados de caracterização e da curva de intensidade-duração-frequência (IDF), ambos do local em estudo, e se apoia na determinação dos volumes acumulados de entrada e saída, de modo que o volume deverá ser capaz de armazenar a máxima diferença entre os volumes acumulados de entrada e saída.

O segundo, por sua vez, também conhecido como método americano, baseia-se nos conceitos de armazenamento e reservatório de detenção e no *Soil Conservation Service (SCS)*. O método consiste, em essência, na determinação do volume a ser armazenado, de modo que a vazão de pós-urbanização não seja maior que a vazão máxima atual e o dimensionamento consiste de um processo de tomada de decisões de forma sequencial.

Rosa (2016) propôs um método de dimensionamento denominado BIRENICE com foco em climas subtropicais. O dimensionamento é feito com base na disponibilidade de área para

implantação da biorretenção. Na modelagem foi utilizado o Método de Puls para verificar o dimensionamento, onde a vazão de entrada foi dada pelo método do hidrograma triangular, utilizando-se o Método Racional para o cálculo da vazão de pico e o NRCS (*Natural Resources Conservation Service*) para a determinação da chuva efetiva. Duas foram as equações consideradas para a saída: uma equação de vertedor com ângulo de 90° e uma equação para percolação, onde o fluxo é calculado pelo método de Green-Ampt e Darcy (ERICKSON; WEISS; GULLIVER, 2013).

Esse método foi comparado com o modelo HEC-HMS, que permitiu concluir que o método criado tem comportamento semelhante ao referido modelo, que já é consolidado. Havendo, contudo, duas diferenças singulares: o método BIRENICE considera o decaimento da infiltração ao longo do tempo e, de forma inovadora, é capaz de prever cenários futuros no dimensionamento da estrutura de biorretenção. Importa salientar que o método foi aplicado em uma biorretenção construída para uma área em escala de microdrenagem e não de lote.

Daniel Junior (2013) utilizou o método da curva envelope para estimar os volumes de entrada no dispositivo de biorretenção, ou trincheira mista como denominou o autor. Os volumes de saída foram determinados por meio da soma da infiltração e da evapotranspiração para um evento crítico. Sendo a infiltração considerada igual a infiltração para a condição de solo saturado, fazendo-se necessária, para tanto, a determinação da porosidade da estrutura. Esta foi determinada de acordo Galbiati (2009). A evapotranspiração, por sua vez, foi calculada para o mês mais frio do ano, observando se as normais climatológicas do município de implantação do dispositivo (Santa Maria - RS) e estimando-se a evapotranspiração mensal através do Método de Thornthwaite. Para verificação da ocorrência de colmatção foram utilizados seis eventos para o ajuste do modelo de infiltração de Horton, percebendo-se diminuição da taxa de infiltração nos diferentes períodos, através dos parâmetros de Horton. Foram utilizados seis eventos nesta análise (2 em cada ano, consecutivamente). Os mesmos tiveram características diferentes, a precipitação e a duração variaram de 31,42 mm a 82,2 mm e de 8,58 a 20,92 horas, respectivamente, por exemplo.

Melo (2011) analisou a retenção a partir da capacidade da estrutura em reter o máximo de água em sua superfície. Para a infiltração, fez-se a comparação da taxa de infiltração da biorretenção com a taxa de infiltração do solo natural. O armazenamento foi analisado de acordo com os níveis de água no interior da estrutura. A vazão de entrada no dispositivo foi calculada a partir do Método Racional. A de saída foi estimada de acordo com teste de infiltração (fez-se ajuste à equação de Horton a partir das curvas da taxa de infiltração), com

duas hipóteses: a primeira considerando somente a direção vertical do fluxo e a segunda levando-se em conta também o fluxo horizontal.

3.3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Muitos são os modelos que podem ser utilizados para simular o comportamento das técnicas compensatórias e, conseqüentemente, de biorretenções. De acordo com Ferreira (2017), SWMM (LIU et al., 2014), RECHARGE (DUSSAILLANT; CHUN; POTTER, 2004), MUSIC (IMTEAZ et al., 2013), DRAINMOD e RECARGA podem ser indicados dentre os modelos mais utilizados nesse contexto.

Souza (2005) realizou a simulação numérica da implantação de um dispositivo de biorretenção para um condomínio hipotético na cidade de Porto Alegre - RS, para quatro cenários diferentes: condição natural, desenvolvimento de condomínio sem qualquer controle, desenvolvimento do condomínio seguindo a legislação local para a construção de loteamento e o desenvolvimento de condomínio em conformidade com as estratégias LID. Para tanto, utilizou-se o modelo hidrológico IPHS1, que faz o uso do NRCS para separar o escoamento e propagar a vazão. Souza, Cruz e Tucci (2011) apresentam melhor o modelo utilizado para a mencionada simulação, onde criaram-se e adaptaram-se alguns módulos hidrológicos para o IPHS1, nos quais as saídas foram estimadas pela infiltração lateral através da equação de Horton e pela percolação através do algoritmo de Berthelot (TUCCI, 2001).

Hoskins e Jason (2013) avaliaram o desempenho de uma biorretenção em recriar o escoamento em uma condição de solo natural em St. Louis, EUA, através do modelo numérico RECARGA. Os resultados do RECARGA fornecem a quantidade e o percentual anual relacionado a cada componente do balanço hídrico na biorretenção. Avaliaram-se três cenários, no primeiro a biorretenção armazenou 75% do 90º percentil da chuva de 24 h (29 mm), no segundo cenário a biorretenção armazena 95% da precipitação anual e no terceiro cenário a biorretenção apresenta volume de armazenamento necessário para capturar e infiltrar 95% do escoamento anual. Os autores concluíram que esses tipos de BMPs podem produzir pequenos efeitos na redução do volume total de escoamento, sendo necessário avaliar outras questões, como as decisões sobre o uso da terra.

Wathaway et al (2014) utilizaram o modelo de simulação contínua DRAINMOD para caracterizar sistemas de biorretenção em cenários climáticos atuais e futuros. Utilizaram-se quatro sistemas de biorretenção, modelados sob duas configurações diferentes, totalizando oito cenários avaliados. As equações governantes do modelo são dois balanços hídricos, uma na

superfície do solo e outra no perfil do solo. A taxa de infiltração é calculada através da equação de Green e Ampt (Green e Ampt, 1911). A verificação do ajuste do modelo foi feita usando o coeficiente Nash-Sutcliffe. O autor afirma que o estudo é aplicável para os padrões climáticos da Carolina do Norte, EUA, e que estudos similares em outros lugares do mundo devem melhorar a resposta dos sistemas às mudanças climáticas.

Roy-Poirier, Fillion e Champagne (2015) apresentaram um modelo hidrológico de biorretenção (MHB). O MHB é um modelo unidimensional de diferenças finitas que foi baseado no modelo RECARGA e consiste em quatro camadas que atuam com reatores. O transbordamento da água é calculado por uma equação de vertedor, a taxa de infiltração na zona de raiz e a saída de água lateral são dadas por uma versão modificada da equação de Green-Ampt, a percolação é determinada com base na teoria cinemática do fluxo insaturado e, por fim, a equação de van Genuchten é utilizada para definir as condutividades hidráulicas não saturadas. Aplicou-se o modelo a dados reais e os resultados sugeriram que o armazenamento de água no solo é o processo mais importante para a retenção de águas pluviais nos sistemas de biorretenção, sendo a saída de água pela lateral significativa quando os solos nativos são permeáveis.

Baek et al. (2017) desenvolveram um software de modelagem para simular e otimizar a implantação de biorretenção em bacias hidrográficas. O armazenamento e o movimento de água nas camadas de solo são calculados pela equação de Darcy, com a condutividade hidráulica podendo ser determinada pela equação de van Genuchten. O processo de otimização passa pela análise de custo, dimensões e melhores combinações de biorretenção na bacia.

3.3 MODELAGEM ATRAVÉS DO MÉTODO DE PULS

O método de Puls é utilizado para simular o escoamento em reservatórios, permitindo, dessa forma, estimar o desempenho da estrutura analisada. É utilizado tanto na fase de concepção quanto na fase de diagnóstico e é considerado um modelo global, uma vez que suas respostas não se dão necessariamente em função dos parâmetros físicos do sistema propriamente ditos (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

A metodologia empregada no método de Puls consiste em uma expressão discretizada da equação da continuidade concentrada, Equação 4, e na relação entre o armazenamento e a vazão do reservatório. Obtêm-se os valores das incógnitas Q e S no tempo $t+1$ através da relação entre cota e vazão de saída, curva cota *versus* vazão de saída. Simplificando a Equação 4 resulta-se na Equação 5.

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{Q_{e_t} + Q_{e_{t+1}}}{2} - \frac{Q_{s_t} + Q_{s_{t+1}}}{2} \quad (4)$$

$$Q_{s_{t+1}} + \frac{2S_{t+1}}{\Delta t} = Q_{e_t} + Q_{e_{t+1}} - Q_{s_t} + \frac{2S_t}{\Delta t} \quad (5)$$

onde: Q_{e_t} e $Q_{e_{t+1}}$ são as vazões de entrada no reservatório nos tempos t e $t+1$; Q_{s_t} e $Q_{s_{t+1}}$ são vazões de saída do reservatório nos tempos t e $t+1$; S_t e S_{t+1} são os volumes de armazenamento do reservatório nos tempos referidos e Δt , o intervalo de tempo de simulação.

Pode-se resumir em quatro passos o procedimento de aplicação do método:

- 1) Traça-se a curva cota *versus* vazão de infiltração;
- 2) No instante $t+1$, os termos da direita da Equação 5 são conhecidos e determina-se o valor de $[Q_{s_{t+1}} + 2S_{t+1}/\Delta t]$;
- 3) A partir de $[Q_{s_{t+1}} + 2S_{t+1}/\Delta t]$ é obtida a vazão de saída por interpolação pela curva cota *versus* vazão de infiltração;
- 4) Conhecida a vazão de saída, calcula-se o nível de água de acordo com o Δt .

De acordo com Rosa (2016), o método pode ser ajustado a um dispositivo de biorretenção, conforme a Equação 6, onde a saída ocorre em função da infiltração/percolação. Este processo pode ocorrer pela lateral e pelo fundo da biorretenção, conforme realizado por Angelini Sobrinha (2012), na modelagem de um poço de infiltração e por Lucas, Barbassa & Moruzzi (2013), na simulação de uma trincheira de infiltração.

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta t} = \overline{Q_{e_t}} - \overline{Q_{s_t}} - \overline{f_{TC,t}} \quad (6)$$

onde: S (m^3) representa o volume armazenado; Q_e (m^3/s) representa a vazão de saída; Q_e (m^3/s) representa a vazão de entrada; $f_{TC,t}$ (m^3/s) representa a percolação no solo; e t (s) o tempo.

4 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho pode ser dividida em quatro etapas. A primeira etapa (item 4.1) compreende a descrição da localização e da área de estudo. A segunda etapa (item 4.2) aborda os detalhes construtivos da biorretenção, tais como os critérios de dimensionamento e plantas e cortes. A terceira etapa (item 4.3) diz respeito ao monitoramento, apresentando-se os detalhes sobre a obtenção da precipitação, da vazão de entrada e do nível de água no interior da estrutura. A quarta e última etapa é a fase da modelagem (item 4.4) que exhibe as equações do modelo e os aspectos da calibração e validação do modelo.

4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo da pesquisa, Figura 3, situa-se no Centro de Tecnologia (CTEC) do campus da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, Alagoas. A cidade possui clima caracterizado como quente e úmido, de acordo com Barbirato et al. (2000), com temperatura média anual de 24,7 °C e precipitação média anual de 1726 mm, sendo novembro o mês mais seco com 39 mm de precipitação média e maio o mês de maior precipitação média, 286 mm (CLIMA, 2018).

De acordo com Rosendo (2013) o solo do local onde se localiza a biorretenção tem características argilosas, resultado obtido a partir de ensaio granulométrico com amostra coletada a uma profundidade de 80 cm a partir do nível do terreno.

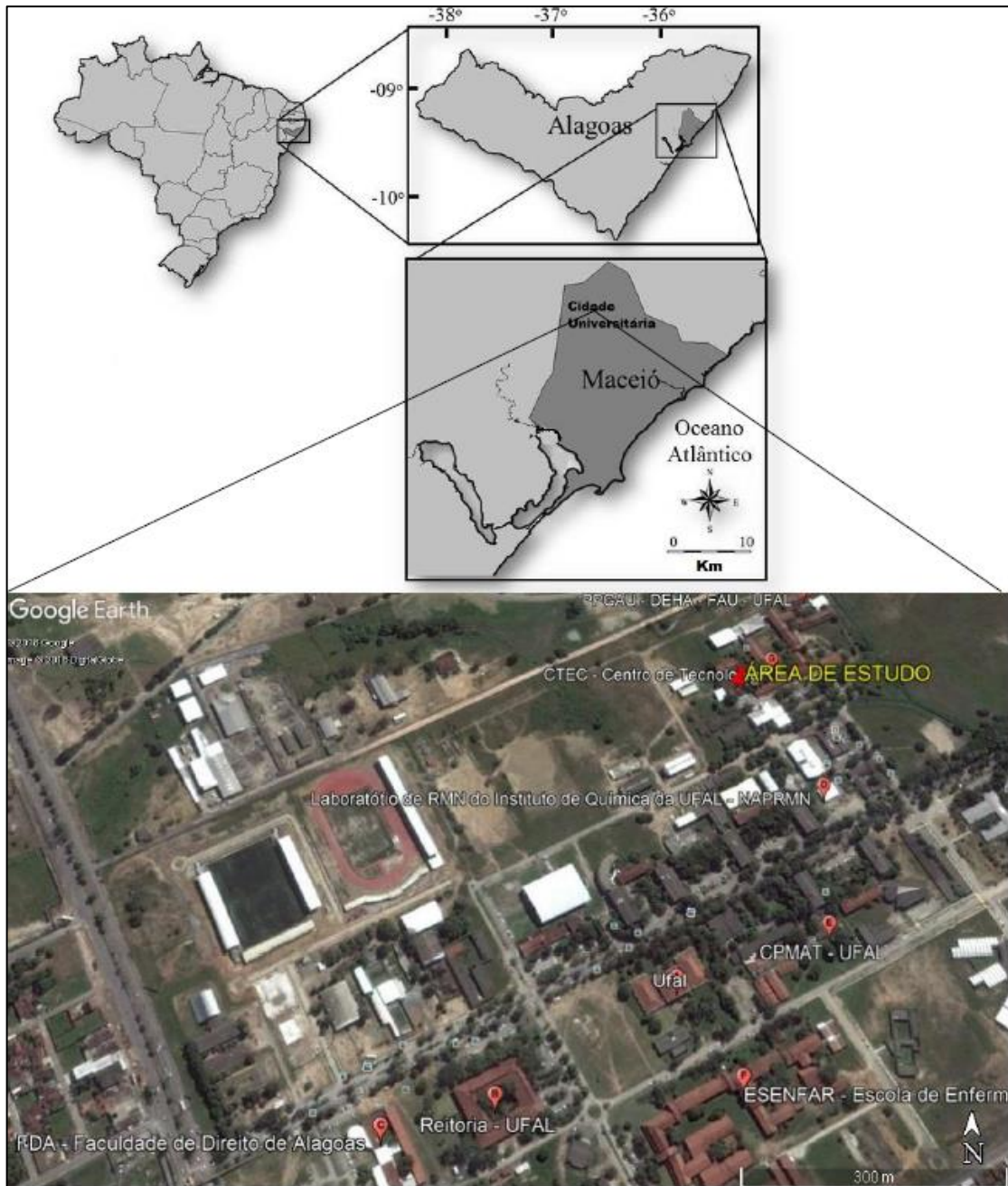
A biorretenção foi construída próxima ao prédio onde funciona o programa Conhecer e Experimentar Engenharia (CEENG), Figura 4, recebendo a contribuição das águas escoadas diretamente dos telhados, de área igual a 173,8 m², da referida edificação e do terreno natural adjacente que é composto por grama e planta e tem área igual a 124,6 m².

A água do telhado é coletada através de calhas, item 2 na Figura 5, e conduzida por intermédio de tubulações até a biorretenção. Uma barreira de tijolo que contorna a estrutura direciona o fluxo da água escoada no terreno adjacente para outra entrada, item 6 na Figura 5, uma abertura livre no lado oposto ao vertedor. Essa barreira, aliada ao desnível entre o terreno natural e a superfície da biorretenção, também delimita a biorretenção para evitar o transbordamento de água.

Além dos itens supracitados, a Figura 5 exhibe os outros itens com os demais componentes do sistema de biorretenção: o item 1 é o vertedor para medir a vazão de entrada proveniente do telhado, o item 3 são os condutores verticais que interligam as calhas do telhado

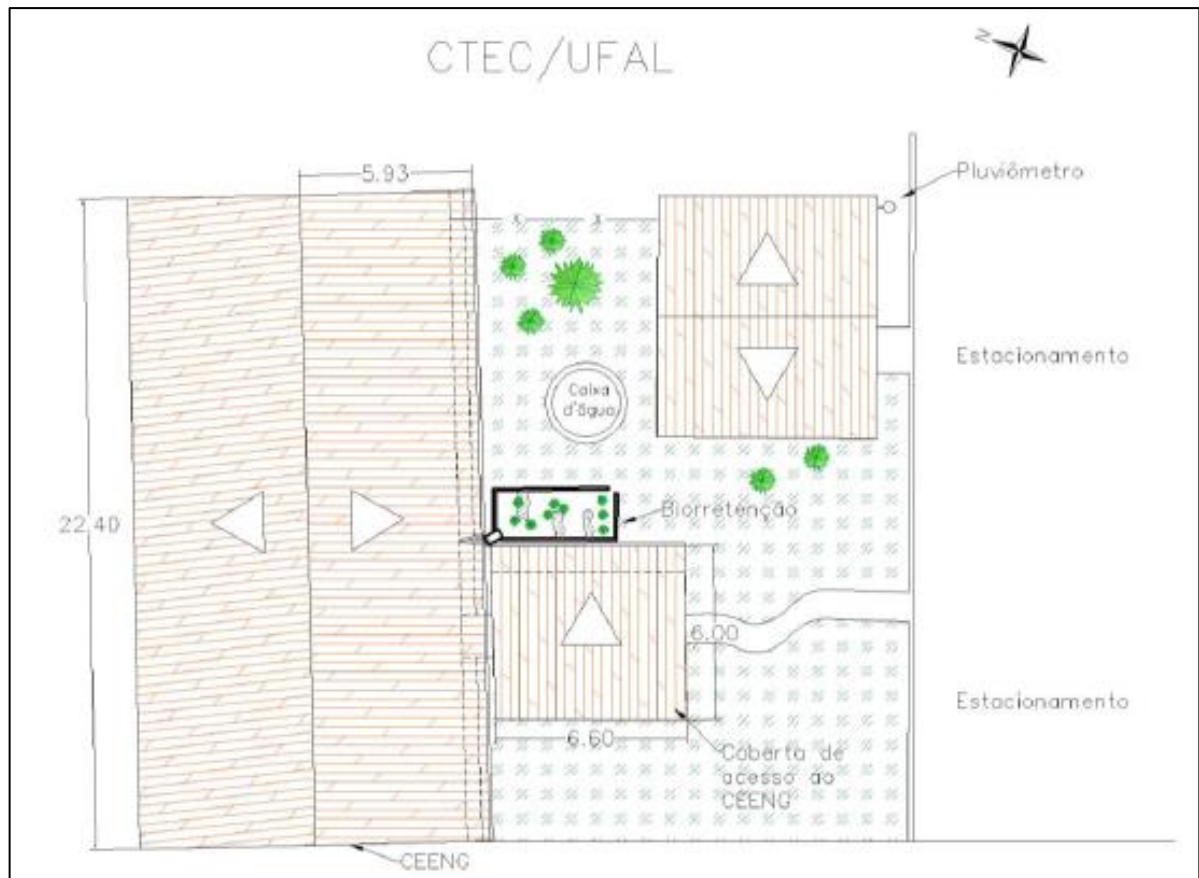
ao vertedor, o item 4 são os poços (que vão até 10 cm abaixo do dolo) para coleta de amostra para análise da qualidade da água (a análise da qualidade da água não foi objeto de estudo dessa pesquisa) e onde ficam os sensores de nível o, item 5 é a barreira de tijolos e, por último, o item 7 é a área permeável adjacente a estrutura, composta predominantemente por grama.

Figura 3 – Localização da área de estudo no campus da UFAL



Fonte: Adaptado de Santos e Sampaio (2013)

Figura 4 – Planta do local onde foi construída a biorretenção



Fonte: Braga (2017)

Figura 5 – Componentes do sistema de biorretenção



- 1 – Vertedor de monitoramento da vazão proveniente do telhado;
- 2 – Calhas para coleta de água do telhado;
- 3 – Condutores verticais que interligam as calhas do telhado ao vertedor;
- 4 – Poços de coleta de amostra para análise da qualidade água e pontos de nível;
- 5 – Barreira de tijolo que contorna a estrutura;
- 6 – Abertura livre para a entrada de água proveniente da área adjacente;
- 7 – Área permeável adjacente composta predominantemente por grama.

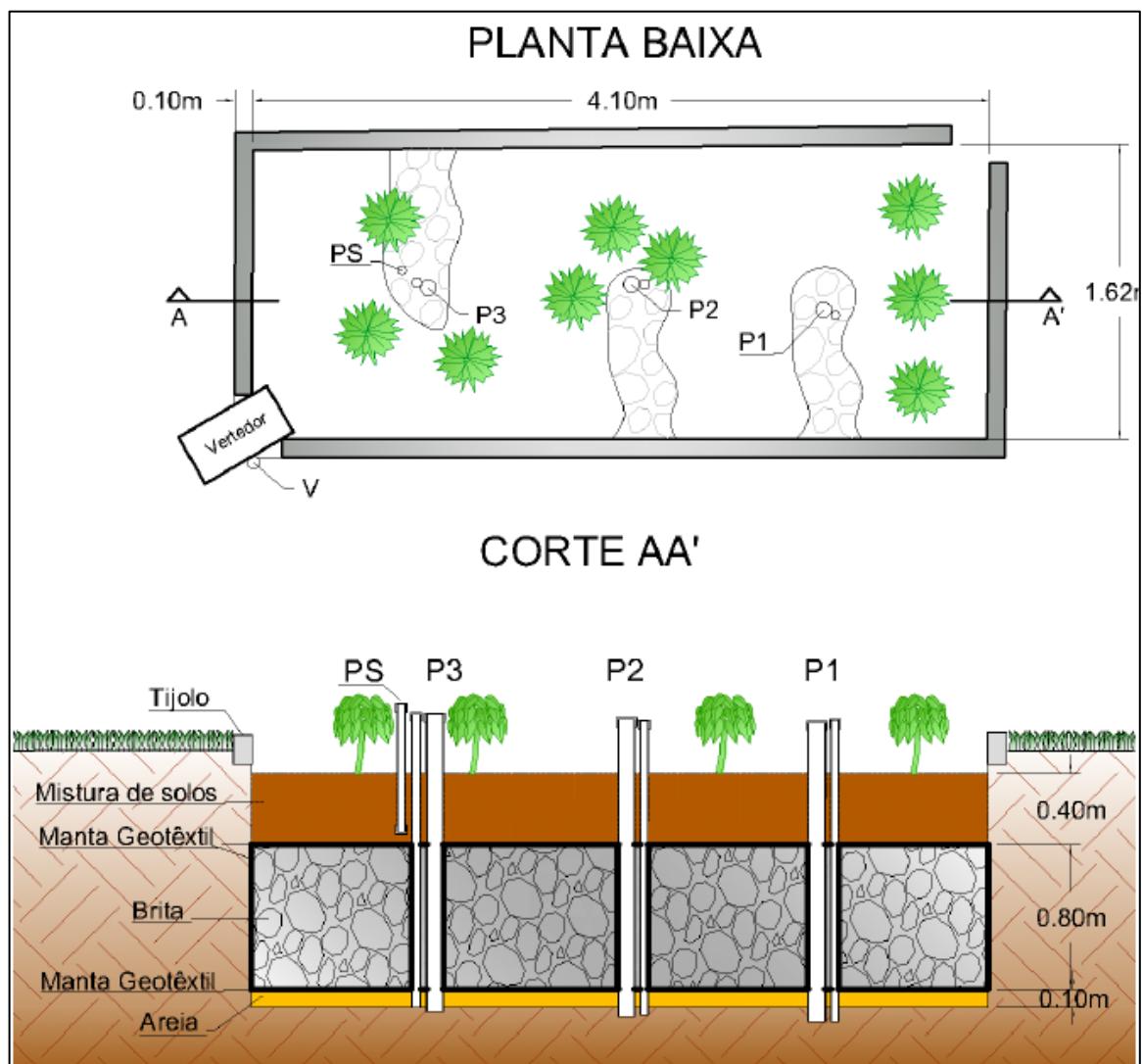
Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2006)

4.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

O dispositivo de biorretenção encontra-se em operação desde maio de 2015. De acordo com Rosendo (2013), utilizou-se o método da precipitação efetiva para o dimensionamento da mesma, obtendo-se 8,3 m³ de volume total. Sua geometria e dimensões foram definidas por Menezes (2015), obedecendo tanto ao volume calculado por Rosendo (2013) quanto aos critérios estipulados por (USEPA, 1999).

A Figura 6 exibe a planta baixa e um corte da estrutura, que foi construída em formato prismático, com largura igual a 1,8 m, comprimento de 4,2 m (área superficial igual a 6,64 m², descontando a barreira de tijolos) e altura dos materiais igual a 1,3 m (resultando em um volume total igual a 8,63 m³).

Figura 6 – Planta baixa e corte da biorretenção



Fonte: Adaptado de Braga (2017)

Menezes (2015) definiu ainda os tipos dos materiais e a altura das respectivas camadas da biorretenção, que podem ser observados na corte AA' da Figura 6. A primeira camada, no sentido de baixo para cima, tem espessura de 10 cm e foi concebida com areia de porosidade igual a 30% para filtração da água, de modo que atenua os efeitos da colmatção do solo do fundo da biorretenção. Acima da camada de areia está a camada de brita, com 80 cm de altura e 43,5 % de porosidade, que serve para o armazenamento da água.

A última camada, denominada mistura de solo, é formada por substrato com húmus e terra preta (na proporção 1:1), que permite o desenvolvimento de algumas plantas *Philodendron sagittifolium*, popularmente conhecida como Imbé, exibidas na planta baixa da Figura 6. Essa camada fica sobre uma manta geotêxtil (BIDIM), que além de evitar a passagem de sólidos para a camada de armazenamento, complementa o processo de filtração da água (BRAGA, 2017).

Os pontos P1, P2 e P3, Figura 6, representam os poços de coleta de água e os locais onde ficam os sensores de nível. Cada ponto possui uma tubulação perfurada de DN 50 mm (para o monitoramento do nível) e uma de DN 100 mm (para a coleta de água). O ponto V contém uma tubulação, de DN 75 mm, conectada ao vertedor através das extremidades inferiores de ambos por um flange, para que seja possível medir o nível da água naquele dispositivo. O ponto PS possui uma tubulação perfurada de DN 50 mm que recebe um sensor de nível para medir o nível da água acima da camada de mistura de solos.

4.3 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Utilizaram-se nesta pesquisa eventos monitorados nos anos de 2015, 2016 e 2017. Sendo o evento compreendido entre o início da precipitação e o completo esvaziamento da biorretenção. Nesses dois primeiros anos o monitoramento foi realizado por Ferreira (2017). A coleta dos dados foi realizada em média a cada 15 dias, tempo correspondente a capacidade máxima de armazenamento de dados por parte dos sensores. Os itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 detalham os procedimentos empregados na obtenção da precipitação, vazão de entrada e do nível de água no interior da biorretenção (na camada de armazenamento), respectivamente.

4.3.1 PRECIPITAÇÃO

O equipamento utilizado para medir as precipitações é um pluviômetro de báscula RG3-M (Figura 7), da marca *Onset*, com um *data logger* acoplado, instalado em uma edificação próxima a biorretenção (Figura 4 e Figura 7). Até maio 2016, quando o pluviômetro foi

instalado, a precipitação era medida, a cada intervalo de 10 min, pela estação pluviométrica “Cidade Universitária” – 270430216A do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), localizada a aproximadamente 1,6 Km da área de estudo (Figura 7).

Figura 7 – Localização dos pluviômetros da biorretenção do CEMADEN



Fonte: Adaptado de Braga (2017)

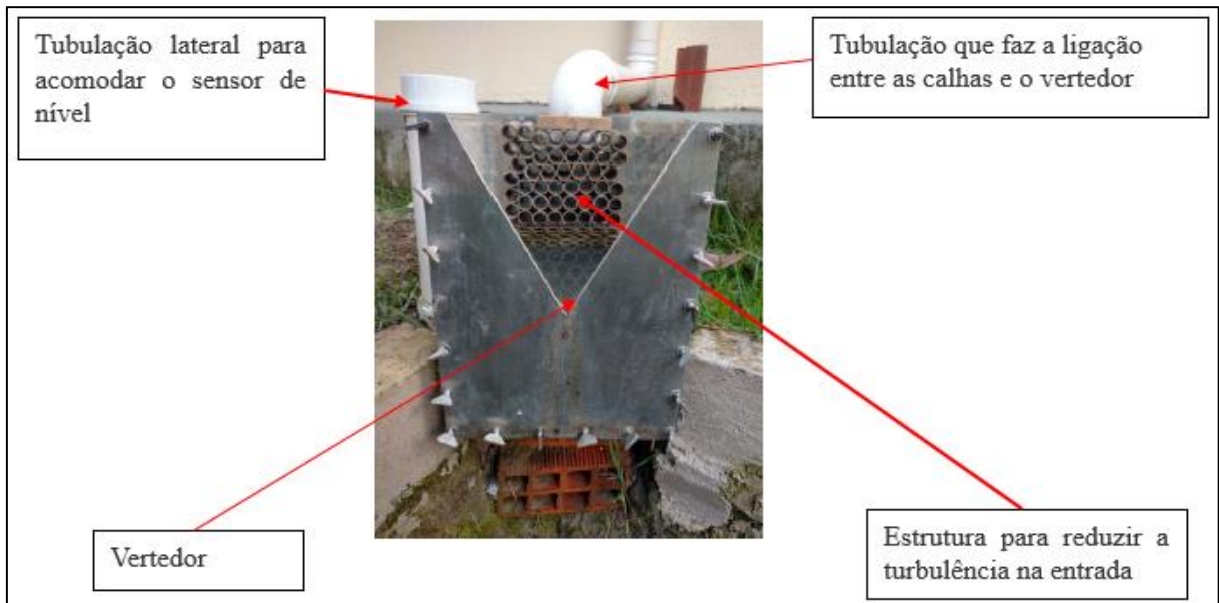
O *data logger* registra o número de “basculadas” do pluviômetro (cada uma corresponde a 0,2 mm) e essa é a informação coletada. De posse da mesma geraram-se os hietogramas, com intervalos de tempo de 10 min. A precipitação não foi utilizada diretamente no modelo, mas é fundamental nas discussões dos resultados, sobretudo no que tange a análise das velocidades de infiltração/percolação observadas (K) em função da umidade. Definiu-se o critério de independência entre dois eventos de acordo com o instante final de um evento e o momento do começo de outro evento (intervalo de tempo entre o completo esvaziamento da biorretenção e a precipitação), doze horas, conforme Souza (2002).

4.3.2 VAZÃO DE ENTRADA

A vazão de entrada oriunda dos telhados é medida através de um vertedor triangular (Figura 8) de 60° de parede delgada, 30 cm de altura, 20 cm de largura, 60 cm de comprimento e altura da crista igual a 13,1 cm. As paredes laterais são de acrílico e a parede frontal de aço

inoxidável. Inseriram-se, no seu interior, seixos e uma estrutura com tubulações de PVC, com o objetivo de amenizar a turbulência na entrada. O sensor para medir a variação do nível, que consequentemente é utilizado para o cálculo da vazão, fica no interior de uma tubulação de DN 75 mm acoplada à lateral do vertedor, 30 cm a montante da crista.

