



Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Recursos Naturais da Amazônia

## **MODELAGEM CHUVA-VAZÃO-PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS VIA PROBLEMAS INVERSOS**

**Cindy Torres Falcón**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientadores: Prof. Dr. Claudio José Cavalcante Blanco

Prof. Dr. Diego Cardoso Estumano

Belém, PA - BRASIL

Outubro de 2023

## “MODELAGEM CHUVA-VAZÃO-PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS VIA PROBLEMAS INVERSOS”

**Cindy Torres Falcón**

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA - PRODERNA/ITEC/UFPA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:



---

Prof. Dr. Claudio José Cavalcante Blanco  
(Orientador – PRODERNA/UFPA)



---

Prof. Dr. Diego Cardoso Estumano  
(Coorientador – ICB/UFPA)



---

Prof. Dr. Emanuel Negrão Macedo  
(Membro Interno – PRODERNA/UFPA)



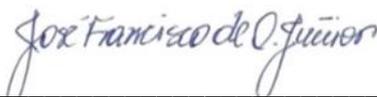
---

Prof. Dr. Jerson Rogério Pinheiro Vaz  
(Membro Interno – PRODERNA/UFPA)



---

Prof. Dr. Nelio Moura de Figueiredo  
(Membro Externo ao Programa – FENAV/UFPA)



---

Prof. Dr. José Francisco de Oliveira Júnior  
(Examinador Externo à Instituição – ICAT/UFAL)

Belém, PA - Brasil  
Outubro de 2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

F181m Falcón, Cindy Torres.  
Modelagem Chuva-Vazão-Produção de Sedimentos via  
Problemas Inversos / Cindy Torres Falcón. — 2023.  
105 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Claudio José Cavalcante Blanco  
Coorientador(a): Prof. Dr. Diego Cardoso Estumano  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Recursos Naturais na Amazônia, Belém, 2023.

1. Modelagem-previsão. 2. lâmina de água. 3. produção de  
sedimento. 4. Kineros2. 5. problemas inversos. I. Título.

CDD 333.7098115

---

Dedico a minha mãe, Melita Bertha Falcón Babilonia, na memória dela, a meu pai, Alfredo Torres Sajamí, aos meus irmãos, Jesús Torres Falcón, Ingrid Fabiola Vargas Falcón, a minha família toda, Clara, Elita, Sofia, Emma, Clavelly, Quique, Elena e prezados amigos, por todo o carinho, apoio e orações.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, toda honra e toda glória. Agradeço a Deus por me guiar e permitir que eu pudesse chegar à conclusão deste sonho de criança, da minha infância. Graças Deus por tudo.

Aos meus pais, Melita Bertha Falcón Babilonia (in memoriam dela) e Alfredo Torres Sajamí. Minha eterna gratidão para minha mãe, quem me fez prometer nunca desistir dos meus sonhos e meus objetivos na vida.

Aos meus irmãos, minha fortaleza para continuar e não desistir neste longo caminho, vocês sempre confiaram em mim e me deram todo o apoio e amor que eu precisei.

Aos meus orientadores, Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, pela oportunidade que me deu de evoluir como pessoa e profissional, acreditando em mim, pela paciência e compreensão, pelos conselhos e suas orientações únicas; Prof. Diego Cardoso Estumano, pela aceitação como orientada no meu início difícil, pela paciência, orientações e palavras de fortaleza que me deu. Os senhores têm meu respeito, admiração e eterna gratidão. Muito obrigada por confiarem e nunca desistirem de mim.

Aos meus padrinhos, Quique Lazo e Elena Campos, pelo apoio e amor. Sempre acreditaram em mim.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado.

À Coordenação Geral do Grupo de Cooperação Internacional de Universidades Brasileiras - Programa GCUB-Mob (antigo PAEC-OEA) pela oportunidade concedida de realizar meu doutorado no Brasil.

À querida professora Iracilda Sampaio, pelo apoio e acolhida no Brasil. Muito obrigada por tudo e pela confiança em nós, os estrangeiros.

As minhas melhores amigas da infância e graduação, minhas irmãs da vida, Verónica Guardia, Thalia Lazo, Maricela del Águila, Adriana Moreno, que sempre torceram por mim, e estiveram presentes sempre que precisei ao longo de minha vida. Com vocês compartilhei meus melhores (e piores) momentos e experiências. Muito obrigada pelo apoio, amor e palavras de motivação e conforto.

A todos meus colegas e grandes amigos da pós-graduação, Marina Martins, Adrielle dos Santos, Patrícia Holanda, Glênea Costa, Ana Karla Lobato, Amanda Soares, Sanny Assis, Radijha, Ruan Sobral, Eduardo de Souza, Bosco Brito. Vocês são daquelas pessoas especialmente maravilhosas. Nunca vou esquecer da sala 307 do PPGITEC. Muito obrigada.

Agradecimento especial aos meus amigos maravilhosos e colegas brasileiros: Vanessa Santos, Laila Rover Santana, Evanice Pinheiro, Josias Cruz, Leonardo Melo. Obrigada pelas valiosas contribuições e amizade sincera, pelas piadas e pelos momentos únicos vividos com vocês. São pessoas muito especiais que levarei sempre no meu coração.

Á querida amiga Syglea Vieira, por todo suporte que me deu durante essa jornada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia - PRODERNA. Muito obrigada.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Água, Energia e Sustentabilidade da Amazônia (GAES) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pela experiência de intercâmbio de ideias e pelo apoio direta e indireta.

A todos que não foram citados, mas que também contribuíram direta e indiretamente para que eu concluísse o doutorado, o meu mais sincero agradecimento. Muito obrigada!

Um perdedor nunca ganha e  
um vencedor nunca desiste.

(Napoleón Hill)

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (Dr. Eng.).

## **MODELAGEM CHUVA-VAZÃO-PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS VIA PROBLEMAS INVERSOS**

O desenvolvimento de modelos matemáticos e métodos diretos têm possibilitado a predição de fenômenos hidrológicos, como, por exemplo, chuva-vazão-produção de sedimentos. Com intuito de complementar o modelo de simulação, os problemas inversos podem ser utilizados para determinar as propriedades desses fenômenos e estimar os parâmetros, os quais não podem ser medidos diretamente. Assim, este estudo foi desenvolvido em uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia com dados de precipitação e parâmetros estimados através do modelo Kíneros2 (K2) / modelo direto (MD). O estudo propõe soluções ao problema inverso (PI) caracterizado pelo fenômeno chuva-vazão-produção de sedimentos para eventos com dados escassos, visando estimar a taxa de entrada, estimar os parâmetros físicos, a lâmina de água e a produção de sedimento da bacia analisada. Os dados de carga de sedimentos são oriundos da estação medidora de sedimentos na pequena bacia hidrográfica. Para uma análise mais pontual e detalhada do comportamento do modelo, também foram realizadas combinações de informações provenientes das observações e do modelo Kíneros2 (K2) simultaneamente com Problemas inversos (PI). A principal contribuição científica do trabalho é a aplicação do método dos problemas inversos (inferências bayesianas juntamente com uma série de Fourier) para estimativa dos parâmetros do modelo de onda cinemática e do balanço de massa, e para estimativa da lâmina de água e da produção de sedimentos de uma pequena bacia hidrográfica na Amazônia. Os resultados apresentaram bom ajuste entre os dados observados e preditos via PI, pois foram obtidos coeficientes de Nash-Sutcliffe acima de 0,70 e RMSE entre 0.27 e 1.99 na calibração e na validação do modelo chuva-vazão-produção de sedimentos. A simulação da lâmina de água e da produção de sedimentos mostrou um grau de confiabilidade de 95%, sendo consistente com os dados observados.

**Palavras-chaves:** Modelagem-previsão; lâmina de água; produção de sedimento; Kineros2; problemas inversos; estimativa de parâmetros.

Abstract of the Thesis presented to PRODERNA / UFPA as part fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resource Engineering (D. Eng.).

## **RAINFALL-RUNOFF-SEDIMENT YIELD MODELLING VIA INVERSE PROBLEMS**

The development of mathematical models and direct methods has made it possible to predict hydrological phenomena such as rainfall-runoff-sediment yield. In order to complement the simulation model, inverse problems can be used to determine the properties of these phenomena and estimate parameters that cannot be measured directly. Therefore, this study was carried out in a small catchment in the Amazon with precipitation data and parameters estimated using the Kineros2 (K2) / direct model (DM). The study proposes solutions to the inverse problem (IP) characterized by the rainfall-runoff-sediment yield phenomenon for events with scarce data, with the aim of estimating the inflow rate, estimating the physical parameters, the runoff depth and the sediment yield of the basin analyzed. The sediment yield data comes from the sediment gauge station in the small catchment. For a more precise and detailed analysis of the model's behavior, combinations of information from observations and the K2 model were also carried out simultaneously with IP. The main scientific contribution is the application of the inverse problem method (Bayesian inference together with a Fourier series) to estimate the parameters of the kinematic wave model and the mass balance, and to estimate the runoff depth and sediment yield for a small watershed in the Amazon. The results showed a good fit between the observed and predicted data via IP, as Nash-Sutcliffe coefficients above 0.70 and RMSE between 0.27 and 1.99 were obtained in the calibration and validation of the rainfall-runoff-sediment yield model. The simulation of the runoff depth and sediment yield showed a 95% degree of reliability, which is consistent with the observed data.

**Keywords:** Modeling-prediction; runoff depth; sediment yield; Kineros2; inverse problems; parameter estimation.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1.- MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	3
1.2.- HIPÓTESE .....	3
1.3.- CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....	3
1.4.- INOVAÇÃO.....	4
1.5.- OBJETIVOS.....	4
1.5.1.- Objetivo Geral.....	4
1.5.2.- Objetivos Específicos.....	4
1.6.- ORGANIZAÇÃO DA OBRA.....	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1.- CICLO HIDROLÓGICO .....	6
2.2.- MODELAGEM E MODELOS .....	8
2.3.- MODELO CHUVA-VAZÃO.....	9
2.4.- MODELOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS.....	11
2.4.1. Universal Soil Loss Equation (USLE) .....	15
2.4.2.- Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) .....	16
2.4.3. Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).....	16
2.4.4. Watershed Erosion Simulation Program (WESP).....	17
2.4.5. Water Erosion Prediction Project (WEPP).....	18
2.4.6.- Kinematic Runoff e Erosion Model (KINEROS2).....	18
2.4.6.1.- Estudos realizados com os modelos Kineros e Kineros2.....	19
2.5.- MODELO DA ONDA CINEMÁTICA.....	20
2.5.1.- Escoamento superficial .....	20
2.6.- ESTUDOS DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS DA AMAZÔNIA.....	21

2.7.- PESQUISAS ENVOLVENDO BACIAS HIDROGRÁFICAS E A MODELAGEM.....	22
2.8.- PROBLEMA DIRETO (PD) .....	23
2.9.- PROBLEMAS INVERSOS (PI) .....	24
2.9.1. Inferências Bayesianas .....	25
2.9.1.1.- Método de Monte Carlo via cadeias de Markov (MCCM) .....	26
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3.1.- ÁREA DE ESTUDO .....	28
3.2.- MODELO DIRETO (MD) – MODELO DA ONDA CINEMÁTICA/ BALANÇO DE MASSA .....	30
3.3.- SOLUÇÃO DO MODELO DIRETO - MÉTODO DAS LINHAS (MOL) .....	32
3.4.- MODELO KINEROS2 (K2) .....	34
3.4.1.- Infiltração.....	35
3.4.2.- Transformação Chuva-Escoamento Superficial nos Planos .....	36
3.4.3.- Erosão nos Planos .....	36
3.5.- DADOS DE ENTRADA DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO .....	39
3.6.- MÉTODO DOS PROBLEMAS INVERSOS (PI) .....	41
3.6.1.- Calibração e validação do modelo Kineros2 .....	43
3.6.2.- Inferências Bayesianas – Monte Carlo Via Cadeias De Markov (MCCM). .....	43
3.7.- VALIDAÇÃO DE DADOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO .....	45
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1.- ESCOAMENTO DE SAÍDA SIMULADO VIA K2 .....	48
4.2.- GERAÇÃO DE MEDIDAS INDIRETAS .....	50
4.2.1- Estimativa de parâmetros com MCCM.....	50
4.2.2.- Estimativas da lâmina de água e da taxa de escoamento lateral via PI.....	52
4.3.- ANÁLISE DE INCERTEZA E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO .....	54
4.4.- OTIMIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DE SAÍDA .....	56
4.5.- PRECIPITAÇÕES E PRODUÇÃO DE SEDIMENTO VIA K2 E PI.....	59

4.6.- APLICAÇÃO DO PI NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO K2 NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS .....	61
4.7.- AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO PARA 2013 a 2014.....	65
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO .....	67
LIMITAÇÕES E/OU RECOMENDAÇÕES .....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	70
APÊNDICE A – COMPROVAÇÃO DA PRIMEIRA REVISÃO DO ARTIGO INTITULADO “Parameter Estimation Using the Inverse Problem Method for Simulating Lateral Inflow and Runoff Depth in a small catchment of Amazon”, SUBMETIDA AOS ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS (ISSN: 1678-2690).....	85
APÊNDICE B – COMPROVAÇÃO DA SUBMISSÃO DO SEGUNDO ARTIGO À REVISTA ENVIRONMENT, DEVELOPMENT AND SUSTAINABILITY (ISSN: 1573-2975).....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico global .....	7
Figura 2 – Linha do tempo com a evolução dos modelos hidrossedimentológicos e/ou metodologias.....	13
Figura 3 – Esquemática do processo de escoamento: (a) Esboço da definição física; (b) Hidrograma típico .....	21
Figura 4 - Desenho esquemático dos problemas diretos .....	24
Figura 5 – Cenários típicos a utilizar problemas inversos.....	24
Figura 6 - Desenho esquemático dos problemas inversos: (a) de causalidade e (b) de especificação.....	27
Figura 7 - Localização da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata .....	28
Figura 8 - Representação do modelo físico da onda cinemática .....	30
Figura 9 - Representação do Método das Linhas (MOL).....	33
Figura 10 – Diagrama dos recursos básicos do KINEROS2 .....	34
Fonte: Adaptado de Woolhiser et al. (1990).....	34
Figura 11 - Representação de entradas e saídas no K2.....	40
Fonte: Adaptado de Woolhiser et al. (1990).....	40
Figura 12 - Desenho representativo da modelagem hidrológica baseada no método de problemas inversos .....	42
Figura 13 - Desenho esquemático dos problemas inversos na modelagem hidrossedimentológica .....	42
Figura 14 - Esquema representativo da evolução do método MCCM .....	45
Figura 15 – Fluxograma da metodologia.....	47
Figura 16 – Escoamento de saída dos eventos representados com o modelo K2.....	49
Figura 17 - Respostas K2/PI da lâmina de água (observada/simulada) e a taxa de entrada lateral (simulada) em função do tempo para os 4 eventos de chuvas máximas diárias..	53
Figura 18 - Saídas típicas K2/PI (observada/simulada/IC = 95%) e valores de R2 para as lâminas de água observadas e simuladas dos eventos de chuvas máximas diárias (A, B, C e D).....	58
Figura 19 - Precipitação observada (a) e Produção de sedimentos observada e saídas com K2 e PI (b) .....	60
Figura 20 - Resultados da calibração do modelo com dados da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata.....	62

Figura 21 - Resultados da validação do modelo com dados da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata.....	63
Figura 22 - Produção de sedimentos observada e simulada para eventos dos anos 2013 e 2014 .....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Amostra de modelos hidrossedimentológicos Empíricos e Físicos.....	15
Tabela 2 – Detalhes sobre algumas pesquisas utilizadas no estudo .....	22
Tabela 3 - Datas dos eventos, volumes precipitados, produção de sedimentos e as referências dos dados da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata.....	43
Tabela 4 - Classificação de desempenho geral para o coeficiente NSE.....	47
Tabela 5 - Identificação dos parâmetros K2.....	48
Tabela 6 - Estimativas dos parâmetros ótimos através do PI desenvolvido para cada evento avaliado .....	51
Tabela 7 - Parâmetros físicos K2/PI variáveis em função da série de Fourier utilizada e avaliados com um intervalo de confiança de 95% .....	55
Tabela 8 – Desempenho do modelo K2 para os eventos de cheia (A, B, C e D) .....	56
Tabela 9 - Desempenho estatístico da produção de sedimentos (PS) simulada em relação à produção de sedimentos observada.....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AGWA	Avaliação Automatizada de Bacias Hidrográficas Geoespaciais ( <i>Automated Geospatial Watershed Assessment</i> )
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EDP	Equações diferenciais parciais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ES	Escoamento Superficial
GSA	Análise de Sensibilidade Global ( <i>Global sensitivity analysis</i> )
HEC-RAS	Centro de Engenharia Hidrológica - Sistema de Análise de Rios ( <i>Hydrologic Engineering Center – River Analysis System</i> )
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Intervalo de confiança
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
K2	KINEROS2-Modelo Cinemático de Escoamento e Erosão ( <i>Kinematic Runoff and Erosion Model</i> )
LISEM	Modelo espacial terrestre integrado (Brasil - Aplicabilidade do lisem ( <i>limburg soil erosion</i> ))
MCCM	Método de Monte Carlo via Cadeia de Markov ( <i>Markov Chain Monte Carlo</i> )
MD	Modelo Direto
MH	Metropolis Hasting
MDL	Método das linhas
NSE	métrica estatística Nash-Sutcliffe ( <i>Nash–Sutcliffe model efficiency coeficiente</i> )
PBIAS	Viés percentual ( <i>The percentage bias</i> )
PD	Problema Direto
PI	Problemas inversos

PS	Produção de sedimento
r	Coefficiente de Pearson
R <sup>2</sup>	Coefficiente de correlação estatístico
RMSE	Raiz quadrática média ( <i>Root Mean Squared Error</i> )
SIG	Sistema de Informação Geográfica
STAR-VARS	Análise de Variogramas de Resposta de Superfícies ( <i>Variogram Analysis of Response Surfaces</i> )
SWAT, ARCSWAT	Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água ( <i>Soil and Water Assessment Tool</i> )
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos ( <i>United States Departamento f Agriculture</i> )
USLE	Equação Universal da Perda de Solo ( <i>Universal Soil Loss Equation</i> )
MUSLE	Equação Universal da Perda de Solo Modificada ( <i>Modified Universal Soil Loss Equation</i> )
RUSLE	Equação Universal da Perda de Solo Revisada ( <i>Revised Universal Soil Loss Equation</i> )
USGS	Pesquisa Geológica dos Estados Unidos ( <i>United States Geological Survey</i> )
WEPP	Projeto de previsão de erosão hídrica ( <i>Water Erosion Prediction Project</i> )
WESP	Programa de Simulação de Erosão de Bacias Hidrográficas ( <i>Watershed Erosion Simulation Program</i> )

## LISTA DE VARIÁVEIS/ SÍMBOLOS

A	Perda de solo por unidade de área e tempo
A0, A1, A2, B1, B2	Parâmetros da série de Fourier
C	Fator de uso e manejo do solo
CC	Cobertura da copa
$C_f$	Splash
$c_h$	efetividade do amortecimento da superfície da água
$C_D$	Coeficiente de arrasto da partícula
$C_m$	Concentração de equilíbrio na capacidade de transporte
$C_D$	Concentração de equilíbrio na capacidade de transporte
CS	Concentração de sedimentos
$CS_i^{OBS}/h_i^{OBS}$	Dado observado
$CS^{\bar{OBS}}/h_i^{\bar{OBS}}$	Média dos dados observados
$CS_i^{SIM}/h_i^{SIM}$	Dado simulado
$CS_i^{\bar{SIM}}/h_i^{\bar{SIM}}$	Média dos dados simulados
$C_v$	Variação do $K_s$
$e_s$	Erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva no solo
$e_h$	Erosão hidráulica
$f_c$	Taxa de infiltração ou capacidade de infiltração (m/s);
$g$	Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
G	Valor efetivo do potencial de capilaridade
h	Volume de água armazenado por unidade de área
$h_u(L,t)$	Profundidade na fronteira do plano contribuinte no tempo t
I	Intensidade da precipitação
In	Profundidade de Interceptação
K	Fator de erodibilidade do solo, expressa a capacidade do solo de sofrer erosão pela chuva

Ks	Condutividade hidráulica saturada efetiva
L	Comprimento do plano
LS	Fator topográfico que expressa o comprimento de declive, declividade do terreno
n	Coefficiente de rugosidade de Manning
p	Cobertura vegetal
P*	Parâmetro candidato
P	Fator de práticas conservacionistas do solo
P e C	Parâmetro e o conjunto de dados observados
PLU	Efeito residual no solo
Qp	Vazão de pico
q(x,t)	Taxa de entrada lateral
Q	Descarga por unidade de largura
R	Fator de erosividade da chuva
r	Cobertura rochosa
re	Relief (microtopografia)
rs	Relief spacing
S	Declividade
SC	Cobertura pelo resíduo
Si	Saturação inicial relativa do solo
SLR	Função contínua produto de quatro subfatores
SM	Umidade do solo
SR	Rugosidade superficial
Ss	Densidade
t	Tempo
Thick	Espesura
u	Índice referente à superfície a montante

$u^*$	Distribuição uniforme
$v_s$	velocidade de queda da partícula (m/s)
$W$	Largura do plano
$\Phi$	Teste de Metropolis
$\phi$	Porosidade
$\alpha$ e $\beta$	Coefficientes resultantes de regressão, estimados por Williams (1975)
$\alpha$ e $\alpha u$	Parâmetro referente a propriedades da bacia hidrográfica
$\alpha$ e $m$	Parâmetros do solo definidos de acordo com coeficiente de Manning
$\lambda$	Índice de distribuição dos tamanhos dos poros
$\rho_1$ e $\rho_2$	Constantes ajustadas aos dados observados
$\pi(P)$	Probabilidade a priori
$\pi(P C)$	Probabilidade a posteriori
$\pi(C P)$	Função de verossimilhança



## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

As diversas formas de uso das bacias hidrográficas geram vários impactos ao meio ambiente e influenciam diretamente o regime hidrológico e hidráulico, modificando a carga de sedimentos e a qualidade da água, uma vez que o solo é susceptível à erosão (GAJBHIYE et al., 2014). A erosão em bacias, muitas vezes é causada pela falta de manejo adequado nas atividades agrícolas e pecuárias, com isso afeta o ambiente através da perda de solo e a transferência de poluentes para os rios (LAGADEC et al., 2016). A intensidade da precipitação está entre os principais fatores que regem a erosão (GARCÍA-RUIZ et al., 2015; DE OLIVEIRA FAGUNDES et al., 2023). Outros fatores como as mudanças de uso e cobertura da terra afetam a produção de sedimentos em rios e lagos naturais e artificiais (CARRIELLO et al., 2014); do mesmo modo, a manutenção dos ecossistemas (BARBOSA, 2021), os ciclos biogeoquímicos (TAN et al., 2017), e a vida útil reduzida dos reservatórios devido ao assoreamento (AYES RIVERA et al., 2019).

O Brasil é considerado uma potência agropecuária e tem potencial hídrico, o que é um ponto importante para o gerenciamento de eletricidade, navegação e abastecimento de água nas comunidades rurais e urbanas da Amazônia. No entanto, existe crescente urbanização, desmatamento e expansão agrícola na Amazônia, os quais sem controle adequado trazem consequências diretas na dinâmica dos eventos naturais da região, e influência na estrutura da vegetação e no transporte de sedimentos (DE SOUZA COSTA et al., 2021). Porém, é importante gerenciar e buscar soluções para a susceptibilidade à erosão, que pode ser agravada devido ao aumento do escoamento superficial, uso inadequado do solo e desmatamento, que são algumas das causas de erosão na superfície da terra (BALASUBRAMANIAN, 2017). Outros fatores podem influenciar o processo erosivo como a compactação do solo, baixo teor de matéria orgânica, perda da estrutura do solo, salinização, acidez. Assim, a erosão do solo constitui uma das principais causas do empobrecimento de terras produtivas, além de contribuir para o aumento da produção de sedimentos e consequentemente assoreamento dos corpos hídricos (LIMA et al., 2014).

No geral, os recursos naturais têm importância determinante no plano social, político, econômico e ambiental. Assim, o estudo dos processos físicos é parte importante da gestão dos recursos naturais. Para estudar os processos físicos são utilizados modelos, que são ferramentas importantes para entender e representar a

dinâmica hidrológica e hidrossedimentológica (WAGENER et al., 2001). Os processos de erosão e sedimentação sem controle podem trazer diversos problemas de mudanças na cobertura vegetal e na qualidade da água (LIMA et al., 2014). A obtenção direta de dados de produção de sedimentos é bastante limitada em bacias hidrográficas, pois necessita de coleta em campo e análise laboratorial; além disso, são necessárias ferramentas de análise e avaliação da variação temporal da geração de sedimentos não captada por amostras pontuais, devido à sazonalidade das estações chuvosas e de estiagem (GARCÍA-RUIZ et al., 2015).

Uma das dificuldades para a modelagem hidrossedimentológica é a escassez de dados de produção de sedimentos (WAGENER et al., 2001; DE MENEZES et al., 2020). Assim, para cada situação, são estabelecidos modelos de estudos, critérios e diretrizes diferenciadas com o intuito de determinar de forma quantitativa, qualitativa e espacial a erosão do solo, a produção de sedimento e suas implicações (COSTA & BLANCO, 2018; LENSE et al., 2019). A maioria dos estudos faz uma análise geral do processo erosivo nas bacias e outros poucos realizam uma análise mais especulativa dos resultados com modelos empíricos e físicos em comparação com os dados observados (DE MENEZES et al., 2020; HARCHE et al., 2021). Assim, destacam-se alguns modelos físicos consolidados na literatura para quantificar o escoamento superficial e a produção de sedimento, como: o modelo cinemático de escoamento e erosão – KINEROS2 (WOOLHISER et al., 1990), o modelo do projeto de previsão de erosão hídrica– WEPP (FLANAGAN & NEARING, 1995) e o modelo espacial terrestre integrado – LISEM (DE ROO et al., 1996). No presente estudo é utilizado o modelo Kineros2 (K2).

O K2 é um modelo físico para simulação do escoamento e produção de sedimentos de bacias hidrográficas agrícolas e urbanas (WOOLHISER et al., 1990). Na simulação são levados em consideração os fenômenos físicos de interceptação, infiltração, escoamento superficial. No geral, ainda existem poucos estudos sobre quantificação de lâmina de água, perda de solo e produção de sedimentos na Amazônia (CARRIELLO et al., 2014; BARBOSA, 2021). Assim, o objetivo do trabalho é propor um procedimento combinado de modelagem-previsão (modelo chuva-vazão-produção de sedimentos) aplicado à quantificação da lâmina de água e da produção de sedimentos, com base em pseudo-observações (gerada via modelo físico K2) e nos dados observados coletados em uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia. Nesse

contexto, o método dos Problemas inversos (PI) foi considerado para modelagem-previsão de dados hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas. Os PI fazem uso combinado das informações disponíveis e do modelo matemático analisado, buscando minimizar as incertezas na estrutura e nos parâmetros do modelo (KIM et al., 2014; BAIA et al., 2020; AZEVEDO et al., 2020).

### 1.1.- MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Do modo geral, ainda existem poucos estudos sobre quantificação da lâmina de água escoada e produção de sedimentos na Amazônia. Entretanto, as pequenas bacias hidrográficas vêm passando por severas mudanças no uso da terra e transformação de áreas florestais em áreas agrícolas. Em particular, a busca por estratégias de conservação do solo e ecossistemas torna-se cada vez mais emergencial, pois mudanças de uso da terra, desmatamento e a ocorrência de grandes variações sazonais e interanuais tornam-se cada vez mais intensas e frequentes devido, também, às mudanças climáticas. Nesse sentido, a escassez de dados experimentais é uma das principais limitantes na modelagem chuva-vazão-produção de sedimentos de bacias hidrográficas. Assim, o estudo tem a motivação de contribuir com a gestão dos recursos hídricos e do uso do solo, por meio de um procedimento combinado de modelagem-previsão aplicado a estimativas de lâmina de água e produção de sedimentos para bacias hidrográficas. O Kineros2 utilizado neste estudo, é um modelo físico consolidado na literatura e está alinhado com o objetivo de preencher lacunas na hidrologia e de simular as respostas hidrossedimentológicas de bacias urbanas e rurais.

### 1.2.- HIPÓTESE

A escassez de dados medidos é uma das principais limitantes na modelagem chuva-vazão-produção de sedimentos para bacias hidrográficas?

