

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL**

**Alessandro Gustavo Franck**

**Desempenho e análise de sensibilidade do modelo Morpho2DH em  
eventos extremos no sul do Brasil.**

Porto Alegre – RS

2024

**Alessandro Gustavo Franck**

**Desempenho e análise de sensibilidade do modelo Morpho2DH em eventos  
extremos no sul do Brasil.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Masato Kobiyama

Porto Alegre – RS

2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Franck, Alessandro Gustavo  
Desempenho e análise de sensibilidade do modelo  
Morpho2DH em eventos extremos no sul do Brasil. /  
Alessandro Gustavo Franck. -- 2024.  
181 f.  
Orientador: Masato Kobiyama.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. modelagem numérica. 2. movimentos de massa. 3.  
fluxo de detritos. 4. Brasil. 5. Morpho2DH. I.  
Kobiyama, Masato, orient. II. Título.

ALESSANDRO GUSTAVO FRANCK

Desempenho e análise de sensibilidade do modelo Morpho2DH em eventos extremos no sul do Brasil.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 19 de março de 2024.

.....  
Prof. Dr. Masato Kobiyama - IPH/UFRGS  
Orientador

.....  
Prof. Dr. Gean Paulo Michel - IPH/UFRGS  
Examinador

.....  
Prof. Dr. Leonardo Romero Monteiro - UDESC  
Examinador

.....  
Prof. Dra. Karla Campagnolo – Senac-RS  
Examinadora

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os professores que contribuíram muito para minha formação e através das aulas, conversas e discussões fizeram eu me interessar cada vez mais e desbravar esse mundo da pesquisa acadêmica.

Ao professor Masato, pelas longas conversas sobre ciência que fizeram eu me apaixonar pela vida acadêmica, por sempre me incentivar e me desafiar e por me orientar nessa jornada.

A Fabiane, pela paciência, companheirismo e por sempre me apoiar e me animar mesmo nos momentos difíceis. E por toda a ajuda com seu olhar crítico e organização que me ajudaram muito durante o trabalho.

A toda minha família, em especial minha mãe Veranilce, meu pai Elio e o meu segundo pai Elieser, que sempre me apoiaram em todas as minhas escolhas me incentivaram a seguir nesse caminho do estudo e me ajudaram durante todo esse período para que eu pudesse concluir mais essa etapa.

A todos os meus colegas do Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais por toda ajuda e pelas ideias que contribuíram para que eu concluísse esse trabalho. E pelos materiais e dados compartilhados que permitiram a execução desse estudo.

Ao Dr. Hiroshi Takebayashi do Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University Kyoto University, pelo apoio e por me auxiliar com algumas dúvidas sobre o Morpho2DH.

Para os examinadores Karla, Gean e Leonardo, e também para o professor Manica, pelas valiosas contribuições e correções que lapidaram o meu trabalho até essa versão final.

A CAPES e ao CNPq pelos auxílios financeiros que permitiram a conclusão desse estudo.

A todos os meus amigos e colegas que fizeram parte dessa jornada.

## RESUMO

O fluxo de detrito é um fluxo de uma mistura de água e sedimentos com um comportamento de fluido contínuo, impulsionado pela gravidade, que atinge grande mobilidade a partir do momento em que os espaços vazios, são saturados com água ou lama. Esse fenômeno pode se mover em velocidades consideráveis, desloca grandes volumes de material e possui um longo alcance. Sendo assim, é essencial que haja uma melhor gestão e um maior planejamento territorial para prevenção de desastres. Nesse sentido uma das ferramentas que pode ser utilizada é a modelagem computacional para previsão de áreas susceptíveis a esses fenômenos. A análise de sensibilidade é um passo crucial no processo de avaliação do modelo e na interpretação dos resultados. Através da análise de sensibilidade, obtemos informações essenciais sobre o comportamento do modelo. Desta forma, o objetivo do presente estudo foi realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada do modelo de simulação de fluxos de detritos Morpho2DH, avaliar se esse é adequado para a previsão e mapeamento de perigo desse fenômeno no Brasil e recomendar critérios de aplicação para o modelo. O modelo foi aplicado em duas áreas no sul do Brasil, sendo elas: (i) Presidente Getúlio, em Santa Catarina, onde ocorreu um grande desastre em 2020 no alto vale do Itajaí; (ii) e Rolante, no Rio Grande do Sul, local de um desastre que ocorreu em 2017 na bacia do rio Mascarada. A metodologia consistiu em três etapas: (i) a calibração do modelo para os dois locais, variando principalmente o volume de entrada; (ii) análise de sensibilidade com abordagem *One At a Time* (OAT) dos parâmetros de entrada selecionados; (iii) análise de sensibilidade com abordagem *All At a Time* (AAT). Foram avaliadas as sensibilidades dos parâmetros de entrada para as variáveis de saída área total atingida, distância total percorrida, velocidade média, altura média, altura máxima e volume depositado. Os resultados da análise OAT demonstram que os parâmetros mais sensíveis dentre os avaliados foram a profundidade máxima de erosão do leito, o coeficiente de resistência, a profundidade mínima do fluxo e o diâmetro médio das partículas. Enquanto a concentração de sedimentos do leito estático, a vegetação e o ângulo de atrito interno apresentaram uma média sensibilidade. Já os parâmetros densidade do líquido, concentração de sedimentos e densidade do sedimento apresentaram as menores sensibilidades, chegando a não apresentar nenhuma influência em algumas das variáveis analisadas. Já os resultados da análise AAT demonstram que o parâmetro concentração do leito estático exerce a maior influência dentre os parâmetros analisados nessa etapa, e ao manter esse constante, o impacto da variação todos os outros parâmetros é pouco significativo. Por fim, recomenda-se que se utilize o modelo para situações em que o volume de entrada e os dados relativos ao terreno, espessuras de erosão e diâmetros médio das partículas sejam bem definidos. E também que se leve em consideração o custo computacional do modelo para a magnitude do evento que se deseja simular.

**Palavras-chave:** modelagem numérica, movimentos de massa, fluxo de detritos, Brasil.

## ABSTRACT

Debris flows are a mixture of water and sediment with a continuous fluid behavior, driven by gravity, which achieves great mobility once void spaces are saturated with water or mud. This phenomenon can move at high speeds, displacing large volumes of material over long distances. Therefore, it is essential to have better management and spatial planning to prevent disasters. In this regard, one of the tools that can be used is computational modeling to predict areas susceptible to these phenomena. Sensitivity analysis is a crucial step in evaluating the model and interpreting the results. Through sensitivity analysis, we obtain essential information about the model's behavior. Thus, the objective of this study was to perform sensitivity analysis of input parameters of the debris flow simulation model Morpho2DH, evaluate its suitability for predicting and mapping the hazard of this phenomenon in Brazil, and recommend application criteria for the model. The model was applied in two areas in southern Brazil: (i) Presidente Getúlio, in Santa Catarina, where a major disaster occurred in 2020 in the upper Itajaí valley; (ii) and Rolante, in Rio Grande do Sul, the place of a disaster that occurred in 2017 in the Mascarada river basin. The methodology consisted of three steps: (i) model calibration for the two locations, mainly varying the input volume; (ii) sensitivity analysis using the One At a Time (OAT) approach for selected input parameters; (iii) sensitivity analysis using the All At a Time (AAT) approach. The sensitivities of input parameters for output variables such as total area affected, total distance traveled, average velocity, average height, maximum height, and deposited volume were evaluated. The results of the OAT analysis demonstrate that the most sensitive parameters among those evaluated were maximum bed erosion depth, resistance coefficient, minimum flow depth, and average particle diameter. Meanwhile, static bed sediment concentration, vegetation, and internal friction angle showed moderate sensitivity. Parameters such as liquid density, sediment concentration, and sediment density showed the lowest sensitivities, sometimes not influencing some of the analyzed variables. The results of the AAT analysis show that the static bed concentration parameter has the greatest influence among the parameters analyzed in this stage, and keeping this constant, the impact of varying all other parameters is relatively insignificant. Finally, it is recommended to use the model for situations where input volume and terrain data, erosion thicknesses, and average particle diameters are well-defined. Additionally, computational cost of the model should be considered concerning the magnitude of the event to be simulated.

**Keywords:** numerical modelling, mass movement, debris flow, Brazil.

## Lista de Figuras

Figura 1: Tipos de movimento de massa. ....	20
Figura 2: Classificações de movimentos de massa e fluxos. As flechas azuis indicam que o fluxo teve origem em um escorregamento ou liquefação da superfície de um escorregamento. A sobreposição dos blocos indica que os mecanismos de propagação desses movimentos de massa são semelhantes. ....	24
Figura 3: Diagrama de classificação para fluxo de detritos dinâmicos, onde $\tau_b$ , $\tau_\mu$ e $\tau_c$ representam mecanismos responsáveis pela sustentação das partículas durante o escoamento de um fluxo e são respectivamente a tensão cisalhante proveniente de linhas de correntes turbulentas, as tensões que derivam das forças viscosas do fluido, e as tensões provenientes da colisão entre partículas da mistura. .	26
Figura 4: Morfologia de um fluxo de detritos. ....	27
Figura 5: Taxonomia de um fluxo de detritos. ....	29
Figura 6: Correlação positiva entre o volume do fluxo e o comprimento da encosta. ....	30
Figura 7: Representação de uma área de deposição de um fluxo de detritos em formato de leque. ....	31
Figura 8: Caracterização entre a declividade do terreno e o movimento de um fluxo de detritos. ....	32
Figura 9: Comportamento reológico de diferentes fluidos quando sujeitos tensões de cisalhamento. ....	33
Figura 10: Esboço da relação entre a deformação do leito e a declividade de equilíbrio. ....	43
Figura 11: Esquema da formação de fluxos laminar e turbulento e a relação entre fluxo de detritos e fluxo de lama. ....	44
Figura 12: Fluxograma de trabalho sugerido em um estudo de análise de sensibilidade. ....	51
Figura 13: Localização da área de estudo 1 em Presidente Getúlio – SC e do fluxo de detritos que ocorreu no bairro Ribeirão Revólver que foi utilizado nesse estudo. ....	57
Figura 14: Fluxos de detritos registrados após o desastre de 2020 na região do Alto Itajaí em Santa Catarina. ....	58
Figura 16: Localização da área de estudo 2 em Rolante – RS e do fluxo de detritos que ocorreu a montante na bacia do Rio Mascarada que foi utilizado nesse estudo. ....	60
Figura 17: Fluxos de detritos registrados após o evento de 2017 no Rio Grande do Sul. ....	62
Figura 19: Fluxograma da metodologia utilizada no presente estudo. ....	64
Figura 20: Localização das regiões de profundidade máxima de erosão no evento 1 (a) e 2 (b). ....	68
Figura 21: Área de vegetação de grande porte no domínio de simulação do evento 1 (a) e 2 (b). ....	68
Figura 22: Grade de cálculo para o evento 1 (A) e evento 2 (B). ....	69
Figura 23: Residências dentro da área de cálculo do evento 1. ....	70
Figura 24: Características do fluxo avaliadas na análise de sensibilidade. ....	75
Figura 25: Alguns resultados do processo de calibração do volume de entrada do fluxo para o evento 1: (A) Profundidade = 0,8 m e EM = 0,1 m; (B) Profundidade = 0,7 m e EM = 0,3 m; (C) Profundidade = 0,9 m e EM = 0,5 m; (D) Profundidade = 0,9 m e EM = 0,01 m; (E) Profundidade = 0,7 m e EM = 0,3 m; e (F) Profundidade = 0,8 m e EM = 0,5 m; ....	78
Figura 26: Foto no local em que o evento 1 destruiu a estrada Doutor Getúlio Vargas que ligava a localidade ao centro urbano de Presidente Getúlio. ....	79
Figura 27: Resultado da calibração para o evento 1. ....	81
Figura 30: Alguns resultados do processo de calibração do volume de entrada do fluxo para o evento 2: (A) Profundidade = 0,8 m e EM = 0,01 m; (B) Profundidade = 0,8 m e EM = 0,05 m; (C) Profundidade = 0,9 m e EM = 0,05 m; (D) Profundidade = 0,7 m e EM = 0,01 m; (E) Profundidade = 0,9 m e EM = 0,1 m; (F) Profundidade = 1,0 m e EM = 0,2 m. ....	83
Figura 29: Resultado da calibração para o evento 2. ....	84
Figura 30: Parâmetros mais sensíveis para a variável área total atingida: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	86
Figura 31: Parâmetros menos sensíveis para a variável área total atingida: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	90
Figura 32: Parâmetros mais sensíveis para a variável distância total percorrida: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	92
Figura 33: Parâmetros menos sensíveis para a variável distância total percorrida: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	94
Figura 34: Parâmetros mais sensíveis para a variável velocidade média: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	96
Figura 35: Parâmetros menos sensíveis para a variável velocidade média percorrida: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	98
Figura 36: Parâmetros mais sensíveis para a variável volume depositado: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	99
Figura 37: Parâmetros menos sensíveis para a variável volume depositado: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	101
Figura 38: Parâmetros mais sensíveis para a variável altura média: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	102
Figura 39: Parâmetros menos sensíveis para a variável altura média: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	104
Figura 40: Parâmetros mais sensíveis para a variável altura máxima: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. ....	106

Figura 41:Parâmetros menos sensíveis para a variável altura máxima:(a) Evento 1; e (b) Evento 2 .....	107
Figura 44: Variação dos parâmetros de entrada em relação ao central em cada cenário.....	109
Figura 45: Variação das seis variáveis de saída analisadas para cada cenário no evento 1.....	110
Figura 46: Variação das seis variáveis de saída analisadas para cada cenário no evento 2.....	111
Figura 45: Correlação entre a variação do CL e a variação da velocidade média e do volume.....	112
Figura 46: Correlação entre a variação do CS e a variação da velocidade média e do volume.....	113
Figura 47: Correlação entre a variação do DS e a variação da velocidade média e do volume.....	113
Figura 48: Correlação entre a variação do DL e a variação da velocidade média e do volume.....	114
Figura 49: Correlação entre a variação do ANG e a variação da velocidade média e do volume.....	114

## Lista de Quadros

Quadro 1: Lista de <i>solvers</i> disponíveis na versão 4 do iRIC e uma breve descrição de sua função principal.....	39
Quadro 2: Compilado da sensibilidade dos parâmetros analisados. ....	115

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Lista de modelos matemáticos para propagação de movimentos de massa. ....	36
Tabela 2: Registro de desastres no Sul do Brasil. ....	55
Tabela 3: Resumo das características de cada área de estudo. ....	62
Tabela 4: Valores iniciais dos parâmetros utilizados nas simulações. ....	67
Tabela 5: Matriz de confusão base para os índices. ....	71
Tabela 6: Faixa de variação dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade. ....	72
Tabela 7: Parâmetros e valores analisados na AS. ....	73
Tabela 8: Conjuntos de parâmetros utilizados na AS pela abordagem AAT. ....	74
Tabela 9: Calibração do volume de entrada do fluxo para o evento 1. ....	77
Tabela 10: Calibração dos parâmetros DM e CL para o evento 1. ....	80
Tabela 11: Valores centrais dos parâmetros de entrada sujeitos a AS para o evento 1. ....	81
Tabela 12: Calibração do volume de entrada do fluxo para o evento 2. ....	82
Tabela 13: Valores centrais dos parâmetros de entrada sujeitos a AS para o evento 2. ....	85

## Lista de Abreviaturas e Siglas

1D	Uma Dimensão
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
AAT	<i>All At a Time</i>
ANG	Ângulo de atrito interno
AS	Análise de Sensibilidade
ASG	Análise de Sensibilidade Global
ASL	Análise de Sensibilidade Local
B <sub>g</sub>	Bagnold
B <sub>h</sub>	Bingham
BL	Blocos
C	Coulomb
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CL	Concentração de sedimentos no Leito móvel
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Atual SGB)
CR	Coefficiente de Resistência
CS	Concentração inicial de Sedimentos
D	Dimensões da solução
DEM	Método do Elemento Discreto
DL	Densidade da fase Líquida
DM	Diâmetro Médio dos sedimentos
DP	Drucker-Prager
DS	Densidade do Sedimento
EI	Euleriano
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EM	Profundidade Máxima do leito Erodível
EM-DAT	<i>Emergency Disaster Data Base</i>
Emp	Empírico
F	Fluído
FDM	Método das diferenças finitas
FEM	Método dos elementos finitos

FVM	Método dos volumes finitos
GPDEN	Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais
iRIC	<i>International River Interface Cooperative</i>
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Ih	Ishii
HB	Herschel-Bulkley
Hk	Lei de Hooke
hp	hipoplástico
La	Lagrangiano
LBM	Método de Boltzmann em Rede
LGRB	<i>Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau</i>
MC	Mohr-Coulomb
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
Mec	Mecânico
MPM	Método do Ponto Material
N	Newtoniano
OAT	<i>One At a Time</i>
PM	Profundidade Mínima do fluxo
PR	Paraná
Q	Quadrático
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SG	Sedimento Grosso
SGB	Serviço Geológico do Brasil (Antigo CPRM)
SF	Sedimento Fino
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIGSC	Sistema de Informações Geográficas Santa Catarina
SMPM	Método de Penalidade Espectral Multidomínio
SPH	Método da Partícula Suave Hidrodinâmica;
TVD	<i>Total Variation Diminishing</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNDRR	<i>United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>

USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VBSA	<i>Variance-based sensitivity analysis</i>
VEG	Vegetação
$\mu(l)$	$\mu(l)$ -reologia

## Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
$A_{max}$	Área máxima atingida descontando a área de iniciação	$m^2$
$Ba$	Número de Bagnold	-
$C$	Concentração real de sólidos	$m^3/m^3$
$\bar{c}$	Concentração de sedimentos no fluxo	$m^3/m^3$
$c_*$	Concentração de sedimentos na camada de deposição estática	$m^3/m^3$
$C_{max}$	Concentração volumétrica máxima de sólidos	$m^3/m^3$
$d$	Diâmetro do grão	m
$d_m$	Diâmetro médio das partículas na mistura de sedimentos	m
$D_{máx}$	Distância máxima percorrida	m
$dx$	comprimento da célula no eixo $x$	m
$dy$	comprimento da célula no eixo $y$	m
$E$	Taxa de erosão/deposição do leito	-
$E_a$	Estimativa do acerto por aleatoriedade	
$EH$	Escore de Heidke	-
$f_b$	Coefficiente de resistência	-
$FN$	Falso Negativo	-
$FP$	Falso Positivo	-
$g$	Aceleração da gravidade	$m/s^2$
$h$	Profundidade do fluxo	m
$H_{ch}$	Altura de deposição	m
$H_{máxima}$	Altura máxima de escoamento	m
$H_{média}$	Altura média	m
$h_s$	Espessura da camada de fluxo laminar	m
$j$	Uma célula qualquer do domínio	-
$k$	Constante inelástica do material	-
$Nca$	Número de células afetadas pelo fluxo	-
$P$	Pressão interna no fluxo (considerada pressão estática)	kPa
$Re$	Número de Reynolds	-
$R_h$	Raio hidráulico	m
$t$	Tempo	s
$T$	Total de <i>pixels</i> analisados	-

$u$	Velocidade média na direção $x$	m/s
$u_m$	Velocidade média do fluido	m/s
$v$	Velocidade média na direção $y$	m/s
$\nu_c$	Viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> /s
$V_{\text{média}}$	Velocidade média do escoamento	m/s
$VN$	Verdadeiro Negativo	-
$\text{Vol}_{\text{dep}}$	Volume depositado	m <sup>3</sup>
$VP$	Verdadeiro Positivo	-
$z_b$	Elevação do leito	m
$\varphi$	Ângulo de atrito interno	°
$\lambda$	Concentração linear	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\rho$	Densidade da água	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_m$	Densidade da mistura do fluxo de detritos	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	Densidade do sedimento	kg/m <sup>3</sup>
$\tau_{bx}$	Tensão cisalhante na direção $x$	kPa
$\tau_{by}$	Tensão cisalhante na direção $y$	kPa
$\tau_c$	Tensões provenientes da colisão entre partículas da mistura	kPa
$\tau_t$	Tensão cisalhante proveniente de linhas de correntes turbulentas	kPa
$\tau_\mu$	Tensões que derivam das forças viscosas do fluido	kPa
$\tau_y$	Tensão crítica para início do escoamento	kPa
$\tau_{*m}$	Cisalhamento adimensional do diâmetro médio	-
$\theta$	Declividade do leito na direção do fluxo	°
$\theta_e$	Declividade de equilíbrio do leito	°
$\theta_x$	Declividade do leito na direção $x$	°
$\theta_y$	Declividade do leito na direção $y$	°
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação	-

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	17
1.1 Apresentação .....	17
1.2 Objetivos.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	20
2.1 Movimentos de massa .....	20
2.2 Fluxos de detritos .....	22
2.2.1 Tipos de fluxos .....	23
2.2.2 Fases de um fluxo de detritos .....	26
2.3 Modelagem matemática de fluxos de detritos .....	32
2.3.1 Visão geral.....	32
2.3.2 Classificações reológicas de modelos matemáticos para fluxos .....	33
2.3.3 Modelos monofásicos e multifásicos.....	33
2.3.4 Estado da arte: Modelagem computacional de fluxo de detritos.....	35
2.4 Morpho2DH .....	38
2.4.1 iRIC 4.0 .....	38
2.4.2 Morpho2DH v2.0 .....	41
2.4.3 Esquema numérico .....	46
2.5 Fontes de incerteza em simulações de fluxos de detritos .....	47
2.6 Análise de sensibilidade .....	48
2.7 Análise de sensibilidade em modelos de fluxo de detritos.....	51
2.8 Fluxos de detritos na região sul do Brasil .....	54
3. ÁREAS DE ESTUDO.....	57
3.1 Desastre do alto vale do Itajaí (SC) em dezembro de 2020.....	57
3.2 Rolante (RS) e o desastre de janeiro de 2017 na bacia do rio Mascarada.....	60
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	63
4.1 Aquisição dos dados .....	65
4.2 Simulações com o Morpho2DH .....	66
4.3 Calibração das simulações.....	70
4.4 Análise de sensibilidade .....	72
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	77
5.1 Calibração do modelo.....	77
5.1.1 Presidente Getúlio (SC).....	77

5.1.2	Rolante (RS) .....	82
5.2	Análise de sensibilidade OAT .....	85
5.2.1	Área total atingida .....	85
5.2.2	Distância final percorrida .....	91
5.2.3	Velocidade média .....	95
5.2.4	Volume depositado .....	99
5.2.5	Altura média .....	102
5.2.6	Altura máxima .....	105
5.3	Análise de sensibilidade AAT .....	108
5.4	Recomendações e critérios de aplicação do modelo .....	115
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	121

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

As mudanças climáticas afetam diversos aspectos no mundo, dentre os quais se destacam os desastres naturais causados por chuvas intensas, como os escorregamentos e fluxos de detritos (Rädler, 2022). No Brasil, observa-se que os eventos extremos de chuva vêm ocorrendo com frequência, com os recordes nacionais de chuva sendo ultrapassados anualmente (Kobiyama *et al.*, 2023).

Os desastres causados por fluxos de detritos são um exemplo de desastre natural hidrológico, de acordo com a classificação do *Emergency Disaster Data Base* (EM-DAT), acarretando sérias consequências, como perdas materiais e humanas, sendo a ocupação desordenada de encostas íngremes um agravante social. A combinação de eventos climáticos extremos com condições geomorfológicas e ocupação antropogênica inadequada leva a um alto grau de perda de vidas humanas (Schuster, 1996; Sidle; Ochiai, 2006; Aristizábal; Sánchez, 2019).

Os fluxos de detritos ou fluxos de massa são fenômenos naturais que atuam na evolução da paisagem. Esses se movem em velocidades consideráveis, deslocam grandes volumes de material e possuem longo alcance, sendo assim, possuem uma grande capacidade de destruição (Hungar *et al.*, 2014; Takahashi, 2014). A principal força que rege esse fenômeno é a gravidade, e a mistura do fluxo pode ser constituída por água, ar, sedimentos, detritos e material lenhoso (Gregoretti *et al.*, 2016).

No Brasil, os desastres naturais provenientes desse fenômeno concentram-se principalmente em regiões montanhosas (Kobiyama *et al.*, 2019). Ao longo dos últimos anos, diversos eventos foram registrados no Brasil, exemplificados pelos ocorridos nos estados de Santa Catarina em 2008 (Goerl *et al.*, 2009) e 2020 (Michel *et al.*, 2021), Paraná em 2011 (Breda Fontão; dos Santos, 2022), Rio de Janeiro em 2011 (Coelho Netto *et al.*, 2011) e 2022 (Kobiyama, 2022), e Rio Grande do Sul em 2017 (SEMA/GPDEN, 2017) e 2020 (Paixão *et al.*, 2021a).

Em 2015, na cidade de Sendai (Japão), o Brasil assinou e se comprometeu a participar do Marco de Ação de Sendai, que objetiva reduzir o risco atual de desastres e prevenir novos riscos por meio da implementação de medidas que previnam e reduzam a

exposição ao risco e a vulnerabilidade a desastres, aprimorem a preparação para a resposta e para recuperação e, dessa forma, fortaleçam a resiliência (UNDRR, 2022).

A gestão de risco pode ser realizada por meio de medidas estruturais e não-estruturais (Baas *et al.*, 2008). As estruturais aplicam intervenções físicas para conter possíveis danos derivados de um fenômeno natural, sendo uma alternativa cara e nem sempre viável. Já as medidas não-estruturais são aquelas em que se procura reduzir os danos ou as consequências de um desastre, não por meio de obras, mas pela introdução de normas, regulamentos, programas, educação e planejamento. Uma das ferramentas não-estruturais que podem auxiliar na Gestão de Risco de Desastre é o mapeamento de áreas suscetíveis a esses fenômenos, uma vez que o mesmo auxilia na gestão e no planejamento territorial e ambiental, contribuindo para a redução do risco de desastre (Franck; Menezes; Kobiyama, 2023).

Esse mapeamento é comumente realizado com a utilização de modelos computacionais que buscam representar o fenômeno. Existem diversos modelos de fluxo com vasta utilização, como por exemplo o FLO-2D (O'Brien *et al.*, 1993), o Flow-R (Horton *et al.*, 2013), o Kanako-2D (Nakatani *et al.*, 2008), e o Morpho2DH (Takebayashi *et al.*, 2014), sendo esse último um modelo de fluxos de lama/detritos implementado na interface do iRIC *software* (Nelson *et al.*, 2016).

O Morpho2DH conta com uma crescente utilização nos últimos anos, principalmente em países como o Japão (Ishikawa; Takebayashi; Fujita, 2019; Takebayashi; Fujita, 2020; Onaka *et al.*, 2021). As principais utilizações desse modelo são na reprodução e previsão de fluxos de lama/detritos, avaliação de estruturas de contenção de fenômenos causadores de desastres relacionados a sedimentos, e avaliação do potencial de destruição de estruturas por fluxos de detritos.

No processo de aplicação de um modelo, é essencial que se conheça a teoria e os parâmetros de entrada necessários para a simulação, assim como o comportamento do modelo perante variações em seus parâmetros. Isso auxilia não só no processo de calibração do resultado do modelo, como também na interpretação física dos resultados. Sendo assim, uma etapa comum antes da aplicação de um novo modelo é buscar conhecer a sensibilidade de seus parâmetros através de uma análise de sensibilidade (Heiselberg *et al.*, 2009). Desta forma, podemos obter informações essenciais sobre o comportamento do modelo, sua estrutura e sua resposta a mudanças nos parâmetros de entrada (Borgonovo; Plischke, 2016).

Em suma, para que haja uma diminuição no número de fatalidades causadas por desastres relacionados a sedimentos, é essencial que haja uma melhor gestão e um maior planejamento territorial voltado para prevenção e redução do risco de desastres. A modelagem computacional pode auxiliar nesse planejamento, no entanto, para que um modelo de previsão seja utilizado de forma correta e eficiente, é essencial que se conheçam as limitações do modelo e as simplificações que esse adota, bem como a faixa de aplicação de seus parâmetros de entrada e sua influência no resultado das simulações. Desta forma, para que se possa considerar o Morpho2DH como uma opção viável de previsão de fluxos no Brasil, é preciso que mais estudos de caso avaliando sua eficiência no país sejam conduzidos.

## **1.2 Objetivos**

O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficácia do modelo de simulação de fluxo de lama/detritos Morpho2DH, por meio de sua aplicação em duas regiões distintas do sul do Brasil, e posteriormente conduzir uma análise de sensibilidade de seus parâmetros de entrada.

O estudo possui como objetivos específicos os itens que seguem:

- Avaliar, com base na calibração do modelo em duas áreas distintas do sul do Brasil com registro de ocorrência de fluxos de detritos, a aplicabilidade do modelo para essas regiões, através dos índices de desempenho obtidos;
- Conduzir uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada do solver Morpho2DH no *software* iRIC 4.0 com a utilização de um método OAT e um método AAT;
- Recomendar critérios de aplicação para o modelo Morpho2DH.

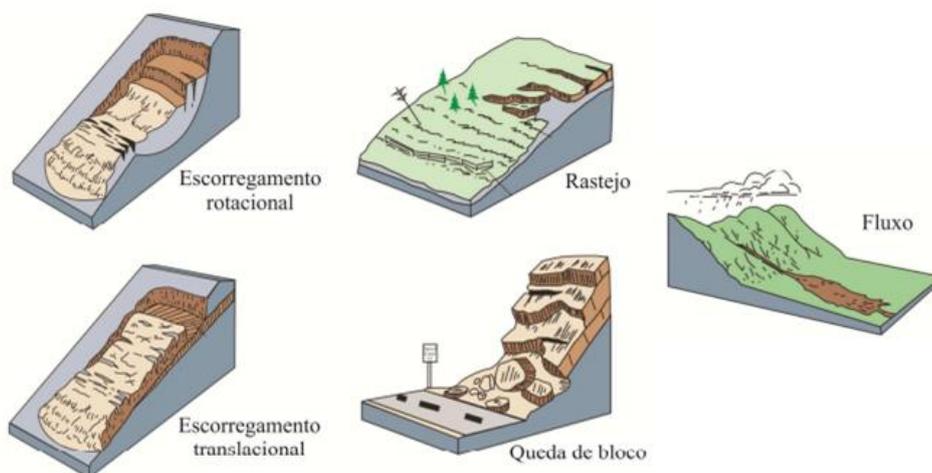
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Movimentos de massa

Movimentos de massa são fenômenos complexos que envolvem a contribuição de diversos fatores. Em uma definição mais direta, é o movimento de solo ou rocha (e/ou vegetação), ao longo da vertente do relevo sob a ação direta da gravidade, onde a contribuição de meios como a água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais e pela indução de comportamento plástico e fluído nos solos (Tominaga, 2009). Esses movimentos estão ligados internamente à alteração do equilíbrio entre as tensões no interior da massa sólida (Cruz, 1974), onde esse equilíbrio é controlado principalmente pelo teor de água, pelo teor e estrutura interna das argilas e pela resistência imposta pelo ângulo de atrito interno e coesão do solo. Atentando-se a essas definições percebe-se nitidamente três fatores muito importantes ao analisar-se movimentos de massa úmidos, são eles o relevo (declividade), a gravidade e a ação da água como agente deflagrador/agravante de um determinado movimento de massa.

Muitos autores propuseram metodologias de classificação dos movimentos de massa, no entanto, a mais difundida internacionalmente é a classificação de Varnes (1978), modificada por Cruden e Varnes (1996), que separa esse fenômeno em seis tipos, levando em conta a velocidade e composição do movimento. Além disso, Varnes (1978) afirma que podem ocorrer combinações entre as diferentes classificações devido ao tipo de material. Já no Brasil, a classificação mais utilizada é a proposta por Augusto Filho (1992), onde os movimentos de massa foram classificados em quatro classes, o rastejo, os escorregamentos, os fluxos e as quedas (Figura 1).

Figura 1: Tipos de movimento de massa.



Fonte: Adaptado de USGS, 2004.

Os escorregamentos se propagam rapidamente e são causados por uma tensão de cisalhamento intensa (Sidle; Ochiai, 2006). Possuem planos de deslizamento bem definidos e podem ser divididos em rotacionais e translacionais. Os escorregamentos rotacionais apresentam uma superfície de ruptura côncava, onde a porção de solo desloca-se em um movimento de rotação. Nesse fenômeno, que costuma ocorrer em solos mais profundos, algumas partes do solo sofrem pouca deformação interna, mantendo uma estrutura próxima à original (Highland; Bobrowsky, 2008).

Já os escorregamentos translacionais normalmente ocorrem em profundidades relativamente baixas, comumente menos de 2 m (Huang *et al.*, 2022) e possuem uma superfície de ruptura plana. Usualmente o comprimento da superfície de ruptura é maior que a largura e ocorre em interfaces de solo e rocha ou de solos com diferentes permeabilidades e/ou densidades. Nesse tipo de deslocamento o solo normalmente perde sua estrutura, pois se movimenta de forma translacional. Quando se movimentam em velocidades altas, associados uma concentração alta de água, os escorregamentos translacionais podem evoluir para um fluxo de detritos (Highland; Bobrowsky, 2008).

Augusto Filho (1992) e Castro (2003) definem os rastejos como movimentos lentos de encosta que não apresentam, geralmente, uma superfície de ruptura definida (plano de movimentação). Estes processos podem abranger grandes áreas e massas de materiais e solos.

As quedas de bloco (*rockfall*) correspondem ao destacamento de uma massa de rocha de uma encosta íngreme ou escarpada (Giani, 1992). São movimentos rápidos e difíceis de se prever, que podem ser iniciados a partir de eventos climáticos, como excesso de chuva ou neve; biológicos, como raízes que podem crescer ao longo da parede das juntas e alavancar blocos; ou sísmicos, provocados, por exemplo, por detonações ou terremotos.

Já os fluxos são movimentos complexos, similares ao escoamento de líquidos viscosos, esses geralmente movem-se ao longo da drenagem das encostas (Varnes, 1978). Devido à velocidade do fluxo e as longas distâncias que podem percorrer, os fluxos de detritos são um dos tipos de movimentos de massa mais perigosos (Jakob; Hungr, 2005).

Um mesmo fenômeno de movimento de massa pode passar por diferentes fases conforme avança encosta abaixo, algumas destas fases podem ser extremamente complexas, como o fluxo de detritos, porém, na maioria dos casos um tipo de fase predomina em cada uma das diferentes partes do movimento e em diferentes períodos do deslocamento (Sidle; Ochiai, 2006). Considerando que o objeto de estudos do presente

trabalho se concentra em fluxos de detritos, uma seção dedicada em específico a esse fenômeno será apresentada a seguir.

## 2.2 Fluxos de detritos

Dentre os tipos de movimento de massa, o fluxo de detritos (também chamados de corrida de massa no Brasil), é um dos mais complexos e destrutivos, podendo ser descrito como um fluxo de uma mistura de água e sedimentos com um comportamento de fluido contínuo, impulsionado pela gravidade, que atinge grande mobilidade a partir do momento em que os espaços vazios, alargados pelo movimento, são saturados com água ou lama (Takahashi, 2007). É importante ressaltar que os fluxos de detritos tratados nesse estudo são do tipo subaéreo, que ocorrem nas encostas, fora do ambiente subaquático. Outro ponto que deve ser esclarecido, é que o termo sedimento será utilizado para descrever qualquer material ou substância particulada, desde argila até blocos de rocha.

Com relação ao histórico de discussão dos fluxos de detritos, a grande maioria dos trabalhos publicados são relativamente recentes, ocorrendo nos últimos 50 anos (Takahashi, 2009; Du *et al.*, 2021; Trujillo-Vela *et al.*, 2022). No entanto, relatos atribuídos a este fenômeno remontam a períodos muito antigos. No Japão, como relata Takahashi (2009), eram usados termos como “*Ja-nuke*” (fluxo do Rei Cobra), “*Yama-tsunami*” (tsunami na montanha) e “*Yama-shio*” (onda de montanha) para se referir aos fluxos de detritos desde tempos muito antigos. Apenas nos anos 1950 trabalhos científicos que discutiam fluxos de detritos, ainda qualitativamente, começaram a ser desenvolvidos no país.

Um dos primeiros trabalhos que se tem registro que relatou cientificamente um fluxo de detritos foi Schlumberger (1882), em seu estudo sobre obras em montanhas, o autor relatou a ocorrência de um fluxo próximo a Barcelonnette (França) nos alpes inferiores. Cossout e Meunier (1996) em sua revisão relatam ainda que na França os fluxos de detritos já eram estudados há muito tempo sob a nomenclatura de “*lave torrentielle*” (lava torrencial), uma classificação que abrangia diversos tipos de fenômenos onde um grande volume viscoso e com altas concentrações de sedimentos era propagada por um canal. Exemplos dessas publicações são Demontzey, (1894) e Thiéry, (1914). Recentemente, existe um crescente interesse em estudar e compreender esse fenômeno complexo, com isso, diversos autores propuseram definições para esse

fenômeno. No presente estudo optou-se por utilizar a definição proposta por Takahashi (2014), que afirma que um fluxo de detritos se trata de uma mistura de água e sedimentos, de maneira como se fosse um fluxo de um fluido contínuo impulsionado pela gravidade, e atinge grande mobilidade a partir do espaço vazio que é dilatado pela saturação de água ou lama.

### **2.2.1 Tipos de fluxos**

Os fluxos (*flows*), grupo de classificação dos movimentos de massa ao qual pertencem os fluxos de detritos, podem ser divididos em diversos tipos de acordo com o seu aspecto, constituição, mecanismos de ocorrência e de transporte, ou por aspectos quantitativos, como velocidade média, concentração de sólidos e coesão do material (Takahashi, 2014). Diversos autores propuseram classificações baseadas em diferentes características dos fluxos (Cruden e Varnes, 1996; Hungr *et al.*, 2001; Hungr *et al.*, 2014; Takahashi, 2014).

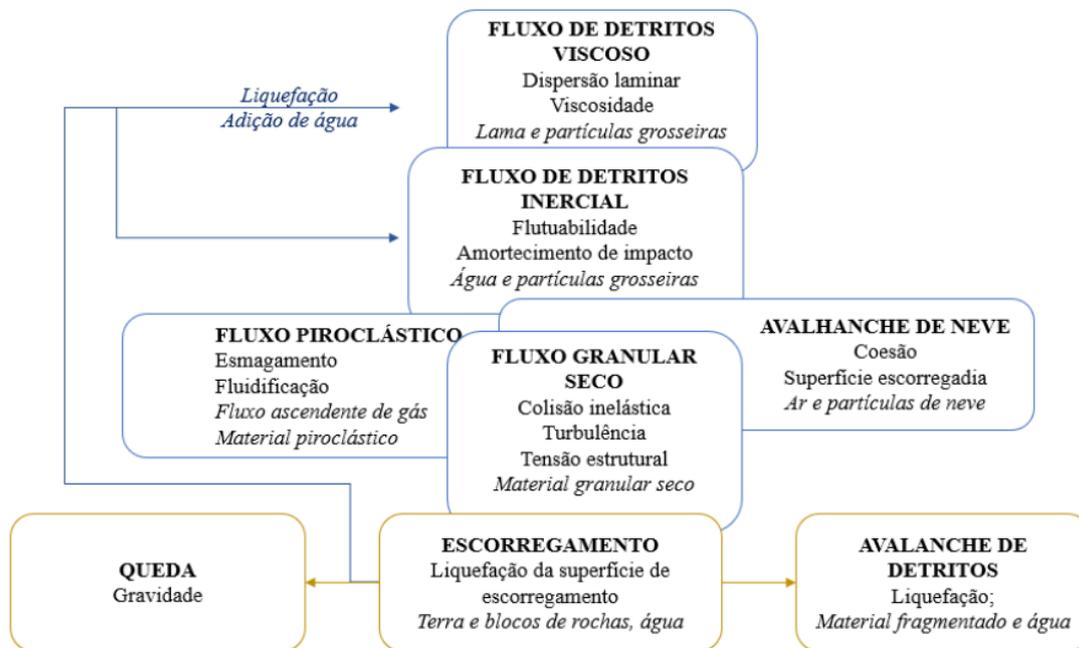
No presente estudo optou-se por adotar a classificação proposta por Takahashi (2014), que propõe uma classificação priorizando os mecanismos físicos envolvidos no desenvolvimento de cada fluxo. Nessa classificação, os fluxos se dividem em cinco tipos: fluxo granular seco, avalanche de neve, fluxo piroclástico, fluxo de detritos inercial e fluxo de detritos viscoso. Esses 5 tipos de fluxos subaéreo são representados na Figura 2.

Um fluxo granular seco pode ser desencadeado tanto por terremotos intensos como por escorregamentos que ocorreram previamente (Jiang *et al.*, 2018). Enquanto os fluxos piroclásticos ocorrem em ambientes vulcânicos e são compostos por uma mistura em movimento que possui duas camadas distintas (Takahashi, 2001). Já um fluxo do tipo avalanche de neve possui efeitos coesivos que favorecem a formação de bolas de neve por colisão entre partículas, aumentando seu volume ao longo do deslocamento (Takahashi, 2001).

Nos fluxos de detritos inerciais, ocorre um efeito de flutuabilidade devido ao fluido intersticial presente, além de um amortecimento de impacto entre as partículas, o que reduz as tensões geradas por colisões. As concentrações de sólidos finos não são tão altas, permitindo a formação de linhas de corrente turbulentas que contribuem significativamente para o movimento dos sedimentos, especialmente nas camadas próximas à superfície livre (Takahashi, 2014). Assim, o comportamento da fase sólida e

da fase líquida é diferente, e a interação entre elas desempenha um papel fundamental na determinação da dinâmica do escoamento.

Figura 2: Classificações de movimentos de massa e fluxos. As flechas azuis indicam que o fluxo teve origem em um escorregamento ou liquefação da superfície de um escorregamento. A sobreposição dos blocos indica que os mecanismos de propagação desses movimentos de massa são semelhantes.



Fonte: Takahashi, (2014 apud Paul, 2020).

Já os fluxos de detritos viscosos ocorrem quando há uma elevada concentração de sedimentos finos, como siltes e argilas, que aumentam a viscosidade do fluido intersticial. Devido a esse fator, os efeitos de colisão entre partículas são reduzidos, e a turbulência do fluido diminui (Takahashi, 2014). Dessa forma, os principais mecanismos de propagação nesse tipo de fluxo são a flutuabilidade e a dispersão laminar, prevalecendo as forças viscosas no meio. Esse fluxo se distancia um pouco dos demais por apresentar poucos mecanismos em comum.

Apesar de não ser considerado um tipo de fluxo, vale mencionar a existência do movimento de massa chamado de avalanche de detritos. Essa não é classificada como um fluxo, pois sua camada inferior é liquefeita, e seu comportamento é mais semelhante ao deslizamento de aglomerados de solo e rochas do que ao movimento de um fluido.

Para classificar os fluxos de detritos dinâmicos de acordo com seu comportamento - turbulento (*turbulent-muddy-type*), inercial rochoso (*stony-type*), viscosos (*viscous*) ou híbridos - Takahashi (2014) propôs três parâmetros de avaliação, sendo eles, número de Reynolds (Reynolds, 1883), profundidade relativa ( $=h/d$ , onde  $h$  é a profundidade do

fluxo e  $d$  é o diâmetro representativo do grão ou partícula) e número de Bagnold (Bagnold, 1954). O número de Reynolds ( $Re$ ) é uma relação entre forças viscosas e forças inerciais, sendo utilizado para determinar os regimes de escoamento de um fluido sobre uma superfície. Esse pode ser calculado pela equação:

$$Re = \frac{u_m R_h}{\nu_c} \quad (2.1)$$

onde  $u_m$  é a velocidade média do fluido;  $R_h$  é o raio hidráulico; e  $\nu_c$  é a viscosidade cinemática.

Já o número de Bagnold ( $Ba$ ) expressa uma proporção de forças entre a colisão de partículas e as forças viscosas, para um escoamento granular. Esse é representado pela seguinte equação:

$$Ba = \frac{d^2 \lambda^{1/2} \dot{\gamma}}{\nu_c} \quad (2.2)$$

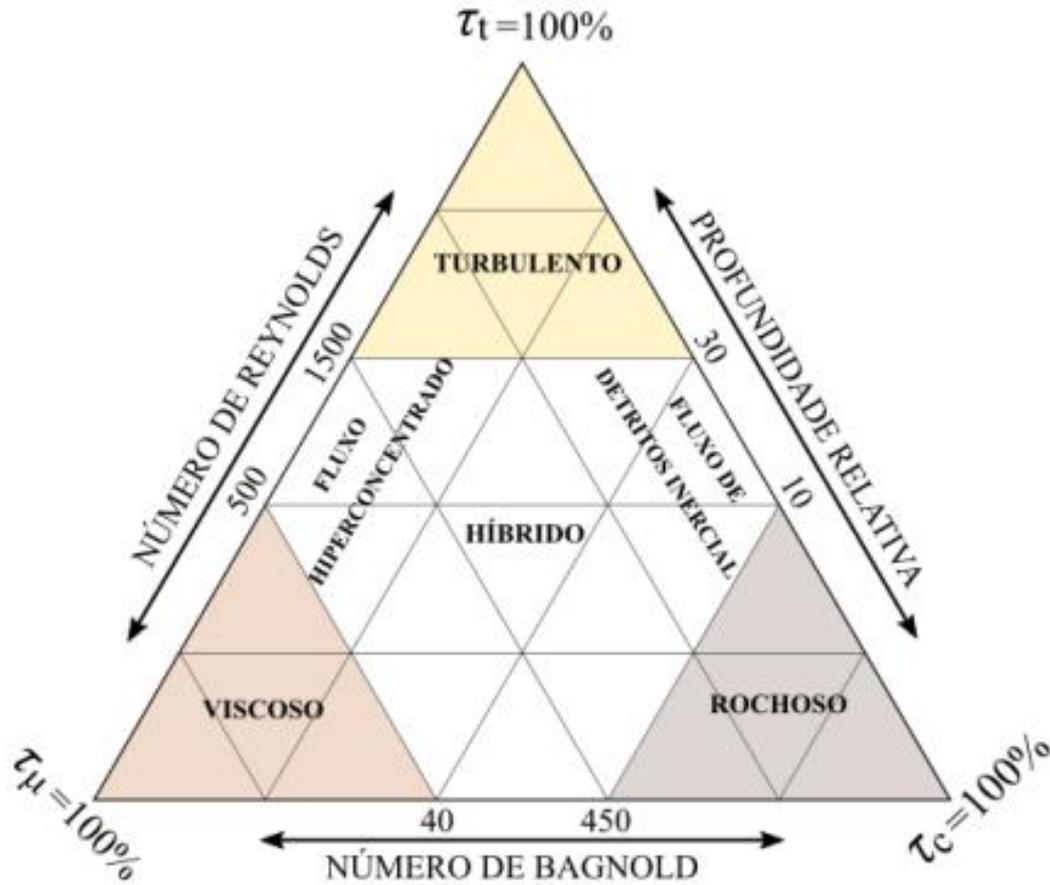
O  $\lambda$  pode ser calculado por:

$$\lambda = \frac{1}{\left(\frac{C_{max}}{C}\right)^{1/3} - 1} \quad (2.3)$$

onde  $d$  é o diâmetro do grão;  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação;  $\lambda$  é a concentração linear;  $C_{max}$  é a concentração volumétrica máxima de sólidos; e  $C$  é a concentração real de sólidos. Desta forma obtêm-se um diagrama triangular para classificação de fluxos de detritos (Figura 3).

Os fluxos de detritos também podem ser classificados de acordo com o material predominante em sua composição. Assim, podemos ter fluxos de detritos de lama, rochosos, lenhosos ou híbridos. Segundo Kobiyama, Michel e Goerl (2013), no sul Brasil, a ocorrência de fluxos de detritos lenhosos é mais frequente, uma vez que o clima subtropical favorece o desenvolvimento de vegetação nas zonas ripárias. Assim, durante um fluxo de detritos, ocorre uma significativa incorporação de troncos e massa lenhosa à mistura em movimento.

Figura 3: Diagrama de classificação para fluxo de detritos dinâmicos, onde  $\tau_t$ ,  $\tau_\mu$  e  $\tau_c$  representam mecanismos responsáveis pela sustentação das partículas durante o escoamento de um fluxo e são respectivamente a tensão cisalhante proveniente de linhas de correntes turbulentas, as tensões que derivam das forças viscosas do fluido, e as tensões provenientes da colisão entre partículas da mistura.

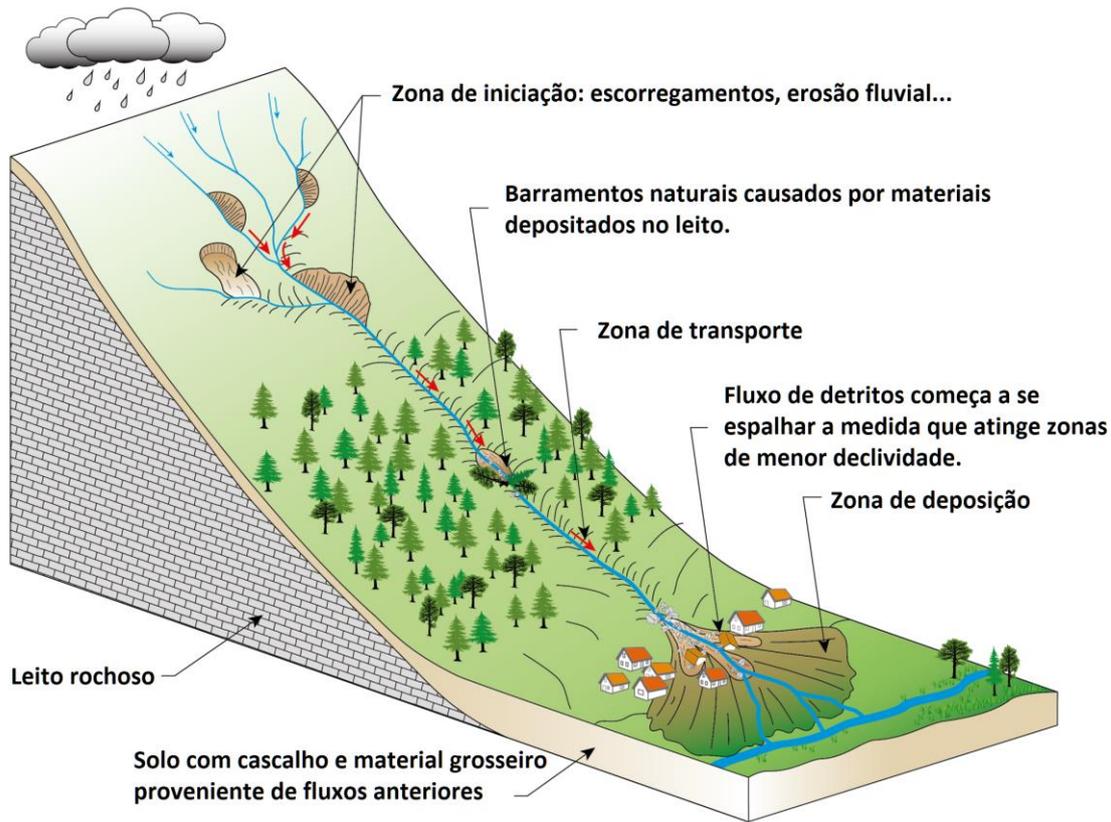


Fonte: Paul, (2020) adaptado de Takahashi, (2014)

### 2.2.2 Fases de um fluxo de detritos

Um fluxo de detritos passa por diferentes fases em que os mecanismos e processos ocorrendo são distintos (Figura 4). Essa separação em fases pode ser feita morfologicamente em três partes: zona de iniciação, zona de transporte e zona de deposição.

Figura 4: Morfologia de um fluxo de detritos.



Fonte: Adaptado de LGRBwissen, (2023).

#### 2.2.2.1 Iniciação do fluxo de detritos

O fluxo é deflagrado na zona de iniciação, onde ocorrem os mecanismos de fluidificação e mobilização do solo. Essa é a região fonte de sedimentos, na qual observam-se planos de ruptura referente ao escorregamento (caso o fluxo tenha sido deflagrado por escorregamentos) que deu início ao movimento do material.

Segundo Takahashi (2014), são três as situações em que é possível a ocorrência de um fluxo de detritos:

i) Quando sedimentos depositados no leito de um canal ou voçoroca são carregados pelo escoamento superficial de água (normalmente uma inundação brusca), aumentando sua concentração e densidade até tornar-se um fluxo de detritos.

ii) Quando ocorre a transformação de um bloco de massa proveniente de um escorregamento em um fluxo de detritos. Isso ocorre por conta do aumento da fluidização da mistura decorrente de um aumento na quantidade de água presente no solo fazendo assim com que o atrito interno e a coesão dos grãos sejam reduzidos ou eliminados (Hutter *et al.*, 1996)

iii) Quando ocorre o rompimento de uma barragem originada por um escorregamento ou por deposição de detritos no canal, na qual a água ou a mistura água e sedimentos é represada e irá arrastar os detritos após o rompimento. No momento do rompimento haverá um aumento na concentração de sedimentos e, conseqüentemente, um aumento na viscosidade.

A maioria dos fluxos de detritos são originados a partir de escorregamentos (Ellen; Fleming, 1987; Iverson *et al.*, 1997; Takahashi, 2007). Iverson *et al.* (1997), afirma que quando se trata de um fluxo de detritos iniciado a partir de um escorregamento, existem pelo menos três mecanismos que são relevantes: uma falha de Coulomb generalizada ao longo do perfil do solo, liquefação por conta de poro-pressões elevadas e um aumento da temperatura granular.

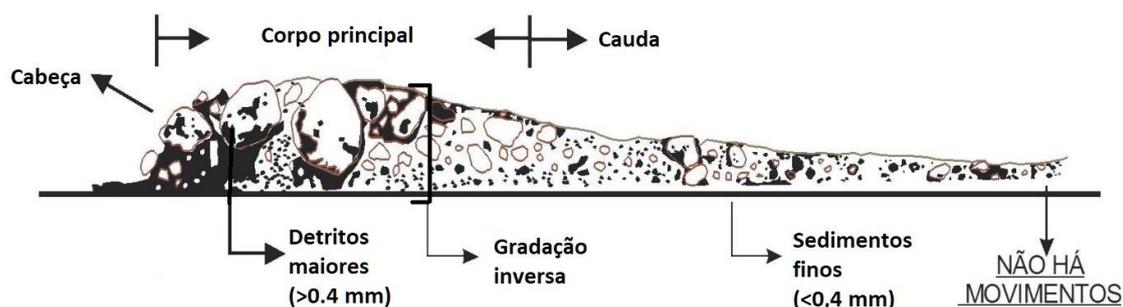
#### 2.2.2.2 Desenvolvimento e Transporte

Durante o transporte, os sedimentos são levados por uma combinação de movimento de rolamento, deslizamento e suspensão em uma matriz fluida (Pierson; Costa, 1987). A deposição, por outro lado, ocorre quando a velocidade do fluxo diminui e as partículas começam a se assentar no leito ou nas margens do canal.

De acordo com Pierson (1986), um fluxo de detritos pode ser dividido em três partes, sendo elas: A **cabeça** que é composta principalmente por sedimentos mais grossos e apresenta uma protuberância inversa à direção do movimento devido ao fenômeno de gradação inversa (i.e. fenômeno onde os grãos maiores são depositados acima de grãos menores); O **corpo principal** que é composto por grande variedade de tamanhos de detritos; O **final ou cauda** onde fica a parte mais diluída da mistura em que se forma uma espécie de fluxo turbulento de água e sedimentos, similar a uma inundação de detritos.

Durante a propagação de um fluxo de detritos ocorre a segregação dos sedimentos, na qual na frente e nas laterais do escoamento observa-se a manifestação de materiais mais grossos; e uma gradação inversa (Figura 5), ou seja, partículas mais finas estão mais próximas do fundo (Naylor, 1980; Takahashi, 2007, 2014). Esse comportamento foi constatado tanto em observações de campo (Suwa; Okano; Kanno, 2013), como em experimentos com modelagem física (Iverson *et al.*, 2010; Logan *et al.*, 2018).

Figura 5: Taxonomia de um fluxo de detritos.



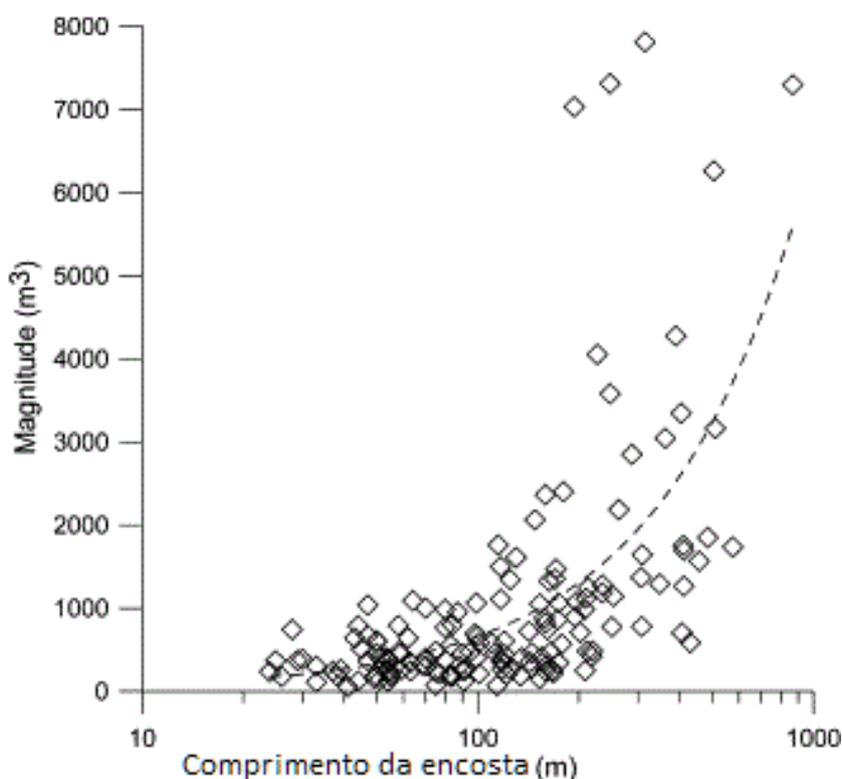
Fonte: Adaptado de Dias *et al.*, (2016).

