

5. Apresentação e análise dos resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os quatro casos de fluxos de detritos, selecionados para estudo. Mostram-se os resultados da calibração preliminar de parâmetros e os resultados obtidos das modelagens 2D e 3D realizadas com os programas DAN-W e DAN3D respectivamente. Finalmente, os valores observados e/ou medidos são comparados com os valores obtidos das modelagens. Também são comparados os resultados das modelagens numéricas em 2D e 3D para verificação de desempenho dos dois programas.

Parte das análises realizadas nesta pesquisa, foram feitas numa visita realizada ao Laboratório de Modelagem Numérica da Faculdade de Engenharia Geológica da Universidade de British Columbia em Vancouver, Canadá.

5.1. Calle Lajas, San José, Costa Rica

5.1.1. Calibração preliminar dos parâmetros

O evento de Calle Lajas trata-se de um fluxo de detritos que iniciou como um pequeno escorregamento de terra na parte alta da encosta e se encaixou no talvegue se transformando em um fluxo de detritos. Este evento foi modelado utilizando a reologia de Voellmy, pois vários autores sugerem a utilização deste modelo reológico para a análise de fluxos de detritos (Hungr *et al.*, 1998; Ayotte e Hungr, 2000; Jakob *et al.*, 2000; Hürlimann *et al.*, 2003; Revellino *et al.*, 2004; Bertolo e Wieczorek, 2005; McDougall 2006; McKinnon *et al.*, 2008). O modelo baseia-se nos parâmetros de coeficiente de atrito e coeficiente de turbulência, conforme já apresentado no Capítulo 3.

A calibração preliminar destes parâmetros foi realizada com o auxílio do módulo SENSAN, de acordo com a metodologia descrita Capítulo 4. Na Figura 5.1a observa-se a *trimline* utilizada para a calibração dos parâmetros e na Figura

5.1b uma representação gráfica dos resultados obtidos de parâmetros de melhor ajuste.

De acordo com a metodologia de trabalho, o melhor ajuste corresponde aos valores compreendidos na zona de cores mais escuras do gráfico da Figura 5.1b. Desta forma, o coeficiente de atrito para este evento encontra-se próximo a 0,13. Ressalta-se que ainda não é possível calibrar e/ou definir o coeficiente de turbulência, pois não foi inserida informação de velocidade na calibração.

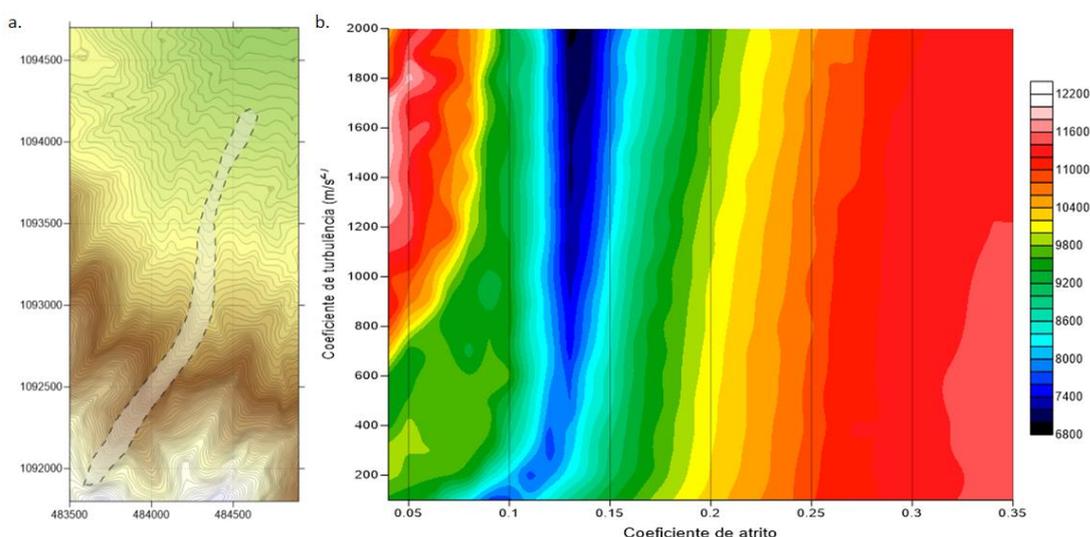


Figura 5.1 – Calibração preliminar dos parâmetros: (a) trimline adotada, (b) Níveis de ajuste dos valores de coeficiente de atrito – Calle Lajas.

5.1.2. Resultados da modelagem em 3D

A análise dinâmica em 3D do evento foi realizada através do programa DAN3D. Utilizou-se a reologia de Voellmy e o coeficiente de atrito foi calibrado preliminarmente através do módulo SENSAN. O coeficiente de atrito foi verificado com as observações de campo da área de impacto e foi mantido igual a 0,13.