### 1.3.- CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

A principal contribuição é aplicar o método dos problemas inversos (inferências bayesianas juntamente com uma série de Fourier) para estimar os parâmetros do modelo de onda cinemática e do balanço de massa, e para estimar a lâmina de água e a produção de sedimentos para uma pequena bacia hidrográfica na Amazônia. A taxa de entrada

lateral foi representada por uma transformada de Fourier, uma vez que foi modelada usando uma estrutura Bayesiana juntamente com o método de Monte Carlo via cadeia de Markov (MCCM).

#### 1.4.- INOVAÇÃO

A inovação do trabalho é propor um procedimento combinado de modelagem-previsão (modelo chuva-vazão-produção de sedimentos), usando pseudo-observações via K2 e dados observados coletados em uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia, para estimativa de lâmina de água escoada e produção de sedimentos. Nesse contexto, o método de Monte Carlo via cadeia de Markov (MCCM), como parte dos Problemas inversos (PI), foi considerado para modelagem-previsão hidrossedimentológica em bacias hidrográficas, especialmente, tentando representar o cenário real, facilitando o entendimento da dinâmica final do aporte da lâmina de água escoada e da produção de sedimentos.

#### 1.5.- OBJETIVOS

##### 1.5.1.- Objetivo Geral

Aplicar problemas inversos como técnica de predição de medidas diretas na modelagem chuva-vazão-produção de sedimentos para estimar a lâmina de água e a produção de sedimentos de bacias hidrográficas.

##### 1.5.2.- Objetivos Específicos

- Obter dados da lâmina de água escoada e da produção de sedimentos através de pseudo-observações [via modelo K2 (Kineros2)] e observações simuladas [usando MCCM (Monte Carlo via cadeia de Markov) – PI (Problemas Inversos)];
- Estimar parâmetros físicos influentes na estimativa da lâmina de água e na produção de sedimento usando o MCCM como estrutura do problema inverso;
- Estimar a taxa de entrada lateral de uma pequena bacia hidrográfica amazônica usando series de Fourier como uma estrutura do problema inverso;
- Analisar a incerteza do modelo Kineros2 e avaliar o desempenho dos resultados da lâmina de água e da produção de sedimentos;

- Verificar a correlação estatística entre os dados observados e os simulados com os problemas inversos.

## 1.6.- ORGANIZAÇÃO DA OBRA

A estrutura desta tese está organizada em cinco capítulos e quatro elementos textuais descritos brevemente como segue:

- No CAPÍTULO 1, descreve-se o problema de pesquisa, a motivação e justificativa da pesquisa, contribuição científica, inovação, e os objetivos do trabalho;
- No CAPÍTULO 2, apresentam-se algumas pesquisas relacionadas com a aplicação do modelo chuva-vazão-produção de sedimentos (modelo da onda cinemática, modelo Kineros2 e o método dos problemas inversos) e pesquisas envolvendo bacias hidrográficas e a modelagem;
- No CAPÍTULO 3, aborda-se a área de estudo analisada, o modelo utilizado, os dados de entrada do modelo hidrossedimentológico, o método dos problemas inversos utilizado, a validação de dados e critérios de desempenho;
- No CAPÍTULO 4, apresentam-se os resultados e discussões do trabalho;
- No CAPÍTULO 5, tem-se as conclusões da pesquisa;
- Limitações e/ou Recomendações;
- Referências Bibliográficas;
- No Apêndice A, encontra-se a comprovação da submissão aos Anais da Academia Brasileira de Ciências, da primeira revisão do artigo “Parameter Estimation Using the Inverse problem Method for Simulating Lateral Inflow and Runoff Depth in a small catchment of Amazon”;
- No Apêndice B, encontra-se a comprovação da submissão do segundo artigo à Revista Environment, Development and Sustainability.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1.- CICLO HIDROLÓGICO

A água é essencial para os ecossistemas e para o clima. Porém, a importância deste recurso natural é indiscutível. O equilíbrio ecológico de ecossistemas, além do fundamental papel no desenvolvimento socioeconômico dos seres humanos, está ligado à disponibilidade de água, quer seja em quantidade, quer seja em qualidade. Nesse sentido, o conhecimento e o monitoramento dos recursos hídricos são importantes para a manutenção do bem-estar social geral.

Os fluxos de água na porção continental do ciclo hidrológico apresentam-se como um sistema dinâmico. Conceitualmente, ao adotar a bacia hidrográfica como a área de drenagem de um rio e seus afluentes, é possível analisar os fluxos de entrada e saída de água, que atua simultaneamente. A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico em que a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também infiltrados profundamente (SILVEIRA, 1993).

As bacias hidrográficas de primeira ordem, que são normalmente de pequena escala, ocupam aproximadamente 80% da área de drenagem de um rio (SANTANA & BLANCO, 2020), por isso, é conveniente considerá-las como maior fonte de geração de vazões afluentes (ROGERS, 1972). Em pequenas escalas espaciais e temporais, os fenômenos hidrológicos apresentam um comportamento mais heterogêneo. No entanto, em escalas espaciais e temporais maiores, a complexidade do processo geralmente se reduz através da média de complexidades de menor escala (SAVENIJE, 2001). O balanço hidrológico de pequenas bacias pode ser considerado menos complexo, visto que a resposta aos eventos de precipitação é mais rápida e mais evidente (BUTTLE, 1998). Por outro lado, fica evidente que a intensidade de diferentes componentes das bacias varia de local para local, principalmente em pequenas escalas (DE MENDONÇA et al., 2022).

Os principais componentes deste sistema dinâmico são a precipitação, a evapotranspiração, a interceptação, a infiltração, e as vazões efluentes e afluentes. O ciclo hidrológico global (Figura 1) é acionado com a retirada da água líquida ou sólida, por meio da superfície oceânica e terrestre, causada pela energia solar que a terra

absorve. Essa água entra no sistema de circulação geral da atmosfera que depende das diferenças de absorção de energia e da refletância entre os trópicos e as regiões de maior latitude, como as polares (WOOLHISER, 1973; TUCCI & CLARKE, 1997).

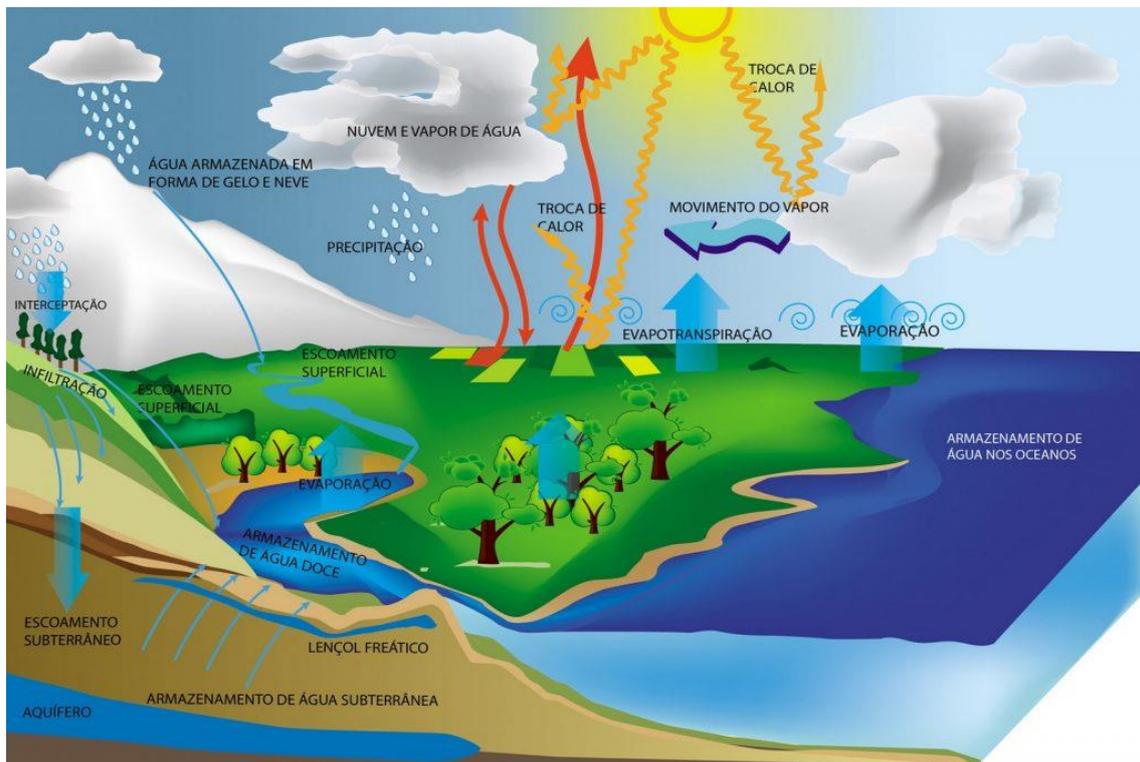


Figura 1 - Ciclo hidrológico global

Fonte: Adaptado de USEPA (1998)

Destaca-se também, que as variáveis do sistema hidrológico são submetidas à variabilidade espacial e temporal, o que torna estes fenômenos não lineares (BLANCO et al., 2013). Quando a intensidade da precipitação excede a taxa de infiltração, o escoamento começa imediatamente. Esse escoamento depende da capacidade de infiltração, da declividade e da porosidade do solo, que também apresenta resistência ao fluxo de água para as camadas mais profundas. Neste sentido, solos com altos teores de argila têm menor capacidade de infiltração e indiretamente produzem mais escoamento superficial, em comparação com os solos arenosos. Além disso, ações antrópicas como a alteração do uso e cobertura do solo podem favorecer o escoamento superficial e a produção de sedimento (BARBOSA, 2021).

## 2.2.- MODELAGEM E MODELOS

Modelagem é analisar e integrar modelos físicos, matemáticos e numéricos, buscando explicar fenômenos naturais e processos industriais, tomando como base hipóteses, que simplificam a realidade. Modelos podem ser descritos pela concepção de um determinado sistema que tenta imitar a realidade para determinação de variáveis inerentes a cada fenômeno ou processo.

Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das ações antrópicas e a prever mudanças futuras nos sistemas ambientais. Nesse caso, a modelagem hidrológica pode ser empregada no intuito de fornecer um importante suporte técnico aos processos de tomadas de decisão referentes ao planejamento e gestão dos recursos hídricos, além de proporcionar condições para elaboração de vários estudos sobre os processos naturais e antrópicos de uma região.

No caso da modelagem hidrossedimentológica da lâmina de água e da produção de sedimentos, percebe-se através da literatura (WOOLHISER et al., 1990; SMITH et al., 1995), que o Kineros2 foi usado para analisar uma variedade de eventos hidrossedimentológicos através do mundo. O modelo já foi utilizado para simular o escoamento superficial e a produção de sedimentos em diversas bacias hidrográficas ao redor do mundo, como exemplo existem alguns estudos desenvolvidos no Arizona, EUA (apresentamos 3 casos relevantes). Nesse caso, o modelo foi utilizado para prever o aumento do escoamento atribuível a mudanças nas propriedades de infiltração do solo, independentemente do aumento do escoamento na área impermeável (KENNEDY et al., 2013). O Kineros2 foi desenvolvido e combinado com o método de Monte Carlo para análise de incerteza e análise de sensibilidade dos parâmetros físicos de uma pequena bacia (HANTUSH & KALIN, 2005; KIM et al., 2014); e para previsão de cheia, usando estimativas de precipitação quase em tempo real obtidas da estação meteorológica nacional (SCHAFFNER et al., 2010). Em Omã, o Kineros2 foi utilizado com abordagens estatísticas para estimar parâmetros e avaliar o desempenho do modelo na previsão chuva-vazão (AL-QURASHI et al., 2008). Na Malásia, um estudo foi desenvolvido para determinar a sensibilidade e validação do Kineros2 na previsão de produção de sedimentos na Bacia Hulu Langat (MEMARIAM et al., 2012); e para prever cheias (MIRZAEI et al., 2016). No Vietnã, foi desenvolvido um estudo para prever os efeitos do escoamento nas mudanças da cobertura da terra (ZIELGER et al.,

2007); e outro estudo para previsão de inundações foi acoplado, combinando o Kineros2 com o HEC-RAS (Software de modelagem para a concepção unidimensional de fluxo de água constante e sistema hidráulico de fluxo de água instáveis bidimensionais) na calibração e validação com dados observados em condições de clima tropical (NGUYEN et al., 2015). Na Bulgária, um estudo foi desenvolvido para previsão dos riscos de inundação sob a influência das mudanças de uso da terra na bacia Malki Iskar (NIKOLOVA et al., 2009).

O K2 também foi utilizado para estudos da análise comparativa com modelos empíricos (USLE, RUSLE, MUSLE) e físicos (LISEM, WEPP, SWAT, EPIC, WATEM, MEFIDIS, AGNPS) na Ásia e na América (GUO et al., 2019); onde o estado da arte também se encontra em desenvolvimento. O K2 faz parte desse estado da arte. Assim, acredita-se que o presente trabalho ajudará a desenvolver ainda mais o campo de pesquisa da modelagem-previsão chuva-vazão-produção de sedimentos, que ainda possui lacunas a serem preenchidas.

### 2.3.- MODELO CHUVA-VAZÃO

Um modelo chuva-vazão é uma representação do sistema dinâmico que divide a precipitação de chuva em escoamento superficial, subsuperficial, evapotranspiração, umidade do solo ou escoamento subterrâneo (PEEL & MCMAHON, 2020). Esta abordagem é fundamental devido às limitações de técnicas de medições, ocasionadas pela complexidade da natureza. Com a aplicação de modelos chuva-vazão, espera-se melhorar a tomada de decisões sobre um problema hidrológico, seja no planejamento de recursos hídricos, cobertura de falhas históricas, proteção contra eventos extremos, mitigação de poluição hídrica, licenciamento de captações, ou outras aplicações (BEVEN, 2012).

Ao longo da história, houve o desenvolvimento de cerca de 280 modelos chuva-vazão, além de pequenas modificações dos modelos oriundos destes modelos (PEEL & MCMAHON, 2020). Segundo Peel e McMahon (2020), a primeira descrição formal de um modelo chuva-vazão veio através do método racional de Mulvaney (1851), que calcula a vazão máxima de pequenas bacias hidrográficas a partir de uma intensidade máxima de precipitação e de um tempo de concentração. Outro modelo matemático relevante, que inspirou diversas outras modificações, é o hidrograma unitário de

Sherman (1932), que utiliza a precipitação efetiva unitária, com intensidade constante no tempo e uniformemente distribuída no espaço e sobre a bacia hidrográfica.

Há uma evidente busca por um modelo que represente de maneira satisfatória os fenômenos chuva-vazão, mas que também o faça a partir do menor número de parâmetros. Segundo Clarck et al. (2011), a superabundância de modelos chuva-vazão mostra que há uma compreensão científica insuficiente da dinâmica ambiental do ciclo hidrológico, que pode ser atribuída às dificuldades em medir e representar a heterogeneidade encontrada nos sistemas naturais. Wagener et al. (2001) e Sitterson et al. (2018) falam que é preciso identificar as prioridades da modelagem e as limitações da disponibilidade de dados, tempo e orçamento para modelos ajudarem a restringir as escolhas e garantir que o modelo seja o melhor para o propósito pretendido. Os modelos chuva-vazão são classificados quanto aos tipos de dados abordados, sejam eles determinísticos ou estocásticos; quanto a estrutura do modelo, que pode ser empírico, conceitual ou físico; quanto à variabilidade espacial, podendo ser modelos agrupados, semi-distribuídos e distribuídos (SITTERSON et al., 2018).

Para Melsen et al. (2016), a principal característica limitante de modelos chuva-vazão está na escolha da estrutura do modelo. As estruturas desses modelos mais simples são os empíricos, que mapeiam a relação entrada-saída, ou seja, fazem uma modelagem caixa-preta ao não utilizar qualquer relação física. Modelos conceituais utilizam equações simplificadas que representam o armazenamento de água na bacia hidrográfica, analisando parcialmente os fluxos de água através de compartimentos, logo, realizam uma modelagem caixa-cinza (DE MENDONÇA et al., 2022). E, modelos físicos são aqueles que utilizam as leis e equações físicas baseadas em respostas hidrológicas reais, ou modelos caixa-branca. Logo, os modelos conceituais e físicos necessitam de uma compreensão completa da física dos fluxos de água envolvidos. Cada estrutura apresenta vantagens e desvantagens, a depender da finalidade do modelo e do nível de detalhamento que se deseja alcançar (BEVEN, 2012, SITTERSON et al., 2018, PEEL & MCMAHON, 2020).

Quando o modelo não utiliza alguma forma de representar a variabilidade espacial é chamado de agrupado, ou seja, considera a manifestação de fenômenos hidrológicos como uma unidade homogênea. Os modelos semi-distribuídos refletem alguma variabilidade espacial. E, os modelos totalmente distribuídos processam variabilidade espacial por células de grade (SITTERSON et al., 2018).

Por ser uma representação simplificada de um sistema dinâmico e complexo, todos os modelos chuva-vazão são incertos. A incerteza dos modelos pode vir dos dados observados, incertezas naturais, estimativa de parâmetros, calibração ou hipóteses do modelo, e nas mudanças de variáveis hidrometeorológicas (SITTERSON et al., 2018). Segundo Pechlivanidis et al. (2011), os dados de entrada são uma importante fonte de incerteza, pois a calibração dos parâmetros de qualquer modelo será baseada na qualidade do monitoramento. O aspecto mais desafiador da validação de modelos com dados observados está contido em saber até onde os modelos são confiáveis e o quão bem podem representar o sistema abordado. Alguns modelos podem ser considerados satisfatórios em determinadas bacias, enquanto outros podem não compreender razoavelmente os fenômenos intrínsecos de outras bacias (DE OLIVEIRA FAGUNDES et al., 2023).

Diversos autores relatam a dificuldade em realizar simulações na Amazônia devido à falta de dados (BLANCO et al., 2013; CARRIELLO et al., 2014; BARBOSA, 2021). Segundo Blanco et al. (2007), a abordagem ideal frente às pequenas bacias é por dados horários, devido ao curto tempo de concentração. No entanto, os únicos dados disponíveis, para a maioria das pequenas bacias hidrográficas, são as precipitações e vazões diárias.

#### 2.4.- MODELOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS

Os modelos físicos têm grandes vantagens sobre as equações empíricas: eles abordam o problema com base na física do processo e conseqüentemente podem ser extrapolados com maior segurança, representando o processo do ciclo hidrológico com fidelidade (WOOLHISER et al., 1990; GUO et al., 2019). E os métodos numéricos ajudam a prever o comportamento dos processos físicos, obtendo resultados mais próximos aos medidos (GALINA et al., 2018; DE OLIVEIRA FAGUNDES et al., 2023).

O significado físico dos parâmetros (Comprimento, Largura, Declividade, Densidade, espessura, Cobertura vegetal, Condutividade hidráulica saturada, Variação do Ks, Valor efetivo do potencial de capilaridade, Porosidade, índice de distribuição do tamanho dos poros, Coeficiente de rugosidade de Manning, Relevo, Espaçamento, cobertura rochosa, Coeficiente de coesão do solo) permite analisar a variação do

comportamento do sistema devido a mudanças em alguns dos seus componentes (AL-QURASHI et al., 2008).

Vários modelos de base física, que calculam escoamento, erosão e transporte de sedimentos foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas, por exemplo, tem-se alguns estudos: em Hohhot – China, foi desenvolvido um estudo para simular o escoamento e a produção de sedimentos; e quantificar a perda de nutrientes do solo para diferentes eventos de chuvas (AN et al., 2019); no Arizona – E.U.A, o modelo K2 foi utilizado, fornecendo 15 parâmetros físicos calibrados para representar uma variedade de práticas de infraestrutura verde (KORGAONKAR et al., 2020); em Marrocos, um estudo foi desenvolvido avaliando o desempenho do K2 em comparação com o SWAT nas condições áridas, com base em estudos prévios realizados na bacia de Tleta, no norte de Marrocos (HARCHE et al., 2021); No Egito, foi desenvolvido um estudo avaliando o desempenho do modelo com a interface de GIS e considerando dados medidos de escoamento superficial (ABDALLA et al., 2022).

Quantificar os processos hidrossedimentológicos nas bacias hidrográficas é complexo, pois existem incertezas nas respostas dos modelos hidrossedimentológicos; nesse contexto, é necessário desenvolver outras alternativas de soluções ao problema. Essas soluções devem abordar explicações das causas dessa influência no comportamento do sistema. Farinasso et al. (2006) descreveram os modelos da seguinte forma: modelos empíricos, mais utilizados em função da simplicidade e disponibilidade dos dados; e modelos baseados em processos que consideram as leis físicas (modelos físicos).

Os modelos hidrossedimentológicos fornecem estimativas que auxiliam na falta de informações sobre o processo de escoamento e sedimentação. Segundo Santos (2001), os modelos hidrossedimentológicos são importantes do ponto de vista da sedimentometria, pois:

- Permitem localizar espacialmente as áreas com processos erosivos mais acentuados, favorecendo a tomada de decisão com medidas pontuais e mais eficientes, pois atingem a fonte do problema;
- Permitem prever o escoamento de saída da bacia e o transporte de sedimentos quantitativamente no tempo e no espaço, facilitando assim, o planejamento da

rede de monitoramento sedimentométrico e a frequência das campanhas de medição;

- Permitem estimar variações de lâmina de água e variação da produção de sedimentos devido a precipitações máximas e a alterações no uso do solo, seja com a finalidade de gestão hídrica das bacias hidrográficas ou para avaliar impactos de determinados usos agrícolas.

Pandey et al. (2009) referem-se à necessidade de quantificar o escoamento e erosão do solo de forma ampla, com o objetivo de proporcionar uma ferramenta para o planejamento estratégico de conservação do solo e gestão dos recursos hídricos. Paiva (2003) afirma que os modelos empíricos utilizam relações empíricas simples, com interesse em estudos preliminares e estimativas grosseiras, tentam relacionar concentração e vazão, não podendo prever sempre a variação da qualidade das águas superficiais e o impacto das mudanças das práticas agrícolas na qualidade das águas.

Sendo assim, os principais modelos hidrossedimentológicos e metodologias disponíveis na literatura (Figura 2) desenvolvidos para entender a natureza da modelagem hidrossedimentológica foram:

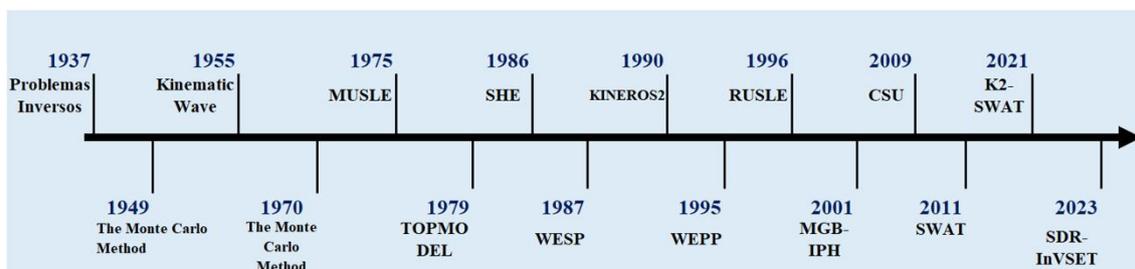


Figura 2 – Linha do tempo com a evolução dos modelos hidrossedimentológicos e/ou metodologias.

### **Problemas Inversos**

Os problemas inversos datam de 5 séculos atrás. Sendo o primeiro trabalho de Tartaglia (1537).

### **The Monte Carlo Method**

O método utiliza uma abordagem estatística para o estudo de equações diferenciais ou, de modo mais geral, de equações integro-diferenciais que ocorrem em vários ramos da ciência natural; e partiu dos pesquisadores Metropolis & Ulam (1949) e Hastings (1970).

### **Kinematic Wave model**

Concebida há mais de 50 anos. Sendo o primeiro trabalho sobre a teoria da onda cinemática de Lighthill & Whitham (1955).

### **TOPMODEL**

O Topography Based Hydrological Model, é um modelo semiconceitual e semidistribuído que utiliza relações físicas para representar os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica (BEVEN; KIRKBY, 1979).

### **SHE**

O Sistema Hidrológico Europeu (SHE) foi desenvolvido pelo consórcio europeu de institutos de hidrologia (BATHURST, 1986).

### **MGB-IPH**

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) foi desenvolvido para a simulação de grandes bacias (áreas maiores que 10.000 km<sup>2</sup>) e permite simular o comportamento físico dos processos que ocorrem na bacia de forma distribuída, seja na descrição determinística ou na forma de estimativa dos parâmetros (COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

### **CSU**

Modelo que usa um sistema de canais e planos para discretizar a bacia. De acordo com Santos (2009), este modelo calcula a erosão e o transporte de sedimentos separadamente para o fluxo superficial e nos canais, e propaga o fluxo por meio do modelo de onda cinemática.

### **SWAT**

O modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) foi desenvolvido por pesquisadores do Serviço de Pesquisa Agrícola dos Estados Unidos (ARS – USDA) e da Universidade do Texas A&M (ARNOLD et al. 2012).

### **SDR-InVEST**

O modelo SDR-InVEST usa o Modelo de Elevação Digital (DEM) para determinar a acumulação de fluxo e o caminho do fluxo de sedimentos (BENDITO et al. 2023).

A Tabela 1 apresenta alguns dos modelos empíricos e físicos existentes e utilizados para simular processos hidrológicos ou erosivos em bacias hidrográficas.

Tabela 1 – Amostra de modelos hidrossedimentológicos Empíricos e Físicos

<b>MODELO</b>	<b>TIPO</b>	<b>REFERÊNCIA</b>
<b>USLE</b>	Empírico	Wischmeier & Smith (1965)
<b>MUSLE</b>	Empírico	Williams (1975)
<b>RUSLE</b>	Empírico	Renard et al. (1996)
<b>WESP</b>	Físico	Lopes (1987)
<b>WEPP</b>	Físico	Flanagan & Nearing (1995)
<b>KINEROS2</b>	Físico	Woolhiser et al (1990)

Assim, detalham-se alguns dos modelos hidrossedimentológicos referidos na Tabela 1, como segue:

#### **2.4.1. Universal Soil Loss Equation (USLE)**

A USLE (Equação 1) é um modelo empírico muito utilizado para o cálculo de erosão em termos médios anuais. O modelo não prevê deposição e não computa produção de sedimentos por ravina, erosão das margens e fundo do canal. O objetivo deste modelo é ser um guia sistemático no planejamento e conservação do solo (WISCHMEIER & SMITH, 1965).

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

Sendo:

A: perda de solo por unidade de área e tempo (t/ha.ano);

R: fator de erosividade da chuva, expressa a erosão potencial da precipitação média anual da região (Mj.mm/ha.h ano);

K: fator de erodibilidade do solo, expressa a capacidade do solo de sofrer erosão pela chuva (t.ha.h/Mj.ha.mm);

L: fator topográfico que expressa o comprimento de declive.

S: fator que representa a declividade do terreno ou grau de declive. Para aplicações práticas, os fatores LS são considerados conjuntamente como fator topográfico.

C: fator de uso e manejo do solo, que representa a relação da perda de solo em terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto;

P: fator de práticas conservacionistas do solo. É a relação entre a intensidade esperada de tais perdas com determinada prática conservacionista.

Os fatores LS, C e P são adimensionais.

#### **2.4.2.- Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)**

A MUSLE (Equação 2) é uma modificação da equação universal de perda de solo – USLE, que considera a substituição do fator da chuva da USLE por um fator de escoamento superficial calculado para cada evento chuvoso individual. Uma vez que o desgaste do solo devido à chuva e ao escoamento superficial comanda o carreamento de sedimentos (WILLIAMS, 1975).

$$R = \alpha.(Q.qp)^\beta \quad (2)$$

Sendo:

Q: volume de escoamento superficial (m<sup>3</sup>);

qp: vazão de pico (m<sup>3</sup>/s);

$\alpha$  e  $\beta$ : coeficientes resultantes de regressão, estimados por Williams (1975), sendo iguais a 11,8 e 0,56 respectivamente.

#### **2.4.3. Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**

Das modificações realizadas na USLE, pode-se destacar a RUSLE, que é um modelo empírico que estima a perda de solo em longo prazo. Na RUSLE a tecnologia de avaliação dos fatores foi alterada e novos dados foram introduzidos para avaliar os termos da equação em condições específicas (RENARD et al., 1997). A RUSLE é

fundamentada na equação universal de perda de solo (USLE), permitindo a estimativa de uma taxa média anual de erosão do solo para um local de interesse qualquer com número de cenários que envolvem sistemas de cultivo, técnicas de manejo e práticas de controle da erosão. Nesse sentido, a aplicação da RUSLE no ambiente SIG para perda de solo é estimada espacialmente dentro de uma determinada área (KOULI et al., 2008). É muito comum encontrar a aplicação do modelo RUSLE, utilizando-se Sistemas de Informação Geográfica (SIG), devido à possibilidade de trabalhar com interface algorítmica. Os trabalhos de Lima et al. (2014) e Delgado et al. (2022) são exemplos dessa aplicação combinada.