Figura 8 – Vertedor utilizado no monitoramento da vazão de entrada



Fonte: Adaptado de Braga (2017)

O sensor de nível foi programado para fazer os registros dos dados a cada minuto. Esses dados são fornecidos em pressão absoluta, necessitando-se convertê-los para pressão relativa com o uso dos dados de pressão atmosférica, monitorados por um *Barollog* instalado próximo a área de estudo. De posse desses dados, as vazões de entrada proveniente do telhado na biorretenção foram obtidas a partir da Equação 7, ajustada por Menezes (2015) a partir de 30 simulações utilizando-se o princípio do método volumétrico de medição de vazões. A equação apresentou R^2 igual a 0,99.

$$Q_v = 0,0118 \cdot h_v^{2,3172} \quad (7)$$

onde:

Q_v (L/s) é vazão de entrada oriunda do telhado na biorretenção;

h_v (cm) é a diferença entre o nível da água e altura da crista do vertedor.

A vazão de entrada proveniente da área adjacente a biorretenção foi estimada com base na precipitação efetiva calculada para essa área pelo método SCS, para grupo de solo C e valor do número CN igual a 75, de acordo com as características de uso e ocupação do local. De posse da precipitação efetiva obteve-se um fator multiplicativo, Equação 8, para a vazão de entrada proveniente do telhado, de modo que a mesma levasse em consideração a vazão de entrada da área adjacente, obtendo-se assim uma vazão total única a ser considerada no modelo.

$$f_m = \frac{V_t + V_a}{V_t} \quad (8)$$

onde:

f_m é o fator multiplicativo da vazão de entrada que vem do telhado;

V_t é o volume de água proveniente do telhado calculado a partir da vazão de entrada medida no vertedor

V_a é o volume de água oriundo da área adjacente, calculado pelo produto entre a precipitação efetiva e a área adjacente.

4.3.3 NÍVEL DE ÁGUA NO INTERIOR DA BIORRETENÇÃO

O nível de água no interior da biorretenção foi monitorado por sensores de nível do tipo *Levelogger F100/M39* da marca *Solinst*. Assim como no monitoramento do nível no vertedor, esses sensores foram programados para fazer o registro do nível a cada minuto e também necessitaram da transformação da pressão absoluta em pressão relativa.

Utilizaram-se apenas os dois sensores que ficam no fundo da biorretenção nessa pesquisa (desconsiderou-se o sensor localizado na camada de substrato, que fica no ponto PS, com descrito no item 4.2 e exibido na Figura 6 do referido item) uma vez que os mesmos são suficientes para verificar os volumes e os níveis de água no interior da biorretenção. Calculou-se a média aritmética entre os níveis fornecidos pelos dois sensores de modo a obter-se o nível observado a ser considerado no modelo.

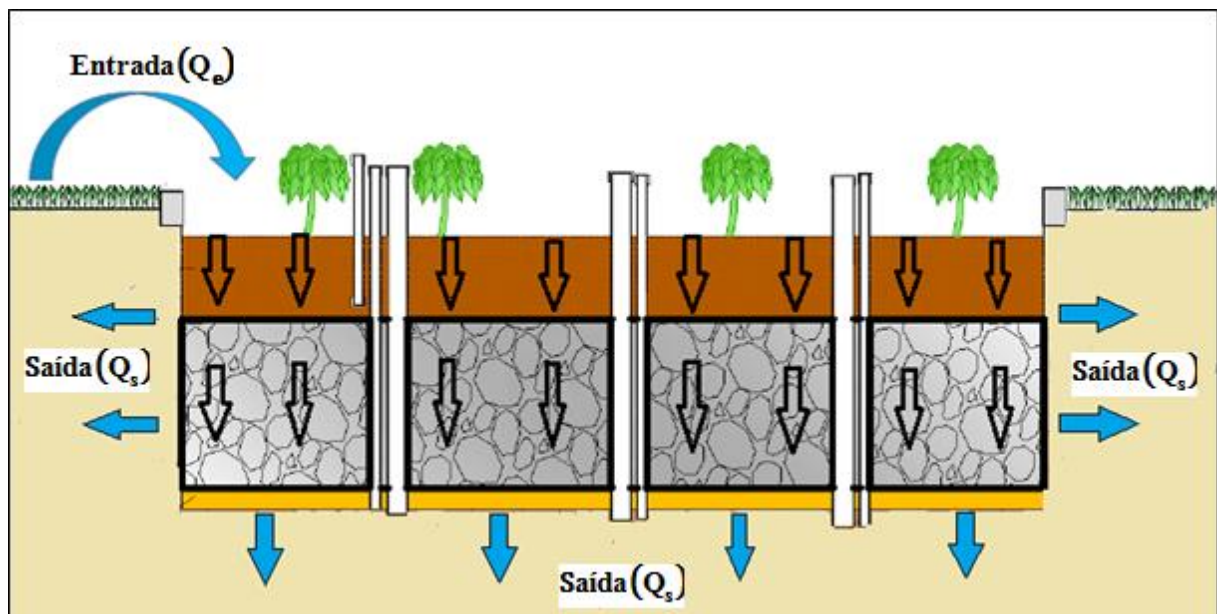
O intervalo de tempo entre o momento em que se inicia a vazão no vertedor e o instante em que se inicia a elevação do nível no fundo da biorretenção, em função do tempo que a água leva para percorrer as camadas e das perdas iniciais da vazão de entrada, foi aqui chamado de defasagem. Essa consideração é importante pois no método de Puls (o método aplicado para calcular a vazão de saída neste trabalho) a vazão de saída ocorre imediatamente após a vazão

de entrada. Necessitando-se, portanto, deslocar o cotograma calculado pelo modelo em relação ao cotograma observado, de acordo com a defasagem, em cada evento.

4.4 MODELAGEM DA BIORRETENÇÃO

A Figura 9 ilustra os processos envolvidos na modelagem da biorretenção. A vazão de entrada, Q_e , monitorada (entrada do modelo) provoca o escoamento da água em direção ao fundo da biorretenção que é armazenada e infiltrada/percolada pelo fundo e pelas laterais, resultando na vazão de saída (saída do modelo), que é calculada pelo método modificado de Puls (CUDWORTH JÚNIOR, 1989), modelando-se, portanto, a vazão de entrada e os níveis d'água observados.

Figura 9 – Modelagem da biorretenção



Fonte: Adaptado de Braga (2017)

O método modificado de Puls (CUDWORTH JÚNIOR, 1989) faz o uso da equação da continuidade e da relação cota-volume-vazão do reservatório. A equação da continuidade, Equação 9, traduz o princípio da conservação da massa (BAPTISTA, NASCIMENTO; BARRAUD, 2005).

$$\overline{Q}_e - \overline{Q}_s = \frac{dS}{dt} \quad (9)$$

onde:

$\overline{Q_e}$ (m³/s) é a vazão média de entrada;

$\overline{Q_s}$ (m³/s) é a vazão média de saída;

S (m³) é o volume armazenado dentro da biorretenção no intervalo de tempo t (s).

Integrando a Equação 9 para cada intervalo de tempo obtêm-se a Equação 10

$$\int_{S_t}^{S_{t+1}} dS = \int_t^{(t+1)} Q_e(t) \cdot dt - \int_t^{(t+1)} Q_s(t) dt \quad (10)$$

Reescrevendo a Equação 10 integrada na forma de diferenças finitas, a mesma resulta na Equação 11.

$$\left(\frac{2S_{(t+1)}}{\Delta t} + Q_{s(t+1)} \right) = (Q_{e_t} + Q_{e(t+1)}) + \left(\frac{2S_t}{\Delta t} - Q_{s_t} \right) \quad (11)$$

As incógnitas da Equação 5 são os volumes e vazões de saída em $t+1$, $S_{(t+1)}$ e $Q_{s(t+1)}$, obtidas resolvendo-se iterativamente essa equação com o auxílio da relação Q_s versus $2S/dt + Q_s$ construída a partir da relação entre o nível da água no interior da biorretenção e a vazão de saída da mesma (CUDWORTH JÚNIOR, 1989). A vazão de saída é dada pela Equação 12 e pela Equação 13.

$$Q_s = K \cdot A_t(h) \cdot 3.600.000 \quad (12)$$

$$Q_s = K \cdot (L_b \cdot C_b + 2 h (C_b + L_b)) \cdot 3.600.000 \quad (13)$$

onde:

Q_s (m³/s) é a vazão de saída;

K (mm/h) é a velocidade de infiltração/percolação, o parâmetro calibrado no modelo;

A_t (m²) é a área da biorretenção (área do fundo mais a área lateral);

h (m) é o nível da água no interior da biorretenção;

L_b (m) é a largura da biorretenção;

C_b (m) é o comprimento da biorretenção;

4.4.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO COM K CONSTANTE

Através das Equações 14, 15 e 16, calcularam-se valores de K para cada evento, a partir dos dados de nível observados. Em seguida, calculou-se o valor de K médio, o objetivo foi ter uma ordem de grandeza como guia no processo de calibração.

$$K_{\text{calculado}} = \frac{Q_S}{A_t(h)} \cdot \frac{1}{3600000} \quad (14)$$

$$K_{\text{calculado}} = \frac{V_S}{A_t(h) \cdot t} \cdot \frac{1}{3600000} \quad (15)$$

onde:

$K_{\text{calculado}}$ (mm/h) é a velocidade de infiltração/percolação observada para cada t ;

V_S (m³) é o volume de água que sai pelo fundo e pelas paredes da biorretenção para cada t , calculado pelas Equação 16;

A_t (m²) é a área do fundo mais a área das paredes da biorretenção;

h (m) é o nível da água no interior da biorretenção;

t (60 s) é o intervalo discretizado de tempo.

$$V_S = S_t - S_{(t+1)} + V_e \quad (16)$$

onde:

V_S (m³) é o volume que saiu pelo fundo e pelas paredes para cada t ;

S_t (m³) é o volume de água no interior da biorretenção no instante t ;

$V_{(t+1)}$ (m³) é o volume de água no interior da biorretenção no instante $t+1$;

V_e (m³) é o volume de água que entrou na biorretenção para cada intervalo de tempo t .

No processo de calibração, K foi tratado como um parâmetro calibrável em cada evento, e a função objetivo utilizada para a otimização deste parâmetro foi o coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), Equação 17.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (NA_{\text{Puls}} - \overline{NA_{\text{obs}}})^2}{\sum (NA_{\text{obs}} - \overline{NA_{\text{obs}}})^2} \quad (17)$$

onde:

NA_{Puls} (m) é o nível de água calculado pelo método de Puls (construiu-se uma relação Q_S versus NA, vazão de saída versus nível da água no interior da biorretenção, para obtenção do NA;

NA_{obs} (m) níveis de água medidos pelos sensores do fundo da biorretenção;

Para verificar o ajuste do modelo, utilizaram-se dois coeficientes. O coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, que verifica a aderência dos dados (Equação 17) e a diferença de nível, Equação 18, que relaciona os volumes calculados e observados (será adotada a terminologia “diferença de volume” para esse indicado neste trabalho).

$$\Delta NA = \frac{\sum(NA_{Puls}(t)) - \sum(NA_{obs}(t))}{\sum(NA_{obs}(t))} \cdot 100 \quad (18)$$

onde:

ΔNA (%) é a diferença percentual de nível;

$NA_{Puls}(t)$ é o nível de água calculado no tempo t ;

$NA_{obs}(t)$ (m) é a média dos níveis medidos pelos sensores do fundo da biorretenção no instante t ;

Para a avaliação do desempenho do modelo, utilizou-se a classificação de Silva et al. (2008), que admite o desempenho do modelo como bom quando o valor de NSE for maior que 0,75, desempenho aceitável para valores de NSE entre 0,36 e 0,75, e desempenho inaceitável para valores de NSE inferiores a 0,36. Para que tudo isso fosse possível, foi desenvolvido um código em linguagem de programação Python.

A Tabela 1 apresenta os 14 eventos utilizados na etapa de calibração do modelo e a Tabela 2 apresenta os 7 eventos utilizados na etapa de validação do modelo. Os eventos são identificados pela ordem cronológica que correram e apresentam as seguintes características: data, duração (intervalo de tempo entre o início da elevação do nível na biorretenção e o instante de completo esvaziamento da mesma, para a precipitação ocorrida), defasagem (definida no item 4.3.3), precipitação total, vazão de pico de entrada, nível máximo alcançado pela água no interior da biorretenção. Coeficiente de escoamento do telhado (C_t), fator multiplicativo da vazão de entrada (f_m) e o coeficiente de escoamento da grama (C_g). Para a validação foi adotada a média dos parâmetros K dos 14 eventos calibrados, verificando-se previamente a existência ou não *outliers*, através do diagrama *Box Plot*.

Tabela 1 – Eventos utilizados na fase de calibração do modelo

Evento	Data	Duração (dd hh: min)	Defasagem (min)	Precipitação total (mm)	Intensidade média (mm/h)	Precipitação anterior (3 dias) (mm)	Q_{ep} (l/s)	Nível máximo (cm)	C_t (Telhado)	f_m	C_g (Grama)
1	22/07/2015	01 13: 25	67	42,4	1,15	6,8	2,17	108,1	0,83	1,17	0.13
2	18/08/2015	00 08: 17	7	10,4	4,2	13,8	1,04	26,5	0,42	1	P<ia*
5	24/04/2016	00 08: 14	14	16,6	2,42	9,6	0,98	26,7	0,49	1	P<ia*
6	22/05/2016	00 13: 20	19	37,8	4,12	5,00	0,76	68,9	0,58	1,21	0,1
7	24/05/2016	00 09: 05	19	20	1,84	43,00	1,48	37	0,59	1,07	0,003
8	29/05/2016	01 05: 34	27	143,2	5,4	14,2	4,52	117,2	0,57	1,82	0,51
9	02/06/2016	00 14: 47	81	22,4	1,53	26,8	2,38	32,6	0,62	1,08	0.01
12	03/04/2017	00 06: 46	4	19,6	4,89	13,00	1,48	49	0,96	1,04	0.02
14	13/04/2017	00 10: 19	13	37	5,69	5,2	1,63	99	0,43	1,27	0.09
15	02/05/2017	00 19: 20	10	96,6	8,07	0,8	2,45	1,24	0,29	2,24	0.37
17	24/05/2017	00 18:49	15	107	8,92	82,8	2,42	125,3	0,42	1,92	0,42
18	08/06/2017	00 12: 06	6	28	3,45	29,2	1,35	0,43	0,37	1,19	0,04
19	17/06/2017	00 08: 36	10	15	2,43	44,8	0,85	38	0,42	1	P<ia*
21	18/08/2017	00 13: 40	22	46,2	1,04	26,2	0,63	70,7	0,57	1,13	0.15

*O valor da precipitação foi menor que as perdas iniciais na área de grama. Para esses casos o f_m foi considerado igual 1

Fonte: Autoria própria

Tabela 2 – Eventos utilizados na fase de validação do modelo

Evento	Evento	Duração (dd hh: min)	Defasagem (min)	Precipitação total (mm)	Intensidade média (mm/h)	Precipitação antecedente (3 dias) (mm)	Qp(l/s)	Nível máximo (cm)	C _t (Telhado)	f _m	C _g (Gramas)
3	20/08/2015	01 11: 55	70.00	63.60	2.22	19.4	1.00	92.2	0.57	1.43	0.24
4	29/01/2016	00 09: 39	22.00	32.00	6.17	28	36.07	43.5	0.52	1.17	0.06
10	19/06/2016	00 18: 36	19.00	29.60	1.22	0.8	2.55	46.2	0.7	1.11	0.05
11	28/06/2016	00 07: 19	40.00	15.00	2.04	28.8	1.17	28	0.56	1.00	P<ia*
13	07/04/2017	00 06:12	6.00	10.40	6.12	6.2	3.16	28	0.88	1.00	P<ia*
16	21/05/2017	00 13: 59	14.00	61.60	6.35	12.2	2.42	122	0.43	1.55	0.23
20	28/06/2017	01 04: 26	14.00	141.80	5.36	12.6	2.52	120.4	0.35	2.23	0.51

*O valor da precipitação foi menor que as perdas iniciais na área de grama. Para esses casos o f_m foi considerado igual 1

Fonte: Autoria própria

4.4.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO COM K VARIÁVEL

Calibrou-se o modelo para velocidade de infiltração (K) variando em função do nível da água no interior da biorretenção (h), segundo a Equação 19, que é uma função linear com parâmetros a e b. A escolha por uma função linear ocorreu a partir da observação do comportamento de K com o nível h, da forma seguinte: como no caso de K constante, foi necessário ter uma ordem de grandeza dos parâmetros calibráveis a e b. Assim, utilizaram-se as Equações 14, 15 e 16 para o cálculo de K em cada intervalo de tempo e para cada evento e, de posse de K e do respectivo nível da água (h), julgou-se que a reta representa bem o comportamento. Assim, empregou-se regressão linear para determinação dos parâmetros a e b.

$$K = ah + b \quad (19)$$

onde:

K (mm/h) é a velocidade de infiltração/percolação no fundo e nas paredes da biorretenção;

a e b são os parâmetros ajustados;

h (m) é o nível da água no interior da biorretenção.

Importa observar que o procedimento para determinação dos parâmetros a e b foi aplicado apenas para a recessão dos eventos, devido ao menor grau de incerteza associado a vazão de entrada (entende-se que o ajuste da equação requer um grau maior de precisão nos dados observados). A vazão de entrada é efeito da precipitação e o objetivo aqui foi determinar o comportamento funcional da infiltração somente. Do ponto de vista de cálculo, ela é o resultado da vazão de entrada observada multiplicada pelo fator multiplicador f_m estimado, que tem menor influência nas recessões dos cotogramas.

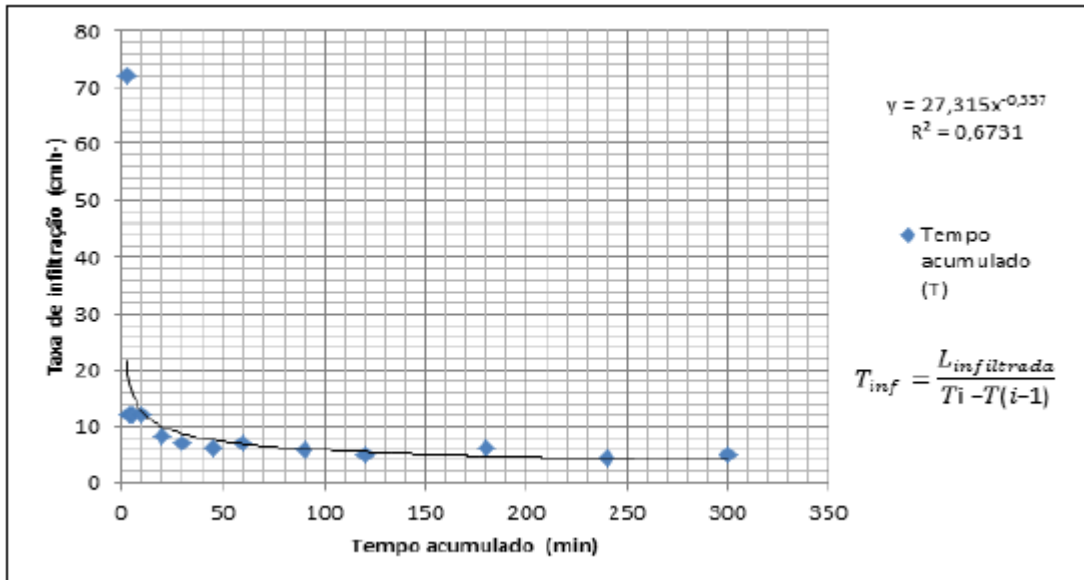
No que diz respeito à calibração dos parâmetros a e b, utilizaram-se 14 eventos, listados na Tabela 1, e 7 eventos para a etapa de validação, conforme Tabela 2. Para a validação foi adotada a média dos parâmetros a e b dos 14 eventos calibrados, verificando-se previamente, a existência ou não de *outliers*, através do diagrama Box Plot. Uma observação importante: como se trata de calibração e validação, os parâmetros a e b foram obtidos para todo o evento e não somente na recessão, como feito na fase anterior.

4.4.3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO COM 2 K'S CONSTANTES

Calibrou-se o modelo para duas velocidades de infiltração/percolação, K_1 e K_2 constantes, uma até o instante de saturação do solo (momento em que a taxa de infiltração alcança a fase assintótica) e outra após a saturação, respectivamente, conforme Tecedor et al. (2015), a partir do cálculo desses parâmetros.

Os valores de K_1 e K_2 médios calculados foram obtidos de acordo com as Equações 14 e 16. Para determinação do instante de saturação, utilizou-se a curva de infiltração do solo onde a biorretenção foi implantada, Figura 10, observando-se valor aproximadamente igual a 208 minutos. Esse mesmo critério foi adotado por Tecedor et al. (2015).

Figura 10 – Curva de infiltração para o solo do local da biorretenção



Fonte: Menezes (2015)

Utilizaram-se 14 eventos na etapa de calibração, Tabela 1, e 7 eventos para a etapa de validação do modelo, Tabela 2. Para a validação foi adotada a média dos parâmetros K_1 e K_2 dos 14 eventos calibrados, verificando-se previamente a existência ou não de *outliers*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se neste item os resultados referentes a modelagem dos dados de vazão de entrada e nível de água no interior da biorretenção pelo método de Puls, compreendendo-se as etapas de calibração e validação do modelo. Apresentam-se também considerações sobre o desempenho do modelo, com base nos coeficientes de desempenho (NSE e diferença de volume) e na comparação entre as etapas de calibração e validação para as três configurações (K constante, K variável e 2 K's constantes).

5.1 EVENTOS MONITORADOS

Avaliaram-se nesse item as seguintes características dos 21 eventos monitorados entre julho de 2015 e agosto de 2017: duração, defasagem, precipitação total, vazão de pico de entrada, nível máximo no interior da biorretenção, coeficiente de escoamento do telhado, fator multiplicativo da vazão de entrada e coeficiente de escoamento da grama (área adjacente a biorretenção), conforme a Tabela 3.

Os eventos apresentaram duração média de 15 horas e 44 minutos, com duração máxima igual a 2 dias 13 horas e 25 minutos, para o evento 1, ocorrido no dia 22/07/2015, e duração mínima igual a 6 horas e 12 minutos, para o evento 13, ocorrido no dia 07/04/17, além de coeficiente de variação igual a 60,38%. Essas informações demonstram que os eventos apresentaram comportamento bem diferentes no que tange a duração.

A defasagem dos eventos apresentou coeficiente de variação igual a 93,10%, indicando um comportamento bem distinto nos eventos. Tal fato ocorreu, sobretudo, devido às características de durações e total precipitado das chuvas até o início da elevação do nível no interior da biorretenção, como pode ser percebido na Figura 11 e na Figura 12, correspondentes aos eventos de menor e maior defasagem, respectivamente.

No evento 12, corrido no dia 03/04/2017, Figura 11, a intensidade da chuva antes da elevação do nível no interior da biorretenção foi de 6,4 mm/h, enquanto que no evento 9, Figura 12, ocorrido no dia 02/06/2016, essa intensidade foi de 1,34 mm/h. Essa diferença fez com que as perdas iniciais no evento 9 fosse maior e, conseqüentemente, a defasagem também.

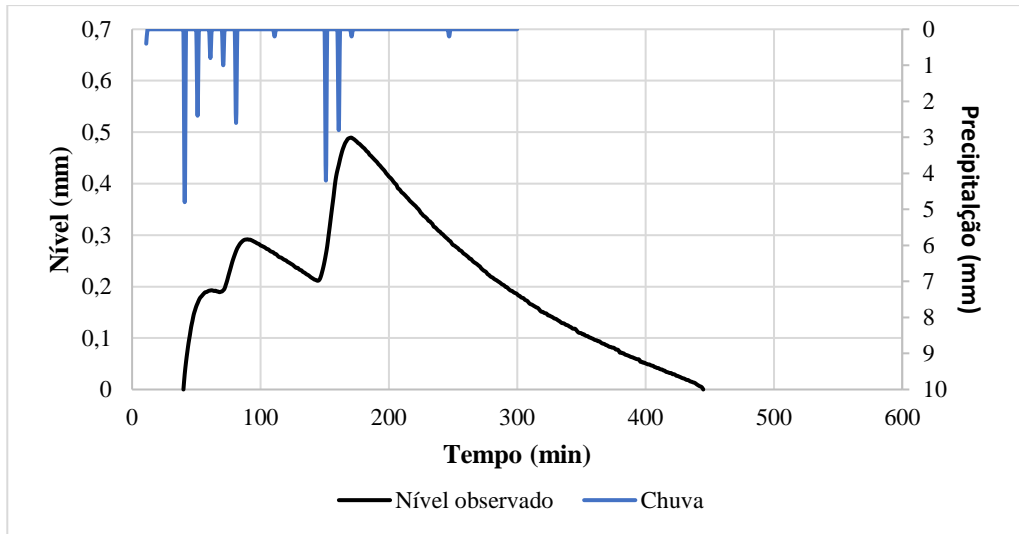
Tabela 3 – Características dos eventos monitorados

Evento	Data	Duração (dd hh: min)	Defasagem (min)	Precipitação total (mm)	Intensidade média (mm/h)	Precipitação anterior (3 dias) (mm)	Qp(l/s)	Nível máximo (cm)	C _t (Telhado)	f _m	C _g (Gramas)
1	22/07/2015	01 13: 25	67	42,4	1,15	6,8	2,17	108,1	0,83	1,17	0,13
2	18/08/2015	00 08: 17	7	10,4	4,2	13,8	1,04	26,5	0,42	1	P<ia*
3	20/08/2015	01 11: 55	70	63,6	2,22	19,4	1	92,2	0,57	1,43	0,24
4	29/01/2016	00 09: 39	22	32	6,17	28	1,81	43,5	0,52	1,17	0,06
5	24/04/2016	00 08: 14	14	16,6	2,42	9,6	0,98	26,7	0,49	1	P<ia*
6	22/05/2016	00 13: 20	19	37,8	4,12	5	0,76	68,9	0,58	1,21	0,1
7	24/05/2016	00 09: 05	19	20	1,84	43	1,48	37,0	0,59	1,07	0,003
8	29/05/2016	01 05: 34	27	143,2	5,4	14,2	4,52	117,2	0,57	1,82	0,51
9	02/06/2016	00 14: 47	81	22,4	1,53	26,8	2,38	32,6	0,62	1,08	0,01
10	19/06/2016	01 00: 35	19	29,6	1,22	0,8	2,55	46,2	0,7	1,11	0,05
11	28/06/2016	00 07: 19	40	15	2,04	28,8	1,17	28,0	0,56	1	P<ia*
12	03/04/2017	00 06: 46	4	19,6	4,89	13	1,48	49,0	0,96	1,04	0,002
13	07/04/2017	00 06:12	6	10,4	6,12	6,2	3,16	28,0	0,88	1	P<ia*
14	13/04/2017	00 10: 19	13	37	5,69	5,2	1,63	99,0	0,43	1,27	0,09
15	02/05/2017	00 19: 20	10	96,6	8,07	0,8	2,45	124,0	0,29	2,24	0,37
16	21/05/2017	00 13: 59	14	61,6	6,35	12,2	2,42	122,0	0,43	1,55	0,23
17	24/05/2017	00 18:49	15	107	8,92	82,8	2,42	125,3	0,42	1,92	0,42
18	08/06/2017	00 12: 06	6	28	3,45	29,2	1,35	43,0	0,37	1,19	0,04
19	17/06/2017	00 08: 36	10	15	2,43	44,8	0,85	38,0	0,42	1	P<ia*
20	28/06/2017	01 04: 26	14	141,8	5,36	12,6	2,52	120,4	0,35	2,23	0,51
21	18/08/2017	00 13: 40	22	46,2	1,04	26,2	0,63	70,7	0,57	1,13	0,15
Média		00 15: 44	23,76	47,43	4,03	22,25	1,84	60,99	0,55	1,31	0,18
Mínimo		00 06: 12	4,00	10,4	1,04	0,8	0,63	0,43	0,29	1,00	0,002
Máximo		01 13: 25	81,00	143,2	8,92	82,8	4,52	125,3	0,96	2,24	0,51
CV (%)		60,38	93,10	86,42	58,36	93,39	51,09	67,29	30,91	30,53	98,01

* O valor da precipitação foi menor que as perdas iniciais na área de grama. Para esses casos o f_m foi considerado igual 1

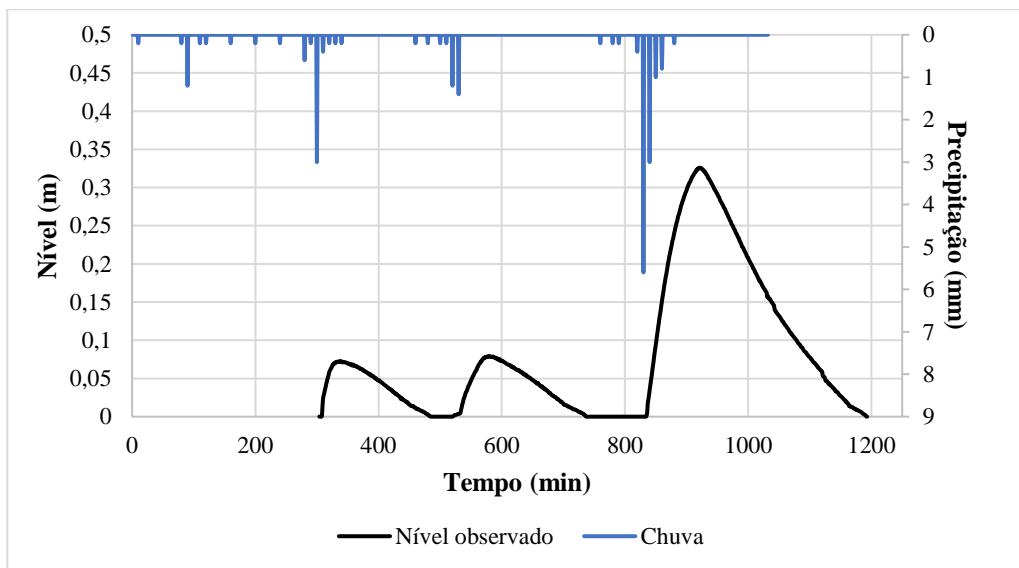
Fonte: Autoria própria

Figura 11 – Evento 12, ocorrido no dia 03/04/2017



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 12 – Evento 9, ocorrido no dia 02/06/2016



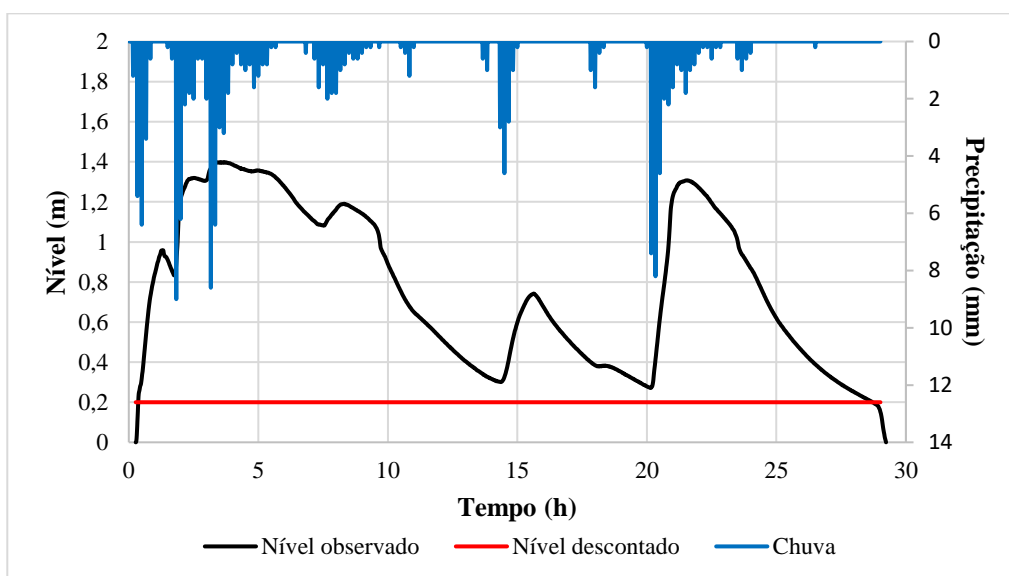
Fonte: Elaborada pelo autor

Assim como as durações, os totais precipitados nos 21 eventos evidenciam um comportamento bem distinto dos eventos de chuva, com CV igual a 86,42%, menor precipitação total igual a 10,40 mm (para o evento 21, ocorrido no dia 18/18/2017) e máxima precipitação total igual a 143,20 mm (para o evento 8, ocorrido no dia 29/05/2016). Tais precipitações tiveram a intensidade média calculada, fornecendo-se assim uma ideia da distribuição temporal da chuva, para uma análise do efeito mais local pode-se observar as vazões de pico de cada evento.