O coeficiente de turbulência foi calibrado de acordo as velocidades estimadas pela CNE (2010). Para isto, foram comparadas as velocidades obtidas pelo DAN3D com as observações em campo, variando o coeficiente de turbulência até se obter o melhor ajuste entre eles. O coeficiente de turbulência foi inicialmente variado de 500 em 500 m/s^2 na faixa de valores entre 0 e 2.000 m/s^2 e, finalmente, ajustado variando-se de 100 em 100 m/s^2 . O valor de melhor ajuste foi obtido igual a 600 m/s^2 .

Para a modelagem do fluxo de Calle Lajas foram adotados dois materiais. Um material na zona de iniciação e deposição; e outro material na zona de transporte. O material na zona de transporte foi definido com uma profundidade máxima de erosão de 1,0 m, em função da presença de rocha intemperizada e depósitos aluviais e colúvios nesta zona. A taxa de erosão foi adotada igual a 0,0012.

Na simulação do fluxo de detritos com o DAN3D foi adotado um volume inicial de material de 9.000 m³, resultando em um volume final de 67.000 m³, valor similar ao estimado pela CNE (2010). Os resultados da simulação numérica também forneceram valores de área de deposição igual a 53.000 m², distância percorrida de 2.600 m e extensão da área de deposição de 1.275 m.

Valores de velocidades em pontos específicos ao longo da trajetória são importantes para a projeção de estruturas de mitigação e convivência. Velocidades em diferentes pontos foram medidas para realizar uma comparação pontual com os valores medidos pela CNE (2010). As velocidades determinadas pela simulação a 250, 500, 1.000, 1.500, 2.000 e 2.500 m da zona de iniciação são respectivamente iguais a 23, 20, 14, 8, 4 e 2 m/s.

A Figura 5.2 apresenta a distribuição espacial das velocidades estimadas pelo DAN3D, onde se observa a redução da velocidade com a diminuição da inclinação do canal principal e o acréscimo da distância da zona de iniciação, local das menores velocidades (cor azul). Este comportamento representa um dos indicadores da localização da zona de deposição.

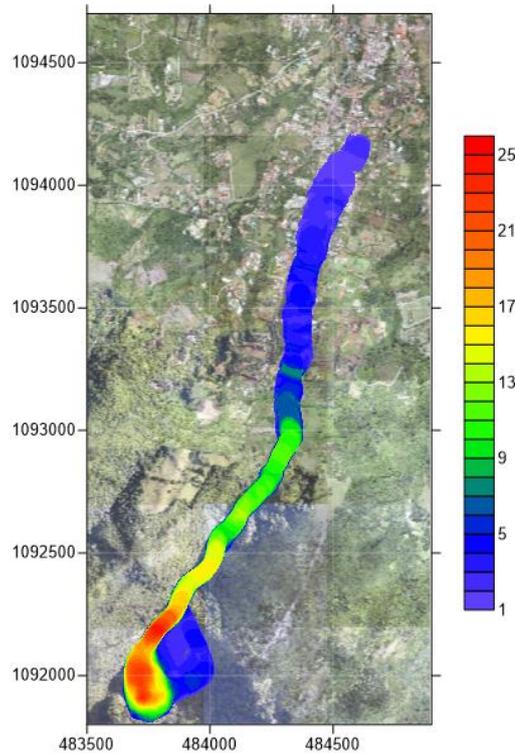


Figura 5.2 – Distribuição espacial de velocidades estimadas pelo programa DAN3D – Calle Lajas.

A altura máxima do fluxo e a profundidade máxima do fluxo também foram calculadas com o DAN3D em pontos específicos da trajetória do fluxo de detritos e correspondentes a 250, 500, 1.000, 1.500, 2.000 e 2.500 m da zona de iniciação. Desta forma os valores de altura máxima do fluxo são iguais a 2,2, 1,9, 1,9, 2,6, 1,8 e 0,6 m, respectivamente e os valores de profundidade máxima de deposição são respectivamente iguais a 0,0, 0,0, 0,0, 1,0, 1,5 e 0,5 m. A distribuição espacial destes valores é apresentada na Figura 5.3a para a altura máxima do fluxo e Figura 5.3b para profundidade máxima de deposição.