#### **2.4.4. Watershed Erosion Simulation Program (WESP)**

O modelo WESP representa a bacia hidrográfica através de uma geometria simplificada e um sistema de planos de escoamento que descarregam em canais de drenagem (LOPES & CANFIELD, 2004). A definição dos planos é baseada nas características do solo, declividade e cobertura vegetal. O WESP é um modelo distribuído, pois suas variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou tempo, e também é um modelo físico visto que depende de fatores básicos como: topografia, natureza do fluxo, características dos solos e dos sedimentos.

A saída de água do modelo WESP é considerada por infiltração, o modelo não leva em consideração a saída por evaporação. O modelo WESP possui três grandes componentes: um componente hidrológico, o qual processa a entrada de histogramas de chuva, o componente de escoamento superficial, o de erosão e o de deposição. O modelo trabalha com três grupos de dados: as características da bacia; os parâmetros de erosão e deposição; e os dados de precipitação. A infiltração é calculada pela equação de Green e Ampt (1911).

O escoamento superficial (nos planos e nos canais) é considerado unidimensional, não permanente e espacialmente variado, sendo o escoamento resultante da propagação do excesso de precipitação em relação à infiltração. O WESP considera a erosão por impactos das gotas de chuva e pelo escoamento superficial. Estes processos são considerados não permanentes e variados e são descritos dinamicamente, utilizando taxas de erosão e deposição simultaneamente, ao invés da abordagem convencional, na

qual são utilizadas funções de transporte de sedimentos para fluxo permanente (SANTOS, 2003).

#### **2.4.5. Water Erosion Prediction Project (WEPP)**

O modelo WEPP (FLANAGAN & NEARING, 1995) é um modelo dinâmico que incorpora conceitos de erosão entressulcos e sulcos, foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para ser aplicado a grandes bacias. Esse modelo é conceitual, levando em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos, física do solo, simulando os processos que ocorrem em uma determinada área em função do estado atual do solo, cobertura vegetal, restos de cultivos e umidade do solo. O WEPP inclui parâmetros para planos, canais e para irrigação.

O WEPP calcula as distribuições espaciais e temporais da perda de solo e a sua deposição, além de fornecer estimativas explícitas de quando e onde, numa determinada bacia hidrográfica ou encosta, está ocorrendo erosão, para possibilitar a adoção de medidas de conservação para controlar a perda de solo e a produção de sedimentos (SANPAIO & BLANCO, 2020).

#### **2.4.6.- Kinematic Runoff e Erosion Model (KINEROS2)**

O Kineros2 é um modelo físico e distribuído, orientado a eventos que descrevem os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão em pequenas bacias urbanas e rurais (WOOLHISER et al., 1990). Segundo Smith et al. (1995) este modelo pode ser usado para determinar os efeitos e/ou saídas no hidrograma e no sedimentograma de uma seção qualquer, e para determinar possíveis mudanças nas características da bacia, tais como: urbanização de uma área, construção de reservatórios, desmatamento, etc. O Kineros2 é a evolução do modelo KINEROS (WOOLHISER et al., 1990); considerando-se as seguintes alterações:

- O algoritmo de infiltração trabalha com um perfil de duas camadas de solo e incorpora um novo método, baseado na física do solo, para redistribuir a água do solo durante períodos de estiagem.

- Solos e sedimentos são caracterizados por uma distribuição de até cinco classes de diâmetro de partículas, em vez de uma única partícula de tamanho médio;

É importante quantificar os processos físicos para implementar planos de mitigação e tratamento de prejuízos nas bacias hidrográficas. Sendo que, o Kineros2 pode ser usado para determinar os efeitos de várias características artificiais, como desenvolvimentos urbanos e para pequenos reservatórios de retenção ou canais revestidos (SMITH et al., 1995), o modelo Kineros2 é utilizado neste estudo e será melhor descrito na metodologia.

#### ***2.4.6.1.- Estudos realizados com os modelos Kineros e Kineros2***

Michaud e Sorooshian (1994) confirmaram a aplicabilidade do Kineros simulando a dinâmica hidrológica em ambientes áridos; Smith et al. (1995) comprovaram a aplicação em ambientes úmidos; e outros estudos realizados em ambientes com erosão pós-incêndio (CANFIELD et al., 2005; VILLARREAL et al., 2022). Além disso, existem estudos que utilizaram os resultados do modelo Kineros2 como entradas para outros modelos; como é o estudo de Harche et al. (2021), que realizou uma análise comparativa entre o Kineros2 e a ferramenta de Avaliação do solo e da água (Soil and Water Assessment Tool – SWAT) para quantificar o processo de escoamento e sedimentação em uma bacia rural; e o estudo desenvolvido com Kineros2 e o simulador de transporte com infiltração e escoamento (Simulator of Transport With Infiltration and Runoff - STWIR) para demonstrar a aplicabilidade do modelo na simulação do escoamento e o transporte de bactérias terrestres (GUBER et al., 2011). Korgaonkar et al. (2020) descreveram a análise de sensibilidade global do modelo juntamente com a estrutura da Análise de Variogramas de Resposta de Superfícies (Variogram Analysis of Response Surfaces - STAR-VARS). Também há outros estudos de análise de sensibilidade e análise de incertezas e desempenho do modelo realizados por Al-Qurashi et al. (2008).

## 2.5.- MODELO DA ONDA CINEMÁTICA

O modelo da onda cinemática foi introduzido como uma teoria a um tipo de movimento ondulatório, que surgiu para representar qualquer problema de escoamento unidimensional. Concebida há mais de 50 anos, a teoria da onda cinemática já encontrou seu nicho na hidrologia e nas problemáticas ambientais. Lighthill e Whitham (1955) explicam a existência de uma relação funcional aproximada em cada ponto entre o escoamento e a concentração.

Singh e Regl (1983) citam que as equações das ondas cinemáticas foram utilizadas no passado para modelar a erosão de um plano inclinado sujeito à chuva, proporcionando soluções analíticas para o processo de erosão em um plano. Azevedo et al. (1997) desenvolveram um modelo computacional matemático de onda cinemática para otimizar a solução não linear de PI na irrigação por sulcos. Relacionado à simulação de problemas governados pelo modelo da onda cinemática, destaca-se o trabalho de Romanov (2009). Como parte da origem da modelagem do processo de escoamento e erosão, pois o modelo da onda cinemática também foi utilizado.

### 2.5.1.- Escoamento superficial

Para Chow et al. (1988), o escoamento superficial é modelado a partir das equações de Saint-Venant, através de equações diferenciais parciais deduzidas pela primeira vez por Saint-Venant (1871). Essas equações descrevem o fluxo não permanente e não uniforme em canal aberto unidimensional, as quais são formadas pela equação da continuidade e da quantidade do movimento. Nesse sentido, as equações de Saint-Venant descrevem o escoamento superficial e a concentração em função do tempo e espaço (WOOLHISER et al., 1990; AL-QURASHI et al., 2008; GALINA et al., 2018).

Lagadec et al. (2016) definem o escoamento superficial como um processo hidrológico que pode gerar grandes mudanças nas bacias, do tipo: erosão do solo, inundações de rios e outros que afetam o ambiente através da perda de solo e a transferência de poluentes contidos nos solos. Nesse contexto, na medida em que uma bacia hidrográfica vai sendo urbanizada, também vai ocorrendo o aumento do escoamento superficial. Por outro lado, Mirzaei et al. (2016) citam que, para prever

inundações são necessários dados precisos de escoamentos superficiais. Nesse caso, o conhecimento de hidrogramas de eventos de cheias é importante.

O estudo do escoamento superficial nas bacias é visualizado através de hidrogramas (Figura 3), nos quais as respostas das bacias hidrográficas às chuvas são visualizadas e analisadas. Os hidrogramas representam o volume escoado no tempo. O escoamento é influenciado pela interação de vários fatores e parâmetros, tais como: precipitações, intensidade e duração, umidade do solo antecedente, relevo, propriedades do solo, uso da terra e as ações antrópicas.

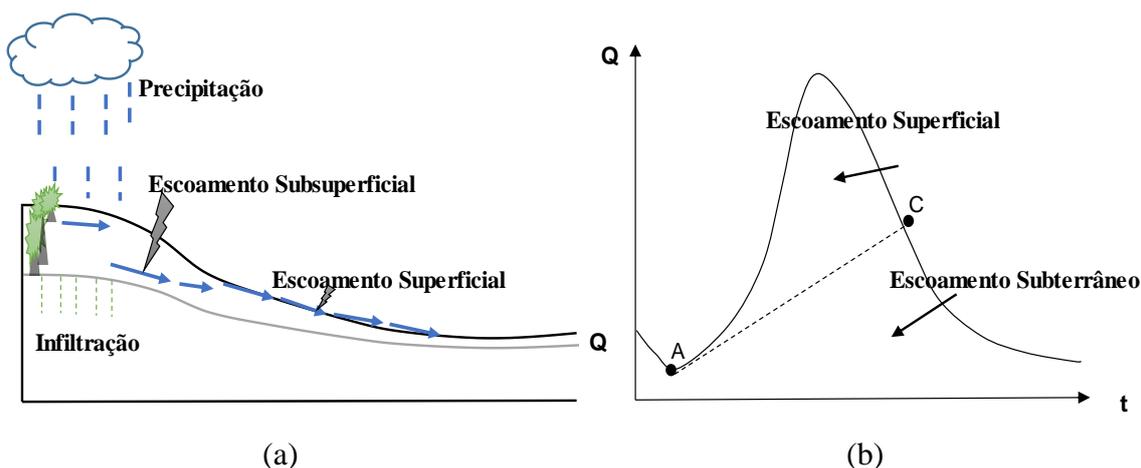


Figura 3 – Esquematização do processo de escoamento: (a) Esboço da definição física; (b) Hidrograma típico

## 2.6.- ESTUDOS DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS DA AMAZÔNIA

Existem estudos utilizando imagens de sensoriamento remoto na modelagem da produção de sedimentos; como, por exemplo, os estudos desenvolvidos na pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, Capitão Poço, Pará, sendo avaliada a aplicação da MUSLE. Os resultados obtidos através da MUSLE foram comparados a dados medidos de produção de sedimentos (CARIELLO et al., 2014). Santos et al. (2015) analisaram o potencial de produção de sedimentos via dois modelos empíricos (USLE e Langbein-Schumm) também na bacia do Igarapé da Prata. Os autores realizaram uma análise comparativa entre os modelos com dados morfoclimáticos da bacia. Os resultados indicaram a superestimação da produção de sedimentos da USLE em relação ao modelo de Langbein-Schumm, o qual apresentou resultados mais próximos aos dados observados.

## 2.7.- PESQUISAS ENVOLVENDO BACIAS HIDROGRÁFICAS E A MODELAGEM

Existe uma grande coleção de trabalhos referente a modelagem hidrossedimentológica em diferentes bacias hidrográficas (GOODRICH et al., 2012).

Apresenta-se alguns dos trabalhos mais citados na literatura na Tabela 2.

Tabela 2 – Detalhes sobre algumas pesquisas utilizadas no estudo

	<b>Estudo</b>	<b>Localização</b>	<b>Pontos principais</b>
Abdalla et al., 2022	Hydrological models simulation in agricultural watershed of Wadi Kharouba in North-Western Coast Region - Egypt	Wadi Kharouba, Egipto	O modelo K2/ARCSWAT foi utilizado para prever a perda dos nutrientes do solo. Os procedimentos foram realizados com monitoramento meteorológico e análise de satélite em uma sub-bacia.
Korgaonkar et al., 2020	Global sensitivity analysis of KINEROS2 hydrologic model parameters representing green infrastructure using the STAR-VARS framework	Sierra Vista, Arizona, USA	Os resultados indicam que a sensibilidade dos parâmetros do K2 segue as tendências com base na intensidade e duração da precipitação.
An et al., 2019	KINEROS2-based simulation of total nitrogen loss on slopes under rainfall events	HeLinGe'Er, Hohhot, China	O K2 tem boa aplicabilidade em parcelas de ambientes áridos e semiáridos, apresentando um bom desempenho simulando a perda total de nitrogênio do solo em escala de parcelas de 20 m de comprimento; sendo um primeiro passo na simulação de perdas de nutrientes do solo nas bacias.
Nguyen et al., 2015	Flash Prediction by Coupling KINEROS2 and HEC-RAS models for Tropical Regions of Northern Vietnam	The region of North Vietnam	O K2 foi acoplado ao HEC-RAS para predição de cheias em regiões tropicais. O K2 não conseguiu estimar com precisão o nível da água dos rios e a vazão, critérios importantes para identificar cheias.
Kennedy et al., 2013	Using the KINEROS2 Modeling Framework to	Sierra Vista, Arizona, USA	O K2 foi aplicado a uma bacia semiárida discretizada com diferentes níveis. No estudo baseado nos testes de discretização foi observado que a

	Evaluate the Increase in Storm Runoff from Residential Development in a Semiarid Environment		geometria da bacia pode ser representada de maneira simplificada. As simulações precisas do modelo dependem da determinação de um valor ótimo dos parâmetros, por exemplo, o Ks.
Al-Qurashi et al., 2008	Application of the Kineros2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman	Wadi-Ahin, Oman	Nesse artigo, foram avaliadas as causas das respostas chuva-vazão para cenários áridos e semiáridos. Também foi analisada a sensibilidade dos parâmetros que influenciam o desempenho do escoamento máximo. As incertezas do K2 foram analisadas através do Método de Monte Carlo via cadeias de Markov.
Azevedo et al., 1997	Kinematic-wave model in the real-time solution of the inverse furrow irrigation problem	-	Os autores, baseados na equação da onda cinemática, desenvolveram um modelo matemático computacional, para simular a fase de irrigação do solo, como um processo de otimização não linear de solução do problema inverso na irrigação por sulco em declive.

## 2.8.- PROBLEMA DIRETO (PD)

Segundo Martinez (2009) os problemas diretos são aqueles que consideram as informações necessárias (dados conhecidos, causas diretas, informações de entrada) em um processo bem determinado, é estável e leva a uma única solução. Assim, tem-se como exemplos: (a) um caso de saúde, dada uma doença qualquer; numerar os sintomas é um problema direto e mais prático; (b) outro caso na hidrologia; dada as informações de precipitações, fazer uma simulação da vazão de água é também um problema direto (Figura 4). No entanto, no caso (a), é muito complexo definir uma doença exata de um paciente, só considerando os sintomas; o problema necessita de vários tipos de análises e critérios de especialistas. No caso (b), a simulação da vazão de água é considerada complexa para identificação dos valores ótimos dos parâmetros físicos influentes na saída do escoamento (ARAUJO et al., 2013).

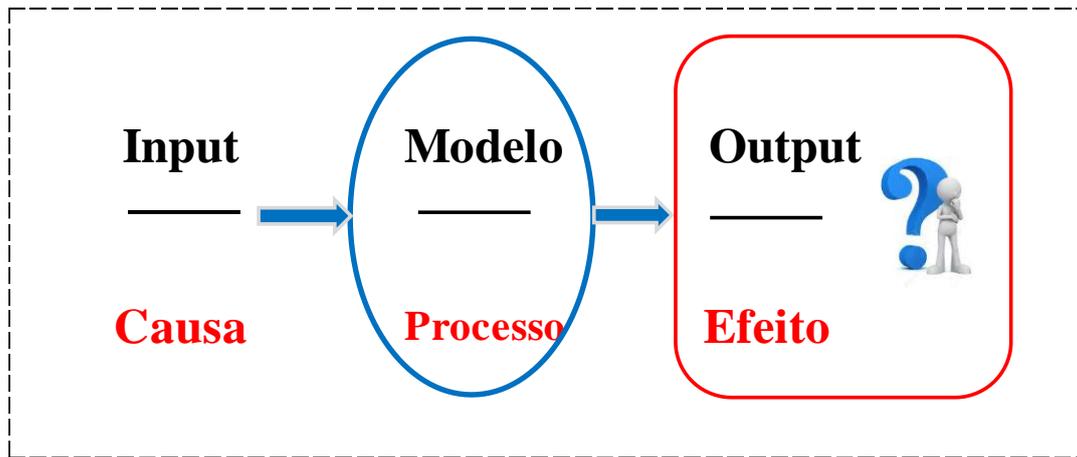


Figura 4 - Desenho esquemático dos problemas diretos

## 2.9.- PROBLEMAS INVERSOS (PI)

Um problema inverso (Figura 5) faz uso combinado das informações disponíveis e do modelo matemático analisado, resultando em incertezas mínimas na estrutura e nos parâmetros do modelo (AZEVEDO et al., 2020; BAIA et al., 2020).

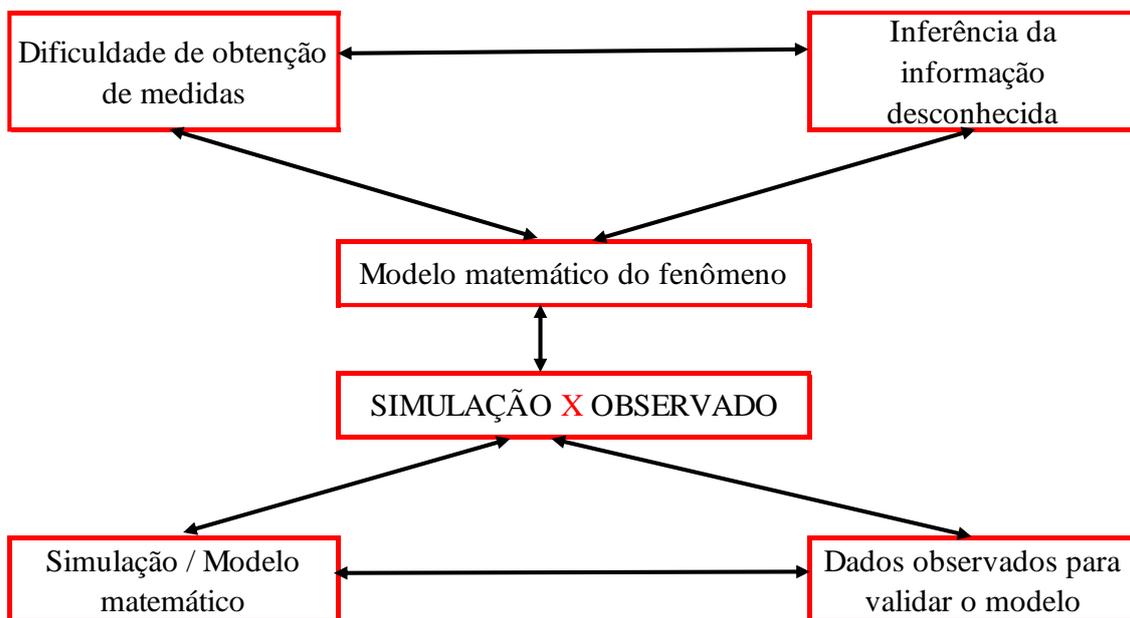


Figura 5 – Cenários típicos a utilizar problemas inversos

Na Matemática, os problemas inversos datam de 5 séculos atrás. O primeiro trabalho versando sobre o tema é de Tartaglia (1537). Os problemas inversos têm como condicionante determinar causas desconhecidas a partir de efeitos desejados ou observados (ENGL et al., 1996). Os problemas inversos fazem uso otimizado das

informações disponíveis, em quanto analisam o nível de complexidade do modelo suportado pelos dados observados e simulados (WAGENER et al., 2001; AZEVEDO et al., 2020).

Segundo de Menezes et al. (2020), a maioria dos estudos faz uma análise geral do processo erosivo nas bacias e outros poucos realizam uma análise mais especulativa dos resultados com modelos empíricos e físicos em comparação com os dados observados. No entanto, a solução de problemas inversos dentro de uma abordagem Bayesiana combina as informações provenientes dos dados observados e do modelo matemático simultaneamente (AZEVEDO et al., 2020). Assim, consegue-se representar o cenário mais próximo ao real. Como caracterização da solução de um problema inverso, detalha-se, a seguir, a técnica de inferências bayesianas.

### 2.9.1. Inferências Bayesianas

Na abordagem bayesiana, através da teoria da inversão estatística, o objetivo é extrair todas as informações e incertezas acerca das variáveis do modelo estudado, com o intuito de se estimar parâmetros e variáveis de estado a partir de dados observáveis em um intervalo de confiança (AZEVEDO et al., 2020). Kaipio e Somersalo (2006) destacaram que nas inferências bayesianas todas as variáveis são tratadas como aleatórias. Nesse sentido, a inferência bayesiana é fundamentada na distribuição de probabilidade a priori [ $\pi(P)$ ]. Assim, após a observação dos dados amostrais, é possível construir a distribuição de probabilidade a posteriori [ $\pi(P|C)$ ] – (AZEVEDO et al., 2020). Nesse sentido, aplica-se o Teorema de Bayes (Equação 3).

$$\pi(P|C) = \frac{\pi(P)\pi(C|P)}{\pi(C)} \quad (3)$$

Onde P e C indicam o parâmetro e o conjunto de dados observados, respectivamente. O termo  $\pi(C|P)$  é a função de verossimilhança e denota a informação sobre os parâmetros a partir dos dados observados para cada possível valor de P (distribuição amostral), enquanto que o termo  $\pi(P)$  representa a distribuição dos dados. A distribuição de probabilidade a posteriori  $\pi(P|C)$  pode ser escrita de acordo com a Equação (4).

$$\pi(P|C) \approx \pi(P)\pi(C|P) \quad (4)$$

Considerando que os erros das variáveis medidas sejam gaussianos, não correlacionados, aditivos e independentes (BECK & ARNOLD, 1977), é possível calcular a função de verossimilhança através da Equação (5) – (ÖZISIK & ORLANDE, 2000).

$$\pi(C|P) = (2\pi)^{1/2} |W|^{1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2} [C^{med} - C^{med}(P)]^T W^{-1} [C^{med} - C^{med}(P)]\right\} \quad (5)$$

Exemplificando para a pesquisa, a análise bayesiana supõe que o conjunto de dados de lâmina de água seja  $h = \{h_1, h_2, h_3, h_4, \dots, h_N\}$  e  $C_s = \{C_{s1}, C_{s2}, C_{s3}, C_{s4}, \dots, C_{sN}\}$  para o conjunto de dados da produção de sedimento, os quais são obtidos a partir de modelos estabelecidos [K2 e modelo direto (Equação da onda cinemática e Equação do balanço de massa) ] e cada um depende de um grupo de parâmetros particulares. As informações prévias dos parâmetros são de fundamental importância e, além disso, as incertezas podem ser maiores ou menores, dependendo dos desvios inerentes às medidas ou ao modelo.

### **2.9.1.1.- Método de Monte Carlo via cadeias de Markov (MCCM)**

O método de Monte Carlo via cadeia de Markov é uma técnica bayesiana que pode ser utilizada para a amostragem e caracterização da solução de um problema inverso (KAPIO & SOMERSALO, 2006). Uma cadeia de Markov é um tipo de processo estocástico  $(h_0, h_1, h_2, h_3 \dots h_i)$ , no qual a distribuição  $h_i$  depende apenas de  $h_{i-1}$ . Ou seja, dado um comportamento atual, a probabilidade de qualquer comportamento futuro do processo não é alterada pelo conhecimento adicional sobre seu comportamento passado (AZEVEDO et al., 2020). Assim, a ideia é gerar valores para a variável aleatória  $h$  através de iterações contínuas; criando uma distribuição para o parâmetro  $P$ , até atingir uma convergência estável. Ao gerar uma sequência com muitos valores simulados, os mesmos são usados para interpretar as características da distribuição de probabilidade a posteriori obtida na etapa experimental ou observada.

O propósito do método de MCCM é que, ao passo que o número de iterações aumente, os pontos iniciais (período de aquecimento) sejam esquecidos e a

convergência da cadeia de Markov ocorra de maneira gradual para uma distribuição de equilíbrio (AZEVEDO et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020; MOURA et al., 2021; AMADOR et al., 2022; MOURA et al., 2022). A questão deste método reside então na construção de algoritmos que gerem cadeias de Markov cuja distribuição convirja satisfatoriamente para a distribuição de interesse.

Os algoritmos mais comumente utilizados são o Amostrador de Gibbs (GEMAN & GEMAN, 1984) e o Metropolis-Hasting (METROPOLIS & ULAM, 1949; HASTINGS, 1970; NUNES et al., 2021; VIEGAS et al., 2022; NUNES et al., 2022), sendo esse último empregado no presente trabalho. Na Figura 6 é mostrado um desenho esquemático geral dos problemas inversos (MARTINEZ, 2009).

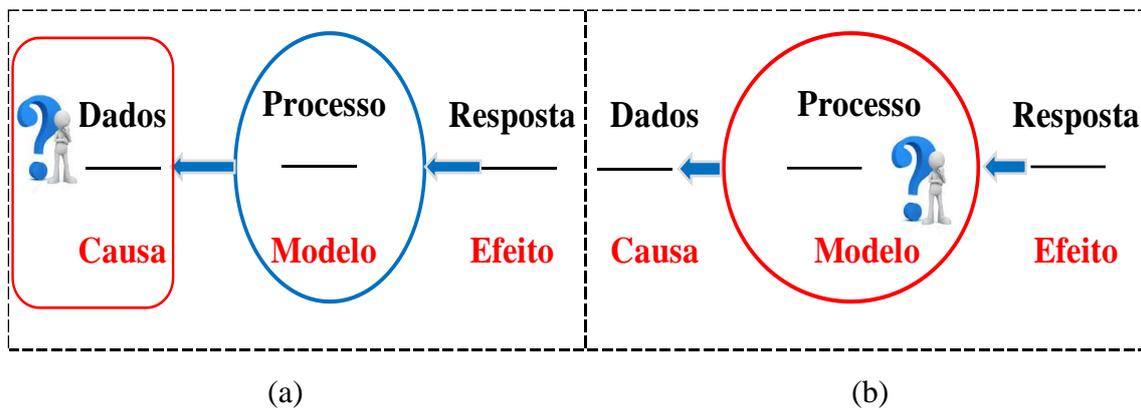


Figura 6 - Desenho esquemático dos problemas inversos: (a) de causalidade e (b) de especificação

## CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1.- ÁREA DE ESTUDO

A estação fluviométrica Marambaia (Cód. 31600000) monitora as vazões diárias da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, que tem área de drenagem de 32,7 km<sup>2</sup> e está situada no município de Capitão-Poço, Estado do Pará (ANA, 2021). Neste ponto está localizada uma estação sedimentométrica, que foi utilizada para coletar os dados observados (CARRIELLO et al., 2014; BARBOSA, 2021) desenvolvidos para a bacia analisada. A altitude média desta bacia hidrográfica é de 79 m, mínima de 46 m, e máxima de 104 m (Figura 7). A declividade é classificada como suave ondulada, pois a média é de 3,45% (USGS, 2021; EMBRAPA, 1999). O tempo de concentração é estimado em 2,2 horas (CARRIELLO et al., 2014). A bacia analisada foi selecionada como área de estudo por interesse no aspecto social, econômico e ambiental com predominância de agricultura e pastagem, e com base em estudos disponíveis na literatura (CARRIELLO et al., 2014; DA SILVA E SILVA et al., 2020; BARBOSA, 2021).