Ainda em decorrência direta das precipitações, têm-se as lâminas máximas da água alcançadas dentro da biorretenção, observando-se que não houve transbordamento da estrutura para os eventos analisados, tendo a lâmina alcançado altura máxima igual a 1,25 m, no evento 17 que ocorreu no dia 24/05/2017.

Percebeu-se variação atípica dos níveis no início e no final dos cotogramas observados, até a altura de 20 cm aproximadamente, como pode ser percebido na Figura 13 (tomou-se o evento 20 como exemplo). Esse fato ocorreu em virtude da existência dos poços que recebem os sensores de nível. Estes ficam a 10 cm de profundidade em relação ao fundo da biorretenção e durante o seu enchimento e esvaziamento o nível varia mais rapidamente em relação a esses mesmos fenômenos ocorrendo no fundo da biorretenção. Os 10 cm da camada de areia também influenciaram nesse comportamento, em virtude da maior permeabilidade da água nesse material do que no solo natural. Descontou-se, portanto, 20 cm nos níveis observados em cada evento, como indica a Figura 13, uma vez que o modelo não conseguiria simular esse comportamento.

Figura 13 – Demonstração dos 20 cm descontados em cada evento (Ex. evento 20)



Fonte: Elaborada pelo autor

O fator multiplicativo da vazão de entrada (f_m) foi calculado a partir do volume medido no vertedor e do volume de entrada oriundo da área de grama adjacente estimado pelo método SCS. Para os casos em que a perda inicial foi maior do que o total precipitado se considerou o f_m igual a 1, em 24 % dos casos, conforme a Tabela 3. O f_m apresentou CV igual a 30,53%, indicando um comportamento relativamente uniforme.

O coeficiente de escoamento do telhado (C_t) apresentou a segunda menor variabilidade dentre as características dos eventos, CV igual a 30,91%. Observa-se, entretanto, alguns valores abaixo dos demais entre abril 2017 e junho do mesmo ano, como o C_t do evento 17 (ocorrido no dia 24/05/2017) que teve valor igual a 0,42, coincidentemente igual ao valor do coeficiente de escoamento da grama (C_g) para esse mesmo evento. Tal fato aconteceu em função de um problema em uma das calhas, ocorrido nesse mesmo período, que provocou o extravasamento da água do telhado na mesma, como pode ser percebido na Figura 14, diminuindo assim o volume de água medido que passou pelo vertedor e, conseqüentemente, reduzindo o valor do coeficiente de escoamento do telhado.

Figura 14 – Extravasamento de água em uma das calhas do telhado



Fonte: Elaborada pelo autor

5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Apresentam-se neste item todos os eventos calibrados. Antes, porém, de apresentar o detalhamento, exibe-se a Tabela 4 com todos os valores dos parâmetros após a calibração de cada evento. Importa lembrar que, na primeira configuração o parâmetro K é único e constante para todo o evento, na segunda configuração K não é constante, mas função de h de forma linear, sendo os coeficientes a e b da reta os parâmetros calibrados. Por fim, na terceira

configuração há dois parâmetros, sendo K_1 com valor constante antes da saturação e K_2 com valor constante após a saturação.

No detalhamento, exibem-se, para cada evento e cada configuração: (a) cotogramas observados e ajustados; (b) gráficos $K(h)$ na recessão (valores calculados pelas equações 14, 15 e 16 do item 4.4.1), juntamente com a reta de tendência dos próprios dados e seus coeficientes a e b (ajuste de uma reta para a recessão, linha tracejada) e a reta construída após a calibração dos parâmetros a e b (linha cheia).

Em todas as formas de representar os resultados daqui por diante a palavra “otimizado” fará referência aos valores após a calibração. A palavra “calculado” fará referência aos valores calculados dos dados, antes de haver calibração. Por exemplo, tomando-se os parâmetros a e b , a e b calculados são obtidos a partir da tendência da reta na recessão antes da calibração, no intuito de se verificar a ordem de grandeza deles; a e b otimizados são obtidos via processo de calibração para todo o evento (e não somente na recessão).

A Figura 15 exhibe o resultado da calibração do evento 1 pra para as três configurações. Observa-se que o cotograma da calibração com K constante coincide com o cotograma da modelagem com 2 K 's constantes a partir de determinado instante (a cor vermelha prevaleceu sobre a cor verde). Tal fato aconteceu porque o K_2 (que teve valor calculado igual a 16,75 mm/h) e o K (que teve valor calculado igual a 16,80 mm/h) apresentarem valores otimizados iguais (31 mm/h).

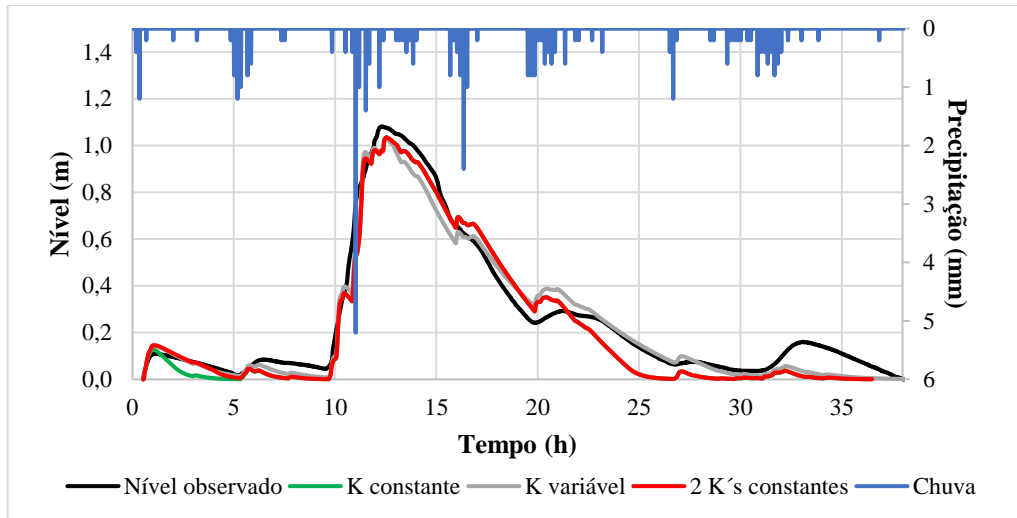
A Figura 16 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 1. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 35,02 e 8,63, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 25,00 e 14,00, respectivamente. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,43.

Tabela 4 – Resumo dos resultados da etapa de calibração do modelo

Evento	K constante				K variável						2 K's constantes					
	K calculado (mm/h)	K otimizado (mm/h)	Diferença de volume (%)	NSE	a calculado	a otimizado	b calculado	b otimizado	Diferença de volume (%)	NSE	K ₁ (calculado) (mm/h)	K ₁ otimizado (mm/h)	K ₂ (calculado) (mm/h)	K ₂ (otimizado) (mm/h)	Diferença de volume (%)	NSE
1	16,80	31,00	16,20	0,94	35,02	25,00	8,62	14,00	7,57	0,96	17,23	16,00	16,75	31,00	14,47	0,94
2	12,79	12,00	2,270	0,91	38,82	0,00	10,91	12,00	2,27	0,91	12,86	10,00	12,75	16,00	2,18	0,92
5	20,85	21,00	4,35	0,98	27,61	13,00	17,51	19,00	2,39	0,99	22,5	22,00	19,60	20,00	2,44	0,99
6	35,29	46,00	10,72	0,87	92,04	87,00	14,71	12,00	3,05	0,97	24,65	21,00	39,55	52,00	1,01	0,94
7	28,26	30,00	3,03	0,95	33,07	17,00	21,34	25,00	6,03	0,95	31,86	31,00	36,05	27,00	5,69	0,96
8	57,06	75,00	1,41	0,82	7,39	76,00	43,63	0,00	17,11	0,91	8,97	19,00	63,45	75,00	1,71	0,82
9	22,39	34,00	14,53	0,79	40,03	5,00	19,38	33,00	13,99	0,79	23,48	53,00	22,05	34,00	7,79	0,80
12	50,76	61,00	4,45	0,93	36,14	146,00	31,70	14,00	10,50	0,95	64,43	66,00	36,55	33,00	9,32	0,97
14	30,50	34,00	0,69	0,88	63,24	68,00	19,31	8,00	7,33	0,93	12,64	18,00	39,53	45,00	2,35	0,94
15	39,23	40,00	1,23	0,97	11,62	51,00	34,15	0,00	16,63	0,95	40,83	33,00	38,86	41,00	0,24	0,98
17	50,93	64,00	2,19	0,89	35,80	70,00	21,70	0,00	13,26	0,96	60,46	64,00	48,77	64,00	2,16	0,89
18	20,39	19,00	3,28	0,95	36,42	13,00	19,10	13,00	1,01	0,91	10,87	11,00	19,65	18,00	0,21	0,92
19	14,29	14,00	7,73	0,83	48,95	89,00	15,52	0,00	10,98	0,85	6,07	7,00	19,84	24,00	8,22	0,86
21	23,30	24,00	4,38	0,87	52,58	77,00	15,05	0,00	13,43	0,90	20,41	20,00	24,28	26,00	1,90	0,88
Média	30,2	36,07	5,46	0,90	39,91	52,64	20,90	10,71	8,97	0,92	25,52	27,93	31,26	36,14	4,26	0,92
CV(%)	47,83	53,45	91,19	6,64	52,14	80,10	45,61	96,19	61,44	5,70	71,36	69,71	45,90	48,59	98,85	6,23
Erro(%)	19,43		-	-	31,91		48,74		-	-	9,44		15,61		-	-

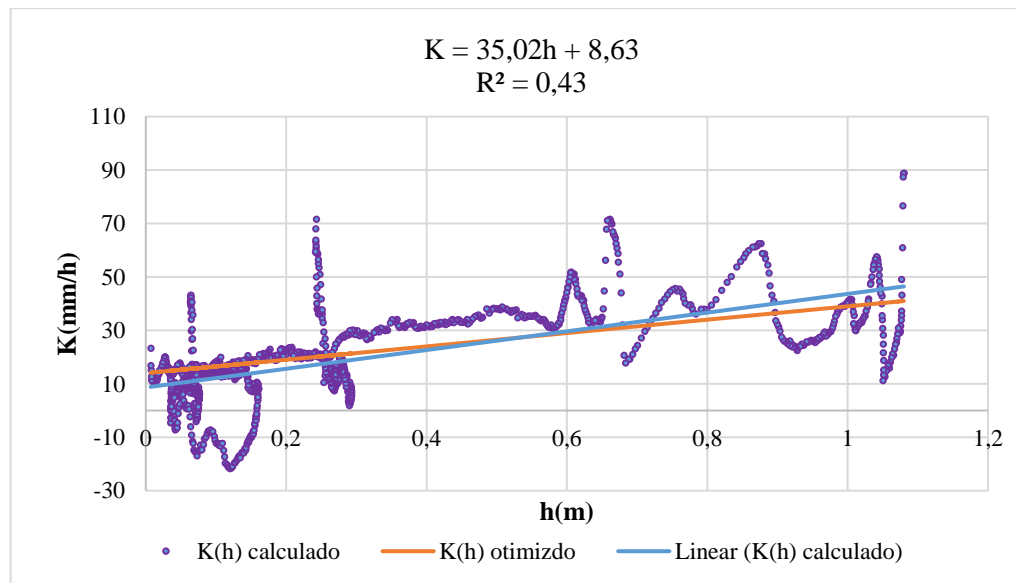
Fonte: Autoria própria

Figura 15 – Calibração do evento 1, ocorrido no dia 22/07/2015



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 16 – K(h) calculado e ajustado para o evento 1



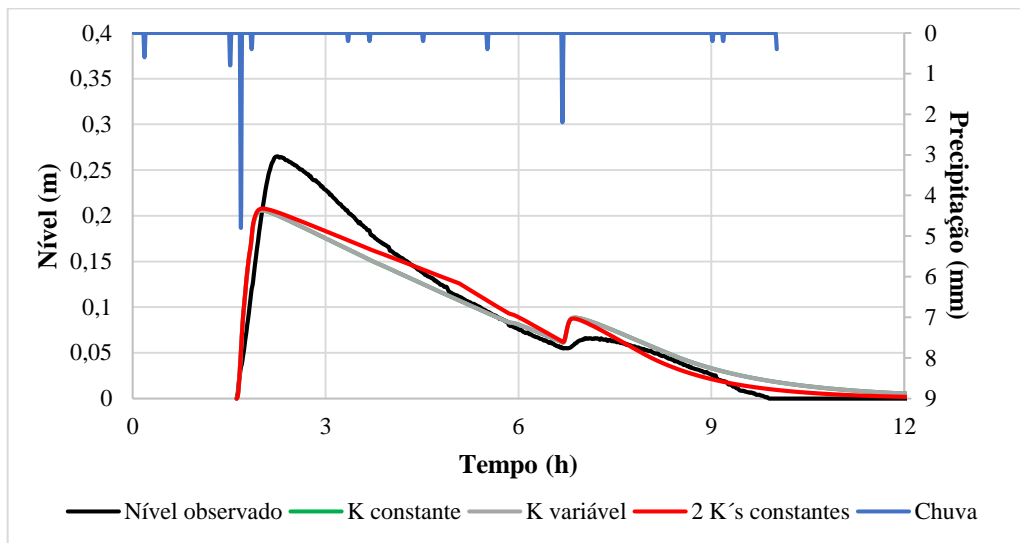
Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração com K variável apresentou a menor diferença de volume, 7,57 %, bem como o maior NSE, 0,96. A configuração com K constante apresentou diferença de volume igual a 16,20% e NSE igual a 0,94, enquanto que a configuração com 2 K's constantes obteve diferença de volume igual a 14,14% e valor do coeficiente NSE igual a 0,94. Para o evento 1, portanto, a configuração com K variável alcançou a melhor representação dos dados observados na etapa de calibração do modelo.

A Figura 17 exibe os resultados da calibração do evento 2 para as três configurações. Observa-se que os cotogramas da configuração com K constante e K variável se sobrepuseram,

prevalecendo a cor vermelha. Tal fato ocorreu porque o valor do coeficiente a otimizado foi igual a zero e o coeficiente b otimizado foi numericamente igual ao valor de K otimizado (12 mm/h). K teve valor calculado igual a 12,79 mm/h e os valores de K_1 e K_2 calculados foram iguais a 12,86 mm/h e 12,75 mm/h, respectivamente, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 10,00 mm/h e 16,00 mm/h, nessa ordem.

Figura 17 – Calibração do evento 2, ocorrido no 18/08/2015

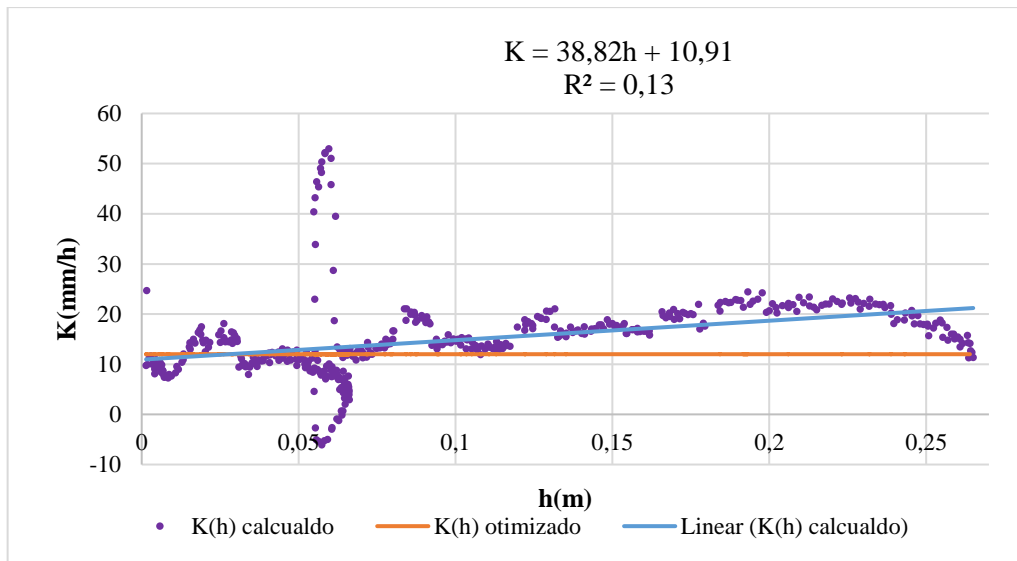


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 18 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 2. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 38,82 mm/h e 10,91 mm/h, respectivamente. Na modelagem, os mesmos otimizados foram iguais a 0 e 12,00 respectivamente, como supracitado. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,13.

A configuração com 2 K's constantes apresentou a menor diferença de volume, 2,18%, assim como o maior valor de NSE, 0,92. As configurações com K constante e com K variável apresentaram valores iguais de diferença de volume e coeficiente NSE, 2,17% e 0,91, respectivamente. Essa igualdade aconteceu justamente porque o valor de a otimizado foi igual a 0 e o valor de K igual ao valor de b otimizado, como supracitado. Portanto, para o evento 2 a configuração com 2 K's constantes obteve a melhor representação dos dados observados na etapa de calibração do modelo.

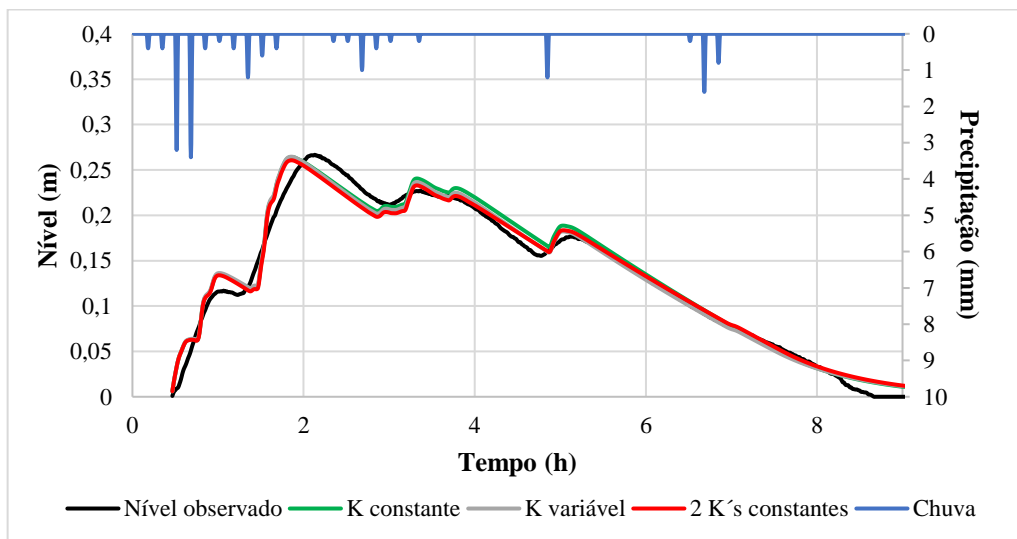
Figura 18 – K(h) calculado e otimizado para o evento 2



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 19 exibe os resultados da calibração do evento 5 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 20,85 mm/h e 21,00 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 22,5 mm/h e 19,60 mm/h, nessa ordem, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 22,00 mm/h e 20,00 mm/h, respectivamente.

Figura 19 – Calibração do evento 5, ocorrido no 24/04/2016

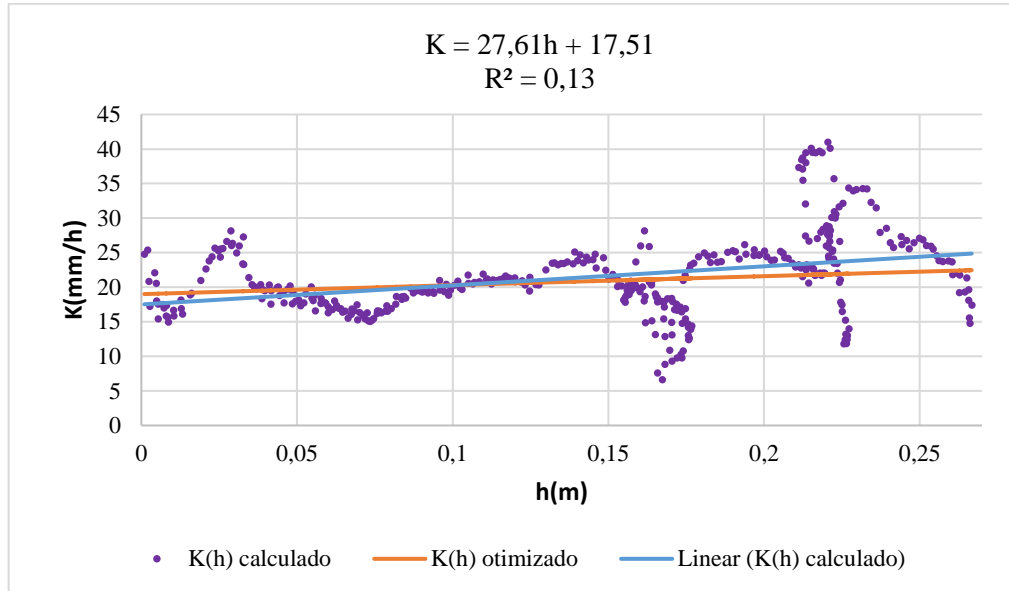


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 20 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 5. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais

a 27,61 e 17,51, respectivamente. Na etapa de calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 13,00 e 19,00, respectivamente. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,13

Figura 20 – K(h) calculado e otimizado para o evento 5



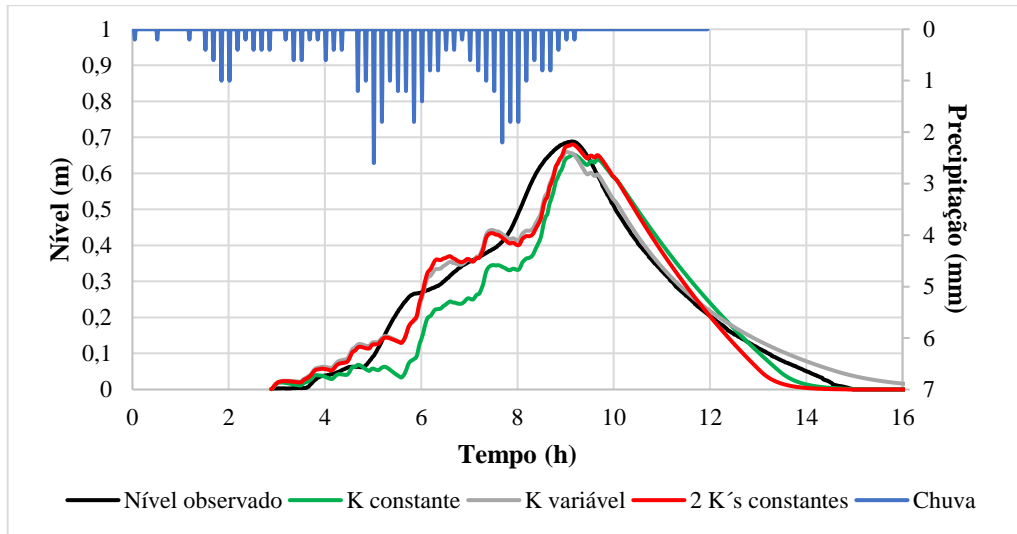
Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração com K variável apresentou a menor diferença de volume, 2,39% e o maior valor de NSE, 0,99, juntamente com a configuração com 2 K's constantes, que apresentou diferença de volume igual a 2,44%. A configuração com K constante apresentou diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 4,35% e 0,98, respectivamente. Para o evento 5, portanto, a configuração com K variável exibiu a melhor representação dos dados observados.

A Figura 21 exibe os resultados da calibração do evento 6 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 35,29 mm/h e 46,00 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 24,65 mm/h e 39,55 mm/h, respectivamente, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 21,00 mm/h e 52,00 mm/h, nessa ordem.

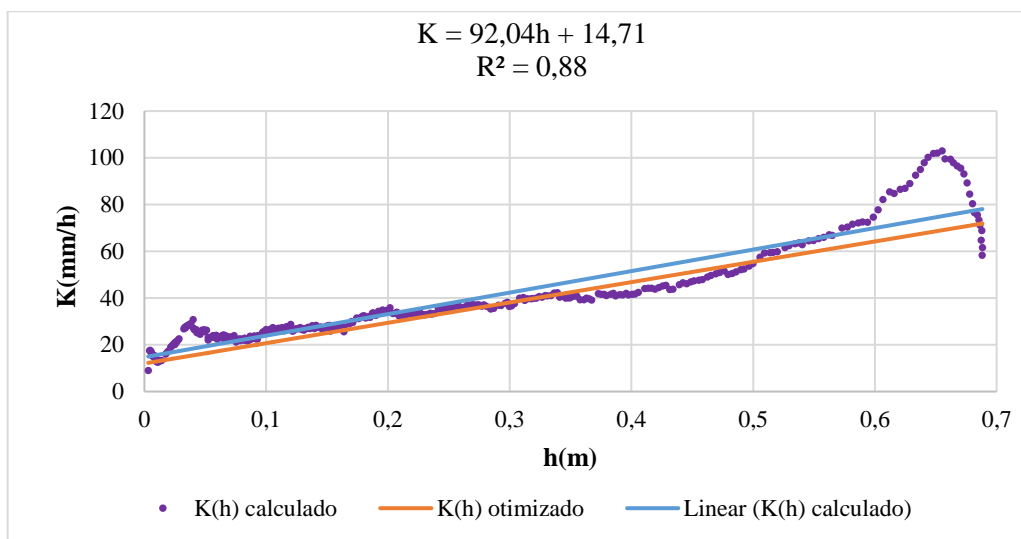
A Figura 22 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 6. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 92,04 e 14,71, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 87 e 12, nessa ordem. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,88

Figura 21 – Calibração do evento 6, ocorrido no 22/05/2016



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 22 - K(h) calculado e otimizado para o evento 6



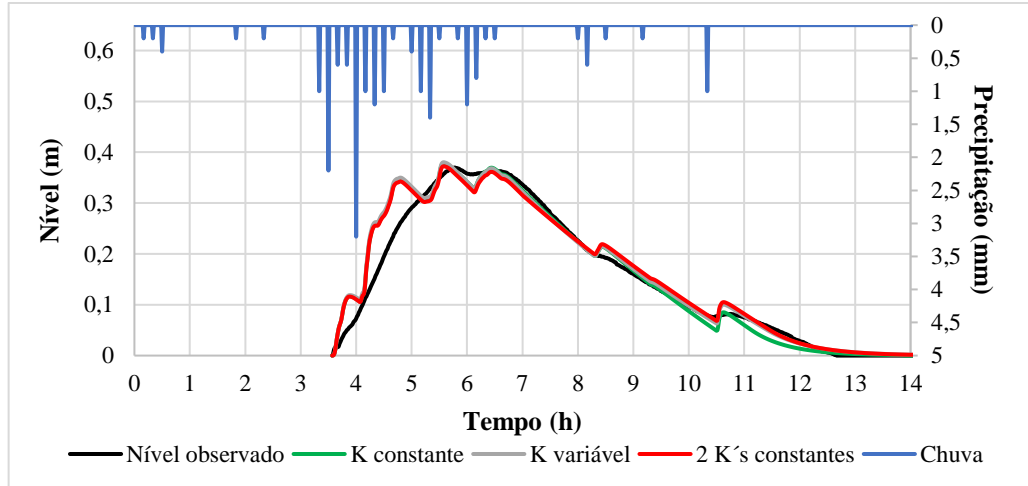
Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração com 2 K's constantes apresentou a menor diferença de volume 1,01% e exibiu coeficiente NSE com valor igual a 0,94. A configuração com K variável apresentou o maior coeficiente NSE, valor igual a 0,97, e teve diferença de volume igual a 10,72%. Para o evento 6, portanto, a configuração com 2 K's apresentou a melhor representação dos dados observados, do ponto de vista da diferença de volume, enquanto que de acordo com o coeficiente NSE a configuração com K variável apresentou melhor desempenho.

A Figura 23 exibe os resultados da calibração do evento 7 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 28,6 mm/h e 30 mm/h, respectivamente.

K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 31,86 mm/h e 36,05 mm/h, nessa ordem, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 31 mm/h e 27 mm/h, respectivamente.

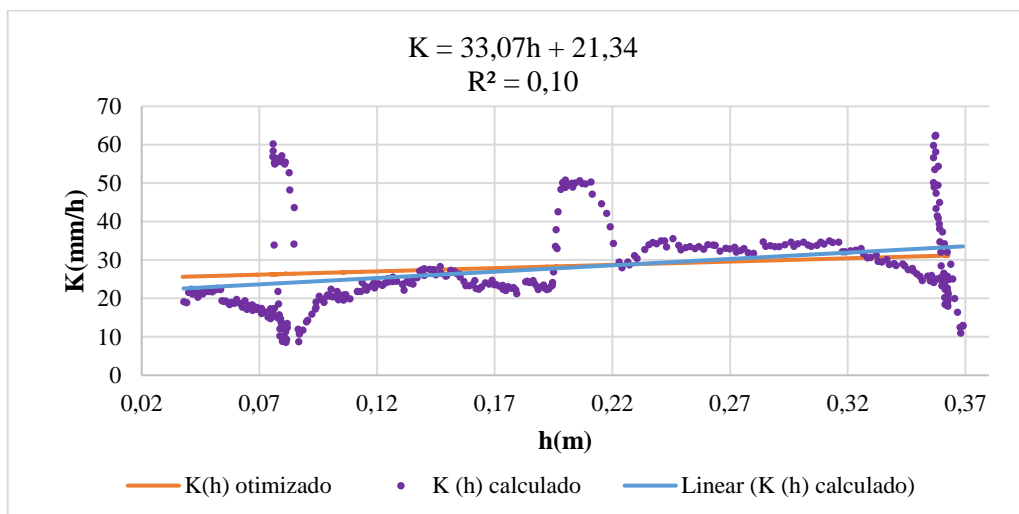
Figura 23 – Calibração do evento 7, ocorrido no 24/05/2016



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 24 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 7. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 33,07 e 21,34, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 17,00 e 25,00, nessa ordem. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,10.