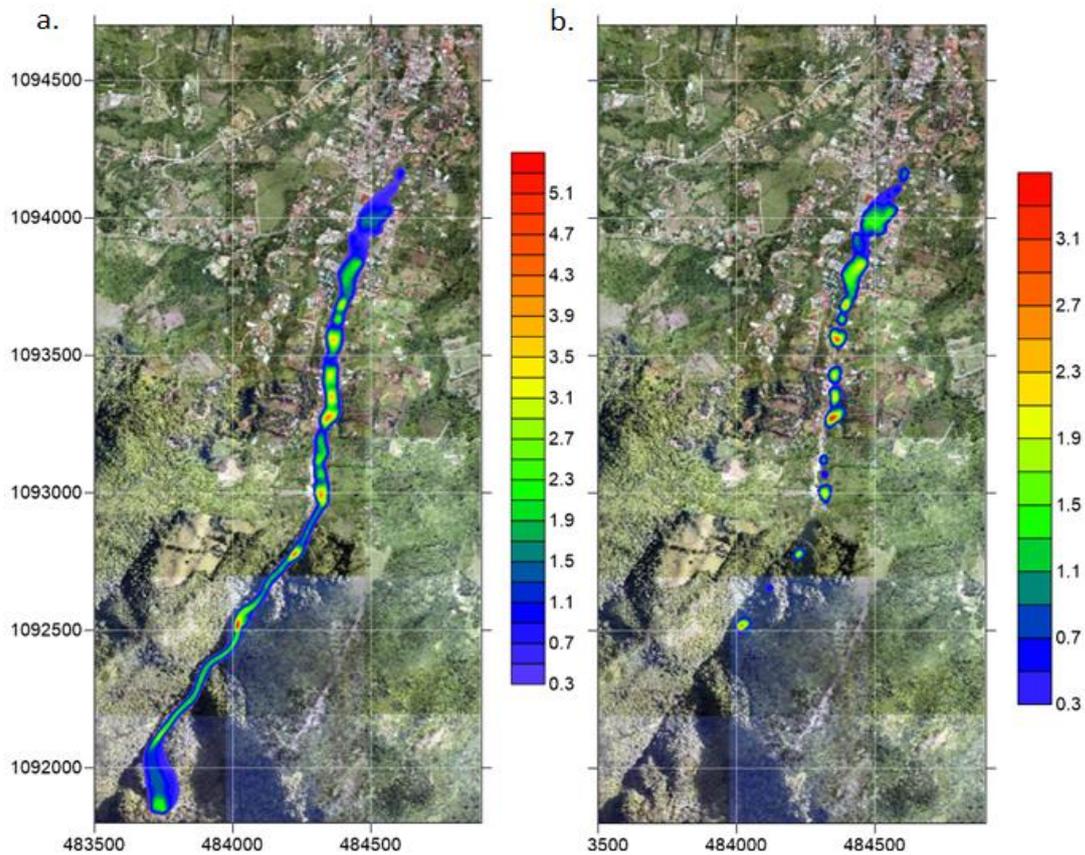


Figura 5.3 – Distribuição espacial de: (a) altura máxima do fluxo; (b) profundidade máxima de deposição – Calle Lajas.

A CNE (2010) documentou os danos das estruturas afetadas pelo fluxo de detritos e propôs um mapa que delimita zonas por seu nível de ameaça, dividindo em: ameaça baixa (verde), ameaça média (amarelo) e ameaça alta (vermelho), conforme mostrado na Figura 5.4a. Visando comparar estes resultados, calculou-se o índice de intensidade segundo Jakob *et al.* (2011). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.4b, onde o índice de intensidade igual a 1000 (cor vermelha) corresponde ao maior dano que resulta na destruição total das moradias ou infraestrutura do local. Observa-se a excelente consistência de resultados entre as duas metodologias de avaliação de possíveis danos provocados por fluxos de detritos.