Segundo alguns autores como Takahashi (1991), Iverson (1997), e Yi Wu (2003), os fluxos de detritos podem variar imensamente em termos de massa específica ( $1.450$  a  $2.240 \text{ kg/m}^3$ ), concentração volumétrica de sedimentos ( $0,27$  a  $0,75$ ) e velocidade ( $2$  a  $10 \text{ m/s}$ ).

Devido às características do escoamento de um fluxo de detritos a parte da cabeça é a principal responsável por erodir o leito. Nesse processo, sedimentos são incorporados a massa fluída enquanto o fluxo avança. Desta forma, a magnitude de um fluxo nem sempre está associada apenas ao volume inicial do escorregamento que o deflagrou, pois pode haver uma parcela importante de material no volume total incorporada devido a capacidade do fenômeno de erodir e incorporar mais partículas durante o seu trajeto (Hung *et al.*, 2007), dando ao fluxo de detritos uma característica não conservativa.

Considerando essa afirmação, a topografia através da declividade do terreno contribui significativamente para a magnitude do fenômeno. Hung *et al.* (2008) identificaram uma correlação positiva entre a magnitude do fluxo e o comprimento da encosta, considerada a partir do ponto de iniciação até o ponto onde o canal atinge uma declividade abaixo de  $15^\circ$  (Figura 6). Essa correlação indica que quanto maior o trajeto com uma declividade significativa, mais sedimentos podem ser incorporados ao fluxo de detritos. Outro parâmetro que influencia na incorporação de material pelo fluxo é material constituinte da encosta, pois solos com uma maior erodibilidade fornecerão mais sedimentos para a massa fluída em deslocamento.

Figura 6: Correlação positiva entre o volume do fluxo e o comprimento da encosta.



Fonte: Adaptado de Hungr *et al.*, (2008)

### 2.2.2.3 Deposição

Quando o fluxo de detritos está completamente desenvolvido e atingiu a máxima capacidade de incorporação de sedimentos, a erosão é drasticamente reduzida (Takahashi, 2014). Devido a esse fator e a perda de água durante o trajeto, é possível a ocorrência de deposição de sedimentos ainda ao longo da zona de transporte. Segundo Iverson (1997), a deposição inicia nas laterais e na cabeça do escoamento.

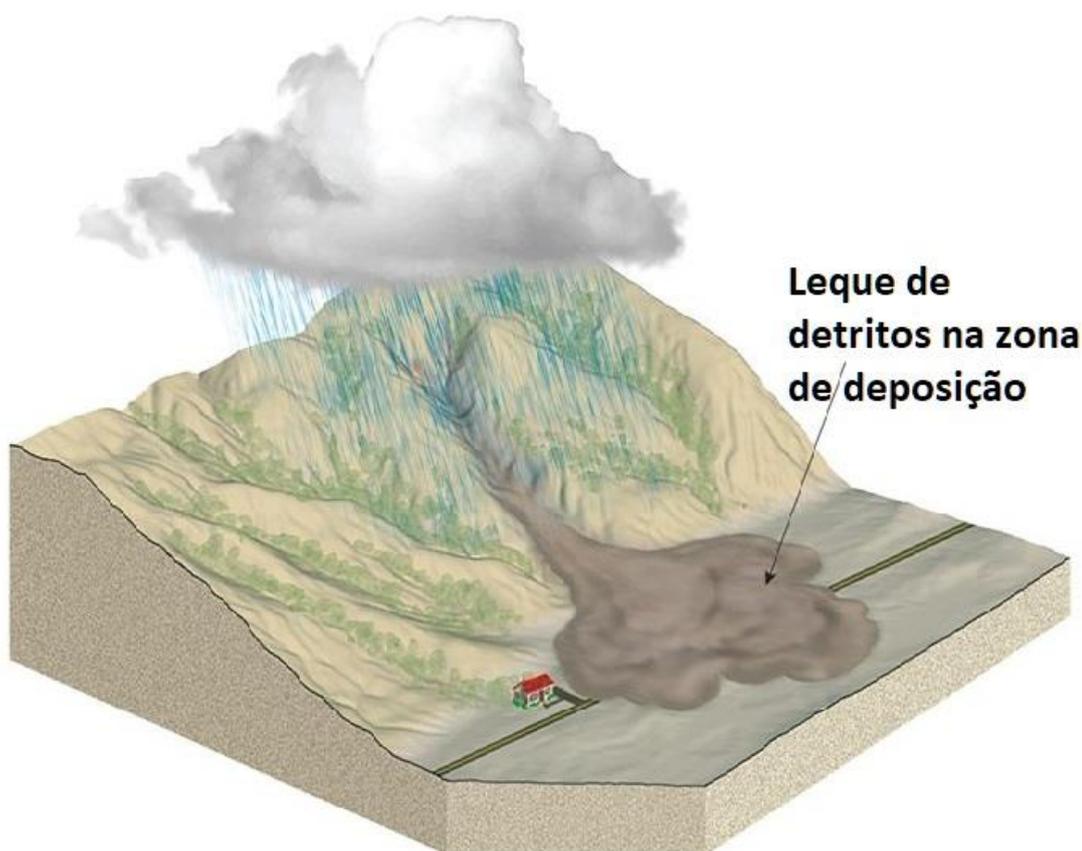
Essa deposição que ocorre nas laterais do escoamento forma feições laterais chamadas de diques (*levees*) e é causada quando a cauda do fluxo de detritos empurra para os lados as partículas maiores presentes na cabeça do escoamento que começam a perder velocidade causando um “efeito ombreira” (*shouldering effect*). Com esse processo de empurrar as partículas para as laterais do escoamento, a deposição será favorecida (Johnson *et al.*, 2012).

Segundo Haas *et al.* (2015), a composição do fluxo influencia nas condições para a iniciação da deposição e, conseqüentemente, no alcance do fluxo de detritos. Quando a quantidade de materiais grossos é maior, há mais perda de água durante o escoamento, o que contribui para uma diminuição das poro-pressões. Já os materiais mais finos

(argilosos) vão reter a água mais facilmente, mas estarão sujeitos à deposição por conta das resistências viscosas.

A perda do confinamento, ou seja, o espalhamento do fluxo para fora do canal, geralmente ocorre quando o fluxo atingiu um local pouco declivoso, o qual diminui as tensões cisalhantes direcionadas à descida, reduzindo a velocidade de propagação e favorecendo a iniciação dos mecanismos deposicionais (Iverson, 1997). O fluxo de detritos se deposita então em um formato semelhante a um leque (Figura 7).

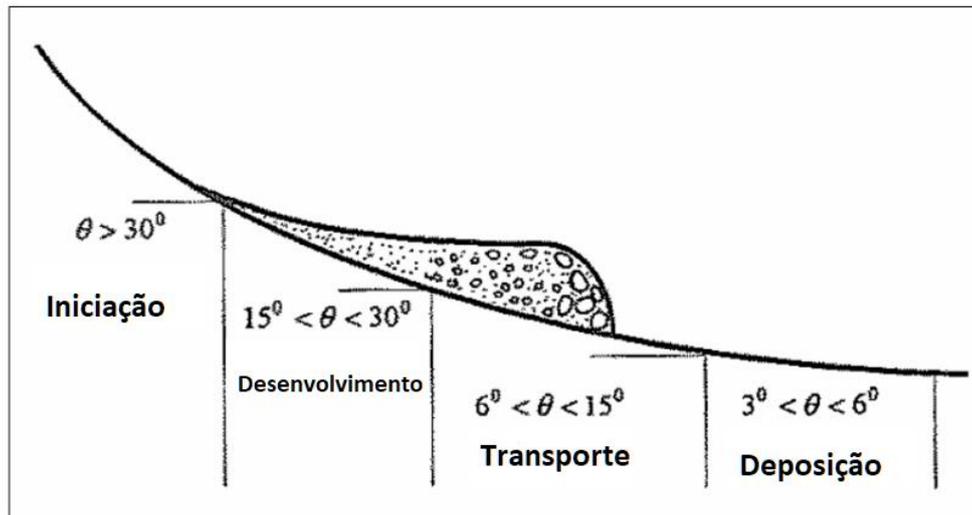
Figura 7: Representação de uma área de deposição de um fluxo de detritos em formato de leque.



Fonte: DOMINO (*Dikes and debris flows monitoring by novel optical fiber sensors*).

Ainda que aos 15° de inclinação aproximadamente o processo de deposição nas bordas externas da massa se inicie, o fluxo pode continuar dependendo de suas características, até declividades menores ( $\approx 3^\circ$ ) se esse tiver confinamento e velocidade suficientes (Figura 8).

Figura 8: Caracterização entre a declividade do terreno e o movimento de um fluxo de detritos.



Fonte: Adaptado de Yi Wu, (2003)

## 2.3 Modelagem matemática de fluxos de detritos

### 2.3.1 Visão geral

Fenômenos naturais, como os fluxos de detritos, podem ser conceituados e expressos por meio de expressões matemáticas ou pela concatenação dessas com leis físicas. Desta forma, a modelagem matemática baseada em princípios físicos, apoiada por observações de campo e experimentos, é essencial para construir conhecimento sobre o comportamento dos fluxos de detritos.

Um fluxo de detritos, conforme apresentado anteriormente, varia imensamente em seu comportamento hidrodinâmico conforme a sua composição e área de ocorrência. Desta forma, há uma grande preocupação sobre qual a abordagem da mecânica de escoamentos é a mais adequada para representar um determinado fluxo. Diversos mecanismos atuam na propagação de um fluxo de detritos e cada um deles tem uma significância diferente conforme as propriedades do material constituinte, a concentração de sólidos e a sua distribuição granulométrica (Paul, 2020).

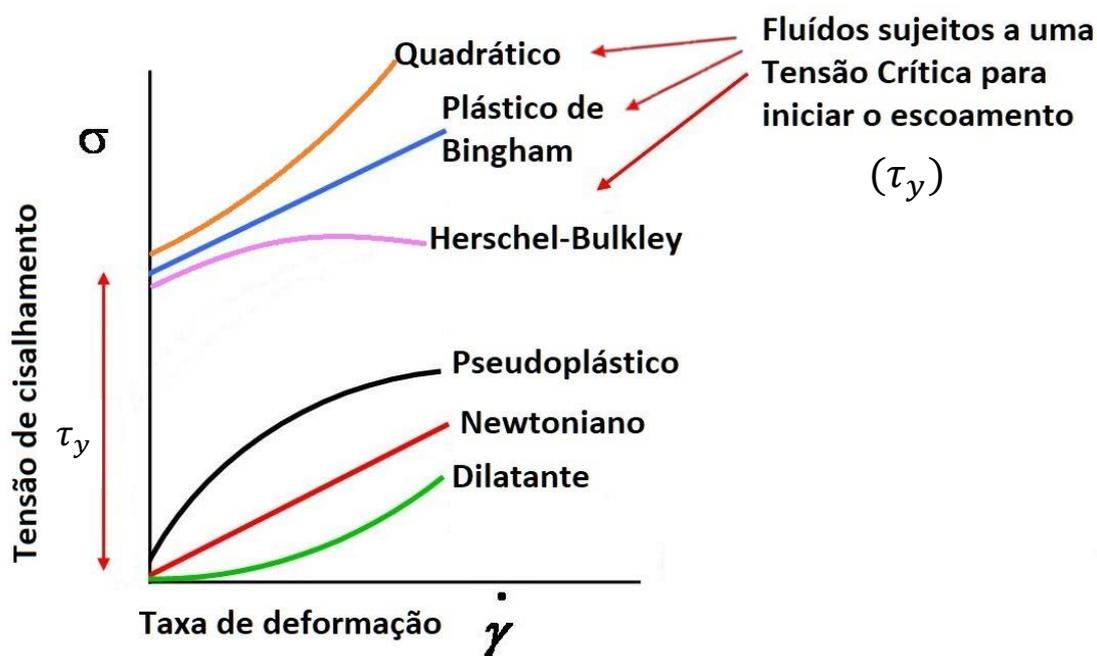
Convencionalmente, as leis físicas são usadas para modelar a etapa de propagação do material, como o balanço de massa e momento. Por exemplo, a primeira tentativa de descrever fluxos foi feita por Voellmy (1955) ao representar avalanches de neve usando uma versão simplificada da equação de momento com uma relação reológica proposta. Esse modelo foi posteriormente implementado para simular fluxos de detritos (Rickenmann *et al.*, 2006; Pirulli; Sorbino, 2008; Mergili *et al.*, 2017).

### 2.3.2 Classificações reológicas de modelos matemáticos para fluxos

A grande maioria dos modelos matemáticos que busca representar os fluxos de lama ou detritos aborda o mesmo como uma mistura monofásica, propondo equações matemáticas que se baseiam na reologia dos fluídos, ou seja, na relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e uma taxa de deformação (Takahashi, 2014). Dessa forma, a maioria dos modelos matemáticos monofásicos caracteriza o fluído como um desses seis grupos: fluído newtoniano (Newton, 1687), fluído dilatante (Bagnold, 1954), pseudoplástico (Ostwald, 1929), fluído plástico de Herschel-Bulkley (Herschel; Bulkley, 1926), fluído plástico de Bingham (Bingham; Green, 1919) ou um fluído plástico quadrático (O'Brien; Julien, 1988) (Figura 9).

No entanto, existem outras abordagens onde os modelos tratam a mistura do fluxo de detritos como um fluído multifásico, avaliando assim a influência mútua das fases sólida e líquida conjuntamente ou como meios independentes.

Figura 9: Comportamento reológico de diferentes fluídos quando sujeitos tensões de cisalhamento.



Fonte: Autor.

### 2.3.3 Modelos monofásicos e multifásicos

#### Modelos monofásicos

Um modelo é monofásico quando se presume que o fluxo tenha uma única fase ou material. Apesar dos fluxos de detritos serem multifásicos por natureza, esses modelos costumam considerar a fase que dissipa a maior quantidade de momentum como dominante para descrever o movimento (Trujillo-Vela *et al.*, 2022).

Em modelos monofásicos, o equilíbrio de massa e momentum é utilizado para modelar a propagação de fluxos de detritos (Kundu; Cohen, 2004). Esses modelos são mais adequados quando um dos componentes, seja fluido ou solo, domina a propagação de massa, especialmente em fluxos granulares secos ou misturas homogêneas hiperconcentradas. Portanto, a contribuição de massa e momentum de uma das fases é considerada insignificante (Trujillo-Vela *et al.*, 2022).

Modelos monofásicos foram inicialmente desenvolvidos para analisar fluxos granulares secos e fluidos separadamente, estabelecendo as bases para o estudo de fluxos de detritos. Alguns dos modelos monofásicos propostos para representar fluxos granulares secos são os propostos por Savage e Hutter (1989, 1991); Denlinger e Iverson (2004); Iverson *et al.*, (2004); Baker *et al.*, (2016). Outros modelos foram desenvolvidos para simular fluxos de detritos como massas hiperconcentradas usando uma única fase (Laigle; Coussot, 1997; Takebayashi; Fujita, 2020).

### **Modelos de mistura**

Nos modelos de mistura, que consideram duas fases para o fluxo, os parâmetros e variáveis a serem calculados são a média ponderada da fração de volume que cada fase ocupa. Sendo assim, as características do fluxo são dadas por uma solução concomitante das equações de momento e conservação de massa para cada uma das fases (Iverson; Denlinger, 2001).

Um dos principais modelos desse tipo é derivado das soluções propostas por Savage e Hutter (1989, 1991), sendo esse o modelo da mistura de Coulomb de Iverson e Denlinger (2001). Com base em observações de experimentos em larga escala, esses autores identificaram que a tensão resultante da fricção de Coulomb prevalecia sobre a tensão derivada da colisão entre partículas. Assim, eles desenvolveram uma teoria abrangente de escoamento tridimensional não permanente, que aborda todo o espectro desde o início até a deposição de um fluxo de detritos. Esse modelo de mistura homogeneizada representa os fluxos de detritos, assumindo uma concentração constante de sólidos.

Ainda de acordo com esse modelo, embora a natureza do escoamento possa eventualmente se tornar permanente, o tempo necessário para que tal comportamento se estabeleça pode ser significativamente longo, tornando-se impraticável em várias situações do mundo real.

Apesar de sua tentativa de descrever comportamentos aplicáveis em uma gama mais ampla de contextos, Takahashi (2014) destaca que esse modelo é mais adequado para concentrações volumétricas elevadas (> 50%). Isso se deve ao fato de que ele opera dentro do regime quase estático, situado no limiar entre um comportamento de corpo rígido e de fluido.

### **Modelos multifásicos**

Os fluxos de detritos são naturalmente multifásicos, pois são compostos por um extenso conjunto de partículas sólidas discretas, cujos espaços intersticiais são preenchidos por fluidos, seja água ou ar (Brennen, 2005).

Uma maneira apropriada de levar em conta mais de uma fase é definir um conjunto de equações para cada fase, aumentando consideravelmente a complexidade da modelagem e o custo computacional (Trujillo-Vela *et al.*, 2022). Se o modelo for baseado na mecânica da continuidade, as fases, ao contrário do que ocorre quando se utiliza a mecânica discreta, se sobrepõem conceitualmente (Baumgarten; Kamrin, 2019). Por outro lado, há um movimento relativo entre as fases, ao contrário dos modelos de mistura. Assim, o conjunto múltiplo de equações deve ser conectado por termos de força adicionais, representando a interação entre as fases (Drew, 1983).

Alguns exemplos de modelos multifásicos são os modelos de Leonardi *et al.* (2015); Pudasaini e Mergili (2019); Trujillo-Vela *et al.* (2020); e Liu *et al.*, (2021).

#### **2.3.4 Estado da arte: Modelagem computacional de fluxo de detritos**

A complexidade dos modelos tem aumentado com o crescente entendimento desses fenômenos e avanços da capacidade de processamento computacional. Assim, as propostas mais recentes são as versões tridimensionais e multifásicas. Vale ressaltar que as representações tridimensionais são mais adequadas para o estudo de processos específicos e em pequena escala de fluxos de detritos, enquanto uma abordagem bidimensional com uma profundidade média ainda é a mais apropriada para aplicações de campo.

A importância dos avanços na modelagem consiste no fato de que uma previsão precisa da propagação de fluxos de detritos usando esses modelos é crucial para um gerenciamento de riscos eficaz e um bom planejamento de uso e ocupação. A literatura inclui muitos modelos matemáticos, com muitas aplicações que variam desde experimentos em escala de laboratório até eventos em escala de bacia (Trujillo-Vela *et al.*, 2022).

Hutter *et al.* (1996) apresentaram uma das revisões de literatura mais amplas e detalhadas sobre os modelos usados para fluxos de detritos, enfatizando os aspectos relevantes para a modelagem desses fenômenos e discutindo as vantagens dessas múltiplas escolhas. Já alguns outros artigos de revisão de literatura sobre fluxos de detritos focam em um ou dois aspectos específicos. Por exemplo, Jan e Shen (1997) forneceram uma revisão de literatura sobre as relações reológicas usadas para fluxos de detritos, classificando-as qualitativamente em seis regimes: atrito, colisão, atrito-colisão, macro viscoso, viscoplástico e viscoplástico-colisional. Van Dine e Bovis (2002) sugeriram uma série de estudos futuros para investigar problemas específicos em fluxos de detritos, estudos esses que ainda estão em andamento duas décadas depois, apesar de alguns avanços recentes.

Por fim, Trujillo-Vela *et al.* (2022) elaboraram uma extensa revisão sobre modelagem de fluxos apresentando uma visão geral sobre o estado da arte com os principais modelos utilizados atualmente, suas teorias e critérios de escolha entre eles. Um dos resultados desse estudo é uma tabela resumo com as principais informações sobre cada modelo (Tabela 1). Ao final, os autores compilaram, de acordo com as informações levantadas sobre cada modelo, diversos critérios de escolha para selecionar o melhor modelo para cada situação a ser simulada. Esses critérios são baseados nos recursos computacionais disponíveis, na acessibilidade do software, na precisão necessária e na versatilidade das ferramentas computacionais para incluir novos desenvolvimentos quando necessário.

Tabela 1: Lista de modelos matemáticos para propagação de movimentos de massa.

Modelo	Fase	Material	Modelo Reológico		Entrada de material	P	D	Discretização no espaço	Software
			Fluido	Sólidos					
Voellmy (1955)	Monofásico	SG	-	C+Q	-	não	1	FDM, FVM	r.avaflow, RAMMS
Perla et al. (1980)	Monofásico	SG	-	C+Q	-	não	1	FDM	Flow-R, FLO-2D
O'Brien e Julien (1988)	Monofásico	F	Q	-	-	não	1	FDM, FEM	EDDA 1.0, EDDA 2.0, RiverFlow2D
Savage e Hutter (1989)	Monofásico	SG	-	MC	-	não	1	EI, La-FDM	
Salm (1993)	Monofásico	SG	-	C+Q	-	não	1	FDM, FVM	r.avaflow, RAMMS, TITAN2D
O'Brien et al. (1993)	Monofásico	F	Q	-	Emp	não	2	FEM, FVM	FLO-2D, HEC-RAS
Takahashi e Nakagawa (1994)	Mistura	SG	-	Bg	Emp	não	2	FDM	Kanako 2D
Laigle e Coussot (1997)	Monofásico	F	HB	-	-	não	1	FVM	

<b>Iverson e Denlinger (2001)</b>	Mistura	SG, F	N	MC	-	sim	2	FVM, SMPM	
<b>Imran et al. (2001)</b>	Mistura	F	Bh, HB	-	-	não	1	La-FDM	
<b>Pouliquen e Forterre (2002)</b>	Monofásico	SG	-	$\mu(l)$	-	não	2	FVM	TITAN2D
<b>Denlinger e Iverson (2004)</b>	Monofásico	SG	-	Hk+MC	-	não	2	FVM-FEM	
<b>Patra et al. (2005)</b>	Monofásico	SG	-	MC	-	não	2	FVM-FDM	TITAN2D
<b>Pitman e Le (2005)</b>	Bifásico	SG, F	-	MC	-	sim	2	FVM, SPH	TITAN2D
<b>Pastor et al. (2009)</b>	Mistura	F	Bh	C+Q	-	sim	2	SPH	
<b>Armanini et al. (2009)</b>	Mistura	SG	-	Bg	Emp	não	2	FVM	TRENT-2D
<b>Christen et al. (2010)</b>	Monofásico	SG	-	C+Q	Emp	não	2	FVM	RAMMS
<b>Pudasaini (2012)</b>	Bifásico	SG, F	lh	MC	-	sim	2	FDM	r.avaflow
<b>Horton et al. (2013)</b>	Monofásico	SG	-	C+Q	-	não	1		OpenLISEN, Flow-R
<b>Iverson e George (2014)</b>	Mistura	SG, F	N	MC	-	sim	2	FVM	D-Claw
<b>Baker et al. (2016)</b>	Monofásico	SG	-	$\mu(l)$	-	não	2	FEM	
<b>Meng e Wang (2016)</b>	Bifásico	SG, F	N	MC	-	sim	1,2	FDM	
<b>Peng et al. (2016)</b>	Monofásico	SG	-	hp+Q	-	não	3	SPH	
<b>Leonardi et al. (2016)</b>	Bifásico	SG, F	Bh	Hk	-	não	3	LBM-DEM	
<b>Córdoba et al. (2018)</b>	Bifásico	SG, F	Q	MC	-	sim	2	FVM	TITAN2F
<b>Li et al. (2018)</b>	Bifásico	SG, F	Q	MC	Emp	não	2	FVM	
<b>Li e Zhao (2018)</b>	Bifásico	SG, F	N	Hk	-	não	3	FVM-DEM	
<b>Pudasaini e Mergili (2019)</b>	Trifásico	SG, SF, F	lh + DP	MC, DP	-	sim	2	FDM	r.avaflow 2.0
<b>Pudasaini e Fischer (2020)</b>	Bifásico	SG, F	lh	MC	Mec	sim	2	FDM	r.avaflow
<b>Takebayashi e Fujita (2020)</b>	Monofásico	SG, F	Q	-	Emp	não	2	FVM-DEM	Morpho2DH
<b>Trujillo-Vela et al. (2020)</b>	Trifásico	SG, BL, F	N	DP	-	sim	2,3	SPH-DEM	Mechsys
<b>Peng et al. (2021)</b>	Bifásico	SG, F	Bh	Hk	-	sim	3	SPH-DEM	LOQUAT
<b>van den Bout et al. (2021)</b>	Bifásico	SG, F	lh	DP	-	sim	2	FEM-MPM	OpenLISEN 2.0a
<b>Pudasaini e Krautblatter (2021)</b>	Monofásico	SG	-	MC	Mec	não	1		

P: poro-pressão no fluido; D: Dimensões da solução; SG: Sedimento Grosso; SF: Sedimento Fino; BL: Blocos; F: Fluido; Q: Quadrático; HB: Herschel-Bulkley; N: Newtoniano; Bh: Bingham; lh: Ishii; Bg: Bagnold; C: Coulomb; MC: Mohr-Coulomb; DP: Drucker-Prager;  $\mu(l)$ :  $\mu(l)$ -reologia; Hk: Lei de Hooke; hp: hipoplástico; Emp: Empírico; Mec: Mecânico; FDM: Método das diferenças finitas; FVM: Método dos volumes finitos; FEM: Método dos elementos finitos; El: Euleriano; La: Lagrangiano; SMPM: Método de Penalidade Espectral Multidomínio; SPH: Método da Partícula Suave Hidrodinâmica; DEM: Método do Elemento Discreto; MPM: Método do Ponto Material; LBM: Método de Boltzmann em Rede.

Fonte: Adaptado de Trujillo-Vela et al., (2022)

Como uma conclusão adicional, de uma perspectiva geral e mais prática dos modelos estudados por Trujillo-Vela *et al.*, (2022), os autores afirmam que a abordagem euleriana baseada em malha horizontal e profundidade média pode ser mais apropriada

para casos em escala de bacia, onde as velocidades, a profundidade do fluxo e as áreas de deposição são variáveis cruciais para o gerenciamento de riscos. Já para a escala laboratorial, para estudar problemas nos quais entender um processo específico é a principal preocupação, o mais recomendado são os esquemas numéricos baseados na abordagem lagrangeana sem malha tridimensional.

## **2.4 Morpho2DH**

### **2.4.1 iRIC 4.0**

A *International River Interface Cooperative* (iRIC) foi fundada em 2007 pelo Professor Dr. Yasuyuki Shimizu (Universidade de Hokkaido, Japão) e pelo Dr. Jonathan Nelson (USGS) com dois objetivos: (1) desenvolver uma plataforma de *software* chamada iRIC para a simulação numérica de fluxo e morfodinâmica em rios; e (2) oferecer seminários e materiais educativos para apoiar esse *software*.

O *software* iRIC pode ser descrito como uma interface para ferramentas de domínio público para calcular fluxo e morfodinâmica em fluxos geofísicos, com ênfase particular em rios e outros canais semelhantes (Nelson *et al.*, 2016). Ele foi desenvolvido por um grupo internacional de cientistas e engenheiros de forma totalmente voluntária.

A criação desse *software*, bem como uma biblioteca de guias de instruções, tutoriais e outros recursos de aprendizado, foi motivada por dois objetivos diferentes. Primeiramente, a equipe de pesquisadores que criou o *software* acreditava que estudantes de graduação e pós-graduação não tinham acesso suficiente a ferramentas no estado da arte para compreender e antecipar a morfodinâmica dos rios com base em princípios físicos. Em segundo lugar, eles acreditavam que os métodos recentemente criados para prever campos de fluxo e modificações morfodinâmicas do canal, visando alterações no fluxo, fornecimento de sedimentos ou forma do canal resultantes de fatores naturais ou antropogênicos, estavam suficientemente desenvolvidos para sair da área de pesquisa e entrar na área de aplicações práticas (Nelson *et al.*, 2016).

Ainda de acordo com Nelson *et al.*, (2016), todas essas mudanças sugeriram que era hora de os desenvolvedores de modelos disponibilizarem ferramentas de pesquisa de última geração para modelagem de rios a estudantes e outros não especialistas, para que pudessem assimilar essas ferramentas em seu próprio conjunto de capacidades.

Atualmente, o iRIC possui 22 *solvers* que são aplicáveis aos mais diversos problemas relacionados a rios. O Quadro 1 apresenta essa lista de *solvers*. Informações

mais detalhadas podem ser encontradas nos manuais e tutoriais disponíveis no site do iRIC (<https://i-ric.org/en/>).

Quadro 1: *Solvers* disponíveis na versão 4 do iRIC e breve descrição de sua função principal.

<b>SOLVER</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>NAYS2DH</b>	O Nays2DH é um modelo computacional para simular o fluxo bidimensional (2D) horizontal não estacionário, transporte de sedimentos e mudanças morfológicas do leito e das margens em rios.
<b>NAYS1D+</b>	O Nays1D+ é um <i>solver</i> unidimensional (1D) para fluxos de rios e deformações do leito na plataforma iRIC. O Nays1D+ pode simular não apenas fluxos estacionários/não estacionários, mas também alterações no nível do leito considerando o transporte de sedimentos de fundo.
<b>NAYS2D+</b>	O Nays2D+ é um <i>solver</i> de fluxo de canal aberto quasi-tridimensional, que combina os resultados de um modelo de fluxo de água rasa bidimensional horizontal e uma solução teórica de perfis de velocidade do fluxo principal e perfis de fluxo secundário na direção vertical.
<b>NAYS2DFLOOD</b>	Nays2DFlood é um <i>solver</i> para inundações que trata do fluxo no plano bidimensional não estacionário usando coordenadas curvilíneas gerais. O Nays2DFlood foi aplicado para análise de fluxo de inundação em rios em uma ampla gama de escalas de comprimento, desde pequenos córregos até o Mississippi.
<b>NAYS2DV</b>	Nays2DV é um modelo computacional para simulação de fluxo bidimensional em um plano vertical. O modelo foi desenvolvido para o cálculo do movimento vertical de fluido (fluxo de densidade).
<b>NAYS3DV</b>	Nays3DV é um modelo tridimensional desenvolvido para o cálculo do movimento vertical e horizontal de fluido com correntes de densidade.
<b>NAYSCUBE</b>	NaysCUBE é um <i>solver</i> tridimensional totalmente não-estacionário para fluxos fluviais e avaliação da morfodinâmica do leito. O modelo resolve as equações básicas do fluxo tridimensional incorporando a pressão da água não hidrostática associada a acelerações e velocidades verticais intensas.
<b>NAYSEDDY</b>	NaysEddy é um <i>solver</i> tridimensional baseado em simulações de grandes escalas (LES). Ele soluciona o fluxo com mais detalhes usando grades cartesianas com condições de contorno imersas em células fantasma. O NaysEddy é flexível, preciso e pode resolver problemas complexos com grande sucesso. Este <i>solver</i> aplica as equações de Navier-Stokes completas sem aproximação e sem média temporal.
<b>GELATO</b>	O GELATO é a nova versão do UTT ( <i>Universal Tracer Tracker</i> ) que é uma ferramenta para rastrear e visualizar a trajetória de vários materiais especificados pelo usuário usando os resultados de cálculos de fluxo de diversos <i>solvers</i> implementados no iRIC. A substância-alvo transportada não apenas segue completamente o fluxo, mas também possui uma capacidade de movimento por si mesma; um exemplo típico é um peixe, pode-se especificar sua capacidade e características para expressar seu movimento.
<b>NAYS2DW2</b>	NaysDw2 é um <i>solver</i> para rastrear o percurso de detritos lenhosos usando funções de rastreamento de materiais do UTT. O método utilizado no NaysDw2 é o mesmo do UTT, que é o método Lagrangiano de rastreamento de materiais. NaysDw2 também possui uma função de colisão e rotação de materiais entre si, similar ao método DEM ( <i>Discrete element method</i> ).
<b>FASTMECH</b>	O FaSTMECH ( <i>Flow and Sediment Transport with Morphological Evolution of Channels</i> ) é um <i>solver</i> quasi-estacionário de fluxo e transporte de sedimentos com evolução morfológica de canais em duas e três dimensões. O <i>solver</i> não possui condição de Courant e pode realizar cálculos espacialmente detalhados ao longo de escalas de tempo relativamente longas de forma extremamente rápida.
<b>RIVER2D</b>	River2D é um modelo hidrodinâmico de elementos finitos bidimensional não estacionário com média de profundidade. Esse modelo é muito eficaz para certos tipos de domínios complexos que não podem ser bem tratados por modelos de diferenças finitas. O River2D foi adaptado para a avaliação de habitats de peixes e amplamente utilizado para esse propósito em todo o mundo.

<b>STORM</b>	SToRM ( <i>System for Transport and River Modeling</i> ) é um solucionador de fluxo bidimensional não estacionário em grade não estruturada, capaz de fornecer análises adequadas mesmo sob as condições de contorno mais complexas. O SToRM incorpora esquemas de captura de choque de ordem superior e métodos precisos de fronteiras móveis, sendo muito eficaz para lidar com variações espaciais e temporais intensas, como as associadas a inundações bruscas, rompimentos de barragens, etc.
<b>MFLOW_02</b>	Mflow_02 é um solucionador para calcular o fluxo bidimensional não estacionário e a morfodinâmica do leito de rios usando malhas não estruturadas e o método dos elementos finitos em um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais. Esse solucionador pode calcular fluxos não estacionários em estruturas como pilares, barragens etc., ou calcular inundações em áreas complicadas, como as áreas das planícies de inundação.
<b>MORPHO2DH</b>	Morpho2DH é o solucionador horizontal bidimensional de fluxo de detritos/lama. O modelo pode reproduzir os processos de transporte e erosão/deposição de fluxos de detritos/lama devido a escorregamentos de terra. Estruturas (por exemplo, barragem SABO, açudes, construções etc.) e a distribuição horizontal da profundidade máxima de erosão podem ser incorporadas na análise. Além disso, análises de fluxo horizontal bidimensional não estacionários e deformação do leito para fluxos de água limpa podem ser realizadas utilizando o Morpho2DH, assim como na versão anterior (Morpho2D).
<b>EVATRIP</b>	EvaTRiP ( <i>Evaluation Tools for River environmental Planning</i> ) é um <i>solver</i> que fornece resultados para o planejamento ambiental de rios. Essa ferramenta pode avaliar a necessidade de proteção das margens de um rio, o tamanho de grão crítico para uma região do rio, avaliação de uma região para crescimento de plantas terrestres, avaliação de uma região de habitat de peixes etc.
<b>SRM</b>	O <i>Storage Routing Model</i> (SRM) é um <i>solver</i> para cálculo de escoamento que utiliza a abordagem de armazenamento rotativo simples. O <i>solver</i> consiste em dois tipos de modelos: um modelo de armazenamento rotativo sintético e um modelo em cascatas de armazenamento rotativo. O solucionador pode calcular a quantidade de escoamento a partir da precipitação, enquanto otimiza os parâmetros do modelo.
<b>ELIMO</b>	O ELIMO é um <i>solver</i> capaz de realizar estimativas confiáveis da geração de tsunamis em locais de terremotos, da propagação pelo oceano e da evolução em áreas costeiras. O ELIMO foi desenvolvido com o lema de "cálculo de tsunami simples e fácil" para tornar esses cálculos acessíveis a não especialistas, juntamente com a interface de software iRIC, disponível gratuitamente.
<b>DHABSIM</b>	DHABSIM ( <i>Diversity based HABitat SIMulation</i> ) é um modelo para cálculo de habitat de fácil utilização em duas dimensões. O <i>solver</i> calcula as condições de habitat para rios de pequeno a médio porte sem utilizar Índices de Adequação de Habitat para espécies específicas de peixes.
<b>CERI1D</b>	CERI1D é um <i>solver</i> para fluxos não estacionários unidimensionais (1D). CERI1D é capaz de calcular o fluxo do rio, as variações do gelo no rio e a propagação de tsunamis em rios. CERI1D fornece dados de suporte para a elaboração de medidas de controle de enchentes e medidas de prevenção de desastres em regiões frias.
<b>SAC</b>	O <i>Slope-Area Computation</i> (SAC) é um <i>solver</i> utilizado para calcular vazões de pico de cheias a partir de medições de elevação de marcas de água ao longo de um trecho de rio. O <i>solver</i> utiliza uma versão geral do método de área-declive para estimar fluxos com base em níveis de água registrados e valores de rugosidade definidos.
<b>CAP</b>	O <i>Culvert Analysis Program</i> (CAP) é um solucionador para desenvolver curvas de vazão para uma ampla variedade de tipos de orifícios. Dada uma série de informações sobre a geometria do orifício, detalhes da abordagem e outros aspectos, o <i>solver</i> produz uma curva de vazão que prevê as taxas de fluxo do orifício em função das elevações do nível d'água.

### 2.4.2 Morpho2DH v2.0

O Morpho2DH é um modelo de corpo contínuo bidimensional para fluxo de detritos e de lama que considera camadas de fluxo laminar e turbulento. Esse modelo conta com uma crescente utilização nos últimos anos, principalmente em países orientais como Japão (Takebayashi; Fujita 2018, 2019, 2020; Ishikawa; Takebayashi; Fujita, 2019; Onaka et al., 2021), China (Kuo; Feng, 2020; Chuang; Kao; Chen, 2022), e Indonésia (Septiandy, 2021), mas também em países da América do Sul como o Peru (Pre Piñan, 2022) e Brasil (Martins Ameno *et al.*, 2021; Franck; Kobiyama, 2023). As principais utilizações desse modelo são na reprodução e previsão de fluxos de lama/detritos (Takebayashi; Fujita, 2020), avaliação de estruturas de contenção de fenômenos causadores de desastres relacionados a sedimentos, como barreiras SABO (Takebayashi; Fujita, 2019), e avaliação do potencial de destruição de estruturas por fluxos de detritos (Nakamoto *et al.*, 2018; Takebayashi; Fujita, 2018).

Embora existam outros modelos numéricos para fluxos de detritos, tais como o FLO-2D e o Kanako-2D, deve-se levar em consideração que Kobiyama *et al.*, (2015) destacaram que o tipo de fluxo de detritos que normalmente ocorre no sul do Brasil é o lenhoso, dentro das possibilidades de análise fornecidas pelo iRIC e pelo Morpho2DH, pode-se considerar uma certa influência da vegetação no fluxo, atuando como um acréscimo na resistência que deve ser vencida para a propagação desse.

As equações constitutivas do modelo foram primeiramente propostas por Egashira e Itoh (2004). Posteriormente, Takebayashi *et al.*, (2014) adaptaram essas equações para serem utilizadas na interface do iRIC. Por fim, Takebayashi e Fujita (2020) e Takebayashi, Fujita e Ohgushi (2022) realizaram as últimas modificações e aprimoramentos no modelo, resultando em sua versão atual. Os fluxos de detritos e de lama consistem em uma mistura de água e sedimentos fluindo, essa mistura é tratada pelo modelo como um corpo fluido contínuo monofásico.

O modelo parte de alguns pressupostos:

(i) Quando as características coesivas da camada mais próxima do leito, sobre a rocha, podem ser desconsideradas (por exemplo em situações onde esse é um material não coesivo, ou está em uma situação saturada onde uma alta poro-pressão faz com que a força coesiva se aproxime de zero), e existe uma condição de equilíbrio em que a taxa de erosão do leito é a mesma que a taxa de deposição de sedimentos, essa taxa de erosão do leito pode ser estimada usando apenas a velocidade do fluxo, a concentração de material sólido na camada do leito e a relação entre a inclinação do leito e a inclinação de

equilíbrio do leito. Ou seja, se o fluxo tiver velocidade suficiente, o mesmo irá erodir todo o material disponível no leito.

(ii) Quando o diâmetro do material sólido é grande, o fluxo de detritos deve ser um fluxo laminar, porque a turbulência não é bem desenvolvida na escala de profundidade do fluxo. Em contraste, quando o diâmetro do material sólido é pequeno (por exemplo, granito fino, cinza vulcânica, neve seca etc.), uma camada de fluxo turbulento é formada acima da camada de fluxo laminar até uma profundidade próxima ao leito, e esse acaba se tornando um fluxo de lama de movimento misto.

(iii) A formação de camadas laminares e turbulentas reduz a inclinação de equilíbrio do leito e aumenta a taxa de erosão. Portanto, considerar a formação de camadas laminares e turbulentas é fundamental para estimar corretamente a taxa de erosão do leito.

O Morpho2DH é constituído por um sistema de 6 equações fundamentais e 6 incógnitas, sendo elas:

A equação de conservação de massa da mistura de água e sedimentos:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (2.10)$$

onde,  $t$  é o tempo;  $h$  é a profundidade do fluxo;  $u$  e  $v$  são as velocidades médias nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente. O termo no lado direito indica o acréscimo e o decréscimo de massa no escoamento e expressa o desenvolvimento e a diminuição de um fluxo de detritos pela troca da mistura de água e sedimentos entre a superfície do leito e o fluxo de detritos, onde  $c_*$  é a concentração de sedimentos na camada de deposição estática (concentração de sedimentos no leito), e  $E$  é a taxa de erosão/deposição do leito (se o sinal for positivo o leito está sendo erodido, se for negativo o processo de deposição está ocorrendo). Para o cálculo de  $E$ , partindo do pressuposto (i) informado anteriormente, tem-se a seguinte equação:

$$\frac{E}{\sqrt{u^2+v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (2.11)$$

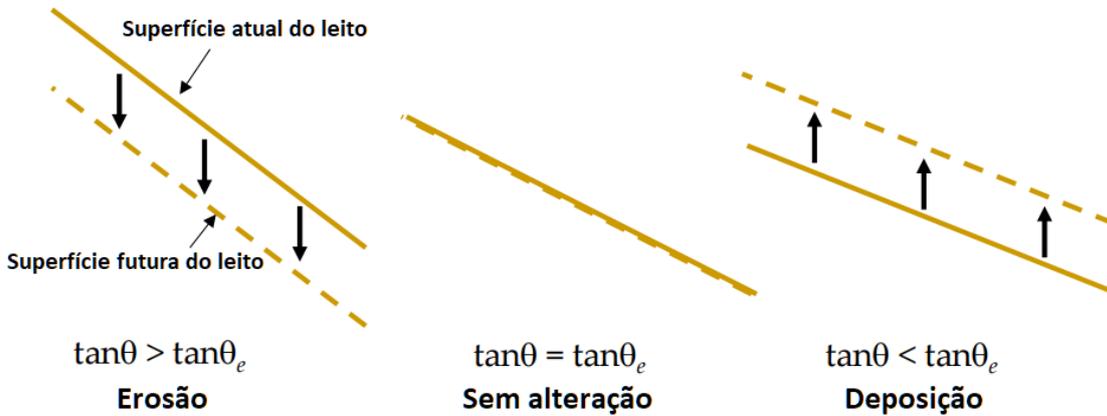
onde  $\theta$  é a declividade do leito na direção do fluxo, sendo calculado através da seguinte equação:

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2+v^2}} \quad (2.12)$$

onde  $\theta_x$  é a declividade do leito na direção  $x$ ;  $\theta_y$  é a declividade do leito na direção  $y$ ; e  $\theta_e$  a declividade de equilíbrio do leito.

A Figura 10 apresenta um esboço da relação entre a deformação do leito (erosão e deposição) com a declividade do mesmo. Quando a declividade do leito é maior que a declividade de equilíbrio, a superfície do leito é erodida e os materiais erodidos são incorporados no fluxo de detritos. Quando a declividade do leito é igual a declividade de equilíbrio, a superfície do leito não é deformada e a massa do fluxo de detritos permanece inalterada e em transporte. Por fim, quando a declividade do leito é menor que a declividade de equilíbrio, os materiais no fluxo de detritos são depositados no leito e a massa do fluxo de detritos é reduzida.

Figura 10: Esboço da relação entre a deformação do leito e a declividade de equilíbrio.



Fonte: Adaptado de Takebayashi e Fujita (2020)

Com o pressuposto (ii), onde considera-se a possibilidade da formação de ambos os fluxos, laminar e turbulento (Figura 11), a depender do tamanho dos sedimentos característicos na mistura, e fazendo referência a uma profundidade média ( $h$ ) e a uma concentração de sedimentos no fluxo ( $\bar{c}$ ), a inclinação de equilíbrio do leito  $\theta_e$  na direção do fluxo é obtida da seguinte forma:

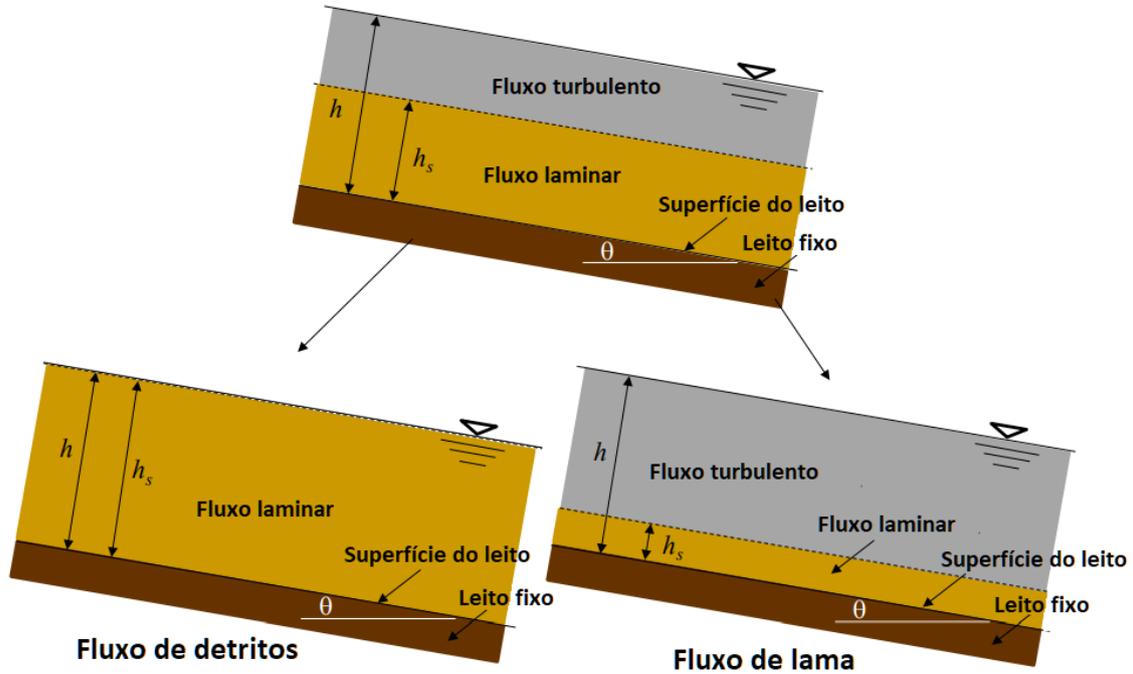
$$\tan \theta_e = \frac{(\rho_s/\rho - 1)\bar{c}}{(\rho_s/\rho - 1)\bar{c} + 1} \cdot \frac{h_s}{h} \cdot \tan \varphi_s \quad (2.13)$$

onde  $\varphi_s$  é o ângulo de atrito interno,  $\rho_s$  é a densidade do sedimento,  $\rho$  é a densidade da água. A espessura da camada de fluxo laminar  $h_s$  é estimada pela seguinte equação:

$$\frac{h_s}{d_m} = \frac{1}{(\tan \varphi_s - \tan \theta)\bar{c} \cdot \cos \theta} \cdot \tau_{*m} \quad (2.14)$$

onde  $d_m$  é o diâmetro médio das partículas na mistura de sedimentos; e  $\tau_{*m}$  é o cisalhamento adimensional do diâmetro médio.

Figura 11: Esquema da formação de fluxos laminar e turbulento e a relação entre fluxo de detritos e fluxo de lama.



Fonte: Adaptado de Takebayashi e Fujita (2020)

Quanto mais fina a camada do fluxo laminar, menor é a declividade de equilíbrio do leito. Portanto, o fluxo de detritos pode ser transportado para áreas com declividades menores.

A conservação de massa de sedimentos na mistura pode ser calculada por:

$$\frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}hu}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}hv}{\partial y} = E \quad (2.15)$$

Para a conservação de momento nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente são utilizadas as seguintes equações:

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (2.17)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade;  $z_b$  é a elevação do leito;  $\tau_{bx}$  e  $\tau_{by}$  são as tensões cisalhantes nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente, enquanto a pressão  $P$  é considerada como a pressão estática, e é calculada por:

$$P = \int_0^h \rho_m g (h - z_b) \cos \theta dz_b \quad (2.18)$$

A dissipação de energia tanto dos sólidos quanto do líquido devido ao movimento é considerada para estimar a tensão cisalhante. A densidade da mistura do fluxo de detritos  $\rho_m$  é calculada pela seguinte equação:

$$\rho_m = (\rho_s - \rho) \bar{c} + \rho \quad (2.19)$$

Quando a camada de fluxo turbulento é dominante, a tensão cisalhante nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente é a seguinte:

$$\tau_{bx} = \{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (2.20)$$

$$\tau_{by} = \{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (2.21)$$

onde  $\tau_y$  é a tensão crítica para início do escoamento, que é calculado pela seguinte relação para materiais não coesivos:

$$\tau_y = \left( \frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{\frac{1}{5}} (\rho_s - \rho) \bar{c} g h_s \cos \theta \tan \varphi_s \quad (2.22)$$

e  $f_b$  é o coeficiente de resistência, sendo utilizada a seguinte relação para calcular esse parâmetro:

$$f_b = \frac{4}{25} \left\{ k_f \frac{(1-\bar{c})^{\frac{5}{2}}}{\bar{c}^{\frac{3}{2}}} + k_d \frac{\rho_s}{\rho} (1 - e^2) \bar{c}^{\frac{1}{3}} \right\} \left( \frac{h_s}{d_m} \right)^{-2} + 9\alpha^2 \left( 1 - \frac{h_s}{h} \right) \quad (2.23)$$

O primeiro e segundo termo do lado direito são provenientes da camada de fluxo laminar, e o terceiro termo é referente a camada de fluxo turbulento. O primeiro termo é originado pela turbulência do líquido entre as partículas sólidas. Essa turbulência em pequena escala pode ser formada em uma camada de fluxo laminar e deve ser considerada ao estimar a dissipação de energia. O segundo termo é devido às colisões inelásticas das partículas de sedimento, onde os valores de  $k_f$  e  $k_d$  são 0,16 e 0,0828 respectivamente, e juntamente com o parâmetro  $e$  são os coeficientes de inelasticidade das partículas.

O parâmetro  $\alpha$  é dado por:

$$\alpha = \frac{k}{6} \quad (2.24)$$

onde  $k$  é a constante inelástica do material.

Por fim, a equação para calcular a alteração de elevação do leito é a seguinte:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_*} \quad (2.25)$$

Esse modelo matemático foi integrado na interface de análise de rios de domínio público iRIC atualmente na versão 4.0, cujo autor do modelo faz parte do grupo de colaboradores do *software*.

### 2.4.3 Esquema numérico

O Morpho2DH utiliza uma grade horizontal no sistema de coordenadas curvilíneo generalizado para resolver as equações, o que reduz a dissipação de energia numérica de energia nas bordas do fluxo em canais curvilíneos (Takebayashi; Fujita; Ohgushi, 2022). O esquema numérico utilizado para a resolução das equações é em um método de volumes finitos de segunda ordem, sendo esse uma versão TVD (*Total Variation Diminishing*) do esquema de MacCormack. O Método de Volumes Finitos concentra os cálculos no centro de volumes descontínuos, de modo que uma função de conexão, conhecida como fluxo numérico, é necessária para conectá-los (LeVeque, 2002). Várias versões do Método de Volumes Finitos são comumente implementadas para resolver um conjunto de equações devido às suas vantagens de estabilidade, especialmente quando as frentes de choque aparecem na simulação (Trujillo-Vela *et al.*, 2022).

O esquema MacCormack-TVD consiste no esquema clássico de MacCormack (MacCormack, 1969) com a introdução de um terceiro passo no qual se adiciona à solução uma viscosidade artificial auto-adaptativa, evitando a formação de oscilações (Franco, 1996; Garcia-Navarro *et al.*, 1992; Tseng e Chu, 2000).

No que diz respeito ao uso de um esquema de segunda ordem, os esquemas de discretização central (como o MacCormack) apresentam desvantagens pois geram oscilações numéricas em torno de descontinuidades (Costabile *et al.*, 2012). Portanto, por meio do método TVD, limitadores não lineares foram introduzidos para evitar essas desvantagens. Segundo Macchione e Morelli (2003), é interessante lembrar que a abordagem TVD trouxe novas perspectivas para esses esquemas centrais de segunda ordem pertencentes à família Lax-Wendroff (a qual o esquema de MacCormack faz parte). Devido a essa adaptação, esquemas como esse, com um termo de viscosidade artificial, foram obtidos através da introdução de limitadores particulares em esquemas de segunda ordem, com a vantagem de que esse termo pode ser formulado sem calibrar constantes empíricas caso a caso (Costabile *et al.*, 2012).

Diversos estudos compararam a performance de esquemas numéricos de primeira e segunda ordem baseados na propriedade TVD, incluindo os esquemas HLL, HLLC, esquema de Roe, e MacCormack-TVD (Costanzo *et al.*, 2002; Macchione; Morelli 2003; Macchione; Viggiani 2004; Costanzo; Macchione 2005), destes trabalhos, pode-se deduzir que as simulações que utilizam o esquema de MacCormack-TVD apresentaram as previsões mais precisas com menor índice de erros numéricos. A utilização de um esquema robusto que reduz oscilações e instabilidades é favorável em estudos de análise de sensibilidade dos parâmetros de um modelo matemático. Nesse estudo busca-se avaliar apenas a influência da alteração do valor dos parâmetros no resultado, sendo assim, é interessante que o esquema numérico seja mais preciso e menos instável, pois sua influência nos resultados dessa análise de sensibilidade é menor.

## **2.5 Fontes de incerteza em simulações de fluxos de detritos**

A modelagem é, por sua essência, a representação de um fenômeno. Essa representação se baseia em pressupostos e utiliza simplificações, seja por conveniência ou devido à limitação na compreensão dos processos e elementos envolvidos nos sistemas analisados. Esses pressupostos e simplificações presentes em um modelo (como, no caso do Morpho2DH a simplificação em 2D e a aproximação da pressão como uma pressão hidrostática) podem resultar em desvios em relação aos resultados esperados, ou seja, em relação ao cenário real. Esses desvios, por sua vez, são responsáveis pelas incertezas presentes nas simulações. Ao buscar prever o comportamento de um sistema, é inevitável que incertezas estejam associadas aos resultados obtidos. Essas incertezas podem surgir em diversas etapas, desde a coleta de dados até a interpretação dos resultados (Montanari *et al.*, 2009).

No contexto de modelagem de fluxos de detritos, é relevante abordar as incertezas relacionadas aos modelos reológicos. As equações constitutivas para os fluidos acabam funcionando como uma representação simplificada dos comportamentos das partículas presentes nos fluxos de detritos (Iverson, 2003). Dentro de uma mistura de água e sedimentos, essas partículas exibem uma gama de comportamentos considerados aleatórios, ou seja, caóticos, introduzindo um elemento imprevisível que afeta o comportamento do fluxo em escala macro. Como resultado, diversos processos e pressupostos inerentes às equações em si contribuem para níveis variados de incerteza dentro da simulação.

Outra fonte de incerteza reside na aquisição e medição dos parâmetros reológicos. A determinação de parâmetros como viscosidade, frequentemente realizada em escala laboratorial, está sujeita às limitações do aparelho empregado (Hunt *et al.*, 2002). Além disso, erros humanos podem ocorrer durante os ensaios. Pequenas variações na composição da mistura testada podem impactar drasticamente os resultados, como observado por Jan e Shen (1997). Experimentos de Major e Pierson (1992) revelaram que o aumento mínimo nas concentrações de sedimentos pode ampliar significativamente os valores de tensão crítica.

Para modelos baseados em processos, a constituição da mistura é fundamental. No entanto, ao prever áreas de alcance de possíveis fluxos de detritos surge a incerteza, pois as características da mistura real não podem ser previstas ou medidas com total certeza. Além disso, as propriedades da mistura mudam ao longo do fluxo, à medida que as frações de água, ar e sólidos mudam continuamente (Takahashi, 2014).

Simulações numéricas também apresentam incertezas devido a erros acumulados nos cálculos, que podem ser desencadeados por séries truncadas, arredondamentos e omissões de fatores nas equações, propagando-se ao longo dos procedimentos de cálculo (Borche, 2008). Além disso, as incertezas relacionadas à interpretação e tratamento dos resultados estão intimamente ligadas às incertezas acumuladas nas fases de aquisição de dados e implementação do modelo (Eidsvig *et al.*, 2014).