Figura 24 – $K(h)$ calculado e otimizado para o evento 7

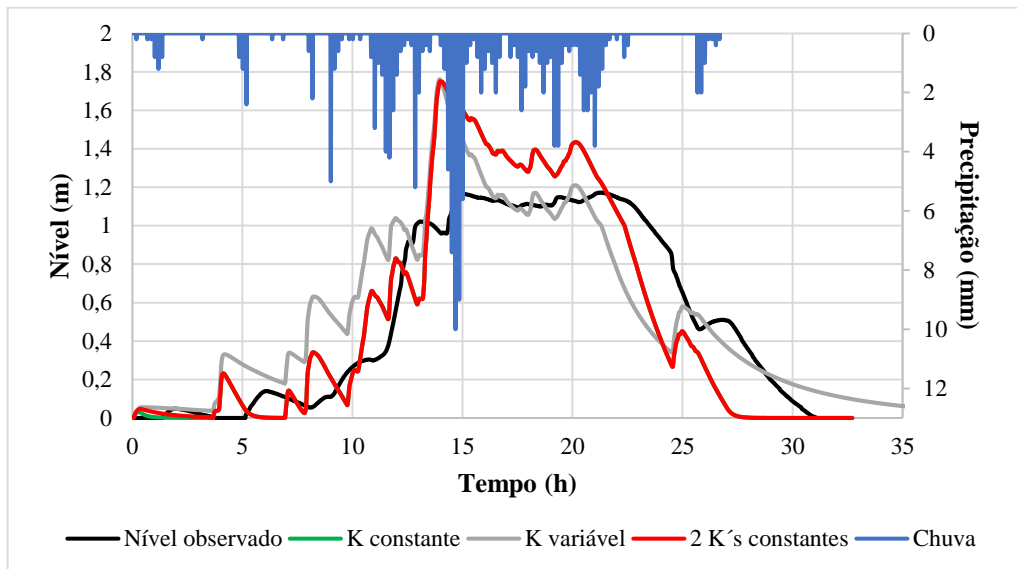


Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração com K constante apresentou a menor diferença de volume, valor igual a 3,03%, exibindo coeficiente NSE igual a 0,95. A configuração com 2 K's constantes obteve o maior coeficiente NSE, valor igual a 0,96 e diferença de volume igual a 5,69%. A configuração com K variável apresentou valores de diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 6,03% e 0,95, respectivamente. A configuração com K constante, portanto, foi a que melhor representou os dados observados na calibração do evento 7, do ponto de vista da diferença de volume, enquanto que de acordo com a o coeficiente NSE o melhor desempenho foi alcançado pela configuração com 2 K's constantes.

A Figura 25 exibe os resultados da calibração do evento 8 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 57,06 mm/h e 75,00 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 8,97 mm/h e 63,45 mm/h, nessa ordem, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 19 mm/h e 75 mm/h, respectivamente. Como K_2 e K otimizados foram iguais, observa-se sobreposição dos cotogramas da configuração com K constante e 2 K's constantes a partir do instante de saturação do solo (a cor vermelha sobressai em relação a cor verde)

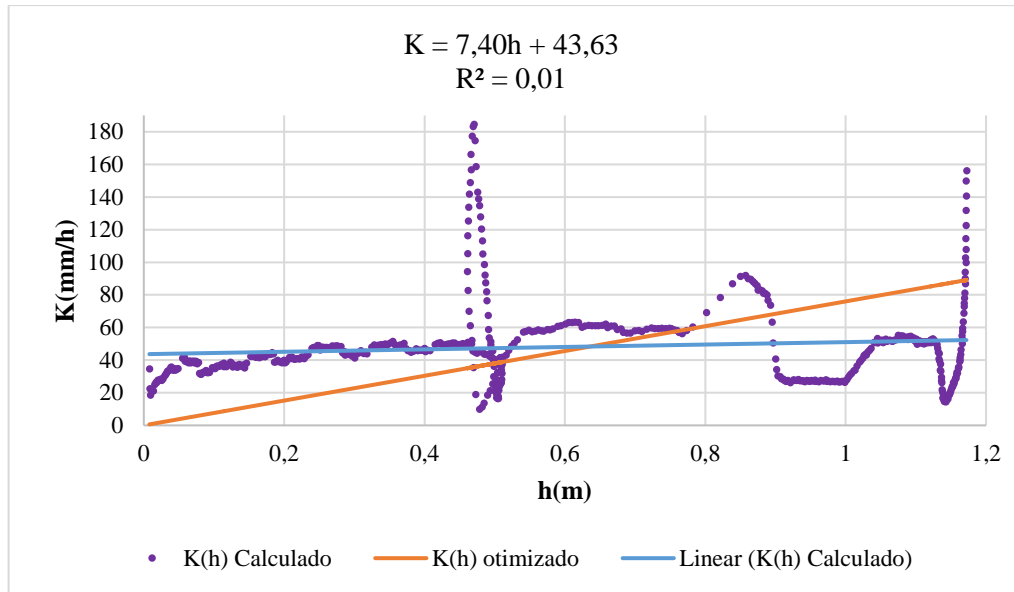
Figura 25 – Calibração do evento 8, ocorrido no dia 29/05/2016



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 26 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 8. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 7,40 e 43,63, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 76,00 e 0,00, respectivamente. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,01.

Figura 26 – K(h) calculado e otimizado para o evento 8



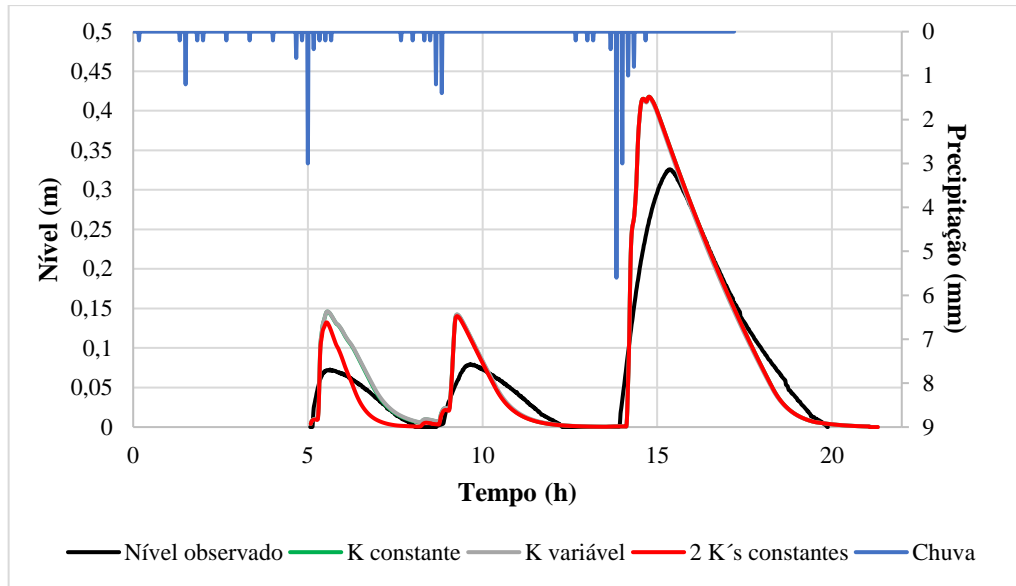
Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração com K constante apresentou a menor diferença de volume, valor igual a 1,41% e teve valor do coeficiente NSE igual a 0,82. A configuração com K variável apresentou o maior NSE, valor igual a 0,91, entretanto, exibiu a maior diferença de volume, valor igual a 17,11%. A configuração com 2 K's constantes obteve valores de diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 1,71% e 0,82, respectivamente. As configurações que apresentaram melhores desempenho na calibração, portanto, foram a configuração com K constantes, do ponto de vista da diferença de volume, e a configuração com K variável, na ótica do coeficiente NSE.

A Figura 27 exhibe os resultados da calibração do evento 9 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 22,39 mm/h e 34 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 23,48 mm/h e 22,05 mm/h, respectivamente, enquanto os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 53 mm/h e 34 mm/h, respectivamente.

Percebe-se, o comportamento idêntico dos cotogramas das três configurações a partir do ponto de saturação (sobressaindo a cor vermelha) sendo igual para as configurações com K constante e 2 K's constantes, uma vez que K foi igual K_2 a na modelagem. No trecho anterior ao ponto de saturação os cotogramas das configurações com K variável e K constante se sobrepuseram (sobressaindo a cor cinza).

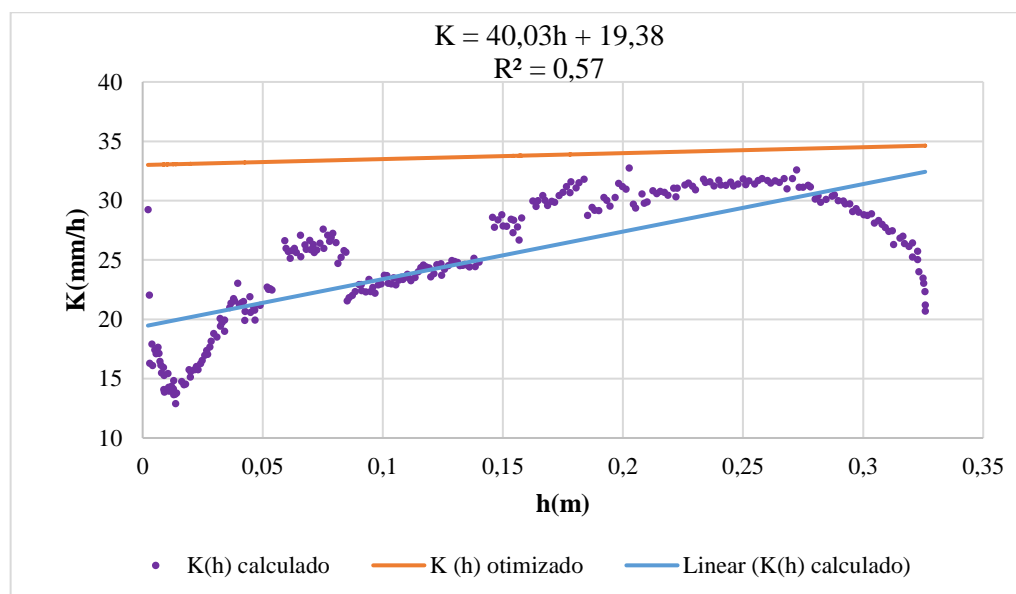
Figura 27 – Calibração do evento 9, ocorrido no dia 02/06/2016



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 28~~Erro! Fonte de referência não encontrada.~~ apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 9. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 40,03 e 19,38, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 5,00 e 33,00, nessa ordem. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,57.

Figura 28 – $K(h)$ calculado e otimizado para o evento 9

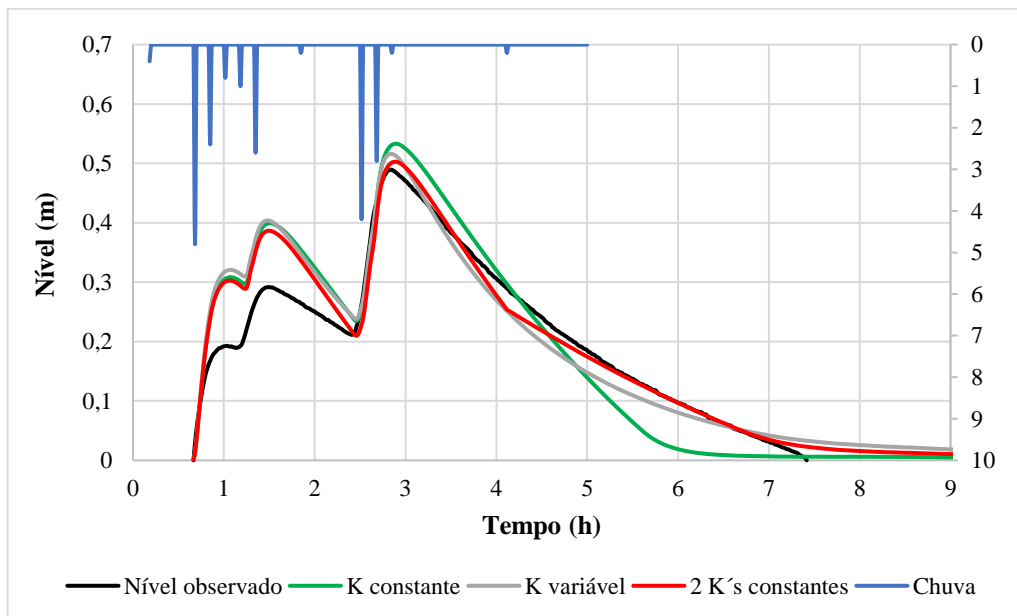


Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração com 2 K's constantes apresentou a menor diferença de volume, valor igual a 7,79% e o maior coeficiente NSE, valor igual a 0,80. A configuração com K constante e a configuração com K variável apresentaram o mesmo valor para o coeficiente NSE, 0,79, e valores próximos para a diferença de volume, 14,53% e 13,99%, respectivamente. A configuração com 2 K's constantes, portanto, obteve a melhor representatividade dos dados observados na calibração do evento 9.

A Figura 29 exibe os resultados da calibração do evento 12 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 50,76 mm/h e 61 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 64,43 mm/h e 36,55 mm/h, nessa ordem, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 66,00 mm/h e 33,00 mm/h, respectivamente.

Figura 29 – Calibração do evento 12, ocorrido no dia 03/04/2017



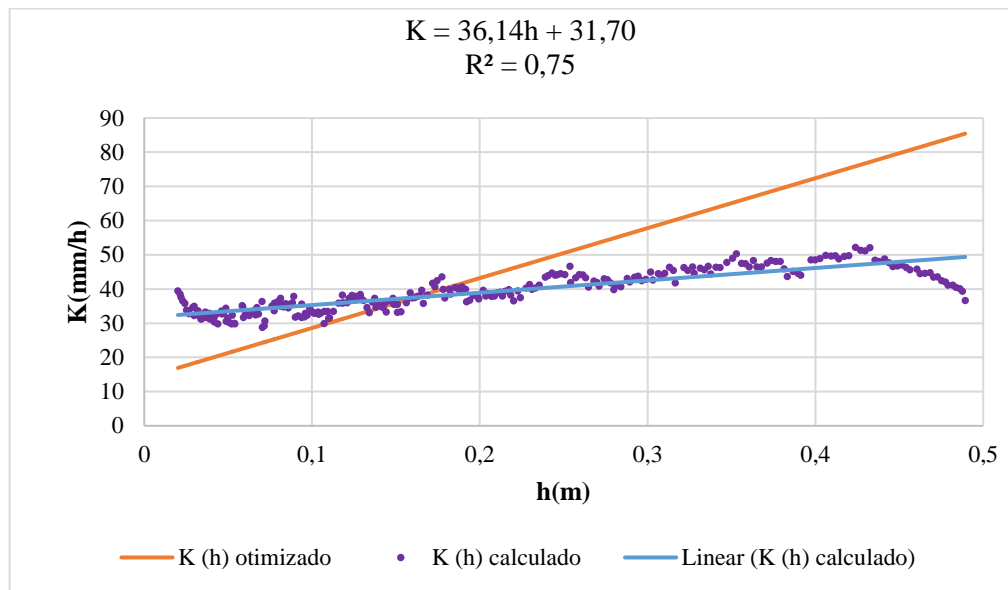
Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 30 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 12. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 36,14 e 31,70, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 146,00 e 14,00, respectivamente. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,75.

A configuração com K constante apresentou a menor diferença de volume, valor igual a 4,45%, e valor do coeficiente NSE igual a 0,93. A configuração com 2 K's constante obteve o maior valor para o coeficiente NSE, 0,97, e diferença de volume igual a 9,32%. A

configuração com K variável alcançou valores de diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 10,50% e 0,952 respectivamente. Para o evento 12, portanto, a configuração com K constante foi a que melhor representou os dados observados na etapa de calibração do modelo, sob a ótica da diferença de volume, enquanto que na perspectiva do coeficiente NSE o melhor desempenho ficou por conta da configuração com 2 K's constantes.

Figura 30 – K(h) calculado e otimizado para o evento 12



Fonte: Elaborada pelo autor

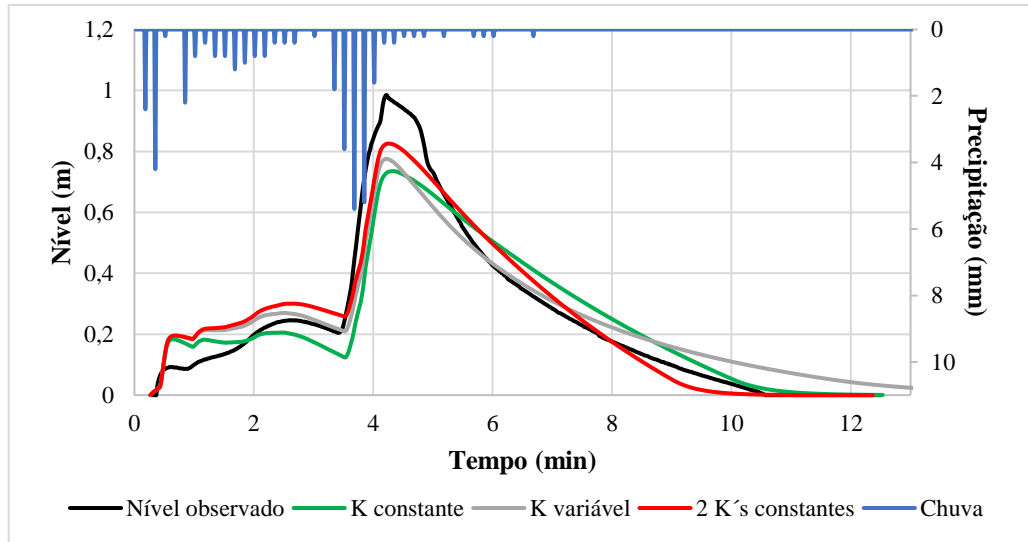
A Figura 31 exibe os resultados da calibração do evento 14 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 30,50 mm/h e 34,00 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 12,64 mm/h e 39,53 mm/h, nessa ordem, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 18,00 mm/h e 45,00 mm/h, respectivamente.

A Figura 32 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 14. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 63,24 e 19,31, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 68,00 e 8,00, nessa ordem. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,58.

A configuração com K constante apresentou a menor diferença de volume, valor igual a 0,69%, e valor do coeficiente NSE igual a 0,88. A configuração com 2 K's constantes apresentou o maior coeficiente NSE, valor igual a 0,94, e diferença de volume igual a 2,35%. A configuração com K variável obteve valores de diferença volume e coeficiente NSE iguais a 7,33% e 0,93, respectivamente. Para a calibração do evento 14, portanto, a configuração com

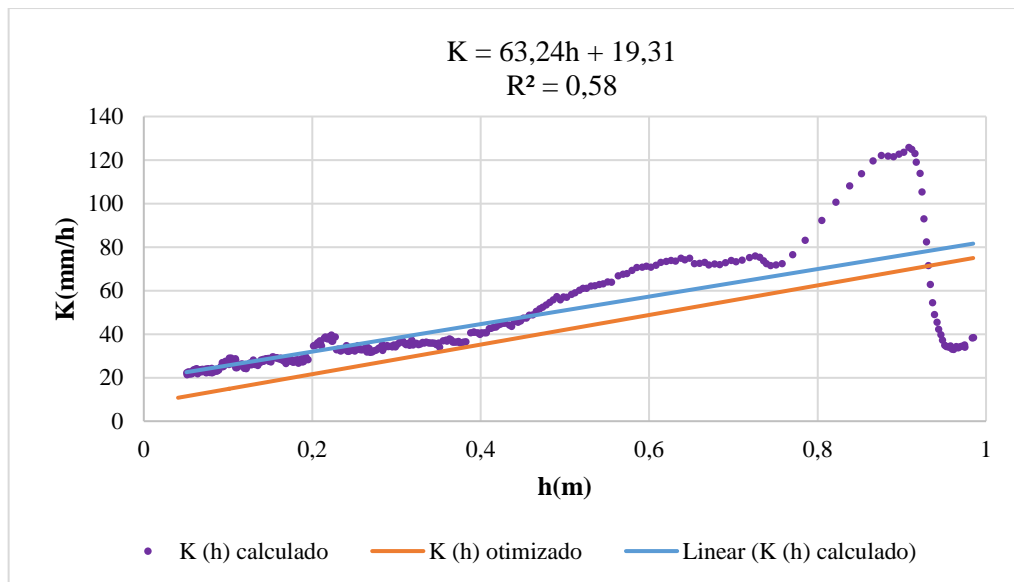
K constante apresentou melhor representação dos dados observados na etapa de calibração do modelo, considerando-se a diferença de volume, enquanto que se levando em consideração o coeficiente NSE o melhor desempenho ficou por conta da configuração com 2 K's constantes.

Figura 31 – Calibração do evento 14, ocorrido no dia 13/04/2017



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 32 - K(h) calculado e otimizado para o evento 14



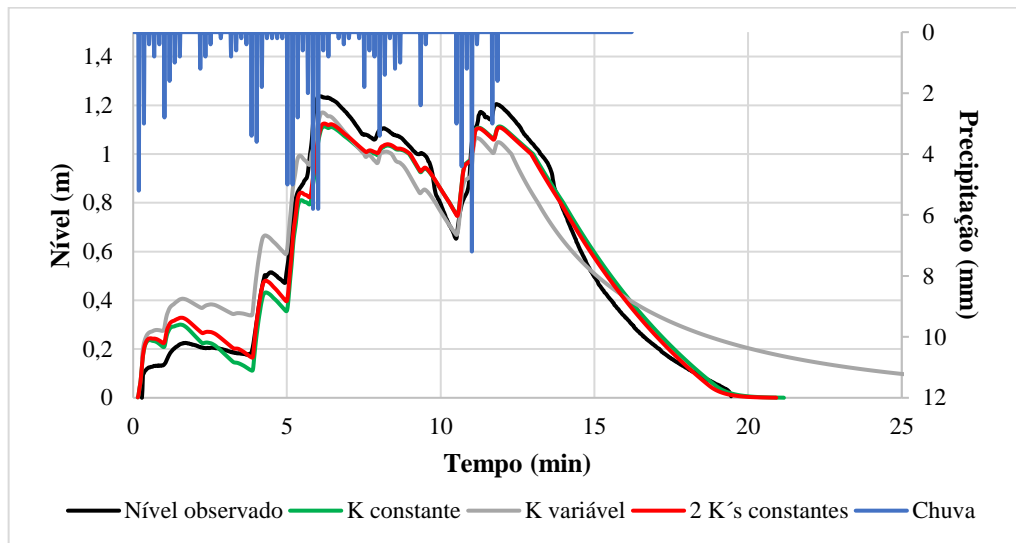
Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 33 exibe os resultados da calibração do evento 15 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 39,23 mm/h e 40,00 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 40,83 mm/h e 38,86 mm/h, nessa

ordem, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 33,00 mm/h e 41,00 mm/h, respectivamente.

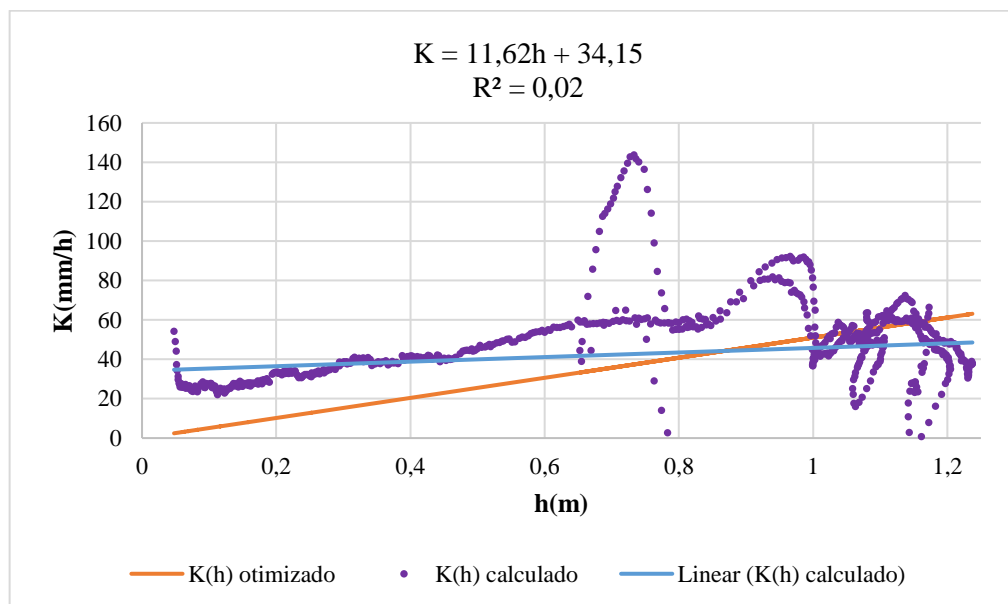
A Figura 34 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 15. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 11,62 e 34,15, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 51,00 e 0,00, respectivamente. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,02.

Figura 33 - Calibração do evento 15, ocorrido no dia 02/05/2017



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 34 – $K(h)$ calculado e otimizado para o evento 15

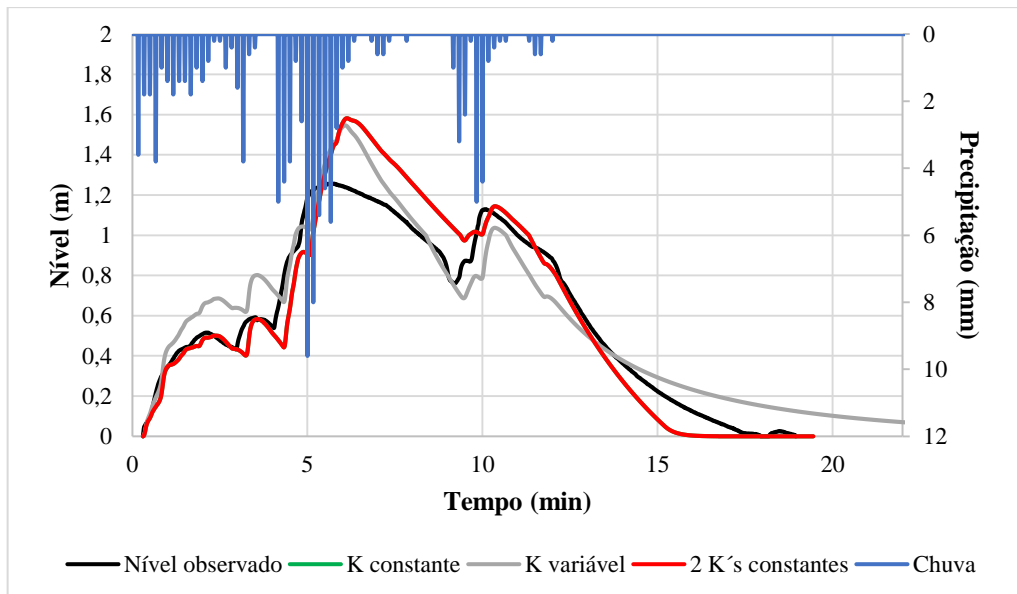


Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração com 2 K's constantes apresentou a menor diferença de volume e o maior coeficiente NSE (junto com a configuração com K variável), valores iguais a 0,24% e 0,98, respectivamente. A configuração com K constante obteve valor da diferença de volume igual a 1,23%. A configuração com K variável alcançou valor da diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 16,63% e 0,95, respectivamente. A calibração com 2 K's constantes, portanto, apresentou a melhor representação dos dados observados para a calibração do modelo no evento 15.

A Figura 35 exibe os resultados da calibração do evento 17 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 50,93 mm/h e 64 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 60,46 mm/h e 48,77 mm/h, nessa ordem, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram ambos iguais a 64,00 mm/h. Como K_1 e K_2 foram iguais a K, os cotogramas das configurações com K constante e 2 K's constantes se sobrepuseram (a cor vermelha sobressai em relação a cor verde).

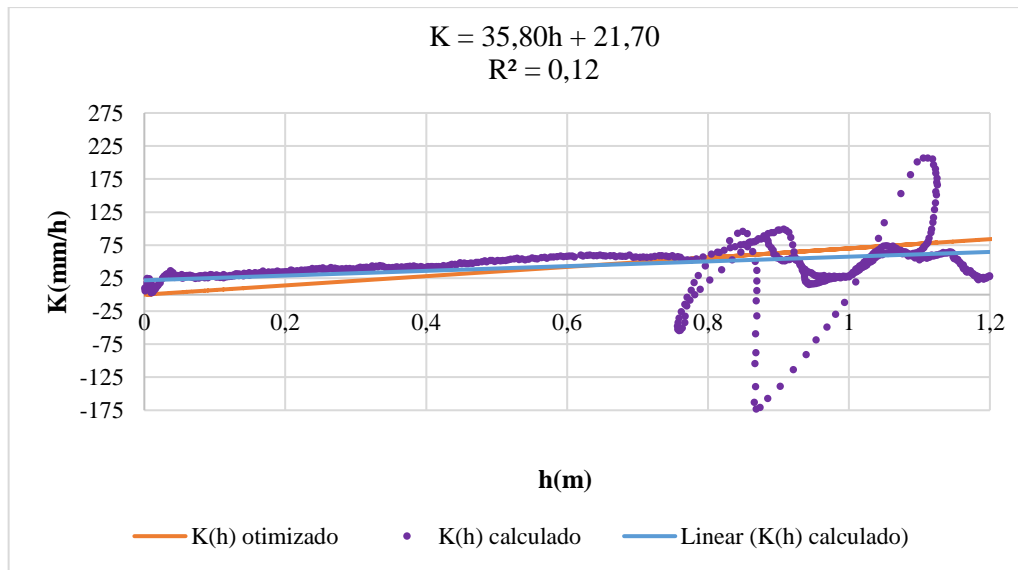
Figura 35 – Calibração do evento 17, ocorrido no dia 24/05/2017



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 36 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 17. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 35,80 e 21,70, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 70,00 e 0,00 respectivamente. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,12

Figura 36 – K h) calculado e otimizado para o evento 17



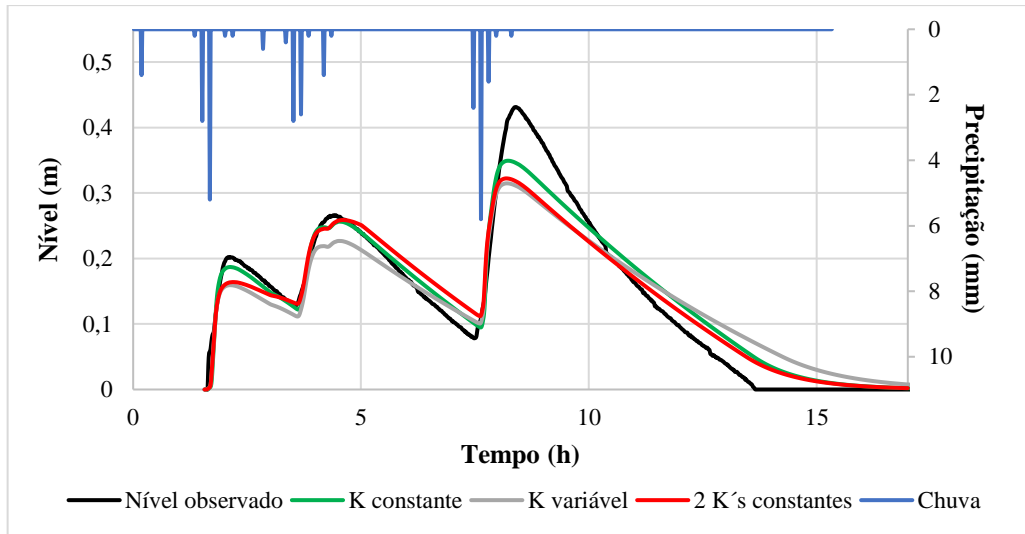
Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração com K constante e 2 K's constantes apresentaram, como esperado (uma vez que K_1 e K_2 foram iguais a K), valores muito próximos para a diferença de volume, 2,19% e 2,16%, respectivamente, e igualdade para o coeficiente NSE, valores iguais a 0,90. A configuração com K variável apresentou o maior valor para o coeficiente NSE, 0,96, mas exibiu também a maior diferença de volume entre as três configurações, valor igual a 13,26 %. Na calibração do evento 17, portanto, a configuração com K variável apresentou a melhor representação dos dados observados, levando-se em conta o coeficiente NSE, enquanto que as demais configurações apresentaram desempenhos semelhantes do ponto de vista da diferença de volume.

A Figura 37 exibe os resultados da calibração do evento 18 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 20,39 mm/h e 19 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 10,87 mm/h e 19,65 mm/h, nessa ordem, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 11,00 mm/h e 18,00 mm/h, respectivamente.