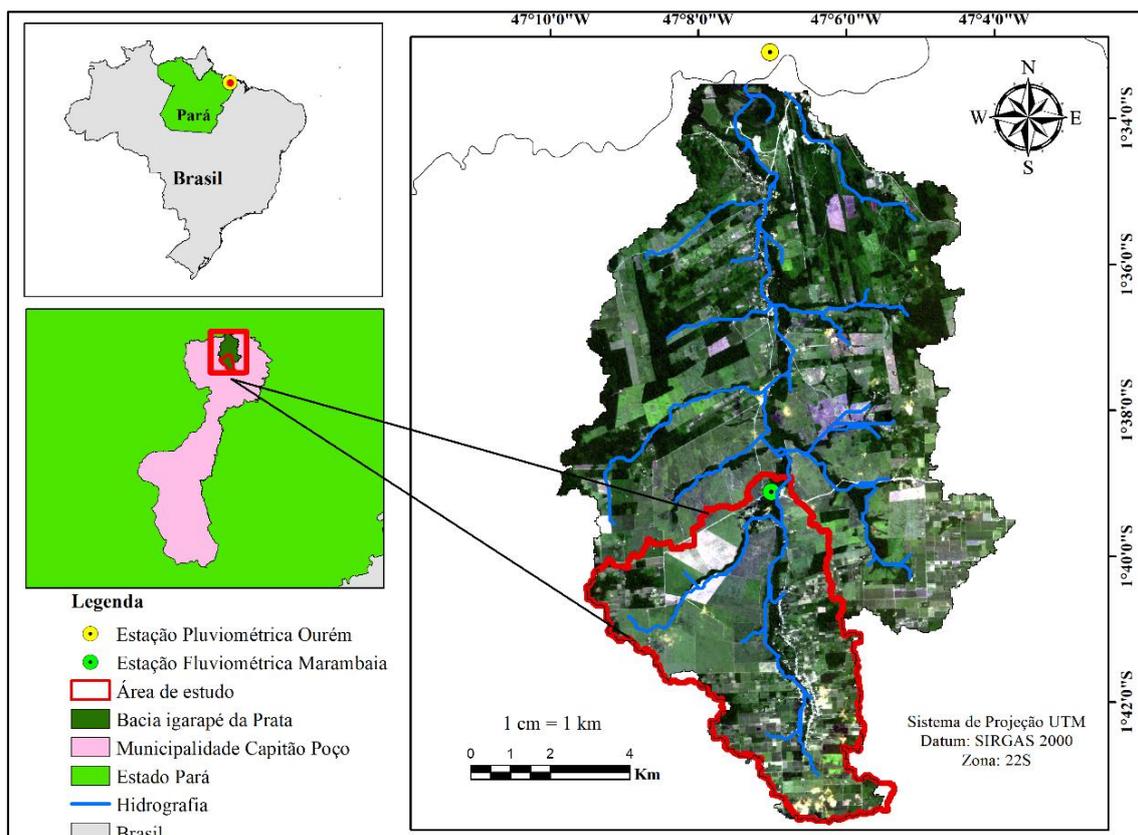


Figura 7 - Localização da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata

As classes de solos inseridas na bacia do Igarapé da Prata são o latossolo amarelo distrófico e o argissolo vermelho-amarelo distrófico (IBGE, 2021). Sartori et al. (2005) comentam que esta classe pedológica é marcada por altas profundidades e condutividade hidráulica. Porém, o uso do solo é predominantemente destinado à pastagem, com vegetação forrageira herbácea de espécies cultivadas (INPE, 2014). O clima da área de estudo é definido como Am, conforme a classificação Köppen-Geiger (KÖPPEN, 1936; GEIGER, 1954), o que representa um clima tropical com altos índices pluviométricos, e baixa variabilidade na temperatura, as médias das temperaturas mínimas, médias e máximas são iguais a 21,4°C, 26,2°C e 32,7°C, respectivamente (SANPAIO & BLANCO, 2020). A variabilidade intra-anual da precipitação na bacia do Igarapé da Prata é caracterizado por dois períodos distintos (MORAES et al., 2005). O período chuvoso é compreendido entre os meses de janeiro e julho, e o período de estiagem é compreendido entre os meses de agosto a dezembro, conforme a normal climatológica observada na estação Ourém - Cód. ANA-147016 (Figura 7).

A estação Ourém está localizada a 15 km de distância da estação Marambaia, na direção norte e, conforme preconiza a OMM (2014), esse raio não pode ser maior que 100 km. Logo, com essa distância respeitada, os dados de chuva são representativos e podem ser relacionados com os dados de vazão. As duas estações fazem parte do sistema HIDROWEB (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

O município de Capitação Poço possui uma população estimada de 56.332 habitantes com uma densidade demográfica de 19,42 habitantes por km<sup>2</sup>. Em 2021 a proporção de pessoas ocupadas em relação à população total era de 9,3%. Referente ao número de estabelecimentos para educação (2021) temos: de ensino fundamental com 103 escolas e com 647 docentes, e de ensino médio com 13 escolas e 171 docentes. Possui comércio forte, que é responsável por quase 50% do PIB da Cidade (IBGE, 2023). Além disso, O município contém uma expressiva produtividade, contendo plantações de Bananas, Coco-da-Baía, Laranja, Maracujá, Pimenta do Reino), Arroz, Feijão, Malva, Mandioca, Milho e Açaí (IBGE, 2023).

### 3.2.- MODELO DIRETO (MD) – MODELO DA ONDA CINEMÁTICA/ BALANÇO DE MASSA

O modelo direto, ou seja, o modelo da onda cinemática estabelece a solução da lâmina de água, que escorre na superfície da bacia. A Figura 8 resume o modelo físico da onda cinemática. O modelo é baseado na equação da continuidade e está apresentado nas Equações (6-7) (LIGHTHILL & WHITHAM, 1955; CHOW, 1959; SINGH & REGL, 1983; CHOW et al., 1988; WOOLHISER et al., 1990; SMITH et al., 1995; KIM et al., 2014; GALINA et al., 2018; HARCHE et al., 2021).

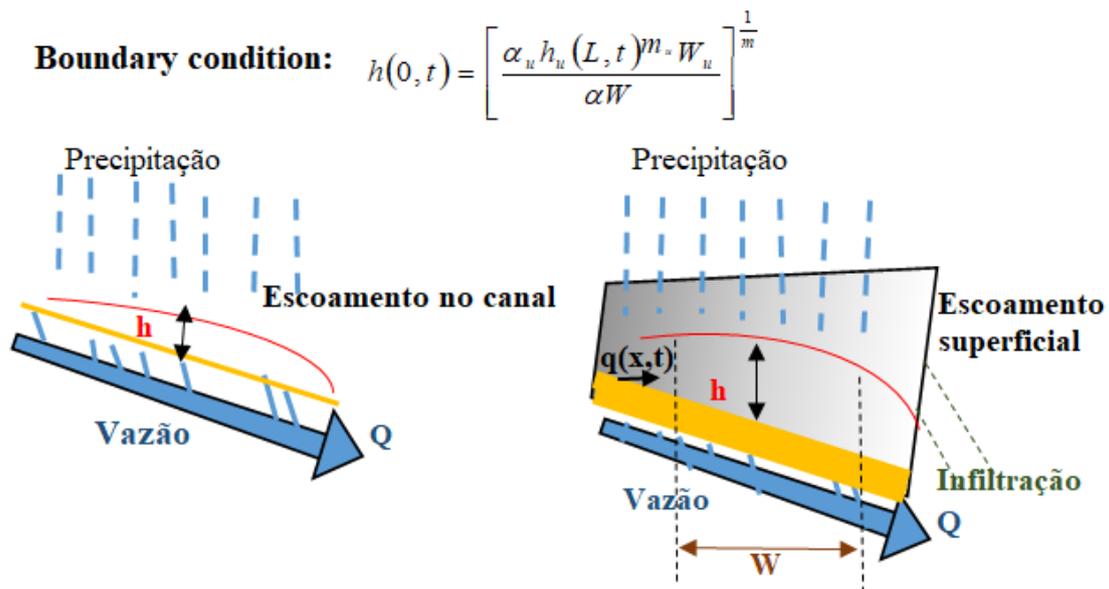


Figura 8 - Representação do modelo físico da onda cinemática

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (6.a)$$

Sendo Q a descarga por unidade de largura (mm/h), h o volume de água armazenado por unidade de área (lâmina de água escoada em mm) e q(x,t) a taxa de escoamento lateral (m/s). A descarga Q pode ser representada pela Equação (6.b) (SINGH & REGL, 1983; WALKER & HUMPHERYS, 1983).

$$Q = \alpha h^m \quad (6.b)$$

$$\alpha = (\rho_1 S)^{1/2} / n \text{ e } m = \rho_2 \quad (6.c-d)$$

Sendo  $\alpha$  e  $m$  parâmetros do solo definidos de acordo com coeficiente de Manning,  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são constantes ajustadas aos dados observados através do método de Monte Carlo via cadeia de Markov,  $S$  é a declividade,  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning. Combinando-se as Equações (6.a-d), tem-se a Equação (7).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t) \quad (7)$$

As Equações (6-7) possuem as seguintes condições de contorno (Equações 8 e 9) e condição inicial (Equação 10) (SINGH & REGL, 1983; WOOLHISER et al., 1990; SMITH et al., 1995; GALINA et al., 2018). Se o limite a montante for uma divisão de escoamento, a condição de contorno é (Equação 8).

$$h(0, t) = 0; \quad (8)$$

$$h(0, t) = \left[ \frac{\alpha_u h_u(L, t)^{m_u} W_u}{\alpha W} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (9)$$

$$h(x, 0) = 0; \quad 0 \leq x \leq L \quad (10)$$

Sendo  $h_u(L, t)$  a profundidade na fronteira do plano contribuinte no tempo  $t$ ,  $u$  o índice referente à superfície a montante,  $L$  o comprimento (m),  $W$  a largura do plano a jusante (m). A Equação (9) só é aplicada, se o plano estiver contribuindo a montante para outro plano na bacia hidrográfica. É importante ressaltar a dificuldade da determinação da taxa de escoamento lateral  $q(x, t)$  no processo de escoamento e produção de sedimentos.

O modelo direto utilizado para estimativa da produção de sedimento está apresentado nas Equações (11-14) e os processos simulados incluem a erosão de respingos, erosão hidráulica, deposição e transporte de sedimentos (BENNETT, 1974; SINGH & REGL, 1983; WOOLHISER et al., 1990; SMITH et al., 1995).

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x, t) = q_s(x, t) \quad (11)$$

Sendo  $A$ , a área da seção transversal do plano ( $m^2$ ),  $C_s$  a concentração de sedimento na água ( $m^3/m^3$ ),  $Q$  a vazão ( $m^3/s$ ), e a taxa de erosão do solo ( $m^2/s$ ) e  $q_s$  a taxa de entrada lateral de sedimento por unidade de comprimento do canal ( $m^3/s/m$ ). A taxa de erosão do solo ( $e$ ) pode ser positiva (erosão) ou negativa (deposição), sendo modelado por dois componentes principais: a erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva no solo ( $e_s$ ), e a erosão hidráulica ( $e_h$ ), e pode ser representada pela Equação (12).

$$e = e_s + e_h \quad (12)$$

A Equação (12) é composta por dois componentes: erosão por impacto das gotas de chuva ( $e_s$ ) – (Equação 13) e erosão hidráulica ( $e_h$ ) – (Equação 14) (BENNETT, 1974; SINGH & REGL, 1983; WOOLHISER et al., 1990; SMITH et al., 1995).

$$e_s = c_f k(h) i^2 \quad (13)$$

$$e_h = C_g (C_m - C_s) A \quad (14)$$

Sendo  $C_f$  o coeficiente a ser determinado experimentalmente ou por calibração,  $k(h)$  é 1,0 antes do escoamento e seu mínimo é 0,0 para escoamento muito profundo,  $i$  a intensidade da precipitação,  $C_m$  a concentração de equilíbrio na capacidade de transporte,  $C_s$ :  $C_s(x,t)$  a concentração real de sedimentos no escoamento;  $C_g$  é o coeficiente da taxa de transferência de sedimentos medido em segundos.

### 3.3.- SOLUÇÃO DO MODELO DIRETO - MÉTODO DAS LINHAS (MOL)

O modelo direto, aplicado às Equações (6-14), foi resolvido com o objetivo de simular a resposta da lâmina de água e a taxa de escoamento lateral da bacia hidrográfica usando o método das linhas (MOL – Figura 9). Neste método, a Equação diferencial Parcial é discretizada e transformada em um sistema de equações diferenciais ordinárias acopladas (OYMAK & SELCUK, 1996; SADIKU & GARCIA, 2000; ISMAIL et al., 2007; SHAKERI & DEGHAN, 2008; SCHIESSER & GRIFFITHS, 2014; ROKNUJJAMAN & ASADUZZAMAN, 2018).

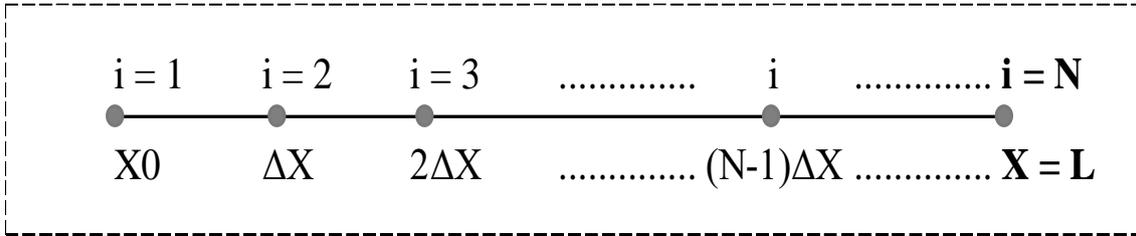


Figura 9 - Representação do Método das Linhas (MOL)

Aplicando diferenças centrais e considerando diferença atrasada no termo da taxa de entrada lateral, a equação diferencial parcial descrita nas Equações (6-14) é descrita pelo seguinte sistema de equações diferenciais ordinárias acopladas.

Considerando a estimativa da lâmina de água,

$$\frac{\partial h_i}{\partial t} = q(x_i, t) - \alpha m h_i^{m-1} \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta x} \quad ; \quad 1 < i < N \quad (15.a)$$

Com as seguintes condições de contorno,

$$i = 1 (h = h_0) \quad ; \quad h_i = \left[ \frac{\alpha_u h_u(L, t)^{m_u} W_u}{\alpha W} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (15.b)$$

e inicial,

$$h_i = 0 \quad ; \quad 1 < i < N \quad (15.c)$$

Considerando a estimativa da produção de sedimentos,

$$\frac{\partial (CS_i)}{\partial t} = q(x_i, t) - \alpha m h_i^{m-1} \frac{CS_i - CS_{i-1}}{\Delta x} + e(x_i, t) \quad (16)$$

A modelagem do escoamento lateral ou taxa de entrada lateral  $q(x,t)$  foi elaborada através do MD, pois medidas diretas não estão possíveis. Tentativas de representar esta informação foram considerar sendo uma constante (SINGH & REGL, 1983) ou considerar como uma função pré-definida de diferenças entre a taxa de chuva e a taxa de infiltração (KIM et al., 2014; AN et al., 2019). Devido a esta dificuldade, o escoamento lateral  $q(x,t)$  foi modelado através de problemas inversos como uma série de Fourier (Equação 17) para que dependesse apenas da variável independente, tempo:

$$q_s \approx q(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t) + B_1 \cos(\omega t) + A_2 \sin(\omega t) + B_2 \sin(2\omega t) \quad (17)$$

### 3.4.- MODELO KINEROS2 (K2)

O K2 (WOOLHISER et al., 1990) foi desenvolvido com o objetivo de simular respostas hidrossedimentológicas de bacias urbanas e rurais. É um modelo hidrossedimentológico cinemático, distribuído e de base física, utilizando uma rede de planos e canais que representam os cursos de água (Figura 10).

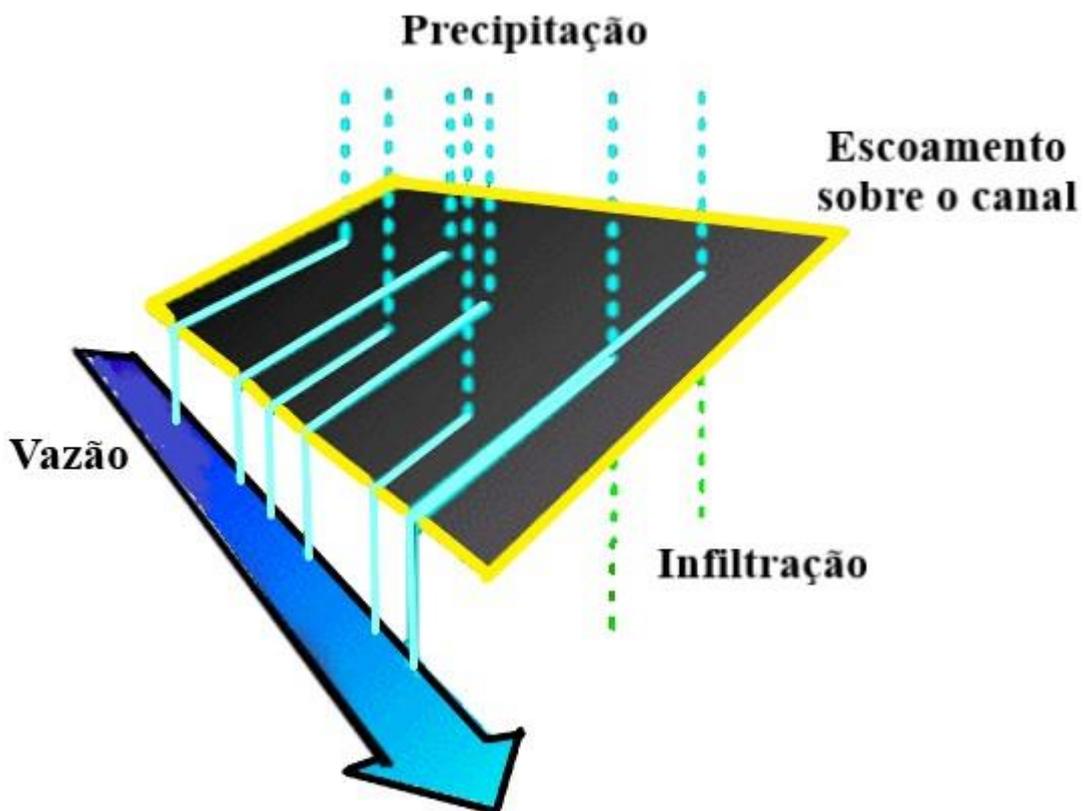


Figura 10 – Diagrama dos recursos básicos do KINEROS2

Fonte: Adaptado de Woolhiser et al. (1990)

O K2 é um modelo físico que usa as equações do modelo da onda cinemática para representar o escoamento sobre planos retangulares e canais abertos, através do Software K2 da plataforma da USDA- (<https://www.tucson.ars.ag.gov/KINEROS/>). O software utiliza dois tipos de arquivos: de entrada (considera os parâmetros que descrevem as características geométricas, hidráulicas e de infiltração da bacia); de precipitação (considera dados pluviométricos da bacia) e de saída (mostra as respostas da taxa de chuva, escoamento superficial e produção de sedimentos).

No K2, o escoamento superficial é descrito pelas equações diferenciais da continuidade, e o transporte e disposição de sedimentos nestes planos e canais são resolvidos pela técnica de diferenças finitas. O modelo pode ser utilizado para determinar os efeitos de vários recursos artificiais, tais como desenvolvimentos urbanos, pequenos reservatórios de detenção, ou canais revestidos, hidrogramas de cheias e produção de sedimentos. Assim, o modelo de escoamento e erosão cinemático é orientado a eventos que descrevem os processos físicos como seguem.

### 3.4.1.- Infiltração

O K2 possui um modelo de infiltração que permite a especificação mais detalhada do perfil do solo para cada elemento hídrico, incluindo a especificação das características do leito para um canal de infiltração (WOOLHISER et al., 1990). Para calcular a infiltração através do modelo K2, utiliza-se Equação (18).

$$fc = Ks \left[ 1 + \frac{\alpha}{e^{\alpha/B} - 1} \right] \quad (18)$$

Sendo:

*fc*: Taxa de infiltração ou capacidade de infiltração (m/s);

*Ks*: Condutividade hidráulica saturada efetiva (m/s);

$\alpha$ : Parâmetro do solo, aproxima-se de 0 para areia; 1 para um solo que contém uma combinação desejável de areia, silte e argila bem uniforme. O modelo K2 adota  $\alpha = 0.85$ ;

*I*: Profundidade infiltrada (m);

*B*:  $(G+h) (O_s - O_i)$  ou  $G\phi(S_{max} - S_i)$ , déficit de saturação do solo;

*G*: Potencial efetivo de capilaridade (mm);

*h*: Altura de água na superfície do solo (m);

$\Delta\theta$ :  $(\theta_s - \theta)$ , Diferença da umidade de saturação do solo ( $m^3/m^3$ );

$\phi$ : Porosidade;

Os parâmetros físicos de condutividade hidráulica saturada efetiva (*Ks*), o potencial de capilaridade (*G*), a porosidade ( $\phi$ ), índice de distribuição dos tamanhos dos poros ( $\lambda$ ) e a saturação relativa inicial do solo (*Si*) variam de acordo com o tipo de solo (AL-QURASHI et al., 2008; KENNEDY et al., 2013; KIM et al., 2014).

### 3.4.2.- Transformação Chuva-Escoamento Superficial nos Planos

Em uma escala muito pequena, o escoamento nos planos é um processo tridimensional extremamente complexo. Em uma escala maior, pode ser visto como um processo unidimensional em direção da maior declividade. Para o cálculo do escoamento, o K2 calcula a infiltração para simular o processo de transformação da precipitação em escoamento, utilizando as equações da onda cinemática (Equações 6-10); que são simplificações das equações de Saint-Venant, as quais não preservam todas as suas propriedades, levando apenas em consideração a gravidade e o atrito (PARLANGE et al., 1982).

### 3.4.3.- Erosão nos Planos

O K2 pode simular o movimento de solo erodido junto com o movimento das águas superficiais. A dinâmica dos sedimentos, é representada pela equação de balanço de massa (Equação 11) - (BENNETT, 1974; WOOLHISER et al., 1990).

A erosão por impacto das gotas de chuva é estimada pela Equação (19);

$$e_s = C_f e^{-C_h h} i^2 \quad (19)$$

Sendo:

$C_f$ : coeficiente a ser determinado experimentalmente ou por calibração, que está relacionado às propriedades do solo e da superfície;

$e^{-C_h h}$ : fator que representa a redução na erosão por impacto das gotas de chuva devido ao aumento da lâmina de água. É definido como 1 antes do início do escoamento e 0 para escoamentos com altas lâminas;

$i$ : intensidade da precipitação;

A erosão hidráulica ( $e_h$ ) é estimada como sendo linearmente dependente da diferença entre a capacidade de transporte do fluxo (concentração de equilíbrio) e a concentração real de sedimento (Equação 20).

$$e_h = C_g (C_h - C_s) A \quad (20)$$

Sendo:

$C_g$ : coeficiente da taxa de transferência de sedimentos medido em segundos. O valor de  $C_g$  pode ser calculado pelas Equações (21.a) e (21.b);

$C_h$ : concentração de equilíbrio na capacidade de transporte;

$C_S$ :  $C_S(x,t)$ : concentração real de sedimentos no fluxo;

$A$ : área ( $m^2$ );

Quando ocorrer a deposição  $C_g$  será igual à velocidade de sedimentação das partículas da profundidade hidráulica ( $h$ );

Para  $C_S \leq C_h$  (erosão);

$$C_g = C_o \frac{v_s}{h} \quad (21.a)$$

Para  $C_S \geq C_h$  (deposição);

$$C_g = \frac{v_s}{h} \quad (21.b)$$

Sendo:

$C_o$ : coeficiente que reflete à coesão do solo;

$v_s$ : velocidade de queda da partícula (m/s);

O K2 utiliza a fórmula de capacidade de transporte de Engelund e Hansen (1967), com a inclusão de um limite crítico do valor da potência unitária do escoamento  $\Omega = uS$  (unit stream power), igual a 0.004 m/s, onde  $u$  é a velocidade do escoamento (m/s) e  $S$  é a declividade, para estender a sua aplicabilidade a escoamentos rasos. O cálculo da concentração de sedimentos na capacidade de transporte é determinado pela Equação (21.c);

$$C_h = \frac{0,05}{d(S_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g} (\Omega - 0,004)} \quad (21.c)$$

Sendo:

$S$ : declividade;

$h$ : profundidade do escoamento (m);

$d$ : diâmetro do sedimento (mm);

$S_s$ : densidade relativa do sedimento ( $\text{g/cm}^3$ );

$g$ : aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );

A velocidade de sedimentação ( $v_s$ ) das partículas é calculada a partir da densidade e tamanho das partículas, assumindo que as partículas têm características de arrasto e velocidades de queda terminais semelhantes às de esferas (FAIR & GEYER, 1954). Esta relação é calculada pela Equação (22.a) de Woolhiser et al. (1990).

$$v_s^2 = \frac{4}{3} \frac{q(S_s - 1)d}{C_D} \quad (22.a)$$

Sendo:

$g$ : aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );

$S_s$ : densidade relativa do sedimento;

$C_D$ : coeficiente de arrasto da partícula, que é uma função do número de Reynolds,

$C_D$  é calculado pela Equação (22.b);

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0,34 \quad (22.b)$$

Sendo:

$R_n$ : número de Reynolds, calculado através da Equação (22.c);

$$R_n = \frac{v_s d}{\nu} \quad (22.c)$$

Sendo:

$\nu$ : viscosidade cinemática da água ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$d$ : diâmetro do sedimento (m);

$v_s$  é encontrada resolvendo-se simultaneamente as Equações (22.a), (22.b) e (22.c).

A simulação do transporte de sedimentos para os canais é realizada de maneira semelhante à simulação do transporte de sedimentos nos planos. A principal diferença nas equações é que a erosão por impacto das gotas de chuva é desprezada, e o termo  $q_s$

(Equação 11) torna-se importante na representação da entrada de escoamento lateral. Segundo Bieger et al. (2014), a previsão incorreta de cargas de sedimentos por ferramentas combinadas com os modelos físicos e/ou empíricos revela a necessidade de mais pesquisas no campo da modelagem hidrológica.

### 3.5.- DADOS DE ENTRADA DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO

Dada a disponibilidade de dados observados obtidos de trabalhos experimentais da pequena bacia hidrográfica analisada (CARRIELLO et al., 2014; BARBOSA, 2021), optou-se por escolher dados de produção de sedimentos dos períodos 2013 a 2014 para realização das análises. O modelo K2 foi usado para estimar a produção de sedimentos na área de estudo. Para a formação dos arquivos do modelo, são utilizados dados hidrológicos diários/máximos da bacia do Igarapé da Prata. Os dados de precipitação foram coletados no trabalho de Lima et al. (2014) e da estação pluviométrica da cidade de Ourém-PA (cód.: 00147016 - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA). Os parâmetros físicos do solo são calibrados no Software K2 por aproximações sucessivas até ser encontrado o melhor valor para cada parâmetro, de modo que representem as saídas da simulação hidrológica chuva-escoamento mais próxima do cenário real. A Figura 11 mostra a sequência representativa do K2, como segue:

- a.- Arquivo I – Arquivo de entrada (valores dos parâmetros físicos);
- b.- Arquivo II – Arquivo de Precipitação (dados dos eventos de chuva discretizados da bacia hidrográfica); e
- c.- Arquivo III – Arquivo de saída (resultados de taxa de chuva, escoamento, produção de sedimentos).

ARQUIVO I: ENTRADAS			ARQUIVO II: SAIDA							
P A R Â M E T R O S	BEGIN GLOBAL		BEGIN RG001			Tempo (min)	Chuva (mm/h)	Saída do fluxo (mm/h)	Saída do fluxo cu (m/s)	Sedimento total (kg/s)
	CLEN = 423, UNITS = METRIC		N= 21							
	DIAMS = .005, .05, .25 ! mm			TIME DEPTH						
	DENSITY = 2.65, 2.60, 2.60 ! g/cc			! (min) (mm)						
	TEMP = 33 ! deg C									
	Nele = 2									
	END GLOBAL									
	-----									
	BEGIN PLANE		P							
	ID = 1, LEN = 4000, WID = 200, SL = .005,		R							
	MANNING = .005		E							
	CV = .12, THICK = 500, SAT = .2, PR = 2		C							
	RELIEF = 2, SPACING = .3		I							
	KS G DIST POR ROCK		P							
	0.6 12.70 0.45 .38 0 ! upper layer		I							
	0.43 26.30 0.39 .32 0 ! lower layer		T							
	FRACT = 0.2, 0.6, 0.2 SPLASH = 50, COH = 0.5		A							
	Plot = H		C							
	END PLANE		Â							
	-----		O							
	BEGIN CHANNEL									
ID = 2, LAT = 1, LEN = 3000, PR = 2										
DEPTH = 1										
WIDTH = 30, SLOPE = .025, MANNING = 0.30,										
SS1 = 1.50, SS2 = 0.80										
COH = .5, FRA = 0.2, 0.6, 0.2										
PAV = 0.6										
Plot = H										
END CHANNEL										
			END							

Figura 11 - Representação de entradas e saídas no K2

Fonte: Adaptado de Woolhiser et al. (1990)

Os arquivos de entrada do modelo K2 apresentam valores adequados para os parâmetros físicos da bacia hidrográfica avaliada; parâmetros caracterizados como geométricos, hidráulicos e característicos da infiltração e erosão. Seguindo o procedimento, obteve-se para a área de estudo um arquivo de saída com observações da taxa de chuva, escoamento superficial e produção de sedimentos. No entanto, o K2 não consegue representar a taxa de escoamento lateral, variável importante nos problemas envolvendo inundação e produção de sedimentos. A partir dessa limitação, o modelo direto utilizado, aproveita os dados obtidos no K2 e aplica o método dos problemas inversos para estimar a taxa de escoamento lateral e a influência dos parâmetros otimizados para as respostas da lâmina de água. Assim, as saídas obtidas no K2, foram utilizadas como suporte do modelo direto e dos problemas inversos na estimativa e representação da taxa de escoamento lateral e a otimização dos parâmetros da modelagem para área de estudo.