A representação do terreno também introduz incertezas nas simulações de fluxo de detritos. Embora ferramentas avançadas de SIG sejam amplamente utilizadas, erros podem ser incorporados em várias etapas, sejam elas: escolha do equipamento, aplicação desse equipamento pelo operador, tratamento das informações coletadas ou peculiaridades da área de estudo (Wilson, 2018).

Por fim, a carência de dados é um desafio persistente, e o desenvolvimento de metodologias para regiões com escassez de informações têm se destacado (Basheer; Elagib, 2019; Falah *et al.*, 2019). Pan *et al.* (2018) afirmam que isso é válido especialmente para fluxos de detritos.

## **2.6 Análise de sensibilidade**

A análise de sensibilidade (AS) é um passo crucial no processo de avaliação do modelo e na interpretação dos resultados. Ela investiga como a variação em um resultado do modelo pode ser atribuída a variações nos diferentes fatores de entrada. Vários

questionamentos são possíveis e várias abordagens de AS foram desenvolvidos, dando origem a uma vasta gama de métodos.

Perguntas típicas abordadas pela AS são: Quais fatores de entrada causam a maior variação no resultado? Há algum fator cuja variabilidade tenha um efeito desprezível no resultado? Existem interações que amplificam ou diminuem a variabilidade induzida por fatores individuais? Pode-se distinguir diferentes tipos de análise de sensibilidade dependendo de como essas perguntas são formuladas e abordadas (Pianosi *et al.*, 2016).

Os métodos de análise de sensibilidade podem ser separados em locais (ASL) e globais (ASG), onde os primeiros fazem uma análise em torno de um parâmetro de interesse no espaço de entrada do modelo, e os segundos visam compreender como a variabilidade em mais de um parâmetro simultaneamente afeta a variabilidade nos resultados do modelo (Borgonovo; Plischke, 2016).

Outra distinção frequentemente feita entre os métodos de AS é entre os classificados como 'Um [parâmetro] de Cada Vez' (OAT, do inglês "*One [factor] At a Time*") e os outros que podem ser chamados de métodos 'Todos os [parâmetros] de Uma Vez' (AAT, do inglês "*All [factors] At a Time*"). Essa distinção refere-se à estratégia de amostragem usada para estimar os índices de sensibilidade (Pianosi *et al.*, 2016). Na verdade, em geral, os índices de sensibilidade não podem ser calculados analiticamente devido à complexidade da relação entre entrada e saída, e, portanto, eles são aproximados numericamente a partir de uma amostra de fatores de entrada e avaliações de saída. A distinção entre métodos OAT e AAT é baseada na abordagem adotada para selecionar amostras de entrada. Especificamente:

- Nos métodos OAT, as variações na saída são induzidas ao variar um fator de entrada por vez, enquanto se mantêm todos os outros fixos;
- Nos métodos AAT, as variações na saída são induzidas ao variar todos os fatores de entrada simultaneamente, e, portanto, a sensibilidade a cada fator considera a influência direta desse fator, bem como a influência conjunta devido às interações.

Enquanto a ASL normalmente utiliza uma abordagem OAT, a ASG pode empregar estratégias tanto OAT quanto AAT. Em geral, os métodos AAT fornecem uma melhor caracterização das interações entre os fatores de entrada. A desvantagem desses métodos, no entanto, é que geralmente exigem uma amostragem mais extensa e, portanto, um número maior de avaliações do modelo (Pianosi *et al.*, 2016).

Segundo Borgonovo e Plischke, (2016), os métodos mais utilizados para análises de sensibilidade local são os métodos com abordagens OAT. Isso permite avaliar o quão

sensível é a saída do modelo às variações em cada parâmetro individual. Apesar de Saltelli e Annoni (2010) criticarem esse método afirmando que o mesmo não aplicável para todos os modelos e é muitas vezes utilizado de forma indevida, de acordo com alguns autores (Ahtikoski *et al.*, 2008; Campbell *et al.*, 2008; Hof *et al.*, 2008; Murphy *et al.*, 2004; Nolan *et al.*, 2007), essa abordagem proporciona uma análise mais abrangente das tendências em cada nível, tornando-se uma maneira bastante utilizada para avaliar a importância relativa entre os diversos parâmetros. Alguns autores já aplicaram métodos OAT com sucesso para avaliação de modelos de propagação de fluxos de detritos (Luna *et al.*, 2012; Hussin *et al.*, 2012).

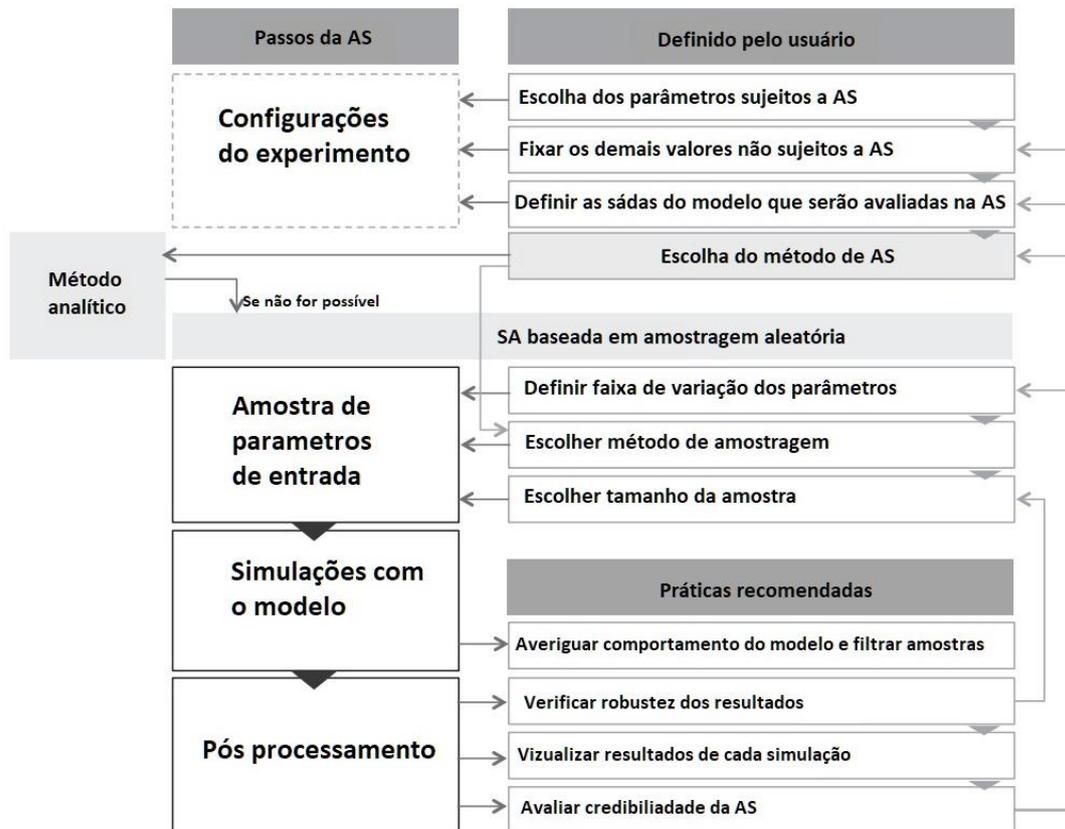
Um outro método muito utilizado é o método de rastreamento, que consiste em variar um determinado parâmetro em dois níveis extremos enquanto os demais são mantidos constantes. Essa análise permite ter uma breve noção da resposta do modelo à variação de um parâmetro, sendo mais recomendada para análises preliminares (Heiselberg *et al.*, 2009).

Algumas metodologias de ASL que utilizam abordagens OAT são: decomposição de cenários, gráficos de teia, funções de sensibilidade unidirecional, e os métodos baseados em diferenciação. Entre esses, os gráficos de teia são uma forma visual de representar a sensibilidade de um sistema em relação a diferentes variáveis ou parâmetros. Esses podem ser usados para representar graficamente a sensibilidade de um modelo em relação a várias entradas. Cada linha em um gráfico de teia representa uma variável de entrada específica, e a posição de cada linha no gráfico mostra o impacto dessa variável na saída do modelo. Por exemplo, se uma linha estiver mais distante do centro do gráfico, isso indica que a saída do modelo é mais sensível a essa variável. Sendo assim, os gráficos de teia podem ajudar um determinado tomador de decisão a visualizar e entender as complexas relações entre as variáveis de entrada e saída de um sistema.

Já entre os métodos globais de análise de sensibilidade, Borgonovo e Plischke (2016) afirmam que o método mais utilizado é o da variância, que busca avaliar a dispersão dos resultados em torno de um valor central médio, utilizando a variância amostral. Zhan *et al.*, (2013) comentaram que análises de sensibilidade avaliadas em termos da variância promovem análises mais robustas quando comparadas aos outros métodos. No entanto, quando as faixas de variação dos parâmetros de entrada são muito grandes, a interpretação da sensibilidade pode se tornar mais complexa (Song *et al.*, 2015). Outras metodologias de ASG consistem em métodos de regressão, métodos baseados em densidade, métodos de transformação invariante, sensibilidade baseada no

valor da informação, e as técnicas de filtragem de Monte Carlo. Pianosi *et al.*, (2016) sugerem um fluxo de trabalho para estudos de AS (Figura 12).

Figura 12: Fluxograma de trabalho sugerido em um estudo de análise de sensibilidade.



Fonte: Adaptado de Pianosi *et al.*, (2016).

Borgonovo e Plischke (2016) elaboraram uma revisão aprofundada sobre o estado da arte e os recentes avanços dos diferentes métodos de análise de sensibilidade. Os autores concluíram que os avanços recentes nesse campo são capazes de reduzir significativamente o custo computacional, tornando o uso de métodos globais ou locais mais diretos e acessíveis a um número crescente de aplicações.

## 2.7 Análise de sensibilidade em modelos de fluxo de detritos

Kurylo (2010) conduziu uma análise de sensibilidade em relação ao fluxo de detritos utilizando o modelo BCDFLOW, proposto por Fannin e Wise (2001), em cinco regiões do Canadá caracterizadas por possuírem terrenos montanhosos vegetados e alta incidência de neve durante o inverno. O estudo investigou a sensibilidade em relação ao alcance e ao volume acumulado, comparando os resultados observados em campo com as previsões do modelo nas cinco áreas onde ocorrências de fluxo de detritos foram

mapeadas. Dado que o modelo se fundamenta principalmente nas características topográficas, o autor avaliou que essa variável desempenha um papel predominante na determinação dos resultados do modelo.

Luna *et al.* (2012) conduziram uma análise de sensibilidade pelo método OAT de fluxos de detritos utilizando o modelo proposto por van Asch *et al.* (2007). Esse modelo considera a dinâmica do fluxo como unidimensional, tratando o fluxo como se fosse laminar e o fluido é tratado como incompressível. Os autores observaram que o ângulo de atrito interno, a profundidade e a coesão do solo são parâmetros sensíveis quando se avalia a quantidade de material deslocado. No entanto, eles destacaram que esses parâmetros não influenciam significativamente na velocidade do fluxo.

Já Hussin *et al.* (2012) realizaram uma análise de sensibilidade com o método OAT no modelo RAMMS (Bartelt *et al.*, 1999), focando no alcance do fluxo, ao alterarem os valores dos coeficientes de atrito, turbulência e arrasto. Esse modelo utiliza o conceito de fluxo contínuo de fluido de Voellmy-Salm. A identificação dos parâmetros mais sensíveis contribuiu para a calibração do modelo em relação a fluxos de detritos simulados. Frank *et al.* (2017) também realizaram uma análise de sensibilidade do RAMMS, no entanto o enfoque foi no volume do fluxo de detritos. A sensibilidade ao volume inicial do escorregamento foi investigada ao variar sistematicamente o mesmo e comparar o volume resultante do fluxo de detritos com estimativas dos locais de campo.

Yu *et al.* (2014) empregaram a modelagem numérica para aprimorar a compreensão dos efeitos da erosão e sedimentação causadas por deslizamentos e fluxos de detritos, bem como para avaliar a influência dos parâmetros reológicos no comportamento do fluxo. Os autores utilizaram o método ANOVA (*Analysis of Variance*), um método de análise de sensibilidade global. O modelo utilizado para tal análise foi proposto por Cannon e Savage (1988), no qual a massa é considerada uma aglomeração de partículas arrastadas pelas forças gravitacionais, sendo as forças de atrito cruciais para impulsionar o fluxo. Os resultados indicaram que a topografia exerce papel significativo nos processos de transporte e deposição de fluxos de detritos. Além disso, a velocidade, alcance, área de deposição e volume movimentado são influenciados pelas condições subterrâneas do solo, pelo tamanho das partículas e pela poro-pressão.

Horton *et al.* (2019) aplicaram um modelo de fluxo de detritos dinâmico 2D, o Massflow para mapeamento de perigo. No entanto, antes de realizar o mapeamento foi conduzida uma análise de sensibilidade do modelo, pelo método OAT, que identificou três principais parâmetros responsáveis pelo aumento do volume de fluxos de detritos: a

concentração de material erodível ao longo do caminho do fluxo, a área e a posição dos escorregamentos iniciais.

Zegers *et al.* (2020) realizaram uma análise de sensibilidade para uma série de variáveis relevantes (área máxima de inundação, velocidade máxima do fluxo, altura máxima e volume de depósito) do FLO-2D utilizando o método *Distributed Evaluation of Local Sensitivity Analysis* (DELSA), que é uma técnica híbrida local-global. Os autores concluíram que  $\beta 1$  - um parâmetro utilizado para estimar a viscosidade da mistura fluida - fornece as maiores sensibilidades nas variáveis analisadas, seguido por SD - um parâmetro do modelo utilizado para representar a retenção do fluxo. Curiosamente, os autores concluíram que a importância relativa de  $\beta 1$  e SD depende do local de estudo, sendo que o primeiro é mais importante para uma das áreas de estudo e o último é mais importante para outra. Esses resultados sugerem que, para o modelo FLO-2D, enquanto os processos reológicos dominam o comportamento do fluxo em um local com canal reto com pequeno leque aluvial, os processos de sedimentação e retenção de partículas controlam o fluxo no local com um grande leque aluvial.

Paixão *et al.* (2021b) conduziram uma análise de sensibilidade para as variáveis distância percorrida, área alcançada e largura do fluxo, ao variarem os parâmetros de entrada do modelo Kanako-2D. A análise utilizou um método OAT em que os valores dos parâmetros de entrada foram individualmente alterados de acordo com um critério baseado em características físicas. Um local real com histórico de fluxos de detritos e um local hipotético com características semelhantes foram utilizados. Os resultados mostram uma alta sensibilidade para os parâmetros ângulo de atrito interno, diâmetro dos sedimentos, densidade de massa da fase fluida e densidade de massa do material do leito.

Kim *et al.* (2021) conduziram uma análise de sensibilidade de fluxos de detritos a diferentes configurações de barreiras do tipo fenda utilizando o modelo FLOW-3D. O método utilizado pelos autores foi o VBSA (*variance-based sensitivity analysis*), um método global. Foram avaliados a concentração de solo em detritos fluidizados, velocidade inicial e volume de detritos, altura da barreira e razão de abertura, sob uma perspectiva de redução de energia do fluxo e aprisionamento de detritos. Os autores verificaram que a velocidade inicial e o volume de detritos desempenham um papel significativo na determinação das características do fluxo de detritos.

Naqvi *et al.* (2023) conduziram uma análise de sensibilidade do modelo r.avaflow 2.0 na região de Pitztal Valley, Áustria. Os autores calibraram o modelo com dados de campo chegando a um bom resultado e posteriormente avaliaram a sensibilidade dos

parâmetros ângulo de atrito basal, fração sólida e volume inicial do material propagado. Como principal conclusão desse estudo, os autores apontam que esses 3 parâmetros possuem influência significativa no resultado da simulação, e, portanto, preferencialmente devem ser medidos em campo para evitar resultados equivocados.

Como pode-se observar, o aumento no interesse em avaliar a sensibilidade de modelos de fluxo de detritos é algo relativamente recente (últimos 15 anos). O conhecimento sobre o funcionamento do modelo e sua aplicação, é, no entanto, fundamental, pois para que haja uma correta aplicação e interpretação dos resultados providos pelo modelo é necessário primeiro conhecer o comportamento de suas componentes perante diferentes situações. Dessa forma, é importante que se avalie um modelo de fluxos de detritos quanto à sensibilidade de seus parâmetros antes de utilizar o mesmo para previsões de áreas de perigo.

A quantidade de trabalhos com o Morpho2DH vem crescendo nos últimos anos. No entanto, ainda não há um estudo sobre a sensibilidade de seus parâmetros, destacando a importância desse trabalho.

## **2.8 Fluxos de detritos na região sul do Brasil**

O Brasil possui diversas regiões montanhosas com características geomorfológicas que, associadas às precipitações intensas, podem acarretar a ocorrência de fluxos de detritos, entretanto, o registro de ocorrências não é muito extenso. De acordo com Kobiyama e Michel (2015), esses processos ocorrem com maior frequência em lugares pouco habitados, visto que são mais comuns em regiões montanhosas nas cabeceiras das bacias. Assim, as poucas testemunhas da ocorrência de um fluxo de detrito raramente possuem o conhecimento necessário para registrá-lo de forma adequada. Ainda assim, existem grandes desastres que atingiram regiões mais povoadas envolvendo fluxos de detritos que podem ser destacados (Tabela 2).

A região sul do Brasil é especialmente suscetível a desastres de movimento de massa, principalmente nas regiões da Serra Geral e da Serra do Mar paranaense, onde o relevo com escarpas acentuadas e altas declividades favorece a formação desse tipo de fenômeno. Considerando a localização das áreas avaliadas nesse estudo, aqui são apresentados apenas registros de fluxos que ocorreram na parte sul do Brasil. No entanto, vale ressaltar que em outras regiões, como por exemplo a região sudeste, tem-se uma alta

incidência desse tipo de desastre, principalmente no estado do Rio de Janeiro e no litoral de São Paulo.

Tabela 2: Registro de desastres no Sul do Brasil.

<b>Ano</b>	<b>Local</b>	<b>Precipitação (mm)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fonte</b>
<b>1974</b>	Tubarão - SC	394/72h	-	Lopes, (2015)
<b>1990</b>	Blumenau - SC	-	-	ND+ (2023)
<b>1995</b>	Timbé do Sul- SC	500/1h	3.000.000	Valdati, (2000)
<b>2000</b>	Arroio do Böni - RS	-	75.000	Paixão <i>et al.</i> , (2021a)
<b>2000</b>	Arroio Jaguar - RS	-	-	Michel (2015)
<b>2008</b>	Rio dos Cedros - SC	21.47/24 h	55.920	Goerl <i>et al.</i> , (2009)
<b>2008</b>	Rio dos Cedros - SC	21.47/24 h	61.340	Goerl <i>et al.</i> , (2009)
<b>2008</b>	Rio Cunha - SC	92.9/24h	-	Michel <i>et al.</i> , (2021)
<b>2011</b>	Rio Jacareí - PR	236.8/24h	1.700.000	Paz e de Paula (2022)
<b>2017</b>	Bacia do Rio Mascarada - RS	96-272/24h	-	SEMA/GPDEN RS (2017)
<b>2020</b>	Bacia do rio Mampituba - RS/SC	268/24 h	-	Paixão <i>et al.</i> , (2021b)
<b>2020</b>	Presidente Getúlio, Ibirama e Rio do Sul - SC.	187-242-183/96 h	-	Michel <i>et al.</i> , (2021)

No Rio Grande do Sul, existem poucos registros de ocorrências de fluxos de detritos. Um desses eventos aconteceu em 2000 no município de Alto Feliz, na Bacia do Arroio Jaguar, durante episódios de chuvas extremas (Michel, 2015). Nesse incidente, uma residência estava no trajeto do fluxo de detritos, resultando em quatro fatalidades.

Em Santa Catarina, ocorreu um evento de chuvas intensas na região do Vale do Itajaí entre outubro e novembro de 2008, resultando em inundações e deslizamentos de terra em várias cidades. Um dos municípios afetados foi Rio dos Cedros, onde ocorreram numerosos deslizamentos, especialmente na bacia do Rio Cunha. Um fluxo de detritos bloqueou temporariamente uma seção do rio. De acordo com Kobiyama *et al.* (2010), a precipitação acumulada na semana do evento foi de 256 mm, o que corresponde ao dobro da média de chuvas para novembro.

No Paraná, em março de 2011, um evento transformou profundamente a planície aluvial do rio Jacareí. Após um acumulado pluviométrico de 236,8 mm em 24h (superior ao esperado para a todo mês de março), diversos deslizamentos ocorreram no terço superior das vertentes da Serra da Prata (Silveira *et al.*, 2014; Zapata *et al.*, 2016). A Serra da Prata foi marcada por dezenas de cicatrizes. O material foi transportado pelos vales na

forma de fluxos de detritos e lama até adentrar a planície aluvial do rio Jacareí, onde foram represados pelo aterro da rodovia BR 277 (Pinto *et al.*, 2014). A inundação generalizada na planície e o acúmulo de troncos resultaram no rompimento da ponte da BR 277 sobre o rio Jacareí.

Em janeiro de 2017, uma precipitação intensa desencadeou uma série de movimentos de massa na bacia do Rio Mascarada, que abrange as cidades de Rolante, São Francisco de Paula e Riozinho (RS). Vários fluxos de detritos ocorreram na área, com relatos não oficiais indicando precipitações diárias de até 272 mm. Houve uma suspeita de que esses fluxos poderiam ter formado temporariamente uma barragem no rio Mascarada, que, ao se romper, causou uma súbita inundação em Rolante (Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável-SEMA/GPDEN, 2017).

Várias catástrofes naturais ocorreram na bacia do Rio Mampituba, sul do Brasil, como consequência da passagem de dois ciclones em julho de 2020. O primeiro foi um ciclone bomba que causou ventos tempestuosos, danificando telhados e derrubando inúmeras árvores. O segundo foi um ciclone extratropical que trouxe precipitação extrema, desencadeando ventos tempestuosos, fluxos de detritos, enchentes de detritos, fluxos de detritos com material lenhoso e inundações. Os municípios mais afetados foram Praia Grande (SC) e Mampituba (RS), onde os danos estavam mais relacionados a ventos tempestuosos, enchentes e enchentes de detritos (Paixão *et al.*, 2021b).

Entre os dias 16 e 17 de dezembro de 2020, a população dos municípios catarinenses de Rio do Sul, Ibirama e Presidente Getúlio, na região do Alto Vale do Itajaí, foi surpreendida por um evento de precipitação extrema (183 a 242 mm/24h). O evento resultou na deflagração de diversos movimentos de massa (escorregamentos translacionais que evoluíram para fluxos de detritos e lama) e posteriormente inundações bruscas (enxurradas). Dentre os impactos do evento, constam 21 óbitos e a destruição de pelo menos 80 residências, deixando 100 pessoas desalojadas e 172 desabrigados, além de danos em infraestrutura pública (Michel *et al.*, 2021).

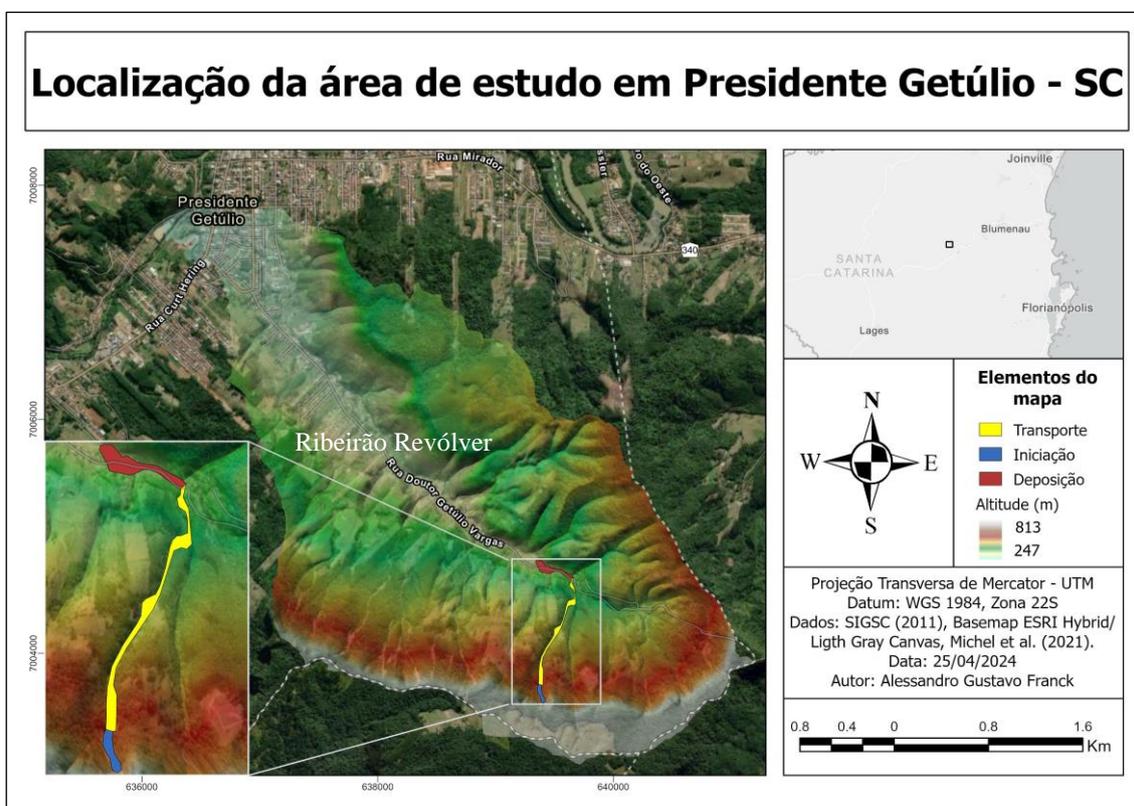
### 3. ÁREAS DE ESTUDO

O presente estudo foi conduzido em 2 áreas distintas, uma no Rio Grande do Sul e outra em Santa Catarina. Essa escolha visa tentar avaliar se o comportamento de um determinado parâmetro na análise de sensibilidade independe da área de aplicação. Outro objetivo foi contribuir para aumentar o número de estudos de caso que utilizam esse modelo no Brasil, para que eventualmente se chegue a uma conclusão da aplicabilidade desse modelo no país.

#### 3.1 Desastre do alto vale do Itajaí (SC) em dezembro de 2020

Entre os dias 16 e 17 de dezembro de 2020, a população dos municípios catarinenses de Rio do Sul, Ibirama e Presidente Getúlio, localizados na região do Alto Vale do Itajaí, enfrentou um evento de precipitação extrema. Esse evento resultou na ocorrência de vários movimentos de massa e enxurradas. Os impactos desse evento incluíram 21 óbitos, a destruição de pelo menos 80 residências, deixando 100 pessoas desalojadas e 172 desabrigados, além dos danos causados à infraestrutura pública (Michel *et al.*, 2021). Dentre os locais afetados, o bairro Ribeirão Revólver (Figura 13) em Presidente Getúlio foi uma das áreas mais atingidas.

Figura 13: Localização da área de estudo 1 em Presidente Getúlio – SC e do fluxo de detritos que ocorreu no bairro Ribeirão Revólver que foi utilizado nesse estudo.



Fonte: Autor

Nos dias anteriores ao evento, grandes volumes de precipitações já vinham sendo observados, principalmente na semana anterior, o que fez com que o solo permanecesse por muito tempo em uma condição de alta umidade. Os primeiros movimentos de massa ocorreram entre os dias 14 e 15, bloqueando a via na Serra do Tucano em Presidente Getúlio (SC) e em estradas vicinais de Ibirama (Michel *et al.*, 2021). Nos dias 16 e 17 uma série de escorregamentos e fluxos de detritos (Figura 14) foram deflagrados por toda região, resultando em perdas humanas e danos significativos.

Figura 14: Fluxos de detritos registrados após o desastre de 2020 na região do Alto Itajaí em Santa Catarina.



Fonte: Registros de campo GPDEN.

Os registros de precipitação nas 96 horas que antecederam o evento foram: 187 mm (Rio do Sul), 242 mm (Presidente Getúlio) e 183 mm (Ibirama) (Michel *et al.*, 2021). Em termos de valores mensais acumulados, os números atingiram 335 mm, 368 mm e 278 mm para Rio do Sul, Presidente Getúlio e Ibirama, respectivamente. Em Ibirama, vale destacar que o pluviômetro ficou inoperante nos últimos dias de dezembro, período em que ocorreram precipitações na cidade, o que pode ter causado uma subnotificação desse valor total.

Estes municípios estão localizados na mesorregião do Vale do Itajaí e têm como divisa comum uma área montanhosa, denominada de Serra do Mirador. Nesse local predominam estruturas compostas por rochas sedimentares como folhelhos, arenitos, siltitos e ritmitos. Segundo Michel *et al.*, (2021) foi possível identificar uma interface entre arenitos e folhelhos na geologia local com estratificação praticamente horizontal. Por apresentarem características de infiltração bastante discrepantes, essa interface entre esses dois tipos de rocha pode ter incentivado um fluxo subsuperficial, com erosão diferencial entre esses contatos, o que pode acelerar a ocorrência dos processos de escorregamento. O solo da região é composto por Argissolos e Cambissolos.

Quanto à geomorfologia, as Serras do Leste Catarinense caracterizam-se por um conjunto de serras cristalinas subparalelas com cotas altimétricas que variam entre 100 e 1200 metros, diminuindo em direção ao litoral (Santa Catarina, 2016). Altitudes maiores ocorrem a oeste deste compartimento, junto aos Patamares do Alto Rio Itajaí, local de interesse para este estudo. A formação dos Patamares do Alto Rio Itajaí se configura por extensos patamares e mesas limitadas por escarpas, com grande amplitude altimétrica (Santa Catarina, 2016).

Esta formação de relevo é constituída por rochas sedimentares e apresenta forte dissecação pelos rios com vales profundos, com desníveis que podem chegar a 500 m. Mesmo com a predominância de vales muito encaixados, são comuns as planícies de vales abertos onde há o estabelecimento de cidades, tais como Rio do Sul, Ibirama e Presidente Getúlio.

Ainda com relação ao relevo, o local impactado pelo evento de 2020 apresenta grande variação de declividade, com valores de 0° até 90°. Michel *et al.*, (2021) realizou uma classificação do relevo da região segundo a metodologia proposta por EMBRAPA (1979), onde ficou comprovado a predominância de relevo ondulado a fortemente ondulado, com ocorrência de regiões montanhosas a fortemente montanhosas.

A bacia do Itajaí-Açu apresenta, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, um clima (Cfa) Subtropical (mesotérmico úmido, com verão quente), com temperatura média oscilando a partir da foz em direção às encostas de 21 °C e 18 °C (Fraga, 2003). A região afetada está compreendida em uma área com predominância de floresta ombrófila densa, formada por remanescentes da Mata Atlântica (Michel *et al.*, 2021).

Na bacia do Itajaí-Açu as precipitações são bem distribuídas, com uma maior concentração de precipitação nos meses de verão: dezembro, janeiro, fevereiro e março (Nery *et al.*, 2000). O valor de precipitação média anual para a região varia de 1500 a

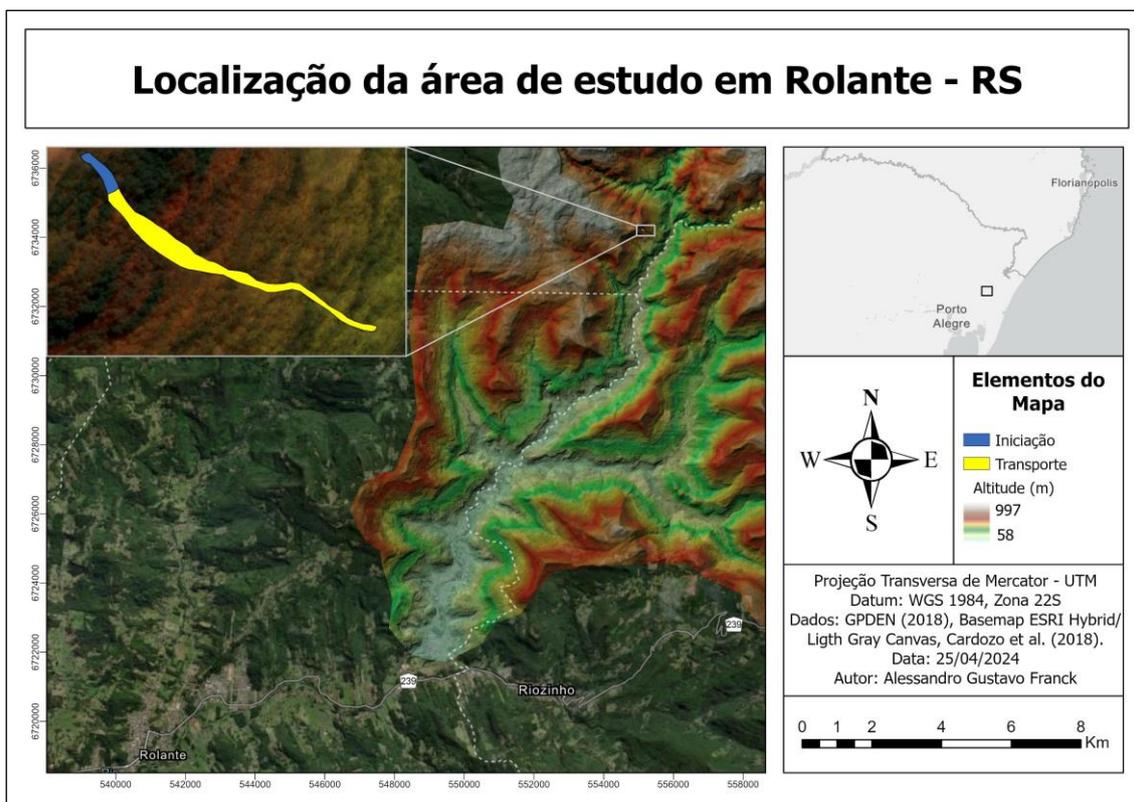
1600 mm. A elevada pluviosidade, aliada as encostas declivosas da região, favorece a fluidificação de movimentos de massa e, assim, a ocorrência de fluxos de detritos.

O fluxo de detritos selecionado para avaliação do Morpho2DH ocorreu em Presidente Getúlio, no bairro Ribeirão Revólver (Figura 13). Esse fluxo é um dos muitos que foram registrados no bairro, e que ao atingirem a parte baixa do vale, formaram uma inundação de detritos responsável por 9 óbitos.

### 3.2 Rolante (RS) e o desastre de janeiro de 2017 na bacia do rio Mascarada

O rio Mascarada nasce no município de São Francisco de Paula e sua bacia hidrográfica, com área de 318,20 km<sup>2</sup>, engloba parte dos municípios de Riozinho e Rolante, localizados no nordeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 16). O rio Mascarada é um afluente do rio Rolante, que por sua vez deságua no rio dos Sinos.

Figura 15: Localização da área de estudo 2 em Rolante – RS e do fluxo de detritos que ocorreu a montante na bacia do Rio Mascarada que foi utilizado nesse estudo.



Fonte: Autor.

Esse local fica sobre a Bacia Sedimentar do Paraná. Nas regiões mais baixas, se encontram os arenitos da Formação Botucatu, seguidos pela Formação Serra Geral.

Dentro da Formação Serra Geral, há os Fácies Gramado, compostos por rochas vulcânicas básicas (basaltos). Nas porções mais elevadas, encontramos os Fácies Caxias, que são caracterizados por rochas tipicamente ácidas, como riocacitos e riolitos (Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2007).

No que diz respeito aos tipos de solo, de acordo com a Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (2017), os tipos de solo predominantes na bacia são o Argissolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Litólico e Cambissolo Húmico.

A região de estudo apresenta uma variação altimétrica de 938 metros entre os pontos de maior e menor altitude e suas declividades variam de 0 a 85 graus, sendo que a maioria dos locais se situa na faixa dos 10 a 35 graus. A bacia pode ser classificada geomorfológicamente de acordo com as classes de declividade estabelecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) em 1979 como um relevo fortemente ondulado, com áreas escarpadas e regiões montanhosas.

Quanto ao clima, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a região possui o clima Cfa (clima subtropical úmido), com precipitação abundante e bem distribuída ao longo do ano, apresentando invernos e verões bem definidos (Wrege *et al.*, 2012). A temperatura média nessa região é de 20°C, conforme o Atlas Climático do Rio Grande do Sul (Matzenauer *et al.*, 2011), e a média anual de chuvas é de cerca de 1.600 mm.

A intensa chuva que desencadeou o evento em questão ocorreu na tarde do dia 5 de janeiro de 2017, entre as 14 horas e 18 horas. Os relatos de inundação começaram por volta das 19 horas na cidade de Rolante (RS). O pico da inundação, de grande magnitude, ocorreu por volta das 23 horas e começou a diminuir às 24 horas (SEMA/GPDEN, 2017). Houve suspeitas de que além da chuva extrema, algum outro fenômeno tenha contribuído para a ocorrência da inundação.

Alguns valores registrados chegaram a 272 mm de precipitação em pluviômetros rurais não oficiais (medições mais próximas dos locais de ocorrência) em um curto período (SEMA/GPDEN, 2017). Esses eventos resultaram em vários escorregamentos e fluxos ao longo da bacia, sendo contabilizadas mais de 400 cicatrizes (Cardozo *et al.*, 2018). A Figura 17 mostra algumas imagens dos fluxos de detritos registrados nesse evento.

Figura 16: Fluxos de detritos registrados após o evento de 2017 no Rio Grande do Sul



Fonte: SEMA/GPDEN, (2017).

O fluxo de detritos considerado como exemplo para aplicação do Morpho2DH está demonstrado na Figura 16. A maioria dos fluxos de detritos que ocorreram durante esse evento se conectaram com o canal de drenagem antes de depositar o material, desta forma é difícil estimar o alcance desses fluxos, uma vez que o material foi diluído e carregado pela água ao atingir a drenagem. Desta forma, optou-se pela escolha de um fluxo de detritos que não se conectou à rede drenagem, possibilitando assim a estimativa do seu alcance total. A Tabela 3 faz um compilado das informações de cada área de estudo.

Tabela 3: Resumo das características de cada área de estudo.

<b>Característica</b>	<b>Alto Vale do Itajaí (SC)</b>	<b>Bacia do rio Mascarada (RS)</b>
Precipitação durante o evento (mm)	242*	272
Precipitação média anual (mm)	1550	1600
Rocha base	Arenitos e folhelhos	Basalto
Solo	Argissolos e Cambissolos	Neossolos e Cambissolos
Clima	Cfa	Cfa
Variação de altitude no local do fluxo (m)	345	189
Distância percorrida (m)	1.665	439
Volume inicial do escorregamento (m <sup>3</sup> )**	4.570	180
Declividade média (m/m)***	0,21	0,43

\* Medida no município alvo do estudo (Presidente Getúlio);

\*\* Volume total (água+sólidos);

\*\*\* Declividade média considerando todo o percurso do fluxo.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

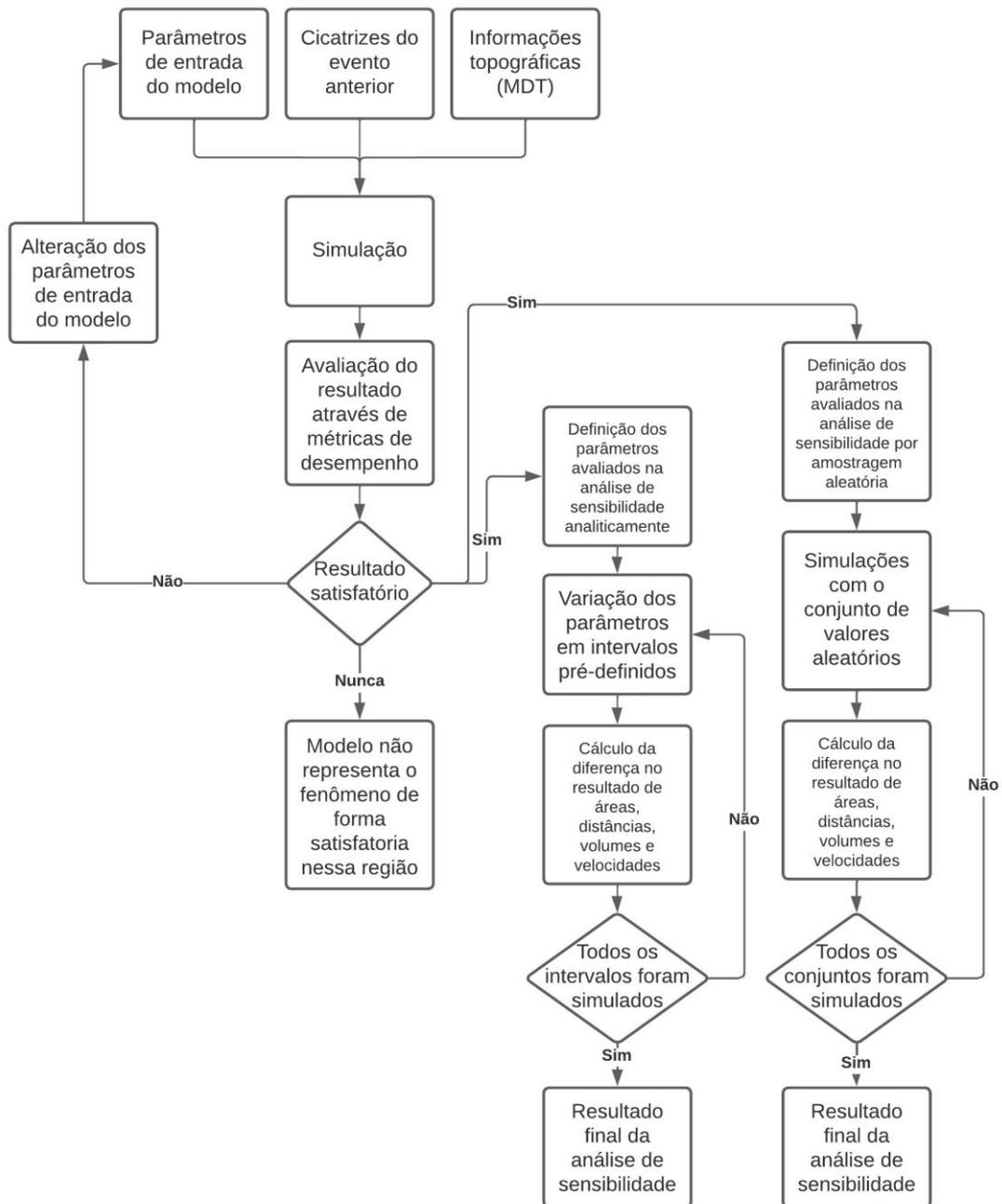
A metodologia deste estudo consistiu na utilização do modelo de fluxos de lama/detritos Morpho2DH (iRIC) para reconstruir dois eventos ocorridos na região sul do Brasil, onde posteriormente foi avaliada a sensibilidade dos parâmetros do modelo alterando-se os parâmetros de entrada. A primeira parte (calibração) utilizou uma metodologia similar à adotada por Paul (2020). A segunda parte (AS) foi dividida em duas etapas, na primeira (OAT) utilizou uma metodologia similar à adotada por Luna *et al.* (2012), já na segunda (AAT) adotou-se uma metodologia similar a utilizada por Zegers *et al.* (2020), alterando-se, no entanto, a forma de analisar os resultados.

Primeiramente, foi realizado um levantamento dos dados disponíveis para a realização do estudo; em seguida o modelo foi preparado e calibrado para cada evento; por fim, com os valores centrais dos parâmetros obtidos por meio da calibração, foi feita uma análise de sensibilidade OAT dos parâmetros de entrada, variando esses em intervalos predefinidos, mantendo seu significado físico (dentro de sua faixa de aplicação). Adicionalmente também foi conduzida uma análise AAT, buscando-se verificar se existem possíveis interferências e influências entre os parâmetros menos sensíveis. A Figura 19 apresenta um fluxograma resumindo a metodologia do trabalho. A partir desse capítulo os eventos simulados terão a seguinte nomenclatura:

- **Evento 1:** O fluxo de detritos que ocorreu em Presidente Getúlio (SC), no bairro Ribeirão Revólver, no ano de 2020.

- **Evento 2:** O fluxo de detritos que ocorreu na bacia do rio Mascarada (RS), em 2017.

Figura 17: Fluxograma da metodologia utilizada no presente estudo.



Fonte: Autor.

## 4.1 Aquisição dos dados

Para implementar o modelo Morpho2DH, são necessários alguns dados e informações sobre o terreno onde o fluxo ocorreu. Essas informações podem ser retiradas de Modelos Digitais de Terreno (MDT). Os MDTs para cada região de estudo foram obtidos a partir de fontes diferentes, conforme descrito a seguir.

### Evento 1

O MDT utilizado possui resolução espacial de 1 m x 1 m por pixel, e foi obtido no portal SIGSC, onde se encontram diversas imagens para todo o território de Santa Catarina, oriundas de um Levantamento Aerofotogramétrico realizado pelo governo estadual, por meio da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDE). Esse levantamento conta com mais de 70 mil aerofotos, ortofotomosaicos coloridos e infravermelhos, modelos digitais altimétricos, restituição da hidrografia, bacias hidrográficas e infraestrutura hídrica (SIGSC, 2023). A cicatriz utilizada para calibrar esse fluxo de detritos, e a profundidade inicial dos escorregamentos (estimada em aproximadamente 1 metro), foram levantados por Michel *et al.* (2021). Essa foi separada em zona de iniciação (escorregamento), transporte e deposição.

Os registros fotográficos desse desastre, assim como outras informações pertinentes, foram fornecidas pelo Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais (GPDEN), do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS.

### Evento 2

O MDT para o Evento 2 também possui resolução espacial de 1 m x 1 m por pixel, no formato GeoTIFF, com projeção original WGS 84. O MDT foi elaborado pela empresa NTT DATA Corporation. A obtenção do modelo digital consiste na coleta de imagens de múltiplos satélites da DigitalGlobe. O MDT foi obtido pelo GPDEN através de auxílio financeiro da CAPES, por meio do projeto “Influência da floresta na dinâmica hidrossedimentológica de bacias montanhosas no sul do Brasil”.

A cicatriz utilizada corresponde a um fluxo de detritos ocorrido em 5 de janeiro de 2017. Essa cicatriz é proveniente de um mapeamento prévio realizado por Cardozo *et al.* (2018). A profundidade do solo no local do escorregamento foi estimada com base em um trabalho de campo, que indicou uma profundidade de ruptura próxima de 1 m (SEMA/GPDEN, 2017). Esse valor foi utilizado como profundidade inicial do escorregamento que originou o fluxo de detritos. A cicatriz foi separada em zona de iniciação (escorregamento), e transporte, não sendo possível identificar com precisão uma

zona de deposição tradicional (em leque). A hipótese é que esse fluxo tenha perdido bastante material para a vegetação no percurso, finalizando sua progressão antes de atingir a zona mais baixa do vale.

Além desses dados necessários para a simulação, registros fotográficos do evento foram fornecidos por SEMA/GPDEN (2017) para auxiliar na montagem do modelo e na interpretação e entendimento dos resultados.

## **4.2 Simulações com o Morpho2DH**

Para as simulações foi utilizado o Morpho2DH 2.0 na interface iRIC. O modelo possibilita uma série de informações de entrada em diversos formatos, fornecendo assim ao usuário diversas possibilidades na simulação. Dentre as possibilidades o modelo pode considerar efeito de obstáculos e vegetação, profundidade máxima de erosão e superfície do leito fixa discretizados pela área, entre outras.

Os obstáculos podem ser residências no caminho do fluxo ou até mesmo outras construções. A vegetação funciona como uma força resistiva a mais que deve ser vencida pelo fluxo, devendo ser fornecidas ao modelo informações sobre a densidade da vegetação (indivíduos por célula de cálculo) e altura (em metros) discretizadas em toda a área de cálculo. Outra informação que pode ser fornecida é a profundidade das raízes, dessa forma, caso a erosão causada pelo fluxo supere essa profundidade, o efeito de resistência dessa vegetação deixa de ser considerado, como se a vegetação tivesse sido arrancada pelo fluxo.

A profundidade máxima de erosão representa a profundidade da camada de material disponível para ser incorporada pelo fluxo durante sua progressão. E a superfície do leito fixa é utilizada para representar estruturas fixas mais elaboradas que simples obstáculos, como por exemplos barreiras SABO, para contenção do fluxo de detritos.

As informações mínimas de entrada necessárias para a simulação consistem em um MDT, o(s) polígono(s) da zona de iniciação do movimento de massa, e os parâmetros de entrada do modelo, que constam em maiores detalhes na Tabela 4. Adicionalmente pode-se inserir outras informações como as discutidas anteriormente.

Os MDTs foram carregados no modelo no formato .tif, já os locais de iniciação do movimento de massa foram carregados em um formato de polígonos (.shp). Vale ressaltar que para o local de iniciação considerou-se apenas a zona de ruptura do escorregamento, que foi definida em função da área na cicatriz até onde se identifica a

existência de uma camada de solo significativa. Outra informação importante é que em ambas as regiões avaliadas, imediatamente abaixo da zona de ruptura o escorregamento atinge o talvegue (caminho de fluxo preferencial) onde a erosão é significativa em cada evento de chuva e, portanto, dificilmente se forma uma camada expressiva de solo. O que é comum nessas áreas é a existência uma camada de sedimentos grossos movimentados e depositados por eventos anteriores (Takahashi, 2014).

Tabela 4: Valores iniciais dos parâmetros utilizados nas simulações.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Concentração de sedimentos no fluxo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,40
Densidade da fase líquida (ton/m <sup>3</sup> )	1,20
Densidade do sedimento (ton/m <sup>3</sup> )	2,65
Concentração de sedimentos no leito móvel (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,60
Diâmetro de sedimentos com comportamento líquido (mm)	0,20
Profundidade mínima do fluxo (m)	0,01
Ângulo de atrito interno (°) *	34,0; 23,0
Coefficiente de resistência (-)	72,0
Diâmetro médio dos sedimentos (m) **	0,3
Densidade da vegetação (plantas/célula)	3,0
Altura da Vegetação (m)	10,0
Profundidade máxima de erosão (m)	0,3

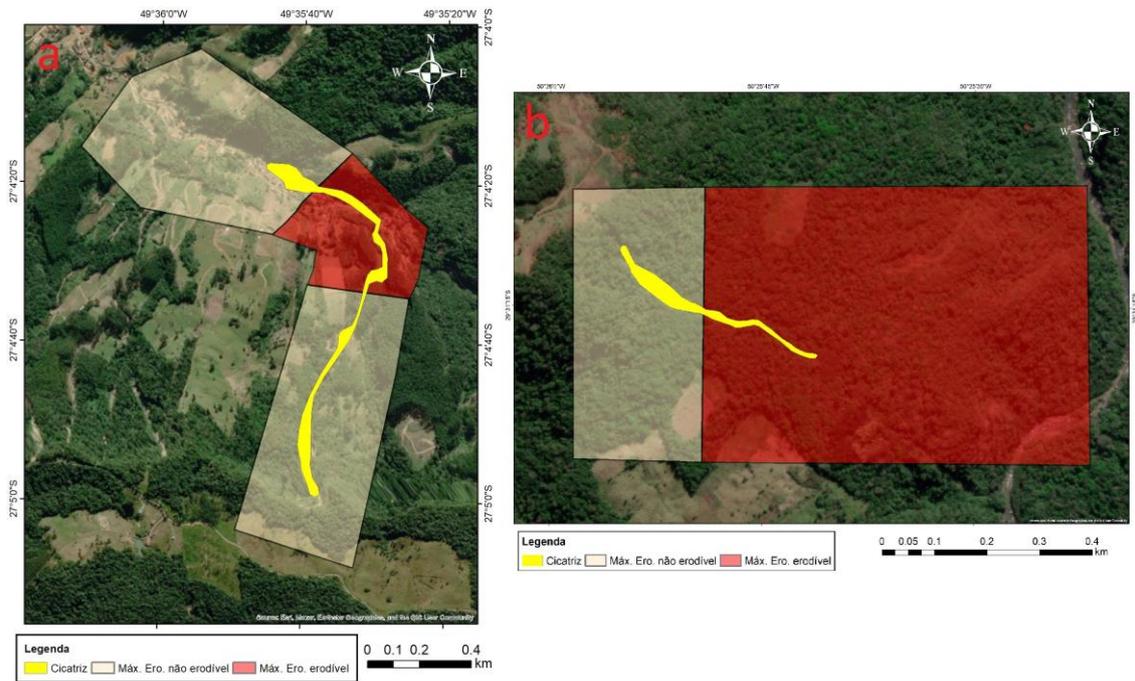
\* Valor medido em campo para as regiões de estudo através do equipamento Borehole Shear Tester. O valor de 34° é para o evento 1, já o valor de 23° corresponde a região do evento 2.

\*\* Valor inicial a ser calibrado, deduzido a partir de registros fotográficos dos eventos.

Esses valores correspondem a estimativa inicial, e foram variados (com exceção dos valores estimados para cada região) no processo de calibração. Sendo assim, o valor desses parâmetros que apresentou o melhor desempenho foi considerado como o valor central na análise de sensibilidade para cada região (Seção 5.1).

O parâmetro profundidade máxima de erosão pode ser discretizado em toda a região de estudo através de polígonos com diferentes valores. Visto que em ambas as áreas estudadas o fluxo percorre em determinados momentos por regiões sem leito disponível para erosão (regiões onde o fluxo é canalizado sobre a própria rocha), e em outros momentos por regiões onde existe material erodível, optou-se por discretizar essa informação em dois valores. Para as regiões sem leito erodível o valor será 0,0 e nas regiões onde existe esse valor foi um dos parâmetros calibrados (Figura 20).

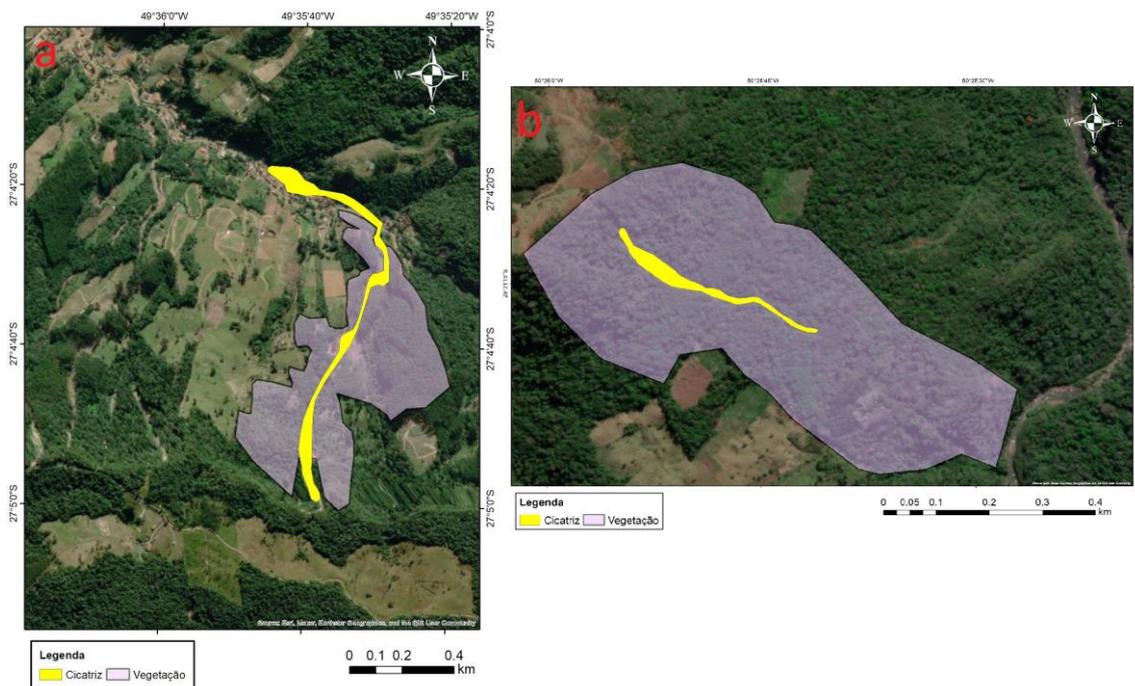
Figura 18: Localização das regiões de profundidade máxima de erosão no evento 1 (a) e 2 (b).



Fonte: Autor

Explorando a possibilidade do Morpho2DH de considerar certa influência da vegetação no fluxo de detritos, realizou-se a definição manual, pelas imagens de satélite, das áreas de vegetação de grande porte nos locais de estudo (Figura 21). Para a densidade e altura da vegetação adotou-se os valores de 3 plantas/célula (cada célula tem 4 m<sup>2</sup>) e 10 (metros) médio para o bioma Mata Atlântica (Tanus *et al.*, 2012; De Angelo, 2022).