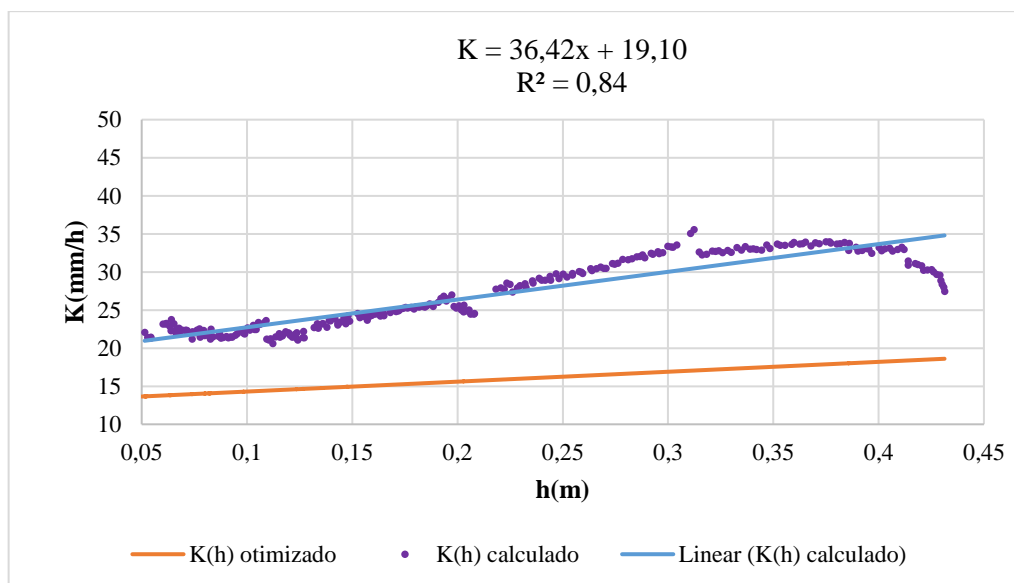
A Figura 38 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 18. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 36,42 e 19,10, respectivamente. Na calibração, ambos otimizados foram iguais a 13,00. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,84

Figura 37 – Calibração do evento 18, ocorrido no dia 08/06/2017



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 38 – K(h) calculado e otimizado para o evento 18

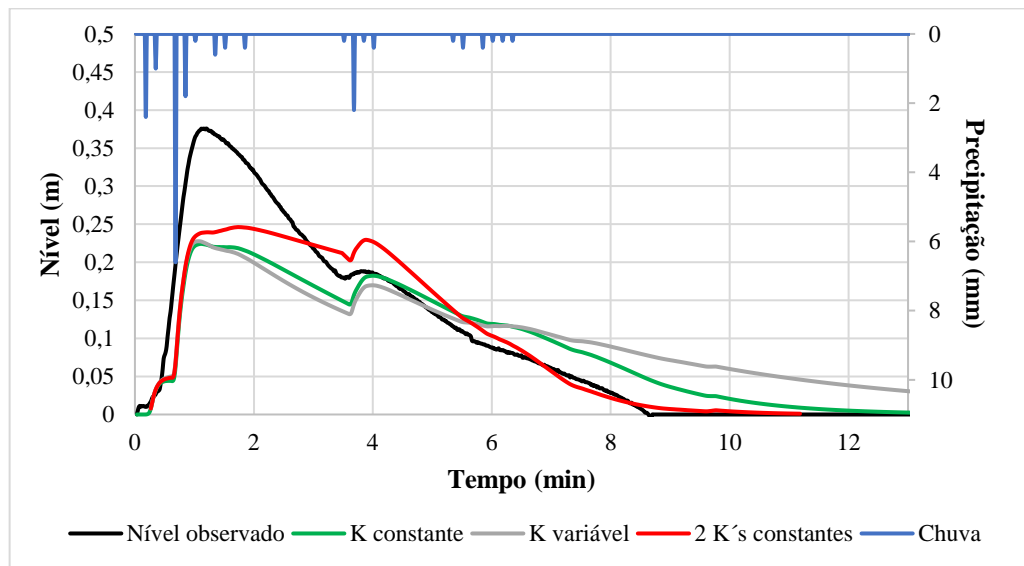


Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração com 2 K's constantes apresentou a menor diferença de volume, valor igual a 0,21%, e valor do coeficiente NSE igual a 0,92. A calibração com K constante obteve o maior valor do coeficiente NSE, 0,95, e diferença de volume igual a 3,29%. A calibração com K variável resultou em valores de diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 1,01% e 0,91, respectivamente. As configurações com 2 K's constantes e K constante, portanto, apresentaram a melhores representatividades dos dados observados na etapa de calibração do modelo, sob as óticas da diferença de volume e coeficiente NSE, respectivamente.

A Figura 39 exibe os resultados da calibração do evento 19 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 14,29 mm/h e 14 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 6,07 mm/h e 19,24 mm/h, nessa ordem, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 7,00 mm/h e 24,00 mm/h, respectivamente.

Figura 39 – Calibração do evento 19, ocorrido no dia 17/06/2017

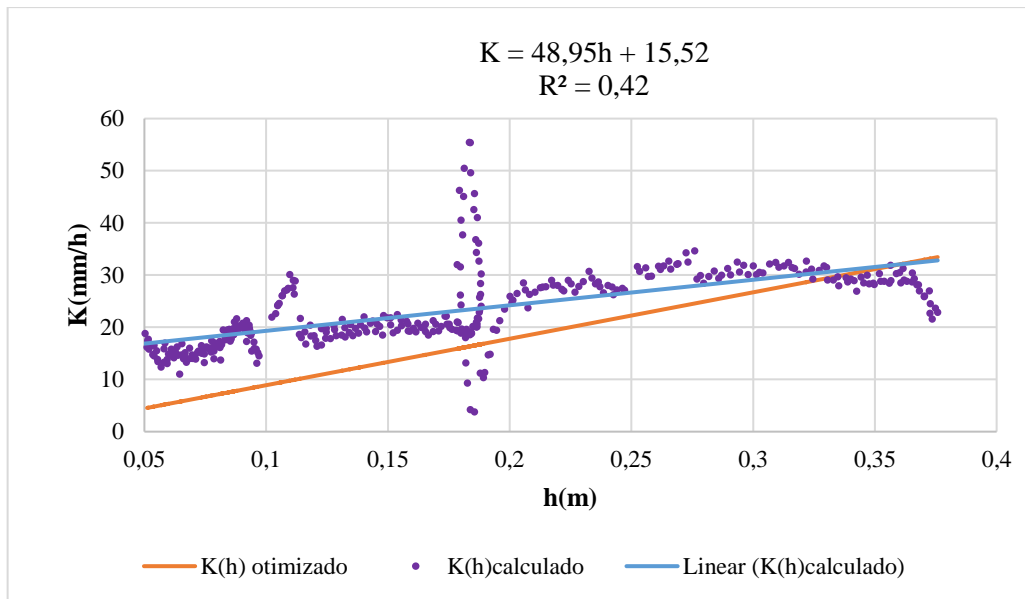


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 40 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 18. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 48,95 e 15,52, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 89,00 e 0,00, respectivamente. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,42.

A configuração com K constante obteve a menor diferença de volume, valor igual a 7,73%, mas apresentou o menor coeficiente NSE, valor igual a 0,83. A configuração com 2 K's constantes alcançou o maior coeficiente NSE, valor igual a 0,86 e diferenças de volume igual a 8,22%. A configuração com 2 K's constantes apresentou valores de diferença de volume iguais a 10,98% e 0,85, respectivamente. As configurações com 2 K's constantes e K constante, portanto, apresentaram a melhores representatividades dos dados observados na etapa de calibração do modelo, sob as óticas da diferença de volume e coeficiente NSE, respectivamente.

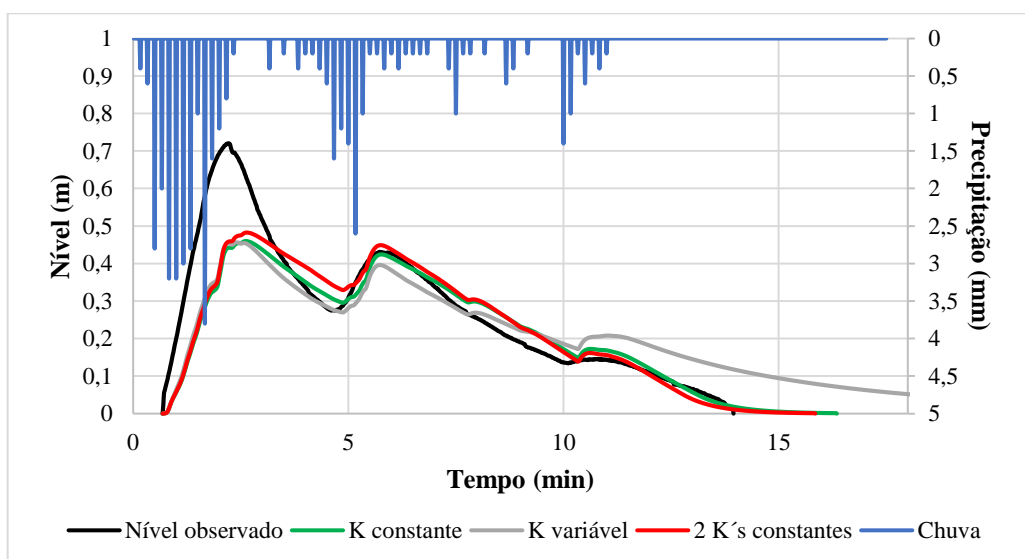
Figura 40 – K(h) calculado e otimizado para o evento 19



Fonte: Elaborada pelo autor

Por fim, a Figura 41 exibe os resultados da calibração do evento 21 para as três configurações. Os valores de K calculado e otimizados foram iguais a 23,30 mm/h e 24,00 mm/h, respectivamente. K_1 e K_2 observados tiveram valores iguais a 20,41 mm/h e 24,28 mm/h, respectivamente, enquanto que os valores otimizados para esses dois parâmetros foram iguais a 20,00 mm/h e 26,00 mm/h, respectivamente.

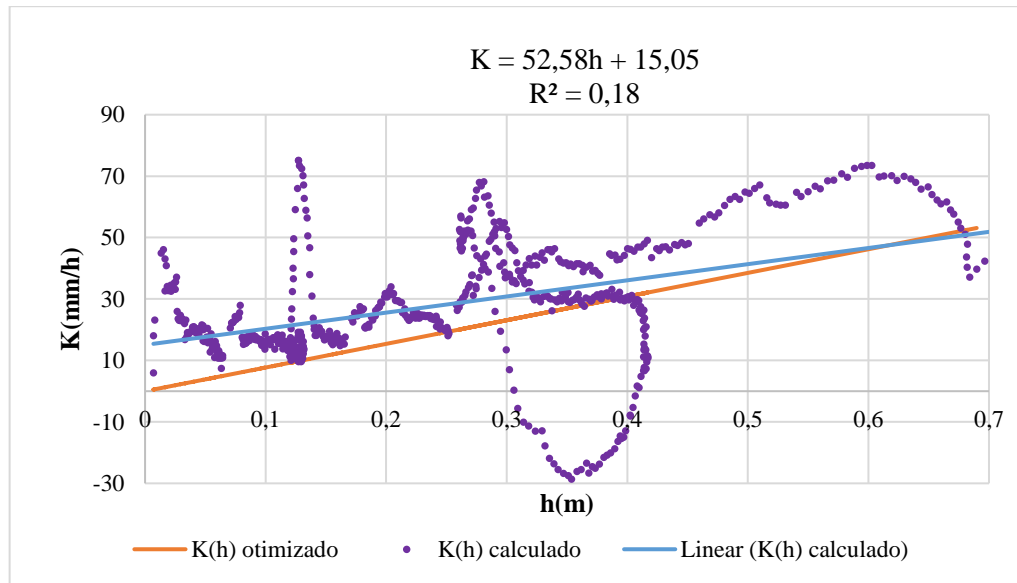
Figura 41 – Calibração do evento 21, ocorrido no dia 18/08/2017



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 42 apresenta os resultados da velocidade de infiltração/percolação variável calculada e otimizada para o evento 21. Os coeficientes a e b calculados, tiveram valores iguais a 52,58 e 15,05, respectivamente. Na calibração, os mesmos otimizados foram iguais a 77,00 e 0,00 respectivamente. O valor de R^2 da reta ajustada foi igual a 0,18.

Figura 42 – K(h) calculado e otimizado para o evento 21



Fonte: Elaborada pelo autor

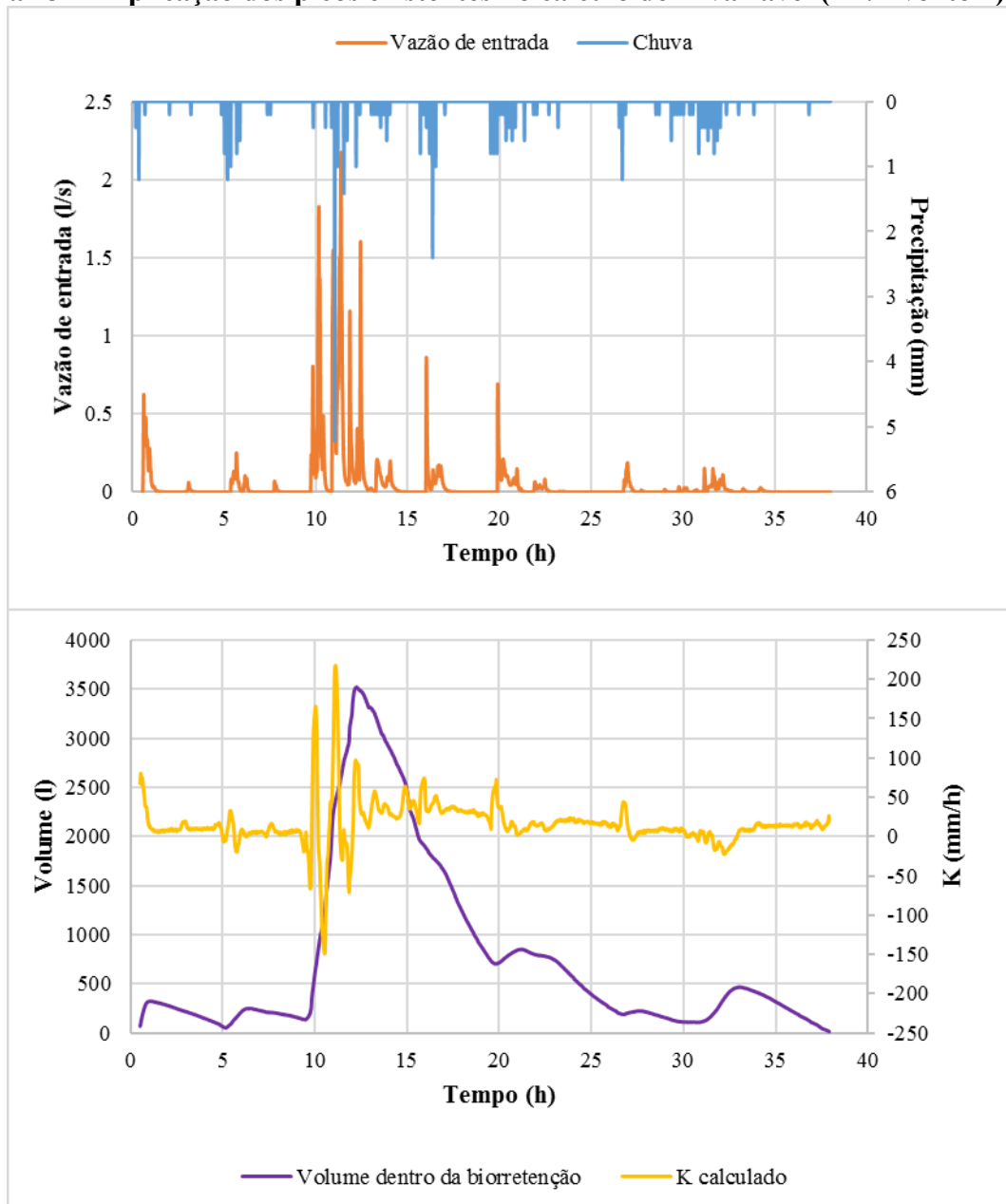
A configuração com K variável apresentou o maior valor para o coeficiente NSE, 0,90, mas obteve a maior diferença de volume, valor igual a 13,43%. A configuração com 2 K's constantes alcançou a menor diferença de volume, valor igual a 1,90%, e alcançou valor do coeficiente NSE igual a 0,88. A configuração com K constante apresentou valores de diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 4,38% e 0,87, respectivamente. Na calibração do evento 21, portanto, a configuração com K variável apresentou o melhor desempenho, sob a ótica do coeficiente NSE, enquanto que do ponto de vista da diferença de volume a configuração com 2 K's constantes melhor representou os dados observados.

5.3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO

Os gráficos de K variável calculados apresentaram alguns picos, às vezes com valores negativos, ao longo dos mesmos, implicando assim em baixos valores de R^2 no ajuste da reta K(h). Esse fato aconteceu em virtude da influência da chuva, como pode ser percebido na Figura 43. O balanço de volumes, equação 16 da seção 4.4.1, utilizado para estimar a vazão de saída

empregada no cálculo de K , leva em conta a vazão de entrada e o volume de água interior da biorretenção. Na presença dos picos da vazão de entrada, ou ainda quando os mesmos cessam, os volumes de saída assumem valores extremos, positivos e negativos, respectivamente. Este último caso ocorre nas elevações do nível da água (os volumes de água no interior da biorretenção são estimados de acordo com níveis observados), onde a vazão de entrada não é suficiente para impedir a diferença negativa entre os volumes nos tempos t e $t+1$, nessa ordem, da equação 16, uma vez que para intervalos curtos (adotou-se discretização de 60 segundo no cálculo de K) o nível da água continua se elevando muito para a pouca vazão de entrada.

Figura 43 – Explicação dos picos existentes no cálculo de K variável (Ex. Evento 1)

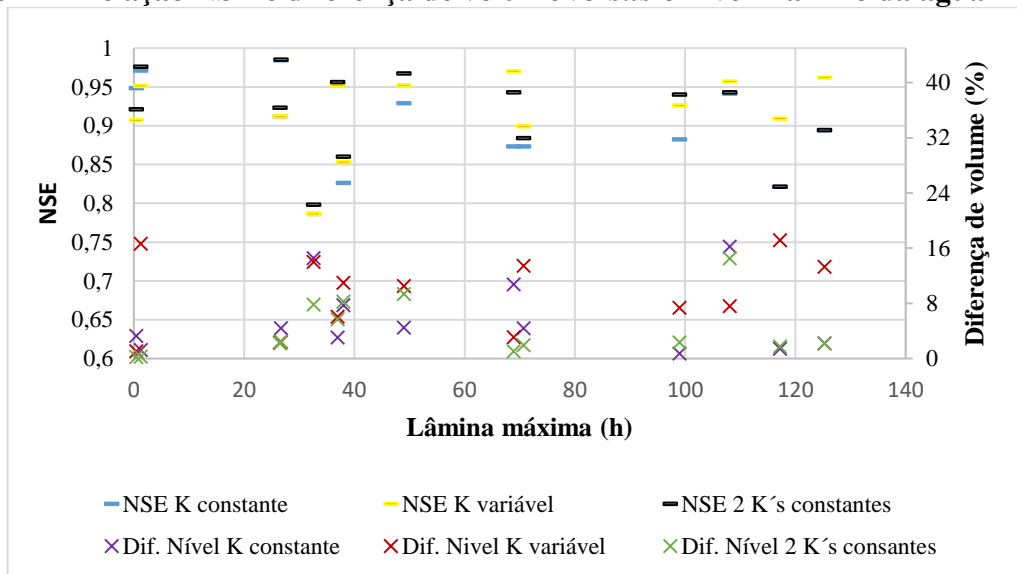


Fonte: Elaborada pelo autor

É importante lembrar ainda que, o fator multiplicado empregado na vazão de entrada é uma estimativa média, com base nos volumes totais, podendo, portanto, subestimar os picos da vazão de entrada. Decidiu-se considerar somente a recessão dos eventos no cálculo de K para que se fugisse o máximo possível da influência da chuva. Não foi possível, entretendo, avaliar somente os trechos onde não havia chuva, em virtude das suas curtas durações, ou seja, trechos maiores de nível observados demonstram mais claramente o comportamento de K(h).

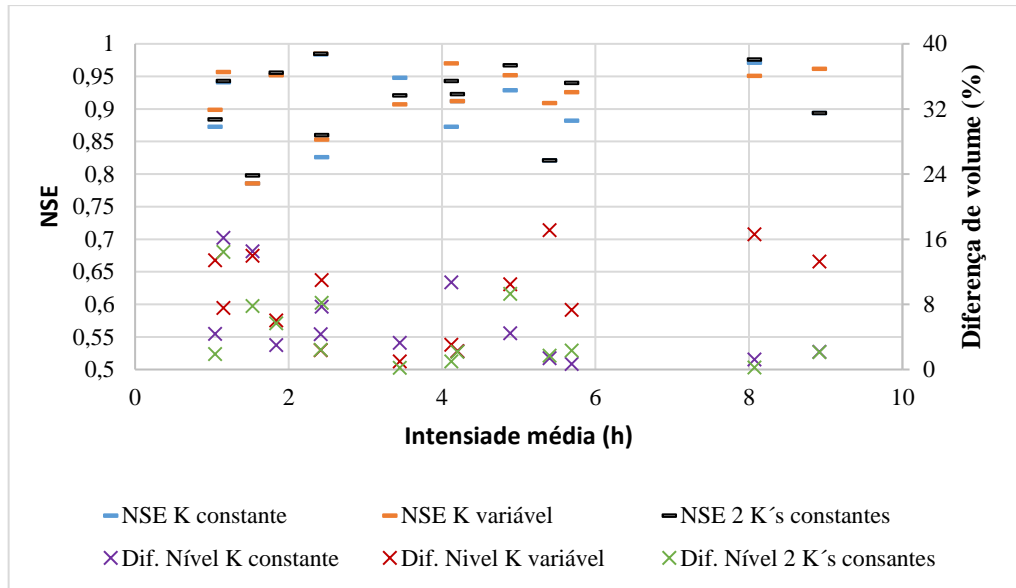
Verificou-se que não há relação do NSE ou da diferença de volume com a altura da lâmina máxima da água no interior da biorretenção, do NSE ou da diferença de volume com a intensidade média da chuva, nem do NSE ou da diferença de volume com a duração nos eventos, como pode ser constatado nas Figura 44, Figura 45 e Figura 46, respectivamente. Esse resultado parece não concordar com aqueles obtidos por Angelini Sobrinha (2012), que percebeu na modelagem de poços de infiltração com o método de Puls que o desempenho do modelo empregado foi afetado pela altura da lâmina da água. A autora constatou que os maiores coeficientes de explicação dos valores de K (taxa de infiltração) otimizados foram para os eventos em que os níveis máximos da água foram inferiores a 1,60 m.

Figura 44 – Relação NSE e diferença de volume *versus* o nível máximo da água



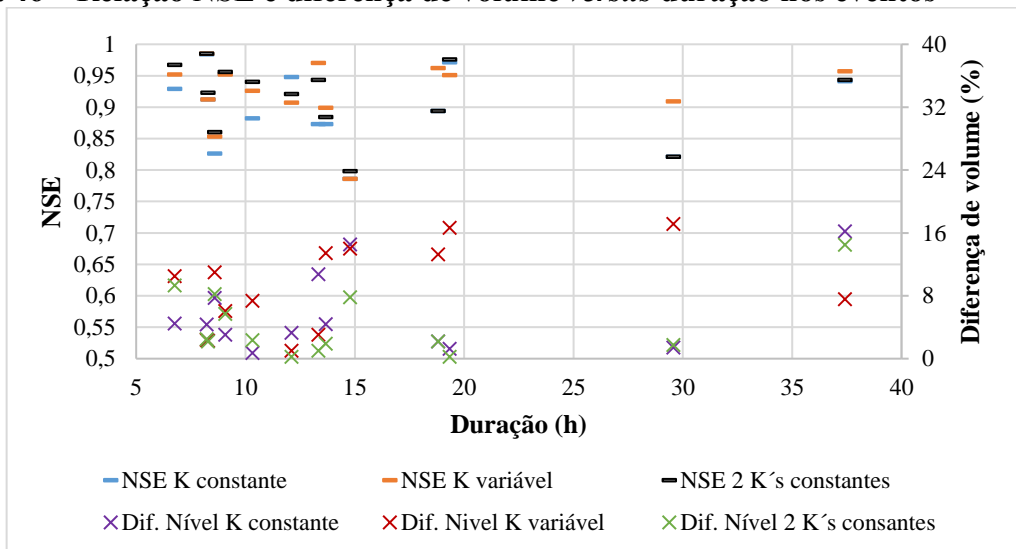
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 45 – Relação NSE e diferença de volume *versus* intensidade média da precipitação



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 46 – Relação NSE e diferença de volume *versus* duração nos eventos



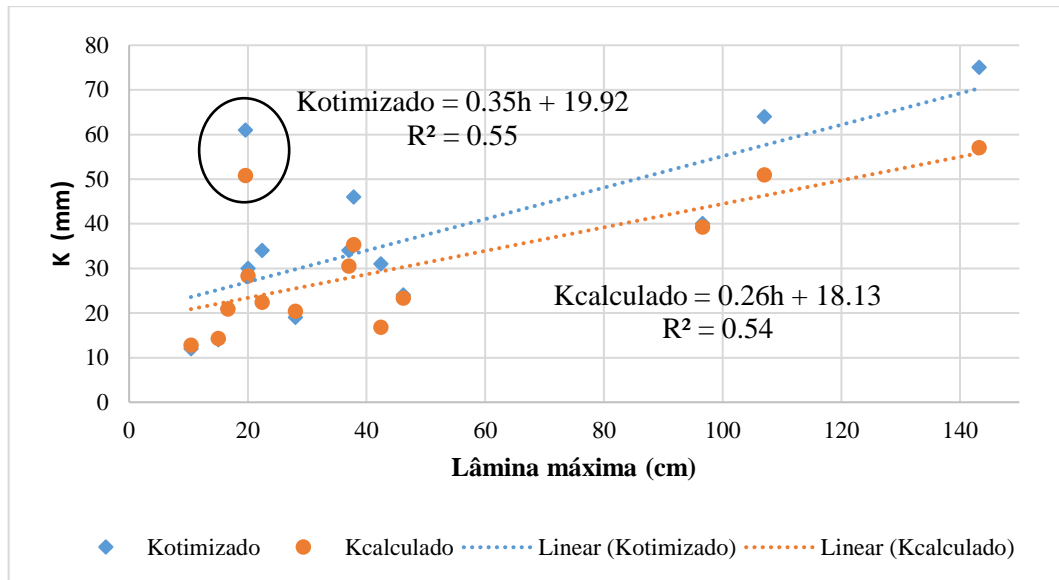
Fonte: Elaborada pelo autor

Observou-se relação linear entre K calculado e a altura máxima lâmina d'água no interior da biorretenção, e entre K otimizado e a altura máxima lâmina d'água no interior da biorretenção, sendo esta última ligeiramente mais definida do que a primeira de acordo com valores de R^2 das retas ajustadas (0,55 e 0,44, respectivamente), como pode ser percebido na Figura 47.

O evento 12 apenas (em destaque na Figura 47) fugiu a essa tendência, possivelmente por causa da alta intensidade da chuva nos primeiro 45 min, valor igual a 15,47 mm/h, como indica a defasagem que teve o menor valor entre os eventos, 4 min, aliada às condições de

umidade proporcionou esse valor alto para K. Utilizou-se nessa análise apenas a velocidade de infiltração/percolação da configuração com K constante pois a mesma emprega um K médio (no caso do K calculado) para todo o evento, tendo-se assim, portanto, um comportamento médio de K em relação à altura máxima da lâmina para cada evento.

Figura 47 – Relação K versus nível máximo de água no interior da biorretenção

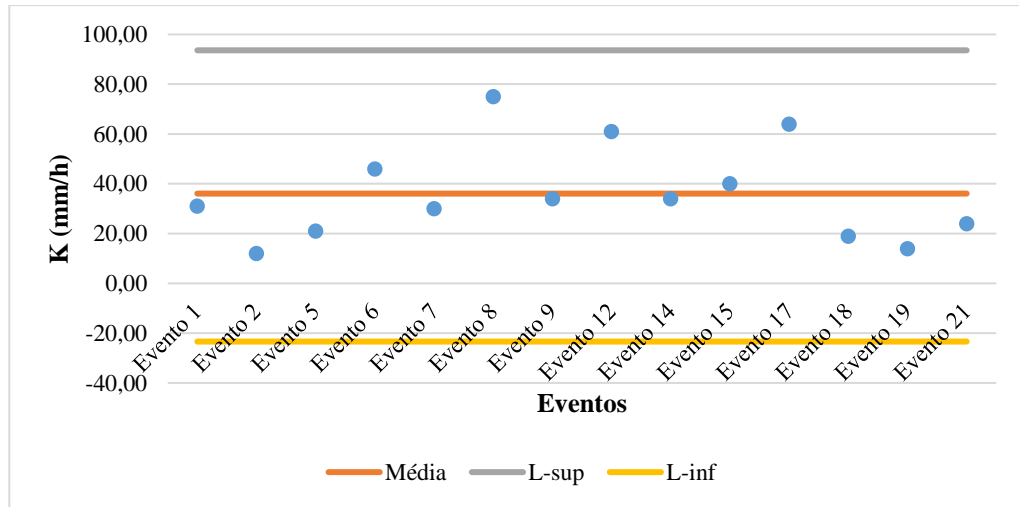


Fonte: Elaborada pelo autor

Na etapa de validação do modelo utilizou-se a média de cada parâmetro otimizado obtida na etapa de calibração. Construiu-se um gráfico com cada parâmetro calibrado a fim de se demonstrar o comportamento dos mesmos ao longo dos eventos. Os limites superiores (L-sup) e limites inferiores (L-inf) foram determinados a partir do diagrama *Box Plot*. Os limites superiores e inferiores são utilizados na identificação de *outliers*.

A Figura 48 demonstra a distribuição de K otimizado para os eventos, que teve média igual a 36,07 mm/h e CV igual a 53,45%. Os limites superiores e inferiores para esses parâmetros foram iguais a 93,63 mm/h e -23,38 mm/h, respectivamente. Percebe-se que K otimizado não apresentou *outliers*.