Em particular, as respostas do K2 abrangem o processo de calibração dos parâmetros físicos por aproximações sucessivas até ser encontrado o melhor valor, com respostas mais próximas do cenário real. No entanto, são necessárias ferramentas e/ou procedimentos da modelagem hidrossedimentológica, que permitam uma análise detalhada do comportamento do modelo suportado pelos dados disponíveis com o

melhor desempenho e grau de confiabilidade, para avaliar cenários com limitações de dados hidrossedimentológicos (DE MENEZES et al., 2020; BENDITO et al., 2023). A partir dessa limitação, o PI pode ser considerado como uma ferramenta, que aproveita as informações disponíveis, resultando em respostas próximas do cenário real, pois pode estimar os parâmetros físicos e a taxa de escoamento lateral do processo sedimentar.

### 3.6.- MÉTODO DOS PROBLEMAS INVERSOS (PI)

Os modelos hidrológicos possuem parâmetros que não podem ser medidos de maneira direta e, portanto, são realizadas inferências para as estimativas. Neste estudo utilizou-se a técnica bayesiana do método de Monte Carlo via Cadeia de Markov (MCCM) para a estimativa dos parâmetros do modelo KINEROS2/modelo direto. Ao se resolver o modelo físico (Equações 7-11), obtém-se como resultado a lâmina de água escoada e a produção de sedimento, dependendo da variável independente, tempo. Esta variável de estado (lâmina de água e produção de sedimento) são as variáveis observáveis, da qual podem ser obtidas medidas observadas. A taxa de escoamento lateral foi representada por uma série de Fourier (Equação 17), uma vez que foi modelada usando uma estrutura Bayesiana juntamente com o MCCM, respectivamente. O MCCM é preferido em situações mais complexas. O primeiro motivo é que, mesmo com valores dos parâmetros correlacionados, é possível selecionar uma (sub) amostra de valores que não seja correlacionada. A segunda razão é que as cadeias de Markov possuem diferentes propriedades de convergência, que podem ser exploradas para obter distribuições propostas mais fáceis de tratar numericamente, quando os métodos mais gerais de amostragem por importância (por exemplo, acessibilidade-rejeição, o algoritmo Levenberg-Marquardt) não se aplicam diretamente (AZEVEDO et al., 2020).

O desenho representativo do PI é representado na Figura 12.

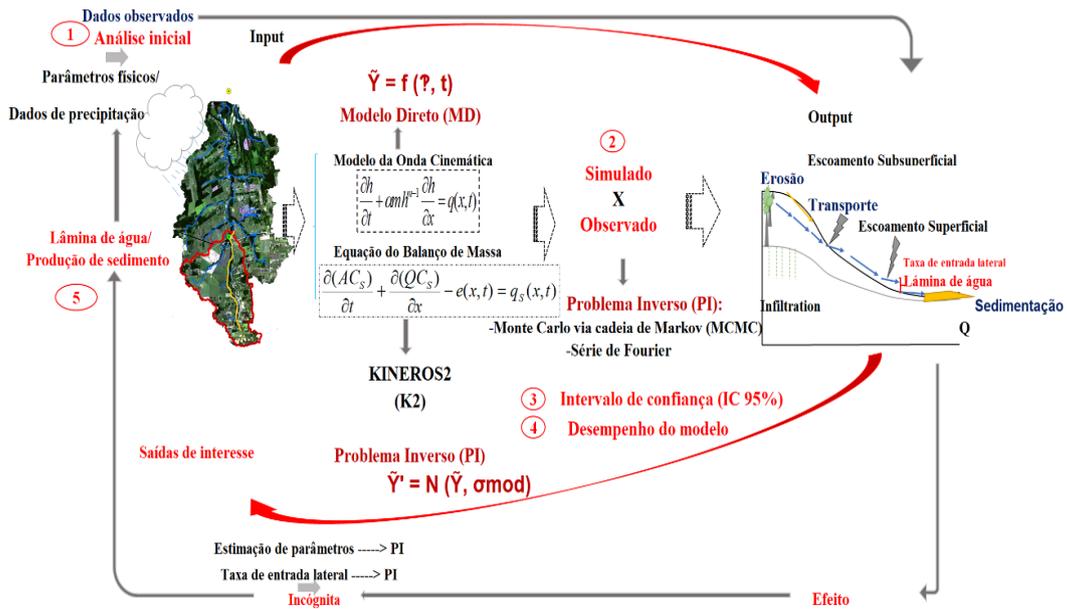


Figura 12 - Desenho representativo da modelagem hidrológica baseada no método de problemas inversos

Além disso, os PI oferecem uma estrutura analítica da complexidade do modelo em função dos dados disponíveis que vai além do simples diagnóstico dos processos físicos com uma análise de incerteza e nível de desempenho. As representações PI ajudam a compreender os processos hidrossedimentológicos (Figura 13) e permitem analisar o comportamento do K2 com graus de confiabilidades, que mais se adequam aos dados observados.

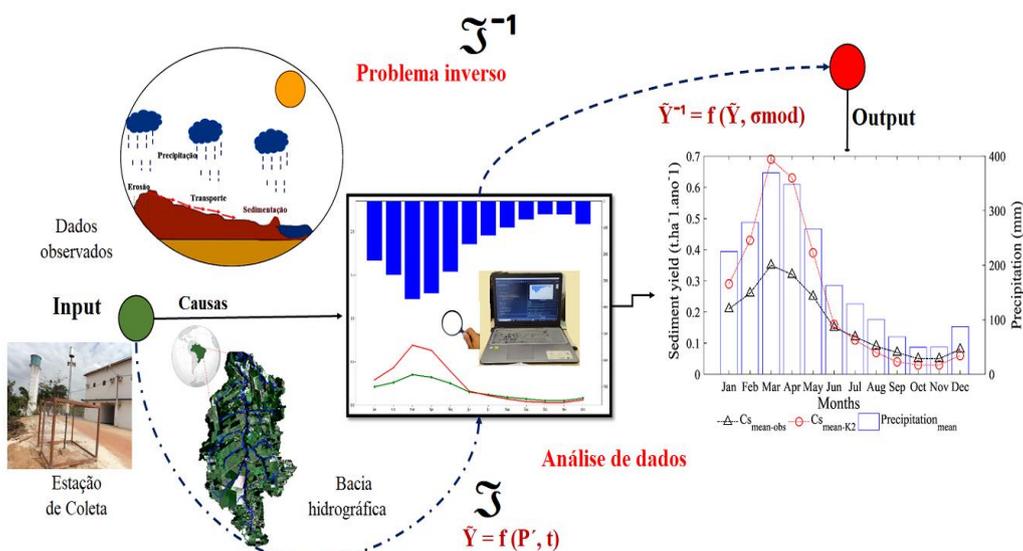


Figura 13 - Desenho esquemático dos problemas inversos na modelagem hidrossedimentológica

### 3.6.1.- Calibração e validação do modelo Kineros2

O K2 foi calibrado e validado em duas etapas. Na calibração foram considerados 6 eventos observados de precipitação e produção de sedimentos do ano de 2013. Na validação foram considerados outros 6 eventos observados de precipitação e produção de sedimentos do ano de 2014. Na Tabela 3 são mostradas as datas dos eventos, os volumes precipitados, a produção de sedimentos e as referências dos dados.

Tabela 3 - Datas dos eventos, volumes precipitados, produção de sedimentos e as referências dos dados da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata

<b>Eventos</b>	<b>Precipitação (mm)</b>	<b>Sedimento observado (t)</b>	<b>Referência</b>
06/02/2013	42.6	0.001	
21/03/2013	43.8	0.006	
30/03/2013	44.6	0.171	Carriello et al., 2014
09/04/2013	57.4	4.144	
17/04/2013	63.2	4.501	
22/04/2013	68.2	11.996	
26/06/2014	36.5	0.773	
25/07/2014	41.5	1.678	
26/09/2014	9.8	0.802	Barbosa, 2021
10/10/2014	11.8	1.771	
27/11/2014	4.3	2.270	
21/12/2014	7.8	1.651	

### 3.6.2.- Inferências Bayesianas – Monte Carlo Via Cadeias De Markov (MCCM)

Em muitos problemas não é possível a obtenção de medidas diretas, essas situações podem ser tratadas usando as informações das possíveis medições com formulação matemática (problema direto) e o conhecimento prévio dos parâmetros. Nesse caso, o problema matemático é representado pelo teorema de Bayes, sendo a distribuição a posteriori  $\pi(P \mid \text{Dados})$  considerada como a distribuição a priori  $\pi(P)$  por verossimilhança de  $\pi(\text{Dados} \mid P)$ , e sob a distribuição de probabilidade marginal  $\pi(\text{Dados})$  - (BECK & ARNOLD, 1977; KAIPIO & SOMERSALO, 2006; OLIVEIRA et al., 2020; MOURA et al., 2021; AMADOR et al., 2022; MOURA et al., 2022).

A estimativa dos parâmetros do modelo físico a partir de dados observados foi necessária para a modelagem do processo de escoamento (CANFIELD et al., 2005; AL-

QURASHI et al., 2008; KENNEDY et al., 2013; KIM et al., 2014). O método de estimação bayesiano quantifica a discrepância por um fator multiplicativo ao mesmo tempo em que são obtidas as distribuições de probabilidade de um único conjunto de parâmetros físicos.

Assim, o método do problema inverso foi aplicado ao processo físico de formação do escoamento superficial e produção de sedimento em uma pequena bacia hidrográfica. Para tanto, foram avaliados 4 eventos diferentes para modelagem hidrológica da lâmina de água e 12 eventos para produção de sedimento. Os parâmetros do modelo com problemas inversos (PI) são:  $P^T = [w \ wu \ \alpha \ \alpha u \ \Omega \ A_0 \ A_1 \ A_2 \ B_1 \ B_2 \ C_f \ i \ C_h \ C_g \ C_m \ C_s \ A]$ , sendo  $C_f$ : coeficiente a ser determinado por calibração;  $i$ : intensidade da precipitação (m/s);  $C_h$ : efetividade do amortecimento da superfície da água;  $C_m$ : Concentração de equilíbrio na capacidade de transporte;  $C_s$ : concentração de sedimentos ( $m^3/m^3$ );  $A$ : área da seção transversal do plano ( $m^2$ );  $w$ : largura do plano jusante (m);  $wu$ : largura do plano contribuinte (m);  $\alpha$  e  $\alpha u$ : parâmetros referentes a propriedades da bacia hidrográfica, incluindo: declividade:  $S$ , coeficiente de rugosidade de Manning:  $n$ ; a constante PI foi ajustada aos dados observados usando o MCCM:  $\Omega$ ; e os parâmetros da série de Fourier utilizada,  $A_0, A_1, A_2, B_1, B_2$  (Equação 17).

O método de Monte Carlo Via Cadeias de Markov (MCCM) foi implementado pelo algoritmo de aceitação/rejeição Metropolis-Hastings, e a geração de parâmetro candidato foi implementada, considerando passeio aleatório como kernel de transição. O algoritmo é apresentado a seguir (HASTINGS, 1970; BECK & ARNOLD, 1977; OLIVEIRA et al., 2020; NUNES et al., 2021; VIEGAS et al., 2022; NUNES et al., 2022):

1. Inicializa-se o contador de iterações da cadeia de Markov ( $i = 0$ ) e se arbitra um valor para a estimativa inicial dos parâmetros  $P^0$ .
2. Gera-se um valor candidato  $P^*$ , através de um kernel de transição, Equação (23), onde  $k$  é uma variável  $N(0,1)$  e  $w$  é o passo de procura.

$$P^* = (I + wk)P^{i-1} \quad (23)$$

3. Calcula-se a probabilidade de aceitação ( $\alpha$ ) do parâmetro candidato através do teste de Metropolis (Equação 24).

$$\alpha = \min \left[ 1, \frac{\pi(P^* / Dado_{OBS})}{\pi(P^{(i-1)} / Dado_{OBS})} \right] \quad (24)$$

4. Gera-se um número aleatório  $u$ , a partir de uma distribuição uniforme,  $u \sim U(0,1)$ .
  5. Se  $U \leq \alpha$ , então se aceita o novo valor e se faz  $P^i = P^*$ . Caso contrário, rejeita-se e se faz  $P^i = P^{i-1}$ ;
  6. Incrementa-se o contador de  $i$  para  $i+1$  e se volta ao passo 2.
- Sendo  $I$  a matriz de identidade.

A Figura 14 apresenta um esquema de funcionamento do método desenvolvido no MATLAB.

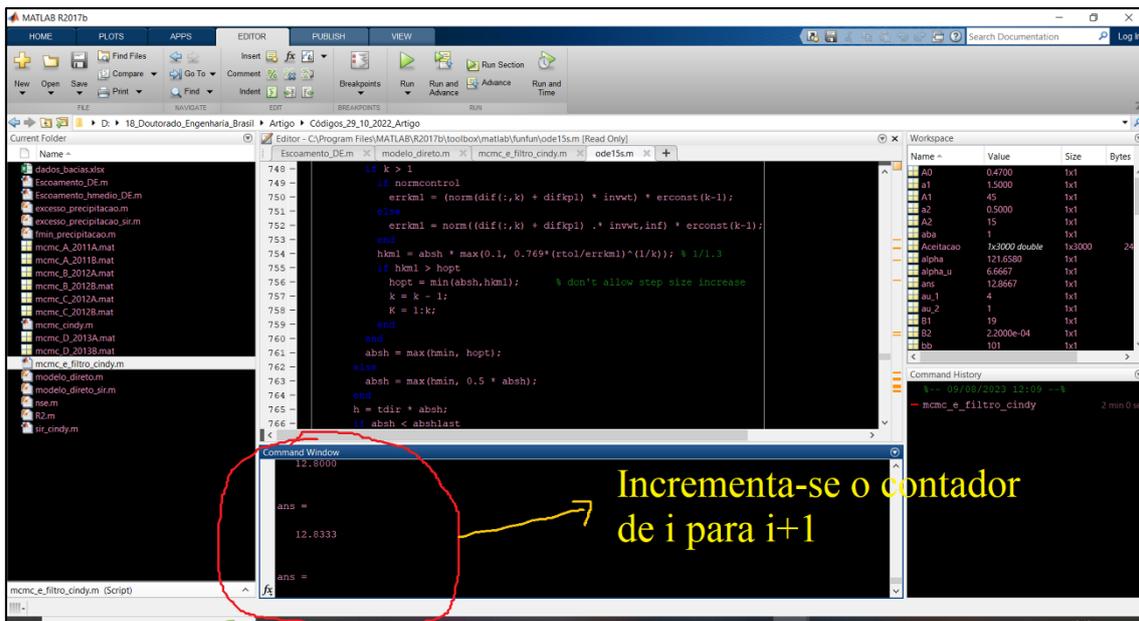


Figura 14 - Esquema representativo da evolução do método MCMC

### 3.7.- VALIDAÇÃO DE DADOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

As medidas observáveis foram obtidas de forma indireta, uma vez que não é possível a observação direta ou na maioria dos casos é limitada. Tais dados foram obtidos com auxílio do software K2, para o qual é necessária a informação dos dados de precipitação e parâmetros referente à bacia. A verificação do modelo K2 para estimativa da lâmina de água foi realizada no intuito de avaliar a concordância entre as pseudo-observações (via K2) e os dados preditos (via MD-PI). A validação foi aplicada por meio de concordâncias das simulações K2-PI em função dos dados observados de

produção de sedimentos disponíveis de Carriello et al. (2014) e de Barbosa (2021). Para esses dados simulados (produção de sedimentos), decidiu-se combinar as respostas K2-PI correspondentes aos mesmos períodos avaliados dos dados observados (2013-2014). No intuito de avaliar a concordância entre os dados experimentais e preditos foram utilizados cinco critérios estatísticos. O coeficiente de Pearson ( $r$ ) (MUKAKA, 2012; DUAN et al., 2015) apresentada na Equação (25); o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (CHENG et al., 2014) apresentada na Equação (26); a métrica estatística Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH & SUTCLIFFE, 1970) apresentada na Equação (27); o erro quadrático médio da raiz (RMSE) (GEBREMICHAEL et al., 2019) apresentada na Equação (28) e a porcentagem de viés (PBIAS) (MORIASI et al., 2007) apresentada na Equação (29).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (CS_i^{OBS} - \overline{CS}^{OBS})(CS_i^{SIM} - \overline{CS}^{SIM})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (CS_i^{OBS} - \overline{CS}^{OBS})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (CS_i^{SIM} - \overline{CS}^{SIM})^2}} \quad (25)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (CS_i^{OBS} - CS_i^{SIM})^2}{\sum_{i=1}^n (CS_i^{OBS} - \overline{CS}^{OBS})^2} \quad (26)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (CS_i^{OBS} - CS_i^{SIM})^2}{\sum_{i=1}^n (CS_i^{OBS} - \overline{CS}^{OBS})^2} \quad (27)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CS_i^{OBS} - CS_i^{SIM})^2} \quad (28)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (CS_i^{OBS} - CS_i^{SIM}) * 100}{\sum_{i=1}^n (CS_i^{OBS})} \quad (29)$$

sendo  $n$  = número de observações em cada tempo;  $CS_i^{OBS}$  = dado observado;  $\overline{CS}^{OBS}$  = média dos dados observados;  $CS_i^{SIM}$  = dado simulado e  $\overline{CS}^{SIM}$  = média dos dados simulados.

Como base para a avaliação de desempenho, o trabalho de De Souza et al. (2021) recomendou classes do coeficiente de Nash-Sutcliffe (Tabela 4).

Tabela 4 - Classificação de desempenho geral para o coeficiente NSE

Classificação	Nash-Sutcliffe (NSE)
Muito bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,50$

Fonte: Adaptado de Souza et al. (2021)

A estrutura lógica da metodologia utilizada no estudo é apresentada na Figura 15.

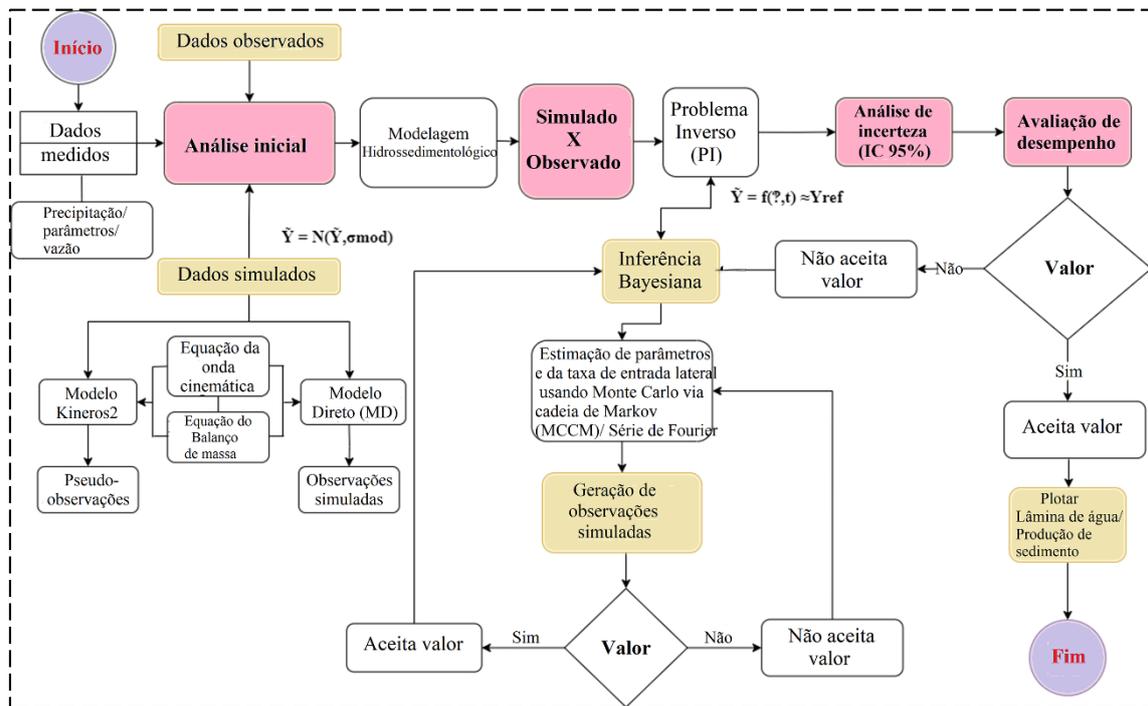


Figura 15 – Fluxograma da metodologia

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1.- ESCOAMENTO DE SAÍDA SIMULADO VIA K2

Antes da simulação da taxa de escoamento lateral e da lâmina de água, realizou-se uma análise dos parâmetros físicos ajustados por tentativa e erro no modelo K2. Essa análise é necessária para decisão de tomar esses parâmetros como dados de entrada dos problemas inversos, verificando-se, assim, as possíveis mudanças e influências nas respostas dos eventos de precipitação da bacia hidrográfica avaliada. A Tabela 5 apresenta os resultados dos parâmetros físicos calibrados no K2 para medidas de chuva diárias [A (14/04/2011), B (9/04/2012a), C (9/04/2012b) e D (22/03/2013)], respectivamente, iguais a 113,3 / 56,7 / 54,6 / 63,8 mm. Esses eventos de chuvas provocaram cheias na pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata (Figura 16).

Tabela 5 - Identificação dos parâmetros K2

<b>Parâmetros</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite</b>	<b>Padrão</b>
Comprimento	Length	m	-	3000
Largura	W	m	-	20,0
Declividade	S	-	0,001-1	0,025
Densidade	Ss	-	-	0,80-1,50
Espessura	Thick	mm	-	500
Porosidade	$\phi$	-	-	0,32-0,38
Saturação inicial	Si	-	0-1	0,2
Coefficiente de Manning	n	-	0,01-0,8	0,03
Condutividade hidráulica saturada	Ks	mm.h <sup>-1</sup>	0-50	0,43-0,60
Variação do Ks	Cv	-	0,01-50	0,1
Potencial efetivo de capilaridade	G	mm	0-500	12,70-26,30
Índice de distribuição do tamanho dos poros	$\lambda$	mm	0,01-1,43	0,39-0,45
Coefficiente de erosão	Cf	-	-	50,0
Coefficiente de coesão	Co	-	-	0,5
Relevo (microtopografia)	re	mm	-	0-2
Espaçamento de relevo	rs	m	-	0,3
Cobertura rochosa	r	%	-	0-1
Profundidade de Interceptação	In	mm	-	1,0
Cobertura vegetal	p	%	-	0-1

Os valores dos parâmetros  $n$ ,  $K_s$ ,  $C_v$  e  $G$ , estão condizentes com o estudo de Memariam et al. (2012) para bacias tropicais, em que os valores utilizados foram entre:  $n$  (0,00-1,04),  $K_s$  (0,01-0,60)  $C_v$  (0,00-0,12) e  $G$  (0,00-2,68). Nesse sentido, também existem estudos de casos que utilizaram parâmetros de declividade e largura semelhantes ( $S$  [0,0004-0,023] e  $W$  [16,8-61,0]) para bacias hidrográficas com características físicas e condições climáticas tropicais e uso intensivo da terra; propensas a fortes inundações e com escassez de dados disponíveis (NGUYEN et al., 2015; MIRZAEI et al., 2016).

Para os parâmetros físicos estudados (Tabela 5), 7 geraram maior influência nas saídas:  $S$  (0,01-1,0),  $S_i$  (0,0-1,0),  $n$  (0,01-0,8),  $K_s$  (0-50),  $C_v$  (0,01-50),  $G$  (0,0-500,0) e  $\lambda$  (0,01-1,43). Assim, os resultados estão de acordo aos disponíveis na literatura para bacias de relevo predominantemente plano, com textura de solo franco-arenoso e arenoso (característica que influenciam no  $K_s$ ), e com agricultura intensiva (KIM et al., 2014), e declividade entre 1% e 20% (AL-QURASHI et al., 2008; AN et al., 2019), parâmetro que influencia na velocidade de resposta do escoamento. No entanto, o que chamou a atenção foi a influência de alguns parâmetros de saídas do K2, por exemplo,  $S$  (0,05-1,0),  $n$  (0,01-0,1),  $K_s$  (0-50), e  $G$  (0,0-500,0). A Figura 16, mostra os picos da lâmina de água, em função do tempo, para os 4 eventos de chuvas acumuladas na área de estudo.

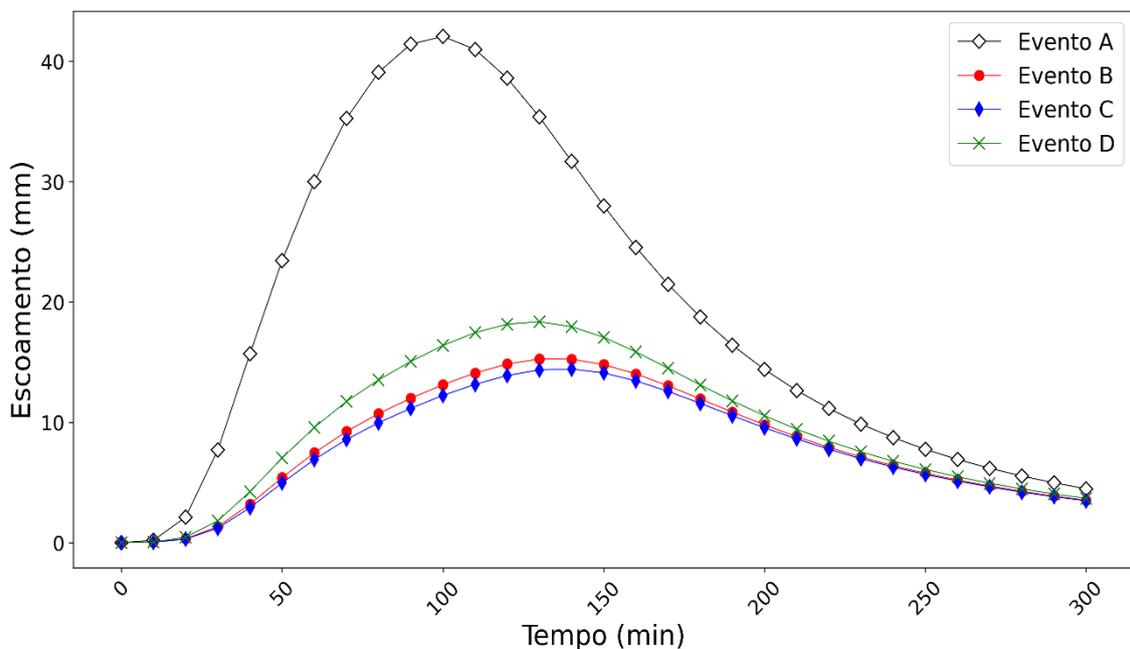


Figura 16 – Escoamento de saída dos eventos representados com o modelo K2

Mesmo com parâmetros físicos calibrados semelhantes, os picos dos hidrogramas mudaram devido a diferentes entradas de precipitações. Logo, as causas das mudanças nas saídas podem também ser devido à velocidade das respostas (interpolação automática) pelo K2 (WOOLHISER et al., 1990; GOODRICH et al., 2012; ABDALLA et al., 2022). Entretanto, em termos de variabilidade do escoamento de saída, os eventos são praticamente homogêneos (B, C e D) entres os resultados da lâmina de água representados no K2, mas o evento A apresentou uma maior diferença na saída.

No geral, as respostas do K2 apresentaram uma ligeira diferença no tempo de pico dos hidrogramas (de 100 a 140 minutos) devido a diferentes entradas de chuvas interpoladas automaticamente com base na relação espaço-tempo como indica Woolhiser et al. (1990). Esses resultados com variabilidade nas respostas e diferenças nos picos da lâmina de água calculados são justificados por Araújo et al. (2013), Kennedy et al. (2013), Kim et al. (2014), An et al. (2019). Os autores creditam isso a não linearidade do modelo, dados de precipitação interpolados e desempenho não satisfatório de identificação dos melhores valores dos parâmetros no processo de calibração.

## 4.2.- GERAÇÃO DE MEDIDAS INDIRETAS

### 4.2.1- Estimativa de parâmetros com MCCM

Para uma melhor análise, os valores dos parâmetros estimados através do PI foram comparados entre eventos para a área de estudo. Esses valores estão sendo considerados como os valores ótimos a representar as respostas da taxa de escoamento lateral e da lâmina de água. A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros ótimos gerados com o PI, em função dos eventos de chuvas máximas diárias (A, B, C e D).