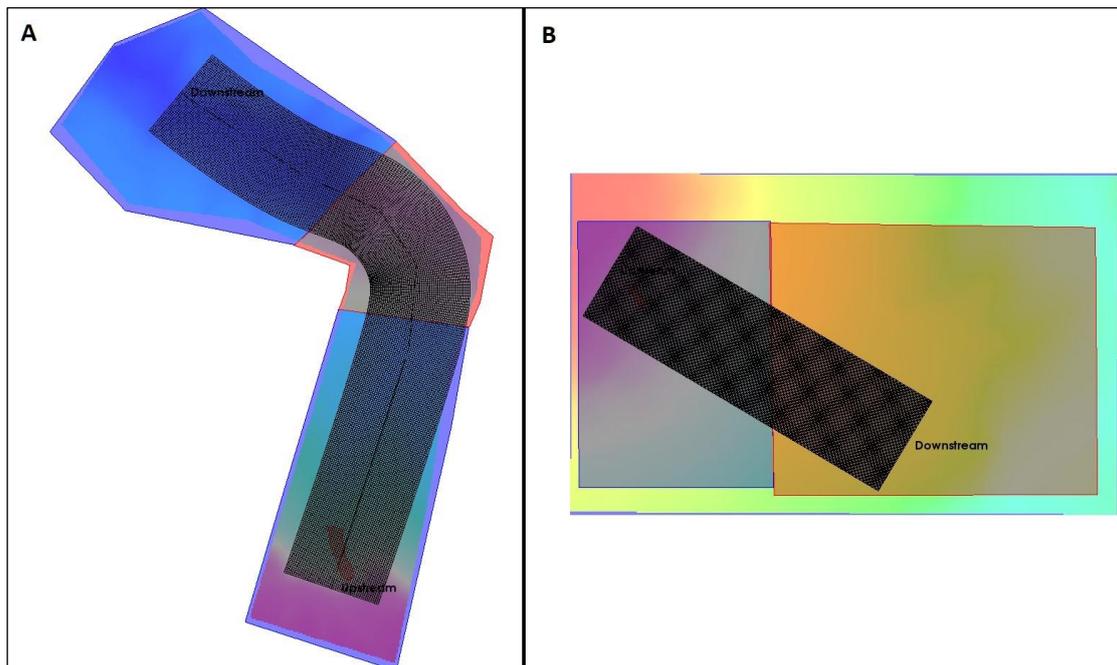
Figura 19: Área de vegetação de grande porte no domínio de simulação do evento 1 (a) e 2 (b).



Fonte: Autor.

A grade para a simulação em 2D foi fixada para as duas regiões em 2x2m (Figura 22). Já o intervalo de cálculo precisou ser ajustado para cada região, visando a estabilidade da simulação e ao mesmo tempo otimizar o tempo computacional. Assim utilizou-se o valor de 0,01 (s) para o evento 1 e 0,005 (s) para o evento 2. Esse valor foi mantido para todas as simulações em cada área durante a análise de sensibilidade. Já o tempo total da simulação foi de 800 segundos para o evento 1 e 250 segundos para o evento 2, sendo esses tempos suficientes para que o fluxo parasse por completo em todas as simulações.

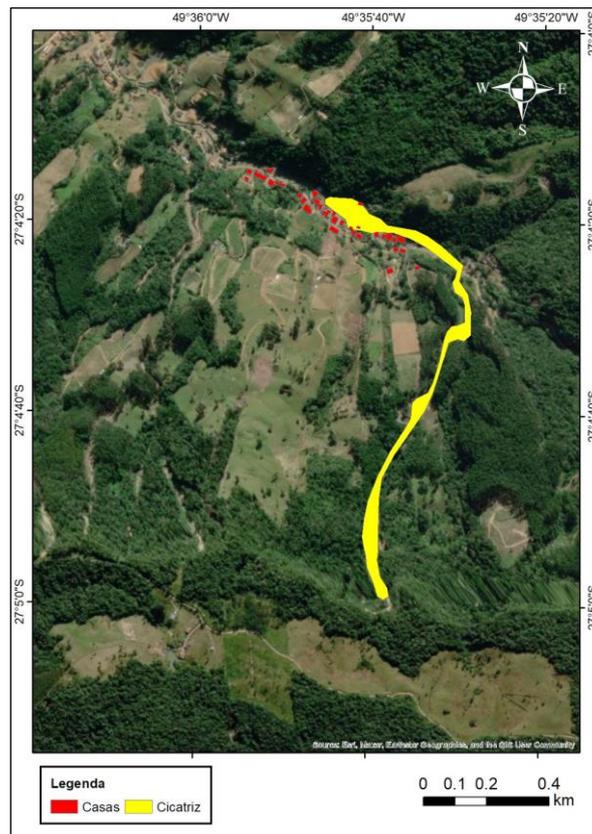
Figura 20: Grade de cálculo para o evento 1 (A) e evento 2 (B).



Fonte: Autor.

Por fim, como o evento 1 ocorreu em local residencial, realizou-se um levantamento adicional das casas dentro da área de cálculo, para que essas fossem configuradas como obstáculos (Figura 23).

Figura 21: Residências dentro da área de cálculo do evento 1.



Fonte: Autor.

### 4.3 Calibração das simulações

A calibração foi feita por meio da comparação dos resultados obtidos pelo modelo e das cicatrizes deixadas pelo evento. Ao simular um evento que já ocorreu, espera-se que o resultado apresentado pelo modelo seja o mais próximo possível do observado em campo. Para avaliar o nível da concordância entre o resultado simulado e o observado será utilizado um índice, calculado a partir de uma matriz de confusão.

Uma matriz de confusão (Tabela 5) é muito utilizada para avaliação de análises preditivas (Fawcett, 2006). No contexto desse estudo, para cada *pixel* dentro da matriz resultado será atribuído uma condição, que pode ser (i) Verdadeiro Positivo (*VP*); (ii) Falso Positivo (*FP*); (iii) Falso Negativo (*FN*); (iv) Verdadeiro Negativo (*VN*). Uma condição *VP* indica que esse *pixel* foi atingido pelo fluxo de detritos simulado pelo modelo e se encontra dentro da cicatriz observada do evento. A condição *FP* representa um *pixel* atingido pelo resultado, mas que se encontra fora da cicatriz. Já a condição *FN* representa um *pixel* que está dentro da cicatriz observada, mas que não foi atingido pelo fluxo simulado. Por fim, a condição *VN* representa um *pixel* que está fora da cicatriz observada e não foi atingido pelo resultado da simulação.

Tabela 5: Matriz de confusão base para os índices.

	Condição real (dentro da cicatriz)	Condição real (fora da cicatriz)
Condição simulada (dentro da cicatriz)	Verdadeiro Positivo ( <i>VP</i> )	Falso Positivo ( <i>FP</i> )
Condição simulada (fora da cicatriz)	Falso Negativo ( <i>FN</i> )	Verdadeiro Negativo ( <i>VN</i> )

É importante ressaltar que normalmente os valores absolutos de *VN* são muito grandes se comparados com a cicatriz, pois a área total da bacia normalmente é muito maior que a área da cicatriz observada. Desta forma, esse valor absoluto de *VN* não foi utilizado nas métricas, uma vez que esse valor alto de *VN* cria tendências nos índices, passando a falsa noção de boa qualidade na simulação. Para contornar tal problema, será utilizada a estratégia empregada por Mergili *et al.* (2015), onde o *VN* possui um valor fixo que representa 5 vezes a área da cicatriz.

Para determinar a eficiência do modelo na representação do evento será utilizado um índice com a formulação baseada no trabalho de Frattini *et al.* (2010). Esse índice é chamado de Escore de Heidke - *EH* (Heidke, 1926). Baseado no Kappa de Cohen (Cohen, 1960), esse mensura a fração de classificações corretas enquanto elimina as classificações corretas por aleatoriedade, esse índice é representado pela equação:

$$EH = \frac{VP+VN-E_a}{T-E_a} \quad (4.1)$$

onde *T* é o total de *pixels* analisados; e *E<sub>a</sub>* é a estimativa do acerto por aleatoriedade, que pode ser calculado através da equação:

$$E_a = \frac{1}{T} [(VP + FN) \cdot (VP + FP) + (VN + FN) \cdot (VN + FP)] \quad (4.2)$$

Uma simulação com correspondência perfeita possui um valor de *EH* igual a 1, um valor de 0 para nenhuma correspondência (similar a um acaso aleatório) e valores negativos para um desempenho pior que o aleatório (Naqvi *et al.*, 2023).

Os parâmetros de entrada do modelo (em especial a profundidade máxima do leito erodível e a profundidade inicial do escorregamento) foram variados dentro de sua faixa de aplicação (Tabela 6) para buscar a maior eficiência possível.

Tabela 6: Faixa de variação dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Referência</b>
Concentração inicial de sedimentos (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,20-0,80	Takahashi (1981)
Densidade da fase líquida (-)	1,0-1,2	Iverson (1997)
Densidade do sedimento (-)	1,3-3,5	HEC-RAS 2D (2023)
Concentração de sedimentos no leito móvel (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,5-0,8	Takebayashi (2019)
Ângulo de atrito interno (°)	25,0-45,0	Iverson (1997)
Diâmetro médio dos sedimentos (m)	10 <sup>-5</sup> -10,0	Iverson (1997)
Vegetação (plantas/célula)	0,0-7,0	-
Profundidade inicial do escorregamento (m)	0,7-1,0	-
Profundidade máxima do leito erodível (m)	0,01-0,3	-
Coefficiente de resistência (-) *	36,0-90,0	-
Profundidade mínima do fluxo (m)	0,01-0,02	-

\*A faixa de variação desse parâmetro é incerta, por esse motivo o autor do modelo recomenda utilizar o valor padrão (72), no entanto, para contemplar esse parâmetro na AS e avaliar sua influência no resultado foi considerada uma variação de no máximo 50% do valor padrão.

#### 4.4 Análise de sensibilidade

Para a análise de sensibilidade, como já apresentado na seção 2.6, existem os métodos OAT e AAT. Os métodos OAT são mais simples e visam compreender a contribuição individual de cada parâmetro para o resultado final. Já os métodos AAT são mais complexos, demandam análises mais robustas e buscam compreender as interações entre os diferentes parâmetros e sua influência global no resultado.

No presente estudo a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo foi primariamente OAT, utilizando gráficos em teia para apresentação e discussão dos resultados e com o objetivo de entender a influência de cada parâmetro individualmente no resultado da simulação. No entanto, também foi conduzida uma análise AAT com um grupo de parâmetros menos sensíveis para que seja avaliada uma possível influência entre parâmetros na baixa sensibilidade apresentada por esses.

Para fins de simplificação, aqui define-se **Variável** como uma saída do modelo representada por um escalar qualquer (volume, área, velocidade, etc.) e **Parâmetro** como uma grandeza física de entrada no modelo sujeita a análise de sensibilidade (diâmetro do sedimento, concentração do leito móvel, etc.). Também serão adotadas as seguintes abreviações para os parâmetros avaliados: Concentração inicial de Sedimentos (**CS**), Densidade da fase Líquida (**DL**), Densidade do Sedimento (**DS**), Concentração de sedimentos no Leito móvel (**CL**), ÂNGulo de atrito interno (**ANG**), Diâmetro Médio dos

sedimentos (**DM**), VEGetação (**VEG**), profundidade Máxima do leito Erodível (**EM**), Coeficiente de Resistência (**CR**), e Profundidade Mínima do fluxo (**PM**).

Primeiramente foi utilizada uma abordagem OAT, onde todos os parâmetros da simulação foram mantidos constantes, exceto o parâmetro escolhido para a sensibilidade. Os valores dos parâmetros para cada simulação (Tabela 7) foram adotados de maneira analítica (escolha do usuário). Após cada simulação os escalares escolhidos foram analisados para verificar o comportamento do modelo e para avaliar a coerência dos resultados. O valor central de cada parâmetro (mantidos constantes enquanto o parâmetro avaliado varia) foi definido através da calibração do modelo, conforme apresentado na seção 4.3, e as faixas de variação de cada parâmetro (Tabela 5) foram respeitadas de acordo com as referências da bibliografia.

Tabela 7: Parâmetros e valores analisados na AS.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores</b>
<b>Concentração de sedimentos - CS (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	0,2; 0,4; 0,6; 0,8
<b>Densidade da fase líquida - DL (-)</b>	1,0; 1,1; 1,2
<b>Densidade da partícula sólida - DS (-)</b>	1,5; 2,0; 2,65; 3,5
<b>Concentração do leito móvel - CL (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	0,5; 0,6; 0,7; 0,8
<b>Ângulo de atrito interno - ANG (°)</b>	23; 30; 34; 40
<b>Diâmetro médio - DM (m)</b>	0,005; 0,01; 0,05; 0,1; 0,2
<b>Vegetação - VEG (plantas/célula)</b>	0; 3; 4,5; 6
<b>Profundidade mínima - PM (m)</b>	0,01; 0,1; 0,15; 0,2
<b>Coeficiente de resistência - CR (-)</b>	36; 54; 72; 90
<b>Profundidade máxima erodível - EM (m)</b>	0,01; 0,015; 0,02

\* Sendo 23° o valor central para o evento 2, e 34° o valor central para o evento 1.

Vale ressaltar que para todos os parâmetros utilizou-se um limiar máximo de 100% de variação para mais ou para menos do valor central, visando não dispersar muito o resultado da análise por gráficos de teia.

Na segunda etapa, buscando avaliar uma possível interferência ou influência entre parâmetros, foi conduzida uma análise com uma abordagem AAT, onde foi utilizado uma ferramenta do *software* Excel para gerar 10 conjuntos de valores aleatórios (Tabela 8) dos parâmetros CS, DL, DS, CL, ANG. Optou-se por conduzir essa análise apenas com esses parâmetros, pois normalmente são os mais comuns de serem variados durante o processo de calibração do modelo.

Tabela 8: Conjuntos de parâmetros utilizados na AS pela abordagem AAT.

Parâmetros	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
CS	0,48	0,21	0,63	0,24	0,46	0,36	0,26	0,50	0,62	0,38
DL	1,13	1,01	1,08	1,12	1,08	1,18	1,01	1,08	1,02	1,01
DS	3,24	3,44	2,82	1,79	1,56	2,20	2,99	2,45	1,71	1,81
CL	0,51	0,55	0,75	0,54	0,63	0,68	0,78	0,73	0,78	0,62
ANG	30,4	39,5	31,8	32,4	35,2	29,3	29,0	36,5	25,2	28,6

O modelo permite também que o usuário informe um valor fixo para a proporção entre a camada laminar e a camada turbulenta no fluxo (veja seção 2.4.2), ou deixe que o próprio modelo calcule essa proporção em cada passo de tempo. O valor desse parâmetro varia de 0 até 1 (com 0 representando um fluxo totalmente turbulento e 1 um fluxo totalmente laminar). Para que não houvesse instabilidades nas simulações devido ao mau dimensionamento desse valor, optou-se por deixar que o modelo calculasse automaticamente.

Neste estudo, foram avaliados os efeitos dos parâmetros do modelo para seis variáveis (Figura 24): velocidade média do escoamento  $V_{média}$  (m/s), altura máxima de escoamento  $H_{máxima}$  (m), altura média  $H_{média}$  (m), área máxima atingida descontando a área de iniciação  $A_{max}$  (m<sup>2</sup>), volume depositado  $Vol_{dep}$  (m<sup>3</sup>) e distância máxima percorrida  $D_{máx}$  (m). As variáveis  $H_{máxima}$  e  $D_{máx}$  foram medidas diretamente nas saídas do modelo. Já as demais variáveis foram calculadas com as seguintes equações:

$$V_{média} = \frac{V1+V2+V3+V4}{4} \quad (4.3)$$

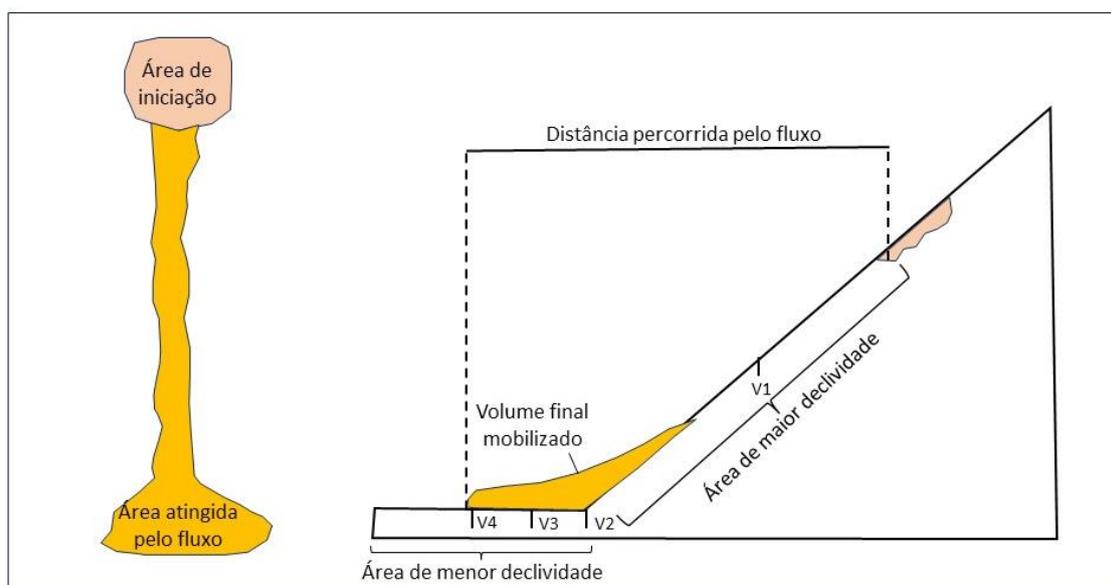
$$H_{média} = \sum_{j=0}^{Nca} H_{máxima}(j)/Nca \quad (4.4)$$

$$A_{máx} = \sum_{j=0}^{Nca} dx \cdot dy \quad (4.5)$$

$$Vol_{dep} = \sum_{j=0}^{Nca} H_{ch}(j) \cdot dx \cdot dy \quad (4.6)$$

onde  $V1$ ,  $V2$ ,  $V3$  e  $V4$  são as velocidades instantâneas nos pontos de controle 1, 2, 3 e 4;  $Nca$  é o número de células afetadas pelo fluxo;  $j$  é uma célula qualquer do domínio;  $dx$  e  $dy$  indicam o comprimento da célula no eixo  $x$  e no eixo  $y$  (*grid*), respectivamente;  $H_{ch}$  é a altura de deposição.

Figura 22: Características do fluxo avaliadas na análise de sensibilidade.



Fonte: Autor.

Para realizar esses cálculos, primeiramente foi necessário carregar o resultado do modelo em um *software* SIG. Apesar da interface do iRIC apresentar alguma semelhança com as interfaces de *softwares* SIG, o mesmo não permite operações e análises na matriz do resultado, permitindo apenas que se modifique a visualização do resultado. Desta forma, foi necessário que o resultado do modelo seja exportado, escolhendo-se uma dentre as opções disponíveis. Optou-se por exportar o resultado no formato de arquivo separado por vírgulas (.csv). Também é permitido que o usuário selecione em qual tempo da simulação ele deseja exportar o resultado, sendo assim, para a realização desse estudo foram exportados os resultados correspondentes aos tempos em que o fluxo atinge o ponto V1, V2, V3, V4 e o resultado final.

Esses arquivos .csv foram carregados no *software* ArcGIS como pontos, sendo que cada ponto representa o resultado de uma célula de cálculo do modelo. Esses pontos foram então transformados em um arquivo matricial 2x2 m através de interpolação com a ferramenta IDW (que utiliza uma metodologia de interpolação do inverso da distância). Assim, com os resultados em formato matricial, é possível realizar as operações das equações (4.3) – (4.6).

Para avaliar a velocidade média estabeleceu-se 4 pontos de controle durante a propagação do fluxo (Figura 24), sendo eles: V1 – metade da distância do ponto de iniciação do fluxo até o ponto onde o fluxo atinge a zona de menor declividade; V2 – local onde o fluxo atinge a zona de menor declividade; V3 – metade da distância percorrida

pelo fluxo na zona de menor declividade; e V4 – velocidade registrada imediatamente antes do fluxo parar por completo (5 segundos antes).

O valor medido foi o correspondente ao pixel com a maior velocidade na frente do fluxo no momento em que este atinge o ponto de controle. Nas situações em que o fluxo parou antes de atingir os pontos de controle na zona de menor declividade (deposição) esses pontos foram ajustados, sempre mantendo a regra estipulada para os pontos V3 e V4. O impacto da variação de cada parâmetro foi avaliado por meio da diferença percentual nas variáveis avaliadas entre um resultado com o parâmetro modificado e o resultado central.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Calibração do modelo

#### 5.1.1 Presidente Getúlio (SC)

Com os dados necessários compilados e as faixas de variação máxima para os parâmetros, iniciou-se o processo de calibração do modelo para os dois eventos avaliados. Com exceção do valor de ANG, medido em campo, os demais parâmetros foram variados em busca do melhor ajuste.

Primeiramente, nas simulações iniciais do evento 1, percebeu-se que independente da variação dos parâmetros, a simulação estava com excesso de volume de entrada, pois o resultado do modelo sempre atingia regiões mais distantes do registrado pela cicatriz observada. Desta forma, a primeira etapa da calibração foi ajustar esse volume. O volume do fluxo propagado provém do volume inicial informado (escorregamento), e do volume incorporado durante a progressão do fluxo, ao erodir as áreas com uma camada de material disponível para incorporação (EM).

Sendo assim, esses dois parâmetros foram ajustados. Foram testadas as profundidades iniciais do escorregamento de 0,9; 0,8; e 0,7 (m). Já para o parâmetro EM foram testados os valores de 0,01; 0,1; 0,3; e 0,5 (m). Com exceção desses dois parâmetros, para os demais foram utilizados os valores apresentados na Tabela 4 (Seção 4.2). A Tabela 9 apresenta o valor de *EH* para cada combinação testada e a Figura 25 apresenta alguns dos resultados desse processo.

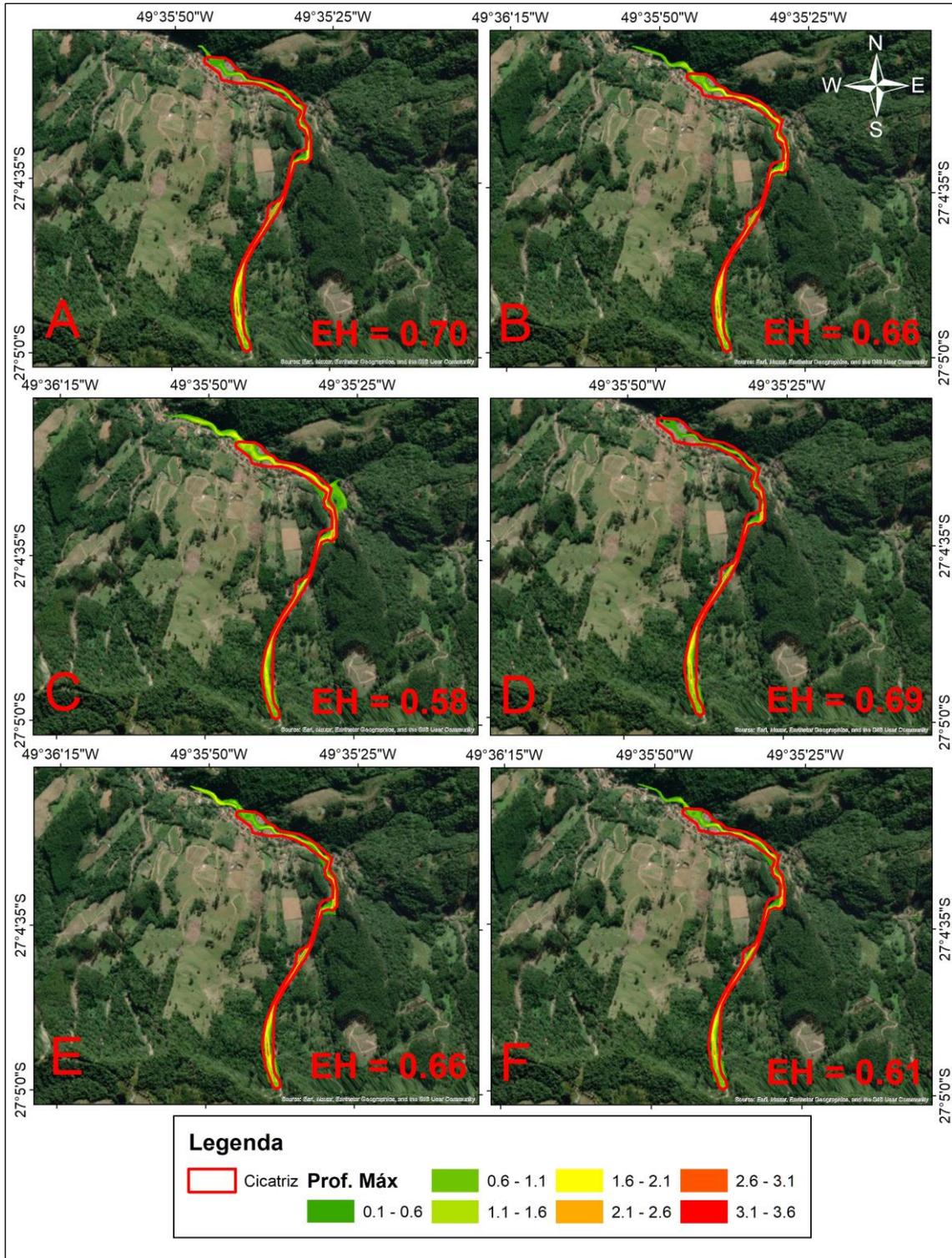
Tabela 9: Calibração do volume de entrada do fluxo para o evento 1.

Profundidade 0,9 m		Profundidade 0,8 m		Profundidade 0,7 m	
Valor de EM (m)	<i>EH</i>	Valor de EM (m)	<i>EH</i>	Valor de EM (m)	<i>EH</i>
0,01	0,69	0,01	0,69	0,01	0,64
0,1	0,66	<b>0,1</b>	<b>0,70</b>	0,1	0,65
0,3	0,61	0,3	0,67	0,3	0,66
0,5	0,58	0,5	0,61	0,5	0,62

Analisando o resultado de todas as combinações testadas temos que a combinação com a profundidade inicial do escorregamento de 0,8 m e a profundidade máxima de erosão de 10 cm é a melhor combinação para a representação do modelo para esse evento. De acordo com a simulação, o valor de erosão máxima nessa área é menor do que o esperado ao analisar fotos do evento registradas por Michel *et al.* (2021). Isso expõe uma possível limitação do modelo, proveniente de uma dependência/limitação nos dados de

entrada para a simulação, que é a espacialização da erosão máxima e a determinação correta do volume mobilizado.

Figura 23: Alguns resultados do processo de calibração do volume de entrada do fluxo para o evento 1: (A) Profundidade = 0,8 m e EM = 0,1 m; (B) Profundidade = 0,7 m e EM = 0,3 m; (C) Profundidade = 0,9 m e EM = 0,5 m; (D) Profundidade = 0,9 m e EM = 0,01 m; (E) Profundidade = 0,7 m e EM = 0,3 m; e (F) Profundidade = 0,8 m e EM = 0,5 m;



Fonte: Autor.

Na Figura 26, é possível perceber que em alguns locais a erosão teve profundidades significativas, no entanto, em outros locais canalizados na encosta pode ser que essa profundidade seja zero. Ao não ter esses dados levantados em campo para toda área afetada, pode ocorrer facilmente uma superestimativa ou subestimativa do volume mobilizado, principalmente em simulações com o Morpho2DH, cujo pressuposto (i) (veja seção 2.4.2) é que basta o fluxo ter velocidade suficiente para incorporar todo o material disponível, visto que todas as outras forças resistivas da erosão são negligenciadas.

Figura 24: Foto no local em que o evento 1 destruiu a estrada Doutor Getúlio Vargas que ligava a localidade ao centro urbano de Presidente Getúlio.



Fonte: GPDEN.

Outra possibilidade para a magnitude do evento demonstrado na figura anterior, é que essa erosão se potencializou após a passagem do fluxo com uma inundação brusca, ocasionada pelos altos volumes de água decorrentes da chuva contínua registrados no dia do evento. Essa seria então outra limitação ao aplicar esses modelos de previsão de fluxos de detritos, pois não é possível determinar qual a parcela da erosão causada pelo fluxo de detritos em si e qual parcela foi causada pela inundação brusca, dificultando a estimativa do volume mobilizado pelo fluxo de detritos.

Como o evento 1 ocorreu em escala de bacia (diversos fluxos se juntaram na parte baixa do vale), é difícil avaliar a dimensão do evento com apenas um dos fluxos isolados. No entanto, como o objetivo principal desse estudo é a análise da sensibilidade dos parâmetros de entrada do modelo, é mais adequado, tendo em vista a dimensão das análises e o custo computacional envolvido, que se utilize apenas um dos eventos de forma isolada, mesmo que isso não represente fielmente o que ocorreu durante o evento em 2020.

Na segunda etapa da calibração, com o volume propagado no fluxo ajustado, os demais parâmetros foram variados para buscar-se uma melhor correspondência na representação do evento 1. Dentre os parâmetros de entrada, o ANG não foi variado na calibração, pois é o único parâmetro com valores medidos *in situ*. O CR não foi variado, pois o autor do modelo recomenda a utilização do valor padrão (72), mesma situação do PM, ao qual se utilizou o valor padrão também (0,01 m). Para o parâmetro VEG optou-se por manter o valor de referência encontrado na literatura (3 plantas/célula). Os demais parâmetros foram variados dentro de sua faixa de aplicação buscando otimizar o valor do *EH*.

Para os parâmetros CS, DL, e DS não foi identificada variação significativa no *EH* (o valor variou apenas na quinta casa decimal), sendo assim, para esses parâmetros o valor central será o valor padrão do modelo. Já para os parâmetros CL e DM o valor de *EH* variou ligeiramente (Tabela 10).

Tabela 10: Calibração dos parâmetros DM e CL para o evento 1.

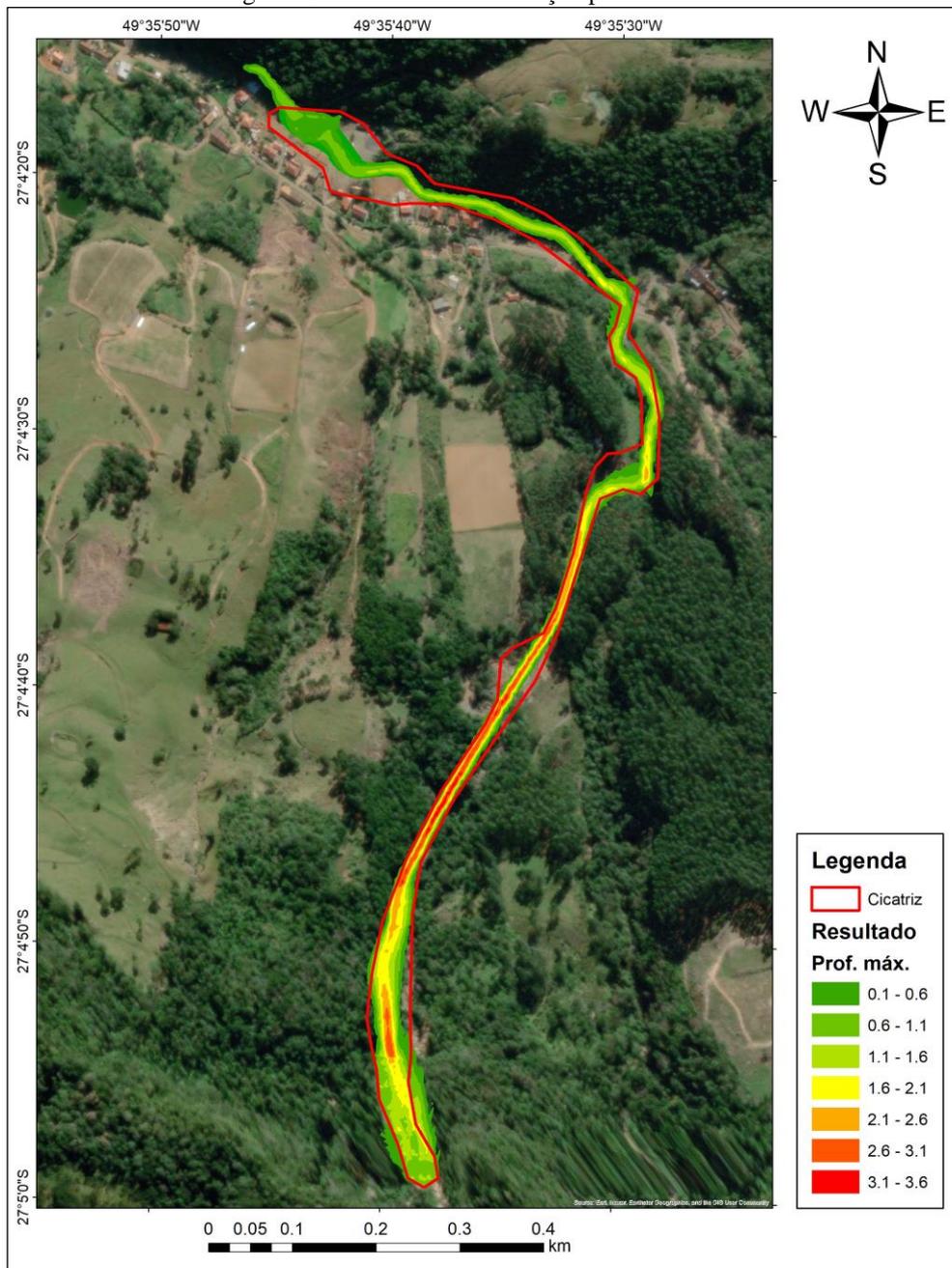
<b>DM = 0,05</b>		<b>DM = 0,1</b>		<b>DM = 0,2</b>		<b>DM = 0,3</b>	
CL	EH	CL	EH	CL	EH	CL	EH
0,5	0,691	0,5	0,704	0,5	0,702	0,5	0,698
0,6	0,699	<b>0,6</b>	<b>0,710</b>	0,6	0,703	0,6	0,701
0,7	0,693	0,7	0,705	0,7	0,703	0,7	0,698
0,8	0,689	0,8	0,699	0,8	0,698	0,8	0,692

Com base na Tabela 10, observa-se que a combinação desses dois parâmetros que resultou no melhor *EH* é com o DM de 0,1 m e o CL de 0,6 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, que resultou em um *EH* de 0,71, um valor que pode ser considerado satisfatório devido sua proximidade do valor ótimo de 1, sendo maior que os valores encontrados em outros estudos (Enenkel *et al.*, 2016; Paul *et al.*, 2020; Naqvi *et al.*, 2023). Desta forma, os valores centrais para o evento 1 foram definidos. A compilação dos valores centrais é apresentada na Tabela 11. A Figura 27 apresenta o resultado final da calibração no tempo de 800 segundos.

Tabela 11: Valores centrais dos parâmetros de entrada sujeitos a AS para o evento 1.

Parâmetro	Valor
Concentração de sedimentos - CS (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,40
Densidade da fase líquida - DL (-)	1,20
Densidade da partícula sólida - DS (-)	2,65
Concentração do leito móvel - CL (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,60
Profundidade mínima - PM (m)	0,01
Ângulo de atrito interno - ANG (°)	34,0
Coefficiente de resistência - CR (-)	72,0
Diâmetro médio - DM (m)	0,1
Vegetação - VEG (plantas/célula)	3,0
Profundidade máxima erodível - EM (m)	0,1

Figura 25: Resultado da calibração para o evento 1.



Fonte: Autor.

### 5.1.2 Rolante (RS)

A abordagem utilizada para a calibração do evento 2 foi a mesma do evento 1, pois novamente constatou-se nas primeiras simulações que o volume propagado era demasiado grande ao comparar o resultado obtido com a cicatriz do evento. Sendo assim, para o evento 2 foram testadas as profundidades iniciais do escorregamento (m) de 1,0; 0,9; 0,8; e 0,7 e os valores de EM (m) de 0,01; 0,05; 0,1; e 0,2. A Tabela 12 apresenta o valor de *EH* para cada combinação testada e a Figura 28 apresenta alguns dos resultados desse processo.

Tabela 12: Calibração do volume de entrada do fluxo para o evento 2.

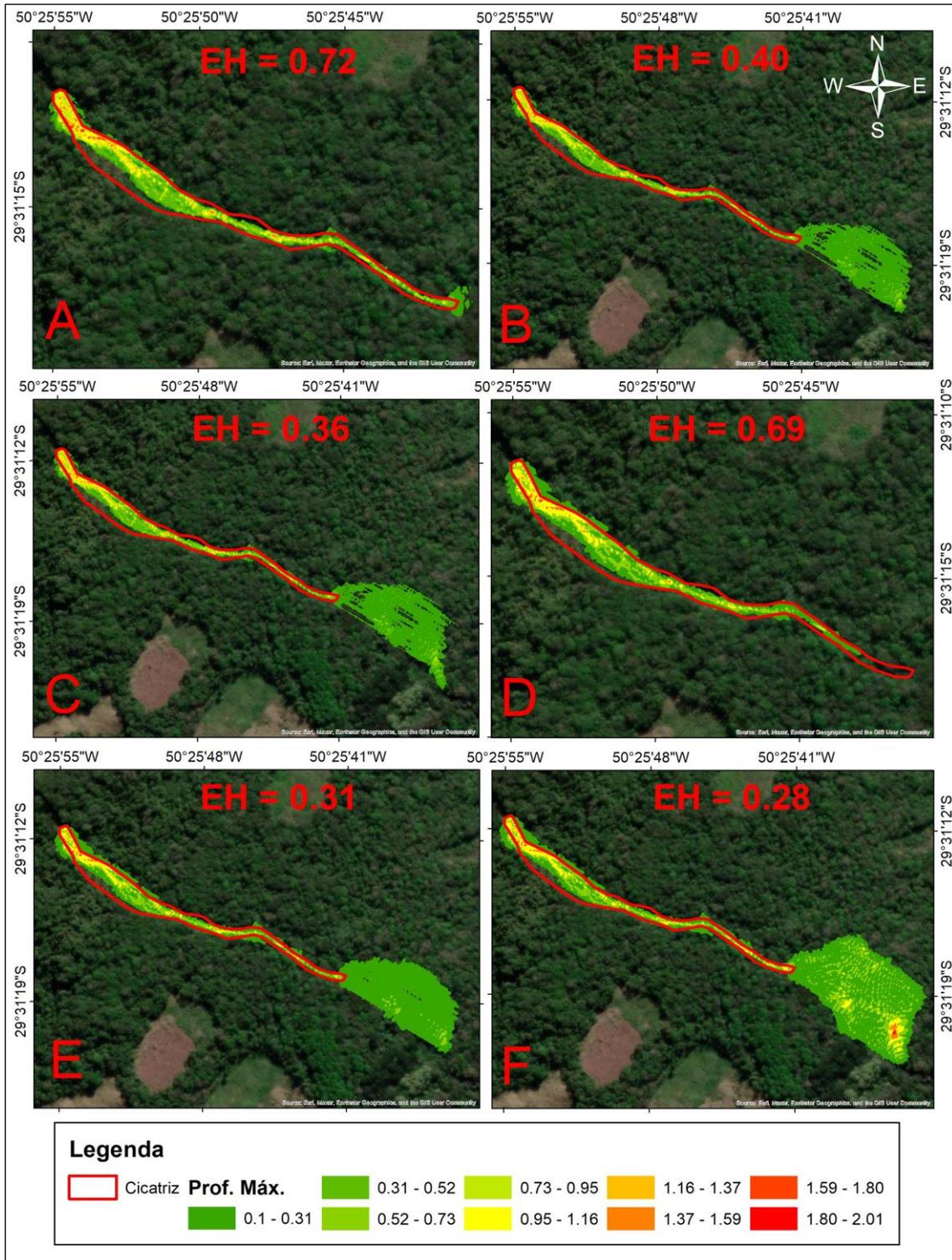
Profundidade 1,0 m		Profundidade 0,9 m		Profundidade 0,8 m		Profundidade 0,7 m	
Valor de EM (m)	EH	Valor de EM (m)	EH	Valor de EM (m)	EH	Valor de EM (m)	EH
0,01	0,42	0,01	0,51	<b>0,01</b>	<b>0,72</b>	0,01	0,69
0,05	0,33	0,05	0,36	0,05	0,4	0,05	0,51
0,1	0,29	0,1	0,31	0,1	0,34		
0,2	0,28	0,2	0,29	0,2	0,33		

Analisando os resultados apresentados (Tabela 12) é possível afirmar que a combinação com a profundidade inicial do escorregamento de 0,8 m e a profundidade máxima de erosão de 1 cm é a melhor combinação para a reprodução do evento 2.

Nota-se que o valor ideal de profundidade de erosão máxima para esse evento de acordo com o modelo é muito baixo, chegando próximo a zero (condição em que não haveria erosão, uma situação em que o fluxo se desloca direto sobre a rocha). Para que isso seja possível, nessa área, após o escorregamento, o fluxo deve ser canalizado em um local com altas taxas de erosão, onde após cada evento de chuva o material acumulado é carregado encosta abaixo, não havendo então material acumulado, no entanto, essa afirmação deve ser confrontada com informações de campo quando possível.

A ausência de material para ser incorporado durante a propagação do fluxo, e a presença de vegetação de grande porte dispersando o material propagado, podem ser fatores que favoreceram para que o fluxo tenha sido interrompido antes de chegar à rede de drenagem, contrariando a maioria dos outros que ocorreram durante esse evento de 2017 na bacia do rio Mascarada. A profundidade de 0,8 m é condizente com o observado para a região por SEMA/GPDEN (2017).

Figura 26: Alguns resultados do processo de calibração do volume de entrada do fluxo para o evento 2: (A) Profundidade = 0,8 m e EM = 0,01 m; (B) Profundidade = 0,8 m e EM = 0,05 m; (C) Profundidade = 0,9 m e EM = 0,05 m; (D) Profundidade = 0,7 m e EM = 0,01 m; (E) Profundidade = 0,9 m e EM = 0,1 m; (F) Profundidade = 1,0 m e EM = 0,2 m.



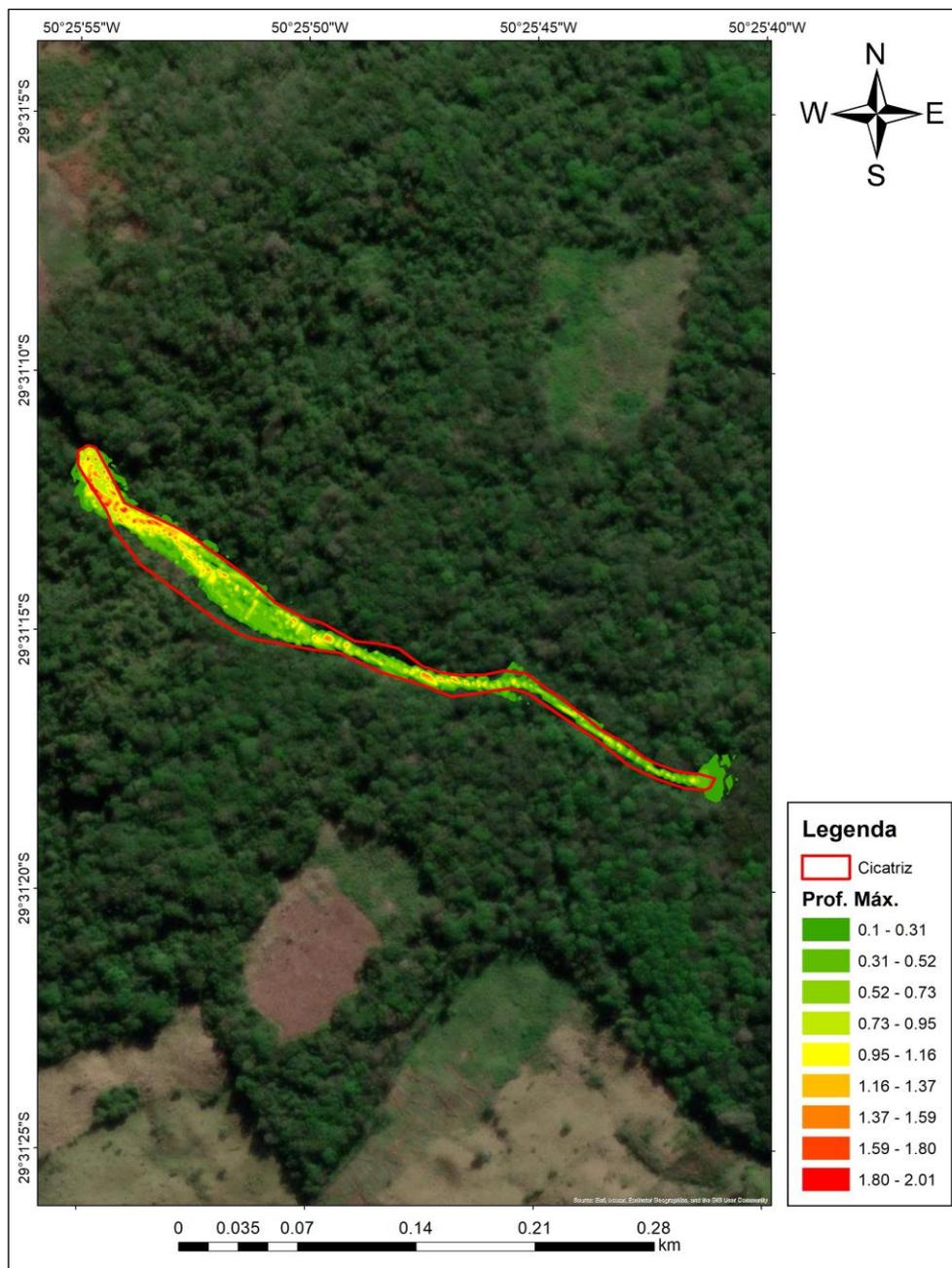
Fonte: Autor

Novamente na segunda etapa da calibração foram variados apenas os parâmetros CS, DL, DS, CL e DM. Pela segunda vez os parâmetros CS, DL e DS não apresentaram variações significativas no *EH*. Já para os parâmetros CL e DM que foram calibrados para

o evento anterior, no caso do evento 2, a variação de ambos não demonstrou uma melhoria significativa do resultado (com o *EH* variando apenas na terceira casa decimal para todas as combinações testadas).

Sendo assim, como a combinação  $CL = 0,6$  e  $DM = 0,1$  apresentou o mesmo valor de *EH* que a melhor combinação da calibração do volume (0,72), optou-se por adotar esses como valores centrais, para assim padronizar a análise desses dois parâmetros nas duas áreas estudadas. A Figura 29 apresenta o resultado final da calibração do evento 2 e a Tabela 13 apresenta a compilação dos valores centrais para o evento 2.

Figura 27: Resultado da calibração para o evento 2.



Fonte: Autor.

Tabela 13: Valores centrais dos parâmetros de entrada sujeitos a AS para o evento 2.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Concentração de sedimentos - CS (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	0,40
<b>Densidade da fase líquida - DL (-)</b>	1,20
<b>Densidade da partícula sólida - DS (-)</b>	2,65
<b>Concentração do leito móvel - CL (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	0,60
<b>Profundidade mínima - PM (m)</b>	0,01
<b>Ângulo de atrito interno - ANG (°)</b>	23,0
<b>Coefficiente de resistência - CR (-)</b>	72,0
<b>Diâmetro médio - DM (m)</b>	0,1
<b>Vegetação - VEG (plantas/célula)</b>	3,0
<b>Profundidade máxima erodível - EM (m)</b>	0,01

## 5.2 Análise de sensibilidade OAT

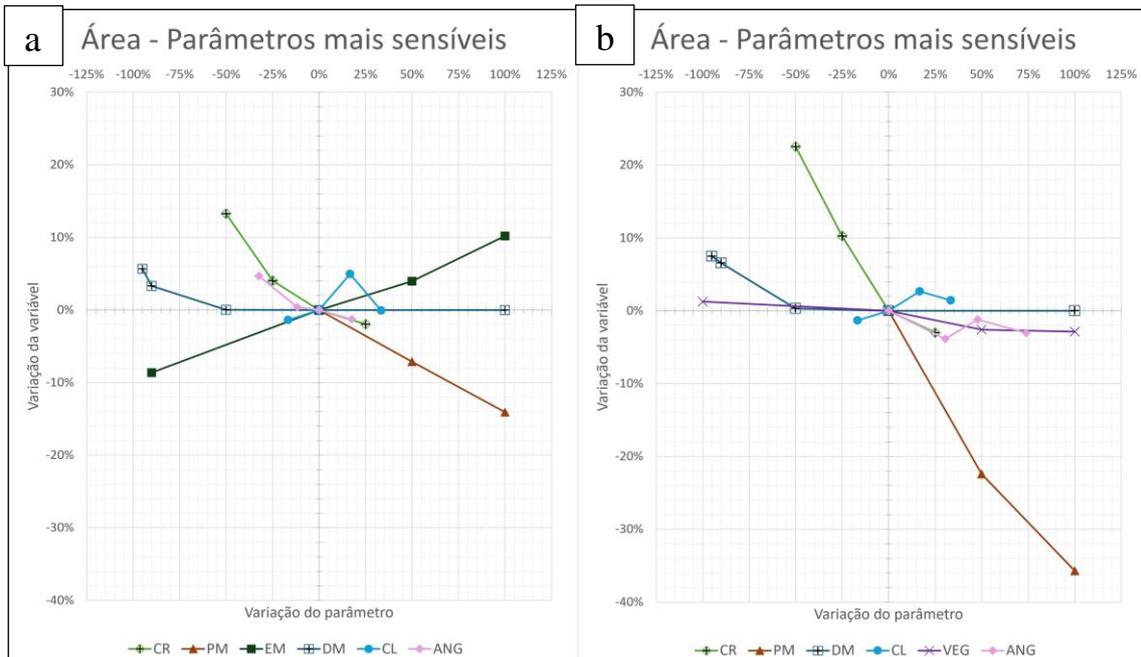
Uma AS com abordagem OAT foi conduzida em todos os intervalos pré-definidos para cada parâmetro de entrada (Tabela 7), utilizando para avaliação da sensibilidade as variáveis de saída área total atingida, distância final percorrida, velocidade média, altura média, altura máxima, e volume depositado. Para facilitar a análise e a visualização dos resultados, para todas as variáveis, os parâmetros foram separados nos gráficos de teia entre mais sensíveis e menos sensíveis. Todos os parâmetros que apresentaram uma variação no resultado menor que 2% foram considerados como menos sensíveis, e, assim, foram inseridos em outro gráfico.

Essa medida visa evitar um acúmulo de informações sobrepostas em um mesmo gráfico, dificultando assim a visualização da tendência de variação apresentada pelos parâmetros. Além da separação entre mais sensíveis e menos sensíveis, elaborou-se também um gráfico de teia para cada área de estudo e os eixos dos gráficos de cada área foram ajustados para que tivessem o mesmo intervalo, facilitando assim a comparação.

### 5.2.1 Área total atingida

A área total atingida em cada simulação foi determinada através da equação (4.5). Os resultados de cada simulação em valores mais precisos podem ser encontrados no Apêndice I. As Figuras 30 e 31 apresentam os resultados da AS para a variável área total.

Figura 28: Parâmetros mais sensíveis para a variável área total atingida: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CR é o coeficiente de resistência, PM é a profundidade mínima, EM é a profundidade máxima erodível, DM é o diâmetro médio, CL é a concentração do leito móvel, ANG é o ângulo de atrito interno e VEG é a vegetação.



Fonte: Autor.

Conforme a Figura 30, os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade a área total atingida em ambas as áreas foram os parâmetros EM, PM e CR. Vale ressaltar que para o Evento 2 (Figura 32b) o parâmetro EM apresentou uma variação maior que 100%, sendo então retirado do gráfico para não prejudicar a análise dos demais parâmetros (sendo esse o único caso em que isso ocorreu durante toda a AS). No entanto, durante a discussão desse parâmetro serão abordados os valores de variação apresentados por esse.

Iniciando a discussão pelo parâmetro EM, que foi o parâmetro mais sensível, esse representa a profundidade máxima do leito disponível para erosão e o valor central adotado foi de 0,1 metros. Esse parâmetro é responsável por aumentar o volume propagado pelo fluxo à medida que esse vai incorporando o material dessa camada durante seu deslocamento. De acordo com Iverson (1997), quanto maior o volume em um fluxo de detritos, normalmente, maior é a distância e a área que esse percorre. Então, é esperado que com mais material sendo propagado (aumento do parâmetro EM) a área atingida seja maior, tendência essa que foi comprovada neste estudo. No entanto, apesar da tendência ser a mesma para ambas as áreas, o incremento na variação é fortemente dependente da área avaliada.

Ao observar-se os dois eventos simulados, no evento 1 tem-se um fluxo com uma característica canalizada, onde o fluxo mantém um certo confinamento até encerrar o movimento. Já no evento 2 o fluxo mantém seu confinamento até atingir um patamar na metade da encosta, onde o canal se abre em uma zona de menor declividade (caindo abruptamente de 0,35 m/m, aproximadamente, para 0,11 m/m), nesse momento, o fluxo perde o confinamento e se espalha em formato de leque (Figura 28), o que ocasiona um aumento significativo na área atingida.

Desta forma, ao analisar-se a variação para os dois eventos, observa-se que no evento 1 a área variou aproximadamente 10% para mais (com o valor de 0,2 m) e aproximadamente 10% para menos (com o valor de 0,01 m), mantendo um comportamento bem uniforme em um local de fluxo canalizado. No evento 2, por outro lado, tem-se um cenário bem diferente, onde para o valor de 0,01 m a variação foi de apenas 3,5% para menos na área total, mas ao utilizar-se os valores de 0,15 m e 0,2 m, tem-se um aumento na área atingida respectivamente de 125% e 197%. Isso ocorre devido a essa perda de confinamento ocasionada pelo aumento de volume no evento 2. Assim, em suma, a tendência apresentada pela variação desse parâmetro na área atingida é de um aumento, no entanto esse aumento é fortemente dependente da área de aplicação.

O segundo parâmetro mais sensível foi o PM, esse representa a profundidade mínima que o fluxo deve ter para que seja considerado um fluxo e para que sua propagação continue, e o valor central desse parâmetro foi o valor padrão do modelo de 0,01 m. Analisando o significado desse parâmetro, nota-se que a tendência na sensibilidade é previsível. O parâmetro indica ao modelo que, para manter o fluxo em movimento, é necessária uma profundidade mínima específica. Ao aumentar esse valor mantendo o volume constante, a profundidade do fluxo permanece constante, mas a profundidade necessária para sustentar o movimento aumenta. Conforme o fluxo se espalha e perde material nas extremidades, onde a profundidade mínima é atingida, ele gradualmente perde volume e diminui a profundidade, levando a sua eventual deposição.

Então ao analisar-se o resultado para o parâmetro PM (Figura 30), observa-se que a tendência é que a área atingida diminua conforme o valor desse parâmetro aumenta, como esperado. Com relação à magnitude da variação, para o evento 1 a maior variação foi de aproximadamente 15% para o valor de 0,03 m, já para o evento 2, para o mesmo valor, essa variação foi de aproximadamente 35%. Essa variação maior ou menor para cada evento deve-se ao fato de que a magnitude dos 2 eventos é diferente, sendo o evento 1 maior que o evento 2, assim é esperado que as variações mais significativas em termos

de porcentagem ocorram no evento 2, pois a área total é menor então mesmo um valor menor de variação pode representar uma porcentagem mais significativa do todo.

Outro parâmetro entre os mais sensíveis é o CR, esse representa o coeficiente de resistência do fluxo e é o grande responsável pela dissipação de energia do mesmo (Takebayashi e Fujita, 2020). Segundo Takahashi (2014), ao dissipar energia o fluxo perde velocidade e inicia o processo de deposição. Portanto, é esperado que com um aumento desse valor a área total atingida seja menor, pois para que o fluxo se mantenha em movimento é necessária uma certa quantidade de energia. Então, com uma dissipação de energia maior é natural que o fluxo seja interrompido antes. O valor central desse parâmetro foi o valor de 72, que é o valor padrão do modelo, e cujo valor o autor do modelo não recomenda variar. Isso deve-se segundo a Takebayashi, (2019) ao fato desse parâmetro ter sido pouco investigado até o momento por experimentos físicos, necessitando assim de maiores investigações para determinar sua faixa de aplicação. No entanto, buscando compreender qual o papel desse parâmetro dentro de uma simulação com o Morpho2DH, decidiu-se por incluir o mesmo na AS conduzida nesse estudo.

Quanto à tendência apresentada por esse parâmetro observa-se pela Figura 30 que é condizente com seu significado físico, ou seja, quanto maior o valor desse parâmetro menor é a área atingida. Em termos de magnitude, nota-se que essa variação não é linear, e quanto maior o valor do parâmetro menor é a diferença na diminuição da área atingida. Isso indica que pode existir um limite para a diminuição na área atingida causada pelo aumento desse parâmetro.

O parâmetro DM, com o valor central de 0,1 m, representa o diâmetro médio das partículas sólidas propagadas pelo fluxo. De acordo com Takahashi (2014) e Iverson (1997), quanto maior o diâmetro médio das partículas no fluxo de detritos, maior é a chance de o fluxo de detritos depositar antes. Ao analisar-se o resultado apresentado pela Figura 30 observa-se que o aumento do valor desse parâmetro apresenta uma tendência de diminuir a área total atingida até um limite onde não há mais variação.

Ao analisar o pressuposto (ii) do modelo (seção 2.4.2), este afirma que quanto maior a partícula sólida, menor deve ser a camada turbulenta dentro do fluxo. Isso leva ao pressuposto (iii), que afirma que a formação de uma camada turbulenta maior, ou seja, com uma camada laminar ( $h_s$ ) menor, o ângulo de equilíbrio ( $\theta_e$ ) é menor (esse parâmetro é responsável por dizer ao modelo quando inicia a deposição, e, portanto, o fluxo percorre distâncias maiores).