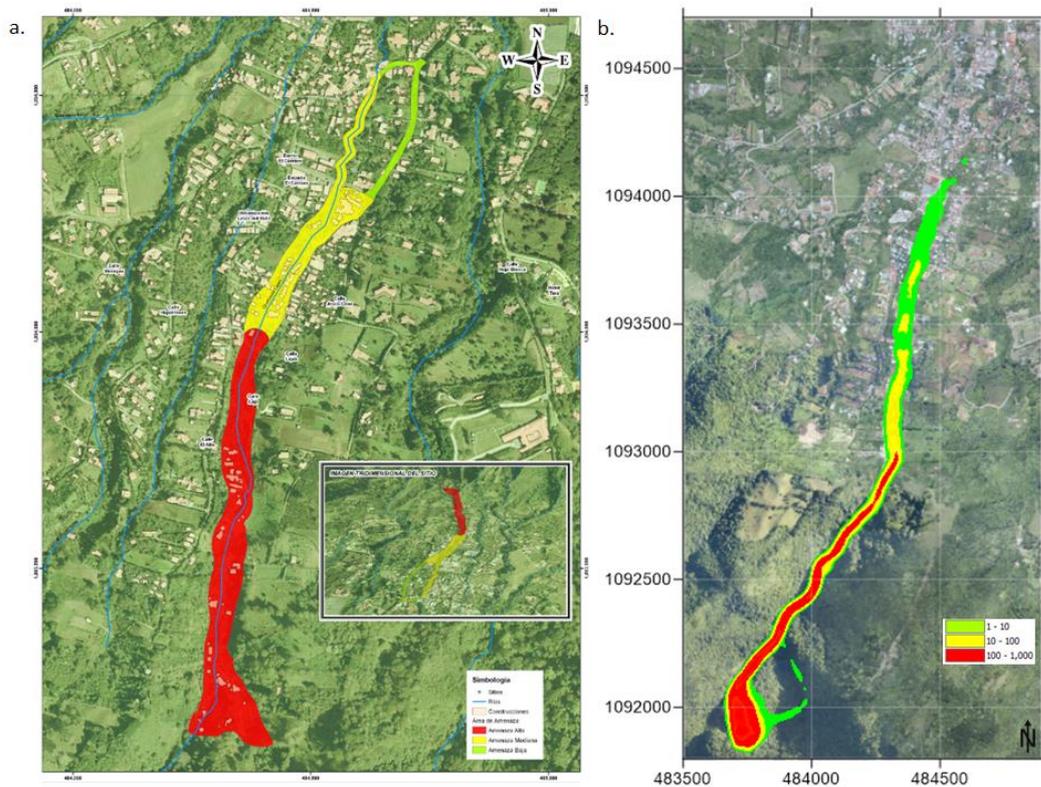


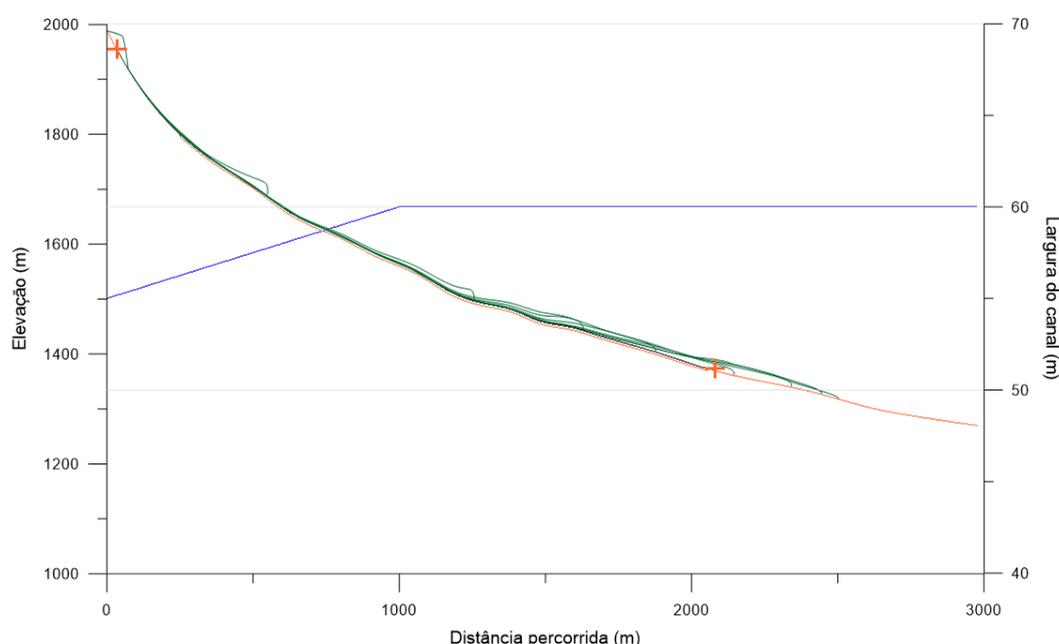
Figura 5.4 – Intensidade de fluxo de detritos: (a) Zoneamento do nível de ameaça de danos segundo (CNE, 2010); (b) Índice de intensidade calculado segundo Jakob et al. (2011) gerado pelo DAN3D.

Na Figura 5.4, a zona onde a CNE (2010) reporta baixa ameaça de danos, os valores de índice de intensidade calculados variam de 1 a 10. Segundo Jakob et al. (2001) estes valores sugerem apenas 30% de probabilidade de danos mínimos danos em estruturas e 70% de probabilidade de ocorrência de leve sedimentação de lama. A zona de ameaça de nível médio indicada pela CNE correspondeu a inundações de lama que invadiram casas. Isto coincide com os resultados de intensidade de Jakob et al. (2001), variando entre 10 e 100, correspondendo a 50% de probabilidade de mínimos danos estruturais. Na zona vermelha da Figura 5.4a, a CNE (2010) reporta que a maior parte das casas foram completamente destruídas, o que coincide com as aproximações obtidas pelo índice de intensidade entre 100 e 1000 de Jacob et al. (2001), que sugere 67% de probabilidade das estruturas sofrerem completa destruição.

5.1.3. Resultados da modelagem em 2D

A simulação do fluxo de detritos com o programa DAN-W foi realizada considerando o perfil e dados de geometria obtidos de topografia, conforme apresentado no capítulo anterior.