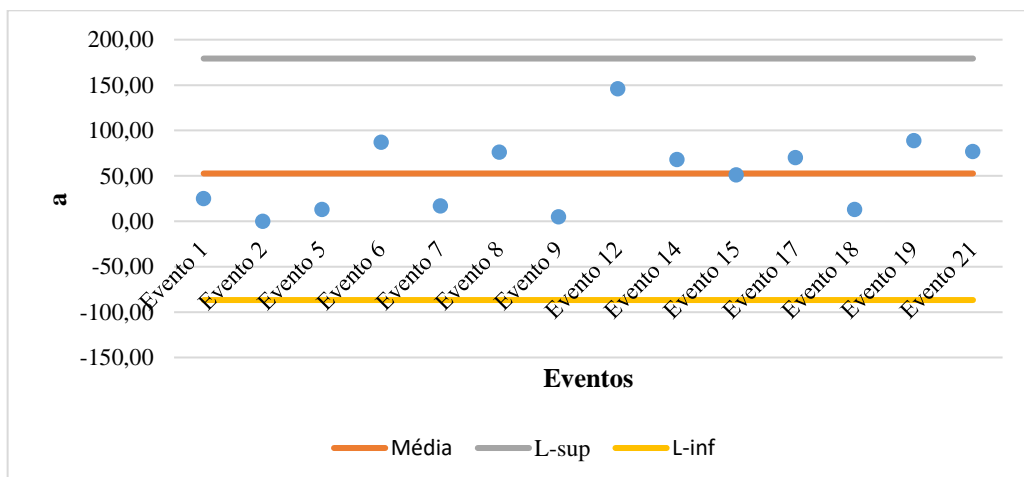
Figura 48 – Distribuição de K otimizado para os eventos calibrados



Fonte: Elaborada pelo autor

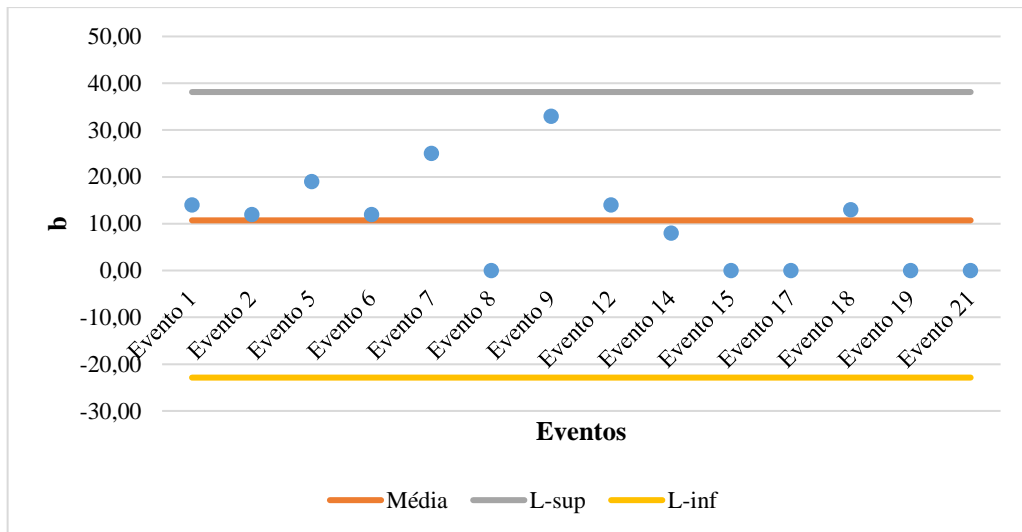
Os parâmetros a e b otimizados apresentam valores médios iguais a 52,64 e 10,71, nessa ordem. O primeiro exibiu CV igual a 80,10 %, o segundo apresentou CV igual a 96,19%. Ambos apresentaram variabilidade relativamente alta, umas das explicações para esse fato pode ser a pouca sensibilidade dos mesmos à mudança do coeficiente NSE no modelo, ou seja, uma alteração significativa no parâmetro a , por exemplo, não implica obrigatoriamente mudança tão importante no coeficiente NSE, aumentando assim, a possibilidade dos parâmetros ótimos não serem necessariamente os mais adequados fisicamente. Contudo, o parâmetros a , que teve limites superiores e inferiores iguais a 179,25 e -86,75, respectivamente, e b , que apresentou limites superiores e inferiores iguais a 38,13 e -22,88, nessa ordem, não apresentaram *outliers*, como pode ser percebido na Figura 49 e na Figura 50, respectivamente.

Figura 49 – Distribuição do parâmetro a otimizado nos eventos calibrados



Fonte: Elaborada pelo autor

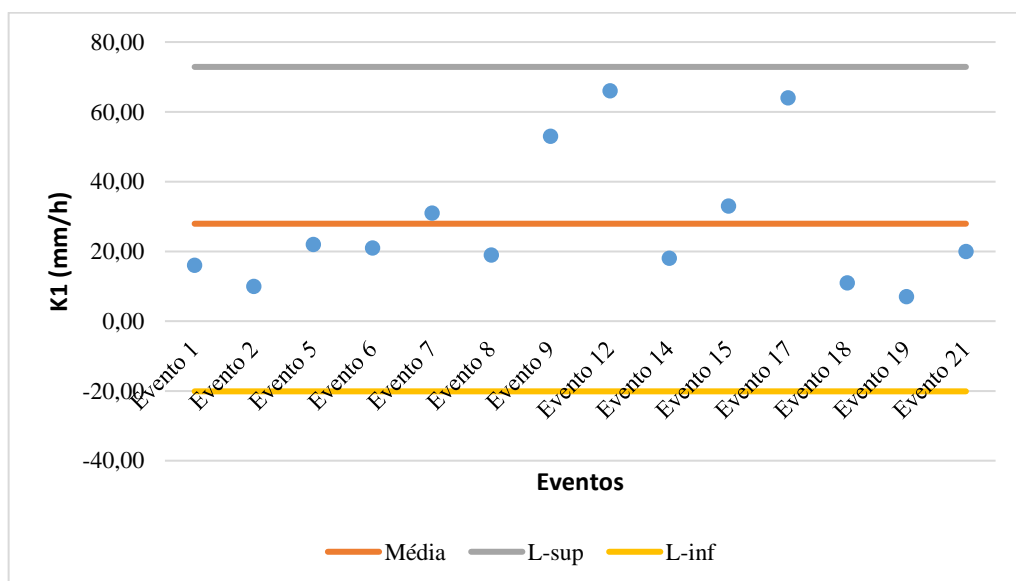
Figura 50 – Distribuição do parâmetro b otimizado nos eventos calibrados



Fonte: Elaborada pelo autor

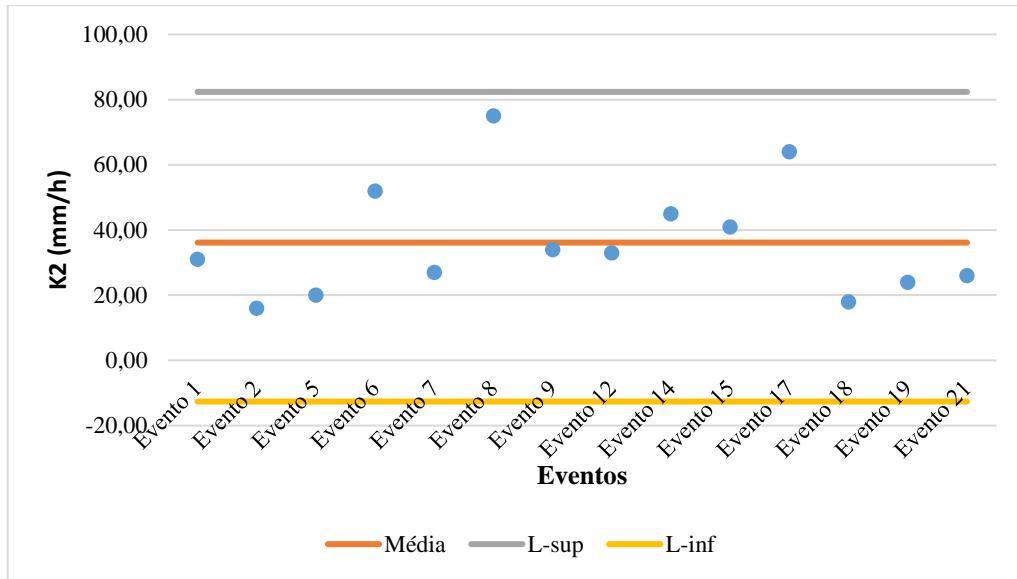
Os parâmetros K_1 e K_2 otimizados apresentam valores médios iguais a 27,93 mm/h e 36,14 mm/h, respectivamente. O primeiro exibiu CV igual a 69,71 %, o segundo apresentou CV igual a 48,59%. Os limites superiores e inferiores para K_1 foram iguais a 72,86 mm/h e -20,13 mm/h, respectivamente. Para K_2 o limite superior foi igual a 82,38 e o limite inferior igual a -12,63. A Figura 51 e a Figura 52 exibem, nessa ordem, a distribuição desses parâmetros otimizados para todos os eventos calibrados, onde percebe-se, assim como nos outros parâmetros do modelo, que não houve *outliers*.

Figura 51 – Distribuição do parâmetro K_1 otimizado nos eventos calibrados



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 52 – Distribuição do parâmetro K_2 otimizado nos eventos calibrados



Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que o valor médio de K_1 é inferior ao valor médio de K_2 . Esperava-se que K_2 médio fosse menor, em virtude da saturação do solo. O não monitoramento da umidade dificultou a investigação desse fato, que ainda tem outra variável envolvida, a altura da lâmina d'água no interior da biorretenção. Acredita-se, contudo, que esses resultados são consistentes, uma vez que os valores de K otimizado estão em conformidade com os valores de K calculados, apresentando inclusive os menores erros na comparação entre esses dois cenários, para K_1 e K_2 , valores iguais a 9,44% e 15,61%, respectivamente.

Por fim, observaram-se diferenças relativamente grandes entre os valores de a e b calculados e os valores de a e b otimizados. Essa diferença era esperada, uma vez que a reta calculada que relaciona K com h foi ajustada a partir das recessões (no intuito de não levar em conta a influência da vazão de entrada, evitando-se ainda os picos mencionados no início do presente item) dos cotogramas observados, onde o solo em geral provavelmente estava saturado ou muito próximo dessa condição, e a e b foram otimizados considerando-se os eventos como um todo.

5.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Apresentam-se neste item todos os eventos validados. Antes contudo da apresentação do detalhamento (gráficos com os cotogramas observados e modelados para cada configuração, por evento), exibe-se a Tabela 5 com os parâmetros de cada configuração, bem como com os

valores de diferença de volume e coeficiente NSE obtidos em cada evento. Lembrando-se ainda que, na primeira configuração o parâmetro K é único e constante para todo o evento, na segunda configuração K não é constante, mas função de h de forma linear, sendo os coeficientes a e b da reta os parâmetros. Por fim, na terceira configuração há dois parâmetros, sendo K_1 com valor constante antes da saturação e K_2 com valor constante após a saturação.

Tabela 5 – Resumo dos resultados da etapa de validação do modelo

Evento	K ajustado (mm/h)	K constante		a ajustado	b ajustado	K variável		K_1 ajustado (mm/h)	K_2 ajustado (mm/h)	2 K's constantes	
		Diferença de volume (%)	NSE			Diferença de volume (%)	NSE			Diferença de volume (%)	NSE
3	36,07	28,71	0,80**	52,64	10,71	14,84	0,86	27,93	36,14	28,88	0,79
4		64,46	0,16			84,59	0,29			92,73	-0,98
10		50,84	0,78			146,2	0,20			54,85	0,77
11		37,09	0,70***			35,51	0,84			17,2	0,91
13		145,16	-0,96			239,86	-1,22			205,08	-2,15
16		28,95	0,77			1,21	0,94			38,77	0,68
20		81,41	-0,28			10,31	0,94			87,1	-0,43
Média*			36,4			0,76	-				14,86

*média referente aos eventos com desempenho classificado como aceitável ($0,36 < NSE < 0,75$) ou bom ($NSE > 0,75$)

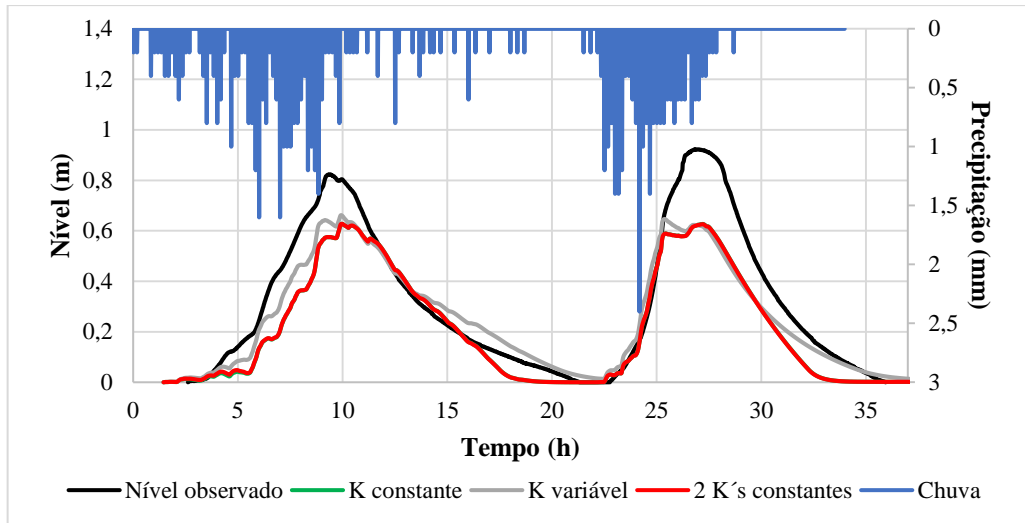
** Destacou-se em amarelo os eventos classificados como bons

*** Destacou-se em verde os eventos classificados como aceitáveis

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 53 exibe os resultados da validação do evento 3 para as três configurações. A configuração com K variável apresentou o menor valor de diferença de volume, 14,84 %, bem como o maior coeficiente NSE, valor igual a 0,86. As configurações com K constante e 2 K's constantes apresentaram resultados bem semelhantes, por isso os cotogramas de ambas se sobrepuseram (a cor cinza prevaleceu em relação a cor verde). O valor do coeficiente NSE foi o mesmo para essas duas configurações, 0,79, enquanto que a diferença de nível para a primeira teve valor igual a 28,71% e 28,88% para a segunda. Para o vento 3, portanto, a configuração com K variável obteve a melhor representação dos dados observados na etapa de validação do modelo.

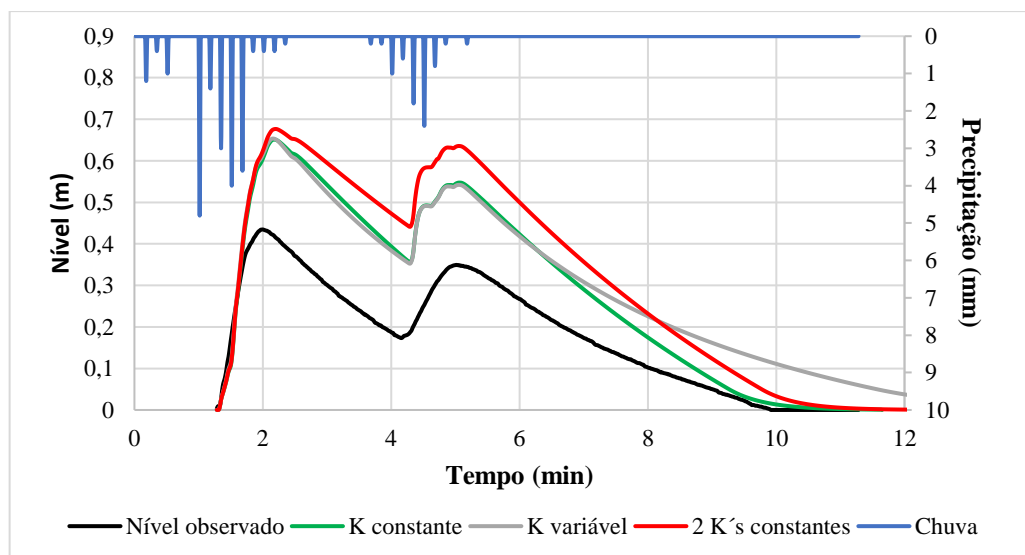
Figura 53 – Validação do evento 3, ocorrido no dia 20/08/2015



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 54 exibe os resultados da validação do evento 3 para as três configurações. A configuração com K constante apresentou valor da diferença de volume igual a 64,6% e valor do coeficiente NSE igual a 0,16. A configuração com K variável obteve valor da diferença de volume igual a 84,59% e valor do coeficiente NSE igual a 0,29. Para a configuração com 2 K's constantes os valores de diferença de volume e coeficiente NSE foram iguais a 92,73% e -0,98, respectivamente. Para o evento 4, portanto, as três configurações apresentaram desempenhos inaceitáveis na representação dos dados observados, na etapa de validação do modelo, de acordo com o coeficiente NSE

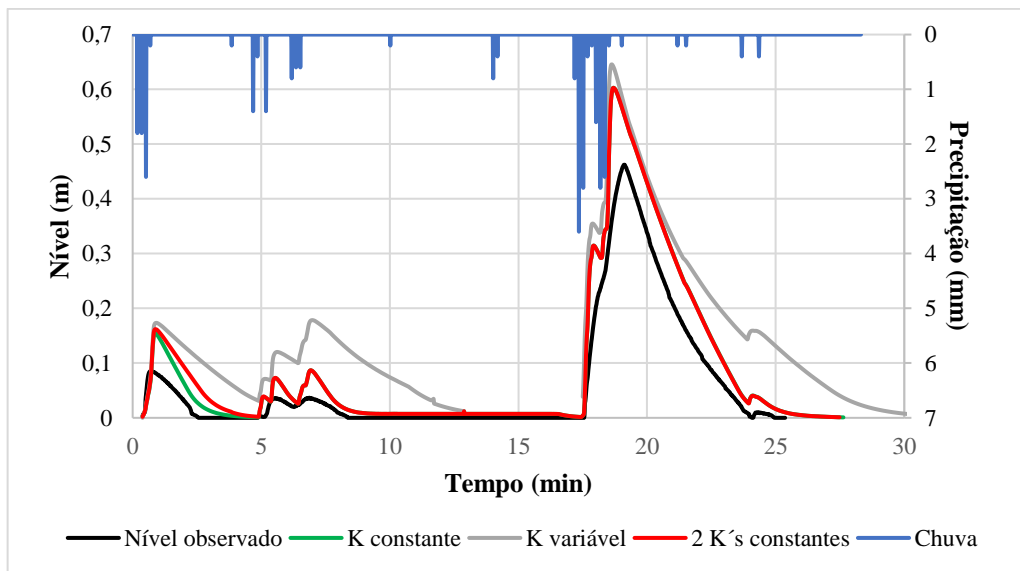
Figura 54 – Validação do evento 4, ocorrido no dia 29/01/2016



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 55 exibe os resultados da validação do evento 10 para as três configurações. A configuração com K constante apresentou a menor valor de diferença de volume, 50,84%, bem como o maior coeficiente NSE, valor igual a 0,78. A configuração com K variável obteve a maior diferença de volume, valor igual a 146,2% e o menor valor do coeficiente NSE, 0,20. A configuração com 2 K's constantes obteve valores de diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 54,85% e 0,77, respectivamente. Na validação do evento 10, portanto, a configuração com K constante apresentou a melhor representação dos dados observados, seguida da configuração com 2 K's constantes com desempenho parecido.

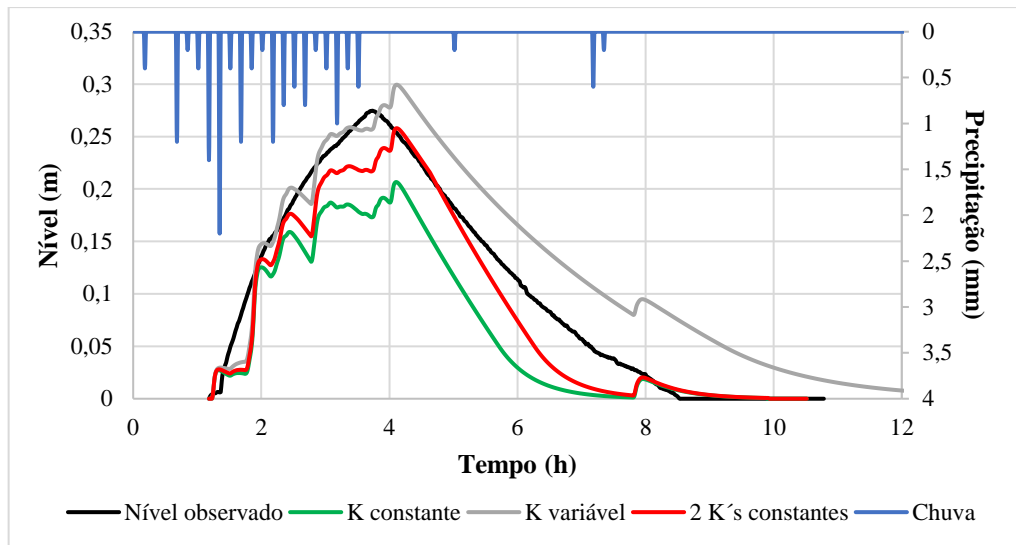
Figura 55 – Validação do evento 10, ocorrido no dia 19/06/2016



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 56 exibe os resultados da validação do evento 11 para as três configurações. A configuração com 2 K's apresentou a menor diferença de volume, valor igual a 17,20%, e também o maior coeficiente NSE, valor igual a 0,91. A configuração com K constante obteve valor da diferença de volume igual a 37,09% e valor de coeficiente NSE igual a 0,70. A configuração com K variável alcançou valores de diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 35,51 % e 0,84, respectivamente. Para o evento 11, portanto, a configuração com 2 K's constante obteve a melhor representação dos dados observados na etapa de validação do modelo.

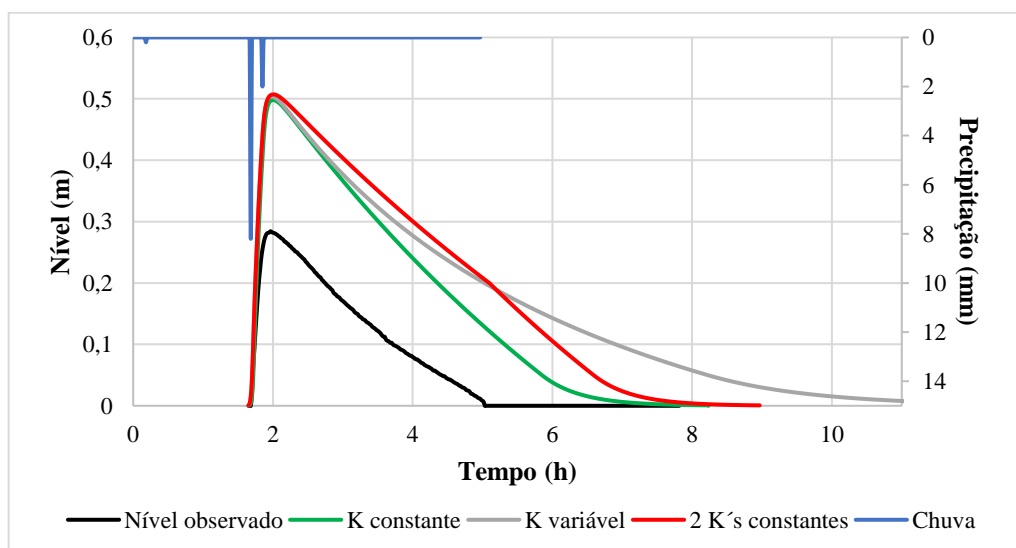
Figura 56 – Validação do evento 11, ocorrido no dia 28/06/2016



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 57 exibe os resultados da validação do evento 13 para as três configurações. A configuração com K constante apresentou valor da diferença de volume igual a 145,16% e valor do coeficiente NSE igual a -0,96. A configuração com K variável obteve valor da diferença de volume igual a 239,86% e valor do coeficiente NSE igual a -1,22. Para a configuração com 2 K's constantes os valores de diferença de volume e coeficiente NSE foram iguais a 205,08% e -2,15, respectivamente. Para o evento 13, portanto, as três configurações apresentaram desempenhos inaceitáveis na representação dos dados observados na etapa de validação do modelo, de acordo com o coeficiente NSE.

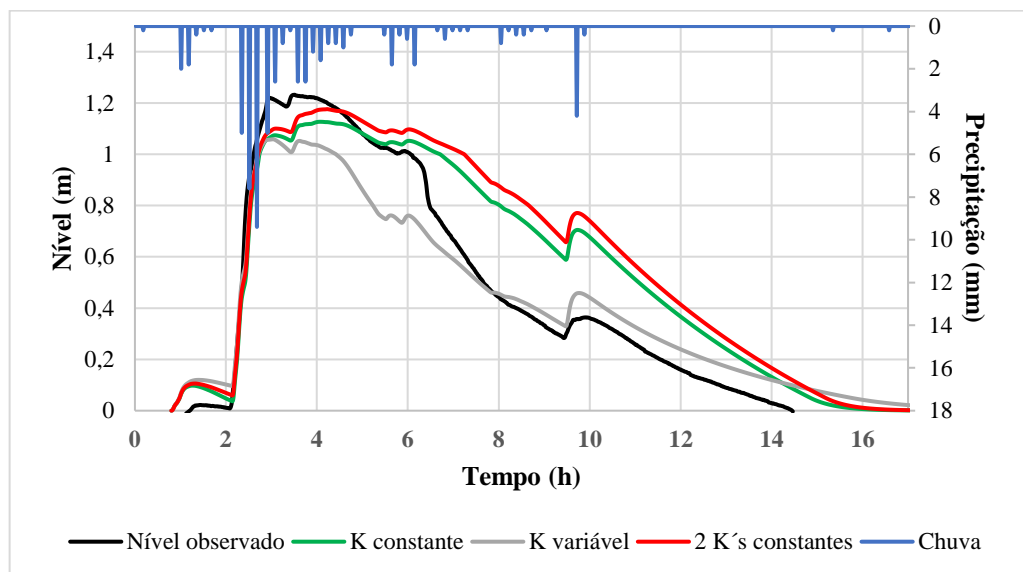
Figura 57 – Validação do evento 13, ocorrido no dia 07/04/2017



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 58 exibe os resultados da validação do evento 13 para as três configurações. A configuração com K variável alcançou a menor diferença de volume, valor igual a 1,21%, além do maior valor do coeficiente NSE, 0,94. A configuração com K constante obteve valor de diferença de volume igual a 28,95% e valor do coeficiente NSE igual a 0,77. A configuração com 2 K's constantes apresentou valores de diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 38,77% e 0,68, respectivamente. Para o evento 11, portanto, a configuração com K variável apresentou a melhor representação dos dados observados na etapa de validação do modelo.

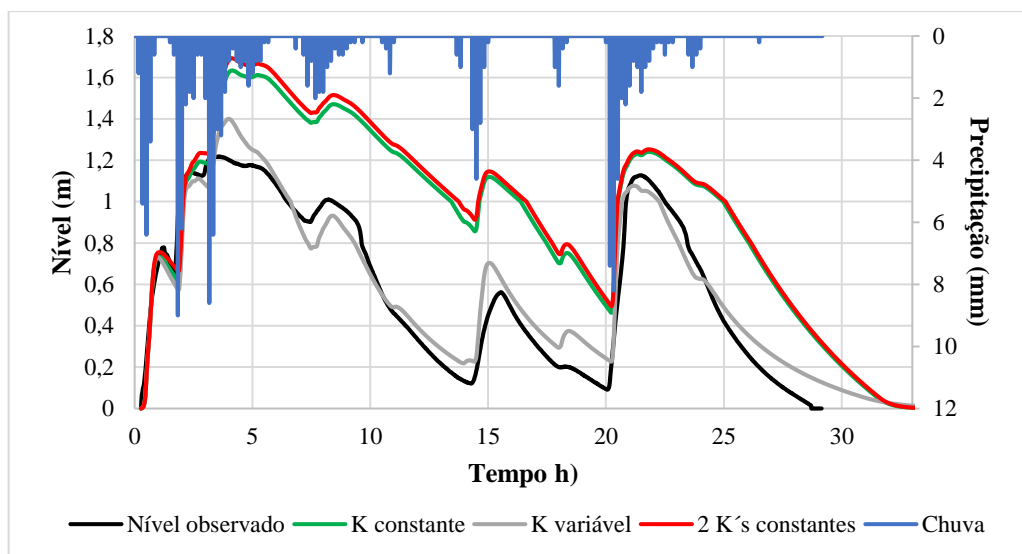
Figura 58 – Validação do evento 16, ocorrido no dia 21/05/2017



Fonte: Elaborada pelo autor

Finalmente, a Figura 59 exibe os resultados da validação do evento 20 para as três configurações. A configuração com K variável apresentou a menor diferença de volume e o maior coeficiente NSE, valores iguais a 10,31% e 0,94, respectivamente. As configurações com K constante e 2 K's constantes obtiveram resultados inaceitáveis de acordo com o coeficiente NSE. A primeira apresentou valor da diferença de volume igual a 81,41% e valor do coeficiente NSE igual a -0,28, enquanto que a segunda alcançou valores de diferença de volume e coeficiente NSE iguais a 87,1% e -0,43, nessa ordem. Para o evento 20, portanto, a configuração com K variável apresentou a melhor representação dos dados observado na etapa de validação do modelo.

Figura 59 – Validação do evento 20, ocorrido no dia 28/06/2017



Fonte: Elaborada pelo autor

5.4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO

Na fase de validação do modelo dois dos sete eventos utilizados apresentaram desempenhos considerados insuficiente para as três configurações, de acordo com a classificação adotada. O primeiro foi o evento 4 corrido no dia 29/01/2016 e o segundo o evento 13, ocorrido no dia 07/04/2017.

O evento 4 teve precipitação total igual 32 mm, dividida em três chuvas de 3,80 mm, 19,40 mm e 8,80 mm, o que provocou pouca contribuição de água da área da grama para o interior da biorretenção, como indica o coeficiente de escoamento da grama, que teve valor igual a 0,06 (a média para essa variável foi igual a 0,18). Embora a precipitação antecedente tenha sido de 28 mm, o solo provavelmente alcançou um grau de umidade bem inferior àquele correspondente a velocidade de infiltração/percolação média otimizada na calibração. Os níveis observados são bem menores, ou seja, infiltrou mais do que o modelo conseguiu simular. Implicando assim, em resultados considerados inaceitáveis na etapa de validação para o evento 4.

No evento 13, assim como no evento supracitado, os cotogramas da modelagem estão com níveis superestimados. Esse fato possivelmente ocorreu também em função da baixa umidade do solo em relação à umidade relacionada com a velocidade de infiltração/percolação média otimizada na calibração. O evento teve uma precipitação antecedente 6,20 mm apenas e, fundamentalmente, contou com pouca precipitação, 10,40 mm, o que implicou em pouca

contribuição de água da área de grama para o interior da biorretenção, como indica a estimativa do coeficiente de escoamento daquela área (as perdas iniciais foram maiores do que a precipitação no cálculo). Desse modo, com a pouca umidade no solo, a velocidade de infiltração/percolação do evento 13 foi muito superior a velocidade de infiltração/percolação otimizada média dos eventos, provocando assim, valores considerados inaceitáveis na etapa de validação do modelo para o evento 13.

A configuração com K variável chamou atenção na validação de 2 eventos: o evento 10, ocorrido no dia 19/06/2016 e o evento 20, ocorrido no dia 28/06/2016. No primeiro, a configuração com K variável foi a única que apresentou desempenho considerado insuficiente e no segundo foi a única configuração que apresentou desempenho considerado no mínimo aceitável.

Essa diferença entre o cotograma da configuração com K variável e os cotogramas das demais configurações nesses dois eventos aconteceu em virtude da altura dos níveis da água no interior da biorretenção. No evento 2 a altura média dos níveis foi baixa, valor igual a 0,12 m, implicando assim em valores baixos para a velocidade de infiltração/percolação. Substituindo esse valor médio dos níveis observados na equação de $K(h)$ obter-se-ia valor de K igual a 17,03 mm/h, sendo que o valor médio de K utilizado na validação foi igual a 36,07 mm/h. Valores baixos de K , portanto, provavelmente provocaram maiores armazenamento de água e conseqüentemente essa diferença de cotogramas na validação do evento 2.

Por fim, para o evento 20 o raciocínio é análogo ao anterior, mas agora com altura média alta dos níveis. O evento 20 teve altura média da lâmina d'água igual a 0,61 m, implicando assim em valores altos para a velocidade de infiltração/percolação. Substituindo esse valor médio dos níveis observados na equação de $K(h)$ obter-se-ia valor de K igual a 42,82 mm/h, sendo que o valor médio de K utilizado na validação foi igual a 36,07 mm/h, como supracitado. Na validação do vento evento 20, portanto, valores altos de K certamente provocaram menor armazenamento de água no interior da biorretenção e conseqüentemente essa diferença entre o cotograma da configuração com K variável e dos cotogramas das demais configurações.

5.5 DESEMPENHO DO MODELO

A Tabela 6 exibe um resumo com o desempenho do modelo para cada configuração e evento nas etapas de validação e calibração. Para cada evento, destacou-se (na cor amarela os eventos calibrados e na cor azul os eventos validados) aquele que apresentou o maior valor de

coeficiente NSE e o menor valor de diferença de volume dentre as três configurações. Exibem-se, ainda, o coeficiente NSE médio e a diferença de volume média para cada configuração.