Sendo assim, ao deixar que o modelo calcule automaticamente o valor da proporção entre camada laminar e turbulenta, e sendo esse valor dependente do DM (equação 2.14), é possível afirmar que essa tendência na área total atingida pela variação no DM se dá através dessa ligação entre DM -  $h_s$  -  $\theta_e$ . E o ponto onde não há mais variação representa que o valor de  $h_s$  atingiu um limite.

O parâmetro CL representa a concentração de material no leito estático, representando assim a concentração de material sólido no volume inicial (escorregamento) e a concentração de material na camada do leito máximo de erosão. Esse, dentre os parâmetros mais sensíveis, foi o único que não apresentou uma tendência bem definida de aumento ou diminuição na área atingida com sua variação.

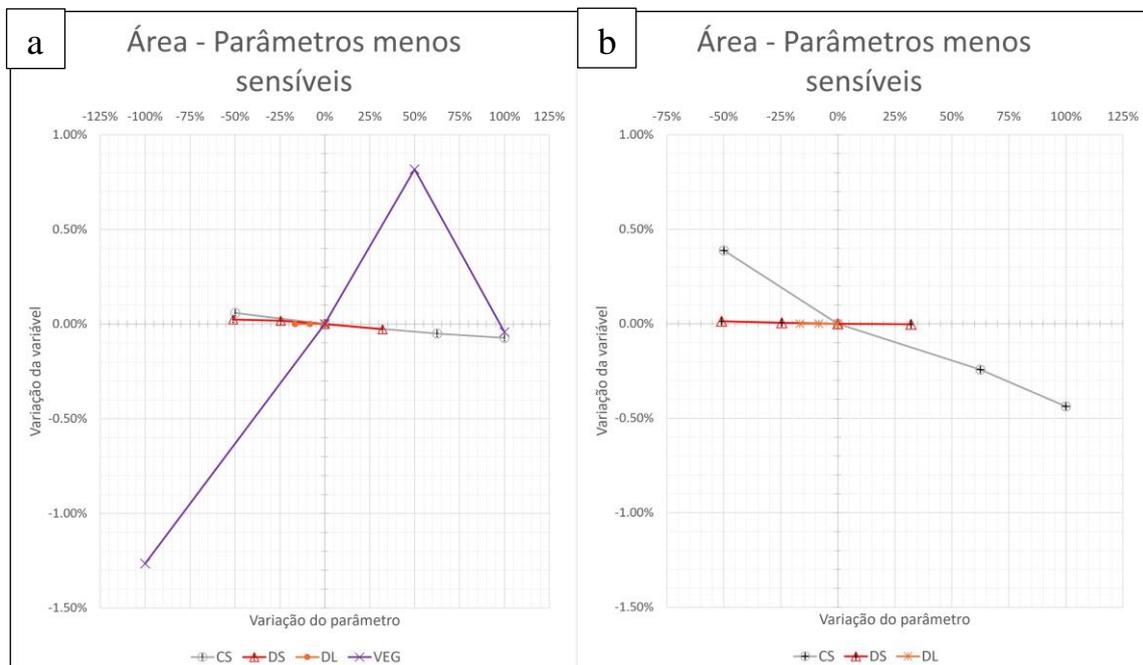
O resultado indica que para valores menores ( $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), a área atingida é menor e à medida que o valor aumenta a área vai aumentando até o valor de  $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , e no valor seguinte ( $0,8 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), a área atingida diminui. A hipótese para esse comportamento pode ser uma quantidade maior de material sólido sendo propagado até um certo limiar, onde a quantidade de partículas sólidas é tão grande que começa a dificultar a propagação do fluxo, fazendo com que esse perca energia mais rapidamente devido a pouca presença de líquido intersticial. No entanto, para que se tenha uma maior clareza do seu comportamento, recomenda-se uma investigação mais aprofundada desse parâmetro.

O parâmetro ANG, que representa o ângulo de atrito interno da mistura, se refere ao ângulo formado entre o plano de falha e a horizontal, quando um material granular está à beira de entrar em movimento devido à aplicação de uma força tangencial. Takahashi (2014) afirma que o ângulo de atrito interno da mistura pode ter influência significativa na propagação de um fluxo de detritos, onde um ângulo de atrito interno maior geralmente resulta em uma dissipação maior de energia, pois as partículas têm maior resistência ao deslizamento umas sobre as outras. Sendo assim, um valor menor desse parâmetro indicaria que o fluxo percorre maiores distâncias, pois a dissipação de energia durante o fluxo é menor.

Ao analisar-se a equação (2.13) nota-se que de fato esse parâmetro influencia no cálculo do ângulo de equilíbrio, sendo então uma influência direta na distância percorrida pelo fluxo. Observando-se o resultado (Figura 30) nota-se que a tendência de diminuição da área com o aumento do parâmetro se confirma na AS, tendo, no entanto, um ponto de anomalia para o evento 2, onde para o valor de  $30^\circ$  a área aumenta se comparada ao valor anterior de  $23^\circ$ , contrariando a tendência esperada. Essa anomalia pode indicar que esse parâmetro depende de fatores externos relativos à área de aplicação.

Para o parâmetro VEG (que representa a densidade da vegetação em plantas por célula), encontram-se duas situações distintas. No evento 1, esse parâmetro foi caracterizado como menos sensível para a área total atingida (variação menor que 2% no resultado) já para o evento 2 esse parâmetro apresentou maior influência no resultado, sendo classificado entre os mais sensíveis. No entanto, vale ressaltar que mesmo dentre os mais sensíveis a influência desse parâmetro na área atingida não foi representativa (2,8%), podendo-se afirmar que esse parâmetro individualmente não é muito influente para a área atingida.

Figura 29: Parâmetros menos sensíveis para a variável área total atingida: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CS é a concentração de sedimentos, DS é a densidade da partícula sólida e DL é a densidade da fase líquida.



Fonte: Autor.

Os parâmetros menos sensíveis para a variável área atingida são o CS, DS e DL. O DS e o DL que representam respectivamente a densidade das partículas sólidas e a densidade da fase líquida não apresentaram nenhuma sensibilidade. Esse resultado é inesperado, visto que a densidade influencia diretamente no movimento do fluxo já que partículas mais densas são mais pesadas e, portanto, precisam de mais energia para serem movimentadas (Iverson, 1997), e um líquido mais denso possui uma viscosidade maior e também precisa de mais energia para se movimentar (Takahashi, 2001).

Já o para o CS tem-se uma pequena variação (<0,5%). Esse parâmetro representa a concentração de sólidos no fluxo, dessa forma sua influência deveria ser maior, visto

que um fluxo com uma maior concentração de sólidos se movimenta de maneira diferente de um fluxo que é composto em sua maioria por líquido (Takahashi, 2014).

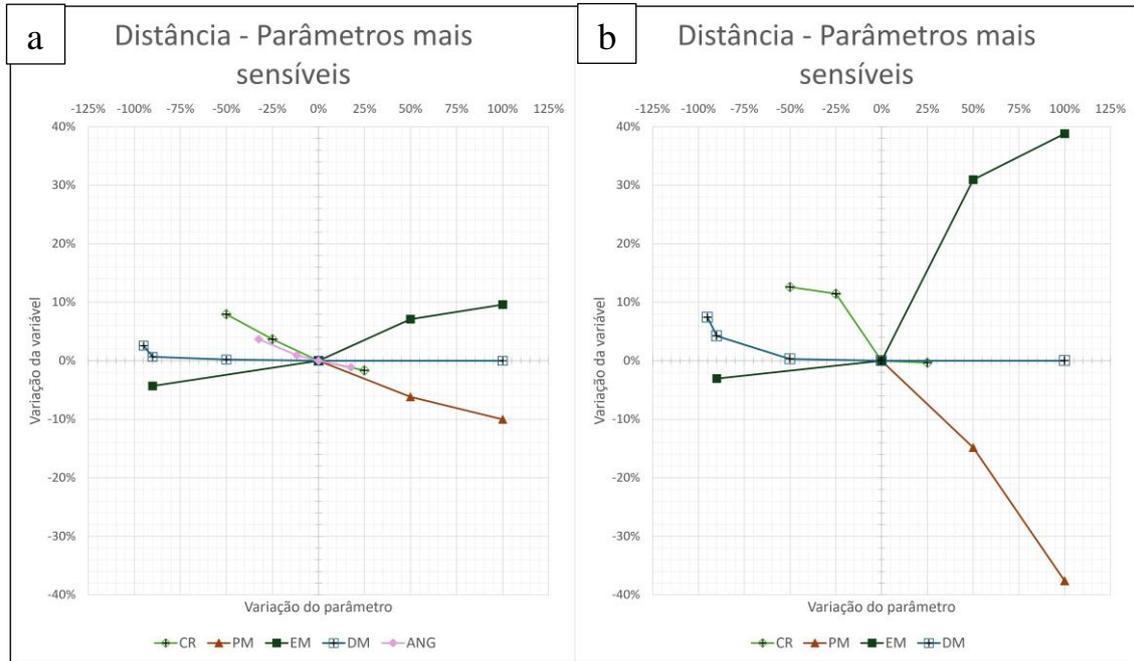
Ao comparar-se esses resultados com outros estudos observa-se algumas semelhanças e diferenças entre o Morpho2DH e outros modelos. Ao avaliar área total atingida, Paixão *et al.* (2021) encontrou as mesmas tendências no comportamento do modelo Kanako 2D para os parâmetros ângulo de atrito interno, concentração do leito móvel e diâmetro médio (Equivalentes ao ANG, CL e DM), no entanto para parâmetros como concentração de sedimentos, massa específica da fase fluída e massa específica do leito (Semelhantes ao CS, DL e DS) a sensibilidade no Kanako 2D é muito maior que no Morpho2DH.

Zegers *et al.* (2020) testaram a sensibilidade do modelo FLO-2D para diversos parâmetros, dentre eles a concentração volumétrica de sedimentos (equivalente ao CS), o coeficiente de detenção (similar ao PM) e o volume total de sedimentos disponível, que pode ser relacionado ao EM. Dentre os resultados encontrados para a área, os autores constataram que os parâmetros que mais exercem influência no resultado (além do parâmetro empírico  $\beta_1$ ) são o coeficiente de detenção e o volume total de sedimentos, similar ao constatado para o Morpho2DH. Os autores ainda comentam que ao aumentar os valores do coeficiente de detenção, a área máxima diminui à medida que o fluxo é forçado a parar em alturas mais profundas, e que isso pode ser uma fraqueza estrutural do FLO-2D, que carece de representações adequadas de processos complexos de deposição e perda de líquido.

### **5.2.2 Distância final percorrida**

A distância final percorrida pelo fluxo foi determinada diretamente com o auxílio de ferramentas SIG no *software* ArcGIS, e constitui no comprimento da linha central do caminho percorrido pelo fluxo. Os resultados da sensibilidade dessa variável aos parâmetros avaliados encontram-se nas Figuras 32 e 33. Adicionalmente no Apêndice I encontra-se a análise completa das distâncias percorridas.

Figura 30: Parâmetros mais sensíveis para a variável distância total percorrida: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CR é o coeficiente de resistência, PM é a profundidade mínima, EM é a profundidade máxima erodível, DM é o diâmetro médio, ANG é o ângulo de atrito interno.



Fonte: Autor.

Analisando a Figura 32, pode-se afirmar que os parâmetros mais sensíveis para a variável distância máxima percorrida são os mesmos sensíveis à área total, i.e, EM, PM e CR. Novamente o EM apresentou a maior sensibilidade em ambas as áreas, apresentando uma tendência de aumento da variável com o aumento do parâmetro. Esse resultado é condizente com o observado para fluxos de detritos típicos, pois espera-se que quanto maior o volume movimentado durante o fluxo, maior será a distância percorrida pelo mesmo (Iverson, 1997), salvo raras exceções onde fatores externos podem influenciar, como por exemplo, a formação de barragens naturais e o extravasamento do canal devido a um grande volume sendo propagado ao mesmo tempo. No entanto, de maneira geral, a tendência apresentada pela análise para o parâmetro EM é a tendência esperada.

Quanto à magnitude da variação, percebe-se que em um evento de menor escala (evento 2) a proporção da variação em relação a distância total foi mais significativa, porém deve-se levar em consideração a situação já relatada anteriormente, em que o fluxo do evento 2 perde o confinamento com o aumento do volume e se espalha rapidamente. Por essa razão, vemos um comportamento mais linear no evento 1 (característica canalizada) e menos linear para o evento 2, levando a conclusão de que a magnitude de variação depende da área.

O parâmetro PM também apresentou a mesma tendência para a distância total que a apresentada para a variável área total, i.e., a variável diminuiu com o aumento do parâmetro. O motivo dessa diminuição é provavelmente o mesmo discutido no tópico da área, ou seja, o aumento desse parâmetro implica que o fluxo precisa ter uma profundidade maior para continuar a propagar. Sendo assim, à medida que o fluxo vai perdendo material a profundidade desse vai diminuindo, e todas as regiões do fluxo que atingem o valor de PM informado vão interrompendo o movimento, com uma perda de material mais acelerada espera-se que o fluxo seja interrompido antes.

Quanto à magnitude da variação, percebe-se que esse parâmetro é muito sensível, principalmente no evento 2, pois uma variação de apenas 2 cm (de 0,01 para 0,03 m) fez com que a distância percorrida pelo fluxo diminuísse em 40%.

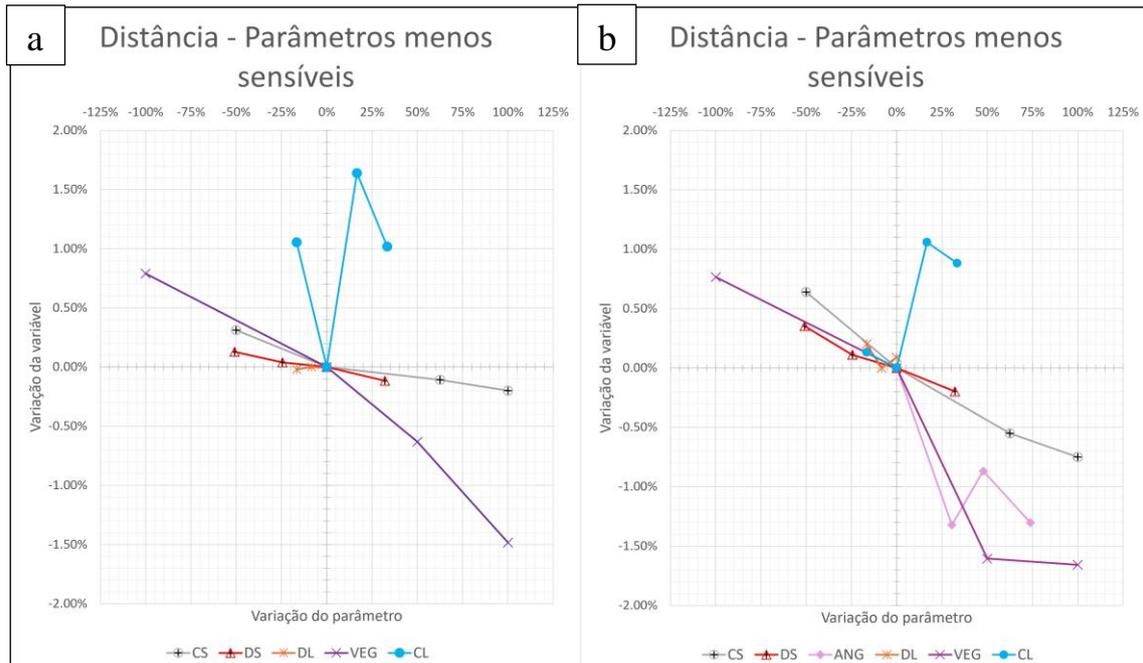
Outro parâmetro dos mais sensíveis para a distância total que apresentou a mesma tendência observada na área total foi o CR. Novamente houve uma diminuição da variável com o aumento do parâmetro. Pensando no significado físico do parâmetro, essa tendência é esperada, pois esse parâmetro é responsável pela dissipação de energia do fluxo. Sendo assim, uma maior dissipação de energia faz com que o fluxo seja interrompido antes. Essa variação, no entanto, não é linear em todos os casos, ou seja, depende da área de aplicação como pode ser observado pelo resultado do evento 2 (Figura 34b), onde no último intervalo simulado (do valor 72 para o valor 90) não houve variação significativa.

O parâmetro DM, assim como no caso da área, novamente apresentou uma tendência de diminuição exponencial com o aumento do valor do parâmetro para a variável distância. O motivo tende a ser o mesmo discutido anteriormente, pois a relação entre  $DM - h_s - \theta_e$  faz com que o fluxo seja interrompido antes, pois o ângulo de equilíbrio é maior com um DM maior, isso ocorre, no entanto, até um certo limite. Ainda, segundo Takahashi (1991), a carga total das partículas afetadas pela flutuabilidade do fluido intersticial é sustentada pela força repulsiva produzida pela colisão das partículas. Isto sugere que partículas menores colidem mais ao longo da propagação do fluxo, permitindo maior alcance e maior área atingida.

O caso do parâmetro ANG para a variável distância é particular, pois no evento 1 esse parâmetro apresentou uma variação maior (aproximadamente 5%) já no evento 2 essa variação foi bem menos significativa (1,3%). Isso indica que a magnitude de variação desse parâmetro depende da magnitude do evento simulado, podendo esse ser mais influente no resultado ou menos, a depender da área de aplicação. A tendência

apresentada para a variação no resultado da distância total é a mesma que para a área, ou seja, a distância diminui com o aumento do parâmetro. O motivo seria o mesmo já comentado anteriormente, onde um valor menor de ANG faz com que o fluxo percorra maiores distâncias, pois as partículas têm menor resistência ao deslizamento umas sobre as outras.

Figura 31: Parâmetros menos sensíveis para a variável distância total percorrida: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CS é a concentração de sedimentos, DS é a densidade da partícula sólida e DL é a densidade da fase líquida, ANG é o ângulo de atrito, VEG é a vegetação e CL é a concentração do leito móvel.



Fonte: Autor.

Entre os parâmetros menos sensíveis tem-se CS, DS e DL, e que assim como no caso da área, é um resultado inesperado. Novamente esperava-se que esses parâmetros tivessem uma influência maior no resultado pelos mesmos motivos já discutidos no tópico 5.2.1. No entanto, ao menos no caso da distância, é possível perceber uma tendência da variação dos parâmetros CS e DS. Para o CS, a tendência é que a distância total diminua com o aumento do parâmetro. Essa tendência faz sentido fisicamente, pois um fluxo com maior concentração tende a perder energia mais rapidamente (Iverson, 1997), e desta forma, o fluxo perde velocidade e deposita antes, atingindo distâncias menores. E para o DS, a tendência observada pelo resultado também é de diminuir a distância total com o aumento do parâmetro. O que também faz sentido fisicamente, pois um sedimento mais denso (pesado) necessita de uma maior quantidade de energia para ser transportado

(Takahashi, 2014). No entanto, mesmo apresentando uma tendência, a magnitude da variação no resultado para a variação desses dois parâmetros é bem menor que a esperada.

Outros dois parâmetros que aparecem como menos sensíveis para a distância total são o CL e VEG. O CL novamente apresentou uma tendência não linear para os dois eventos estudados, a tendência foi a mesma para as duas áreas, ou seja, pelos resultados obtidos nessa AS é possível afirmar que as variações ocasionadas pela alteração desse parâmetro não dependem da área de aplicação. No entanto, essa tendência não-linear merece uma investigação mais aprofundada, pois indica que possivelmente esse parâmetro representa processos complexos dentro do modelo que estão sujeitos a interações com outros parâmetros calculados em cada etapa da simulação.

Já a VEG apresentou uma tendência bem definida, que indica uma diminuição na distância atingida pelo fluxo com o aumento do valor do parâmetro. Como a vegetação atua como uma força resistiva a mais para o fluxo, atuando como obstáculo e ajudando a dispersar uma parte da energia, é esperado que com um valor maior de plantas por célula a dispersão de energia seja maior e o fluxo deposite antes.

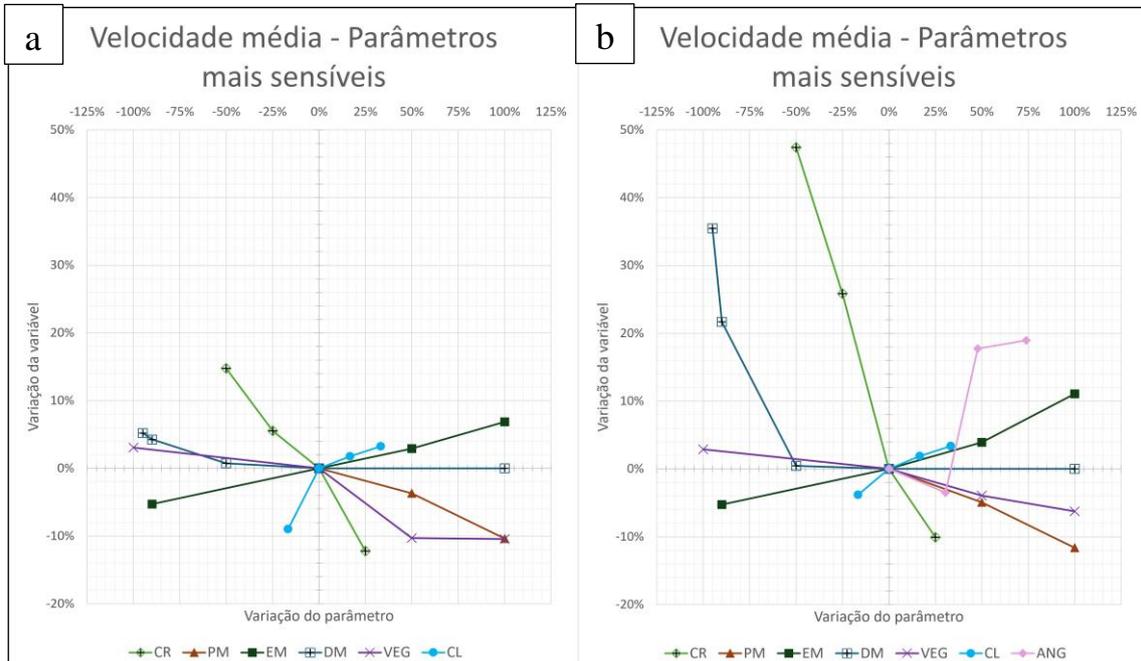
Comparando esses resultados com outros estudos, observa-se novamente algumas semelhanças e diferenças. No estudo de Paixão *et al.* (2021) novamente temos uma tendência similar na variação da distância para os parâmetros ANG, CL e DM, e uma grande diferença na sensibilidade dos parâmetros CS, DL e DS.

Hussin (2012) ao analisar a sensibilidade do resultado do modelo RAMMS para a distância percorrida, constatou que os parâmetros coeficiente de entrada e coeficiente de fricção exercem influência significativa no resultado. Esses parâmetros podem ser, de certa forma, relacionados aos parâmetros EM e CR no presente estudo. A tendência apresentada por ambos os parâmetros para a variável distância é similar a encontrada para o Morpho2DH no presente estudo.

### **5.2.3 Velocidade média**

A velocidade média em cada simulação foi determinada conforme a equação (4.3). As Figuras 34 e 35 apresentam os resultados da AS para a variável velocidade média. Adicionalmente, no Apêndice I se encontram todos os valores utilizados para essa análise. Para a velocidade média, um número maior de parâmetros exerce uma influência mais significativa no resultado, i.e., são mais sensíveis (Figura 34).

Figura 32: Parâmetros mais sensíveis para a variável velocidade média: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CR é o coeficiente de resistência, PM é a profundidade mínima, EM é a profundidade máxima erodível, DM é o diâmetro médio, CL é a concentração do leito móvel, ANG é o ângulo de atrito interno e VEG é a vegetação.



Fonte: Autor.

O parâmetro que mais influencia na velocidade média é o CR. Essa tendência vai de encontro ao sentido físico do parâmetro já discutido anteriormente, pois com um valor maior de CR a dispersão de energia do fluxo é maior, e em um fluxo com o mesmo volume e com menos energia, a velocidade de propagação do fluxo é menor (Iverson, 1997). A magnitude da variação chegou a aproximadamente 50%, demonstrando que para calibrar essa variável o CR pode ser um bom parâmetro de ajuste. No entanto, vale ressaltar que o autor do modelo recomenda que se utilize o valor central para esse parâmetro (72), por falta de estudos mais aprofundados sobre seu significado físico e faixa de aplicação.

Outro parâmetro com influência significativa na velocidade é o EM, que apresentou a mesma tendência (praticamente linear) para ambos os eventos. Seguindo a tendência das variáveis anteriores, a velocidade aumentou com o aumento do EM. Com um volume maior sendo propagado no mesmo canal (devido ao aumento do EM), espera-se que a velocidade aumente (Takahashi, 1991), então, essa tendência observada é esperada. Em termos de magnitude, para ambos os eventos a variação foi parecida, indicando que a influência do EM na velocidade é menos dependente da área de aplicação.

Para o DM (Figura 34b) observa-se que esse exerce uma forte influência na velocidade no evento 2, no entanto, a magnitude da influência desse parâmetro no evento

1 não é tão acentuada. Isso demonstra que, para a velocidade média, a área de aplicação e magnitude do evento podem influenciar na sensibilidade do DM. A tendência da variação, entretanto, é a mesma para os dois eventos, i.e., quanto menor o DM maior a velocidade. Isso remete novamente a relação entre o DM, o  $h_s$  e o ângulo de equilíbrio, pois esse último exerce influência direta no cálculo da velocidade (equação 2.11). Com diâmetros menores de partícula, pelo pressuposto (ii) do modelo, temos também uma presença mais expressiva de turbulência, que costuma estar associada a velocidades maiores.

Outro parâmetro que apresentou uma tendência de diminuir a velocidade com o aumento de seu valor foi o PM. O provável motivo é que se um fluxo perde material mais rapidamente (efeito do aumento do PM), seu volume propagado diminui e consequentemente a velocidade média também diminui. A magnitude de variação da velocidade média com a variação do PM foi aproximadamente a mesma para os dois eventos, indicando que essa variação é independente da área de aplicação.

O aumento do parâmetro VEG, ao aumentar a força resistiva para a propagação do fluxo, também exerce certa influência na velocidade média. Na Figura 34 nota-se que quanto maior o valor de VEG menor é a velocidade média, seguindo a tendência esperada para a variação desse parâmetro. A magnitude da variação da velocidade média com a alteração desse valor se mostrou semelhante para ambos os eventos simulados, dando espaço para a afirmação de que essa variação é independente da área. Essa tendência, no entanto, não é muito linear como pode ser observado na Figura 34a para o evento 1, sugerindo assim que se faça uma análise mais aprofundada da influência desse parâmetro na velocidade média do fluxo.

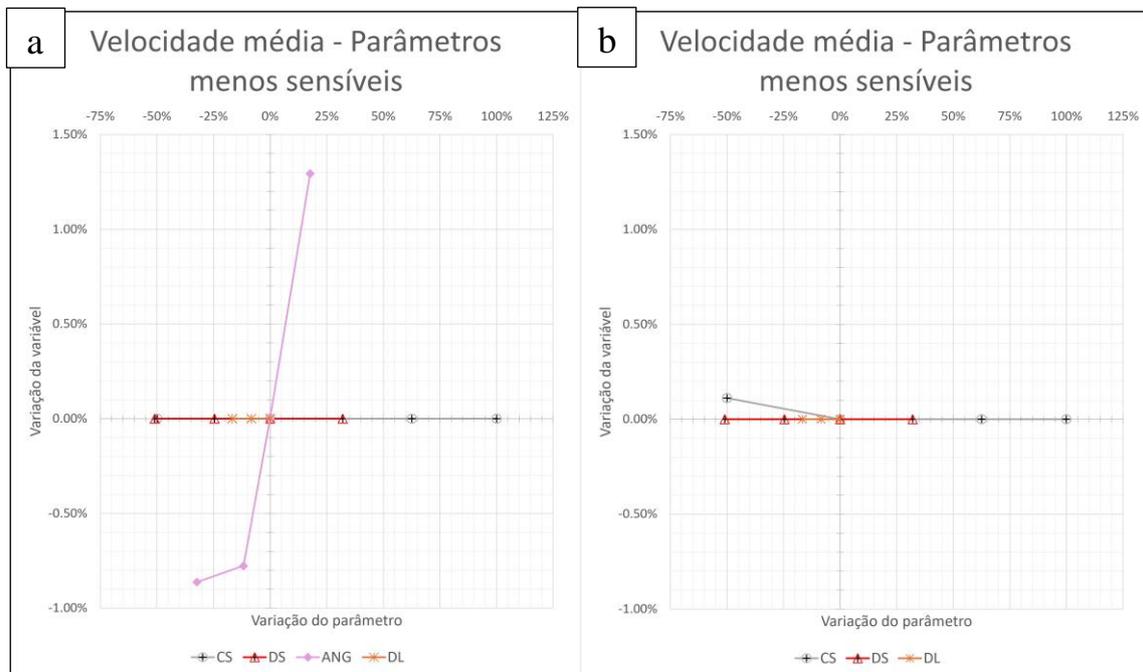
O parâmetro CL apresentou uma tendência semelhante para ambos os eventos, sendo essa mais monótona para a variação da velocidade média que para as variáveis anteriores. A velocidade média aumentou com o aumento de desse parâmetro. Esse aumento pode ter sido ocasionado, assim como para o DM por um maior número de partículas sendo propagadas e incorporadas ao fluxo aumentando o volume de sólidos. Observa-se que esse parâmetro é mais influente para o evento 1 que para o evento 2 (Figura 34), reforçando a hipótese de que essa influência se dá pelo volume maior de sólidos, pois a magnitude do volume total para o evento 1 é maior que para o evento 2, sendo esse o motivo da influência maior no evento 1.

Por fim, nos parâmetros mais sensíveis, o parâmetro ANG apresentou um resultado inesperado, pois esse demonstrou influências muito distintas para os dois

eventos. No evento 1 temos uma faixa de variação total de pouco mais do que 2% se considerarmos o valor mais baixo e o valor mais alto. Já para o evento 2, essa variação chegou a pouco mais de 20%, ou seja, o parâmetro ANG foi 10 vezes mais influente para o evento 2 que para o evento 1.

Isso indica uma grande dependência da área de aplicação para esse parâmetro na velocidade, e, que possivelmente esse exerce maior influência em eventos de menor magnitude. O ANG também não apresentou uma tendência linear, mas em geral percebe-se um aumento da velocidade com o aumento do ângulo de atrito interno. Ao analisar-se a equação 2.13, nota-se que esse parâmetro também tem uma relação direta com o ângulo de equilíbrio, o que pode explicar essa tendência.

Figura 33: Parâmetros menos sensíveis para a variável velocidade média percorrida: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CS é a concentração de sedimentos, DS é a densidade da partícula sólida e DL é a densidade da fase líquida e ANG é o ângulo de atrito.



Fonte: Autor.

Novamente, os parâmetros menos sensíveis são CS, DS e DL que não apresentaram nenhum efeito na velocidade com a sua variação. Esse resultado foi inesperado, pois fisicamente seria esperado que os três exercessem certa influência na velocidade.

Luna *et al.* (2012) avaliaram a sensibilidade dos parâmetros ângulo de atrito (equivalente ao ANG) e profundidade do solo (equivalente ao EM), dentre outros no resultado da velocidade de um modelo proposto por van Asch *et al.* (2004). Os autores constataram que um aumento nesses dois parâmetros representa um aumento na

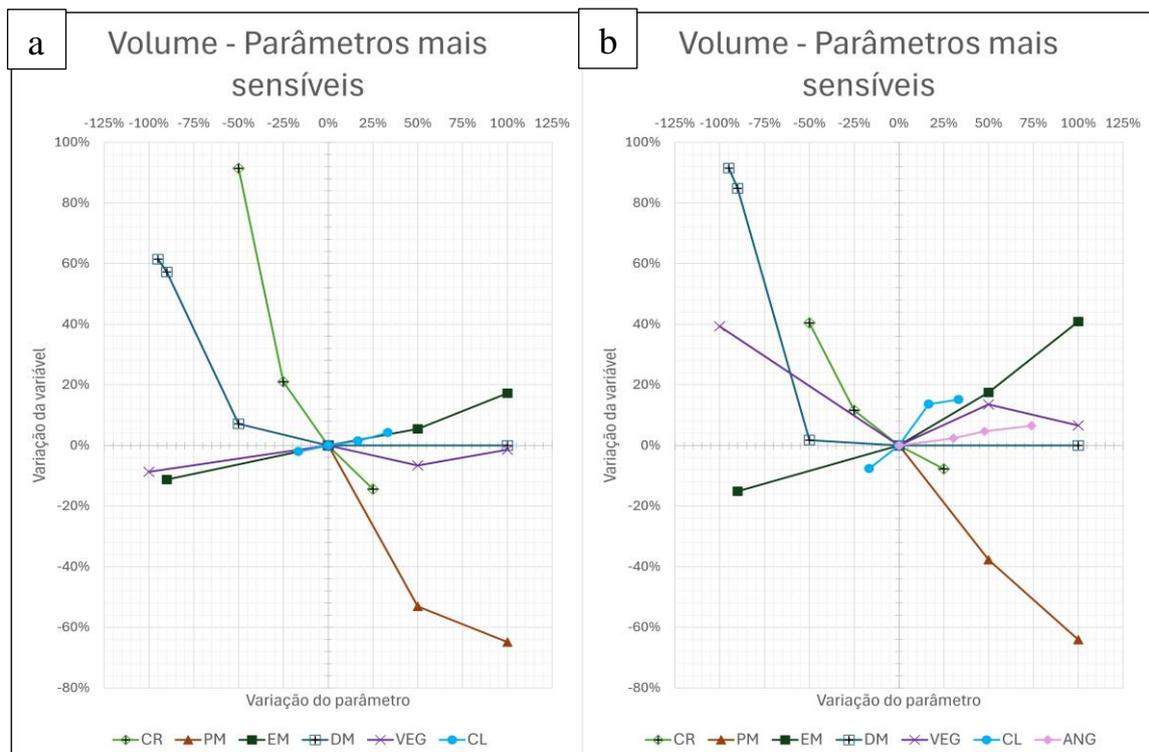
velocidade do fluxo, similar as tendências encontradas para o ANG e EM no presente estudo.

Zegers *et al.* (2020) avaliaram também a sensibilidade do resultado do FLO-2D para a velocidade média. Para essa variável os autores constataram novamente que os parâmetros volume total de sedimentos e coeficiente de detenção exercem influência significativa. Os autores comentam ainda que a tendência é um aumento na velocidade com o aumento do volume total de sedimentos e uma diminuição com o aumento do coeficiente de detenção, similarmente ao encontrado para o Morpho2DH para os parâmetros EM e PM.

### 5.2.4 Volume depositado

O volume depositado foi determinado através da equação (4.6), vale ressaltar que foram consideradas apenas as células com valores positivos de  $H_{ch}$ , que representam deposição de material, desconsiderando assim as células com valores negativos, que representam a erosão. As Figuras 36 e 37 apresentam os resultados da análise para o volume. Adicionalmente no Apêndice I encontra-se a análise completa para o volume depositado.

Figura 34: Parâmetros mais sensíveis para a variável volume depositado: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CR é o coeficiente de resistência, PM é a profundidade mínima, EM é a profundidade máxima erodível, DM é o diâmetro médio, CL é a concentração do leito móvel, ANG é o ângulo de atrito interno e VEG é a vegetação.



Fonte: Autor.

A grande maioria dos parâmetros apresentou influência significativa sobre o volume depositado e todos eles possuem uma relação direta com a velocidade. O CR apresentou a mesma tendência para ambos os eventos, que é de uma diminuição no volume depositado com o aumento do valor do parâmetro. Pelo sentido físico do parâmetro, essa tendência é esperada, e pode ter uma relação direta com o volume incorporado pelo fluxo na zona de erosão. Como observado na Figura 32, um aumento do CR representa uma diminuição significativa da velocidade média, e assim a competência para mobilizar o material disponível do fluxo diminui, levando a uma diminuição no volume total mobilizado e depositado.

A mesma situação ocorre para os parâmetros PM, DM e CL, que apresentam a mesma tendência para o volume e a velocidade, levando a mesma hipótese do CR, onde a velocidade exerce influência no volume erodido da camada máxima de erosão e conseqüentemente no volume depositado.

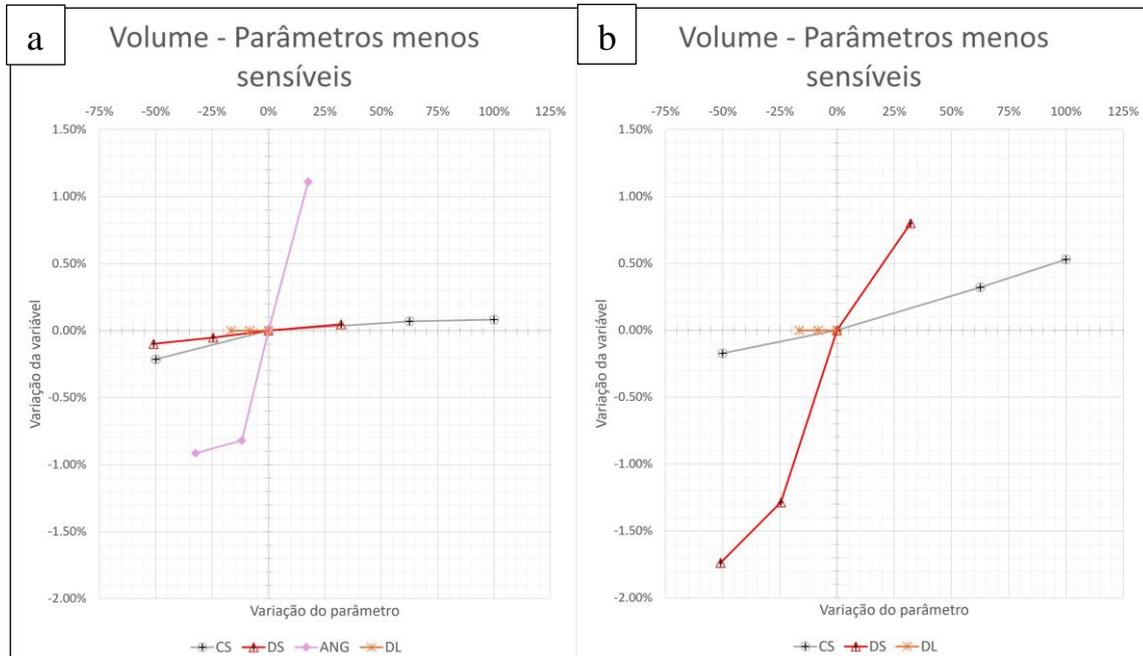
Já para o parâmetro EM há uma relação direta com a variável em análise. Esse parâmetro representa a profundidade máxima do leito erodível, e é o parâmetro responsável por aumentar o volume no fluxo através do aumento na quantidade de material que esse pode incorporar. Então é esperado que um aumento no EM cause um aumento proporcional no volume depositado até o limite em que o fluxo não teria mais capacidade ou competência para incorporar material.

Outro parâmetro sensível é a VEG, no entanto, essa não possui uma tendência bem definida, pois apresentou resultados diferentes para ambos os eventos. Isso indica que trata-se de um parâmetro dependente da área de aplicação, visto que a proporção da área do fluxo sob influência da vegetação em relação a área total é diferente em ambos os eventos (Figura 21). Contudo, a influência exercida pela alteração no valor de VEG é bem significativa, chegando a 40% para o evento 2, indicando que esse é um parâmetro importante para a calibração ou determinação do volume final mobilizado pelo fluxo.

O ANG, apesar de exercer uma influência menor que os demais parâmetros (principalmente no evento 1, onde foi classificado como menos sensível), apresenta uma tendência bem definida para o volume depositado, sendo essa um aumento na variável ocasionada pelo aumento do valor do parâmetro. Um ângulo de atrito interno mais alto normalmente significa que o fluxo pode transportar uma carga de sedimentos maior, já que as partículas individuais são menos propensas a se separar do fluxo principal devido à fricção interna mais forte (Takahashi, 2014). O motivo, também está provavelmente

relacionado a velocidade. Ao analisar-se a tendência desse parâmetro para a velocidade média, percebe-se que é a mesma apresentada para o volume.

Figura 35: Parâmetros menos sensíveis para a variável volume depositado: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CS é a concentração de sedimentos, DS é a densidade da partícula sólida e DL é a densidade da fase líquida.



Fonte: Autor.

O CS e DS apresentam certa influência no resultado (Figura 37), interferindo diretamente no volume depositado. No entanto, em termos de variação (Apêndice I) essa influência ainda é pequena, podendo-se afirmar que para o volume essas variáveis também são pouco sensíveis. Para o DL novamente não houve influência significativa no resultado.

A tendência encontrada por Hussin (2012) na variação do volume depositado para o parâmetro coeficiente de entrada também é similar a apresentada pelo EM, já para o parâmetro coeficiente de fricção os autores identificaram alguns picos de variação abrupta, mas em geral o volume diminuiu com o aumento desse parâmetro, similar ao comportamento do CR no Morpho2DH.

Luna *et al.* (2012) também avaliaram os efeitos do ângulo de atrito e profundidade do solo no volume total do fluxo de detritos para o modelo de van Asch *et al.* (2004), chegando a tendências similares as do ANG e EM no presente estudo, i.e., um aumento nesses parâmetros representa um aumento no volume do fluxo.

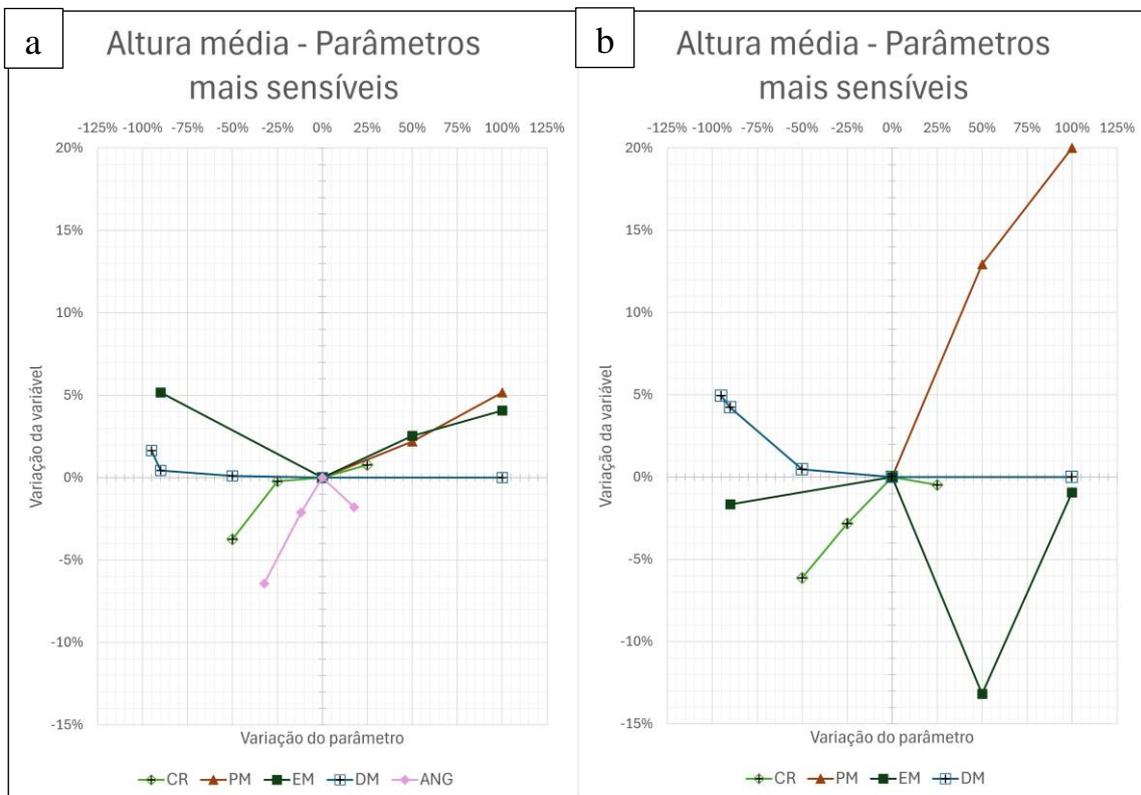
Em sua análise para a sensibilidade no resultado do volume depositado apresentado pelo FLO-2D, Zegers *et al.* (2020) observaram que o parâmetro mais

influyente é o coeficiente de detenção, possuindo uma relação inversa ao volume final depositado, resultado similar ao apresentado pelo PM nesse estudo.

### 5.2.5 Altura média

A altura média foi determinada através da equação (4.4), e nas Figuras 38 e 39 se encontram os resultados da análise OAT para essa variável. No Apêndice I encontra-se a análise completa do resultado da AS para a altura média.

Figura 36: Parâmetros mais sensíveis para a variável altura média: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CR é o coeficiente de resistência, PM é a profundidade mínima, EM é a profundidade máxima erodível, DM é o diâmetro médio, e ANG é o ângulo de atrito interno.



Fonte: Autor.

Para a altura média os parâmetros mais influentes foram o PM e o EM (Figura 38). O PM chama a atenção, principalmente no evento 2, onde a alteração desse parâmetro levou a um aumento de cerca de 20% da altura média. Ao analisar-se a equação (4.4), utilizada para determinar essa variável, observa-se que essa leva em consideração o número de células afetadas (*Nca*) ou seja, a área total afetada para determinar o valor da altura média. Da análise das variáveis anteriores já foi constatado que o aumento do PM tem grande influência na diminuição da área total. Então, ao manter o volume propagado

constante em uma área menor, é esperado que ocorra um aumento na altura média. Essa tendência foi observada em ambos os eventos. A magnitude, no entanto, apresentou um comportamento similar ao observado na variável área total, reforçando a relação direta entre essas variáveis no caso do PM.

Já o EM apresenta uma análise mais complexa, pois esse parâmetro é responsável por aumentar o volume no fluxo, sua altura e de manter esse em movimento. No entanto, ao analisar-se o resultado do evento 1, na situação em que o fluxo depositou antes por falta de entrada de volume ( $EM = 0,01$ ), a área, cerca de 10% menor, pode ter uma influência maior na determinação da altura média. Já para os demais valores testados no evento 1, a área aumenta em uma proporção menor que o volume mobilizado (Figura 38), que começa a exercer influência nessa variável. Então pode-se afirmar que existe maior influência da área atingida em determinadas situações e em outras a influência do volume mobilizado é maior.

Essa afirmação é apoiada também pelo resultado do evento 2, onde no terceiro valor ( $EM=0,15$ ) o fluxo se espalha após atingir a região de menor declividade na encosta e perder seu confinamento, aumenta muito sua área afetada e fazendo com que a altura média diminua bruscamente. Já para o valor de 0,2 m, o volume mobilizado aumenta e o aumento na área não é tão expressivo quanto na etapa anterior, fazendo com que a altura média volte a aumentar. Com isso, pode-se afirmar que a influência do EM na altura média do fluxo é fortemente dependente da área de aplicação.

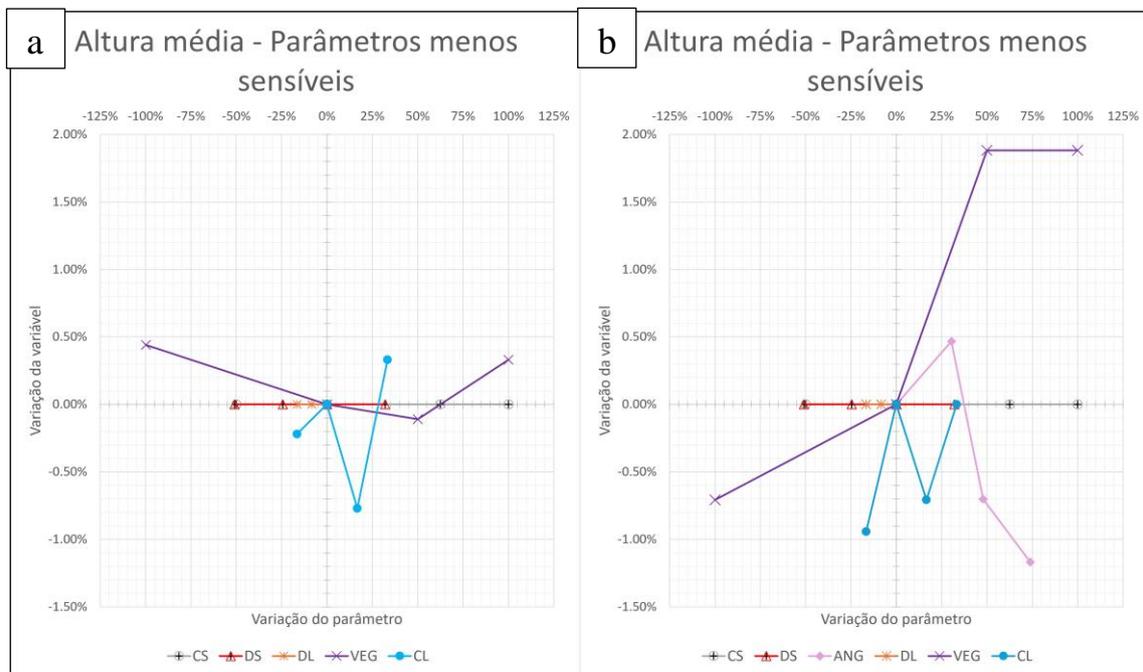
Ao observar-se o resultado para o parâmetro CR pode-se deduzir ainda que pode haver a influência de uma outra variável na altura média, i.e., a velocidade. Pela análise das variáveis anteriores, vê-se que o parâmetro CR funciona como a principal força resistiva ao fluxo, e faz com que a velocidade da frente do fluxo diminua significativamente ao aumentarmos o valor do parâmetro. Isso desencadeia uma espécie de “congestionamento” no canal por onde o fluxo está sendo propagado, o que faz com que a altura máxima registrada por uma determinada célula também aumente. Vale ressaltar que a altura média é calculada como a média das alturas máximas registradas em cada célula ao final da simulação.

Nota-se ainda que existe um limite para esse fenômeno, a partir do qual a influência da área e do volume começam ter peso novamente, levando a uma mudança na tendência, que passa a uma condição de estabilidade e depois aumenta ou diminui levemente a depender da área de aplicação (Figura 38). Para o parâmetro DM, tem-se a

mesma situação, indicando possivelmente que o resultado da altura média para esse parâmetro também sofre influência da área e do volume.

O parâmetro ANG demonstrou maior influência apenas no evento 1. A tendência da influência da variação desse parâmetro na altura média mostrou que existe um ponto de inflexão que pôde ser observado em ambos os eventos. O valor do parâmetro que causou essa inflexão, no entanto, variou para cada evento, mostrando que existe uma dependência da área de aplicação. O aumento no valor do parâmetro causa um aumento no valor da altura média até o ponto de inflexão, onde um valor mais alto passa a causar uma diminuição na variável. Novamente esse efeito pode ser causado pela influência mútua entre as variáveis área, volume e velocidade.

Figura 37: Parâmetros menos sensíveis para a variável altura média: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CS é a concentração de sedimentos, DS é a densidade da partícula sólida e DL é a densidade da fase líquida, ANG é o ângulo de atrito, VEG é a vegetação e CL é a concentração do leito móvel.



Fonte: Autor.

Entre os parâmetros menos sensíveis para a altura média (Figura 39) o CL não apresentou uma tendência bem definida, mas apresentou o mesmo comportamento para ambos os eventos. A VEG apresentou tendências distintas para ambos os eventos, indicando assim um comportamento dependente da área de aplicação para altura média. Por fim, tem-se os parâmetros CS, DS e DL, que novamente não apresentaram influência significativa no resultado.

Hussin (2012) avaliou também o efeito dos parâmetros coeficiente de entrada e coeficiente de fricção para a altura média no modelo RAMMS. O autor encontrou uma

tendência similar à do EM para o coeficiente de entrada, no entanto para o coeficiente de fricção a tendência foi contrária à do CR, isso possivelmente deve-se ao fato de que mesmo que a função dos dois parâmetros seja similar em cada modelo, seu significado físico não é exatamente o mesmo, sendo cada um calculado de maneira diferente.

Zegers *et al.* (2020) também avaliaram a sensibilidade dos parâmetros de entrada do FLO-2D para a altura média. Para essa variável o parâmetro predominantemente mais sensível foi um parâmetro empírico do modelo ( $\beta I$ ), no entanto, os parâmetros coeficiente de detenção e volume máximo de sedimentos foram respectivamente o segundo e terceiro parâmetros mais sensíveis. Os autores não comentam qual a tendência desses parâmetros na altura média.

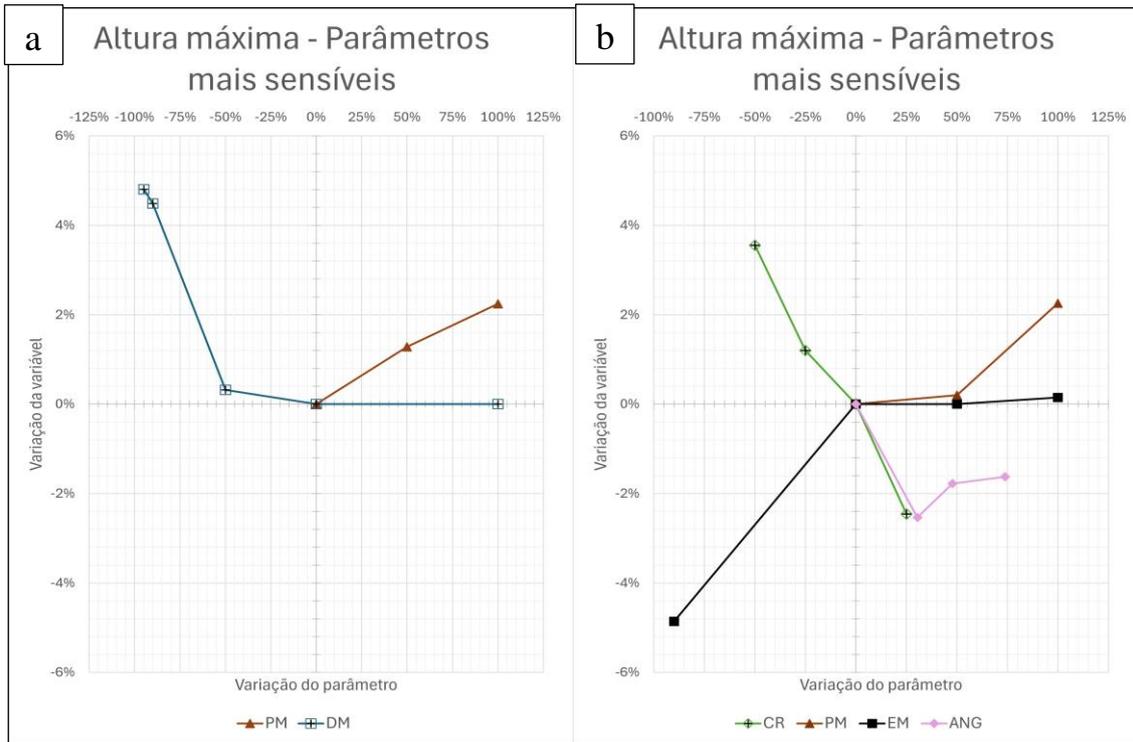
### 5.2.6 Altura máxima

A altura máxima foi determinada como o *pixel* com a altura mais elevada registrado dentro da área afetada pelo fluxo. Vale ressaltar que devido a característica canalizada em boa parte do evento 1, essa altura ocorreu nas zonas mais encaixadas do canal, na zona de transporte do fluxo. As Figuras 40 e 41 apresentam o resultado da análise OAT para a altura máxima, e no Apêndice I encontra-se a análise completa para altura máxima.

Poucos parâmetros exerceram uma influência significativa na altura máxima, principalmente no evento 1 (Figura 40). Dentre esses, destaca-se o PM, que aparece para ambos os eventos como um parâmetro mais sensível. A tendência é a mesma que para a altura média, onde um aumento no valor do parâmetro representa um aumento na altura máxima registrada. O motivo é possivelmente o “congestionamento” ocasionado pela diminuição na velocidade da frente do fluxo (Figura 34).

Outro ponto a ser destacado são os parâmetros CR e EM. Ambos só apresentaram sensibilidade para o evento 2. A tendência do EM indica que o ponto onde ocorreu essa altura máxima para o evento 2 ocorre depois do início da zona de erosão, pois o EM só pode exercer influência em uma variável após esse ponto. O que não é o caso do evento 1, em que o EM não exerceu influência alguma, indicando então que o ponto de altura máxima para o evento 1 ocorreu no canal antes de atingir a zona de erosão. A tendência apresentada pelo EM no evento 2, pode ser explicada por um volume maior sendo mobilizado, o que causa um acúmulo maior de material na célula que registrou a altura máxima.

Figura 38: Parâmetros mais sensíveis para a variável altura máxima: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CR é o coeficiente de resistência, PM é a profundidade mínima, EM é a profundidade máxima erodível, DM é o diâmetro médio, e ANG é o ângulo de atrito interno.



Fonte: Autor.

Diferentemente da altura média, onde a tendência do CR apresentava um ponto de inflexão, para a altura máxima temos uma tendência bem definida no evento 2, i.e., com um aumento do parâmetro, temos uma diminuição da altura máxima. Isso indica que nesse ponto o acúmulo de material diminuiu, ou seja, com uma velocidade menor ocasionada pelo aumento do CR (Figura 34), o volume mobilizado é menor (Figura 36), causando um acúmulo de material menor no ponto da altura máxima. Isso demonstra a relação entre os parâmetros CR e EM para a sensibilidade da altura máxima. No entanto, como podemos observar pelo resultado na Figura 40, essa relação e a sensibilidade dos parâmetros EM e CR dependem da área de aplicação.