Para manter a consistência com as análises realizadas em 3D, foi utilizada a reologia de Voellmy com coeficiente de atrito de 0,13 e fator de turbulência de 600 m/s^2 . A Figura 5.5 apresenta um resumo dos dados topográficos e características do fluxo modelado.



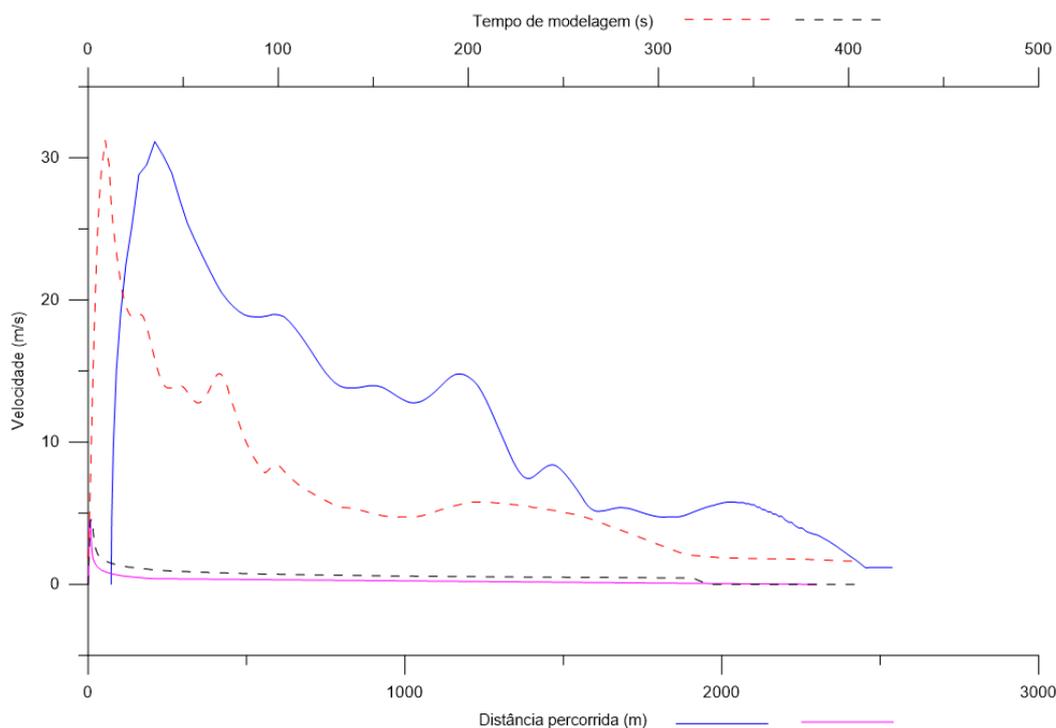
Legenda: Linha preta: perfil topográfico; Linha verde: superfície superior do movimento; Linha laranja: perfil de erosão definida em cada local; Linha azul: largura do canal; Cruzeiros vermelhos: centros de gravidade inicial e final do material.

Figura 5.5 – Principais características do fluxo no DAN-W - Calle Lajas.

A simulação com o DAN-W forneceu a distância percorrida pelo fluxo de 2.300 m e extensão da área de deposição igual a 1.055 m. Partiu-se de um volume inicial de 9.000 m^3 que erodiu o canal em função da profundidade de erosão inserida, e resultou num volume final de 62.650 m^3 e uma área de deposição de 58.025 m^2 .

As velocidades obtidas na modelagem 2D são apresentadas na Figura 5.6. Também foi realizada uma comparação análoga à análise de resultados realizada

com o programa DAN3D em função das velocidades em diferentes pontos da trajetória do fluxo, estimadas pela CNE (2010). Os pontos de controle de velocidades foram estabelecidos a 250, 500, 1.000, 1.500, 2.000 e 2.500 m de distância da zona de iniciação do movimento, resultando em velocidades de 30, 19, 13, 7, 5, 2 m/s, respectivamente.



Legenda: Linha azul: velocidade da frente do movimento; Linha rosa: velocidade da parte traseira do movimento; Linha vermelha: velocidade máxima; Linha preta: velocidade mínima.

Figura 5.6 – Variação da velocidade com a distância percorrida obtida da modelagem com o programa DAN-W - Calle Lajas.

A altura máxima do fluxo e a profundidade máxima de deposição também foram calculadas a 250, 500, 1.000, 1.500, 2.000 e 2.500 m de distância da zona de iniciação, obtendo-se valores de 2,1, 2,1, 1,9, 2,3, 2,0 e 0,0 m, respectivamente para a altura máxima do fluxo. Para a profundidade da área de deposição foram obtidos valores nulos até 1.000 m de distância e para 1.500, 2.000 e 2.500 m, foram encontrados valores de 1,5, 2,0, e 0,0 m, respectivamente.