Tabela 6 - Estimativas dos parâmetros ótimos através do PI desenvolvido para cada evento avaliado

Parâmetros	Valores ótimos com o PI por evento				
		Evento A	Evento B	Evento C	Evento D
Largura a montante	Wu	13,49	17,935	14,142	16,104
Largura	W	10,826	9,469	9,378	9,711
Declividade e rugosidade a montante	$\alpha u$	112,672	147,632	158,668	149,114
Declividade e rugosidade	$\alpha$	7,394	6,179	6,278	6,671
	$\Omega$	0,009	0,009	0,009	0,009
	A0	0,456	0,438	0,462	0,458
Coeficientes da série de Fourier	A1	41,189	39,702	39,609	41,182
	B1	26,673	16,947	15,872	17,186
	A2	15,28	14,866	14,189	14,404
	B2	2,12E-04	2,33E-04	2,13E-04	2,32E-04

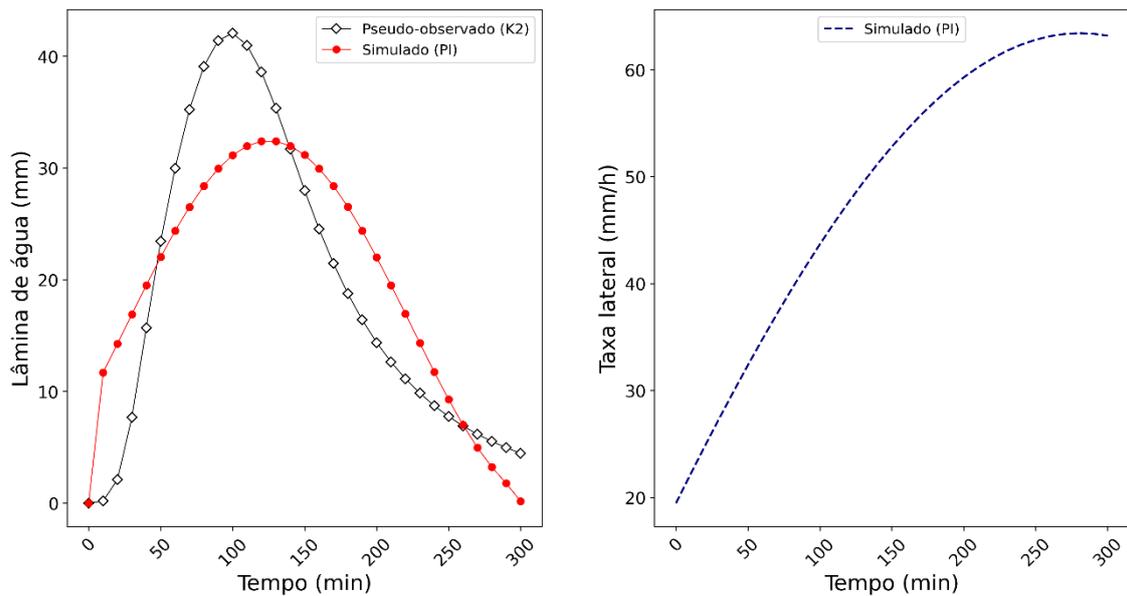
Os parâmetros obtidos via PI são resultados da estimativa com MCCM a partir das respostas da Tabela 5, sendo colocados em dois grupos: parâmetros físicos do K2 [W; Wu;  $\alpha$  e  $\alpha u$  (contém: S e n)]; e parâmetros físicos do MD/PI ( $\Omega$ , A0, A1, A2, B1, B2), oriundos da série de Fourier utilizada (Equação 17). Assim, esse agrupamento conseguiu simular a taxa de escoamento lateral e representar a lâmina de água (Figura 17). No geral, a estimativa dos parâmetros com MCCM conseguiu quantificar a confiabilidade dos parâmetros, dos cenários e do modelo, além de ser utilizada para amostragem e caracterizar a solução de um PI (KAPIO & SOMERSALO, 2006).

De acordo com Hastings (1970), Beck e Arnold (1977), Oliveira et al. (2020), Nunes et al. (2021), Viegas et al. (2022), o propósito da estimativa dos parâmetros com MCCM é dotar o modelo com uma convergência gradual para uma distribuição de equilíbrio, i.e., a cadeia de Markov fica mais estável, tendo valores padronizados dos parâmetros. Nesse contexto, os resultados dos valores ótimos da Tabela 6, consideraram uma análise de sensibilidade local com até 3000 estados da cadeia de Markov em torno dos valores padrões da Tabela 5. Nesse processo de padronização dos parâmetros do PI foi necessário um tempo aproximado de vinte minutos na simulação da taxa de escoamento lateral para cada evento da bacia hidrográfica. Assim, como eram esperadas, as estimativas dos parâmetros dependeram das perturbações (estados da

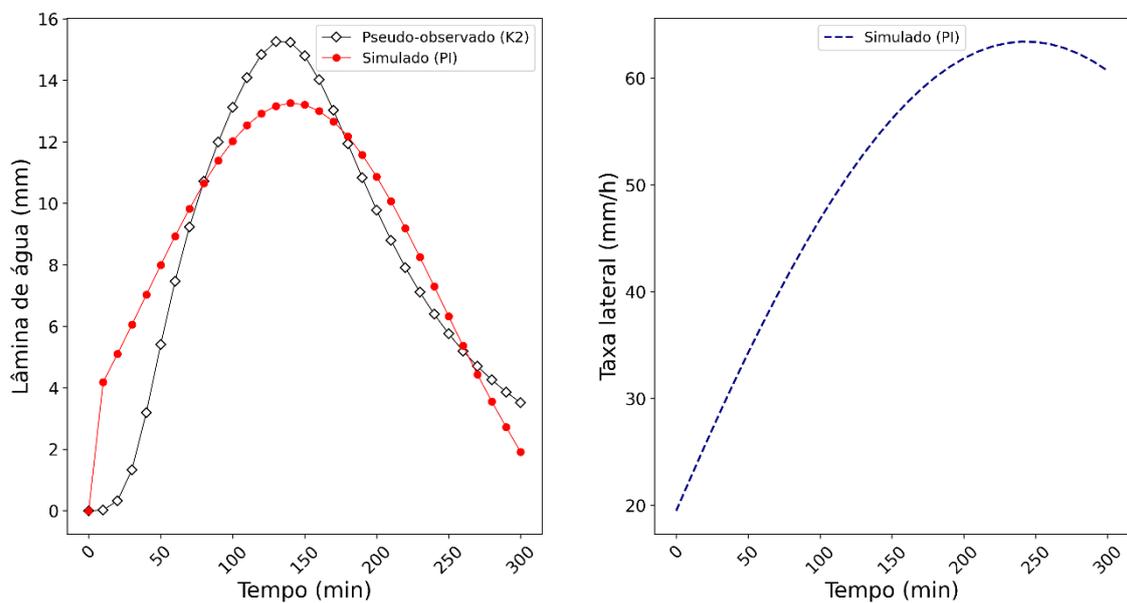
cadeia) feitas nos valores iniciais dos parâmetros (AL-QURASHI et al., 2008; KENNEDY et al., 2013; KIM et al., 2014).

#### 4.2.2.- Estimativas da lâmina de água e da taxa de escoamento lateral via PI

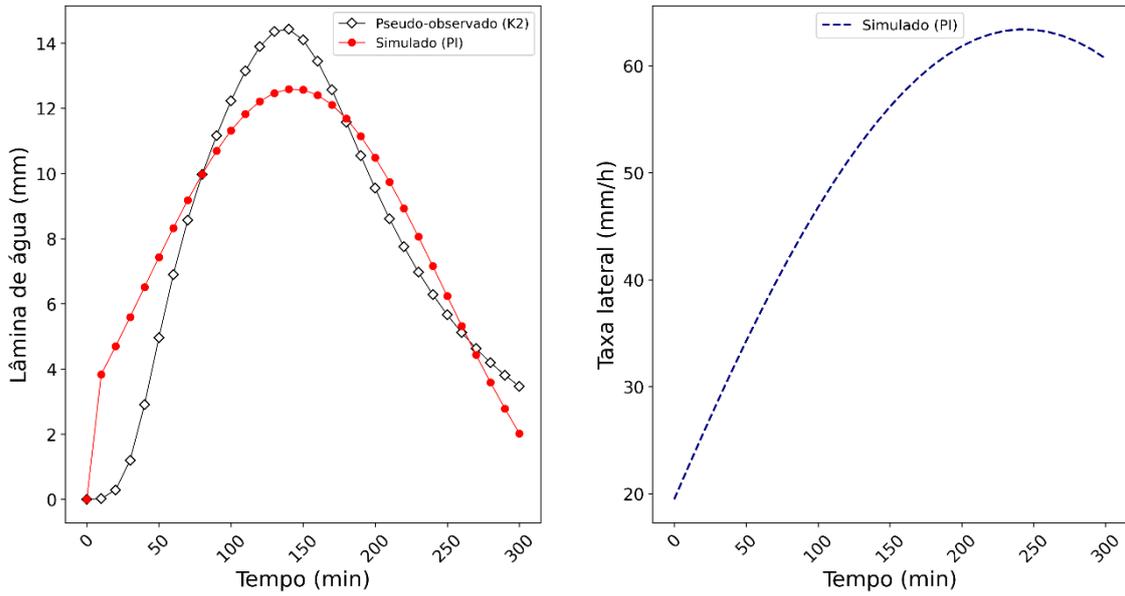
Nas simulações da lâmina de água e da taxa de escoamento lateral pelo PI, observa-se uma proximidade entre os valores obtidos no K2 para os quatro eventos de chuvas máximas. A Figura 17 mostra as respostas da lâmina de água desenvolvidas com K2 e PI e a simulação da taxa de escoamento lateral obtidas com o PI, em função dos eventos de precipitações máximas/diárias (A, B, C e D) avaliados na área de estudo.



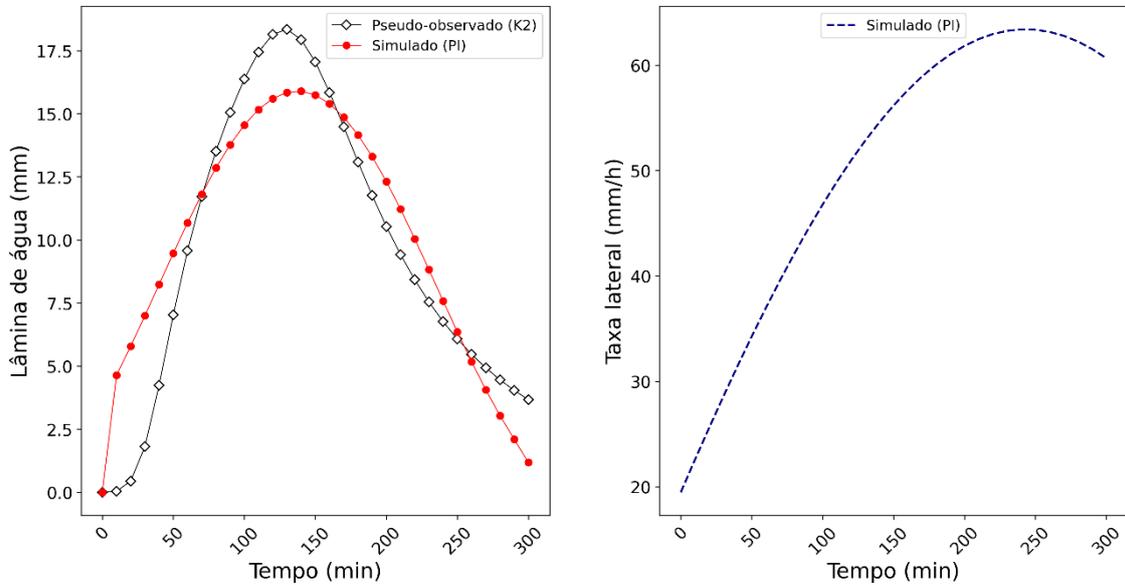
(Evento A)



(Evento B)



(Evento C)



(Evento D)

Figura 17 - Respostas K2/PI da lâmina de água (observada/simulada) e a taxa de entrada lateral (simulada) em função do tempo para os 4 eventos de chuvas máximas diárias

As respostas da lâmina de água e da taxa de escoamento lateral são resultantes das interações das entradas obtidas no K2 (dados observáveis) e dos parâmetros padronizados com MCCM e séries de Fourier no processo da modelagem chuva-vazão ao tentar representar o cenário real mais próximo da bacia hidrográfica. Após o processo da estimativa dos parâmetros via PI, as ocorrências de variabilidade da taxa de escoamento lateral nas respostas do escoamento de saída apresentaram comportamentos

pouco variáveis; aproximando-se bem das medidas observáveis no K2. Neste sentido, as simulações via PI apresentaram uma ligeira diferença na representação da lâmina de água frente às respostas do K2. A maior diferença está no evento A, com o maior volume de pico; diferença devida a possíveis variações dos dados de entradas obtidos com o K2 (WOOLHISER et al., 1990) e pela não linearidade do modelo direto (LIGHTHILL & WHITHAM, 1955; SINGH & REGL, 1983; WOOLHISER et al., 1990; SMITH et al., 1995). No entanto, outros estudos abordando a modelagem chuva-vazão, citam que a estimativa da taxa de escoamento lateral pode ser responsável pelos erros e mudanças na representação da lâmina do escoamento superficial (SINGH & REGL, 1983; KIM et al., 2014; AN et al., 2019).

Segundo Woolhiser e Goodrich (1988), a água que escoar dos planos entra no canal principal na forma de taxa de escoamento lateral. Logo é importante estimar os valores dessa influência no escoamento de saída, que pode ser resultado das mudanças do uso e cobertura do solo. Nesse sentido, nossos resultados com o PI estimaram a taxa de escoamento lateral, servindo como auxílio para redução de custos e tempo em testes experimentais na quantificação de parâmetros do processo de escoamento.

Como analisado em outros estudos (NGUYEN, 2015; MIRZAEI et al., 2016), o K2 só não estima com precisão o nível de água do rio; critério importante para identificar cheias. Assim, utilizando o K2 conjuntamente com o método do PI, conseguiu-se simular a taxa de entrada de escoamento lateral e mostrar essa influência nas mudanças do comportamento da lâmina de água como citam Singh e Regl (1983) e Kim et al. (2014). Assim, a qualidade de ajuste da taxa de escoamento lateral mostrada na Figura 17 pode ser verificada sob o sentido prático da aplicação da solução de um problema inverso (ARAÚJO et al., 2013).

#### 4.3.- ANÁLISE DE INCERTEZA E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

A Tabela 7 apresenta os valores dos parâmetros físicos estimados via K2/PI para cada evento máximo diário de chuva (A, B, C e D) com um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 7 - Parâmetros físicos K2/PI variáveis em função da série de Fourier utilizada e avaliados com um intervalo de confiança de 95%

Eventos	Parâmetros K2/PI										
	w	wu	$\alpha$	$\alpha u$	$\Omega$	A0	A1	B1	A2	B2	
Limite	0-50	0-50	0-200	0-200	0-0,01	0-0,5	0-50	0- 50	0-50	0-0,01	
Média	13,49	10,83	112,67	7,39	0,009	0,46	41,19	26,67	15,28	2,12E-04	
A	IC	13,4-	10,8-	112,6-	7,3-	0,008-	0,45-	41,18-	26,6	15,2-	2,12E-04 -
	95%	13,5	10,9	112,7	7,4	0,009	0,46	41,19	-	15,3	2,13E-04
	NSE	<b>0,76</b>									
Média	17,93	9,47	147,63	6,18	0,009	0,44	39,7	16,95	14,87	2,33E-04	
B	IC	17,7-	9,32-	145,5-	6,10-	0,008-	0,43-	38,11-	15,8-	14,6-	2,31E-04 -
	95%	18,1	9,60	148,9	6,25	0,009	0,44	40,62	18,3	15,1	2,36E-04
	NSE	<b>0,83</b>									
Média	17,14	9,38	158,67	6,28	0,009	0,46	39,61	15,87	14,19	2,13E-04	
C	IC	16,9-	9,28	153,5-	6,21-	0,008-	0,45-	38,35-	14,8	13,9-	2,11E-04 -
	95%	17,4	-9,51	164,1	6,34	0,009	0,47	41,18	-	14,6	2,15E-04
	NSE	<b>0,84</b>									
Média	16,1	9,71	149,11	6,67	0,009	0,46	41,18	17,19	14,4	2,32E-04	
D	IC	16,0-	9,60-	143,7-	6,61-	0,009	0,45-	39,28-	16,0	14,3-	2,30E-04 -
	95%	16,2	9,84	156,7	6,72		0,46	43,02	-	14,5	2,34E-04
	NSE	<b>0,85</b>									

Analisando a Tabela 7, os NSEs demonstram um desempenho muito bom para os eventos chuva-vazão modelados através do PI, pois An et al. (2019); Harche et al. (2021); De Souza et al. (2021) apresentam o seguinte intervalo,  $0,75 < NSE \leq 1,00$ , como sendo de classificação “muito bom” para simulações hidrológicas. Assim, a metodologia aplicada do PI, pode ser utilizada para prever respostas de lâmina de água e taxa de entrada de escoamento lateral para pequenas bacias hidrográficas. Sobretudo, quando a obtenção de medidas diretas é limitada (SANSO & GUENNI, 2000; AL-QURASHI et al., 2008; KENNEDY et al., 2013; KIM et al., 2014).

Tabela 8 – Desempenho do modelo K2 para os eventos de cheia (A, B, C e D)

<b>Eventos</b>	<b>r</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>NSE</b>	<b>RMSE</b>	<b>PBIAS</b>
<b>A</b>	0.88	0.77	0.76	6.72	-3.35
<b>B</b>	0.93	0.86	0.83	1.95	-5.32
<b>C</b>	0.93	0.87	0.84	1.80	-5.38
<b>D</b>	0.93	0.86	0.85	2.25	-3.88

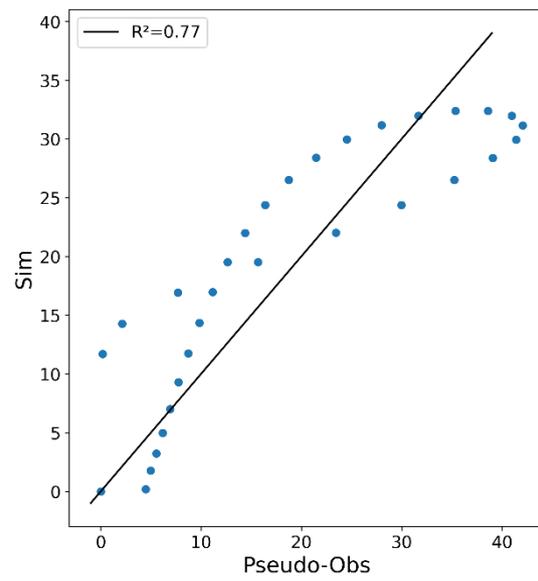
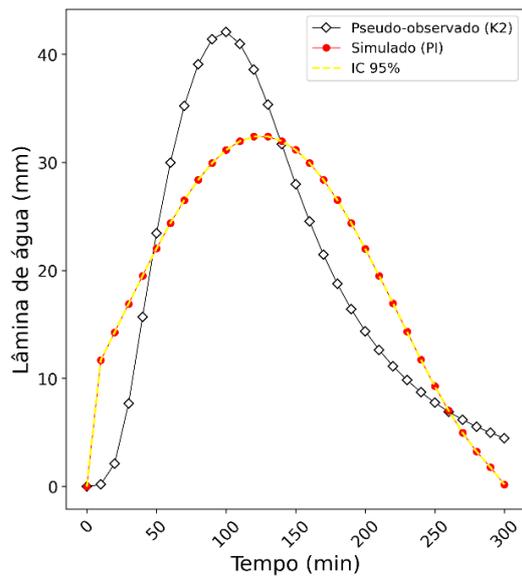
Analisando a Tabela 8, os resultados de PBIAS são satisfatórios (AN et al., 2019, HARCHE et al., 2021; DE SOUZA COSTA et al., 2021). Os resultados do PI foram consistentes com os dos estudos mencionados anteriormente. Considerando o pico e a duração dos hidrogramas, como os atrasos das ondas, supõe-se que as simulações PI apresentem valores menores do que os pseudo-observados em relação a K2.

Os parâmetros, baseados no intervalo de confiança de 95%, foram valores médios (ótimos) e valores limites, que simularam as saídas do escoamento via PI mais próximas das saídas observáveis do K2. Assim, esses valores representaram um maior grau de confiabilidade na modelagem hidrológica (Tabela 7). Nesse contexto, os resultados da análise de incerteza dos eventos avaliados foram avaliados comparativamente para verificar sua consistência ( $NSE \geq 0,75$ ) (GOODRICH et al., 2012; HARCHE et al., 2021); e destacar seus pontos fortes em situações hidrológicas reais (WALKER & HUMPHERYS, 1983; SANZO & GUENNI, 2000). Boas práticas da modelagem hidrológica requerem que o modelador forneça uma avaliação de confiança dos parâmetros e do modelo, avaliando as possíveis incertezas associadas ao processo de simulação (SANZO & GUENNI, 2000; AL-QURASHI et al., 2008; KIM et al., 2014; AN et al., 2019).

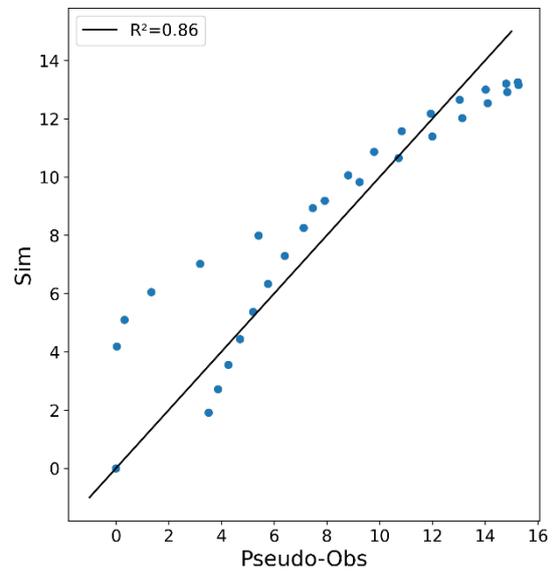
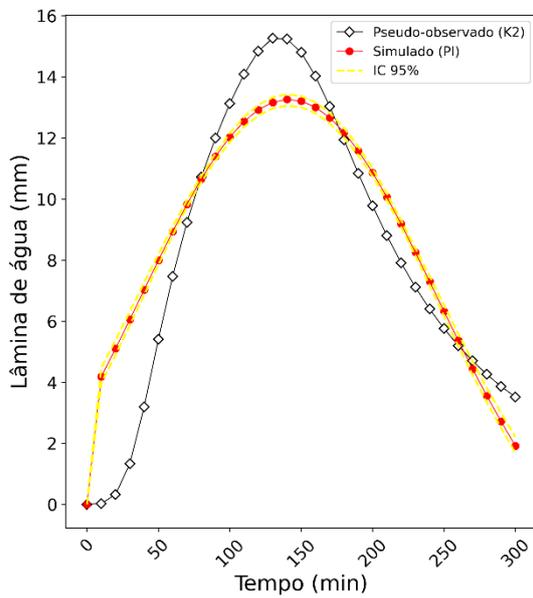
#### 4.4.- OTIMIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DE SAÍDA

Na otimização, a maioria dos resultados tiveram respostas próximas dos resultados observados no K2 para os quatro eventos de chuva máximas; eles representaram comportamentos quase homogêneos na simulação pelo PI para cada evento avaliado. A Figura 18 mostra os resultados da lâmina de água K2/PI (observada/simulada) com grau de confiança de 95% e o coeficiente de correlação

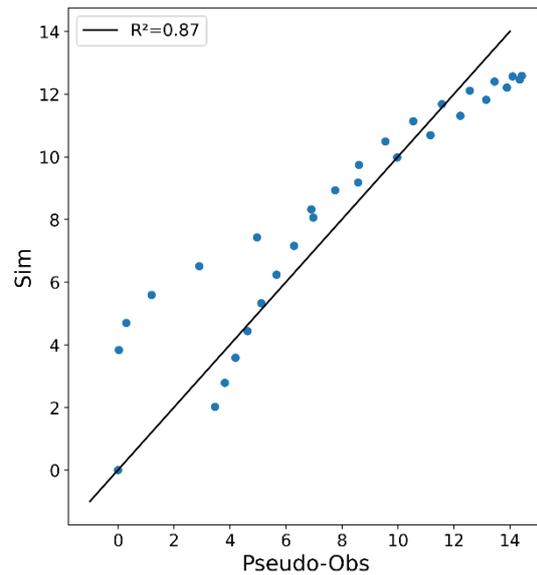
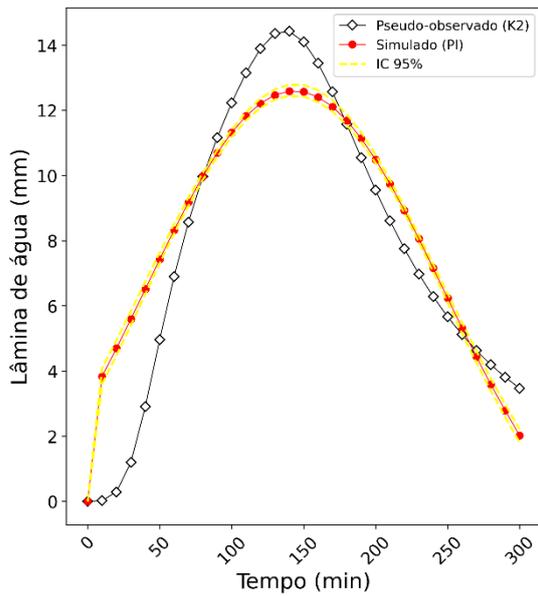
estatístico ( $R^2$ ) dos dados observados (K2) versus os dados simulados (PI) para cada evento de chuva máxima/diária avaliado.



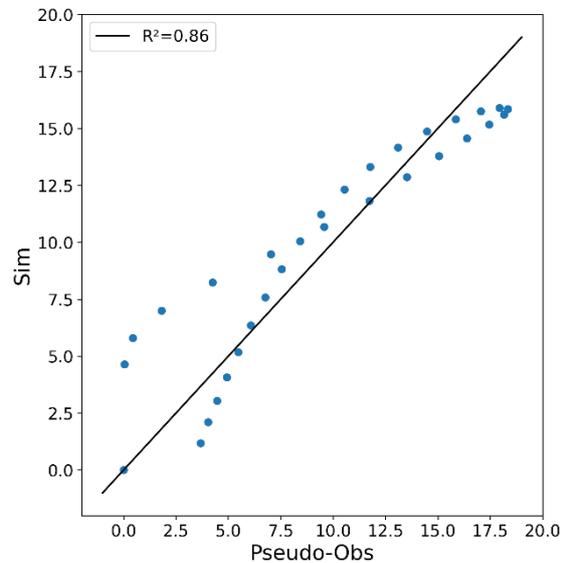
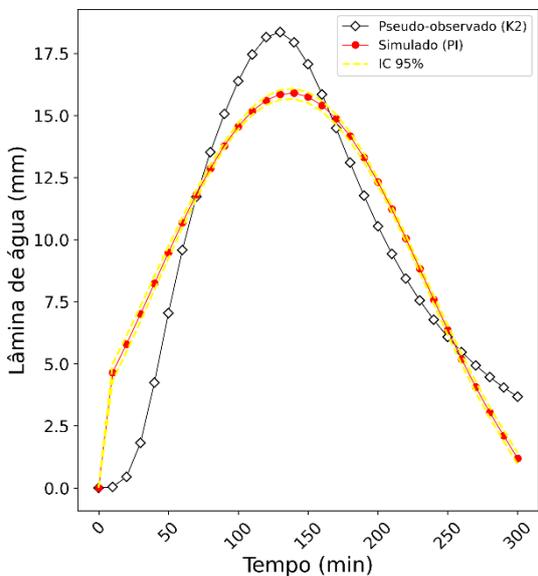
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 18 - Saídas típicas K2/PI (observada/simulada/IC = 95%) e valores de R2 para as lâminas de água observadas e simuladas dos eventos de chuvas máximas diárias (A, B, C e D).

As lâminas de água representadas na Figura 18 são resultados do processo de modelagem otimizado; depois das estimativas com MCCM e séries de Fourier, e considerando as influências da simulação da taxa de escoamento lateral na representação da lâmina do escoamento. Nesse caso, após o processo de análise de incertezas (IC 95%) e avaliação de desempenho com Nash-Sutcliffe da Tabela 7; os resultados de correlação estatística ( $R^2$ ) apresentaram uma diferença nas tendências da

lâmina de água, frente à solução observada no K2, a maior diferença foi para o evento A; com o menor resultado de correlação estatística ( $R^2 = 0,77$ ), sendo considerado como resultado razoável. Os resultados de  $R^2$  dos eventos B, C e D, apresentaram melhor ajuste na modelagem chuva-escoamento da bacia hidrográfica, com resultados semelhantes e respectivamente iguais a 0,86, 0,87 e 0,86. Isso mostra o desenvolvimento de soluções de predições de chuva e estimativas de dados não disponíveis, aplicando MCCM e séries de Fourier como métodos inversos (SANSO & GUENNI, 2000).