Outro parâmetro classificado como um dos mais sensíveis para altura máxima, principalmente no evento 1, é o DM. Novamente esse parâmetro apresentou a mesma tendência para ambos os eventos, variando apenas na sua magnitude. A hipótese mais provável é que esse resultado esteja também relacionado à velocidade.

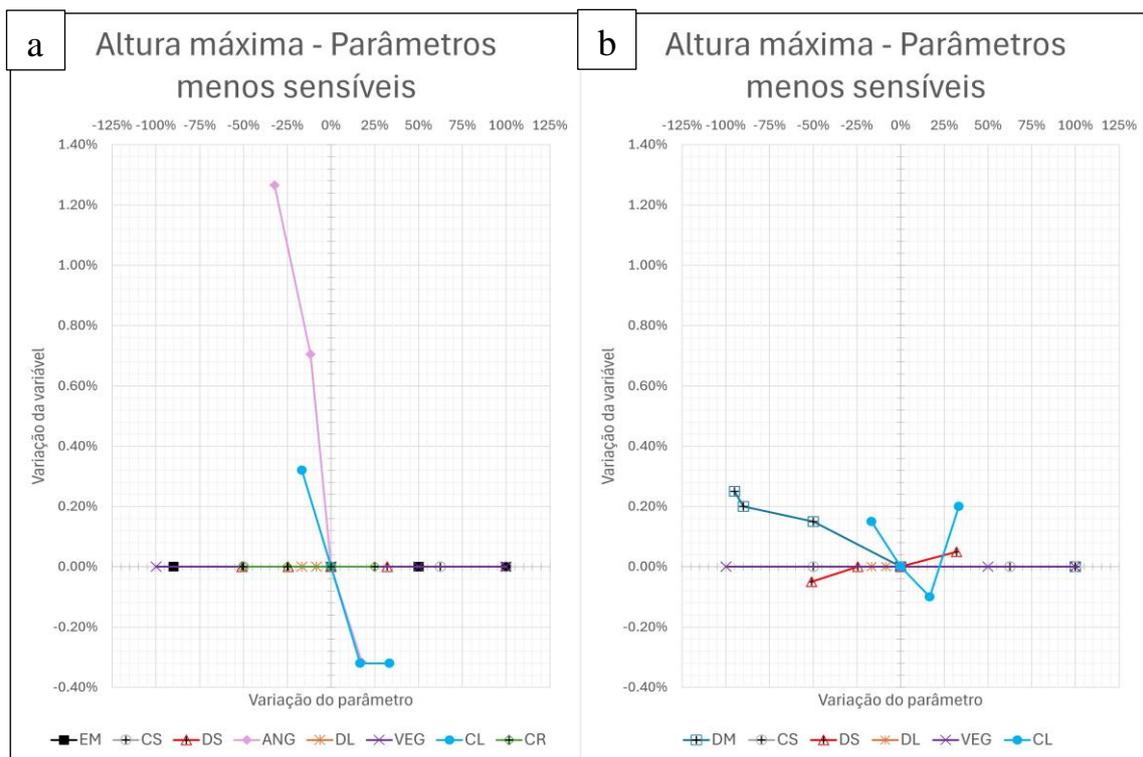
Ao analisarmos o resultado para ambos os eventos, podemos deduzir que o ponto de altura máxima para o evento 1 ocorre em uma etapa mais inicial do fluxo, possivelmente na fase de acúmulo do material do escoamento no canal, pois a maioria

dos parâmetros não exerceu influência alguma na altura máxima, diferentemente do evento 2. Nessa fase inicial do fluxo, uma velocidade maior causada por um valor menor de DM, possivelmente faz com que o material se acumule mais rapidamente no canal, resultando em uma altura máxima maior. Apesar da magnitude de variação causada pela alteração do DM ser diferente para ambos os eventos, a tendência é similar.

O parâmetro ANG não demonstrou uma tendência clara para ambos os eventos, no entanto é possível perceber a presença de um ponto de inflexão assim como para a altura média, principalmente para o evento 2.

A grande maioria dos parâmetros não demonstrou influência na altura máxima para o evento 1, colaborando com a hipótese de que essa altura ocorreu em um ponto mais inicial do fluxo, onde apenas alguns poucos parâmetros podem exercer efeito significativo.

Figura 39: Parâmetros menos sensíveis para a variável altura máxima: (a) Evento 1; e (b) Evento 2. Onde CS é a concentração de sedimentos, DS é a densidade da partícula sólida e DL é a densidade da fase líquida, CR é o coeficiente de resistência, EM é a profundidade máxima erodível, DM é o diâmetro médio, e ANG é o ângulo de atrito interno, VEG é a vegetação e CL é a concentração do leito móvel.



Fonte: Autor.

Novamente os parâmetros CS, DS e DL não exerceram qualquer influência significativa, mesmo caso do parâmetro VEG para a altura máxima. Vale ressaltar que mesmo que as porcentagens de variação sejam perceptíveis, em termos de valores, a maior

parte dessas variações foram pequenas (alguns poucos cm), como pode ser observado no Apêndice I.

Não foram encontrados estudos de análise de sensibilidade de modelos de fluxos de detritos, que avaliaram a sensibilidade dos parâmetros de entrada para a altura máxima, para efeitos de comparação de resultados.

### **5.3 Análise de sensibilidade AAT**

Para a análise AAT foram simulados os 10 conjuntos de valores aleatórios (Tabela 8) para os dois eventos. Além do fato desses 5 parâmetros serem comumente variados durante a calibração do modelo, e estarem presentes na maioria das análises de sensibilidade (de parâmetros reológicos) de modelos de fluxo de detritos, os parâmetros CS, DS, e DL apresentaram pouca ou nenhuma sensibilidade as variáveis analisadas na etapa OAT. Dessa forma, outra razão para conduzir essa análise AAT é verificar se existe uma possível influência entre esses parâmetros, que limita a variação no resultado.

A Figura 42 apresenta visualmente a porcentagem de variação de cada parâmetro em relação ao central, já as Figuras 43 e 44 apresentam o resultado das simulações para cada cenário em cada evento. No Apêndice II encontram-se todos resultados dessa etapa.

Os resultados são apresentados desta forma para observar se há alguma tendência nas variáveis de saída em relação à variação dos parâmetros, conforme mostrado na Figura 42. Ao analisar os dados das três figuras, é evidente uma correlação entre a variação do parâmetro CL e as variáveis de velocidade e volume.

Ao observar-se a tendência dos resultados dessa análise AAT e compará-las com as tendências do CL na análise OAT, percebe-se que em ambas o resultado varia de forma muito similar. Isso é perceptível principalmente para as variáveis área total, velocidade média e volume depositado. Para a área total, os resultados da AAT demonstraram a tendência de aumentar do valor 0,5 até 0,7 ( $m^3/m^3$ ) e depois diminuir entre 0,7 e 0,8 ( $m^3/m^3$ ) e para as variáveis velocidade e volume uma tendência de aumentar com o aumento do valor do parâmetro.

Nota-se também que essas três variáveis de saída são justamente as variáveis em que o CL foi classificado como um parâmetro mais sensível na análise OAT, colaborando para o entendimento do motivo dessa correlação. Ou seja, o CL de fato é um parâmetro influente nas variáveis área total, velocidade média e volume depositado, mesmo quando variado em conjunto com outros parâmetros.

Figura 40: Variação dos parâmetros de entrada em relação ao central em cada cenário. Onde CR é o coeficiente de resistência, PM é a profundidade mínima, EM é a profundidade máxima erodível, DM é o diâmetro médio, CL é a concentração do leito móvel, ANG é o ângulo de atrito interno, VEG é a vegetação, CS é a concentração de sedimentos, DS é a densidade da partícula sólida e DL é a densidade da fase líquida.

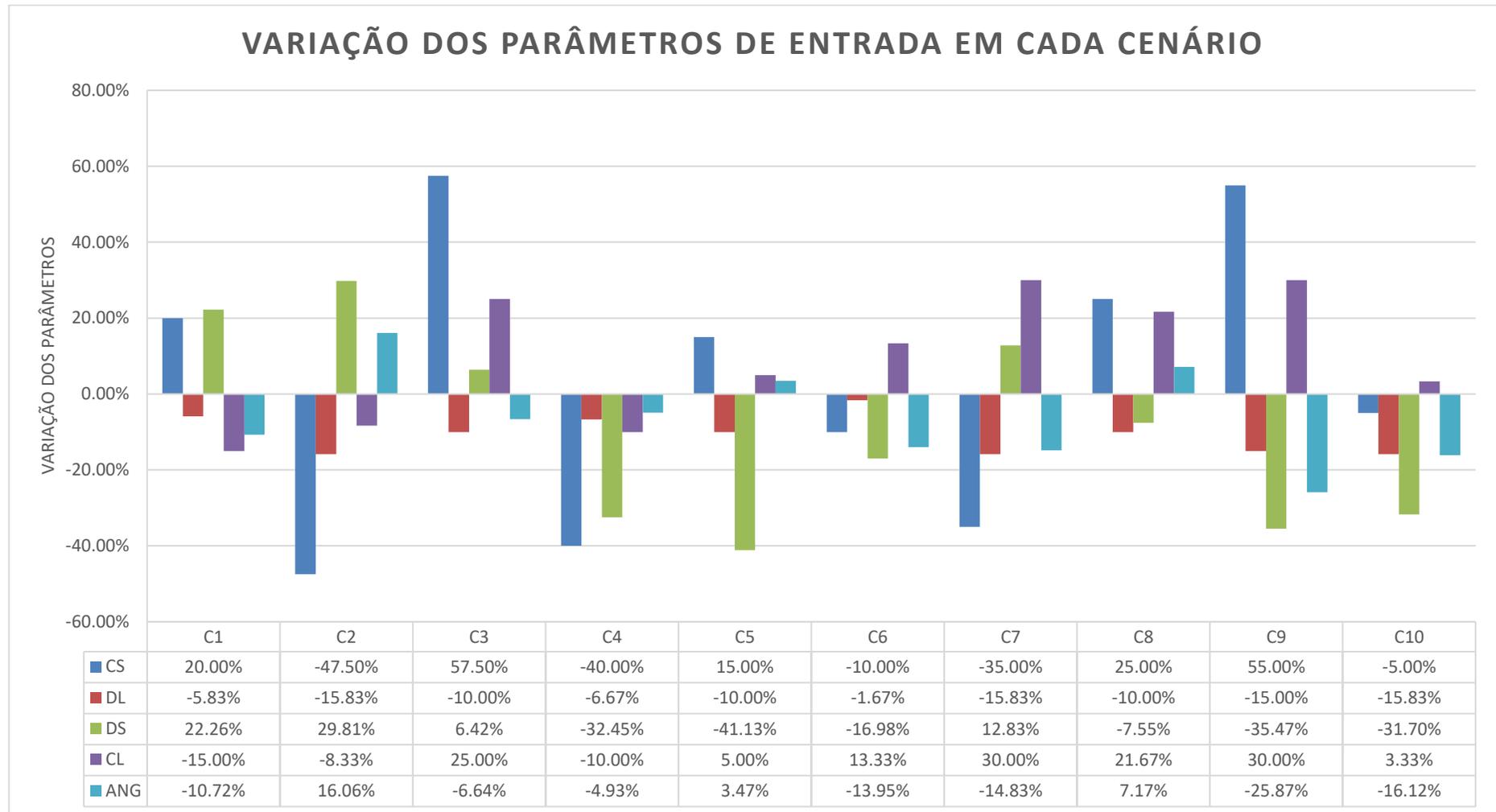


Figura 41: Variação das seis variáveis de saída analisadas para cada cenário no evento 1.

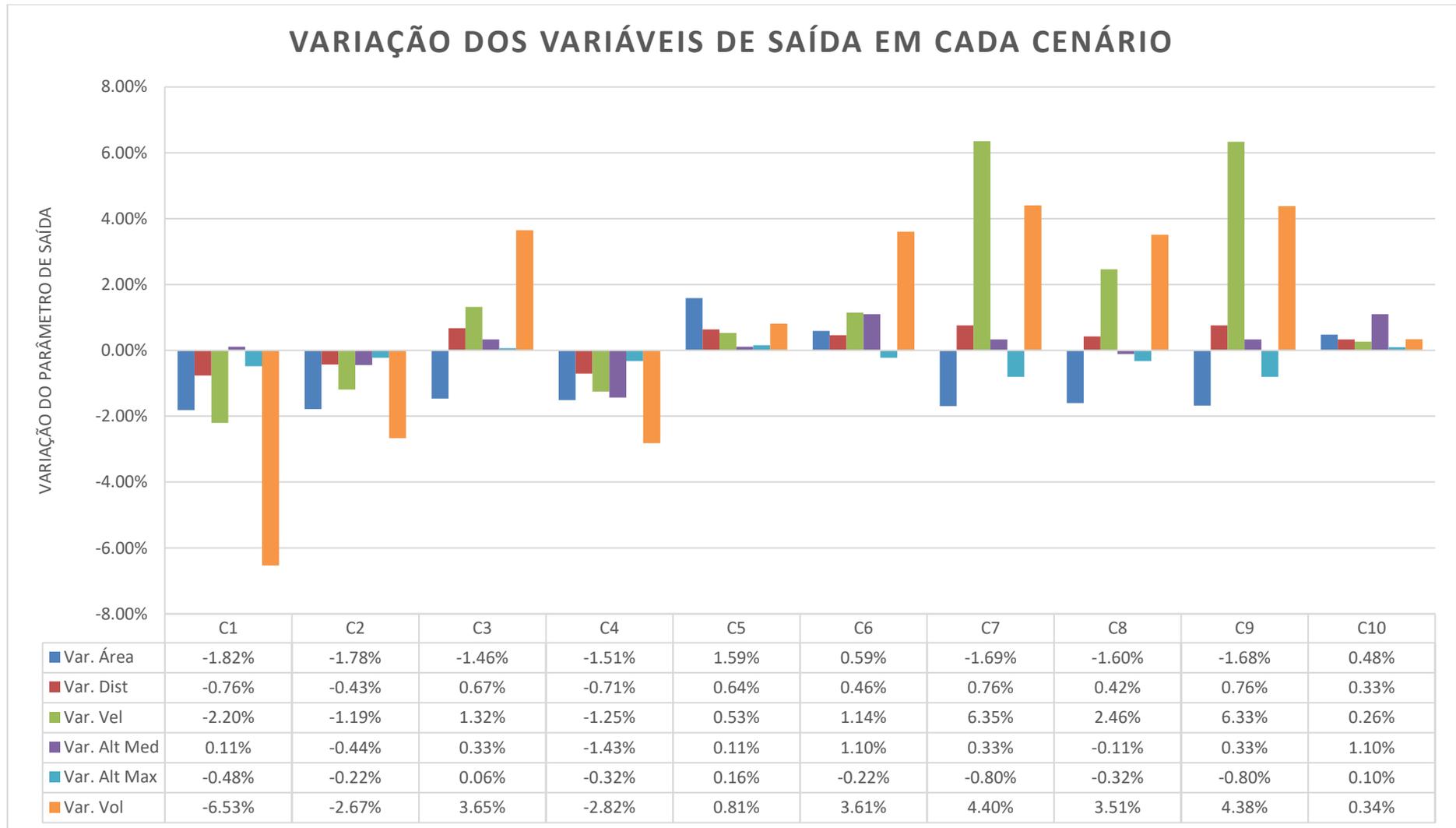
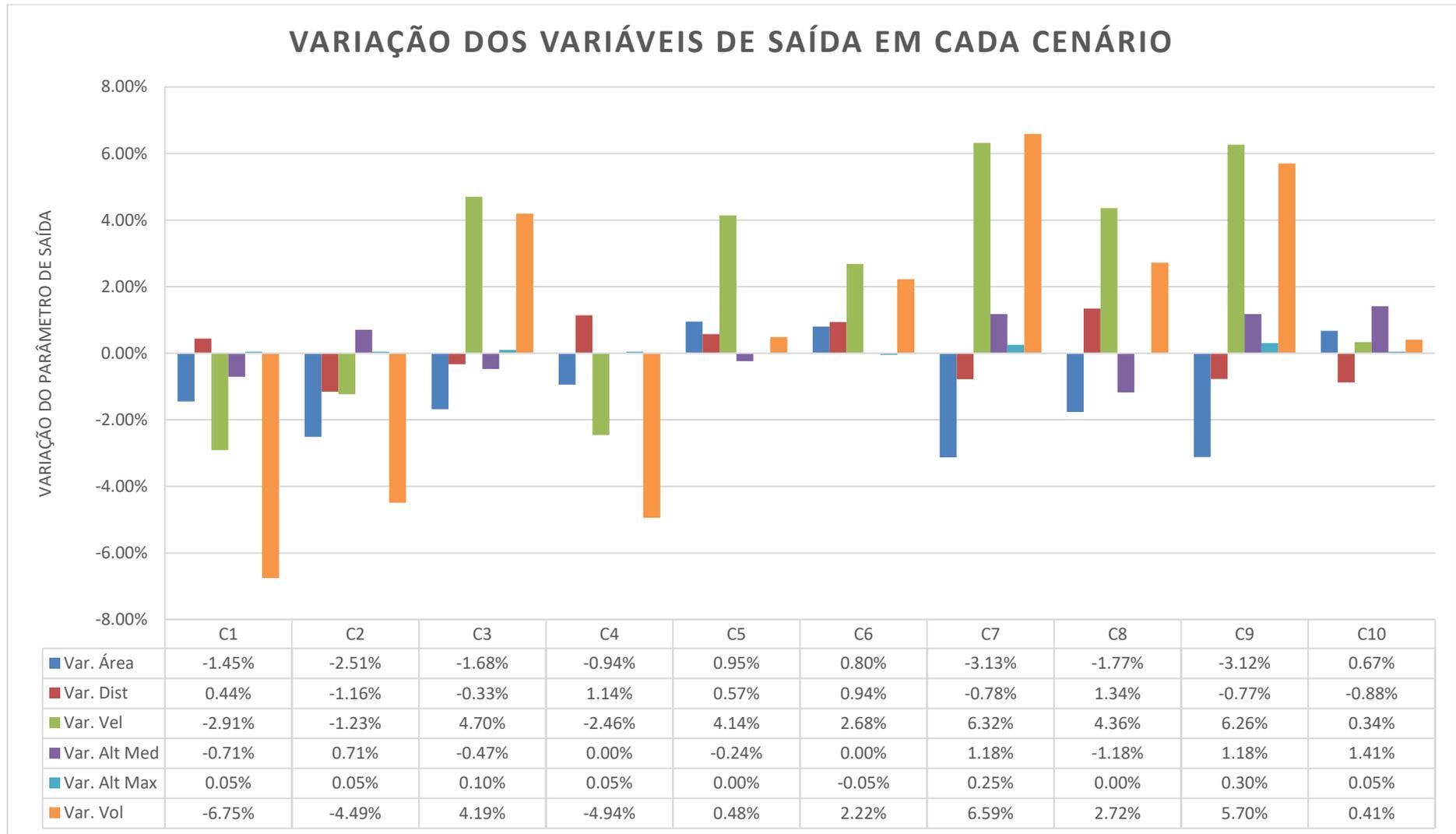


Figura 42: Variação das seis variáveis de saída analisadas para cada cenário no evento 2.

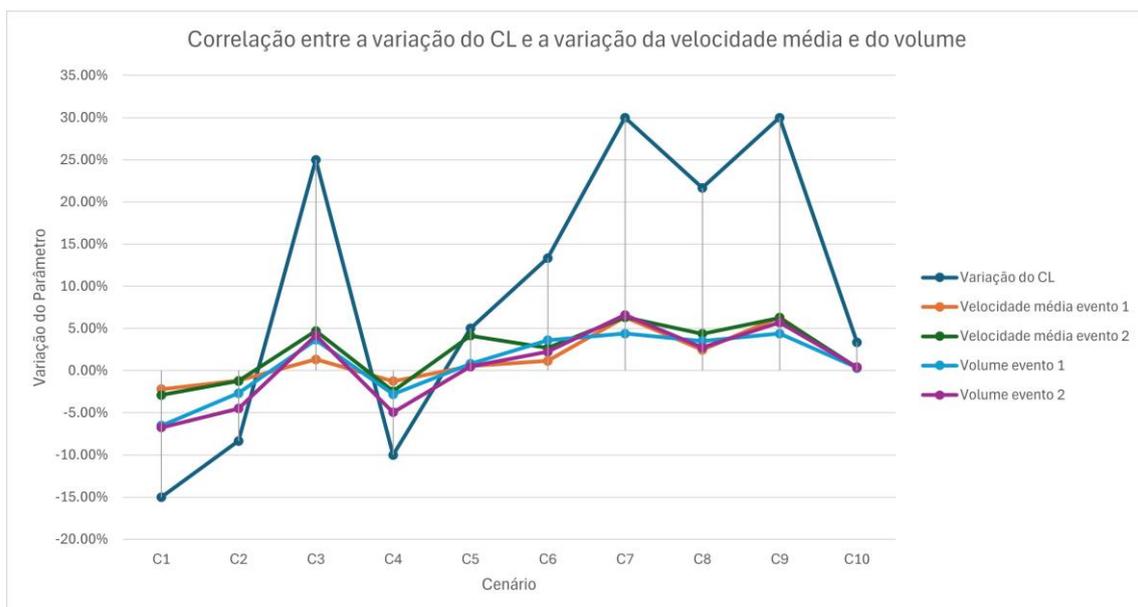


Salienta-se que dentro dos conjuntos de valores aleatórios gerados automaticamente pelo Excel, os conjuntos C7 e C9 possuem o mesmo valor de CL. Isso ocorreu ao arredondar os valores aleatórios para duas casas decimais. Então mesmo que os valores gerados aleatoriamente não fossem exatamente os mesmos, no modelo, em que se utilizou no máximo duas casas decimais como dígitos significativos, o valor foi reconhecido como sendo o mesmo. Ao analisar-se o resultado dos conjuntos C7 e C9, nota-se que ambos são muito similares, apresentando valores próximos para as variáveis de saída.

Isso reforça que dentre os parâmetros testados nessa análise AAT, o CL é o que exerce maior influência no resultado. No entanto, ainda que a tendência do resultado seja quase que inteiramente influenciada pelo CL, a magnitude da variação é ligeiramente diferente da observada na análise OAT, indicando que existe influência dos outros parâmetros no resultado, ao menos na magnitude.

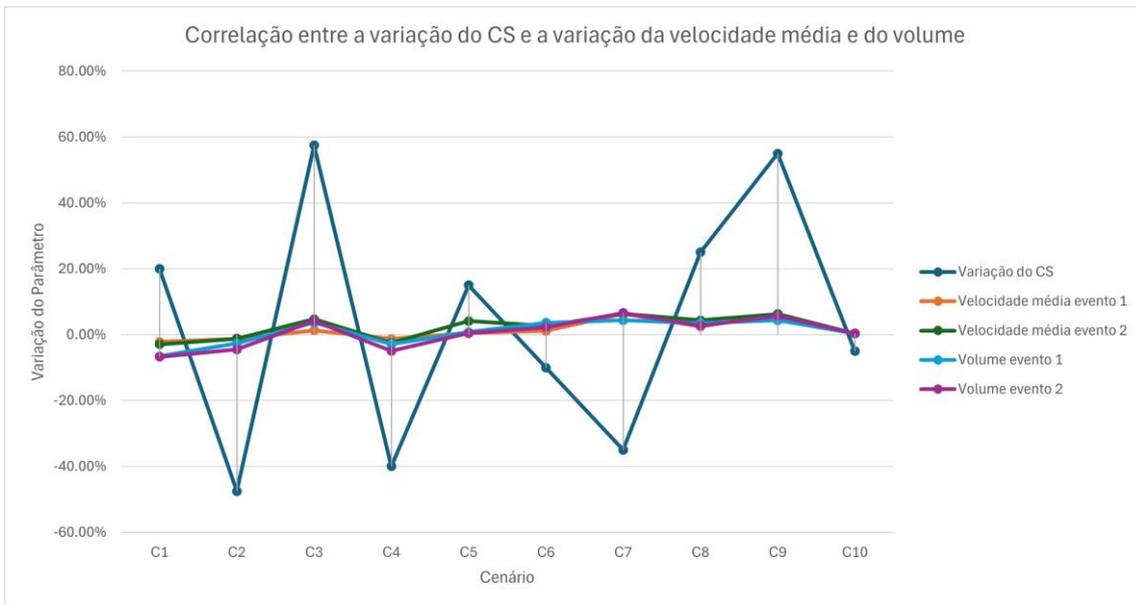
Essa correlação fica mais clara ao analisar-se as Figuras 45 até 49, onde foi plotado a variação do parâmetro em relação a variação do volume e da velocidade média. Essas duas variáveis foram selecionadas por apresentarem uma tendência similar para todos os parâmetros avaliados na análise AAT, i.e., ao aumentar o parâmetro aumenta a variável (ou não exerce influência nenhuma). No Apêndice III encontram-se os gráficos para as outras variáveis.

Figura 43: Correlação entre a variação do CL e a variação da velocidade média e do volume.



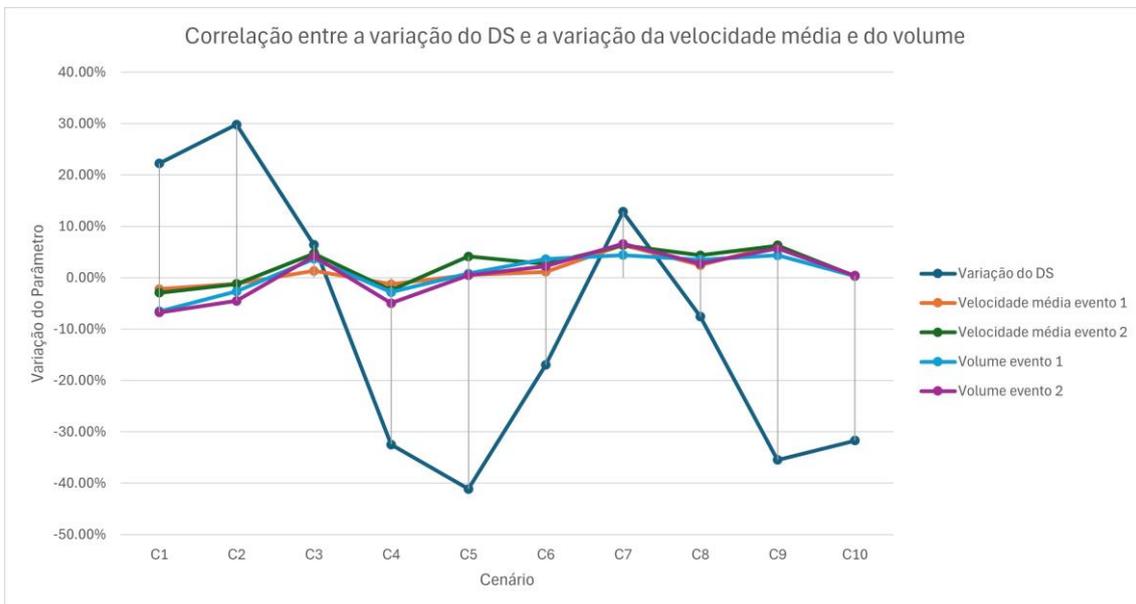
Fonte: Autor.

Figura 44: Correlação entre a variação do CS e a variação da velocidade média e do volume.



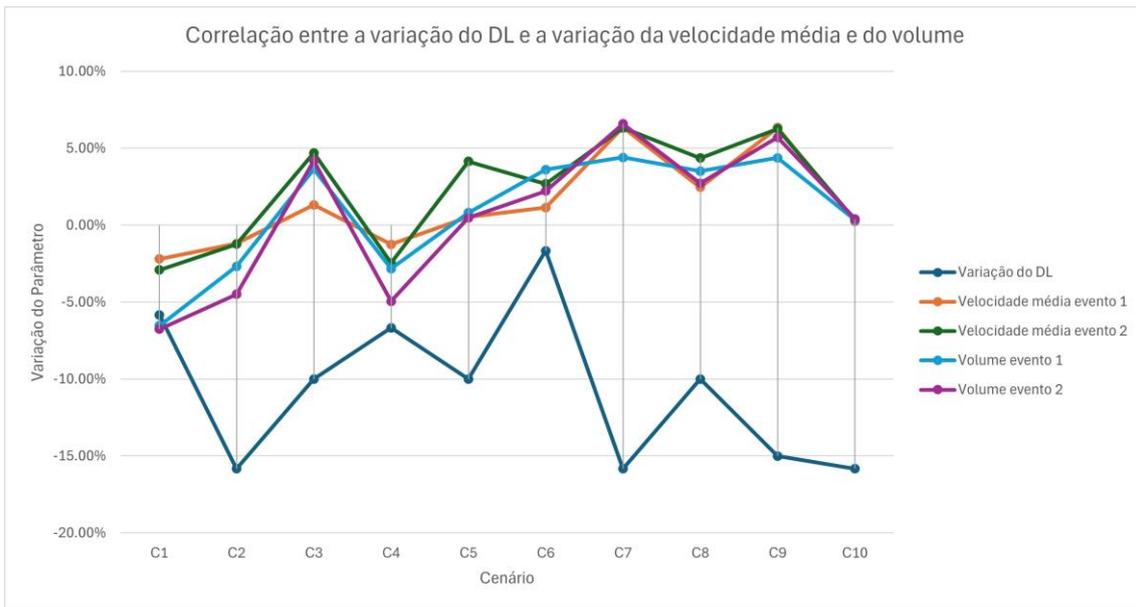
Fonte: Autor.

Figura 45: Correlação entre a variação do DS e a variação da velocidade média e do volume.



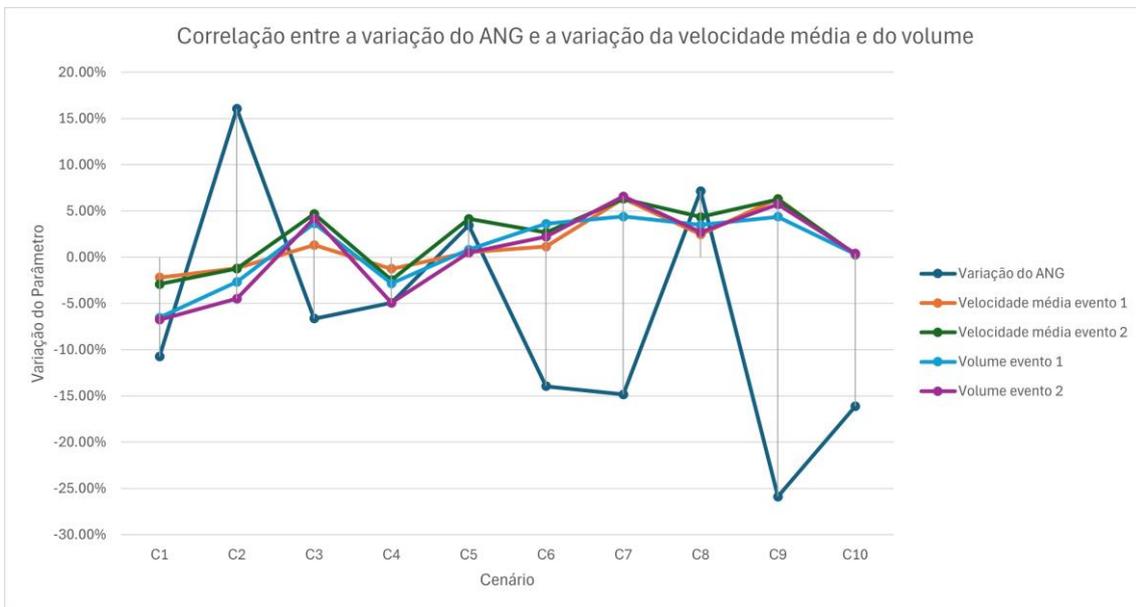
Fonte: Autor.

Figura 46: Correlação entre a variação do DL e a variação da velocidade média e do volume.



Fonte: Autor.

Figura 47: Correlação entre a variação do ANG e a variação da velocidade média e do volume.



Fonte: Autor.

Sendo assim, não foi possível estabelecer uma correlação entre a variação dos outros parâmetros com a variação dos resultados. Isso implica que possivelmente esses parâmetros não exerçam influência significativa, ou sua influência é mascarada pela variação dos outros parâmetros.

## 5.4 Recomendações e critérios de aplicação do modelo

O Quadro 2 apresenta um resumo AS para todas as variáveis e parâmetros. As colunas 2, 3, 4 e 5 classificam os parâmetros em ordem de sensibilidade, do mais sensível ao menos. Além disso, serão discutidas algumas recomendações e critérios de aplicação para o uso do modelo.

Quadro 2: Compilado da sensibilidade dos parâmetros analisados. Onde CR é o coeficiente de resistência, PM é a profundidade mínima, EM é a profundidade máxima erodível, DM é o diâmetro médio, CL é a concentração do leito móvel, ANG é o ângulo de atrito interno, VEG é a vegetação, CS é a concentração de sedimentos, DS é a densidade da partícula sólida e DL é a densidade da fase líquida.

Variável	Parâmetros mais sensíveis	Parâmetros menos sensíveis	Parâmetros que aumentam o valor da variável ao aumentar seu valor	Parâmetros que diminuem o valor da variável ao aumentar seu valor	Parâmetros sem uma tendência clara
Área total atingida	EM>PM> CR>DM> CL>ANG	VEG>CS> DS>DL	EM	PM>CR> DM>ANG> CS>DS	CL>VEG> DL
Distância final percorrida	EM>PM> CR>DM	ANG>VEG> CL>CS> DS>DL	EM	PM>CR> DM>ANG> VEG>CS> DS	CL>DL
Velocidade média	CR>DM> EM>PM> ANG>CL> VEG	CS=DS=DL	EM>ANG> CL	CR>DM> PM>VEG	CS=DS= DL
Volume depositado	CR>DM> PM>EM> VEG>CL	ANG>DS> CS>DL	EM>CL> ANG>DS> CS	CR>DM> PM	VEG>DL
Altura média	PM>EM> DM>CR> ANG	VEG>CL> CS=DS=DL	PM>CR	DM	EM>ANG> VEG>CL> CS=DS=DL
Altura máxima	PM>DM> EM>CR> ANG	CL>DS>CS= VEG=DL	PM>EM>DS	DM>CR	ANG>CL> CS=DL= VEG

O Quadro 2 traz alguns esclarecimentos importantes sobre o funcionamento do modelo e seus parâmetros de entrada. A começar pelos parâmetros mais sensíveis (EM, PM, CR e DM) repetindo-se para todas as variáveis analisadas, ou seja, pode-se afirmar que são os parâmetros mais sensíveis dentre os avaliados nesse estudo.

Em seguida, estão os parâmetros CL, ANG e VEG, aparecendo ocasionalmente entre os mais sensíveis, indicando que para determinadas variáveis esses parâmetros exercem uma influência significativa. No entanto, na ordem de sensibilidade, esses três sempre aparecem após os quatro primeiros listados, então podemos classificar a sensibilidade desses parâmetros como média.

Por fim, tem-se os parâmetros CS, DS e DL como os menos sensíveis, exercendo pouca ou nenhuma influência no resultado para algumas das variáveis analisadas. Então, esses parâmetros podem ser classificados como menos sensíveis, ou até mesmo insensíveis.

Ao levarmos em consideração um modelo para aplicação, deve-se considerar os parâmetros disponíveis e como o modelo trabalha com esses. É importante que ao aplicarmos um determinado modelo tenhamos a disposição a maior quantidade possível de parâmetros sensíveis medidas em campo. Isso por que ao utilizarmos um modelo para prever um fenômeno sempre há uma incerteza associada aos parâmetros de entrada (como discutido na seção 2.5). Ao utilizarmos dados medidos em campo, pode-se então reduzir essa incerteza, principalmente se esses parâmetros forem os que causam maior influência no resultado.

Dessa forma, ao considerar os parâmetros mais sensíveis do Morpho2DH, tem-se dois que podem ser obtidos em campo. Desconsiderando o parâmetro PM, cujo objetivo é mais relacionado a manter a estabilidade da simulação (Takebayashi, 2019) e o parâmetro CR, cujo autor do modelo recomenda manter o valor padrão (Takebayashi, 2019), tem-se os parâmetros EM e DM. O DM pode ser medido em campo através de análises granulométricas da área de aplicação, já o EM exige um pouco mais de esforço, mas é possível estimar a camada de solo no percurso do fluxo através de sondagens ou tradagem, por exemplo. Assim, com dois dos parâmetros mais sensíveis medidos, a incerteza da aplicação do Morpho2DH pode ser reduzida.

Vale ressaltar que o modelo utiliza uma simplificação (Pressuposto (i)) para entrada de material no fluxo. Nessa simplificação, basta o fluxo ter velocidade suficiente para incorporar todo o material disponível, o que faz com que o mesmo desconsidere forças resistivas como as tensões geradas pela resistência ao cisalhamento do solo. Isso

aumenta ainda mais a importância de estimar corretamente o EM no campo, visando não superestimar o volume mobilizado pelo fluxo, o que impactaria em um mapeamento de perigo com o Morpho2DH, por exemplo.

Outros parâmetros com média sensibilidade como CL e ANG também podem ser medidos em campo. O ANG pode ser estimado com ensaios de resistência ao cisalhamento, seja em laboratório, com um corpo de prova, ou diretamente em campo. Já o CL representa a concentração de material sólido inicial do leito, que pode ser medida através de amostras indeformadas (para o caso de solos) ou estimada através de análises volumétricas (para sedimentos grossos).

Outro ponto importante é o volume inicial do escorregamento, além do volume de entrada no fluxo (EM), como discutido na seção 5.1, esse parâmetro tem uma forte influência na área total atingida pelo fluxo. Sendo assim, esse parâmetro de entrada pode ser considerado também como um parâmetro importante de se obter em campo. Para escorregamentos antigos pode-se obter a profundidade média da ruptura e a área do escorregamento através de topografia. Para escorregamentos potenciais, pode-se obter a profundidade do solo.

Considerando essas informações, é recomendável então, que para utilizar o Morpho2DH de forma mais segura e aceitável se tenha o máximo possível dos parâmetros mais sensíveis estimados em campo.

Outro aspecto a ser considerado é o custo computacional para aplicação do modelo. Para as simulações conduzidas nesse estudo utilizou-se um computador com 16 Gb de RAM, armazenamento em SSD e um processador Intel(R) Core(R) i7-8700, 3,2 GHz. Com um passo de tempo de 0,01 s e uma grade de cálculo de 2x2 metros com 64.741 células de cálculo a simulação levou em média 5 horas para atingir os 800 segundos nas simulações do evento 1. Já para o evento 2, com um passo de cálculo de 0,005 s e uma grade também de 2x2 metros, no entanto, com menos células de cálculo (33.027), as simulações demoraram em torno de 2 horas para atingir os 250 segundos. Esse tempo variou um pouco para alguns parâmetros avaliados, como o DM, que com valores menores demandava mais tempo.

Esse custo computacional do Morpho2DH é discutido por Takebayashi, Fujita e Ohgushi (2022), que conduziram simulações numéricas em um computador com processador Intel(R) Xeon(R) de 2,30 GHz e 48 GB de RAM. O tempo computacional necessário foi de 72 h e 22 min para o cálculo de 1.200 s com o passo de tempo de 0,0025 s, utilizando o mesmo tipo de grade utilizado no presente estudo (com sistema de

coordenadas curvilíneas generalizadas). No entanto, o evento simulado por esses autores tinha uma magnitude muito maior, percorrendo cerca de 2,4 km até depositar por completo e demandando uma grade com 167.767 células de 2x2 metros.

Sendo assim, é importante considerar a quantidade de simulações necessárias e o tempo disponível ao escolher utilizar o Morpho2DH. Principalmente tendo em vista que os 2 eventos simulados nesse estudo não são considerados de grande porte, visto que de acordo com Takahashi, (2014) fluxos de detritos de grande magnitude podem chegar a milhões ( $10^6$ ) de metros cúbicos de volume mobilizado, podendo chegar inclusive em raras ocasiões a uma magnitude de  $10^9$  (Iverson, 1997). Nos eventos utilizados neste estudo, têm-se no máximo uma grandeza de  $10^3$ . Além disso, pelo estudo conduzido por Takebayashi, Fujita e Ohgushi (2022), para grandes magnitudes de fluxos de detritos o tempo de simulação pode ser de vários dias.

Um dos pontos positivos do Morpho2DH é a utilização da interface iRIC, que é bastante intuitiva, ajudando novos usuários a entender facilmente como rodar uma simulação com o modelo. A interface permite visualizar o resultado mesmo durante o processo de simulação. Outro ponto positivo é que nessa interface o modelo aceita diversos tipos de formatos para os arquivos de entrada, tanto para os matriciais quanto para os vetoriais, e oferece várias opções para o formato dos arquivos de saída.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente estudo foi avaliada a utilização do modelo de fluxo de lama/detritos Morpho2DH através de sua aplicação em duas regiões distintas do sul do Brasil, e posteriormente foi conduzida uma análise de sensibilidade de seus parâmetros de entrada. A partir dos resultados obtidos as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- O modelo obteve um resultado satisfatório na representação do fenômeno para os dois eventos, apresentando valores de  $EH$  de 0,71 para o evento 1 e de 0,72 para o evento 2. Durante a calibração constatou-se que o parâmetro volume inicial e profundidade máxima do leito de erosão exercem papel fundamental. Desta forma, recomenda-se que ambos sejam corretamente estimados em campo;
- Na análise de sensibilidade com abordagem OAT os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade foram o EM, PM, DM e CR. Já os parâmetros que apresentaram menor sensibilidade para algumas variáveis analisadas foram o CS, DS e DL;
- Na análise de sensibilidade com abordagem AAT, dentre os cinco parâmetros testados, houve forte influência do parâmetro CL nos resultados, com boa correlação com o volume depositado e velocidade para os dois eventos;
- Como critérios para a escolha do Morpho2DH para mapeamento de perigo destacam-se a obtenção dos valores dos parâmetros mais sensíveis em campo para redução da incerteza na simulação, e a avaliação do custo computacional devido a magnitude do evento a ser simulado. A interface do modelo e sua usabilidade são pontos positivos para novos usuários.

Vale ressaltar que considerando os pontos fortes e fracos o Morpho2DH ainda é uma boa opção para mapeamento de perigo desse fenômeno, visto que obteve bons resultados na representação dos eventos simulados nesse estudo. No entanto, o modelo necessita ainda de mais investigações acerca de outros fatores, como a sensibilidade do passo de tempo, a sensibilidade do tamanho da grade de cálculo e a sensibilidade do MDT, por exemplo. Esses fatores podem exercer influência significativa na sensibilidade de parâmetros que não apresentaram sensibilidade na presente análise, que teve esses valores fixados, como a concentração de sedimentos (CS), densidade da partícula sólida (DS) e densidade do líquido (DL).

Por fim, o Morpho2DH é mais um modelo para fluxos de detritos/lama entre os diversos disponíveis atualmente, cujo maiores informações podem ser vistas na seção 2.3.4. É importante destacar que antes de selecionar um modelo, seja ele o Morpho2DH ou algum outro dentro do leque de opções, o usuário deve buscar conhecer seu funcionamento e entender os parâmetros de entrada necessários para sua correta utilização. Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi prover mais informações acerca desse tópico para que isso possa auxiliar os futuros usuários do Morpho2DH a tomar decisões relacionadas a sua utilização.

Considerando as atividades desenvolvidas, onde foi avaliado o comportamento do Morpho2DH para alguns parâmetros e variáveis, seguem algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Avaliação da sensibilidade do passo de tempo, da resolução da grade de cálculo e do MDT;
- Investigação sobre a incerteza e faixa de aplicação do parâmetro CR;
- Quantificação de incerteza dos parâmetros de entrada a partir de dados medidos em campos;
- Aplicações do Morpho2DH em mais estudos de caso no Brasil, para compreensão da sua eficiência para os fluxos de lama/detritos ocorridos no Brasil;
- Análise de sensibilidade global dos parâmetros de entrada do Morpho2DH.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHTIKOSKI, A., HEIKKILÄ, J., ALENIUS, V., SIREN, M. Economic viability of utilizing biomass energy from young stands e the case of finland. **Biomass and Bioenergy** 32, 988e996, 2008.

ARISTIZÁBAL, E.; SÁNCHEZ, O.; Spatial and temporal patterns and the socioeconomic impacts of landslides in the tropical and mountainous Colombian Andes. **Disasters**. (2019).

ARMANINI, A., FRACCAROLLO, L., ROSATTI, G., Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels. **Comput. Geosci.** 35, 993–1006, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.11.008>.

AUGUSTO FILHO, O. (1992). Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência **Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/PCRJ. V.2. p. 691-704.

BAAS, S. et al. **Disaster risk management systems analysis: A guide book**. 1. ed. Rome: FAO-UN, 78 p., 2008.

BAGNOLD, R. A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. **Mathematical and Physical Sciences**, v. 225, p. 49–63, 1954.

BAKER, J., BARKER, T., GRAY, J. A two-dimensional depth-averaged  $\mu(I)$ -rheology for dense granular avalanches. **J. Fluid Mech.** 787, 367–395, 2016. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.684>.

BARTELT, P.; SALM, B.; GRUBER, U. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining. **Journal of Glaciology**, v. 45 (150), p. 242-254, 1999.

BASHEER, M.; ELAGIB, N. A. Performance of satellite-based and GPCC 7.0 rainfall products in an extremely data-scarce country in the Nile Basin. **Atmospheric Research**, v. 215, n. August 2018, p. 128–140, 2019.

BAUMGARTEN, A.S., KAMRIN, K. A general fluid–sediment mixture model and constitutive theory validated in many flow regimes. **J. Fluid Mech**, 861, 721–764, 2019. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.914>.

BINGHAM, E. C., GREEN, H., Plastic Material and not a Viscous Liquid; The Measurement of its Mobility and yield value. **Proc. Amer. Soc. Test Mater.** 1919.

BORCHE, A. **Métodos numéricos**. 1 ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 206 p., 2008.

BORGONOVO, E., PLISCHKE, E. Sensitivity analysis: A review of recent advances. **European Journal of Operational Research** 248, 869–887, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.032>

BRENNEN, C.E. **Fundamentals of multiphase flow**. Cambridge University Press, 2005.

CAMPBELL, J.E., CARMICHAEL, G.R., CHAI, T., MENA-CARRASCO, M., TANG, Y., BLAKE, D.R., BLAKE, N.J., VAY, S.A., COLLATZ, G.J., BAKER, I., BERRY, J.A., MONTZKA, S.A., SWEENEY, C., SCHNOOR, J., STANIER, C.O. Photosynthetic control of atmospheric carbonyl sulfide during the growing season. **Science** 322, 1085e1088, 2008.

CANNON, S.H.; SAVAGE, W.Z. A Mass change model for the estimation of debris flow runout. **Journal of Geology**, v.96, p.221-227, 1988.

CARDOZO, G. L.; ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M. Parâmetros geomorfológicos para avaliação pós-desastre de escorregamentos: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Mascarada/RS. em Anais do **I Encontro Nacional de Desastres**, Porto Alegre, Jul. 2018, 1, 8 p.

CASTRO, A. L. C. **Manual de Desastres. Volume 1: Desastres Naturais**. Brasília: MPO, 2003. 177 p.

CHRISTEN, M., KOWALSKI, J., BARTELT, P., RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. **Cold Reg. Sci. Technol.** 63, 1–14, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>.

CHUANG, C., KAO, B., CHEN, C. Simulation of the Debris Flow Due to the Potential Large-scale Landslide Area (T002) in Fuxing, Taoyuan Using iRIC Morpho2DH. In: **15th Congress INTERPRAEVENT 2022 Taiwan**. 2022. [em chinês]

COELHO NETTO, A. L.; SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; VIANNA, L. G. G.; ARAÚJO, I. S.; FERREIRA, D. L. C.; LIMA, P. H.; SILVA, A. P. A.; SILVA, R. P. **The Extreme Landslide Disaster In Brazil**. In: II WORLD LANDSLIDES FORUM - LANDSLIDES AND URBAN RISKS. Roma, 2011. *Landslide Science and Practice. Volume 6: Risk Assessment, Management and Mitigation...* Roma: Springer-Verlag, January 2011. pp. 377-384 (pp.6).

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**. v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.

CÓRDOBA, G.A., SHERIDAN, M.F., PITMAN, B., Titan2F code for lahar hazard assessment. **Bol. Soc. Geol. Mex.** 3, 611–631, 2018. <https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a3>.

COSTANZO, C., MACCHIONE, F. & VIGGIANI, G. The influence of source terms treatment in computing two dimensional flood propagation. In **Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2002** (D. Bousmar & Y. Zech eds), Louvain-la-Neuve, Belgium, 4–6 September, Balkema, The Netherlands, Vol. 1, pp. 277–282, 2002.

COSTANZO, C. MACCHIONE, F. Comparison of two-dimensional finite volume schemes for dam break problem on an irregular geometry. In **Proceedings of the XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea, Theme D**, pp. 3372–3381, 2005. (CD-ROM)

COSTABILE, P., COSTANZO, C., MACCHIONE, F. Comparative analysis of overland flow models using finite volume schemes. **Journal of Hydroinformatics** 14, 122–135, 2012. <https://doi.org/10.2166/hydro.2011.077>

- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750.000. 2007 Disponível em: <  
[http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia\\_basica/cartografia\\_regional/mapa\\_rio\\_grande\\_sul.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf)>. Acesso em 11 de março de 2023.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. Transportation Research Board. U.S. **National academy of Science Special Report**, 247: 36-75. 1996.
- CRUZ, O. **A Serra do Mar e o Litoral na Área de Caraguatatuba - Contribuição à Geomorfologia Tropical Litorânea**. São Paulo: IGEO/USP, 1974.
- DE ANGELO, A.C.S. **Precipitação extrema e modelagem hidrogeomorfológica de fluxo de detritos na Bacia do Jacaréi – Serra do Mar Paranaense**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2022.
- DENLINGER, R.P., IVERSON, R.M. Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 1. Theory and computation. **J. Geophys. Res**, 109, 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JF000085>
- DEMONTZEY, P. **L'Extinction des Torrents en France par Ic Reboisement**. Imprimerie Nationale, Paris, 1894. [em francês]
- DIAS, V.C., VIEIRA, B.C., GRAMANI, M.F.,. Parâmetros morfológicos e morfométricos como indicadores da magnitude das corridas de detritos na Serra do Mar Paulista. **Confins**, 2016. <https://doi.org/10.4000/confins.11444>
- DOMINO - Dikes and debris flows monitoring by novel optical fiber sensors. **Debris flows**. Disponível em: <<https://domino.dei.unipd.it/features/debris-flows/>> Acesso em setembro de 2023
- DREW, D.A. Mathematical modeling of two-phase flow. **Ann. Rev. Fluid Mech.** 15, 261–291, 1983. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.15.010183.001401>.
- DU, J., FAN, Z., XU, W., DONG, L. Research Progress of Initial Mechanism on Debris Flow and Related Discrimination Methods: A Review. **Front. Earth Sci.** 9, 629567, 2021. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.629567>
- EIDSVIG, U.M.K., PAPATHOMA-KÖHLE, M., DU, J., GLADE, T., VANGELSTEN, B.V. Quantification of model uncertainty in debris flow vulnerability assessment. **Engineering Geology** 181, 15–26, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.006>
- EGASHIRA, S., ITOH, T. Numerical simulation of debris flow, **Journal of Japan Society of Computational Fluid Dynamics**, Vol. 12, No. 2, pp. 33-43, 2004. [em japonês]
- ELLEN, S.D., FLEMING, R.W. Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California, in: Reviews in Engineering Geology. **Geological Society of America**, pp. 31–40, 1987. <https://doi.org/10.1130/REG7-p31>
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa, 1979.

FALAH, F., RAHMATI, O., ROSTAMI, M., AHMADISHARAF, E., DALIAKOPOULOS, I.N., POURGHASEMI, H.R. **Artificial Neural Networks for Flood Susceptibility Mapping in Data-Scarce Urban Areas**, in: *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*. Elsevier, pp. 323–336, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00014-4>

FANNIN, R.J.; WISE, M.P. An empirical–statistical model for debris flow travel distance. **Canadian Geotechnical Journal**. v.38, pp.982-994, 2001.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, n. 8, p. 861–874, 2006.

FRAGA, N. C. Clima, gestão do território e enchentes no Vale do Itajaí-SC. **Terra Livre**, v.1, n.20, p. 159-170, 2003.

FRANCK, A.G.; MENEZES, D.; KOBİYAMA, M. Avaliação da susceptibilidade a escorregamentos translacionais em Maquiné/RS e influência dos dados de campo na qualidade do mapeamento de perigo. **Caminhos de Geografia**, v.24, n.93, p.367–384, 2023. <https://doi.org/10.14393/RCG>

FRANCK, A.G., KOBİYAMA, M. Comparison of two numerical models by using a case study of 2014 debris flow disaster in Hiroshima. In: **III END - Encontro Nacional de Desastres da ABRHidro**. Niterói-RJ, Brasil, 2023.

FRANCO, A. B. Modelação computacional e experimental de escoamentos provocados por roturas de barragens., **IST/DECivil**. UTL, Lisbon, 1996.

FRANK, F., MCARDELL, B.W., OGGIER, N., BAER, P., CHRISTEN, M., VIELI, A. Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: sensitivity testing of field-data-based entrainment model. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.** 17, 801–815, 2017. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-801-2017>

GARCIA-NAVARRO, P.; ALCRUDO, F.; SAVIRON, J., 1-D open channel flow simulation using TVD-MacCormack scheme. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE 118-(10), 1359–1372, 1992.

GIANI, G. P. **Rock Slope Stability Analysis**. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, 1992.

GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M.; CORREA, G. P.; ROCHA, H. L.; GIGLIO, J. N. Desastre hidrológico resultante das chuvas intensas em Rio dos Cedros – SC. In **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande: ABRH, Anais, 2009. CD-rom. 19p.

GREGORETTI, C.; DEGETTO, M.; BOREGGIO, M. GIS-based cell model for simulating debris flow runout on a fan. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 326–340, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.054>

HAAS, T., BRAAT, L., LEUVEN, J.R.F.W., LOKHORST, I.R., KLEINHANS, M.G. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments.

**Journal of Geophysical Research F: Earth Surface**, v. 120, n. 9, p. 1949–1972, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015JF003525>

HEC-RAS 2D. **Sediment Technical Reference Manual**. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/d2sd/ras2dsedtr/latest/model-description/water-and-sediment-properties/sediment-properties>> Acesso em setembro de 2023.

HEIDKE, P., 1926. Berechnung des Erfolges und der Güte der Windstärkevorhersagen im Sturmwarnungsdienst (Cálculo do sucesso e qualidade das previsões de ventos no serviço de alerta de tempestades). **Geografika Annaler** 8, 301–349. (em alemão)

HEISELBERG, P.K.; BROHUS, H.; HESSELHOLT, A.T.; RASMUSSEN, H.E.S.; SEINRE, E. THOMAS, S. Application of Sensitivity Analysis in Design of Sustainable Buildings. **Renewable Energy**, v. 34, n. 9, p. 2030–2036, 2009.

HERSCHEL, W.H., BULKLEY, R. Konsistenzmessungen von gummi-benzollosungen. **Kolloid-Zeitschrift** 39, 291–300, 1926. <https://doi.org/10.1007/BF01432034>.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides. **Landslides**, p. 129, 2008.

HOF, A., DEN ELZEN, M., VAN VUUREN, D. Analysing the costs and benefits of climate policy: value judgements and scientific uncertainties. **Global Environmental Change**, 18 (3), 412e424, 2008.

HORTON, P., JABOYEDOFF, M., RUDAZ, B., ZIMMERMANN, M., Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.** 13, 869–885, 2013. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013>

HORTON, A.J., HALES, T.C., OUYANG, C., FAN, X. Identifying post-earthquake debris flow hazard using Massflow. **Engineering Geology**, 258, 105134, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.011>

HUANG, W., LOVERIDGE, F., SATYANAGA, A. Translational upper bound limit analysis of shallow landslides accounting for pore pressure effects. **Computers and Geotechnics**, 148, 104841, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104841>

HUNGR, O., EVANS, S. G.; BOVIS, M. J.; HUTCHINSON, J. N. A review of the classification of landslides of the flow type. **Environmental & Engineering Geoscience**, v. 7, n. 3, p. 302, 2001.

HUNGR, O.; MCDOUGALL, S.; BOVIS, M. Entrainment of material by debris flows. **Debris-flow Hazards and Related Phenomena**, p. 135–158, 2007.

HUNGR, O., MCDOUGALL, S., WISE, M., CULLEN, M. Magnitude–frequency relationships of debris flows and debris avalanches in relation to slope relief. **Geomorphology** 96, 355–365, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.03.020>

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, v. 11, n. 2, p. 167–194, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>

HUNT, M. L., ZENIT, R., CAMPBELL, C. S. BRENNEN, C. E. Revisiting the 1954 suspension experiments of R. A. Bagnold. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 452, p. 1–24, 2002.