5.1.4. Análise dos resultados

Apresenta-se uma comparação entre os principais parâmetros obtidos das simulações realizadas com o DAN-W e o DAN3D. Os valores calculados com cada programa são comparados com os valores reais observados e/ou medidos após o evento e, seguidamente são comparados os resultados obtidos da modelagem em 2D com os obtidos da modelagem em 3D. A Tabela 5.1 apresenta os valores obtidos nos principais parâmetros nas análises realizadas.

Tabela 5.1 – Comparação de resultados numéricos do DAN-W e DAN3D e valores reais observados no fluxo de detritos - Calle Lajas.

Parâmetro	Valores observados e calculados			Diferenças Percentuais		
	Observado	DAN-W	DAN3D	DAN-W Observado	DAN3D Observado	DAN-W DAN3D
Distância percorrida (m)	2.500	2.300	2.600	8	4	12
Extensão da área de deposição (m)	1.200	1.055	1.275	12	6	17
Volume final (m ³)	65.000	62.650	67.000	4	3	6
Área de deposição (m ²)	39.800	58.000	53.000	46	33	9

Os valores de distância percorrida obtidos pelas modelagens numéricas resultaram satisfatórios, pois a diferença percentual ficou entre 4 e 8% comparado com o valor observado. Este parâmetro é de grande importância, pois deve ser levado em conta em projetos de medidas de proteção e convivência.

A extensão da área de deposição foi aproximada pelas simulações com diferenças percentuais entre 6 e 12%. Para a extensão da área de deposição, o DAN3D superestimou a distância em 75 m e, portanto, este valor é favor da segurança, ao contrário do valor obtido com o DAN-W que subestima a extensão da área de deposição em 145 m.

O volume final calculado pelos programas DAN-W e DAN3D mostrou resultados que diferem de apenas 3 e 4% do valor observado. Ressalta-se que este parâmetro é muito sensível à taxa de erosão adotada para cada material, indicando que os valores selecionados representam adequadamente o evento de fluxo de detritos.

Valores da área de deposição obtidos com as modelagens apresentaram as maiores diferenças percentuais em relação à área observada e iguais a 33 e 46%. A

diferença percentual entre os valores obtidos com os dois programas é de 9%, o que sugere que os resultados observados em campo podem apresentar algum erro de medição. Nota-se também que a diferença percentual dos valores obtidos com o DAN-W é maior quando comparada ao DAN3D. Isto era esperado tendo em vista as limitações nos dados de entrada topográficos de um programa em 2D em relação ao programa 3D.

As diferenças porcentuais entre as simulações com DAN-W e DAN3D ficaram entre 6 e 17 %, evidenciando que os modelos são consistentes entre si, principalmente quando são adotados os mesmos modelos reológicos para as modelagens 2D e 3D.

A Figura 5.7 apresenta a variação de velocidade com a distância da zona de iniciação estimada pela CNE (2010) e calculada com as modelagens numéricas 2D e 3D. Vários pontos de controle foram selecionados ao longo do canal de fluxo para realizar uma comparação quantitativa dos valores estimados e calculados.

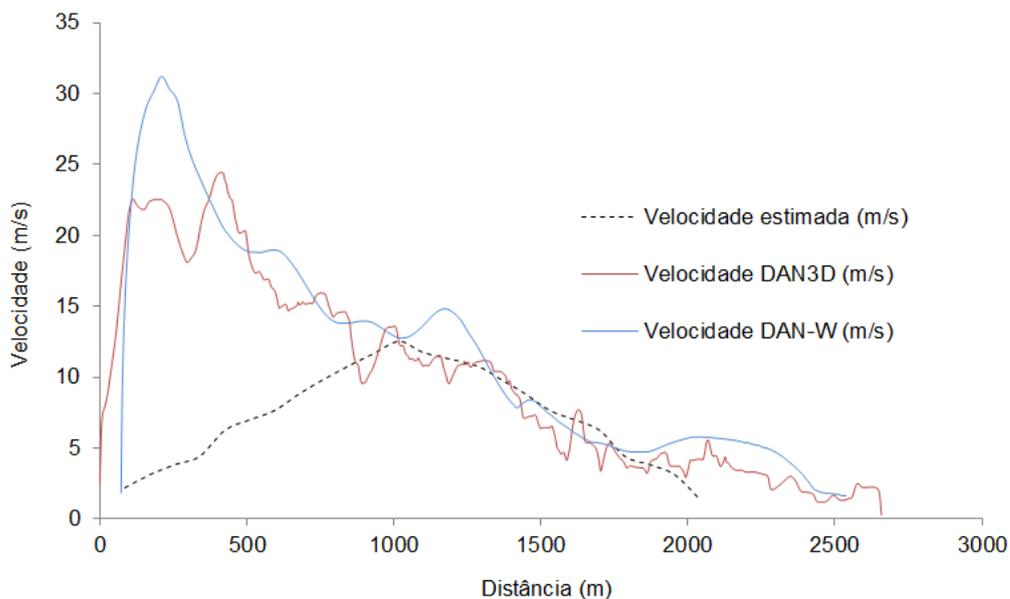


Figura 5.7 – Comparação das velocidades estimadas e calculadas em função da distância percorrida - Calle Lajas.