No entanto, na análise dos tempos de pico das respostas K2/PI, o evento C apresentou maior atraso no tempo de pico (acima de 130 minutos) - (Figura 16). Segundo Kennedy et al. (2013) e Kim et al. (2014), as diferenças e atrasos associados às respostas de K2 e PI podem ser devido aos valores padronizados dos parâmetros e aos dados conhecidos ou de entrada (HARCHE et al., 2021). As considerações do tempo de pico e conhecimento da variabilidade da lâmina do escoamento são de importância em projetos estruturais para controle de inundações, erosão e perda de nitrogênio do solo (LANGE & HAENSLER, 2012; AN et al., 2019; KAUTZ et al., 2019; KORGAONKAR et al., 2020).

#### 4.5.- PRECIPITAÇÕES E PRODUÇÃO DE SEDIMENTO VIA K2 E PI

As precipitações observadas (Figura 19a) para o período analisado 2013-2014, mostram as possíveis influências na produção de sedimento na pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata. A possível relação precipitação-produção de sedimentos está condizente com as respostas de produção de sedimentos observada (Figura 19b). Nesse contexto, De Oliveira Fagundes et al. (2023) e de Bendito et al. (2023), afirmam que a precipitação é a principal responsável pelas mudanças na produção de sedimentos.

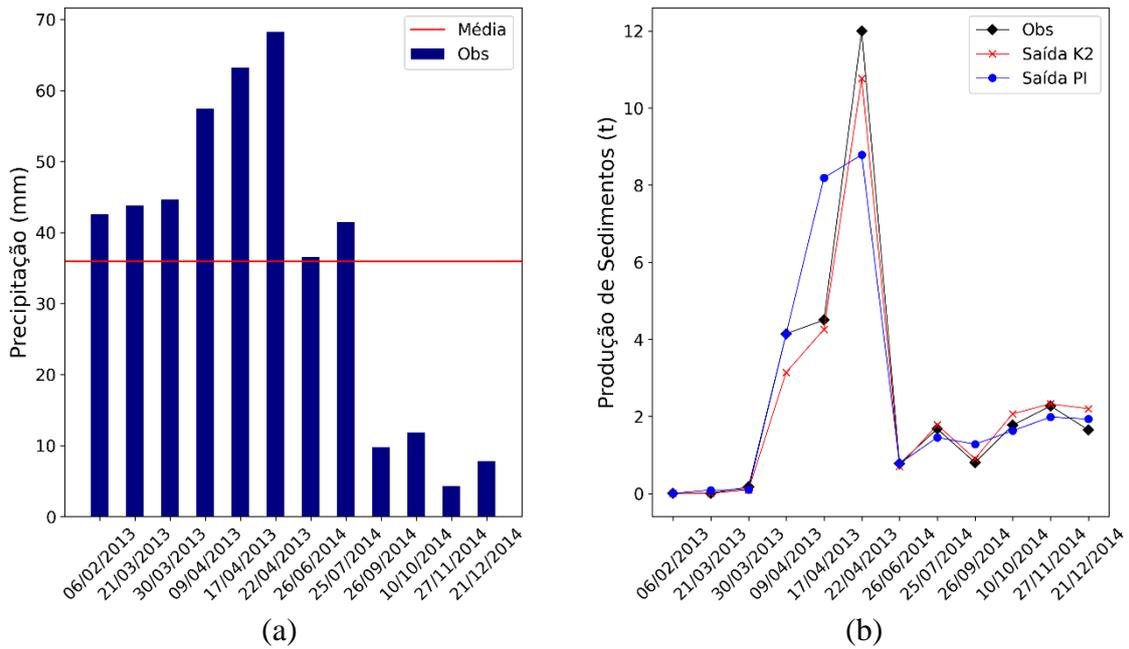


Figura 19 - Precipitação observada (a) e Produção de sedimentos observada e saídas com K2 e PI (b)

Analisando-se a Figura (19b), pode-se observar que os picos representados para o evento (22/04/2013) provocaram cheias na pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata. Além disso, pode-se observar que as simulações com K2 e PI apresentaram respostas próximas aos dados observados na maioria dos casos. No entanto, a variabilidade e moderadas diferenças nas respostas das saídas com K2 e PI podem ser devidas à não linearidade do modelo K2 (WOOLHISER et al., 1990) e a extrapolação dos dados de entrada (ARAÚJO et al., 2013). Por outro lado, extrapolações de dados podem causar sub ou superestimação nas representações da modelagem hidrossedimentológica (DE MENEZES et al., 2020).

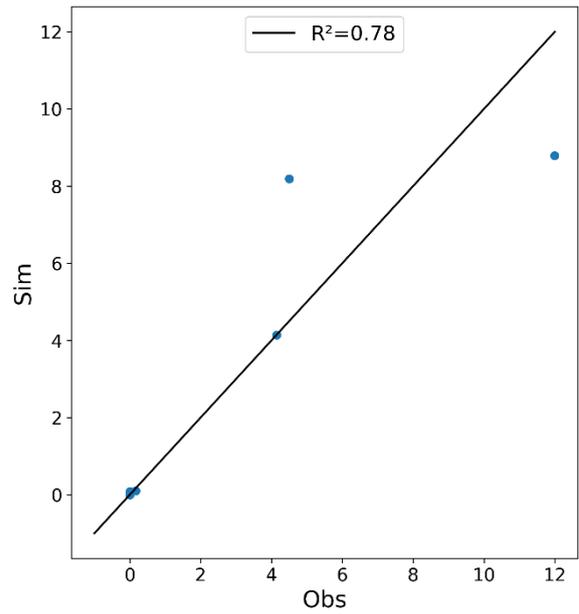
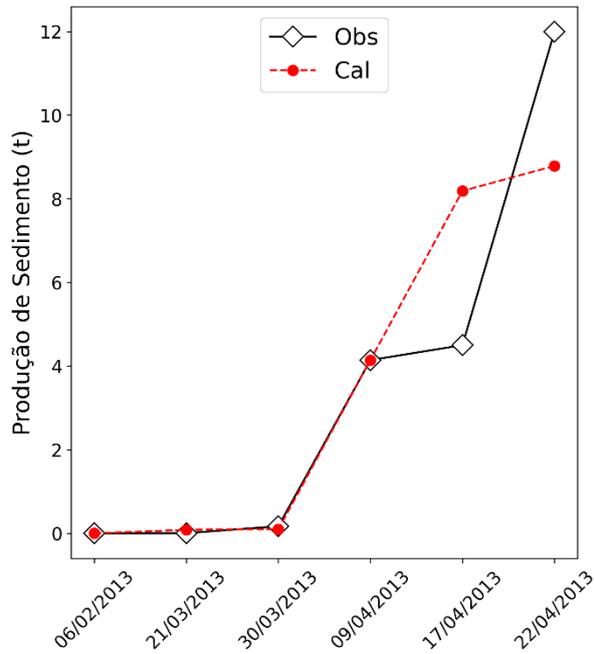
Assim, ao longo da análise inicial, apenas dois eventos representados com PI apresentaram maior diferença quando comparadas com as respostas do K2 e com os dados observados. A discordância inicial nas respostas PI com as observações pode ser atribuída à histerese entre as variáveis do modelo K2 (WILLIAMS, 1989). Segundo Bieger et al. (2014), essas diferenças podem ser devidas à modelagem inadequada da variabilidade espacial da precipitação, aos dados hidrossedimentológicos locais limitados, às incertezas do modelo e aos parâmetros físicos e/ou incertezas dos dados observados.

No geral, os fenômenos hidrológicos e de produção de sedimentos são determinados por uma complexa interação de fatores da natureza; o que influencia nos processos hidrosedimentológicos (DE MENEZES et al., 2020). Neste sentido, faz-se necessário uma estrutura que equilibre o nível de complexidade do modelo hidrosedimentológico suportado pelos dados disponíveis com o nível de desempenho adequado ao cenário real (WAGENER et al., 2001). Apesar da concordância inicial das respostas de produção de sedimento com K2 e PI para os 12 eventos avaliados; as simulações precisam de calibração e validação com os dados observados para justificar o comportamento do modelo K2 por meio de uma análise mais detalhada e considerando uma maior confiabilidade aos resultados (BRAGA et al., 2013; DE MENEZES et al., 2020).

#### 4.6.- APLICAÇÃO DO PI NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO K2 NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

A Figura (20a) mostra os eventos de produção de sedimentos calibrados para um período da análise de um ano (2013) com o intervalo de confiança de 95%. Na calibração, os valores dos dados simulados ficaram próximo aos valores dos dados observados; no entanto, dois eventos apresentaram uma maior diferença, com respostas de produção de sedimentos subestimada sendo (>50%) para o evento de 22/04/2013 e superestimada sendo (>50%) para o evento de 17/04/2013.

Na Figura (20b) é mostrada a correlação entre os dados de produção de sedimentos observada e simulada na calibração.

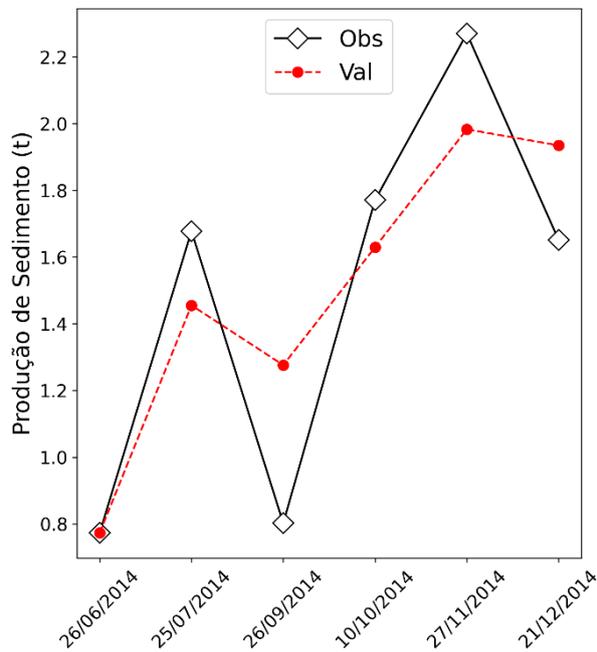


(a) Produção de sedimentos observada e simulada - 2013

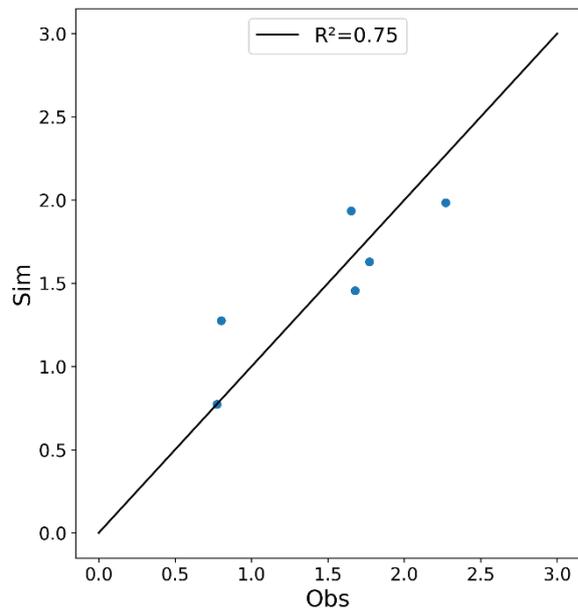
(b) Correlação entre os dados de produção de sedimentos observada e simulada

Figura 20 - Resultados da calibração do modelo com dados da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata.

Na Figura 21 são mostrados os eventos de produção de sedimentos validados para o ano 2014, também com intervalo de confiança de 95%.



(a) Produção de sedimentos observada e simulada - 2014



(b) Correlação entre os dados de produção de sedimentos observada e simulada

Figura 21 - Resultados da validação do modelo com dados da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata.

Assim, na validação percebe-se que as simulações de produção de sedimento do período analisado (2014) apresentaram maior variabilidade em relação às observações. Isso pode ser devido aos dados de entrada disponíveis (dados observados e/ou parâmetros físicos) na modelagem hidrossedimentológica serem interpolados automaticamente com base na relação espaço-tempo como indica Woolhiser et al. (1990). Outros autores creditam isso a não linearidade do modelo propriamente e ao desempenho dos parâmetros no processo de calibração (ARAÚJO et al., 2013) e a escassez de dados medidos nas bacias (WAGENER et al., 2001; CARRIELLO et al., 2014).

Os resultados da calibração e validação da produção de sedimentos (Figuras 20 e 21) apresentaram resultados satisfatórios. No entanto, os resultados precisam de uma avaliação de desempenho do modelo K2 e uma análise de incerteza nos parâmetros; como se referem outros estudos usando dados disponíveis (HAMEL et al., 2015; DE MENEZES et al., 2020; HARCHE et al., 2021). Segundo Wagener et al. (2001), muitos procedimentos da modelagem-previsão hidrossedimentológica existentes não fazem o melhor uso das informações disponíveis, resultando em incertezas nos resultados.

Porém, no presente trabalho, os eventos da modelagem de sedimentos calibrados e validados consideraram um intervalo de confiança de 95%.

Também foram determinados valores do coeficiente de determinação,  $R^2$ , (Figuras 20b e 21b), mostrando que o PI simulou adequadamente a produção de sedimentos. Em particular, na calibração e validação os resultados apresentaram desempenho estatístico (Tabela 9) classificado como “muito bom” ( $0.75 < NSE \leq 1.00$ ) na calibração e com classificação “bom” ( $0.65 < NSE \leq 0.75$ ) na validação. Entretanto, as pequenas divergências do desempenho da modelagem na calibração e validação ocorrem devidas às incertezas próprias do modelo e incertezas dos dados disponíveis. Nesse sentido, os estudos de Wagener et al. (2001) e de Araújo et al. (2013) afirmam que, a combinação de incertezas na estrutura e nos parâmetros do modelo, levam a diferenças significativas nas simulações em relação aos dados observados.

No geral, as simulações K2-PI apresentaram bons resultados, possivelmente, sendo as mais adequadas para estimativas de produção de sedimentos na pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, podendo ser reaplicadas a outras bacias da Amazônia. Nesse contexto, os resultados foram avaliados comparativamente para verificar sua consistência por meio da correlação de Pearson ( $r$ ), coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e a Raiz do erro quadrático médio (RMSE) conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Desempenho estatístico da produção de sedimentos (PS) simulada em relação à produção de sedimentos observada

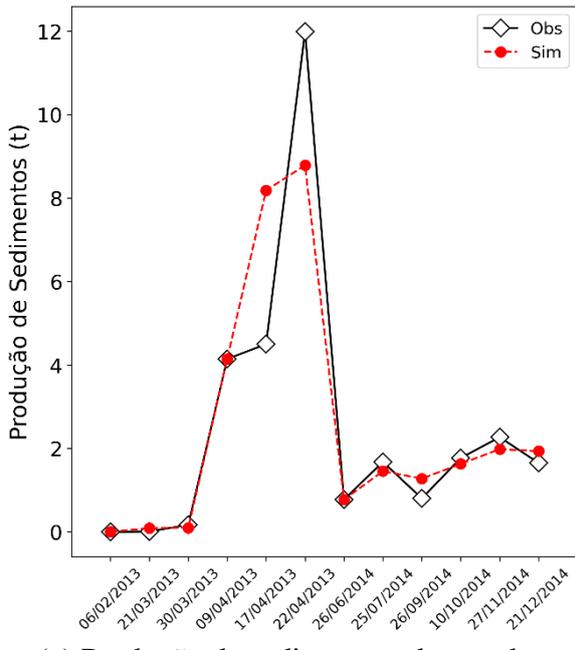
<b>Período</b>	<b>Evento</b>	<b>PS Observada</b>	<b>PS Simulada</b>	<b>NSE</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>
2013 (calibração)	06/02/13	0,001	0,001	0,78	0,88	0,78	1,99
	21/03/13	0,006	0,087				
	30/03/13	0,171	0,097				
	09/04/13	4,144	4,144				
	17/04/13	4,501	8,189				
	22/04/13	11,996	8,786				
2014 (validação)	26/06/14	0,773	0,773	0,74	0,87	0,75	0,27
	25/07/14	1,678	1,455				
	26/09/14	0,802	1,276				
	10/10/14	1,771	1,630				
	27/11/14	2,270	1,983				
	21/12/14	1,651	1,935				
2013 a 2014 (Período todo)				0,80	0,90	0,80	1,42

#### 4.7.- AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO PARA 2013 a 2014

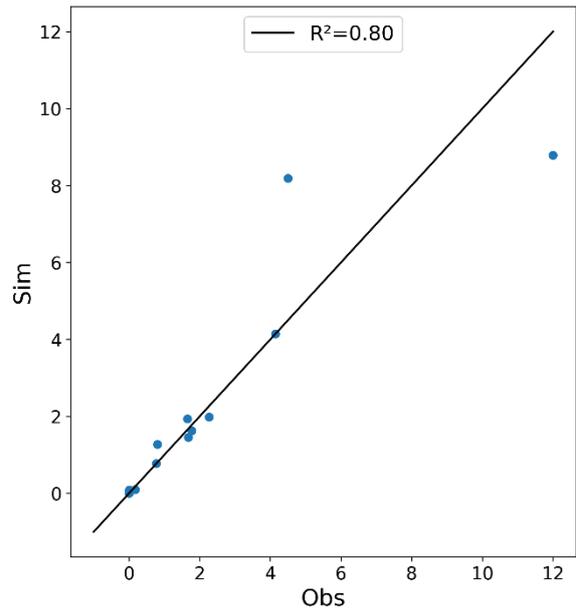
A Figura 22 mostra a produção de sedimentos dos eventos observados e simulados na pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata. Após a análise da calibração e validação; optou-se por mostrar o resultado gráfico com o total dos eventos representativos das observações (12 eventos) comparados com as respostas das simulações do mesmo período. Em geral, as simulações K2-PI apresentaram bons resultados, possivelmente sendo as mais adequadas para estimativas de produção de sedimentos da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, podendo ser reaplicadas a outras bacias da Amazônia. Esses resultados são confirmados pelo desempenho estatístico apresentado na Tabela 9.

Observando a Figura (22.a), nota-se que dois eventos (17/04/13 e 22/04/13) não foram bem simulados, possuem variabilidade mais visíveis quando comparados com os dados observados. Isso pode significar que, mesmo que a não linearidade do modelo K2 seja uma das causas da variabilidade e diferenças nas respostas da modelagem com K2-PI, existem outras causas dessas diferenças nas representações de produção de sedimentos. Por exemplo, segundo de Menezes et al. (2020), as extrapolações dos dados de entrada podem causar sub ou superestimação nas respostas da modelagem. Além disso, pode ser devido à representação inadequada da variabilidade espacial da precipitação, o número de eventos analisados, as incertezas no modelo e nos parâmetros físicos (BIEGER et al., 2014).

Os resultados da calibração, validação e para todo o período analisado mostraram o desempenho satisfatório dos PI para simulação da produção de sedimentos e para estimativas de dados não disponíveis necessários para a modelagem hidrossedimentológica (SANSO & GUENNI, 2000; WAGENER et al., 2001; BENDITO et al., 2023).



(a) Produção de sedimentos observada e simulada - 2013 e 2014



(b) Correlação entre os dados de produção de sedimentos observada e simulada

Figura 22 - Produção de sedimentos observada e simulada para eventos dos anos 2013 e 2014

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

As análises dos dados dos eventos de chuvas máximas diárias exibem bons desempenhos e confiabilidade, através de coeficientes de Nash-Sutcliffe e coeficientes de determinação, considerados satisfatórios para os eventos: A, B, C e D. Esses resultados foram favorecidos pela determinação de valores apropriados na padronização dos parâmetros estimados via PI.

É importante destacar que os resultados das estimativas da lâmina de água e da taxa de escoamento lateral dos eventos de chuvas máximas diárias: A, B, C e D apresentaram confiabilidade nas respostas das medidas simuladas no Kineros2 e método dos problemas inversos, com um grau de confiabilidade igual a 95%. A simulação da taxa de escoamento lateral e a estimativa dos parâmetros abordaram as causas diretas e indiretas da variação da lâmina de água na área de estudo. A taxa lateral e os parâmetros estimados interagiram no comportamento da modelagem chuva-vazão.

Os problemas inversos (desde os mais rigorosos a nível estatístico aos menos formais) podem ser viáveis para analisar as mudanças dos processos hidrológicos e sedimentológicos. No entanto, a metodologia pode apresentar incertezas referentes a medições precisas ou exatas, incertezas que podem ser justificadas pela identificação dos melhores valores numéricos dos parâmetros no processo de padronização. Nesse contexto, o estudo de problemas inversos na hidrologia e hidrossedimentologia promove a adaptação de medidas indiretas de chuva, estimativas da taxa de escoamento lateral e estimativas de dados não disponíveis. Logo, o método dos problemas inversos pode ser considerado para estimativas de produção de sedimentos, que fazem uso otimizado das informações disponíveis e que permitem uma análise detalhada do comportamento do modelo. Do mesmo modo, o método pode ser considerado uma ferramenta de auxílio para redução de custos e otimização de demanda de tempo na simulação hidrossedimentológica com escassez de dados e/ou medidas diretas.

Assim, a modelagem hidrossedimentológica chuva-vazão-produção de sedimentos via problemas inversos analisada no presente trabalho, é viável para representar os cenários reais dos processos físicos e como parte de um sistema de estimativas de dados hidrossedimentológicos para bacias hidrográficas.

Como sugestão para estudos futuros, propõe-se a aplicação de problemas inversos a outros processos físicos na hidrologia (por exemplo: infiltração, armazenamento de água subterrâneo, evaporação, evapotranspiração), aplicação de outros modelos físicos e

empíricos (como exemplo: LISEM, USLE, MUSLE, SWAT) e/ou técnicas (como exemplo: Filtro de partículas, redes neurais artificiais, algoritmo Levenberg-Marquardt), análise dos comportamentos da modelagem e avaliação dos parâmetros influentes nas respostas dos modelos, análise dos casos limites do modelo K2 para validação do problema inverso, análise de incerteza, análise da autocorrelação entre os parâmetros do modelo, bem como os dados de entrada nas distribuições de probabilidade utilizadas como priori, como solução a problemas de identificação de causas diretas e indiretas nos processos hidrológicos, a fim de se entender como estes influenciam nos resultados a posteriori.

Além disso, propõe-se a aplicação de PI a:

- Outras pequenas bacias hidrográficas da Amazônia e de outras regiões; e
- Bacias hidrográficas de médio e grande porte da Amazônia e de outras regiões.

## LIMITAÇÕES E/OU RECOMENDAÇÕES

A produção de gráficos com taxas de infiltração e análise do balanço hídrico da bacia deverá proporcionar o melhor entendimento da influência da taxa de entrada lateral na saída do modelo K2. O uso de outras técnicas na modelagem hidrossedimentológica, como exemplo: usar filtro de partículas como estrutura dos problemas inversos, deverá proporcionar melhor entendimento dos eventos extremos de precipitação.

A escassez de dados medidos na pequena bacia hidrográfica analisada foi uma das principais limitações da modelagem-previsão hidrossedimentológica. No entanto, a técnica dos problemas inversos com abordagem bayesiana utilizada neste estudo, conseguiu representar razoavelmente a estimativa da lâmina de água e da produção de sedimentos em função dos dados observados.

A aplicação do método de Monte Carlo via cadeia de Markov (MCCM) como estrutura dos problemas inversos não conseguiu representar satisfatoriamente as respostas dos eventos extremos. No entanto, as estimativas de produção de sedimentos via método dos problemas inversos conseguiram representar razoavelmente os eventos observados de carga de sedimentos em suspensão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, M. A. I.; EL-WAHAB, M. A.; TAWFIK, M.; KHATER, I. Hydrological Models Simulation in Agricultural Watershed of Wadi Kharouba in North-Western Coast Region – Egypt. **Fresenius Environmental Bulletin**, 31(01A/2022), p. 1063-1078, 2022.

AL-QURASHI, A.; MCINTRYE, N.; WHEATER, H.; UNKRICH, C. Application of the KINEROS2 Rainfall-Runoff Model to an Arid Catchment in Oman. **Journal of Hydrology**, 355, p. 91-105, 2008.

AMADOR, I. C. B.; NUNES, K. G. P.; DE FRANCO, M. A. E.; VIEGAS, B. M.; MACÊDO, E. N.; FÉRIS, L. A.; ESTUMANO, D. C. Application of Approximate Bayesian Computational technique to characterize the breakthrough of paracetamol adsorption in fixed bed column. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 105917, p. 132, 2022.

AN, M.; HAN, Y.; XU, L.; XIURU, W.; AO, C.; PANG, D. KINEROS2-based simulation of total nitrogen loss on slopes under rainfall events. **CATENA**, 177, p. 13-21, 2019.

ANA – Agência Nacional de Águas. Sistema de Informações Hidrológicas - **HidroWeb**. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em março de 2021.

ARAÚJO, A. D. S.; VELHO, H. F. C.; GOMES, V. V. F. Calibrating an hydrological model by an evolutionary strategy for multi-objective optimization. **Inverse Problems in Science and Engineering**, v. 21, n. 3, p. 438-450. 2013.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, **Transactions of the ASABE**, v. 55, n.4, p. 1491-1508, mai. 2012. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>

AYES RIVERA, I., ARMIJOS CARDENAS, E., ESPINOZA-VILLAR, R., ESPINOZA, J., MOLINA-CARPIO, J., AYALA, J., GUTIERREZ-CORI, O., MARTINEZ, J.-M., & FILIZOLA, N. Decline of Fine Suspended Sediments in the

Madeira River Basin (2003–2017). **Water**, 11(3), 514, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11030514>

AZEVEDO, C. A.; FALCÓN, C. T.; ESTUMANO, D. C. Application of Bayesian Technique for Parameter Estimation in a Fermentative Process. **Engenharia Técnica**, v. 19, n. 1, p. 105-111, 2020.

AZEVEDO, C. A. V.; WALKER, W. R.; MERKLEY, G. P. Kinematic wave model in the real time solution of the inverse furrow irrigation problem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 1, p. 35-41, 1997.

BAIA, R. T.; LOBATO, S. L. A.; OLIVEIRA, K. B.; MACEDO, E. N.; BRAGA, E. M.; ESTUMANO, D. C. Inverse problem for estimating and optimization of parameters of batch ethanol fermentation process using Bayesian techniques. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, p. 26496-26516, 2020.

BALASUBRAMANIAN, A. Soil erosion-causes and effects. Order, 2017.

BARBOSA, A. J. S. da S. Modelagem Numérica-Experimental da Produção de Sedimentos de Pequenas Bacias Hidrográficas da Amazônia. 2021. 101 f. **Tese de Doutorado** (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

BATHURST, J. C. Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Systeme Hydrologique Europeen. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 87, n. 1-2, p.79-102, out. 1986. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90116-2)

BECK, J. V.; ARNOLD, K. J. Parameter estimation in Engineering and Science. New York: **Wiley**, 1977.

BENDITO, B. P. C., CHAVES, H. M. L., & SCARIOT, A. Erosion and Sedimentation Processes in a Semi-Arid Basin of the Brazilian Savanna under Different Land Use, Climate Change, and Conservation Scenarios. **Water**, 15(3), 563, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15030563>

BENNETT, J. P. Concepts of mathematical modeling of sediment yield. **Water Resources Research**, v. 10, n. 3, p. 485-492, 1974.

BEVEN, K. Rainfall-runoff modelling: the primer. Second edition. UK: **Wiley** - Blackwell. 457 p., 2012.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v.24, p. 43-69, 1979. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>

BIEGER, K., HÖRMANN, G., & FOHRER, N. Simulation of Streamflow and Sediment with the Soil and Water Assessment Tool in a Data Scarce Catchment in the Three Gorges Region, China. **Journal of Environmental Quality**, 43(1), 37–45, 2014. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0383>

BLANCO, C. J. C.; SANTOS, S. S. M.; QUINTAS, M. C.; VINAGRE, M. V. A.; MESQUITA, A. L. A. Contribution to hydrological modelling of small Amazonian catchments: application of rainfall–runoff models to simulate flow duration curves. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 7, p. 1423-1433, 2013.

BLANCO, C. J.C.; SECRETAN, Y.; FAVRE, A. Análise, aplicação e transposição de um modelo chuva-vazão para simulação de curvas de permanência de pequenas bacias da Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 205216, 2007.