- HUSSIN, H. Y. **Probabilistic run-out modeling of a debris flow in Barcelonnette**. Dissertação (Mestrado) - Geo-information Science and Earth Observation Course, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 107 f., 2012.
- HUTTER, K.; SVENDSEN, B.; RICKENMANN, D. Debris flow modeling: a review. **Continuum Mechanics and Thermodynamics**, v. 8, n. 1, p. 1–36, 1996.
- IMRAN, J., PARKER, G., LOCAT, J., LEE, H. 1D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows. **J. Hydraul. Eng.** 127, 959–968, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:11\(959\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:11(959)).
- ISHIKAWA, A., TAKEBAYASHI, H., FUJITA, M. Flow characteristics of mud flows generated by the Hokkaido Eastern Iburu Earthquake. **J. JSCE, Ser. B1 74**, p. I\_865-I\_870, 2019. [https://doi.org/10.2208/jscejhe.75.2\\_i\\_865](https://doi.org/10.2208/jscejhe.75.2_i_865) [em japonês]
- IVERSON, R. M. Physics of debris flow. **Review of Geophysics**, v. 35, n. 97, p. 245–296, 1997.
- IVERSON, R. M.; REID, M. E.; LAHUSEN, R. G. Debris-flow mobilization from landslides. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 25, n. 1, p. 85–138, 1997. a. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.earth.25.1.85>>
- IVERSON, R. M., DENLINGER, R. P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 106(B1), 537-552, 2001.
- IVERSON, R.M. The debris-flow rheology myth. In: D. Rickenmann and C.L. Chen (eds), **Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment** (Vol. 1, pp. 303–314). Millpress, Rotterdam, 2003.
- IVERSON, R.M., LOGAN, M., DENLINGER, R.P. Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 2. Experimental tests. **J. Geophys. Res.: Earth Surf.** 109, 1–16, 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JF000084>.
- IVERSON, R. M. Debris-flow mechanics. In: JAKOB, M.; HUNGR, O. (Eds.). **Debris flow Hazards and Related Phenomena**. 1. ed. Berlin. p. 105–134, 2005.
- IVERSON, R.M., LOGAN, M., LAHUSEN, R.G., BERTI, M. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. **J. Geophys. Res.** 115, F03005, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JF001514>.
- IVERSON, R.M., GEORGE, D.L., A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. I. Physical basis. **Proc. R. Soc. A** 470, 1–31, 2014. <https://doi.org/10.1098/rspa.2013.0819>.
- JAKOB, M; HUNGR, O. (eds.) **Debris-flow hazards and related phenomena**. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 739p.
- JAN, C.-D.; SHEN, H. W. **Review dynamic modeling of debris flows**. In: ARMANINI, A.; MICHIEU, M. (Eds.). **Recent Developments on Debris Flows**. Berlin: Springer, 1997. p. 93–116.

- JIANG, Y.-J., FAN, X.-Y., LI, T.-H., XIAO, S.-Y. Influence of particle-size segregation on the impact of dry granular flow. **Powder Technology** 340, 39–51, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.014>
- JOHNSON, C.G., KOKELAAR, B.P., IVERSON, R.M., LOGAN, M., LAHUSEN, R.G., GRAY, J.M.N.T. Grain-size segregation and levee formation in geophysical mass flows. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 117, n. F1, p. n/a-n/a, 2012. <https://doi.org/10.1029/2011JF002185>
- KIM, M., LEE, S., KWON, T.-H., CHOI, S.-K., JEON, J.-S. Sensitivity analysis of influencing parameters on slit-type barrier performance against debris flow using 3D-based numerical approach. **International Journal of Sediment Research** 36, 50–62, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.04.005>
- KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; CORRÊA, G. P., MICHEL, G. P. Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorological and geomorphic aspects, In: D. DE WRACHIEN AND C. A. BREBBIA (Eds) **Conference Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and debris Flows III**, 2010. p 77-88.
- KOBIYAMA, M., MICHEL, G. P., GOERL, R. F. Relação entre desastres naturais e floresta. **Revista Geonorte**, 3(10), 17–48, 2013. Recuperado de [//www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1128](http://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1128)
- KOBIYAMA, M.; MICHEL, G.P.; ENGSTER, E.C.; PAIXAO, M. A. Historical analyses of debris flow disaster occurrences and of their scientific investigation in Brazil. **Labor & Engenho**, v.9, p.76-89, 2015.
- KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P.; GOERL, R. F. Proposal of debris flow disasters management in Brazil based on historical and legal aspects. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v.11, n.3, p.85-93, 2019.
- KOBIYAMA, M. Unusual rainfall intensity and total amount causing more than 200 deaths in Petrópolis City, Rio de Janeiro State, Brazil, in February 2022. **GADRI Actions**, v.17, n.1, p.15-20, 2022.
- KOBIYAMA, M., MACIEL, J.G.F., RUOSO, E.G., FRANCK, A.G., FAGUNDES, M.R. Lições aprendidas com grandes desastres recentes causados por eventos hidrológicos extremos no Brasil. **Revista Geonorte** 14, 2023. <https://doi.org/10.21170/geonorte.2023.V.14.N.46.115.142>
- KUNDU, P.K., COHEN, I.M. **Fluid Mechanics**, 3 ed. Elsevier Academic Press: Berlin, 2004.
- KUO, P., FENG, Z. A Simulation of the 2016 debris flow of Hongye Village by iRIC Morpho2DH. In: **Proceedings of the 18th Conference on Current Researches September 1st – 3rd, 2020 in Geotechnical Engineering**. Taiwan, 2020. (em Chinês)
- KURYLO, J. B. **Sensitivity analysis of UBCDFLOW and debris flow travel distance in mountainous forested terrain around the Kootenay, British Columbia Region**. TCC (Graduação) - Curso de Geological Engineering, University Of British Columbia, Vancouver, 2010.
- LAIGLE, D., COUSSOT, P. Numerical modeling of mudflows. **J. Hydraul. Eng.** 123, 617–623, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:7\(617\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:7(617)).

LEONARDI, A., WITTEL, F.K., MENDOZA, M., VETTER, R., HERRMANN, H.J., Particle–Fluid–Structure interaction for debris flow impact on flexible barriers. **Comput. -Aided Civil Infrastruct. Eng.** 31, 323–333, 2016. <https://doi.org/10.1111/mice.12165>.

LeVEQUE, R.J. **Finite volume methods for hyperbolic problems, vol. 31**. Cambridge University Press: London. 2002.

LGRBwissen - Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. **Murgangähnliche Ereignisse (Fließen)**. Disponível em: < <https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/ingenieurgeologie/massenbewegungen/murgangaehnliche-ereignisse-fluessen>> Acesso em: 17 jun. 2023.

LI, X., ZHAO, J., A unified CFD–DEM approach for modeling of debris flow impacts on flexible barriers. **Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.** 42, 1643–1670, 2018. <https://doi.org/10.1002/nag.2806>.

LI, J., CAO, Z., HU, K., PENDER, G., LIU, Q., A depth-averaged two-phase model for debris flows over erodible beds. **Earth Surf. Proc. Land.** 43, 817–839, 2018. <https://doi.org/10.1002/esp.4283>.

LIU, C., YU, Z., ZHAO, S. A coupled SPH–DEM–FEM model for fluid–particlestructure interaction and a case study of Wenjia gully debris flow impact estimation. **Landslides** 115, 1–23, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01640-6>.

LOGAN, M., IVERSON, R.M., OBRYK, M.K. Video documentation of experiments at the USGS debris-flow flume 1992–2017 (ver 1.4, January 2018): **U.S. Geological Survey Open-File Report 2007–1315**, 2018 <https://doi.org/10.3133/ofr20071315>.

LOPES, A.R.S., **Desastres socioambientais e memória no sul de Santa Catarina (1974-2004)**. Tese (Doutorado). Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

LUNA, B. Q.; REMAITRE, A.; VAN ASCH, T.W.J.; MALET, J.P.; VAN WESTEN, C.J. Analysis of debris flow behavior with one dimensional run-out model incorporating entrainment. **Engineering Geology**, v. 128, p.63-75, 2012.

MACCHIONE, F., MORELLI, M. A. Practical aspects in comparing shock-capturing schemes for dam-break problems. **J. Hydraul. Engng ASCE** 129, 187–195, 2003.

MACCHIONE, F., VIGGIANI, G. Simple modelling of dam failure in a natural river. **Water Manag.** 157, 53–60, 2004.

MacCORMACK, R. W., The Effect of viscosity in hypervelocity impact cratering, **AIAA Paper**, 69-354, 1969.

MAJOR, J.; PIERSON, T. C. Debris Flow Rheology’ Experimental Analysis of Fine-grained Slurries. **Water Resources Research**, v. 28, n. 3, p. 841–857, 1992.

MARTINS AMENO, H.Z., OHARA, M., EGASHIRA, S., NAGUMO, N. OSANAI, N. Área de perigo resultante de falha em barragem de rejeitos de mineração. **Vigiles: Revista de Defesa Civil, Defesa Social e Segurança Pública**, v. 4, n.1, 2021.

MATZENAUER, R; RADIN, B; ALMEIDA, I. (Ed.). **Atlas Climático: Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura Pecuária e Agronegócio; Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), 2011.

MENG, X., WANG, Y., Modelling and numerical simulation of two-phase debris flows. **Acta Geotech.** 11, 1027–1045, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0418-4>.

MERGILI, M.; KRENN, J.; CHU, H. J. R.randomwalk v1, a multi-functional conceptual tool for mass movement routing. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 12, p. 4027– 4043, 2015

MERGILI, M., FISCHER, J.-T., KRENN, J., PUDASAINI, S.P. r. avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two phase mass flows. **Geosci. Model Dev.** 10, 553–569, 2017. <https://doi.org/10.5194/gmd10-553-2017>

MICHEL, G. P. **Estimativa da profundidade do solo e seu efeito na modelagem de escorregamentos**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2015. 164 f.

MICHEL, G.P.; SCHWARZ, H.; ABATTI, B.H.; PAUL, L.R.; SILVA, M.A.; ZANANDREA, F.; SALVADOR, C.G.; CENSI, G.; BIEHL, A.; KOBAYAMA, M. **Relatório técnico dos desastres de dezembro de 2020 nos municípios de Presidente Getúlio, Ibirama e Rio do Sul – SC**. Volume I. Porto Alegre: GPDEN/IPH/UFRGS, 2021. 53 p.

MONTANARI, A.; SHOEMAKER, C. A.; VAN DE GIESEN, N. Introduction to special section on Uncertainty Assessment in Surface and Subsurface Hydrology: An overview of issues and challenges. **Water Resources Research**, v. 45, n. 10, p. 2005–2008, 2009.

MURPHY, J., SEXTON, D., BARNETT, D., JONES, G., WEBB, M., COLLINS, M., STAINFORTH, D. Quantification of modeling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. **Nature** 430, 768e772, 2004.

NAKAMOTO, H., TAKEBAYASHI, H., MIYATA, H., FUJITA, M. Numerical simulation of debris flow considering destruction of houses. **J. JSCE**, Ser. B1 Vol.74, No.4, I\_919-I\_924, 2018. [em japonês]

NAKATANI, K.; WADA, T.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Development of “Kanako 2D (Ver.2.00),” a user-friendly one- and two-dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 1, p. 62-72. 2008.

NAQVI, M.W., KC, D., HU, L., Numerical Modelling and Sensitivity Analysis of the Pitztal Valley Debris Flow Event. **Geosciences** 13, 378, 2023. <https://doi.org/10.3390/geosciences13120378>

NAYLOR, M. A. The Origin of Inverse Grading in Muddy Debris Flow Deposits--A Review. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 50, n. 4, p. 1111–1116, 1980.

ND+. **FOTOS: tragédia que matou 21 pessoas em Blumenau completa 30 anos.** Disponível em: <https://ndmais.com.br/meio-ambiente/fotos-tragedia-que-matou-21-pessoas-em-blumenau-completa-30-anos/>. Acesso em agosto de 2023.

NELSON, J.M., SHIMIZU, Y., ABE, T., ASAH, K., GAMOU, M., INOUE, T., IWASAKI, T., KAKINUMA, T., KAWAMURA, S., KIMURA, I., KYUKA, T., MCDONALD, R.R., NABI, M., NAKATSUGAWA, M., SIMÕES, F.R., TAKEBAYASHI, H., WATANABE, Y., The international river interface cooperative: Public domain flow and morphodynamics software for education and applications. **Advances in water resources** 93, 62–74, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.017>

NERY, J. T.; BALDO, M. C.; MARTINS, M. L. O. F. O Comportamento da Precipitação na Bacia do Itajaí. **Acta Scientiarum (UEM)**, Maringá, v. 22, n.5, p. 1429-1435, 2000.

NOLAN, B., HEALY, R., TABER, P., PERKINS, K., HITT, K., WOLOCK, D. Factors influencing ground-water recharge in the eastern united states. **Journal of Hydrology** 332, 187e205, 2007.

O'BRIEN, J.S., JULIEN, P.Y. Laboratory analysis of mudflow properties. **J. Hydraul. Eng.** 114, 877–887, 1988. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:8\(877\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(877)).

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y.; FULLERTON, W. T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. **Journal of Hydrological Engineering**, v. 119, n. 2, p. 244-259, 1993. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:2\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244))

ONAKA, N., AKAMATSU, Y., KONO, T., YAMAGUCHI, K., Investigation of the complex disaster caused by debris flow and flood in the higashi river, Shimata river system due to the heavy rain in July 2018. **Journal of JSCE** 9, 291–301, 2021. [https://doi.org/10.2208/journalofjsce.9.1\\_291](https://doi.org/10.2208/journalofjsce.9.1_291)

OSTWALD, W. Ueber die rechnerische darstellung des strukturegebietes der viskosit' at. **Kolloid-Zeitschrift** 47, 176–187, 1929. <https://doi.org/10.1007/BF01496959>.

PAIXAO, M.A.; CORSEUIL, C. W.; KOBIYAMA, M.; GONZALEZ AVILA, I.; VANELLI, F.M.; OLIVEIRA, H.U.; VASCONCELLOS, S.M.; CAMPAGNOLO, K.; FAGUNDES, M.R. Occurrence of Multi-Disasters in the Mampituba River Basin, Southern Brazil, Duringthe COVID-19 Pandemic. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v.13, n.4, p.84-92, 2021a.

PAIXÃO, M.A.; KOBIYAMA, M.; FUJITA, M.; NAKATANI, K. Sensitivity analysis of debris flow simulations using Kanako-2D. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v.14, n.1, p.1-11, 2021b.

PAN, H. L., Jiang, Y., Wang, J., Ou, J. Rainfall threshold calculation for debris flow early warning in areas with scarcity of data. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 18, n. 5, p. 1395– 1409, 2018.

- PASTOR, M., HADDAD, B., SORBINO, G., CUOMO, S., DREMPETIC, V., A depth-integrated, coupled SPH model for flow-like landslides and related phenomena. **Int. J. Numer Anal Methods Geomech.** 33, 143–172, 2009. <https://doi.org/10.1002/nag.705>.
- PATRA, A.K., BAUER, A., NICHITA, C., PITMAN, E.B., SHERIDAN, M., BURSIK, M., RUPP, B., WEBBER, A., STINTON, A., NAMIKAWA, L., et al. Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. **J. Volcanol. Geoth. Res.** 139, 1–21., 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.06.014>
- PAUL, L.R. **Proposição de modelo para simulação de fluxos de detritos em escala de bacia.** Dissertação (Mestrado) Programa de pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. 2020. 208p.
- PAZ, O.L.D.S., PAULA, E.V. Sedimentologia e reconstituição volumétrica de depósitos de corridas de lama em planície aluvial: estudo na bacia do rio Jacareí, Paraná. **Sociedade & Natureza** 34, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-64381>
- PENG, C., GUO, X., WU, W., WANG, Y., Unified modelling of granular media with Smoothed Particle Hydrodynamics. **Acta Geotech.** 11, 1231–1247, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0496-y>.
- PENG, C., ZHAN, L., WU, W., ZHANG, B., A fully resolved SPH-DEM method for heterogeneous suspensions with arbitrary particle shape. **Powder Technol.** 387, 509–526, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.044>.
- PERLA, R., CHENG, T., MCCLUNG, D.M., A two-parameter model of snow-avalanche motion. **J. Glaciol.** 26, 197–207, 1980. <https://doi.org/10.3189/S002214300001073X>.
- PIANOSI, F., BEVEN, K., FREER, J., HALL, J.W., ROUGIER, J., STEPHENSON, D.B., WAGENER, T. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. **Environmental Modelling & Software** 79, 214–232, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>
- PIERSON, T.C. Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington, in: Abrahams, A.D. (Ed.), **Hillslope Processes.** Routledge, pp. 269–296., 1986. <https://doi.org/10.4324/9781003028840-13>
- PIERSON, T. C., COSTA, J. E. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. **Geological Society of America Bulletin**, 98(4), 573-586, 1987.
- PINTO, R. C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C. Movimentos de Massa como Processos Naturais de Evolução das Encostas, Estudo de Caso: Bacia do Rio Jacareí, Municípios de Morretes e Paranaguá– PR. Geoinf: **Revista do Programa de Pós-graduação em Geografia**, v. 6, n. 1, p. 23–45, 2014. <https://doi.org/10.4025/geoinga.v6i1>
- PIRULLI, M.; SORBINO, G. Assessing potential debris flow runout: A comparison of two simulation models. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 8, n. 4, p. 961–971, 2008.
- PITMAN, E.B., LE, L., A two-fluid model for avalanche and debris flows. *Philos. Trans. R. Soc. London A: Math. Phys. Eng. Sci.* 363, 1573–1601, 2005. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1596>.

POULIQUEN, O., FORTERRE, Y. Friction law for dense granular flows: application to the motion of a mass down a rough inclined plane. **J. Fluid Mech.** 453, 133–151, 2002. <https://doi.org/10.1017/S0022112001006796>.

PRE PIÑAN, R. **Evaluación riesgo por flujo hiperconcentrado detonado por precipitación en el área de influencia de la quebrada la esperanza (Pumarinri), distrito de Amarilis, Huánuco – 2021.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidad de Huánuco. Facultad de Ingeniería. Perú, 2021.

PUDASAINI, S.P. A general two-phase debris flow model. **J. Geophys. Res.: Earth Surf.** 117, 799–819, 2012. <https://doi.org/10.1029/2011JF002186>.

PUDASAINI, S.P., MERGILI, M. A Multi-Phase Mass Flow Model. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface** 124, 2920–2942, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019JF005204>.

PUDASAINI, S.P., FISCHER, J.-T., A mechanical erosion model for two-phase mass flows. **Int. J. Multiph. Flow** 132, 103416, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103416>.

PUDASAINI, S.P., KRAUTBLATTER, M., The mechanics of landslide mobility with erosion. **Nature communications** 12, 6793, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26959-5>.

RÄDLER, A.T. Invited perspectives: how does climate change affect the risk of natural hazards? Challenges and step changes from the reinsurance perspective. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.22, p.659-664, 2022. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-659-2022>

REYNOLDS, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the Motion of Water shall be Direct or Sinuous, and the Law of Resistance in Parallel Channels. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 174, p. 935– 982, 1883. Disponível em: <<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/183/1>>

RICKENMANN, D., LAIGLE, D., MCADELL, B., HÜBL, J. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. **Comput. Geosci.** 10, 241–264, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10596-005-9021-3>.

SALM, B. Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches. **Ann. Glaciol.** 18, 221–226, 1993. <https://doi.org/10.3189/S0260305500011551>.

SALTELLI, A., ANNONI, P. How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. **Environmental Modelling & Software** 25, 1508–1517, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.04.012>

SANTA CATARINA. **Fascículo Completo: Atlas Geográfico de Santa Catarina. Diversidade da natureza – Fascículo 2**, 2016. <https://doi.org/105965/978858302078322016>.

SAVAGE, S. B.; HUTTER, K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 199, n. 2697, p. 177–215, 1989.

SAVAGE, S. B.; HUTTER, K. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis. **Acta Mechanica**, v. 89, p. 201–223, 1991.

SCHLUMBERGER. Über den Muhrgang am 13 August 1876 im Wildbache von Faucon bei Barcelonnette (Nieder-alpen): in **Studien über die Arbeiten der Gebirge** (Ed. DEMONZY, P.) pp. 289–299, 1882. (em alemão)

SCHUSTER, R. L. Socioeconomic significance of landslides. In: **Landslides: Investigation and Mitigation**. Washington (DC): National Academy Press. Transportation Research Board Special Report, 247, 12-35. 1996.

SEMA - SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Diagnóstico Preliminar: Descritivo dos eventos ocorridos no dia 5 de janeiro de 2017 entre as regiões dos municípios de São Francisco de Paula e Rolante/RS**. Porto Alegre, RS: SEMA/GPDEN, 2017.

SEPTIANDY, D.D. **Pendekatan banjir lahar dingin dengan simulasi iRIC: Morpho2DH**. S1 Thesis, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2021. Disponível em: <https://etd.umy.ac.id/id/eprint/4078/> (em Indonésio)

SIDLE, R. C.; OCHIAI, H. **Landslides: Processes, Prediction, and Land Use**. Washington, DC: AGU, 2006.

SIGSC, 2023. **Sistema de Informação Geográfica Santa Catarina**. Disponível em: <http://sigsc.sc.gov.br/> Acesso em 15 de março de 2023.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S. M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v15i1.366>

SONG, X.; ZHANG, J.; ZHAN, C.; XUAN, Y.; YE, M.; XU, C. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. **Journal of Hydrology**, v. 523, p.739-757, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>.

SUWA, H.; OKANO, K.; KANNO, T. Behavior of debris flows monitored on test slopes of Kamikamihorizawa Creek, Mount Yakedake, Japan. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 2, n. 2, p. 33–45, 2013.

UNDRR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Sendai Framework at a Glance**. Disponível em: <https://www.preventionweb.net/sendai-framework/sendai-framework-at-a-glance> Acesso em 15 de março de 2023.

TAKAHASHI, T. Debris flow. **Annual Review Fluid Mechanics**, p. 57–77, 1981.

TAKAHASHI T. **Debris Flow**. IAHR Monograph, A. A.Balkema: Rotterdam, 1991.

TAKAHASHI, T. Theoretical and numerical approaches. **Spec. Publ. int. Ass. Sediment**, v. 31, p. 11–43, 2001.

TAKAHASHI, T. A Review of Japanese Debris Flow Research. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 2, n. 1, p. 1–14, 2007.

TAKAHASHI, T. **Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures**. 2a ed. London: Taylor & Francis Group, 2014. v. 1. 448 p. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00024-008-0342-8>>

TAKAHASHI, T., NAKAGAWA, H. Flood/debris flow hydrograph due to collapse of a natural dam by overtopping. **J. Hydrosoci. Hydraul. Eng.** 12, 41–49, 1994. <https://doi.org/10.2208/prohe.37.699>. In Japanese.

TAKEBAYASHI H, EGASHIRA S, FUJITA M. Horizontal two-dimensional analysis of mud flow occurred in Izuoshima Island in October 2013. **Adv River Eng, JSCE**, 2014. [Em japonês com resumo em inglês]

TAKEBAYASHI, H., FUJITA, M. Flow characteristics of debris flow which was happened in Sannodani river during Kumamoto earthquake in April, 2016. **J. JSCE, Ser. B1 74, I\_1093-I\_1098**, 2018. [https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.5\\_I\\_1093](https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.5_I_1093) [em japonês]

TAKEBAYASHI, H., FUJITA, M. Flow characteristics of debris flow which was happened in Yanohigashi, Hiroshima in July, 2018. **Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)**. 75. I\_859-I\_864, 2019. [doi.org/10.2208/jscejhe.75.2\\_I\\_859](https://doi.org/10.2208/jscejhe.75.2_I_859) [em japonês]

TAKEBAYASHI, H. Morpho2DH Tutorial - Debris/Mud flow – **iRIC 3.0 – User’s Guide**, 2019. Disponível em: < <https://i-ric.org/en/download/morpho2dh-tutorial/>>

TAKEBAYASHI, H., FUJITA, M. Flow characteristics of debris flow which was happened in Kumano, Hiroshima in July, 2018. **Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)**. 75. 362-369, 2020. [doi.org/10.2208/jscejhe.75.1\\_362](https://doi.org/10.2208/jscejhe.75.1_362) [em Japonês]

TAKEBAYASHI, H., FUJITA, M. Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensional Continuum Body Model. **Geosciences** 10, 45, 2020. <https://doi.org/10.3390/geosciences10020045>

TAKEBAYASHI, H., FUJITA, M., OHGUSHI, K. Numerical modeling of debris flows using basic equations in generalized curvilinear coordinate system and its application to debris flows in Kinryu River Basin in Saga City, Japan. **Journal of Hydrology** 615, 128636, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128636>

TANUS, M.R., PASTORE, M., BIANCHINI, R.S., GOMES, E.P.C. Estrutura e composição de um trecho de Mata Atlântica no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga, São Paulo, SP, Brasil. **Hoehnea** 39, 157–168, 2012. <https://doi.org/10.1590/S2236-89062012000100010>

THIÉRY. E. **Restauration des Montagnes. Librairie Polytech-nique Ch.** Béranger, Paris. 1914.

TOMINAGA, L. K. **Análise e mapeamento de risco**. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org). Desastres Naturais: Conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. p.147-160. Disponível em: < [https://educacao.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2023/06/Conhecer\\_para\\_Prevenir\\_3ed\\_2016.pdf](https://educacao.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2023/06/Conhecer_para_Prevenir_3ed_2016.pdf)> Acesso em: 19 jun. 2023.

TRUJILLO-VELA, M.G., GALINDO-TORRES, S.A., ZHANG, X., RAMOS-CANˆON, ´ A.M., ESCOBARVARGAS, J.A. Smooth particle hydrodynamics and discrete element method coupling scheme

for the simulation of debris flows. **Comput. Geotech.** 125, 103669, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103669>.

TRUJILLO-VELA, M.G., RAMOS-CañÓN, A.M., ESCOBAR-VARGAS, J.A., GALINDO-TORRES, S.A. An overview of debris-flow mathematical modelling. **Earth-Science Reviews** 232, 104135, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104135>

TSENG, M. H.; CHU, C. R. The simulation of dam-break flows by an improved predictor corrector TVD scheme. **Advances in Water Resources** 23(6), 637–643, 2000.

VALDATI, J. **Riscos e desastres naturais: a área de risco de inundação na sub-bacia do Rio da Pedra – Jacinto Machado/SC**. Dissertação (Mestrado) Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

VAN ASCH, T.W.J., MALET, J.-P., VAN BEEK, L.P.H., AMITRANO, D. Techniques, issues and advances in numerical modelling of landslide hazard. **Bulletin de la Société Géologique de France** 178, 65–88, 2007. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.178.2.65>

van den BOUT, B., van ASCH, T., HU, W., TANG, C.X., MAVROULI, O., JETTEN, V.G., van WESTEN, C.J., Towards a model for structured mass movements: the OpenLISEM hazard model 2.0 a. **Geosci. Model Dev.** 14, 1841–1864, 2021. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1841-2021>.

VAN DINE, D., BOVIS, M. History and goals of Canadian debris flow research, a review. **Nat. Hazard** 26, 67–80, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1015220811211>.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (Orgs.) **Special Report 176: Landslides: Analysis and Control**. Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., p. 11-33, 1978.

VOELLMY, A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen. **Schweizerische Bauzeitung, Jahrg.** 73, Ht. 12, p. 159-62; Ht. 15, p. 212-17; Ht. 17, p. 246-49; Ht. 19, p. 280–85, 1955. [em alemão]

USGS - U.S. Geological Survey. **Landslide Types and Processes**. Factsheet 2004- 3072, 2004, 4p.

WILSON, J. P. **Environmental applications of Digital Terrain Modeling**. 1a ed. Hoboken: Wiley Blackwell, 2018.

WREGE, M. S., STEINMETZ, S., REISSER JUNIOR, C., ALMEIDA, I. R. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012.

YI WU, C. **Numerical Modelling on the motion and deposition behaviors of debris flow**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), NCKU, Tainan, Taiwan 168 p., 2003.

YU, G; ZHANG, M; CHEN, H. **The dynamic process and sensitivity analysis for debris flow**. In: SASSA, K.; CANUTI, P.; YIN, Y. (eds.) **Landslide Science for a Safer Geoenvironment**. 2. ed. Springer, 2014. p. 159-165.

ZAPATA, R.; SIMIANO, L. F.; PINHEIRO, E. G. **O evento águas de março e sua avaliação de danos e perdas**. In: PINHEIRO, E. G.; PEDROSO, F. F. F. (Eds.). **Construindo um estado resiliente: o modelo paranaense para a gestão do risco de desastres**. 1. ed. Curitiba: CEPED/FUNESPAR, 2016. p. 34–51.

ZEGERS, G., MENDOZA, P.A., GARCES, A., MONTSERRAT, S. Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.** 20, 1919–1930, 2020. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1919-2020>

ZHAN, C. S.; SONG, X.; XIA, J.; TONG, C. An efficient integrated approach for global sensitivity analysis of hydrological model parameters. **Environment Modelling & Software**, v. 41, p39-52, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.10.009>.

## **Apêndice I – Resultados completos da análise OAT**

## Apêndice IA – Parâmetro CS

Presidente Getúlio											
CS		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0,2	-50%	45110,6	1696,6	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3500,64	3,12
0,4	0%	45083,9	1691,32	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3508,17	3,12
0,65	63%	45061,5	1689,5	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3510,58	3,12
0,8	100%	45051,3	1687,95	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3511,02	3,12

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,059%
0%	0,000%
63%	-0,050%
100%	-0,072%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,312%
0%	0,000%
63%	-0,108%
100%	-0,199%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,000%
0%	0,000%
63%	0,000%
100%	0,000%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,000%
0%	0,000%
63%	0,000%
100%	0,000%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,000%
0%	0,000%
63%	0,000%
100%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	-0,215%
0%	0,000%
63%	0,069%
100%	0,081%

Rolante											
CS		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0,2	-50%	8270,09	456,2	3,64	2,69	2,4	0,27	2,25	0,425	112,44	1,996
0,4	0%	8238,09	453,3	3,64	2,69	2,4	0,26	2,25	0,425	112,64	1,996
0,65	63%	8218,09	450,8	3,64	2,69	2,4	0,26	2,25	0,425	113,00	1,996
0,8	100%	8202,09	449,9	3,64	2,69	2,4	0,26	2,25	0,425	113,24	1,996

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,388%
0%	0,000%
63%	-0,243%
100%	-0,437%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,640%
0%	0,000%
63%	-0,552%
100%	-0,750%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,111%
0%	0,000%
63%	0,000%
100%	0,000%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,000%
0%	0,000%
63%	0,000%
100%	0,000%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,000%
0%	0,000%
63%	0,000%
100%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	-0,172%
0%	0,000%
63%	0,320%
100%	0,530%

## Apêndice IB – Parâmetro DL

Presidente Getúlio											
DL		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
1	-17%	45083,9	1691,12	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3508,17	3,12
1,1	-8%	45083,9	1691,45	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3508,17	3,12
1,2	0%	45083,9	1691,32	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3508,17	3,12

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,000%
-8%	0,000%
0%	0,000%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	-0,020%
-8%	0,000%
0%	-0,008%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,000%
-8%	0,000%
0%	0,000%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,000%
-8%	0,000%
0%	0,000%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,000%
-8%	0,000%
0%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,000%
-8%	0,000%
0%	0,000%

Rolante											
DL		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
1	-17%	8238,09	453,8	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,64	1,996
1,1	-8%	8238,09	452,9	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,64	1,996
1,2	0%	8238,09	453,3	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,64	1,996

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,000%
-8%	0,000%
0%	0,000%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,199%
-8%	0,000%
0%	0,088%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,000%
-8%	0,000%
0%	0,000%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,000%
-8%	0,000%
0%	0,000%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,000%
-8%	0,000%
0%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,000%
-8%	0,000%
0%	0,000%

## Apêndice IC – Parâmetro DS

Presidente Getúlio											
DS		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
1,3	-51%	45095,1	1693,5	5,91	2,83	1,92	0,76	2,86	0,908	3504,69	3,12
2	-25%	45091,8	1691,97	5,91	2,83	1,92	0,76	2,86	0,908	3506,32	3,12
2,65	0%	45083,9	1691,32	5,91	2,83	1,92	0,76	2,86	0,908	3508,17	3,12
3,5	32%	45071,7	1689,36	5,91	2,83	1,92	0,76	2,86	0,908	3509,8	3,12

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	0,025%
-25%	0,018%
0%	0,000%
32%	-0,027%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	0,129%
-25%	0,038%
0%	0,000%
32%	-0,116%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	0,000%
-25%	0,000%
0%	0,000%
32%	0,000%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	0,000%
-25%	0,000%
0%	0,000%
32%	0,000%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	0,000%
-25%	0,000%
0%	0,000%
32%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	-0,099%
-25%	-0,053%
0%	0,000%
32%	0,046%

Rolante											
DS		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
1,3	-51%	8239,2	454,9	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	110,68	1,995
2	-25%	8238,5	453,8	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	111,19	1,996
2,65	0%	8238,09	453,3	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,64	1,996
3,5	32%	8237,9	452,4	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	113,54	1,997

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	0,013%
-25%	0,005%
0%	0,000%
32%	-0,002%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	0,353%
-25%	0,110%
0%	0,000%
32%	-0,199%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	0,000%
-25%	0,000%
0%	0,000%
32%	0,000%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	0,000%
-25%	0,000%
0%	0,000%
32%	0,000%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	-0,050%
-25%	0,000%
0%	0,000%
32%	0,050%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-51%	-1,739%
-25%	-1,286%
0%	0,000%
32%	0,800%

## Apêndice ID – Parâmetro ANG

Presidente Getúlio											
ANG PG		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
23	-32%	47201,3	1753,26	5,98	3,16	1,91	0,44	2,87	0,850	3476,08	3,159
30	-12%	45268,4	1706,83	5,98	3,17	1,91	0,44	2,88	0,889	3479,40	3,142
34	0%	45083,9	1691,32	5,98	2,99	2,02	0,6	2,90	0,908	3508,17	3,120
40	18%	44504,1	1672,78	5,85	3,24	1,96	0,69	2,94	0,892	3547,11	3,110

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-32%	4,697%
-12%	0,409%
0%	0,000%
18%	-1,286%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-32%	3,663%
-12%	0,917%
0%	0,000%
18%	-1,096%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-32%	-0,863%
-12%	-0,777%
0%	0,000%
18%	1,294%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-32%	-6,428%
-12%	-2,107%
0%	0,000%
18%	-1,791%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-32%	1,266%
-12%	0,705%
0%	0,000%
18%	-0,316%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-32%	-0,91%
-12%	-0,82%
0%	0,00%
18%	1,11%

Rolante											
ANG Rol		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
23	0%	8238,09	453,3	3,6	2,47	1,32	0,1	1,87	0,425	112,64	1,996
30	30%	7920,37	447,3	3,35	2,24	1,42	0,22	1,81	0,427	115,32	1,945
34	48%	8139,17	449,4	4,55	2,35	1,59	0,33	2,21	0,422	117,85	1,961
40	74%	7988,87	447,4	4,35	2,7	1,56	0,3	2,23	0,420	119,95	1,964

Área	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
30%	-3,857%
48%	-1,201%
74%	-3,025%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
30%	-1,321%
48%	-0,869%
74%	-1,304%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
30%	-3,471%
48%	17,757%
74%	18,959%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
30%	0,467%
48%	-0,701%
74%	-1,168%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
30%	-2,535%
48%	-1,775%
74%	-1,623%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
30%	2,380%
48%	4,628%
74%	6,490%

## Apêndice IE – Parâmetro DM

Presidente Getúlio											
DM		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0,005	-95%	47647,67	1734,85	5,89	2,82	1,94	0,7	2,84	0,923	5664,75	3,27
0,01	-90%	46582,2	1702,66	5,78	2,8	1,92	0,75	2,81	0,912	5517,00	3,26
0,05	-50%	45095,2	1695,26	5,41	2,79	1,94	0,73	2,72	0,909	3756,50	3,13
0,1	0%	45083,9	1691,32	5,35	2,78	1,9	0,76	2,70	0,908	3508,17	3,12
0,2	100%	45083,9	1691,32	5,35	2,78	1,9	0,76	2,70	0,908	3508,17	3,12

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	5,687%
-90%	3,323%
-50%	0,025%
0%	0,000%
100%	0,000%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	2,574%
-90%	0,670%
-50%	0,233%
0%	0,000%
100%	0,000%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	5,190%
-90%	4,263%
-50%	0,741%
0%	0,000%
100%	0,000%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	1,652%
-90%	0,441%
-50%	0,110%
0%	0,000%
100%	0,000%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	4,808%
-90%	4,487%
-50%	0,321%
0%	0,000%
100%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	61,473%
-90%	57,261%
-50%	7,079%
0%	0,000%
100%	0,000%

Rolante											
DM		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0,005	-95%	8853,4	486,9	5,14	3,97	2,83	0,17	3,03	0,446	215,74	2,001
0,01	-90%	8777,79	472,56	4,56	4,15	1,82	0,35	2,72	0,443	208,2	2
0,05	-50%	8263,8	454,6	3,65	2,66	2,41	0,26	2,25	0,427	114,59	1,999
0,1	0%	8238,09	453,3	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,6386	1,996
0,2	100%	8238,09	453,3	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,6386	1,996

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	7,469%
-90%	6,551%
-50%	0,312%
0%	0,000%
100%	0,000%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	7,412%
-90%	4,249%
-50%	0,287%
0%	0,000%
100%	0,000%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	35,459%
-90%	21,700%
-50%	0,447%
0%	0,000%
100%	0,000%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	4,941%
-90%	4,235%
-50%	0,471%
0%	0,000%
100%	0,000%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	0,251%
-90%	0,200%
-50%	0,150%
0%	0,000%
100%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-95%	91,533%
-90%	84,839%
-50%	1,732%
0%	0,000%
100%	0,000%

## Apêndice IF – Parâmetro CR

Presidente Getúlio											
CR		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m²)	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m³)	Altura máxima (m)
36	-50%	51064,23	1825,46	6,28	3,91	2,2	0,66	3,26	0,874	6715,65	3,12
54	-25%	46895,28	1753,22	5,99	3,04	2,09	0,88	3,00	0,906	4243,98	3,12
72	0%	45083,9	1691,32	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3508,17	3,12
90	25%	44209,26	1663,37	5,37	2,23	1,82	0,56	2,50	0,915	3000,83	3,12

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	13,265%
-25%	4,018%
0%	0,000%
25%	-1,940%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	7,931%
-25%	3,660%
0%	0,000%
25%	-1,653%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	14,776%
-25%	5,541%
0%	0,000%
25%	-12,225%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	-3,744%
-25%	-0,220%
0%	0,000%
25%	0,771%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	0,000%
-25%	0,000%
0%	0,000%
25%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	91,429%
-25%	20,974%
0%	0,000%
25%	-14,462%

Rolante											
CR		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m²)	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m³)	Altura máxima (m)
36	-50%	10095,97	510,39	5,26	4,31	3,51	0,1	3,30	0,399	158,21	2,067
54	-25%	9082,8	505,19	4,28	4,25	2,54	0,18	2,81	0,413	125,73	2,02
72	0%	8238,09	453,3	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,6386	1,996
90	25%	7991,3	451,8	3,58	2,32	1,99	0,15	2,01	0,423	103,87	1,947

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	22,552%
-25%	10,254%
0%	0,000%
25%	-2,996%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	12,594%
-25%	11,447%
0%	0,000%
25%	-0,331%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	47,427%
-25%	25,839%
0%	0,000%
25%	-10,067%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	-6,118%
-25%	-2,824%
0%	0,000%
25%	-0,471%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	3,557%
-25%	1,202%
0%	0,000%
25%	-2,455%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-50%	40,459%
-25%	11,623%
0%	0,000%
25%	-7,785%

## Apêndice IG – Parâmetro VEG

Presidente Getúlio											
VEG		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0	-100%	44513,35	1704,7	5,9	3,09	1,94	0,79	2,93	0,912	3202,7	3,12
3	0%	45083,9	1691,32	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3508,17	3,12
4,5	50%	45452,31	1680,64	5,47	2,4	1,84	0,49	2,55	0,907	3277,77	3,12
6	100%	45064,68	1666,21	5,46	2,4	1,83	0,49	2,55	0,911	3459,53	3,12

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	-1,266%
0%	0,000%
50%	0,817%
100%	-0,043%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	0,791%
0%	0,000%
50%	-0,631%
100%	-1,485%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	3,078%
0%	0,000%
50%	-10,290%
100%	-10,466%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	0,441%
0%	0,000%
50%	-0,110%
100%	0,330%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	0,000%
0%	0,000%
50%	0,000%
100%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	-8,707%
0%	0,000%
50%	-6,568%
100%	-1,386%

Rolante											
VEG		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0	-100%	8340,41	456,77	3,63	2,66	2,82	0,09	2,30	0,422	156,92	1,996
3	0%	8238,09	453,3	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,64	1,996
4,5	50%	8023,41	446,02	3,63	2,66	2,18	0,12	2,15	0,433	127,9	1,996
6	100%	8001,33	445,78	3,63	2,66	1,94	0,15	2,10	0,433	120,07	1,996

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	1,242%
0%	0,000%
50%	-2,606%
100%	-2,874%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	0,765%
0%	0,000%
50%	-1,606%
100%	-1,659%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	2,908%
0%	0,000%
50%	-3,915%
100%	-6,264%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	-0,706%
0%	0,000%
50%	1,882%
100%	1,882%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	0,000%
0%	0,000%
50%	0,000%
100%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-100%	39,313%
0%	0,000%
50%	13,549%
100%	6,598%

## Apêndice IH – Parâmetro EM

<b>Presidente Getúlio</b>											
<b>EM</b>		<b>Variação Parâmetros (%)</b>									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0,01	-90%	41191,7	1618,12	5,89	2,48	1,7	0,7	2,69	0,955	3114,36	3,12
0,1	0%	45083,9	1691,32	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3508,17	3,12
0,15	50%	46872,46	1811,54	5,89	3,03	1,95	0,83	2,93	0,931	3698,1	3,12
0,2	100%	49682,58	1853,79	5,89	3,2	2,17	0,89	3,04	0,945	4112,1	3,12

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	-8,633%
0%	0,000%
50%	3,967%
100%	10,200%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	-4,328%
0%	0,000%
50%	7,108%
100%	9,606%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	-5,277%
0%	0,000%
50%	2,902%
100%	6,860%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	5,176%
0%	0,000%
50%	2,533%
100%	4,075%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	0,000%
0%	0,000%
50%	0,000%
100%	0,000%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	-11,226%
0%	0,000%
50%	5,414%
100%	17,215%

Rolante											
EM		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0,01	-90%	7959,87	439,6	3,63	2,66	1,98	0,2	2,12	0,418	95,63	1,899
0,1	0%	8238,09	453,3	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,64	1,996
0,15	50%	18480,52	593,52	3,63	2,66	2,46	0,54	2,32	0,369	132,36	1,996
0,2	100%	24459,45	629,17	3,63	2,66	2,73	0,91	2,48	0,421	158,69	1,999

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	-3,377%
0%	0,000%
50%	124,330%
100%	196,907%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	-3,022%
0%	0,000%
50%	30,933%
100%	38,798%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	-5,257%
0%	0,000%
50%	3,915%
100%	11,074%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	-1,647%
0%	0,000%
50%	-13,176%
100%	-0,941%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	-4,860%
0%	0,000%
50%	0,000%
100%	0,150%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-90%	-15,100%
0%	0,000%
50%	17,509%
100%	40,884%

## Apêndice II – Parâmetro PM

Presidente Getúlio											
PM		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0,01	0%	45083,9	1691,32	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3508,17	3,12
0,015	50%	41872,86	1587,09	5,76	2,51	1,79	0,89	2,74	0,928	1644,11	3,16
0,02	100%	38739,48	1521,85	5,32	2,44	1,77	0,66	2,55	0,955	1230,59	3,19

Área	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	-7,122%
100%	-14,072%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	-6,163%
100%	-10,020%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	-3,694%
100%	-10,378%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	2,203%
100%	5,176%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	1,282%
100%	2,244%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	-53,135%
100%	-64,922%

Rolante											
PM		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0,01	0%	8238,09	453,3	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,6386	1,996
0,015	50%	6392,24	386,13	4,13	2,94	1,22	0,21	2,13	0,48	70,19	2
0,02	100%	5294,77	282,69	3,84	2,52	1,47	0,07	1,98	0,51	40,42	2,041

Área	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	-22,406%
100%	-35,728%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	-14,818%
100%	-37,637%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	-4,922%
100%	-11,633%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	12,941%
100%	20,000%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	0,200%
100%	2,255%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
0%	0,000%
50%	-37,686%
100%	-64,115%

## Apêndice IJ – Parâmetro CL

Presidente Getúlio											
CL		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
0,5	-17%	44461,4	1709,15	5,39	2,71	1,78	0,47	2,59	0,906	3437,54	3,13
0,6	0%	45083,9	1691,32	5,89	2,82	1,9	0,76	2,84	0,908	3508,17	3,12
0,7	17%	47317,24	1719,05	6,04	2,93	2,08	0,52	2,89	0,901	3561,07	3,11
0,8	33%	45052,7	1708,55	5,92	2,9	2,07	0,85	2,94	0,911	3654,84	3,11

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	-1,381%
0%	0,000%
17%	4,954%
33%	-0,069%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	1,054%
0%	0,000%
17%	1,640%
33%	1,019%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	-8,971%
0%	0,000%
17%	1,759%
33%	3,254%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	-0,220%
0%	0,000%
17%	-0,771%
33%	0,330%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,321%
0%	0,000%
17%	-0,321%
33%	-0,321%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	-2,013%
0%	0,000%
17%	1,508%
33%	4,181%

Rolante											
CL		Variação Parâmetros (%)									
Valor	Variação	Área (m²)	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m³)	Altura máxima (m)
0,5	-17%	8127,7	453,9	3,71	2,57	1,86	0,46	2,15	0,421	103,98	1,999
0,6	0%	8238,09	453,3	3,63	2,66	2,39	0,26	2,24	0,425	112,64	1,996
0,7	17%	8456,62	458,1	3,85	2,73	2,21	0,32	2,28	0,422	127,98	1,994
0,8	33%	8354,45	457,3	3,76	3,34	1,77	0,37	2,31	0,425	129,69	2

Área	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	-1,340%
0%	0,000%
17%	2,653%
33%	1,412%

Distância	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,132%
0%	0,000%
17%	1,059%
33%	0,882%

Velocidade média	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	-3,803%
0%	0,000%
17%	1,902%
33%	3,356%

Altura média	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	-0,941%
0%	0,000%
17%	-0,706%
33%	0,000%

Altura máxima	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	0,150%
0%	0,000%
17%	-0,100%
33%	0,200%

Volume depositado	
Variação Entrada	Variação saída
-17%	-7,688%
0%	0,000%
17%	13,619%
33%	15,137%

## **Apêndice II – Resultados completos da análise AAT**

Presidente Getúlio AAT										
Cenário	Variação Parâmetros (%)									
	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
C1	44263,37	1678,47	5,71	2,75	2,05	0,61	2,78	0,909	3279,09	3,105
C2	44281,41	1684,05	5,88	2,83	2,00	0,52	2,81	0,904	3414,48	3,113
C3	44425,68	1702,72	5,91	2,95	2,04	0,62	2,88	0,911	3636,22	3,122
C4	44403,13	1679,31	5,72	2,87	2,02	0,62	2,81	0,895	3409,24	3,11
C5	45799,94	1702,06	5,91	2,87	2,03	0,62	2,86	0,909	3536,59	3,125
C6	45351,88	1699,11	5,78	2,95	2,19	0,58	2,87	0,918	3634,81	3,113
C7	44321,98	1704,2	5,97	3,02	2,32	0,78	3,02	0,911	3662,53	3,095
C8	44362,56	1698,48	5,76	2,85	2,35	0,69	2,91	0,907	3631,31	3,11
C9	44326,49	1704,16	5,97	3,02	2,32	0,78	3,02	0,911	3661,83	3,095
C10	45298,45	1696,95	5,95	2,80	1,85	0,80	2,85	0,918	3520,10	3,123

Rolante AAT										
Cenário	Variação Parâmetros (%)									
	Área (m <sup>2</sup> )	Distância (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	Velocidade média	Altura média (m)	Vol dep (m <sup>3</sup> )	Altura máxima (m)
C1	8118,34	455,3	3,42	3,1	2,08	0,08	2,17	0,422	105,03	1,997
C2	8031,43	448,06	3,45	3,3	2	0,08	2,21	0,428	107,58	1,997
C3	8099,64	451,82	3,65	3,25	2,38	0,08	2,34	0,423	117,36	1,998
C4	8160,47	458,45	3,72	3	1,92	0,08	2,18	0,425	107,07	1,997
C5	8316,33	455,9	3,61	3,14	2,48	0,08	2,33	0,424	113,18	1,996
C6	8304,29	457,54	3,53	3,13	2,44	0,08	2,30	0,425	115,14	1,995
C7	7980,10	449,75	3,755	3,22	2,45	0,08	2,38	0,43	120,06	2,001
C8	8092,57	459,37	3,84	3,11	2,3	0,08	2,33	0,42	115,7	1,996
C9	7981,27	449,8	3,75	3,22	2,45	0,08	2,38	0,43	119,06	2,002
C10	8293,31	449,32	3,65	3,02	2,22	0,08	2,24	0,431	113,1	1,997

**Apêndice III – Gráficos com as demais variáveis que não apresentaram correlação com os parâmetros**

Figura AIII-1: Correlação entre a variação do CL e a variação da área.

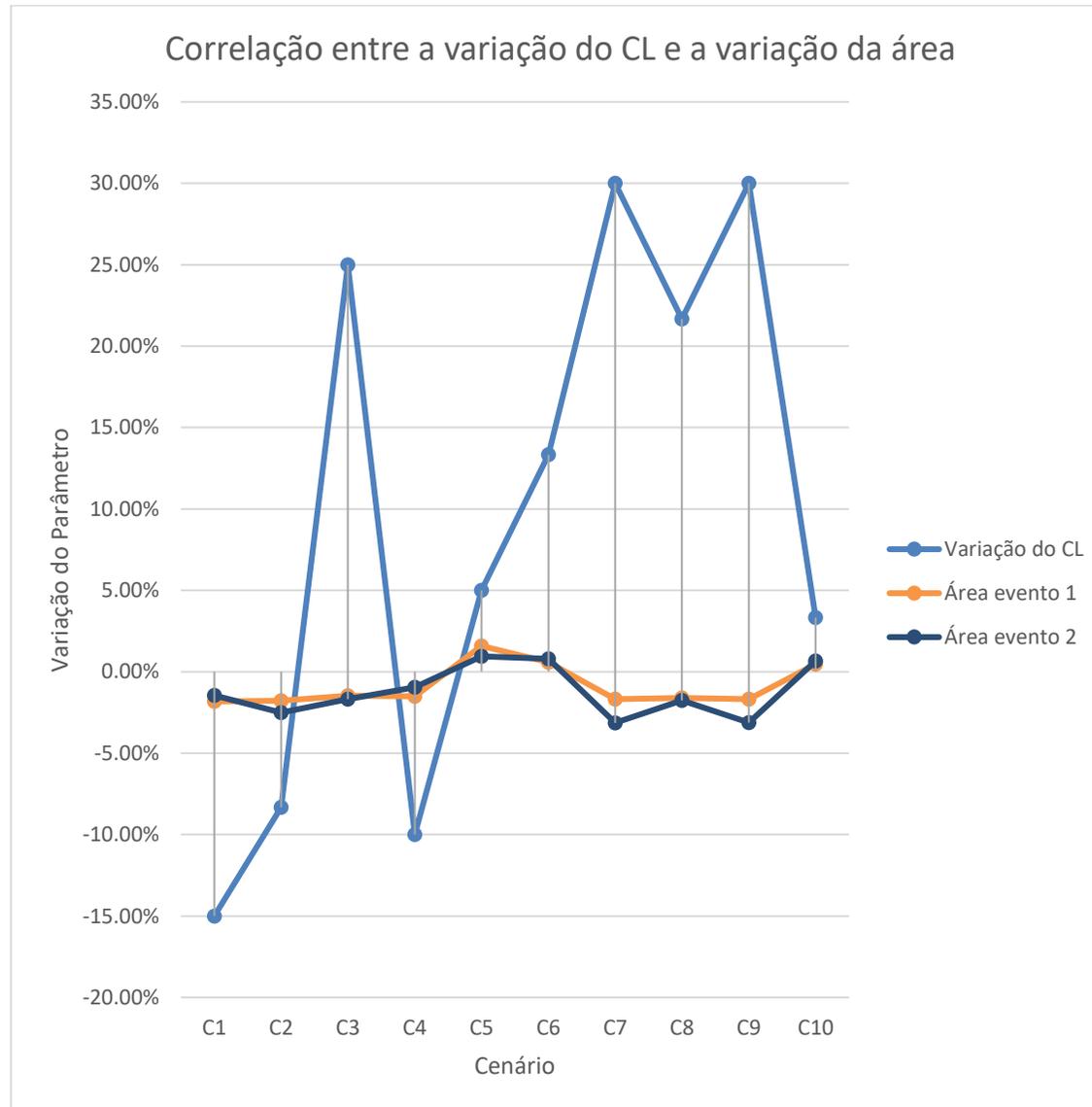


Figura AIII-2: Correlação entre a variação do CL e a variação da altura máxima.

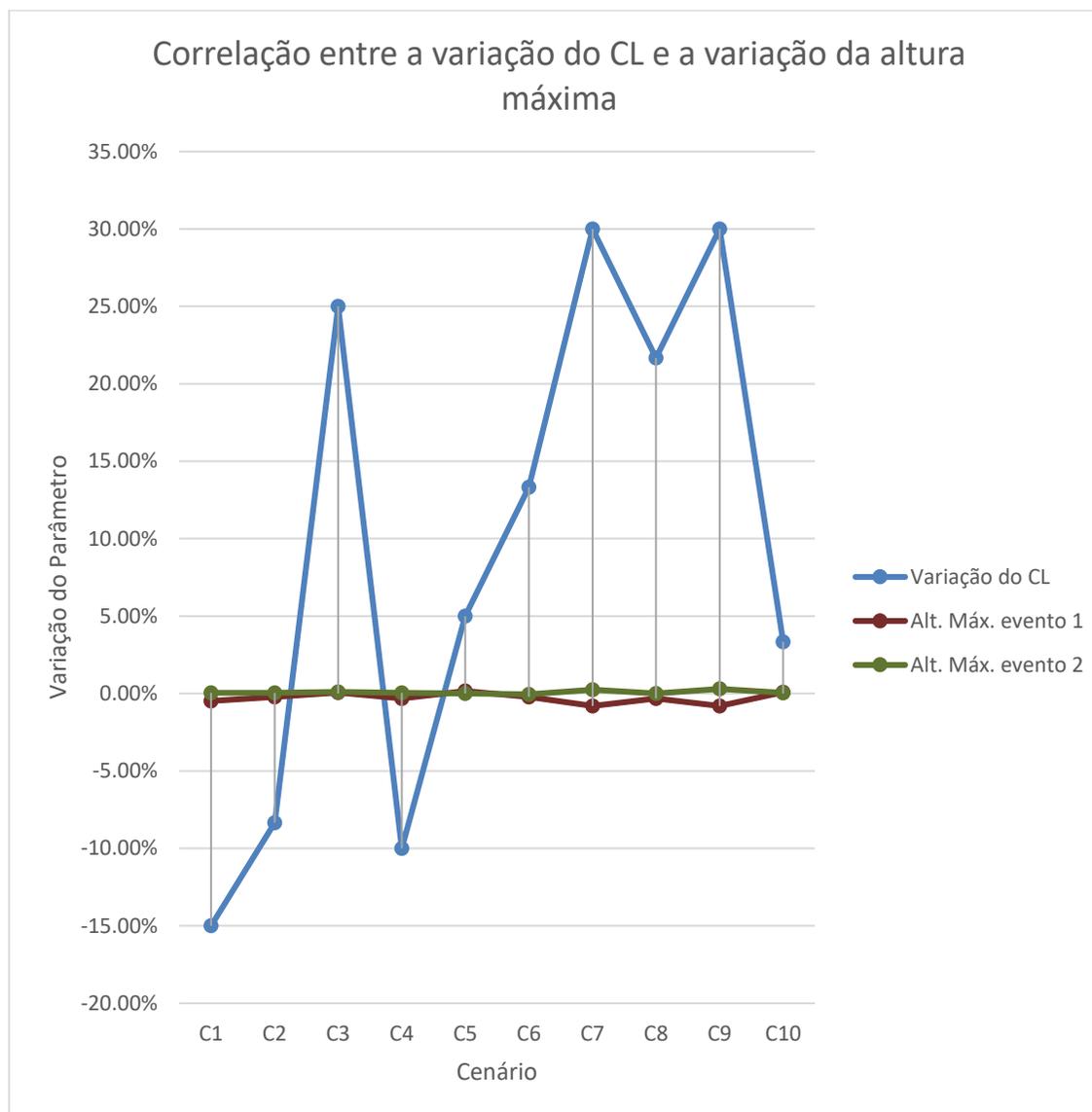


Figura AIII-3: Correlação entre a variação do CL e a variação da altura média.