Tabela 6 – Desempenho do modelo para cada configuração

Evento	K constante				K variável				2 K's constantes			
	Calibração		Validação		Calibração		Validação		Calibração		Validação	
	NSE	Diferença de volume (%)	NSE	Diferença de volume (%)	NSE	Diferença de volume (%)	NSE	Diferença de volume (%)	NSE	Diferença de volume (%)	NSE	Diferença de volume (%)
1	0,94	16,20			0,96	7,57			0,94	14,47		
2	0,91	2,27			0,91	2,27			0,92	2,18		
3			0,79	28,71			0,86	14,84			0,79	28,88
4			0,16	64,46**			0,29	84,59			-0,98	92,73
5	0,98	4,35			0,99	2,39			0,99	2,44		
6	0,87	10,72			0,97	3,05			0,94	1,01		
7	0,95	3,03*			0,95	6,03			0,96	5,69		
8	0,82	1,41			0,91	17,11			0,82	1,71		
9	0,79	14,53			0,79	13,99			0,80	7,79		
10			0,78	50,84			0,20	146,20			0,77	54,85
11			0,70	37,09			0,84	35,51			0,91	17,20
12	0,93	4,45			0,95	10,50			0,97	9,32		
13			-0,96	145,16			-1,22	239,86			-2,15	205,08
14	0,88	0,69			0,93	7,33			0,94	2,35		
15	0,97	1,23			0,95	16,63			0,98	0,24		
16			0,77	28,95			0,94	1,21			0,68	38,77
17	0,89	2,19			0,96	13,26			0,89	2,16		
18	0,95	3,28			0,91	1,01			0,92	0,21		
19	0,83	7,73			0,85	10,98			0,86	8,22		
20			-0,28	81,41			0,94	10,31			-0,43	87,10
21	0,87	4,38			0,90	13,43			0,88	1,90		
Média	0,90	5,46	0,28	62,37	0,92	8,97	0,41	76,07	0,92	4,26	-0,06	74,94

* destacou-se em amarelo a configuração que teve o melhor desempenho na calibração do modelo para cada evento

** destacou-se em azul a configuração que teve melhor desempenho na validação do modelo para cada evento

Fonte: Elaborada pelo autor

Quanto ao coeficiente NSE na calibração, a configuração com K constante conseguiu 1 evento com melhor desempenho, a configuração com K variável obteve 6 e a configuração com 2 K's 8 (houve um empate entre essas duas últimas configurações). Quanto a diferença de volume, na calibração ainda, a configuração com K constante alcançou 5 ventos com melhor desempenho, a configuração com K variável obteve 1 e a configuração com 2 K's constantes 8. Nesse aspecto, portanto, a configuração com 2 K's constantes atingiu o melhor desempenho na calibração do modelo.

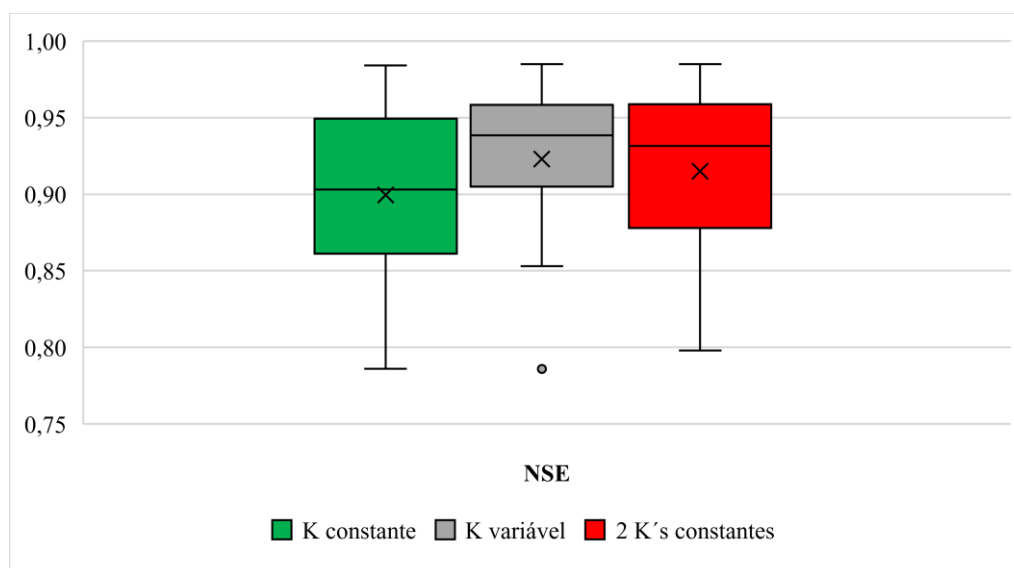
No que tange ao coeficiente NSE na validação, a configuração com K constante conseguiu 1 evento com melhor desempenho, a configuração com K variável obteve 5 e a

configuração com 2 K's 1. Quanto a diferença de volume, na validação ainda, a configuração com K constante alcançou 3 eventos com melhor desempenho, a configuração com K variável obteve 3 e configuração com 2 K's constantes 1. Nesse aspecto, portanto, a configuração com 2 K's constantes atingiu o melhor desempenho na calibração do modelo. Nesse âmbito, portanto, a configuração com K variável atingiu o melhor desempenho na validação do modelo.

A configuração com K constante apresentou coeficiente NSE médio igual a 0,90 na etapa de calibração do modelo. As configurações com K variável e 2 K's constantes obtiveram valores iguais a 0,92 para esse indicador de desempenho. Nota-se que as três configurações apresentaram resultados considerados bons, de acordo com a classificação de Silva et al. (2008) adotada, e muito próximos nesse quesito, na calibração. Houve um ligeiro ganho de desempenho com as duas configurações novas (K variável e 2 K constantes), cerca de 2% de aumento no coeficiente NSE. Ferreira (2017) e Tecedor *et al.* (2015) encontraram valores médios de coeficiente Nash-Sutcliffe iguais a 0,88 e 0,72, respectivamente na calibração do método de Puls. Quanto a coeficiente NSE médio, portanto, as três configurações alcançaram desempenhos semelhantes na etapa de calibração do modelo.

A Figura 60 apresenta o diagrama *Box Plot* para os coeficientes NSE dos eventos calibrados para as três configurações. As médias (representadas por X) dos coeficientes NSE das configurações K variável e 2 K's constantes não ficaram exatamente iguais porque foram consideradas três casas decimais para a concepção do gráfico. Observa-se um *outlier* na configuração com K variável (o ponto cinza), que corresponde ao evento 9, ocorrido na data 02/06/2016, que teve valor igual a 0,79.

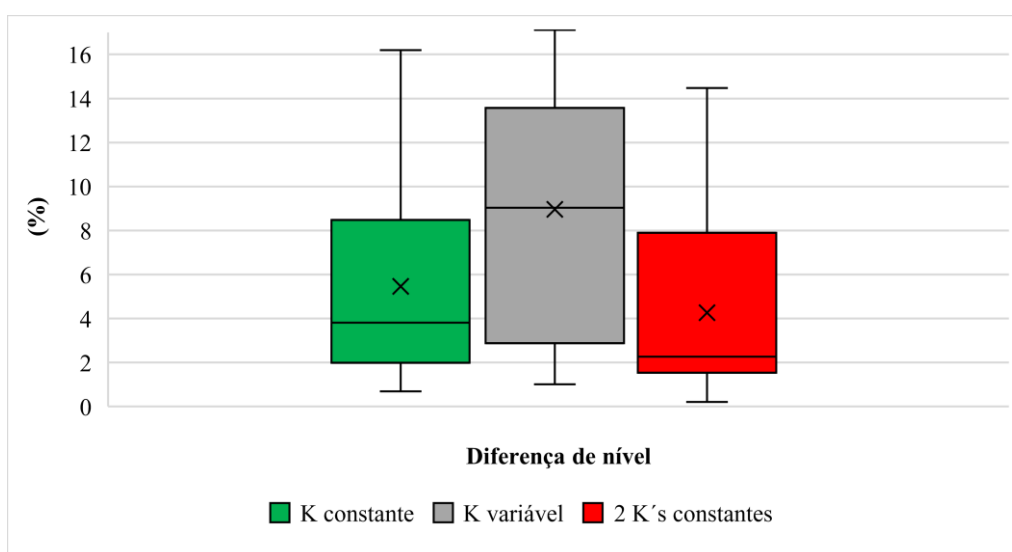
Figura 60 – Diagrama *Box Plot* para o coeficiente NSE na calibração do modelo



Fonte: Elaborada pelo autor

No que concerne a diferença de volume na calibração, as configurações com K constante e 2 K's constantes apresentaram resultados próximos, valores médios iguais a 5,46% e 4,26%, respectivamente. A configuração com K variável obteve diferença de volume média igual a 8,97%. A Figura 61 apresenta o diagrama *Box Plot* para a diferença de volume dos eventos calibrados para as três configurações. No critério da diferença de volume média, portanto, a configuração com K variável apresentou desempenho inferior em relação às demais configurações na etapa de calibração do modelo.

Figura 61 – Diagrama *Box Plot* para a diferença de volume na calibração do modelo



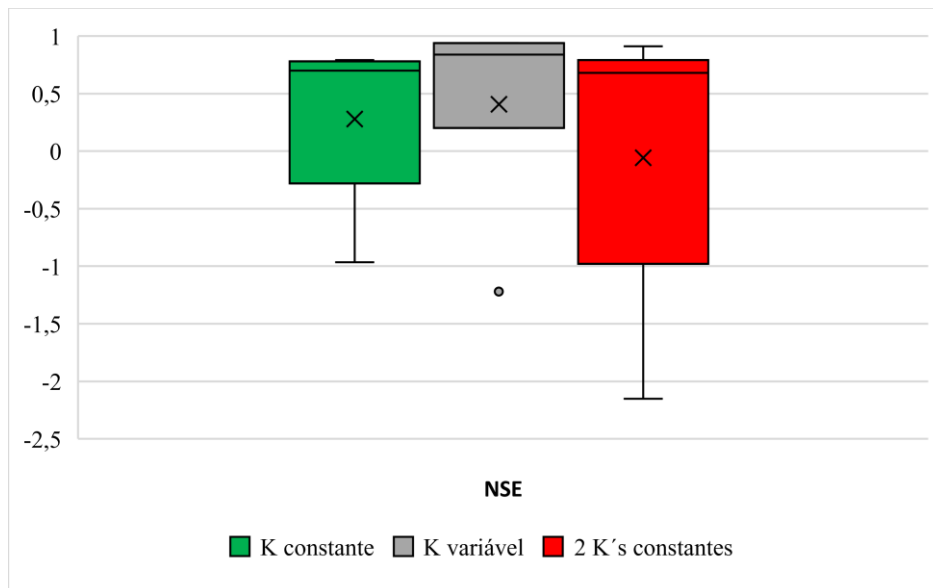
Fonte: Elaborada pelo autor

A velocidade de infiltração/percolação constante, K ajustado, teve média igual a 36,07 mm/h e coeficiente de variação igual a 6,64% na etapa de calibração do modelo, o maior valor foi de 75 mm/h, enquanto que o menor foi 12 mm/h. Ferreira (2017) e Rosendo (2013) encontraram valores médios iguais a 26 mm/h e 50 mm/h, respectivamente, para esse parâmetro, estudando o mesmo disposto, o primeiro na modelagem e o segundo no dimensionamento. Ficando, portanto, a velocidade de infiltração/percolação próxima de valores anteriormente estimados por outros autores.

Na etapa de validação do modelo, a configuração com K constante e com 2 K's constantes apresentaram coeficientes NSE médios classificados como inaceitáveis, valores iguais a 0,28 e -0,06, respectivamente. A configuração com K variável, entretanto, obteve resultado considerado aceitável, coeficiente NSE médio igual a 0,41. Em estudo de filtro-vala-trincheira, com uso do método de Puls na modelagem, Lucas, Barbassa e Moruzzi (2013) obtiveram valor médio do coeficiente Nash-Sutcliffe na validação do modelo igual a 0,43,

enquanto Ferreira (2017) obteve valor igual a 0,70, mas para apenas três eventos, na modelagem da biorretenção em estudo. A Figura 62 apresenta o diagrama *Box Plot* para os coeficientes NSE dos eventos validados para as três configurações. A configuração com K variável, portanto, se destacou no aspecto do coeficiente NSE médio na validação do modelo, mesmo contando com um *outlier* (o ponto cinza na Figura 62, com valor igual a -1,22 e correspondente ao evento 13).

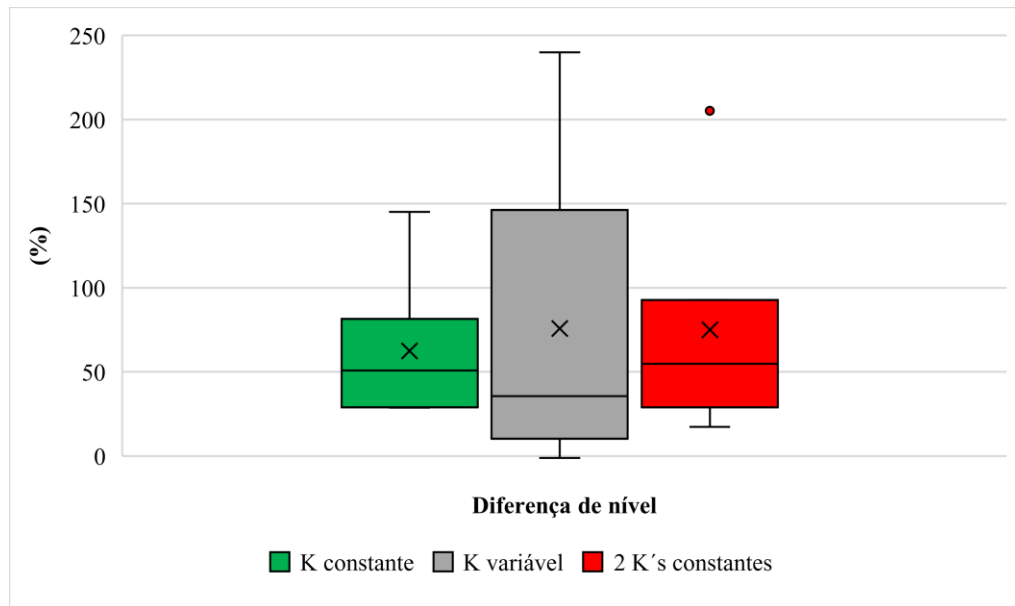
Figura 62 – Diagrama *Box Plot* para o coeficiente NSE na validação do modelo



Fonte: Elaborada pelo autor

Quanto a diferença de volume na validação do modelo, as três configurações apresentaram valores médios altos. A configuração com K constante obteve valor igual a 62,37%, a configuração com K variável obteve valor igual a 76,07% e a configuração com 2 K's variáveis alcançou valor igual a 74,94%⁹. A Figura 63 apresenta o diagrama *Box Plot* para a diferença de volume dos eventos validados para as três configurações, o ponto vermelho demonstra um *outlier*, como valor igual a 205,08% e correspondente ao evento 13, na configuração com 2 K's variáveis. As três configurações, portanto, apresentaram resultados ruins para a diferença de volume na etapa de validação do modelo.

Figura 63 – Diagrama *Box Plot* para a diferença de volume na validação do modelo



Fonte: Elaborada pelo autor

Na etapa de validação ainda, a configuração com K variável apresentou quatro eventos com resultados considerados bons e três eventos com resultados considerados insuficientes. A configuração com K constantes alcançou três eventos com resultados considerados boons, um considerado aceitável e três considerados inaceitáveis. A configuração com 2 K's constantes apresentou três eventos com resultados considerados bons, um considerado aceitável e três considerados aceitáveis. Sob essa ótica, portanto, a configuração com K variável apresentou melhor desempenho na etapa de validação do modelo.

Enfim, a modelagem com a configuração K variável teve desempenho relativamente superior. Embora essa configuração tenha obtido maior diferença de volume média na etapa de calibração, cerca de 46% a mais, alcançou maior valor de coeficiente NSE médio, juntamente com a configuração com 2 K's constantes nessa mesma etapa e, sobretudo, apresentou maior quantidade de eventos classificados como bons e maior valor médio do coeficiente NSE na etapa de validação do modelo. Sendo a única configuração a alcançar resultado considerado aceitável na etapa de validação de acordo a classificação adotada

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Monitoraram-se 21 eventos entre os dias 22/07/2015 e 18/08/2017. Desses, utilizaram-se 14 na etapa de calibração do modelo e 7 na etapa de validação. Os aspectos monitorados foram a precipitação (com média de 47,30 mm) a partir de um pluviômetro instalado próximo a biorretenção, a duração (com média igual a 15h 44 min) e os níveis da água (com média igual a 60,99 cm) no interior da biorretenção através de sensores de nível e a vazão de entrada (com vazão de pico média igual a 1,81 l/s) através de um vertedor instalado.

A configuração com K constante apresentou bons resultados para o coeficiente NSE médio e para diferença de volume média na calibração do modelo. Na validação, entretanto, os desempenhos para esses indicadores foram ruins, o coeficiente NSE médio foi classificado como inaceitáveis, embora 4 dos sete eventos tenham sido considerados como aceitáveis ou bons, e a diferença de volume média foi alta, valor igual a 62,37%. O valor de K médio otimizado, 36,07 mm/h, mostrou-se condizente com outros estudos realizados na biorretenção objeto de estudo dessa pesquisa.

A configuração com 2 K's constantes também alcançou resultados bons para o coeficiente NSE médio e para a diferença de volume média e, assim como a configuração com K constante, também apresentou resultados ruins na validação do modelo de acordo com esses dois indicadores de desempenho. Outro aspecto importante na calibração da configuração com 2 K's conste foi o fato do valor médio de K_1 , 27,93 mm/h, ter sido inferior ao valor médio de K_2 , 36,14 mm/h. Esperava-se que K_1 fosse maior que K_2 em virtude da saturação, entretanto, ficou constatado que a altura da lâmina da água também tem papel fundamental na velocidade de infiltração/percolação. Como não houve monitoramento da umidade do solo local, maiores conclusões sobre essa situação não foram possíveis.

Assim como as demais configurações, a configuração com K variável apresentou bons resultados para o coeficiente NSE médio e para a diferença de volume média, embora esse último indicador tenha sido alto em relação às demais configurações, 8,97%, cerca de 46% maior em média. Na validação, a diferença de volume média para essa configuração também foi alta, valor igual a 76,07%, mas quanto ao coeficiente NSE médio, foi a única a apresentar valor classificado como aceitável ao menos, 0,41. A configuração com K variável apresentou ainda a maior quantidade de evento considerados bons na validação do modelo, 4 dos 7 eventos.

Na etapa de calibração do modelo as três configurações apresentaram resultados bons, com desempenhos muito parecidos, destacando-se negativamente a configuração com K variável que apresentou diferença de volume relativamente alta. Na etapa de validação,

entretanto, a configuração com K variável apresentou melhores resultados, alcançando maior quantidade de eventos classificados como bons, além da obtenção do maior valor médio do coeficiente NSE. O desempenho do modelo nas configurações com K constante e 2 K constantes foram semelhantes, com valores ligeiramente superiores para essa última configuração, que também apresentou inesperadamente valor médio de K_1 otimizado inferior ao valor médio de K_2 otimizado.

O método de Puls aplicado a simulação do comportamento hidrológico do sistema de biorretenção foi adequado para as três configurações adotadas. Com base nos resultados, e do ponto de vista teórico, pode-se afirmar que a combinação de duas velocidades de infiltração/percolação variáveis (uma antes da saturação e outra após) provavelmente seria a configuração ideal, uma vez que se confirmou a hipótese de $K(h)$ e se verificou a importância de se considerar a saturação do solo (A configuração com 2 K 's constantes foi a que apresentou a maior quantidade de evento com melhor desempenho na calibração). Necessita-se ainda, entretanto, melhor investigação das velocidades de infiltração/percolação.

Embora não se tenha alcançado ganhos significativo do ponto de vista de resultados, avançou-se no entendimento da representação física do modelo com este trabalho, constatando-se a importância da adoção da velocidade de infiltração/percolação em função da altura da lâmina de água no interior da biorretenção, sobretudo. Tal constatação se deu especialmente na validação do modelo, onde a configuração com K variável se destacou.

Por fim, sugerem-se a estudos futuros, considerar outros tipos ou combinação de funções para a velocidade de infiltração/percolação a fim de se reduzir as diferenças de volume apresentadas nas etapas de calibração e validação do modelo, para a configuração com K variável, bem como monitorar a umidade do solo para um melhor entendimento dos seus efeitos na velocidade de infiltração/percolação, e conseqüentemente no desempenho do modelo.

REFERÊNCIAS

- ANGELINI SOBRINHA, L. **Monitoramento e modelagem de um poço de infiltração de águas pluviais em escala real e com filtro na tampa**. [Dissertação de mestrado]. Universidade Federal de São Carlos-UFSCar, São Carlos, São Paulo, 147 p, 2012.
- BAEK, S-S; LIGARAY, M; PARK, J, P. Hyun-Suk SHIN, H, S; KWON, Y; BRASCHER, J, T; CHO, K, H. Developing a hydrological simulation tool to design bioretention in a watershed. **Environmental Modelling & Software**. v 30, p 1-12, 2017.
- BAPTISTA, Márcio; NASCIMENTO, Nilo; BARRAUND, Sylvie. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 2 ed. Porto Alegre: Magia Editoração, 2011. 318 p.
- BARBASSA, A. P.; ANGELINI SOBRINHA, L.; MORUZZI, R. B. Poço de infiltração para controle de enchentes na fonte: avaliação das condições de operação e manutenção. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 91-107, 2014.
- BARBIRATO, G. M.; BARBOSA, R. V. R.; FERNANDES, E. F.; TELES, V. R.; OLIVEIRA, T. C. S. Análise do Clima Urbano de Maceió-AL: comparações entre diversas escalas. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, vol. 11. Rio de Janeiro, 2000
- BRAGA, R. M. B. **Estudo da remoção de poluentes de águas da drenagem urbana por um dispositivo de biorretenção**. 2017. 105 f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas–UFAL, Maceió, 2017
- BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2006. 120 p.
- CADORE, Regina Cera. **Critérios de dimensionamento de biorretenções**. 2016. 115 f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria –UFSM, Santa Maria, 2016.
- CARVALHO et al. Poços como estruturas de infiltração. In: Tópicos sobre infiltração. Série Geotecnia – UnB, v. 4., Brasília : Faculdade de Tecnologia, 2012.405-458.
- CARVALHO, E.T.L. **Avaliação de elementos de águas pluviais na Zona Norte de Goiânia**. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás. 2008.
- CARVALHO, E.T.L. **Avaliação geotécnica de poços de infiltração de águas pluviais**. Tese de doutorado em geotecnia Brasília/DF: junho/2013 universidade de Brasília- faculdade de tecnologia -departamento de engenharia civil. 2013.
- CLIAMTE-DATA.ORG. **Clima**: Maceió. Disponível em:<<https://pt.climate-data.org/locatio n/2193/>> . Acesso em: 18 maio 2018.
- CUDWORTH JÚNIOR, A. G. A water resources technical publication. In_____Flood Hydrology Manual. United States Government Printing Office. Denver, 1992. p. 133 — 175.

DANIEL JUNIOR, Jair João. **Avaliação de uma biorretenção como uma estrutura sustentável de drenagem urbana**. 2013. 115 f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria –UFSM, Santa Maria, 2013.

DAVIS, Allen P. et al. Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v.135, n.5, p.109-117, mar. 2009

DUSSAILLANT, A. R.; WU, H. C.; POTTER, K. W. Richards Equation Model of a Rain Garden. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 9, n. 3, p. 219-225, 2004. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2004\)9%3A3\(219\)](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9%3A3(219)). Acesso em: 21 dez. 2016.

ERICKSON, A. J.; WEISS, P. T.; GULLIVER, J. S. Optimizing stormwater treatment practices: a handbook of assessment and maintenance. New York; Springer, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-4624-8>.

FERREIRA, Lucas Tardelly Linz Mariz et al. Monitoramento de um dispositivo de biorretenção: análises preliminares. In: SIMPOSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 13., 2016, Aracaju. **Anais...Porto Alegre: ABRH**, 2016. p. 1-10

FERREIRA, Tays Santos. **Avaliação do comportamento hidrológico de poços de infiltração de águas pluviais sob diferentes concepções**. 2016. 1577 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos–UFScar, São Carlos, 2016

FERREIRA, Lucas Tardelly Linz Mariz. **Avaliação do funcionamento de um dispositivo de biorretenção: monitoramento e modelagem**. 2017. 97 f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas–UFAL, Maceió, 2017.

FLETCHER, T. D.; et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more - the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525-542, 2014.

GALBIATI, Adriana Farina. **Tratamento domiciliar de águas negras através de tanque de evapotranspiração**. 2009. 38 f. Dissertação (mestrado) – Saneamento e Recursos Hídricos. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul-UFMS, Campo Grande, 2009.

GOGATE, Nivedita G.; KALBAR, Pradip P.; RAVAL, Pratap M. Assessment of stormwater management options in urban contexts using multiple Attribute decision-Making. **Journal of Cleaner Production**, Knoxville, v.142, n.4, p.2016-2059, nov. 2016.

GREEN, W. H.; AMPT, G.A. Studies on soil physics-1: the flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, v.4, n.1, p. 1-24, 1911.

HATHAWAY, J.M.; BROWN, R.A.; FU, J.S.; HUNT, W.F.. Bioretention function under climate change scenarios in North Carolina, USA. **Journal of Hydrology**. v. 519. p 503-5011, 2014.

HOSKINS, Jay & Peterein, JASON. (2013). Case Study of St. Louis, Missouri: Comparison of Bioretention Performance to the Runoff Component of a Restored Water Balance. **Journal of Environmental Engineering**. v.139. p. 516-521, 2013

HWANG, Vincent et al. Fly ash-amended pervious concrete pavement followed by bamboo bioretention basin dracaena sanderiana for urban stormwater runoff control. **Construction and Building Materials**, Oxford, v.132, n.1, p.161-169 feb. 2017.

IMTEAZ, M. A.; AHSAN, A. RAHMAN, A. MEKANIK, F. Modelling stormwater treatment systems using MUSIC: Accuracy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 71, p. 15-21, 2013.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, EDUSP, 2005. 335p.

LIMA, Valter Cleber Guedes da Rocha. **Análise experimental e numérica de trincheira de infiltração em meio não saturado**. 2009. 176 f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos –EESC, São Carlos, 2009.

LIU et al. A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality: Needs and opportunities. **Science of the Total Environment**. V. 601-302, p. 580-593, dez. 2017.

LIU, J., SAMPLE, D.J., BELL, C., GUAN, Y., 2014. Review and Research Needs of Bioretention Used for the Treatment of Urban Stormwater. **Water** 6, 1069–1099

LUCAS, A.H.; BARBASSA, A.P.; MORUZZI, R.B. **Modelagem de um Sistema Filtro-Vala-Trincheira de Infiltração pelo Método de PULS Adaptado para Calibração de Parâmetros**. RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 18, n.2. Abr/Jun 2013, 225-236

MELO, Tássia dos anjos Tenório et al. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, Online, v.14, n.4, p.147-165, jul. 2014.

MELO, Tássia dos Anjos Tenório. **Jardim de chuva: Sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas**. 2011. 113 f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco–UFPE, Recife, 2011

MENEZES, M. C. **Construção de um dispositivo de um dispositivo de biorretenção no centro de tecnologia** – UFAL. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, UFAL, Maceió.

NETTO, G. J. S. **Desempenho de modelos de infiltração em sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande-MG**. 2011. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

OLIVEIRA, A. E. **Modelagem da infiltração de água no solo com o modelo Green-Ampt**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2015.

POMPÊO, Cesar. Augusto. Drenagem urbana sustentável. RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 5, n. 1, p. 15-23, 2000.

RODRIGUES, L.N.; PRUSKI, F.F. Otimização do desempenho de sistemas de irrigação do tipo pivô central com o uso da equação de Green-Ampt. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1977, Campina Grande. Resumo...Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. 1977. 1 CD-ROM.

ROSA, Altair. **Bioretention for diffuse pollution control in SUDS using experimental-adaptive approaches of ecohydrology**. 2016. 107 f. Doctoral Thesis, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos.

ROSENDO, A. A. **Avaliação de métodos e critérios para dimensionamento de dispositivos de biorretenção**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Alagoas, 2013.

ROY-POIRIER, A.; FILION AND, P; CHAMPAGNE, Y. An event-based hydrologic simulation model for bioretention systems. **Water Science & Technology**. v. 72, p. 1524-1533, 2015.

SANTOS, E. C.; SAMPAIO, C., L., S. A Pesca Artesanal na Comunidade de Fernão Velho, Maceió (Alagoas, Brasil): de Tradicional a Marginal. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 13, n. 4, p. 513-524, 2013.

SILVA, Cyntia Alexandrino; BUENO, Laura Machado de Mello. **Morfologia urbana e água: cenário desejável através do desenho urbano**. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 18. ENCONTRO DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, 3., 2013, Campinas. **Anais...**Campinas: PUC, 2013.

SOUZA Christopher Freire. **Mecanismos técnicos-institucionais para a sustentabilidade da drenagem urbana**. 2005 174 f. Dissertação (mestrado) – Recursos Hídricos e Saneamento. Universidade Federal do Rio Grande do Sul –UFRS, Porto Alegre, 2005.

SOUZA, Christopher Freire; CRUZ, Marcos A.S; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Adapting a rainfall-runoff model to simulate LID stormwater systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE, 12., 2011, Porto Alegre. **Anais...**Porto Alegre: International Water Association, 2011. p. 1-8.

SOUZA, Vladimir Caramori Borges. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração de escoamento superficial**. 2002. 117 f. Tese (doutorado) – Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul –UFRS, Porto Alegre, 2002.

SOUZA, Vladimir Caramori Borges. Gestão da drenagem urbana no Brasil: desafios para a sustentabilidade. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, Online, v.1, n.1, p.057-072, jul. 2013.

TECEDOR et al. Monitoramento e modelagem hidrológica de plano de infiltração construído em escala real. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 20 n.3 Porto Alegre jul./set. 2015 p. 594 – 604

TUCCI, C.E (Organizador). Hidrologia: ciência e aplicação. 2ºed. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS, 2001.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.5, p.892-898, Sep./Oct.1980.