BRAGA, A. C. F. M., SILVA, R. M. D., SANTOS, C. A. G., GALVÃO, C. D. O., & NOBRE, P. Downscaling of a global climate model for estimation of runoff, sediment yield and dam storage: A case study of Pirapama basin, Brazil. **Journal of Hydrology**, 498, 46–58, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.007>

BUTTLE, J. M. Fundamentals of small catchment hydrology. In: Isotope tracers in catchment hydrology. **Elsevier**, p. 1-49, 1998.

CANFIELD, H. E., GOODRICH, D. C., BURNS, I. S. Selection of Parameters Values to Model Post-Fire Runoff and Sediment Transport at the Watershed Scale in Southwestern Forests. **Managing Watersheds for Human and Natural Impacts**, 2005.

CARIELLO, B. L.; BLANCO, C. J. C.; GOMIDE, I. S.; BARBOSA, A. J. S.; SANTOS, D. B. O. Analysis of the Modified Universal Soil Loss Equation to estimate the sediment yield in a small Amazon catchment. **SYLWAN**, vol. 158, p. 347-359, 2014.

CHENG, C. L.; SHALABH, G.; GARG, G. Coefficient of determination for multiple measurement error model. **Journal of Multivariate Analysis**, vol. 126, p. 137-152, 2014.

- CHOW, V. T. Open-channel Hydraulics. **McGraw-Hill**, New York, 667, p. 1959.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied Hydrology. **McGraw-Hill** Series in Water Resources and Environmental Engineering, Singapore, p. 1-572, 1988.
- CLARK, M. P.; KAVETSKI, D.; FENICIA, F. Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. **Water Resources Research**, v. 47, n. 9, 2011.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, p. 27-39, 2003. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n3.p27-39>
- COSTA, C. E. A. DE S., & BLANCO, C. J. C. Influência da Variabilidade Climática sobre a Erosividade em Belém (PA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, 33(3), 509–520, 2018. <https://doi.org/10.1590/0102-7786333010>
- DA SILVA E SILVA, R., BLANCO, C. J. C., DA SILVA CAVALCANTE, I. C., TEIXEIRA, L. C. G. M., FERNANDES, L. L., & PESSOA, F. C. L. Relationship between water quality parameters and land use of a small Amazonian catchment. **Sustainable Water Resources Management**, 6(4), 65, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00421-8>
- DELGADO, D.; SADAQUI, M.; LUDWIG, W.; MÉNDEZ, W. Spatio-temporal assessment of rainfall erosivity in Ecuador based on RUSLE using satellite-based high frequency GPM-IMERG precipitation data. **CATENA**, 219(2022), p. 1-23, 2022.
- DE MENDONÇA, L. M., BLANCO, C. J. C., & DE OLIVEIRA CARVALHO, F. Recurrent neural networks for rainfall-runoff modeling of small Amazon catchments. **Modeling Earth Systems and Environment**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01626-w>
- DE MENEZES, D., MINELLA, J. P. G., & TASSI, R. Monitoring sediment yield for soil and water conservation planning in rural catchments. **Environmental Monitoring and Assessment**, 192(11), 736, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08670-y>
- DE OLIVEIRA FAGUNDES, H., DE PAIVA, R. C. D., BRÊDA, J. P. L. F., FASSONI-ANDRADE, A. C., BORRELLI, P., & FAN, F. M. An assessment of South American sediment fluxes under climate changes. **Science of The Total Environment**, 879, 163056, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163056>

DE ROO, A.P.J., WESSELING, C.G. AND RITSEMA, C.J. LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. **Hydrological Processes**, in press, 1996a.

DE ROO, A.P.J., OFFERMANS, R.J.E. AND CREMERS, N.H.D.T. LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. II: Sensitivity analysis, validation and application. **Hydrological Processes**, in press, 1996b.

DE SOUZA, C. E. A. C.; BLANCO, C. J. C.; JÚNIOR, J. F. O. Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River. **Climatic Change**, v. 166, n. 45, p. 1-22, 2021.

DUAN, Y., WILSON, A. M., & BARROS, A. P. Scoping a field experiment: Error diagnostics of TRMM precipitation radar estimates in complex terrain as a basis for IPHEX2014. **Hydrology and Earth System Sciences**, 19(3), 1501–1520, 2015. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1501-2015>

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

ENGELUND, F.; HANSEN, E. A monograph on sediment transport in alluvial streams. **Teknisk Vorlag**, p. 62, 1967.

ENGL, H. W; HANKE, M.; NEUBAUER, A. Regularization of Inverse Problems. **Kluwer Academic Publishers**, Dordrecht, Países Baixos, 1996.

FAIR, G. M.; GEYER, J. C. Water supply and wastewater disposal. John **Wiley** and Sons, New York, p. 993, 1954.

FARINASSO, M.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perda de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do alto Parnaíba – PIMA, **Revista Brasileira de Geomorfologia Uberlândia**, v. 7, n. 2, p. 73-85, 2006.

FLANAGAN, D.C.; NEARING, M. A. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. **USDA ARS National Soil Erosion Research Laboratory**. West Lafayette, Indiana, 1995.

- GAJBHIYE, S., MISHRA, SK & PANDEY, A. Priorización de áreas propensas a la erosión a través del análisis morfométrico: una perspectiva RS y GIS. *Appl Water Sci* 4, 51–61, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0129-7>
- GALINA, V.; CARGNELUTTI, J.; KAVISKI, E.; GRAMANI, L. M.; LOBEIRO, A. M. Application of lattice Boltzmann method for surface runoff in watershed. *International Journal of Numerical Methods for Calculation and Design in Engineering (RIMNI)*, v. 34, n. 1, p. 1-10, 2018.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., BEGUERÍA, S., NADAL-ROMERO, E., GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C., LANA-RENAULT, N., & SANJUÁN, Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 239, 160–173, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>
- GEIGER, R. Landolt-Börnstein–Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, alte Serie Vol. 3. Ch. Klassifikation der Klimate nach W. Köppen. **Springer**, Berlin, p. 603-607, 1954.
- GEMAN, S.; GEMAN, D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, n. 6, p. 721-741, 1984.
- GEBREMICAEL, T. G., MOHAMED, Y. A., ZAAG, P. V. D., GEBREMEDHIN, A., GEBREMESKEL, G., YAZEW, E., & KIFLE, M. Evaluation of multiple satellite rainfall products over the rugged topography of the Tekeze-Atbara basin in Ethiopia. *International Journal of Remote Sensing*, 40(11), 4326–4345, 2019. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1562585>
- GOODRICH, D. C.; BURNS, I. S.; UNKRICH, C. L.; SEMMENS, D. J.; GUERTIN, D. P.; HERNANDEZ, M., et al. (2012). KINEROS2/AGWA: model use, calibration and validation. *Transactions of the ASABE* (American Society of Agricultural and Biological Engineers), v. 55, n. 4, p. 1561-1574, 2012.
- 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.
- GUBER, A. K., Y. A. PACHEPSKY, A. M. YAKIREVICH, D. R. SHELTON, A. M. SADEGHI, D. C. GOODRICH, & C. L. UNKRICH. Uncertainty in modelling of faecal

coliform overland transport associated with manure application in Maryland. **Hydrological Process**, 25(15): 2393-2404, 2011.

GUO. Y.; PENG. C.; ZHU. Q.; WANG. M.; WANG. H.; PENG. S.; HE. H. Modelling the impacts of climate and land use changes on soil water erosion: Model application, limitations and future challenges. **Journal of Environmental Management**, 250 (2019) 109403, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109403>.

HAMEL, P., CHAPLIN-KRAMER, R., SIM, S., & MUELLER, C. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. **Science of The Total Environment**, 524–525, 166–177, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.027>

HANTUSH, M. M.; KALIN, L. Uncertainty and sensitivity analysis of runoff and sediment yield in a small agricultural watershed with KINEROS2. **Hydrological Sciences Journal**, v. 50, n. 6, p. 1151-1171, 2005.

HARCHE, S. E.; CHIKHAOUI, M.; NAIMI, M.; CHOUKRI, F.; CHAAOU, A. Comparative analysis between KINEROS2 and SWAT for hydrological modeling: A case study from Tleta Watershed in Morocco. **International Journal of Environmental, Agriculture and Biotechnology**, v. 6, n. 1, p. 270-281, 2021.

HASTINGS, W. K. Monte Carlo sampling methods using Markov Chains and their applications. **Biometrika**, v. 57, n. 1, 97-109, 1970.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística. Vetores geoespaciais da pedologia brasileira na escala 1:250.000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871pedologia.html?=&t=downloads>. Acesso em março de 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística. Capitão Poço. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/capitao-poco/panorama>. Acesso em outubro de 2023.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Mapeamento do uso e cobertura da terra na Amazônia Legal, Projeto TerraClass Amazônia Legal. 2014. Disponível em: <https://www.terraclass.gov.br/geoportal-aml/>. Acesso em dezembro de 2021.

ISMAIL, A.; KARIM, F.; ROY, G.; MEAH, M. A. (2007). Numerical modelling of tsunami via the method of lines. World Academy of Science, **Engineering and Technology**, n. 32, p. 177–185, 2007.

KAIPIO, J. P.; SOMERSALO, E. Statistical and computational inverse problems. **Springer Science & Business Media**. 2006.

KAUTZ, M. A., HOLIFIELD, C. D., GUERTIN, D. P., GOODRICH, D. C., VAN, W. J, WILLIAMS, C. J. Hydrologic model parameterization using dynamic Landsat-based vegetative estimates within a semiarid grassland. **Journal of Hydrology**, 575, p. 1073-1086, 2019.

KENNEDY, J. R.; GOODRICH, D. C.; UNKRICH, C. L. Using the KINEROS2 Modeling Framework to Evaluate the Increase in Storm Runoff from Residential Development in a Semiarid Environment. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 6, p. 698–706, 2013.

KIM, K.; WHELAN, G.; PURUCKER, T.; BOHRMANN, T. F.; CYTERSKI, M. J.; MOLINA, M.; GU, Y.; PACHEPSKY, Y.; GUBER, A.; FRANKLIN, D. R. Rainfall-runoff model parameter estimation and uncertainty evaluation on small plots. **Hydrological Processes**, v. 28, p. 5220-5235, 2014.

KÖPPEN, W. Das geographische system der klimat. Handbuch der klimatologie, p. 46, 1936.

KORGAONKAR, Y.; MELES, M. B.; GUERTIN, D. P., GOODRICH, D. C., UNKRICH, C. Global sensitivity analysis of KINEROS2 hydrologic model parameters representing green infrastructure using the STAR-VARS framework. **Environmental Modelling and Software**, v. 132, 104814, p. 1-10, 2020.

KOULI, M.; SOUPIO, P.; VALLIANATOS, F. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. **Environmental Geology**, v. 3,73133, p. 1-15, 2008.

LAGADEC, L. R.; PIERRE, P. P.; BRAUD, I.; CHAZELLE, B.; MOULIN, L.; DEHOTIN, J.; HAUCHARD, E.; BREIL, P. Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. **Journal of Hydrology**, 541, p. 495-509, 2016.

LANGE, J.; HAENSLER, A. Runoff generation following a prolonged dry period. **Journal of Hydrology**, 464-465, p. 157-164, 2012.

- LENSE, G. H. E., PARREIRAS, T. C., MOREIRA, R. S., AVANZI, J. C., & MINCATO, R. L. Estimates of soil losses by the erosion potential method in tropical latosols. **Ciência e Agrotecnologia**, 43, e012719, 2019. <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943012719>
- LIGHTHILL, M. J.; WHITHAM, G. B. On kinematic waves. I. Flood movement in long rivers. **Proc. Royal Society London**, Series A, 229(1178), p. 281-316, 1955.
- LIMA, S. R. M.; BLANCO, C. J. C.; GOMIDE, I. S.; BARBOSA, A. J. S.; GONCALVES, M. F. Análise do Fator de Erosividade da Chuva para uma Pequena Bacia Hidrográfica da Amazônia. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 6, p. 184-191, 2014.
- LOPES, V.L. A numerical model of watershed erosion and sediment yield. Tucson, 148 p. **PhD - Dissertation**, University of Arizona. 1987a.
- LOPES, V.L.; CANFIELD, H.E. “Effects of Watershed Representation on Runoff and Sediment Yield Modeling”. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, v. 40, n. 2, p. 311-319, 2004.
- MARTINEZ, L. V. Modelling and inverse-modelling: experiences with O.D.E. linear systems in engineering courses. **International journal of Mathematical Education in Science and Technology**, v. 40, n. 2, p. 259-268, 2009.
- MELSEN, L.; TEULING, A.; TORFS, P.; ZAPPA, M.; MIZUKAMI, N.; CLARK, M.; UIJLENHOET, R. Representation of spatial and temporal variability in large-domain hydrological models: case study for a mesoscale pre-Alpine basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 6, p. 2207-2226, 2016.
- MEMARIAM, H.; BALASUNDRAM. S. K.; TALIB, J.; SUNG, C. T. B.; SOOD, A. M.; ABBASPOUR, K. C.; HAGHIZADEH, A. Hydrologic Analysis of a Tropical Watershed using KINEROS2. **Environment Asia**, v. 5, n. 1, p. 84–93. 2012.
- METROPOLIS, N.; ULAM, S. The monte carlo method. **Journal of the American statistical association**, v. 44, n. 247, p. 335-341, 1949.
- MICHAUD, J. D.; SOROOSHIAN, S. Effect of rainfall sampling errors on simulations of desert flash floods. **Water Resources Research**, v. 30, n. 10. p. 2765-2777, 1994.

MIRZAEI, M.; FAGHIH, M.; YING, T. P.; EL-SHAFIE, A.; HUANG, F. & LEE, J. Application of a rainfall-runoff model for regional-scale flood inundation mapping for the Langat River Basin. **Water Practice & Technology**, v. 11, n. 2, p. 373–383, 2016.

MORAES, B. C. D.; COSTA, J. M. N. D.; COSTA, A. C. L. D.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. *Acta amazônica*, v. 35, p. 207-214, 2005.

MORIASI DN, ARNOLD JG, VAN LIEW MW, BINGNER RL, HARMEL RD et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Trans ASABE**, 50(3):885–900, 2007.

MOURA, C. H. R.; VIEGAS, B. M.; TAVARES, M. R. M.; MACÊDO, E. N.; ESTUMANO, D. C.; QUARESMA, J. N. N. Parameter Estimation in Population Balance through Bayesian Technique Markov Chain Monte Carlo. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, v. 7, n. 2, p. 890-901, 2021.

MOURA, C. H.; VIEGAS, B. M.; TAVARES, M.; MACEDO, E.; ESTUMANO, D. C. Estimation of Parameters and Selection of Models Applied to Population Balance Dynamics Via Approximate Bayesian Computational. **Journal of Heat and Mass Transfer Research**, v. 9, n. 1, p. 53-64, 2022.

MUKAKA, M. M. Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient medical research.in, 2012.

MULVANEY, T. J. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. **Proceedings of the institution of Civil Engineers of Ireland**, v. 4, p. 19-31, 1851.

NASH, J. E; SUTCLIFFE, J. V. River Flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NGUYEN, H. Q.; DEGENER, J.; KAPPAS, M. Flash Flood prediction by coupling KINEROS2 and HEC-RAS Models for Tropical Regions of Northern Vietnam. **Journal of Hydrology**, n. 2, p. 242-265. 2015.

NIKOLOVA, M., N. STOYAN, V. NIKOLOV, I. ZUZDROV, M. GENEV, T. KOTSEV, R. VATSEVA, & Y. KRUMOVA. Implementation of the “KINEROS” model for estimation of the flood prone territories in the Malki Iskar River basin. **Info. and Security** 24: 76-88, 2009.

NUNES, K. G. P.; DÁVILA, I. V. J.; AMADOR, I. C. B.; ESTUMANO, D. C.; FÉRIS, L. A. Evaluation of zinc adsorption through batch and continuous scale applying Bayesian technique for estimate parameters and select model. **Journal of Environmental Science and Health**, Part A, v. 56, n. 11, p. 1228-1242, 2021.

NUNES, K. G. P.; DAVILA, I. V. J.; ARNOLD, D.; MOURA, C. H. R.; ESTUMANO, D. C.; FÉRIS, L. A. Kinetics and Thermodynamic Study of Laponite Application in Caffeine Removal by Adsorption. **Environmental processes**, v. 9, n3, p. 1-17. 2022.

OLIVEIRA, R. F.; NUNES, K. G. P.; JURADO, I. V.; AMADOR, C. B.; ESTUMANO, D. C.; FÉRIS, L. A. Cr (VI) adsorption in batch and continuous scale: A mathematical and experimental approach for operational parameters prediction. **Environmental Technology & Innovation**, 20, 101092, 2020.

OMM - Organização Mundial de Meteorologia. Guia de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, 2014. Disponível em: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=3664](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3664). Acesso em 18/09/2023.

OYMAK, O.; SELÇUK, N. Method of Lines Solution of Time Dependent Two Dimensional Navier-Stokes Equations. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 23, n. 5, p. 455–466, 1996.

ÖZISIK, M. N.; ORLANDE, H. R. B. Inverse Heat Transfer, New York: **Taylor & Francis**, 2000.

PAIVA, E.M.C.D. Métodos de Estimativa da Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D (Orgs.). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: **ABRH/UFSM**. cap. 13, pp.365-394, 2003.

PANDEY, A.; CHOWDARY, V. M.; MAL, B. C. Sediment Yield Modelling of an Agricultural Watershed Using MUSLE, Remote Sensing and GIS. **Springer-Verlag**, n. 7, p. 105-113, 2009.

PARLANGE, J. Y.; LISLE, I.; BRADDOCK, R. D.; SMITH, R. E. The three parameter infiltration equation. **Soil Science**, v. 133, n. 6, p. 337–341, 1982.

PECHLIVANIDIS, I. G.; JACKSON, B. M.; MCINTYRE, N. R.; WHEATER, H. S. Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration

approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. **Global NEST Journal**, v. 13, n. 3, p. 193-214, 2011.

PEEL, M. C.; MCMAHON, T. A. Historical development of rainfall-runoff modeling. Wiley Interdisciplinary Reviews: **Water**, v. 7, n. 5, p. e1471, 2020.

RENARD, K.G. et al. (Coord.). Predicting Soil Erosion By Water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Agricultural Handbook, Washington-D.C: **USDA**, n. 703, p. 384, 1996.

ROGERS, W. F. New concept in hydrograph analysis. **Water Resources Research**, v. 8, n. 4, p. 973-981, 1972.

ROKNUJJAMAN, M.; ASADUZZAMAN, M. On the Solution Procedure of Partial Differential Equation (PDE) with the Method of Lines (MOL) Using Crank-Nicholson Method (CNM). **American Journal of Applied Mathematics**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2018.

ROMANOV, A. V. Inverse Problems in Mathematical Modeling of Flood Waves Routing. **Russian Meteorology and Hydrological**, v. 34, n. 8, p. 549-555, 2009.

SADIKU, M. N. O.; GARCÍA, R. C. Method of Lines Solution of Axisymmetric Problem. **IEEE SoutheastCon 2000 Proceedings**. "Preparing for The New Millennium" (Cat. No.00CH37105), p. 527-530, 2000.

SANPAIO, L. DA C.; BLANCO, J. C. C. Modelo WEPP para estimativa da Produção de sedimentos em uma pequena Bacia Hidrográfica da Amazônia. **GEOARAGUAIA**, v. 10, n. 2, p. 197-216, 2020.

SANSO, B.; GUENNI, L. A Nonstationary Multisite Model for Rainfall. **Journal of the American Statistical Association**, v. 95, n. 452, p. 1089–1100, 2000.

SANTANA, L. R.; BLANCO, C. J. C. Contribution to the classification of small catchments according to the drainage area. **International Journal of River Basin Management**, p. 1-12, 2020.

SANTOS, C. A. G. et al. Influência do tipo da cobertura vegetal sobre a erosão no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 92-96, 2001.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológico: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 3, p.01-19, set. 2009.

SANTOS, D. B. O; BLANCO, C. J. C; PESSOA, F. C. L. RUSLE para determinação da tolerância de perda do solo. **Biota Amazônia**, v. 5, n. 4, p 78-83, 2015.

SANTOS, C. A. G.; SRINIVASAN, V. S.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. Application of an optimization technique to a physically based erosion model. **Hydrological Process Journal**, 17, p. 989-1003, 2003.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.

SAVENIJE, H. H. G. Equifinality, a blessing in disguise? **Hydrological processes**, v. 15, n. 14, p. 2835-2838, 2001.

SCHAFFNER, M.; UNKRICH, C. L. & GOODRICH, D. C. Application of the KINEROS2 site-specific model to south-central NY and northeast PA: Forecasting gages and ungaged fast-responding watersheds. Tech. Attachment No. 2010-01. Bohemia, N. Y.: **National Weather Service**, Eastern Region. 2010.

SCHIESSER, W.; GRIFFITHS, G. Method of lines solutions for the three-wave model of Brillouin equations. Engineering Computations: **International Journal for Computer-Aided Engineering and Software**, v. 31, n. 3, p. 388-405, 2014.

SHAKERI, F.; DEGHAN, M. The method of lines for solution of the one dimensional wave equation subject to an integral conservation condition. **Computers and Mathematics with Applications**. n. 56, p. 2175 – 2188, 2008.

SHERMAN, Jack. Crystal Energies of Ionic Compounds and Thermochemical Applications. **Chemical Reviews**, v. 11, n. 1, p. 93-170, 1932.

SILVEIRA, A. L. L. D. "Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica." Hidrologia – Ciência Aplicada, C. E. M. Tucci, ed., Editora da **UFRGS / ABRH**, Porto Alegre, 943, 1993.

SINGH, V. P., & REGL, R. R. Analytical solutions of kinematic equations for erosion on a plane I. Rainfall of indefinite duration. **Advances in Water Resources**, 6(1), 2-10, 1983. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(83\)90073-8](https://doi.org/10.1016/0309-1708(83)90073-8)

SITTERSON, J.; KNIGHTES, C.; PARMAR, R.; WOLFE, K.; AVANT, B.; MUCHE, M. An overview of rainfall-runoff model types. **In International Congress on Environmental Modelling and Software**. 2018.

SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C.; WOOLHISER, D. A.; UNKRICH, C. L. KINEROS: a kinematic runoff and erosion model. In: SINGH, V. J. - Computer Models of Watershed Hydrology. **Water Resources Research**. Highlands Ranch: Water Resources Publications. p. 697-732. 1995.

TAN, Z., LEUNG, L. R., LI, H., TESFA, T., VANMAERCKE, M., POESEN, J., ZHANG, X., LU, H., & HARTMANN, J. A Global Data Analysis for Representing Sediment and Particulate Organic Carbon Yield in Earth System Models. **Water Resources Research**, 53(12), 10674–10700, 2017. <https://doi.org/10.1002/2017WR020806>

TARTAGLIA, N. Nova Scientia, Venice. 1537.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

USDA. United States Department of Agriculture. TUCSON-KINEROS2: A kinematic runoff and erosion model, 2013. Disponível em < <http://tucson.ars.ag.gov/kineros>>. Acesso em novembro de 2018.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. Stream Corridor Restoration – principles, processes and practices. EUA: **National Technical Info Svc**, 1998.

USGS – United States Geological Survey. Satellite images, aerial photographs, and cartographic products. 2014. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em maio de 2021.

VIEGAS, B. M.; MAGALHÃES, E. M.; ORLANDE, H. R. B.; ESTUMANO, D. C.; MACÊDO, E. N. Experimental study and mathematical modelling of red mud leaching: application of Bayesian techniques. **International Journal of Environmental Science and Technology**, p. 1-14, 2022.

VILLARREAL, M. L.; NORMAN, L. M.; YAO, E. H.; CONRAD, C. R. Wildfire probability models calibrated using past human and lightning ignition patterns can inform mitigation of post-fire hydrological hazards. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 13, n. 1, p. 568-590, 2022.

WAGENER, T., BOYLE, D. P., LEES, M. J., WHEATER, H. S., GUPTA, H. V., & SOROOSHIAN, S. A framework for development and application of hydrological

models. **Hydrology and Earth System Sciences**, 5(1), 13–26, 2001.  
<https://doi.org/10.5194/hess-5-13-2001>

WALKER, W. R.; HUMPHERYS, A. S. Kinematic wave Furrow Irrigation Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, New York, v. 109, n. 4, p. 377-392, 1983.

WILLIAMS, G. P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. **Journal of Hydrology**, 111(1–4), 89–106, 1989.  
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90254-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90254-0)

WILLIAMS, J. R. Sediment routing for agricultural watersheds. **Water Resources Bulletin**. USDA – Texas, p. 965-974, 1975.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting Rainfall-Erosion Losses from Gopland East of the Rocky Mountains. **Agricultural Handbook**, n. 282, p 47, 1965

WOOLHISER, D. A. Hydrologic and watershed modeling—state of the art. **Transactions of the ASAE**, v. 16, n. 3, p. 553-559, 1973.

WOOLHISER, D. A.; GOODRICH, D. C. Effect of storm rainfall intensity patterns on surface runoff. **Journal of Hydrologic Engineering**. Eng., v. 5, n. 4, p. 355-362, 1988.

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. US Department of Agriculture, **Agricultural Research Service**, ARS-77, 1990.

ZIEGLER, A. D., T. W. GIAMBELLUCA, D. PLONDKE, S. LEISZ, L. T. TRAN, J. FOX, M. A. NULLET, J. B. VOGLER, D. M. TROUNG, AND T. D. VIEN. Hydrological consequences of landscape fragmentation in mountainous northern Vietnam: Buffering of Hortonian overland flow. **Journal of Hydrological**. 337(1-2): 52-67, 2007.

**APÊNDICE A – COMPROVAÇÃO DA PRIMEIRA REVISÃO DO  
ARTIGO INTITULADO “Parameter Estimation Using the Inverse  
Problem Method for Simulating Lateral Inflow and Runoff Depth in a  
small catchment of Amazon”, SUBMETIDA AOS ANAIS DA  
ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS (ISSN: 1678-2690)**

 Anais da Academia Brasileira de Ciências

 Home

 Author

 Review

## Submission Confirmation

 Print

---

Thank you for your revision

---

**Submitted to**

Anais da Academia Brasileira de Ciências

**Manuscript ID**

AABC-2023-0570.R1

**Title**

Parameter Estimation Using the Inverse Problem Method for Simulating Lateral Inflow and Runoff Depth in a small catchment of Amazon

**Authors**

Torres Falcón, Cindy

Blanco, Claudio

Estumano, Diego

**Date Submitted**

16-Aug-2023

**APÊNDICE B – COMPROVAÇÃO DA SUBMISSÃO DO SEGUNDO  
ARTIGO À REVISTA ENVIRONMENT, DEVELOPMENT AND  
SUSTAINABILITY (ISSN: 1573-2975)**

**Environment, Development and Sustainability**

**Inverse problem models for rainfall–runoff–sediment process modelling applied to a  
small catchment in the Amazon**

--Manuscript Draft--

<b>Manuscript Number:</b>		
<b>Full Title:</b>	Inverse problem models for rainfall–runoff–sediment process modelling applied to a small catchment in the Amazon	
<b>Article Type:</b>	Original paper	
<b>Keywords:</b>	Sediment yield, KINEROS2, Inverse problem, Parameter estimation	
<b>Corresponding Author:</b>	Claudio Blanco, PhD UFPA Belém, Pará BRAZIL	
<b>Corresponding Author Secondary Information:</b>		
<b>Corresponding Author's Institution:</b>	UFPA	
<b>Corresponding Author's Secondary Institution:</b>		
<b>First Author:</b>	Cindy Torres Falcón, Master	
<b>First Author Secondary Information:</b>		
<b>Order of Authors:</b>	Cindy Torres Falcón, Master Claudio Blanco, PhD Diego Cardoso Estumano, PhD Ana Julia Soares Barbosa, PhD	
<b>Order of Authors Secondary Information:</b>		
<b>Funding Information:</b>	Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil (CAPES) (001) CNPq (308147/2021-9) the office for research (PROPESP) and Foundation for Research Development (FADESP) of the Federal University of Pará (PAPQ2023)	PhD student Cindy Torres Falcón Professor Claudio Blanco Professor Diego Cardoso Estumano
<b>Abstract:</b>	The objective of this work was to develop a rainfall–runoff–sediment yield model to evaluate the sediment yield of a small Amazonian catchment according to the available data. Available sediment yield data were obtained from the literature, and events in 2013 and 2014 were analysed. For a more specific and detailed analysis of model behaviour, combinations of information from observations and the KINEROS2 (K2) model were performed simultaneously with inverse problem (IP) method. The results showed a good fit between the observed and predicted data via IP, as Nash-Sutcliffe coefficients above 0.70 and RMSE between 0.27 and 1.99 were determined in the model calibration and validation. The simulation of sediment yield showed a degree of reliability equal to 95%, which was consistent with the observed data.	