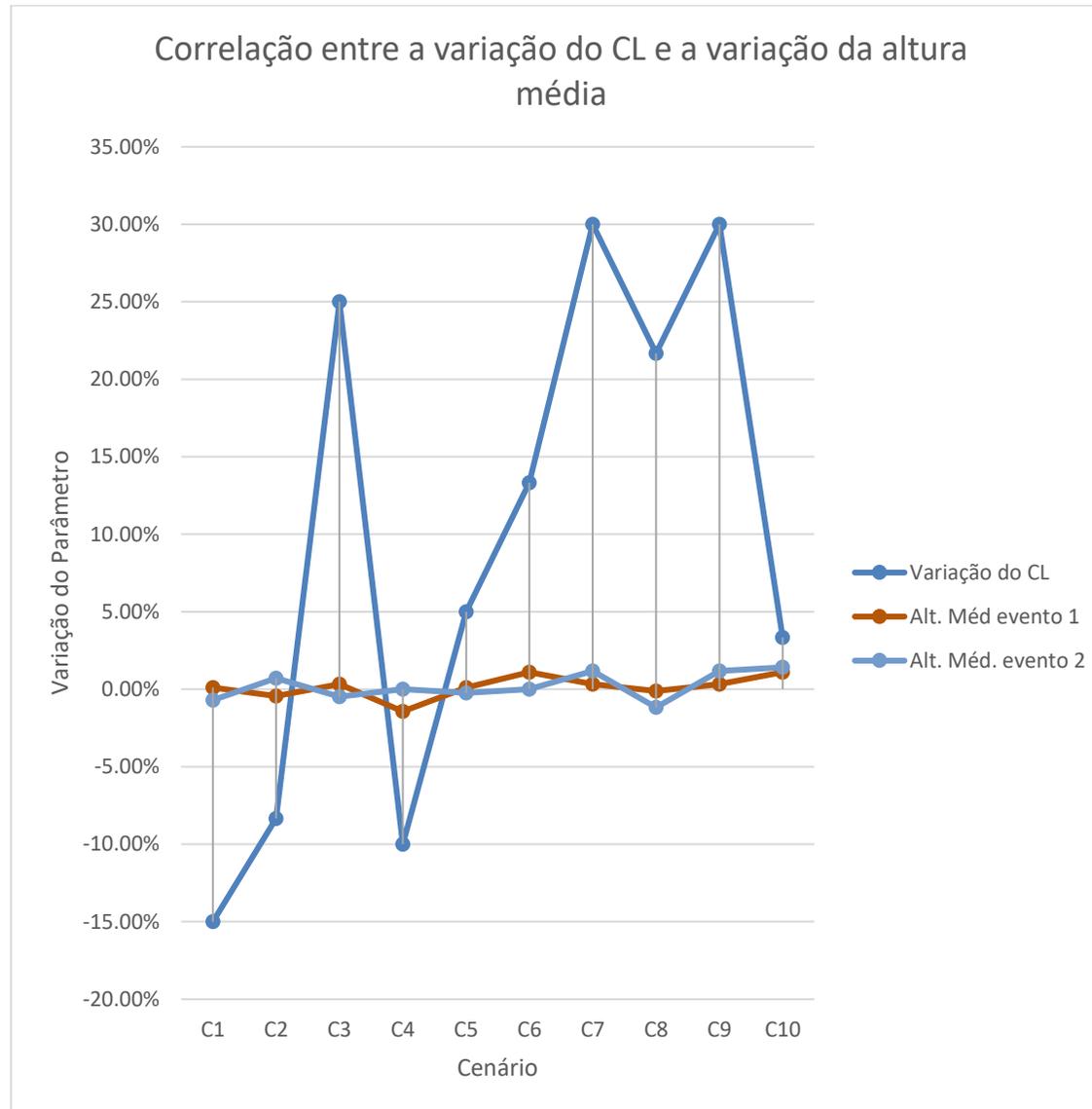


Figura AIII-4: Correlação entre a variação do CL e a variação da distância.

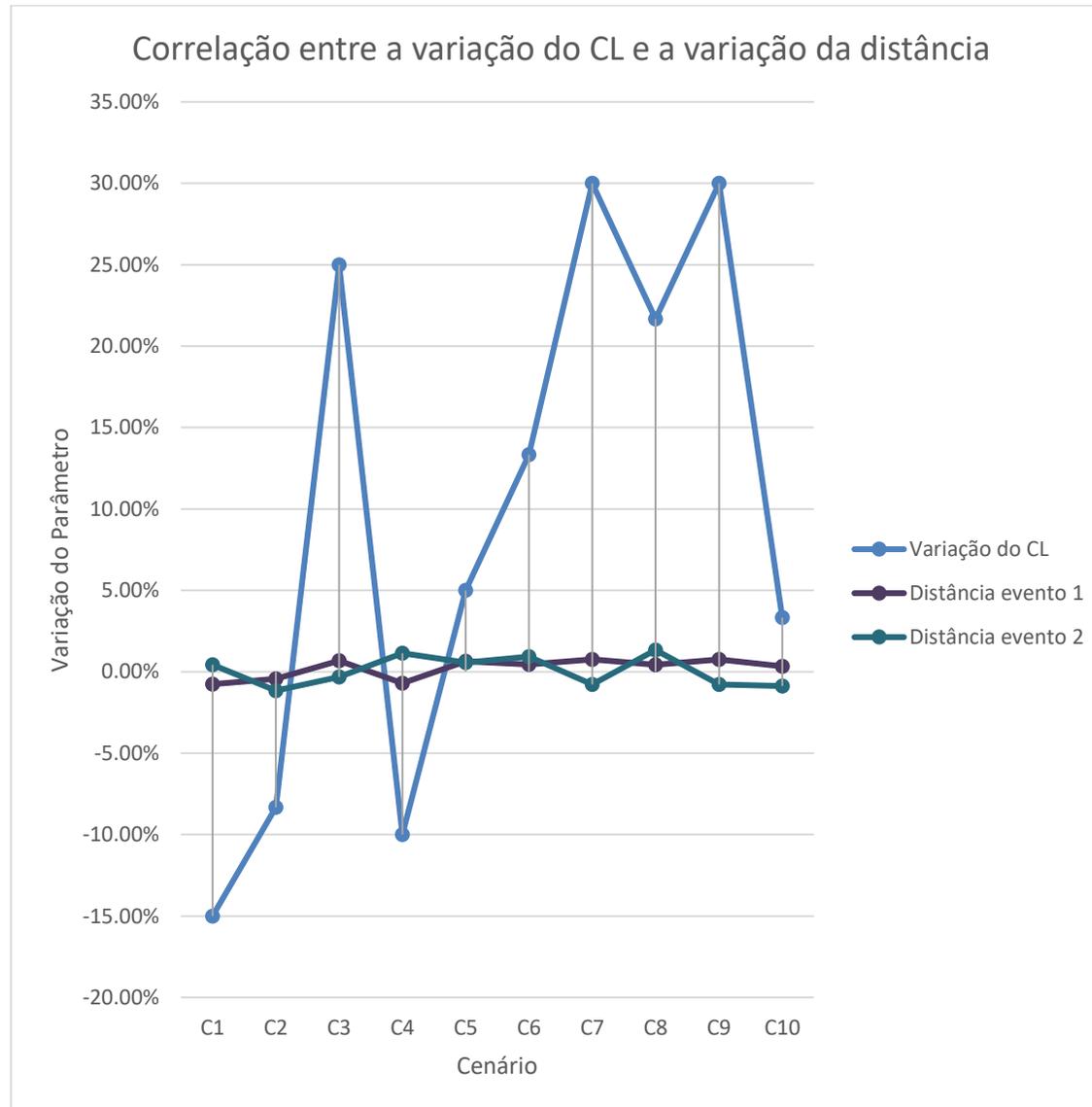


Figura AIII-5: Correlação entre a variação do CS e a variação da área.

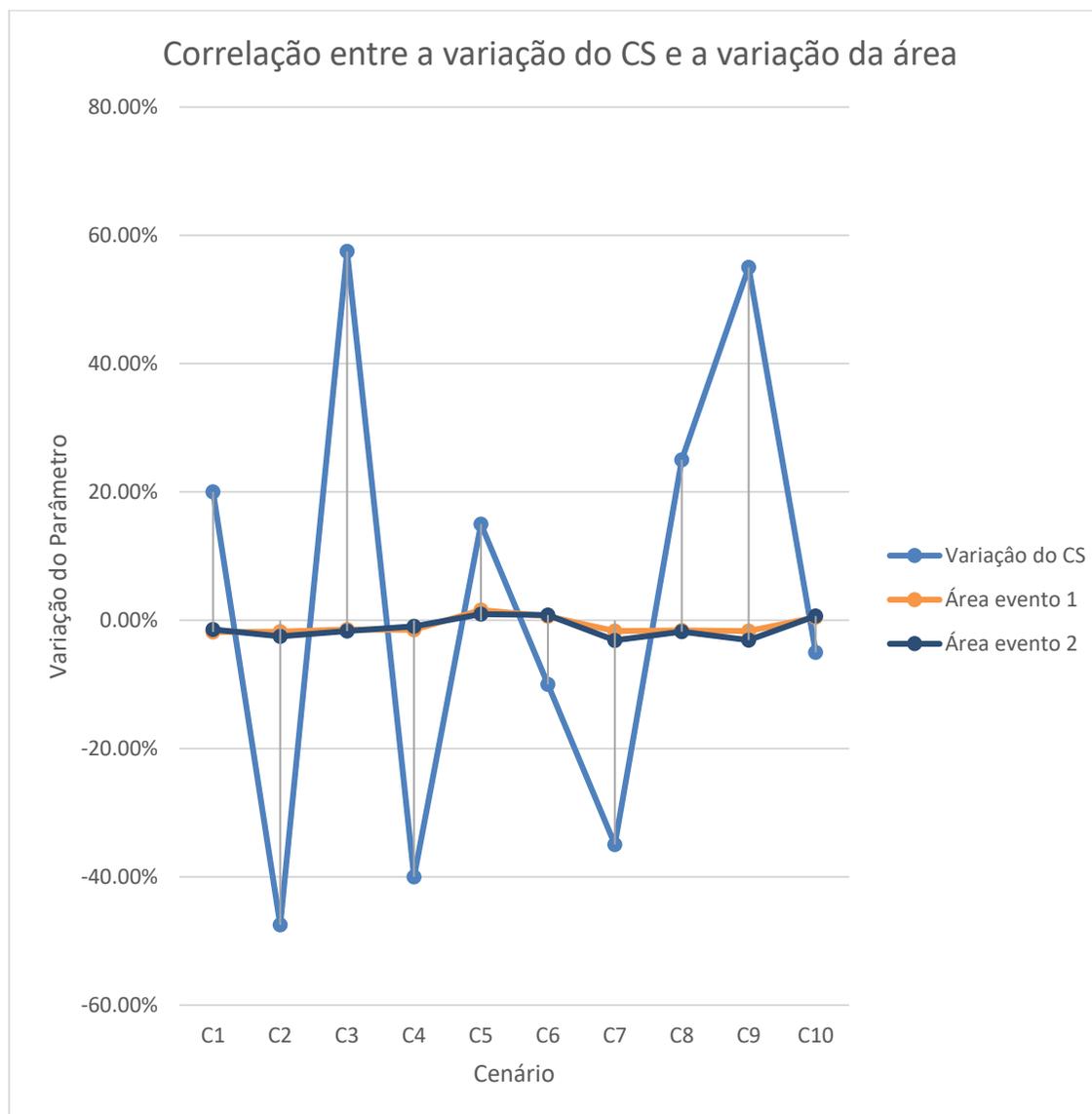


Figura AIII-6: Correlação entre a variação do CS e a variação da altura máxima.

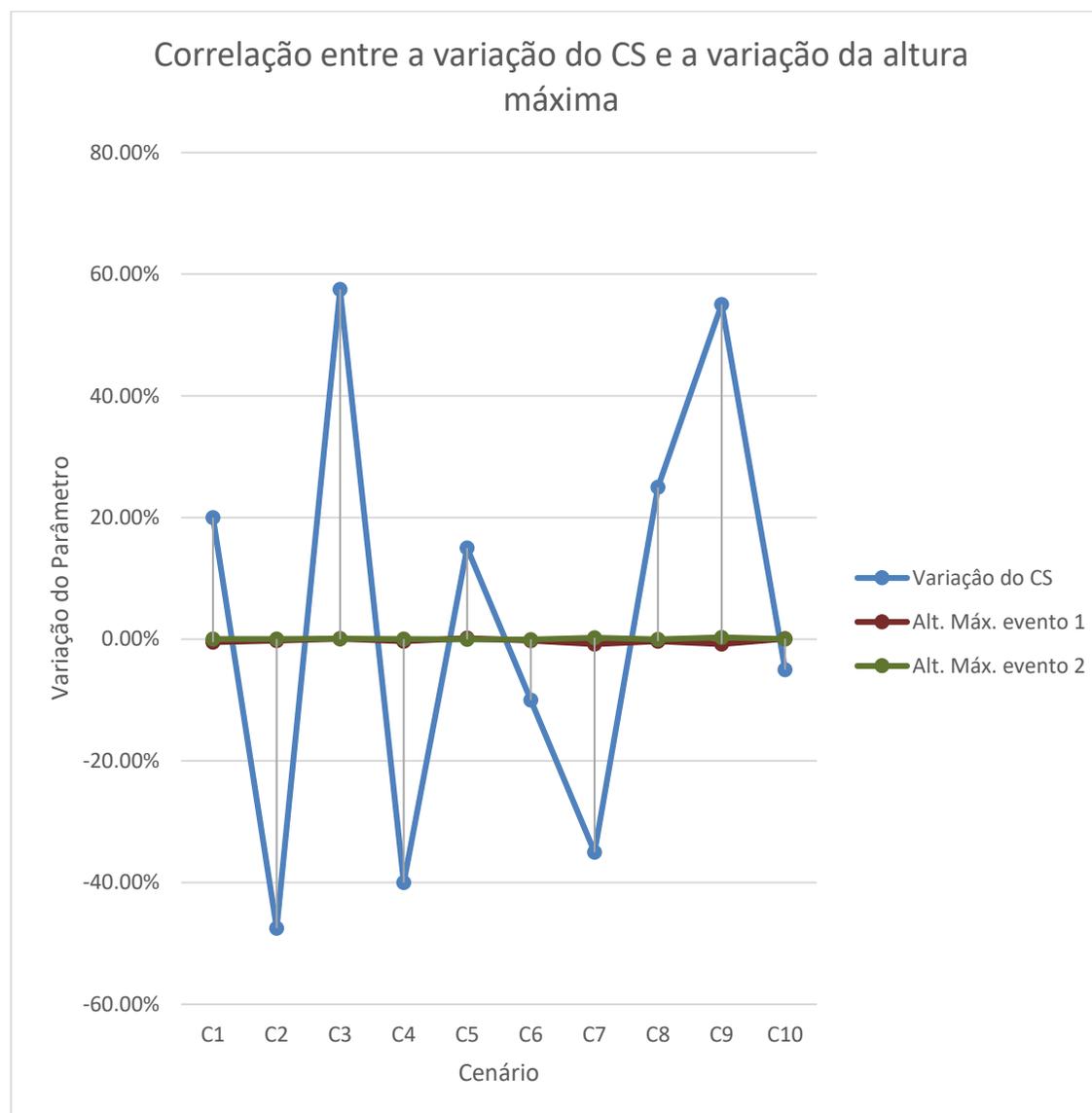


Figura AIII-7: Correlação entre a variação do CS e a variação da altura média.

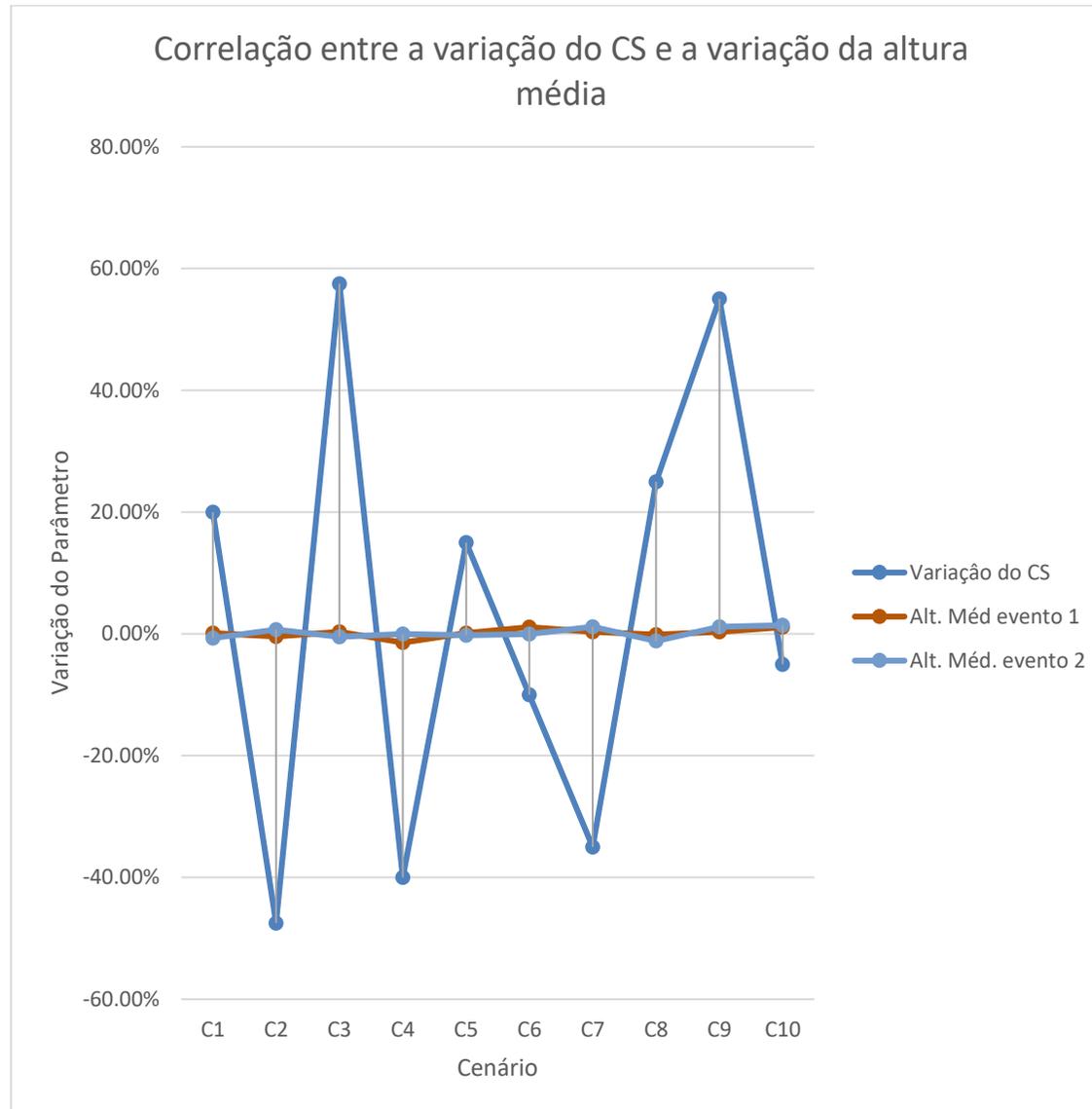


Figura AIII-8: Correlação entre a variação do CS e a variação da distância.

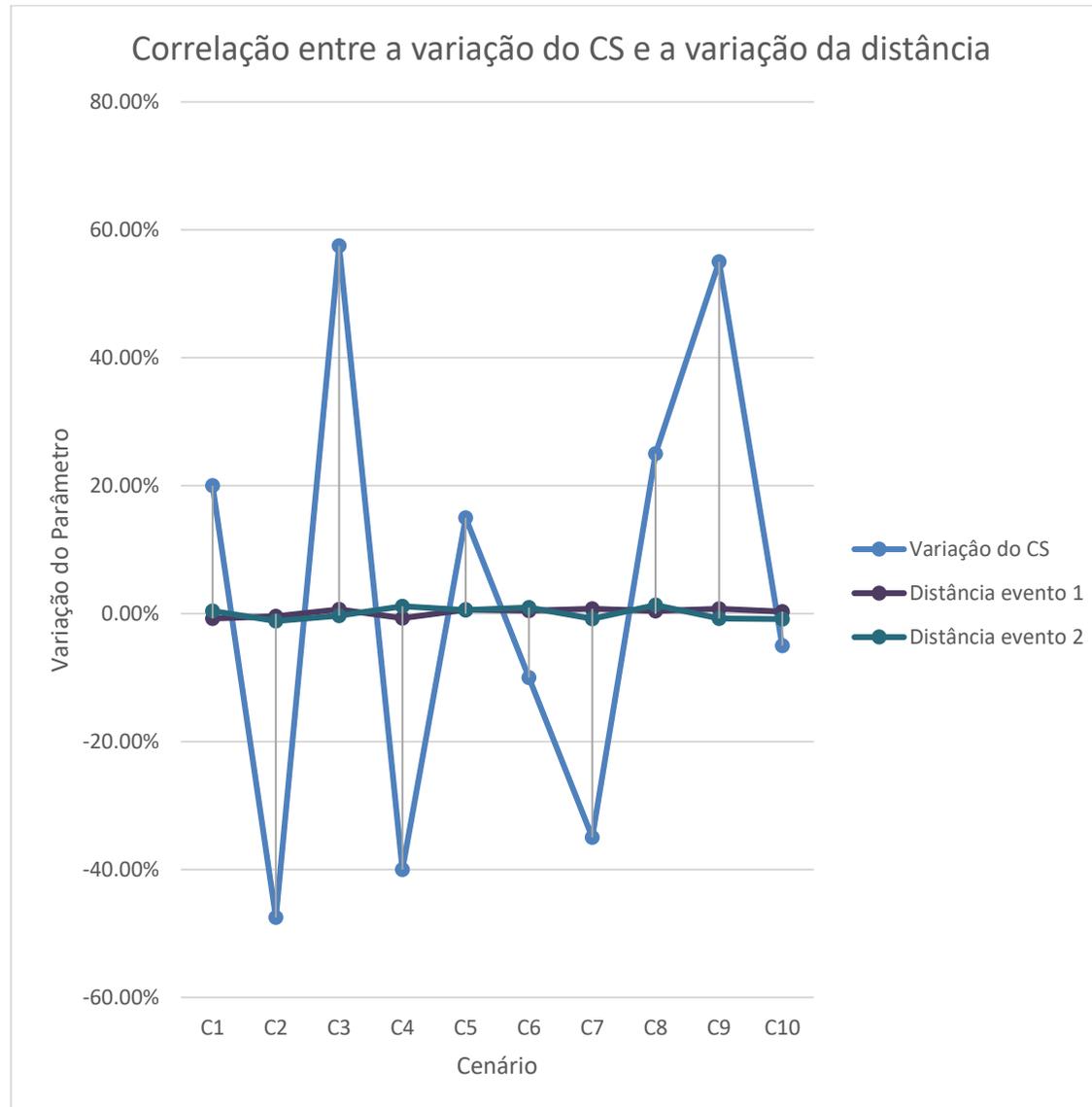


Figura AIII-9: Correlação entre a variação do DL e a variação da área.

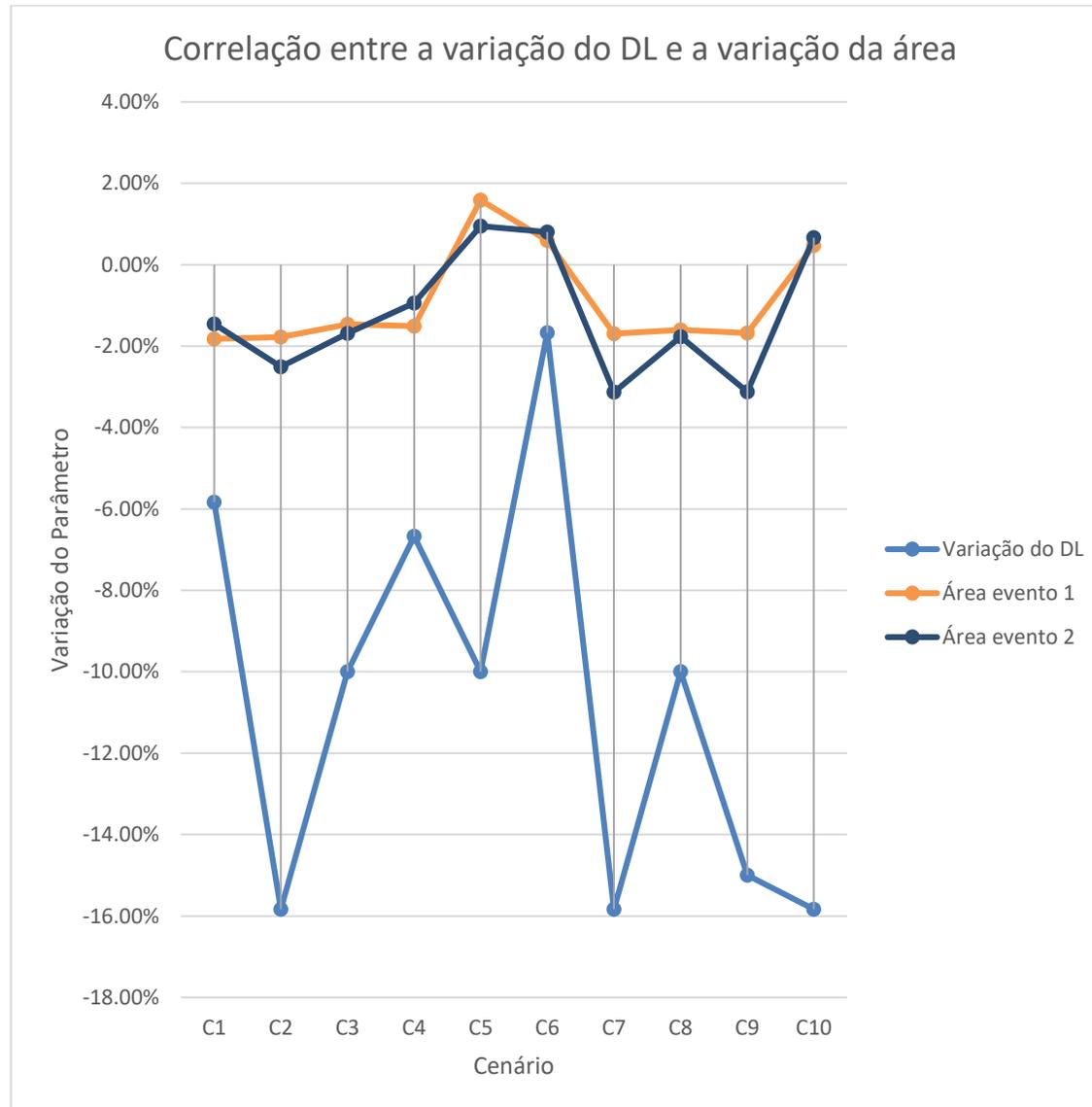


Figura AIII-10: Correlação entre a variação do DL e a variação da altura máxima.

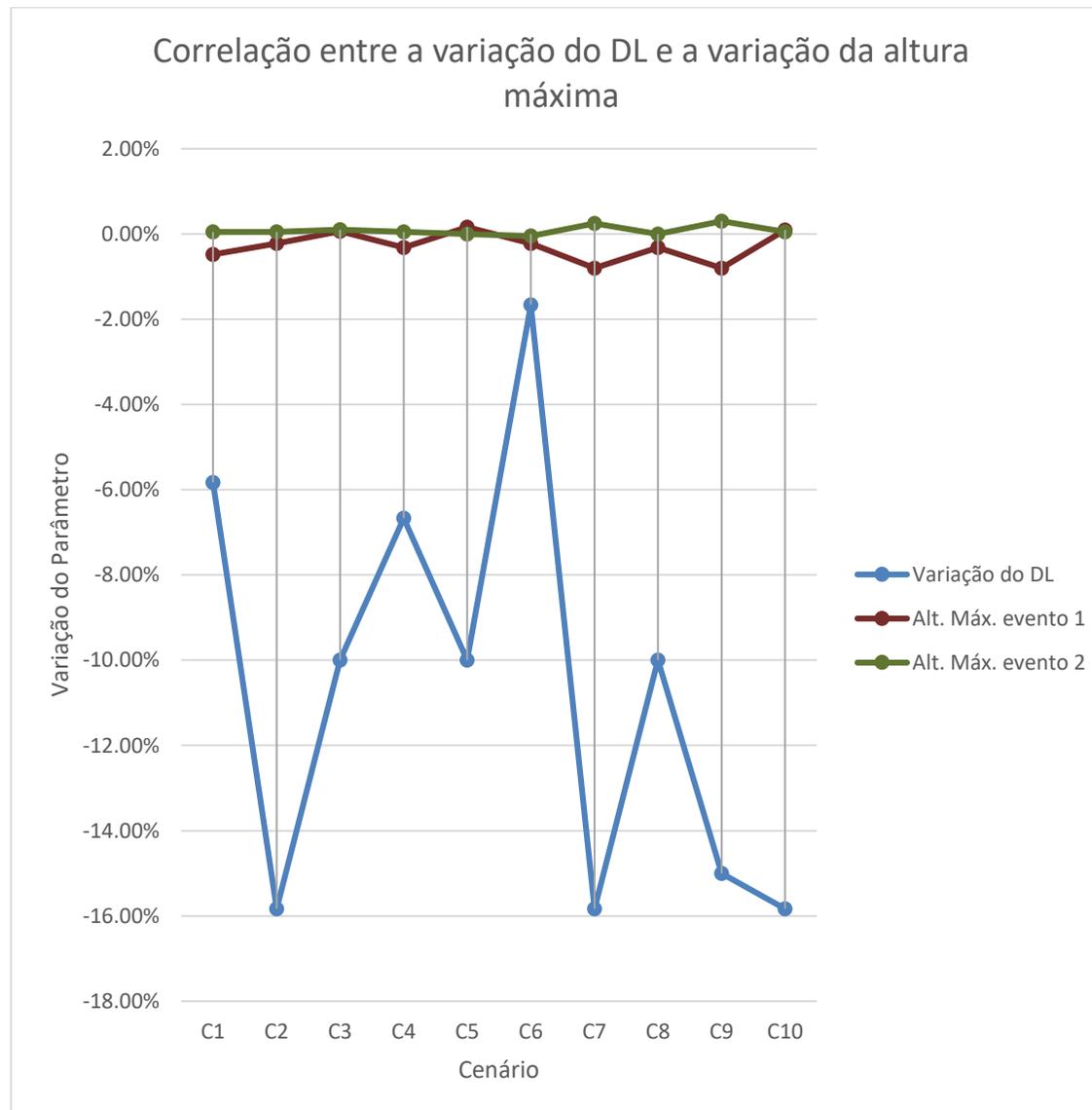


Figura AIII-11: Correlação entre a variação do DL e a variação da altura média.

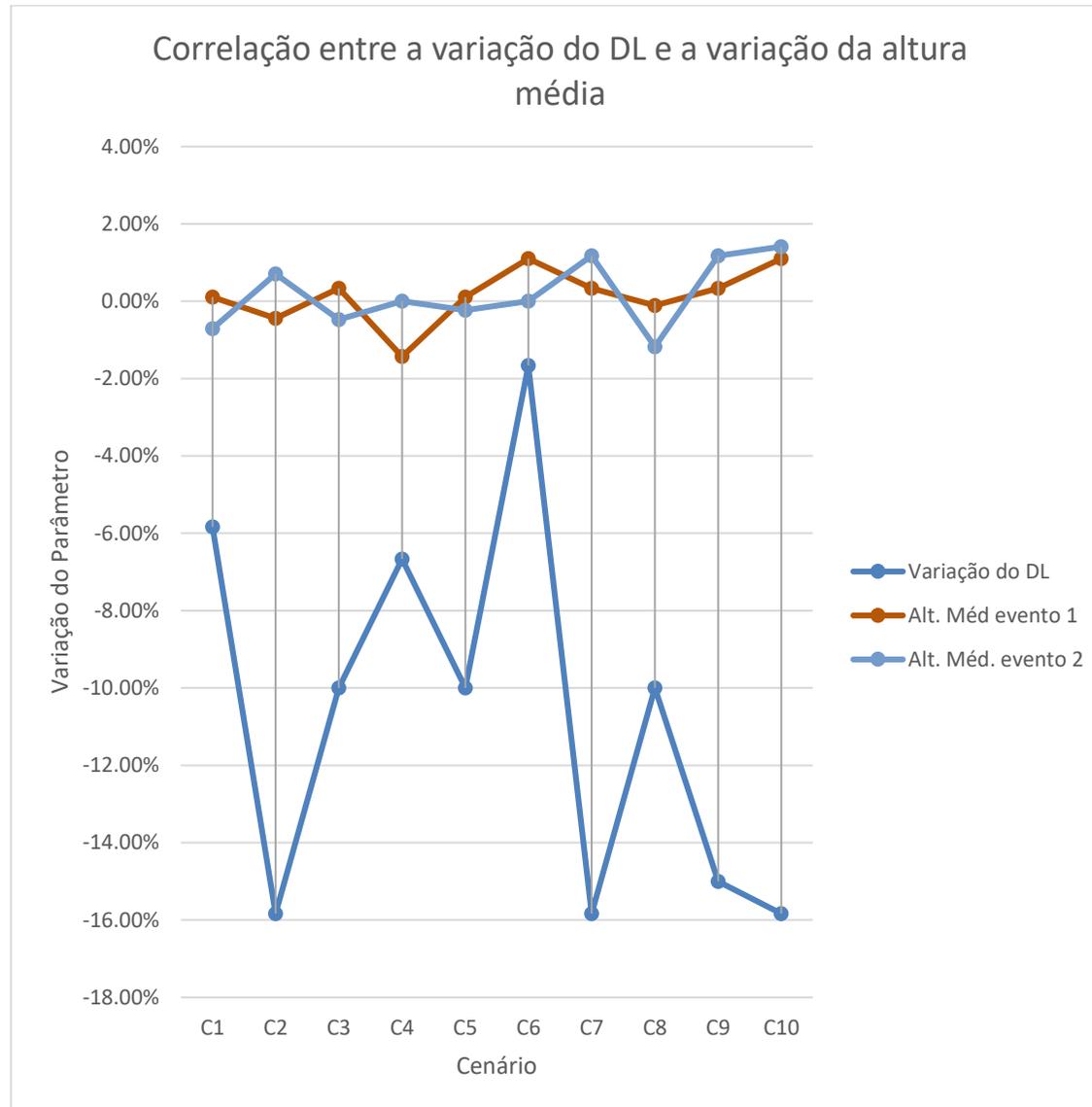


Figura AIII-12: Correlação entre a variação do DL e a variação da distância.

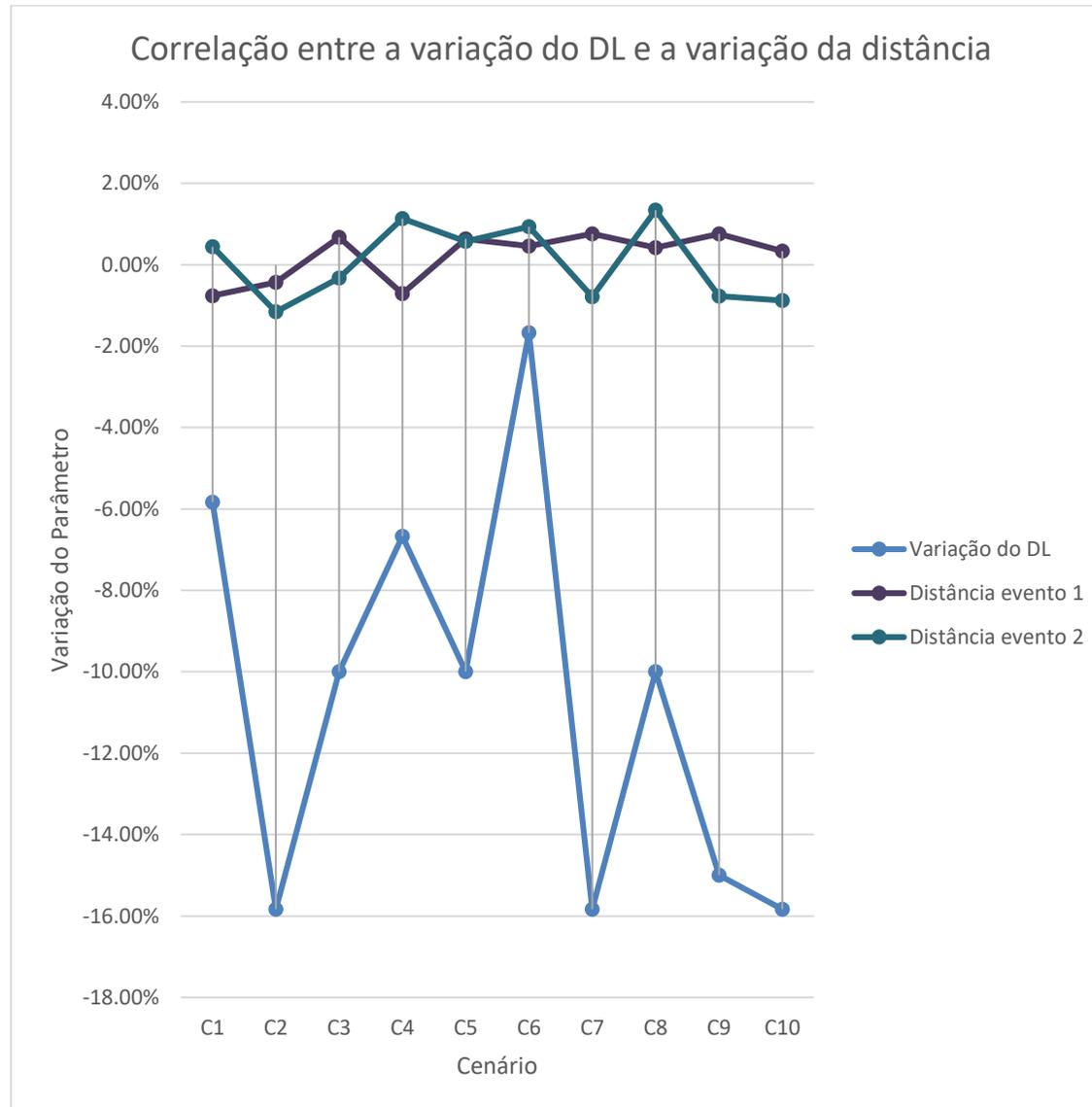


Figura AIII-13: Correlação entre a variação do DS e a variação da área.

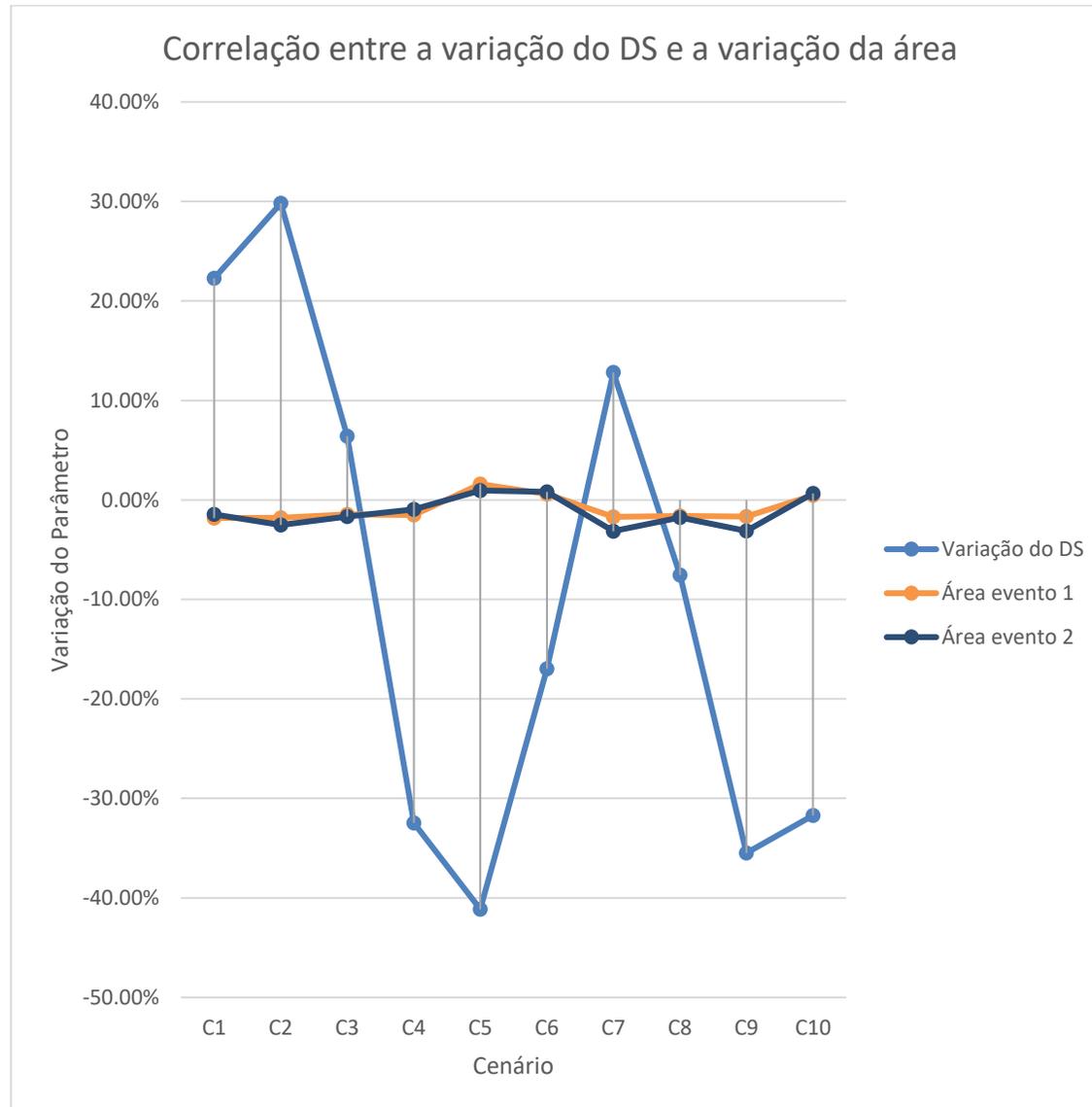


Figura AIII-14: Correlação entre a variação do DS e a variação da altura máxima.

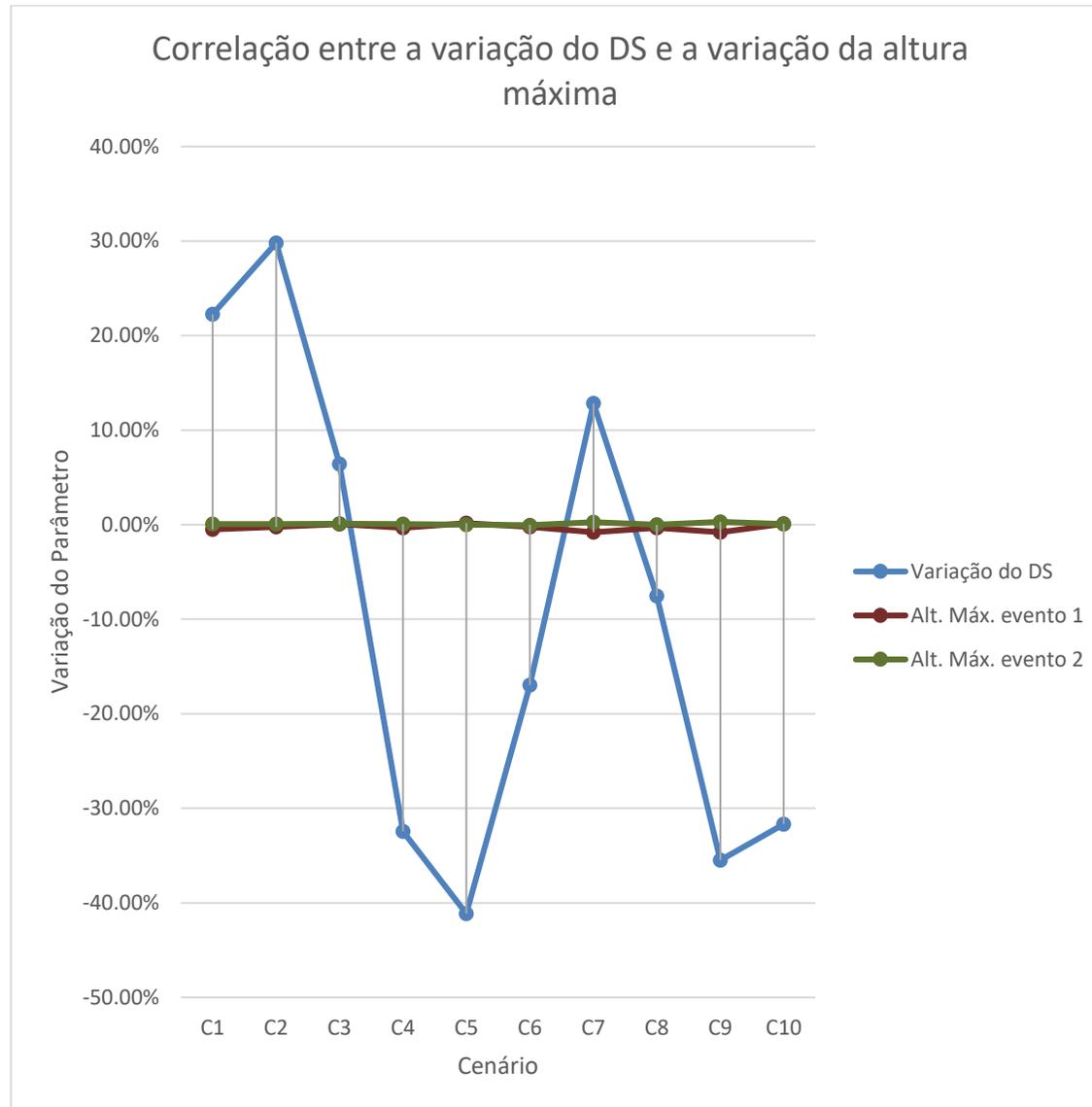


Figura AIII-15: Correlação entre a variação do DS e a variação da altura média.

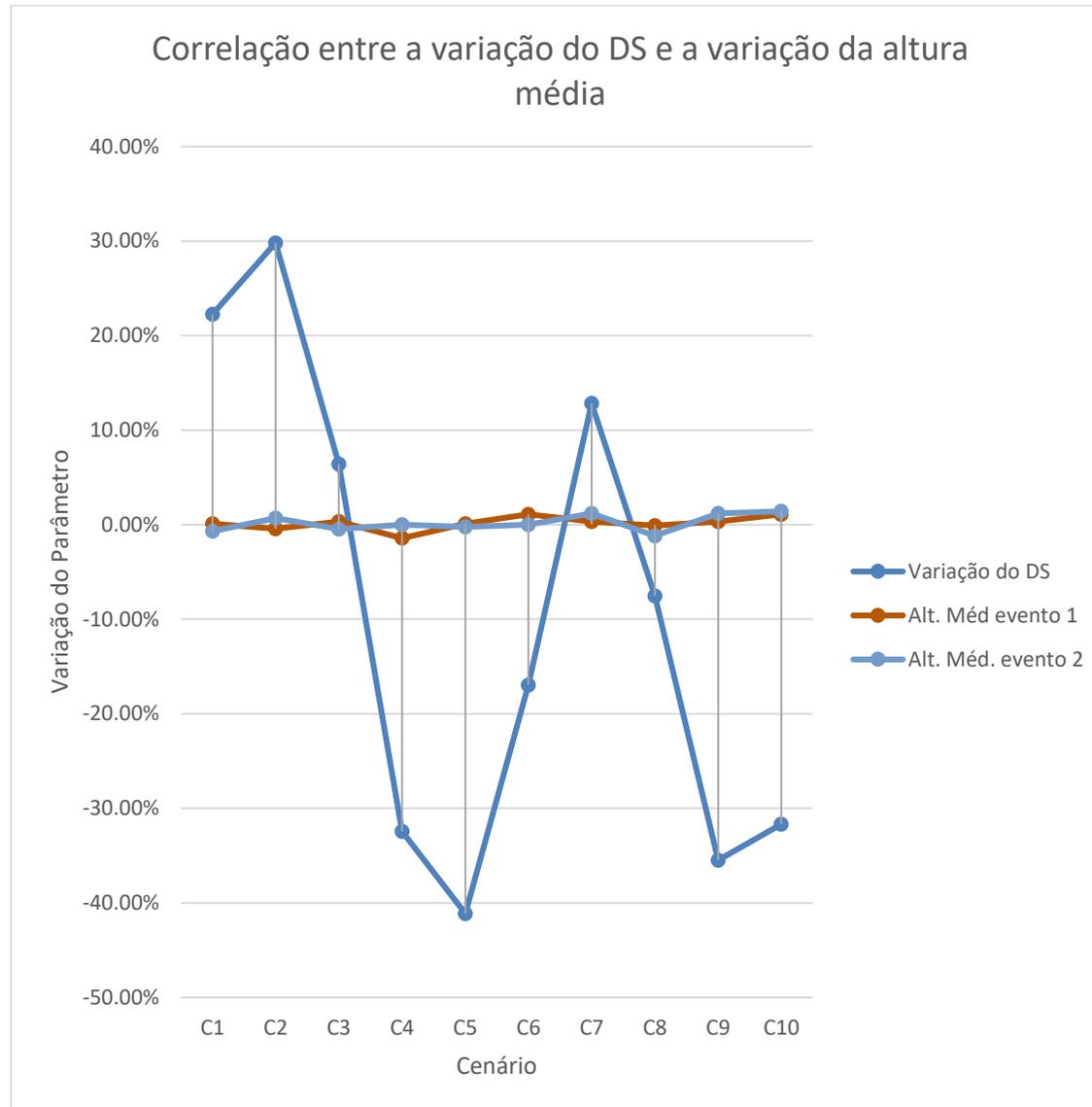


Figura AIII-16: Correlação entre a variação do DS e a variação da distância.

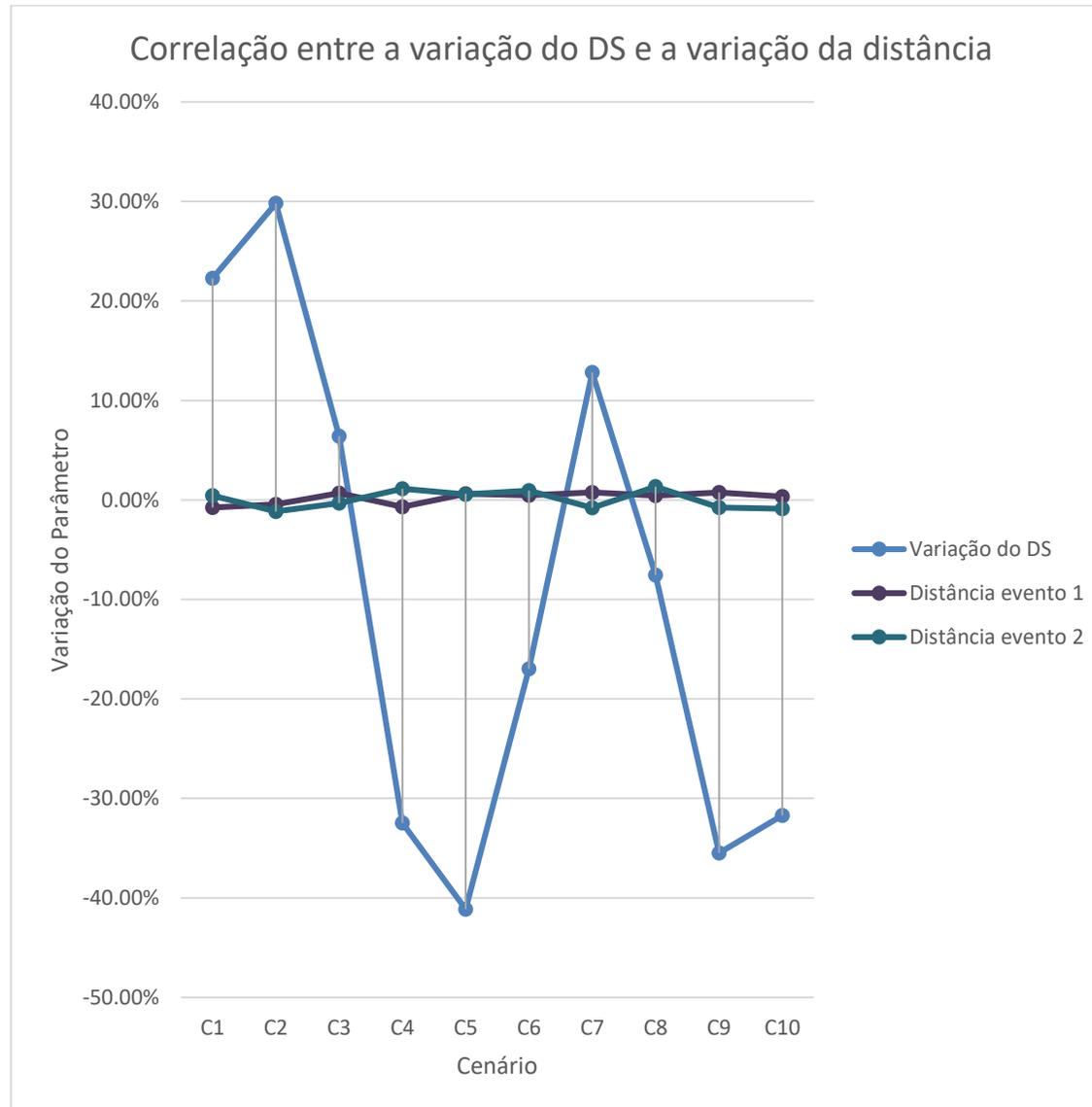


Figura AIII-17: Correlação entre a variação do ANG e a variação da área.

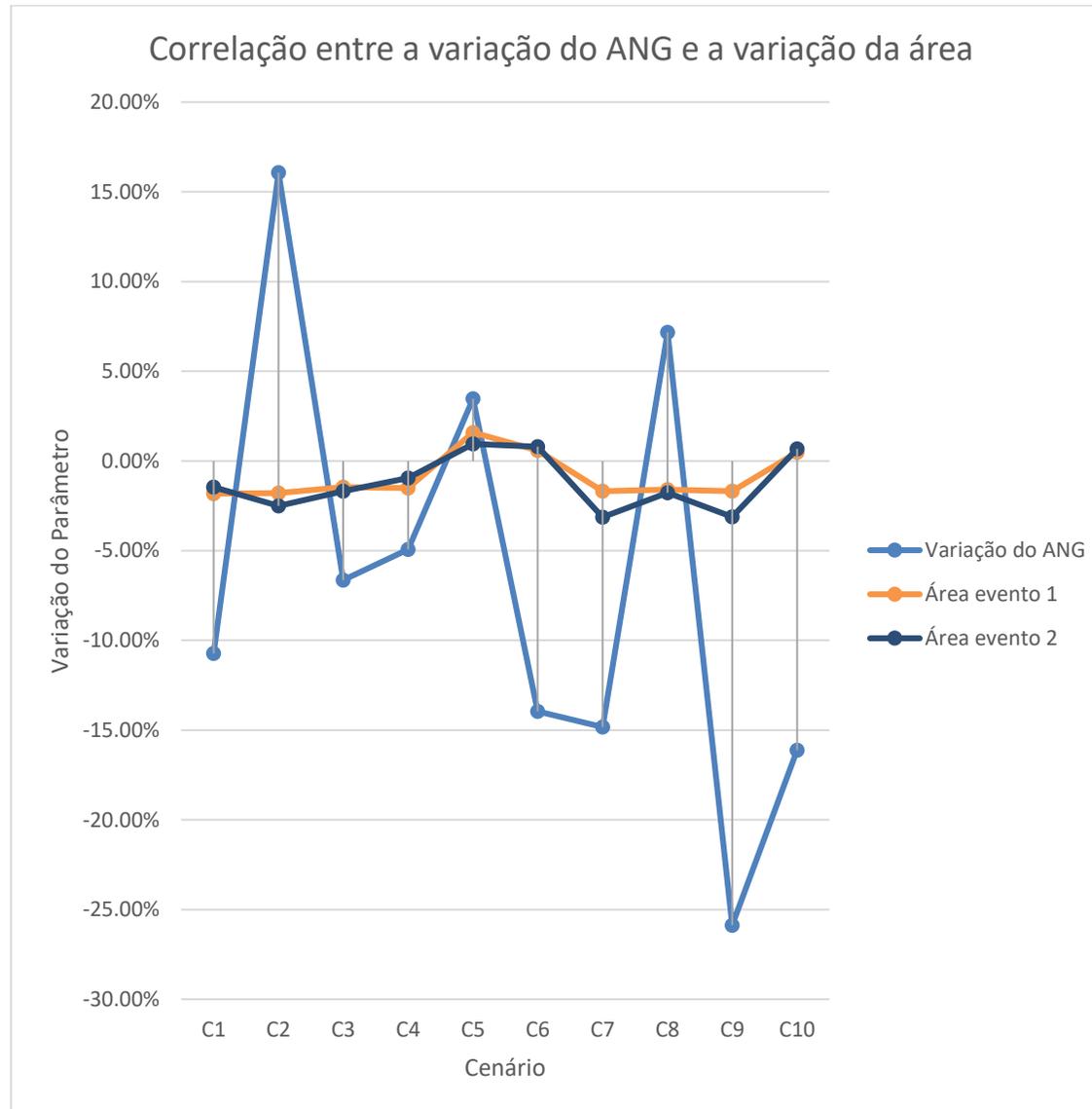


Figura AIII-18: Correlação entre a variação do ANG e a variação da altura máxima.



Figura AIII-19: Correlação entre a variação do ANG e a variação da altura média.



Figura AIII-20: Correlação entre a variação do ANG e a variação da distância.