APÊNDICE A – CÓDIGO COMPUTACIONAL DA CONFIGURAÇÃO COM K CONSTANTE

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import dados # "i" é o hidrograma de entrada e "observado" os níveis
observados
import informações
import statistics

K = 46

lamina_precipitada = informações.precipitação
largura = 1.625 # largura da biorretenção
comprimento = 4.086 # comprimento da biorretenção (m)
area = largura*comprimento # area da base (m²)
q = [] # lista para as vazões de saída
l = 0 # indice para as iterações do cálculo da vazão de saída
h = 0 # datum
nivel = 0 # valor inicial do nível d'água
hmax = 3 # altura do reservatório
dt = 60 # intervalo de tempo em segundos no diagrama de entrada
dh = 0.05 # intervalo de discretização para h
vazao = [] # lista para o armazenamento das vazões em função do nível
d'água
volume_vazão = [] # lista para a relação vazão x volume
nivelz = [] # nível teórico
por_areia = 0.3 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da areia
por_brita = 0.435 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da brita
por_terra = 0.5 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da terra
volume = [] # lista para armazenar os volume em função das cotas
cota = [] # lista para armazenar as cotas para cada volume
area_telhado= 173.8 #dissertação da Renata e Puls Fival do Tardelly
area_verde=(124.6+28.5-area)

def cota_vazao(h): # relação cota x vazão
    if h == 0:
        vazao_saida = 0
    else:
        vazao_saida = (K/3600000)*(area+2*h*(comprimento+largura))
    return vazao_saida

def cota_volume(h): # relação cota x volume
    if h <= 0.8:
        volume = area * h * por_brita
    elif 0.8 < h <= 1:
        volume = area * 0.8 * por_brita + area * (h - 0.8) * por_terra
    else:
        volume = area * 0.8 * por_brita + area * 0.2 * por_terra + area *
(h - 1)
    return volume

def vol_vaz(h): # relação vazão x volume
    d = 2*cota_volume(h)/dt+cota_vazao(h)
    return d

```

```

cotal=[]
while h <= hmax: #volume vazao x vazao
    cotal.append(h)
    vazao.append(cota_vazao(h)) # Utilização da relação cota x vazão
    volume_vazão.append(vol_vaz(h)) # relação vol_vazão para cada h
    h += dh

x = volume_vazão # relação vazão x volume para cada h
y = vazao # vazão de saída para cada h
z = cotal

def interl(y, z, valor): #interpolador para acahar a cota apartir da vazao
    for n in range(len(y)):
        if (n == 0) and valor < y[n] or (n == len(y)-1 and valor > y[n]):
            result = "Fora do intervalo"
        elif y[n]>valor>y[n-1]:
            result = ((z[n]-z[n-1])/(y[n]-y[n-1]))*(valor-y[n-1])+z[n-1]
    return result

h = 0

def inter(x, y, valor):
    for n in range(len(x)):
        if (n == 0) and valor < x[n] or (n == len(x)-1 and valor > x[n]):
            result = "Fora do intervalo"
        elif x[n]>valor>x[n-1]:
            result = ((y[n]-y[n-1])/(x[n]-x[n-1]))*(valor-x[n-1])+y[n-1]
    return result

while h <= hmax:
    cota.append(h)
    sd = cota_volume(h)
    volume.append(sd)
    h += dh
xi = volume
yi = cota

def nei(xi, yi, val):
    for o in range(len(xi)):
        if (o == 0) and val < xi[o] or (o == len(xi)-1 and val > xi[o]):
            cinn = "Fora do intervalo"
        elif xi[o] > val > xi[o-1]:
            cinn = ((yi[o]-yi[o-1])/(xi[o]-xi[o-1]))*(val-xi[o-1])+yi[o-1]
    return cinn

e = 2*cota_volume(nivel)/dt - cota_vazao(nivel) # 2S/dt-Q1
f = e+dados.i[l]+dados.i[l+1] # 2S2/dt+Q
g = inter(x, y, f)# Q
cin = f - g
leite = cin*60/2
h1 = f-2*g # 2S 2/dt-Q2
n=interl(y,z,g)
nivelz.append(n)
q.append(g)
while g >= 0:
    l += 1
    e = h1
    f = e+dados.i[l]+dados.i[l+1]
    g = inter(x, y, f)
    if g == 'Fora do intervalo':
        break

```

```

cin = f - g
leite = cin * 60 / 2
h1 = f-2*g
n = interl(y, z, g)
nivelz.append(n)
q.append(g)
if (l+2) >= len(dados.i):
    dados.i.append(0)
if len(nivelz) > informações.tempohmax:
    if g < 1e-6:
        break

plt.plot(dados.i, label="Vazões de entrada")
plt.plot(q, label="Vazões de saída")
plt.title('Hidrogramas', fontsize=18)
plt.xlabel('Tempo (min)', fontsize=14)
plt.ylabel('Vazão (m³/s)', fontsize=14)
plt.axis([-5, len(q)*1.1, 0, max(dados.i)*1.1])
plt.legend()
plt.show()

plt.plot(nivelz, label="Nível calculado") #niveis teóricos
plt.plot(dados.observado, label="Nível observado") # niveis observados
plt.title('Cotagramas', fontsize=18)
plt.xlabel('Tempo (min)', fontsize=14)
plt.ylabel('Nível (m)', fontsize=14)
plt.axis([-5, len(nivelz)*1.1, 0, max(dados.observado)*1.1])
plt.legend()
plt.show()

def cota_area(h): # relação cota x vazão
    areas=(comprimento*largura+2*h*(comprimento+largura))
    return areas

xgl=0
agl=[]
while xgl < len(dados.observado):
    dfdl=cota_area(dados.observado[xgl])
    agl.append(dfdl)
    xgl=xgl+1
sdl=statistics.mean(agl)

listak=[]
listah=[]
def k():
    ini=0
    fim=informações.tempofim
    while ini<fim:
        if (len(dados.i) < len(dados.observado)):
            dados.i.append(0)
            volumes=cota_volume(dados.observado[ini])-
cota_volume(dados.observado[ini+1])+dados.i[ini+1]*60

arem=(cota_area(dados.observado[ini])+cota_area(dados.observado[ini+1]))/2
jk=volumes/arem/60
ak=jk*3600000
listak.append(ak)
listah.append(dados.observado[ini])
ini=ini+1
am=statistics.mean(listak)
print ("\nK observado: %.2f" % am)

```

```

dur=informações.tempofim

mo = np.mean(dados.observado)
num = []
den = []
p = 1
while p <= len(nivelz):
    if len(dados.observado)<len(nivelz):
        dados.observado.append(0)
    if len(nivelz)<len(dados.observado):
        nivelz.append(0)
    kk = (dados.observado[p-1]-nivelz[p-1])**2
    num.append(kk)
    rs = ((dados.observado[p-1]-mo)**2)
    den.append(rs)
    p += 1
ns = 1-sum(num)/sum(den)

vazao_pico=max(dados.i)*1000
print("\nVazão de pico(l/s): %.2f" %vazao_pico)

volume_entrada=[]
b=0
for x in dados.i:
    b=x*60*1000
    volume_entrada.append(b)
a=sum(volume_entrada)
print("\nVolume de entrada(l): %.3f" % a)

volum_saida=[]
bq=0
for xq in q:
    bq=xq*60
    volum_saida.append(bq)
aq=sum(volum_saida)*1000
print("\nVolume de saída(l): %.3f"% aq)

vol_telhado = lamina_precipitada/1000*area_telhado*1000
c=a/vol_telhado

print("\nCoeficiente de escoamento telhado: %.2f" % c)

print((" \nDuração(min): %.f" % dur))
k()
print("\nNível máximo: %.3f" %max(dados.observado))

CN=74
S=25400/CN-254
ia=0.2*S
if lamina_precipitada>ia:
    pefav=(lamina_precipitada-ia)**2/(lamina_precipitada-ia+S)
else:
    print("\nERRO: P < ia")

Peft=lamina_precipitada*c
c_g = pefav/lamina_precipitada
print("\nCoeficiente de escoamento da grama: %.6f" %c_g)
vol_grama=pefav/1000*area_verde*1000+lamina_precipitada/1000*area*1000
v_total=a+vol_grama
ft=v_total/a

```

```
print("\nFator: %.2f" %ft)
print("\nNash-Sutcliffe: %.3f" % ns)
deltav=((sum(nivelz)-sum(dados.observado))/sum(dados.observado))*100
print("\nErro de volume percentual geral: %.2f" % deltav)
print("\nNível observado:", dados.observado)
print("\nNível calculado:", nivelz)
```

APÊNDICE B – CÓDIGO COMPUTACIONAL DA CONFIGURAÇÃO COM K VARIÁVEL

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import dados # "i" é o hidrograma de entrada e "observado" os níveis
observados
import informações
import statistics
import pandas as pd

a=87
b=12

largura = 1.625 # largura da biorretenção
comprimento = 4.086 # comprimento da biorretenção (m)
area = largura * comprimento # area da base (m²)
q = [] # lista para as vazões de saída
l = 0 # indice para as iterações do cálculo da vazão de saída
h = 0 # datum
# nivel = max(dados.observado) # valor inicial do nível d'água
nivel = 0
hmax = 2 # altura do reservatório
dt = 60 # intervalo de tempo em segundos no diagrama de entrada
dh = informações.dh # intervalo de discretização para h
vazao = [] # lista para o armazenamento das vazões em função do nível
d'água
volume_vazão = [] # lista para a relação vazão x volume
nivelz1 = [] # nível teórico
por_areia = 0.3 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da areia
por_brita = 0.435 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da brita
por_terra = 0.5 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da terra
volume = [] # lista para armazenar os volume em função das cotas
cota = [] # lista para armazenar as cotas para cada volume

va = dados.i[:]
ob = dados.observado[:]

zz = [] # vazão de entrada
zozo = [] # nível observado
nn = 0
while nn < len(dados.i):
    zz.append(dados.i[nn])
    nn = nn + 1

nns = 0
while nns < len(dados.observado):
    zozo.append(dados.observado[nns])
    nns = nns + 1

def k(h):
    res = a * h + b
    return res

```

```

def cota_vazao(h): # relação cota x vazão]
    if h == 0:
        vazao_saida = 0
    else:
        nt=k(h)
        if nt <= 0:
            vazao_saida = 0
        else:
            vazao_saida = k(h) * 1/3600000 * (area + 2 * h * (comprimento +
largura))
    return vazao_saida

def cota_volume(h): # relação cota x volume
    if h <= 0.8:
        volume = area * h * por_brita
    elif 0.8 < h <= 1:
        volume = area * 0.8 * por_brita + area * (h - 0.8) * por_terra
    else:
        volume = area * 0.8 * por_brita + area * 0.2 * por_terra + area *
(h - 1)
    return volume

def vol_vaz(h): # relação vazão x volume
    d = 2 * cota_volume(h) / dt + cota_vazao(h)
    return d

cotal = []
while h <= hmax: # volume vazao x vazao
    cotal.append(h)
    cv = cota_vazao(h)
    vazao.append(cv) # Utilização da relação cota x vazão
    volume_vazão.append(vol_vaz(h)) # relação vol_vazão para cada h
    h += dh

x = volume_vazão # relação vazão x volume para cada h
y = vazao # vazão de saída para cada h
z = cotal

def inter1(y, z, valor): # interpolador para achar a cota a partir da
vazao
    for n in range(len(y)):
        if y[n]==0 and y[n-1]==0:
            result=0
        elif (n == 0) and valor < y[n] or (n == len(y) - 1 and valor >
y[n]):
            result = "Fora do intervalo"
        elif y[n] >= valor >= y[n - 1]:
            result = ((z[n] - z[n - 1]) / (y[n] - y[n - 1])) * (valor - y[n
- 1]) + z[n - 1]
    return result

h = 0

def inter(xp, yp, valorr): # interpolador para achar a vazao a partir do
termo vaz_vol
    for nw in range(len(xp)):
        if (nw == 0) and valorr < xp[nw] or (nw == len(xp) - 1 and valorr >
xp[nw]):
            result = "Fora do intervalo"
        elif xp[nw] >= valorr >= xp[nw - 1]:

```



```

        result = ((yp[nw] - yp[nw - 1]) / (xp[nw] - xp[nw - 1])) *
(valorr - xp[nw - 1]) + yp[nw - 1]
        return result

while h <= hmax:
    cota.append(h)
    sd = cota_volume(h)
    volume.append(sd)
    h += dh
xi = volume
yi = cota

h = 0

def nei(xi, yi, val):
    for o in range(len(xi)):
        if (o == 0) and val < xi[o] or (o == len(xi) - 1 and val > xi[o]):
            cinn = "Fora do intervalo"
        elif xi[o] > val > xi[o - 1]:
            cinn = ((yi[o] - yi[o - 1]) / (xi[o] - xi[o - 1])) * (val -
xi[o - 1]) + yi[o - 1]
        return cinn

e = 2 * cota_volume(nivel) / dt - cota_vazao(nivel) # 2S/dt-Q1
f = e + zz[l] + zz[l + 1] # 2S2/dt+Q
g = inter(x, y, f) # Q
cin = f - g
leite = cin * 60 / 2 # volume
h1 = f - 2 * g # 2S 2/dt-Q2
n = interl(y, z, g)
nivelz1.append(n)
q.append(g)
while g >= 0:
    l += 1
    e = h1
    f = e + zz[l] + zz[l + 1]
    g = inter(x, y, f)
    cin = f - g
    leite = cin * 60 / 2
    h1 = f - 2 * g
    n = interl(y, z, g)
    nivelz1.append(n)
    q.append(g)
    if (l + 2) >= (len(zz)):
        zz.append(0)
    if len(nivelz1) > informacoes.tempohmax:
        if g < 1e-6:
            break

mo = np.mean(zozo)
num = []
den = []
p = 1
while p <= len(zozo):
    if len(zozo) < len(nivelz1):
        zozo.append(0)
    if len(nivelz1) < len(zozo):
        nivelz1.append(0)
    kk = (zozo[p - 1] - nivelz1[p - 1]) ** 2
    num.append(kk)
    rs = ((zozo[p - 1]) - mo) ** 2

```

```

    den.append(rs)
    p += 1
ns2 = 1 - sum(num) / sum(den)

def cota_area(h): # relação cota x vazão
    areas=(comprimento*largura+2*h*(comprimento+largura))
    return areas

xgl=0
agl=[]
while xgl < len(dados.observado):
    dfdl=cota_area(dados.observado[xgl])
    agl.append(dfdl)
    xgl=xgl+1
sdl=statistics.mean(agl)

plt.plot(dados.i, label="Vazões de entrada")
plt.plot(q, label="Vazões de saída")
plt.title('Hidrogramas', fontsize=18)
plt.xlabel('Tempo (min)', fontsize=14)
plt.ylabel('Vazão (m³/s)', fontsize=14)
plt.axis([-5, len(q)*1.1, 0, max(dados.i)*1.1])
plt.legend()
plt.show()

plt.plot(nivelz1, label="Nível calculado") #níveis teóricos
plt.plot(dados.observado, label="Nível observado") # níveis observados
plt.title('Cotagramas', fontsize=18)
plt.xlabel('Tempo (min)', fontsize=14)
plt.ylabel('Nível (m)', fontsize=14)
plt.axis([-5, len(nivelz1)*1.1, 0, max(dados.observado)*1.1])
plt.legend()
plt.show()

xg=135
ag=[]
while xg < len(dados.observado):
    dfd=cota_area(dados.observado[xg])
    ag.append(dfd)
    xg=xg+1
sd=statistics.mean(ag)

listak=[]
listah=[]
def k():
    ini=informações.tempohmax
    fim=informações.tempofim
    while ini<fim:
        if ((len(dados.i))< len(dados.observado)):
            dados.i.append(0)
            volumes=cota_volume(dados.observado[ini])-
cota_volume(dados.observado[ini+1])+dados.i[ini+1]*60

arem=(cota_area(dados.observado[ini])+cota_area(dados.observado[ini+1]))/2
jk=volumes/arem/60
ak=jk*3600000
listak.append(ak)
listah.append(dados.observado[ini])
ini=ini+1
am=statistics.mean(listak)

```

```

    print("\nK medio observado na recessão: %.2f" % am)

    print("\nLista de h na recessao:", listah)
    print("\nLista de K observado na recessao:", listak)

vazao_pico=max(dados.i)*1000
print("\nVazão de pico(l/s): %.2f" %vazao_pico)

volume_entrada=[]
b=0
for x in dados.i:
    b=x*60*1000
    volume_entrada.append(b)
a=sum(volume_entrada)
print("\nVolume de entrada(l): %.3f" % a)

volum_saida=[]
bq=0
for xq in q:
    bq=xq*60
    volum_saida.append(bq)
aq=sum(volum_saida)*1000
print("\nVolume de saída(l): %.3f"% aq)
print("\nNash-Sutcliffe: %.3f" % ns2)

deltav=((sum(nivelz1)-sum(dados.observado))/sum(dados.observado))*100
print("\nErro de volume percentual geral: %.2f" % deltav)
k()
print("\nNível observado:", dados.observado)
print("\nNível calculado:", nivelz1)

```

APÊNDICE C – CÓDIGO COMPUTACIONAL DA CONFIGURAÇÃO COM 2 K's CONSTANTES

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import dados # "i" é o hidrograma de entrada e "observado" os níveis
observados
import informações
import statistics

k1 =21
k2 =52

dh = informações.dh # intervalo de discretização para h
largura = 1.625 # largura da biorretenção
comprimento = 4.086 # comprimento da biorretenção (m)
area = largura*comprimento # area da base (m²)
q = [] # lista para as vazões de saída
l = 0 # indice para as iterações do cálculo da vazão de saída
h = 0 # datum
nivel = 0 # valor inicial do nível d'água
hmax = 3 # altura do reservatório
dt = 60 # intervalo de tempo em segundos no diagrama de entrada
vazao = [] # lista para o armazenamento das vazões em função do nível
d'água
volume_vazão = [] # lista para a relação vazão x volume
nivelz = [] # nível teórico
por_areia = 0.3 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da areia
por_brita = 0.435 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da brita
por_terra = 0.5 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da terra
volume = [] # lista para armazenar os volume em função das cotas
cota = [] # lista para armazenar as cotas para cada volume

zl=[] #vazão de entrada
zo=[] #nível observado
b=0

while len(dados.i)<len(dados.observado):
    dados.i.append(0)

while b < informações.saturação:
    zl.append(dados.i[b])
    zo.append(dados.observado[b])
    b=b+1

def cota_vazao(h): # relação cota x vazão
    if h == 0:
        vazao_saida = 0
    else:
        vazao_saida = (k1/3600000)*(area+2*h*(comprimento+largura))
    return vazao_saida

def cota_volume(h): # relação cota x volume
    if h <= 0.8:
        volume = area * h * por_brita
    elif 0.8 < h <= 1:

```

```

        volume = area * 0.8 * por_brita + area * (h - 0.8) * por_terra
    else:
        volume = area * 0.8 * por_brita + area * 0.2 * por_terra + area *
(h-1)
    return volume

def vol_vaz(h): # relação vazão x volume
    d = 2*cota_volume(h)/dt+cota_vazao(h)
    return d

cotal=[]
while h <= hmax: #volume vazao x vazao
    cotal.append(h)
    vazao.append(cota_vazao(h)) # Utilização da relação cota x vazão
    volume_vazão.append(vol_vaz(h)) # relação vol_vazão para cada h
    h += dh

x = volume_vazão # relação vazão x volume para cada h
y = vazao # vazão de saída para cada h
z = cotal

def inter1(y, z, valor): #interpolador para achar a cota apartir da vazao
    for n in range(len(y)):
        if (n == 0) and valor < y[n] or (n == len(y)-1 and valor > y[n]):
            result = "Fora do intervalo"
        elif y[n]>valor>y[n-1]:
            result = ((z[n]-z[n-1])/(y[n]-y[n-1]))*(valor-y[n-1])+z[n-1]
    return result

h = 0

def inter(xp, yp, valorr): #interpolado para achar a vazão na relação
vazao x vazão_volume
    for n in range(len(xp)):
        if (n == 0) and valorr < xp[n] or (n == len(xp)-1 and valorr >
xp[n]):
            result = "Fora do intervalo"
        elif xp[n]>valorr>xp[n-1]:
            result = ((yp[n]-yp[n-1])/(xp[n]-xp[n-1]))*(valorr-xp[n-
1])+yp[n-1]
    return result

while h <= hmax:
    cota.append(h)
    sd = cota_volume(h)
    volume.append(sd)
    h += dh
xi = volume
yi = cota

def cota_area(h): # relação cota x vazão
    areas=(comprimento*largura+2*h*(comprimento+largura))
    return areas

h=0

def nei(xi, yi, val): #interpolador para achar a cota a parptir do volume
    for o in range(len(xi)):
        if (o == 0) and val < xi[o] or (o == len(xi)-1 and val> xi[o]):
            cinn = "Fora do intervalo"
        elif xi[o] > val > xi[o-1]:

```

```

        cinn = ((yi[o]-yi[o-1])/(xi[o]-xi[o-1]))*(val-xi[o-1])+yi[o-1]
    return cinn

e = 2*cota_volume(nivel)/dt - cota_vazao(nivel) # 2S/dt-Q1
f = e+z1[l]+z1[l+1] # 2S2/dt+Q
g = inter(x, y, f) # Q
cin = f - g
leite = cin*60/2
h1 = f-2*g # 2S 2/dt-Q2
n=inter1(y,z,g)
nivelz.append(n)
q.append(g)
while g >= 0:
    l += 1
    e = h1
    f = e+z1[l]+z1[l+1]
    g = inter(x, y, f)
    if g == 'Fora do intervalo':
        break
    cin = f - g
    leite = cin * 60 / 2
    h1 = f-2*g
    n = inter1(y, z, g)
    nivelz.append(n)
    q.append(g)
    if (l+2) >= len(z1):
        z1.append(0)
    if len(nivelz) > informacoes.tempohmax:
        if g < 1e-6:
            break
    if len(nivelz)>=len(z0):
        break

mo = np.mean(z0)
num1 = []
den1 = []
p1 = 1

while p1 <len(z0):
    if len(z0)>len(nivelz):
        nivelz.append(0)
    kk = (zo[p1-1]-nivelz[p1-1])**2
    num1.append(kk)
    rs = ((zo[p1-1])-mo)**2
    den1.append(rs)
    p1 += 1

vol_ascensão = []
for hn in z1:
    zx = hn * 60
    vol_ascensão.append(zx)
zxxxz=sum(vol_ascensão)*1000

ghh=dados.observado[informacoes.saturação]
if ghh <= 0.8:
    volumel = area * ghh * por_brita
elif 0.8 < ghh <= 1:
    volumel = area * 0.8 * por_brita + area * (ghh - 0.8) * por_terra
else:
    volumel = area * 0.8 * por_brita + area * 0.2 * por_terra + area * (ghh
- 1)

```

```

print("\nNível máximo: %.2f" % max(dados.observado))
print("\nNível no ponto de saturação: %.2f" % ghh)
Vol_obs=volumel*1000
print("\nVolume observado no ponto de saturação: %.2f" % Vol_obs)
print("\nVolume que entrou até a saturação: %.2f" % zxxxz)
dif=-Vol_obs+zxxxz

print("\nVolume que deveria ter saído até a saturação: %.2f" %dif)

vs=[]
for km in q:
    asn = km*60
    vs.append(asn)
vss=sum(vs)*1000

print("\nVolume que saiu ate a saturação: %.2f" % vss)
lit=vss-dif
print("\nDiferença de balanço em litros ate a saturação: %.2f" %abs(lit))
errov=lit/dif
print("\nErro volume armazenado percentual ate a saturação: %.2f" %
abs(errov*100))

cv=[]
for gh in range(0, len(nivelz)):
    ag=nivelz[gh]-zo[gh]
    gh=gh+1
    cv.append(ag)
lk=sum(cv)

absl=lk*area*1000*por_brita

ns1 = 1-sum(num1)/sum(den1)
print("\nNSE_1: %.3f" % ns1)

plt.plot(nivelz, label="Nível calculado") #niveis teóricos
plt.plot(zo, label="Nível observado") # niveis observados
plt.title('Cotagramas', fontsize=18)
plt.xlabel('Tempo (min)', fontsize=14)
plt.ylabel('Nível (m)', fontsize=14)
plt.axis([-5, len(nivelz)*1.1, 0, max(zo)*1.2])
plt.legend()
plt.show()

#####
#####

largura = 1.625 # largura da biorretenção
comprimento = 4.086 # comprimento da biorretenção (m)
area = largura*comprimento # area da base (m²)
qs = [] # lista para as vazões de saída
l = 0 # indice para as iterações do cálculo da vazão de saída
h = 0 # datum
#nivel=max(zo)
#nivel=max(dados.observado)
nivel=nivelz[-1]
#print("\nnivel máximo: %.2f" %nivel)
hmax = 3 # altura do reservatório

```

```

dt = 60 # intervalo de tempo em segundos no diagrama de entrada
#dh = 0.05 # intervalo de discretização para h
vazao = [] # lista para o armazenamento das vazões em função do nível
d'água
volume_vazão = [] # lista para a relação vazão x volume
nivelz1 = [] # nível teórico
por_areia = 0.3 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da areia
por_brita = 0.435 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da brita
por_terra = 0.5 # porcentual a acrescentar no volume em virtude da
porosidade da terra
volume = [] # lista para armazenar os volume em função das cotas
cota = [] # lista para armazenar as cotas para cada volume

zz=[] #vazão de entrada
zozo=[] #nível observado
nn=informações.saturação
while nn<len(dados.i):
    zz.append(dados.i[nn])
    nn=nn+1

nns=informações.saturação
while nns<len(dados.observado):
    zozo.append(dados.observado[nns])
    nns=nns+1

def cota_vazao(h): # relação cota x vazão
    if h == 0:
        vazao_saida = 0
    else:
        vazao_saida = (k2/3600000)*(area+2*h*(comprimento+largura))
    return vazao_saida

def cota_volume(h): # relação cota x volume
    if h <= 0.8:
        volume = area * h * por_brita
    elif 0.8 < h <= 1:
        volume = area * 0.8 * por_brita + area * (h - 0.8) * por_terra
    else:
        volume = area * 0.8 * por_brita + area * 0.2 * por_terra + area *
(h-1)
    return volume

def vol_vaz(h): # relação vazão x volume
    d = 2*cota_volume(h)/dt+cota_vazao(h)
    return d

cotal=[]
while h <= hmax: #volume vazao x vazao
    cotal.append(h)
    vazao.append(cota_vazao(h)) # Utilização da relação cota x vazão
    volume_vazão.append(vol_vaz(h)) # relação vol_vazão para cada h
    h += dh

x = volume_vazão # relação vazão x volume para cada h
y = vazao # vazão de saída para cada h
z=cotal

def interl(y, z, valor):
    for n in range(len(y)):

```



```

    if (n == 0) and valor < y[n] or (n == len(y)-1 and valor > y[n]):
        result = "Fora do intervalo"
    elif y[n]>=valor>=y[n-1]:
        result = ((z[n]-z[n-1])/(y[n]-y[n-1]))*(valor-y[n-1])+z[n-1]
    return result

h = 0

def inter(x, y, valor):
    for n in range(len(x)):
        if (n == 0) and valor < x[n] or (n == len(x)-1 and valor > x[n]):
            result = "Fora do intervalo"
        elif x[n]>=valor>=x[n-1]:
            result = ((y[n]-y[n-1])/(x[n]-x[n-1]))*(valor-x[n-1])+y[n-1]
    return result

while h <= hmax:
    cota.append(h)
    sd = cota_volume(h)
    volume.append(sd)
    h += dh
xi = volume
yi = cota

def nei(xi, yi, val):
    for o in range(len(xi)):
        if (o == 0) and val < xi[o] or (o == len(xi)-1 and val > xi[o]):
            cinn = "Fora do intervalo"
        elif xi[o] >= val >= xi[o-1]:
            cinn = ((yi[o]-yi[o-1])/(xi[o]-xi[o-1]))*(val-xi[o-1])+yi[o-1]
    return cinn

e = 2*cota_volume(nivel)/dt - cota_vazao(nivel) # 2S/dt-Q1
if e < 0:
    e=0
f = e+zz[l]+zz[l+1] # 2S2/dt+Q
g = inter(x, y, f) # Q
cin = f - g
leite = cin * 60 / 2
h1 = f-2*g
n=inter1(y,z,g)
nivelz1.append(n)
qs.append(g)
while g >= 0:
    l += 1
    e = h1
    f = e+zz[l]+zz[l+1]
    g = inter(x, y, f)
    if g == 'Fora do intervalo':
        break
    cin = f - g
    leite = cin * 60 / 2
    h1 = f-2*g
    n = inter1(y, z, g)
    nivelz1.append(n)
    qs.append(g)
    if (l+2) >= len(zz):
        zz.append(0)
    if len(nivelz1) > informações.tempohmax:
        if g < 1e-6:
            break

```

```

mo = np.mean(zozo)
num = []
den = []
p = 1

while p <=len(zozo):
    if len(zozo)<len(zozo):
        zozo.append(0)
    if len(nivelz1)<len(zozo):
        nivelz1.append(0)

    kk = (zozo[p-1]-nivelz1[p-1])**2
    num.append(kk)
    rs = ((zozo[p-1])-mo)**2
    den.append(rs)
    p += 1
ns2 = 1-sum(num)/sum(den)
print("\nNSE_2: %.3f" % ns2)

plt.plot(nivelz1, label="Nível calculado") #niveis teóricos
plt.plot(zozo, label="Nível observado") # niveis observados
plt.title('Cotagramas', fontsize=18)
plt.xlabel('Tempo (min)', fontsize=14)
plt.ylabel('Nível (m)', fontsize=14)
plt.axis([-50, len(nivelz1)*1.1, 0, max(zozo)*1.5])
plt.legend()
plt.show()

nivel_calculado=nivelz+nivelz1

plt.plot(nivel_calculado, label="Nível calculado") #niveis teóricos
plt.plot(dados.observado, label="Nível observado") # niveis observados
plt.title('Cotagramas', fontsize=18)
plt.xlabel('Tempo (min)', fontsize=14)
plt.ylabel('Nível (m)', fontsize=14)
plt.axis([-5, len(nivel_calculado)*1.1, 0, max(nivel_calculado)*1.1])
plt.legend()
plt.show()

mo = np.mean(dados.observado)
num = []
den = []
p = 1
while p <=len(nivel_calculado):
    if len(dados.observado)<len(nivel_calculado):
        dados.observado.append(0)
    if len(nivel_calculado)<len(dados.observado):
        nivel_calculado.append(0)
    kk = (dados.observado[p-1]-nivel_calculado[p-1])**2
    num.append(kk)
    rs = ((dados.observado[p-1])-mo)**2
    den.append(rs)
    p += 1
ns = 1-sum(num)/sum(den)

qt=q+qs
zzt=z1+zz

plt.plot((zzt), label="Vazao de entrada") #niveis teóricos
plt.plot(qt, label="Vazao de saida") # niveis observados

```

```

plt.title('Hidrograma', fontsize=18)
plt.xlabel('Tempo (min)', fontsize=14)
plt.ylabel('Vazao (m³/s)', fontsize=14)
plt.axis([-5, len(qt)*1.1, 0, max(zzt)*1.1])
plt.legend()
plt.show()

vol_ascending = []

zzt=zz+z1
for hn in zzt:
    zx = hn * 60
    vol_ascending.append(zx)
zzxz=sum(vol_ascending)*1000

vs=[]
for km in qt:
    asn = km*60
    vs.append(asn)
vssn=sum(vs)*1000

print("\nNSE_FINAL: %.3f" % ns)
deltav=((sum(nivel_calculado)-
sum(dados.observado))/sum(dados.observado))*100
print("\nErro de volume percentual geral: %.2f" % deltav)

voles=[]
for das in zz:
    volz=das*60*1000
    voles.append(volz)
kon=sum(voles)

listaka=[]
listaha=[]
def ka():
    ini=0
    fim=informações.saturação
    while ini<fim:
        if (len(dados.i) < len(dados.observado)):
            dados.i.append(0)
            volumes=cota_volume(dados.observado[ini])-
cota_volume(dados.observado[ini+1])+dados.i[ini+1]*60

arem=(cota_area(dados.observado[ini])+cota_area(dados.observado[ini+1]))/2
jka=volumes/arem/60
aka=jka*3600000
listaka.append(aka)
listaha.append(dados.observado[ini])
ini=ini+1
ama=statistics.mean(listaka)
print("\nK1 observado: %.2f" % ama)

ka()

listak=[]
listah=[]
def k():
    ini=(informações.saturação)

```

```

fim=informações.tempofim
while ini<fim:
    if (len(dados.i) < len(dados.observado)):
        dados.i.append(0)
        volumes=cota_volume(dados.observado[ini])-
cota_volume(dados.observado[ini+1])+dados.i[ini+1]*60

arem=(cota_area(dados.observado[ini])+cota_area(dados.observado[ini+1]))/2
jk=volumes/arem/60
ak=jk*3600000
listak.append(ak)
listah.append(dados.observado[ini])
ini=ini+1
am=statistics.mean(listak)
print("\nK2 observado: %.2f" % am)

k()

bgd=[]
for jks in qs:
    ahg=jks*60*1000
    bgd.append(ahg)

print("\nVolume que deveria ter saído na parte saturada %.2f" %
(cota_volume(dados.observado[informações.saturação])*1000+kon))
print("\nVolume que saiu na parte saturada: %.2f" % sum(bgd))
print("\nDiferença do balanço em litros na parte saturada: %.2f"
%abs((cota_volume(dados.observado[informações.saturação])*1000+kon)-
sum(bgd)))
print("\nVolume que entrou total: %.2f" % zxxxz)
print("\nVolume que saiu total: %.2f" % vssn)
print("\nVolume que saiu total_2: %.2f" %(sum(bgd)+vss))
print("\nNível calculado:",nívelz+nívelz1)

```