Observa-se na Figura 5.7 que os resultados numéricos do DAN-W e DAN3D apresentam a mesma tendência. A maior variação se encontra no trecho inicial, onde o DAN-W estimou velocidades maiores do que as do DAN3D. Isto pode estar relacionado ao tipo de construção da zona de iniciação de cada programa. No caso

do DAN-W insere-se um volume formado por um sólido (bloco ou pirâmide) e no DAN3D insere-se a topografia do material de origem.

Ao comparar as velocidades obtidas das modelagens com as calculadas pela CNE (2010), pode-se observar que nos primeiros 1.000 m os valores são significativamente diferentes. Porém, no trecho após os 1.000 m mostram uma tendência similar às modelagens numéricas. Considera-se que os valores estimados pela CNE (2010) neste trecho inicial foram calculados grosseiramente devido ao difícil acesso ao local, além de utilizar uma metodologia válida para fluxo permanente quando na realidade o problema corresponde a um fluxo não permanente com frequentes alterações de regime.

Tabela 5.2 – Comparação de velocidades instantâneas numéricas e estimadas - Calle Lajas.

Distância da zona de iniciação (m)	Velocidade máxima instantânea estimada e calculada (m/s)			Diferenças percentuais		
	Estimado	DAN-W	DAN3D	DAN-W Estimado	DAN3D Estimado	DAN-W DAN3D
250	4	30	23	650	475	30
500	7	19	20	171	186	5
1000	12	13	14	8	17	7
1500	8	7	8	13	0	13
2000	2	5	4	150	100	25
2500	-	2	2	-	-	0

Analisando os pontos de controle na Tabela 5.2, observa-se que as maiores diferenças percentuais entre velocidades calculadas pelo DAN-W e DAN3D e as velocidades estimadas pela CNE (2010) encontram-se nos pontos a 250 e 500 m da zona de iniciação. No trecho intermediário, pontos a 1.000 e 1.500 m, os valores estimados pela CNE (2010) e os obtidos das modelagens são consistentes, assim como os valores das modelagens 2D e 3D. No trecho final (2.000 m) a velocidade estimada de 2m/s é menor que as calculadas pelas modelagens numéricas, porém na mesma ordem de grandeza. É interessante notar que os resultados consistentes são os obtidos nas zonas de transporte e deposição, podendo ser utilizados em projetos de obras de mitigação e convivência nestes locais.

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados numéricos de altura máxima do fluxo e a profundidade máxima de deposição, as quais são parâmetros importantes para medidas de proteção como barreiras ou diques.

Os resultados da Tabela 5.3 mostram que os valores de altura máxima do fluxo são consistentes, apresentando diferenças percentuais entre 0 e 12 %. Já no caso das profundidades de deposição, as diferenças percentuais são maiores, variando de 33 a 50%. Deve-se lembrar de que as comparações de valores em locais pontuais às vezes apresentam diferenças percentuais altas, devido à elevada dispersão intrínseca ao ponto de controle.

Tabela 5.3 – Valores numéricos de altura máxima do fluxo e profundidade máxima de deposição – Calle Lajas.

Parâmetro	Distância da zona de iniciação (m)	DAN-W	DAN-3D	Diferença percentual DAN-W e DAN3D
Altura máxima do fluxo (m)	250	2,1	2,2	5
	500	2,1	1,9	11
	1000	1,9	1,9	0
	1500	2,3	2,6	12
	2000	2,0	1,8	11
	2500	-	0,6	-
Profundidade máxima de deposição (m)	250	0,0	0,0	0
	500	0,0	0,0	0
	1000	0,0	0,0	0
	1500	1,5	1,0	50
	2000	2,0	1,5	33
	2500	-	0,5	-

5.2.

Llano de la Piedra, San José, Costa Rica

5.2.1.

Calibração preliminar dos parâmetros

O evento de Llano de la Piedra, consistiu de um escorregamento rotacional na parte alta da encosta que atingiu um depósito pretérito de colúvio e foi transformado em um fluxo de detritos. Modelou-se utilizando a reologia de atrito na parte inicial e a reologia de Voellmy na zona do fluxo de detritos.

Para simular a parte inicial do movimento foi utilizado uma rotina numérica do DAN3D chamada Dan3D Flex. Este *plugin* permite levar em conta a condição do movimento de uma massa coerente em um plano de deslizamento da base sem a presença de pressões laterais (Aaron e Hungr, 2016). Assim, a massa inicial é tratada como um bloco rígido que se desloca e, finalmente, transforma-se em fluido a partir de uma distância indicada ao programa.

O Dan3D Flex foi utilizado para obter uma melhor aproximação da parte inicial do movimento e assim um melhor ajuste da zona de deposição do evento. Importante comentar que foram realizadas análises sem o Dan3D Flex, as quais mostraram uma tendência do material se dispersar muito mais do que o observado no evento, resultando em áreas de deposição maiores que as observadas.

A calibração preliminar foi realizada com o módulo SENSAN de acordo com a metodologia descrita no item 4.1. A Figura 5.8a apresenta a *trimline* utilizada para a calibração e a Figura 5.8b uma representação gráfica dos resultados obtidos como parâmetros de melhor ajuste para o modelo de Voellmy. De acordo com a metodologia de trabalho o melhor ajuste corresponde aos valores na região de cores mais escuras do gráfico da Figura 5.8b. Portanto, o coeficiente de atrito encontra-se próximo a 0,35.

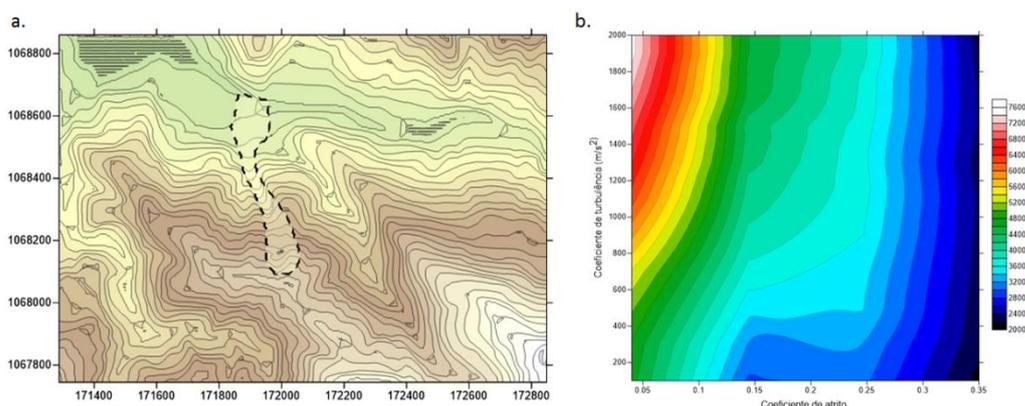


Figura 5.8 – Calibração preliminar dos parâmetros: (a) Trimline adotada; (b) Níveis de ajuste dos valores de coeficiente de atrito - Llano de la Piedra.

5.2.2. Resultados da modelagem em 3D

Para a modelagem do fluxo de Llano de la Piedra foram utilizados três materiais. Um material na zona de iniciação, outro na zona de transporte e outro material na zona de deposição. O material na zona de transporte foi definido com uma profundidade máxima de erosão de 5,0 m, pois trata-se de um material argilo-siltoso e a taxa de erosão foi definida em 0,0045.

Uma vez realizada a calibração preliminar, foram verificados os parâmetros escolhidos. Os resultados mostraram uma distância percorrida muito menor do que

a distância observada (Figura 5.9a), sendo necessário modificar o coeficiente de atrito previamente adotado.

O SENSAN procura semelhanças entre nós específicos do arquivo *trimline* inserido e um arquivo gerado pelo DAN3D chamado de *maxthick.grd*. Este arquivo inclui os valores de profundidade máxima atingida em cada localização espacial.

A primeira aproximação mostrada na Figura 5.9a não resultou satisfatória, pois se considera que a obtenção de uma boa calibração para a distância percorrida é mais importante do que a dispersão mostrada pelo material na parte média do evento.

Desta forma, foram processadas várias simulações variando-se o coeficiente de atrito até se obter uma melhor aproximação da distância percorrida pelo fluxo de detritos, atingida com coeficiente de atrito igual a 0,2.

Entretanto observa-se na Figura 5.9b, que esta calibração apresenta algumas diferenças na zona de transporte e deposição. Estas diferenças podem ser explicadas por limitações dos dados de topografia, com menor precisão que a esperada.

A calibração do coeficiente de turbulência foi realizada baseada em valores estimados de relatórios do evento e em calibrações realizadas para eventos similares, pois não foram tomadas medidas para aproximar as velocidades do evento. O coeficiente de turbulência foi adotado igual a 100 m/s. Os resultados da distribuição espacial de velocidades calculadas pelo DAN3D são mostrados na Figura 5.10.

Valores de velocidades em pontos específicos ao longo da trajetória são importantes para projetos de estruturas de mitigação e convivência. Assim, foram estimadas velocidades em pontos de controle a 100, 200, 300, 400, 500 e 550 m de distância da zona de iniciação, resultando em velocidades de 16, 25, 19, 11, 6 e 3 m/s, respectivamente.

Também foram calculadas com o DAN3D as alturas máximas do fluxo e as profundidades máximas de deposição após o evento, apresentadas na Figura 5.11.

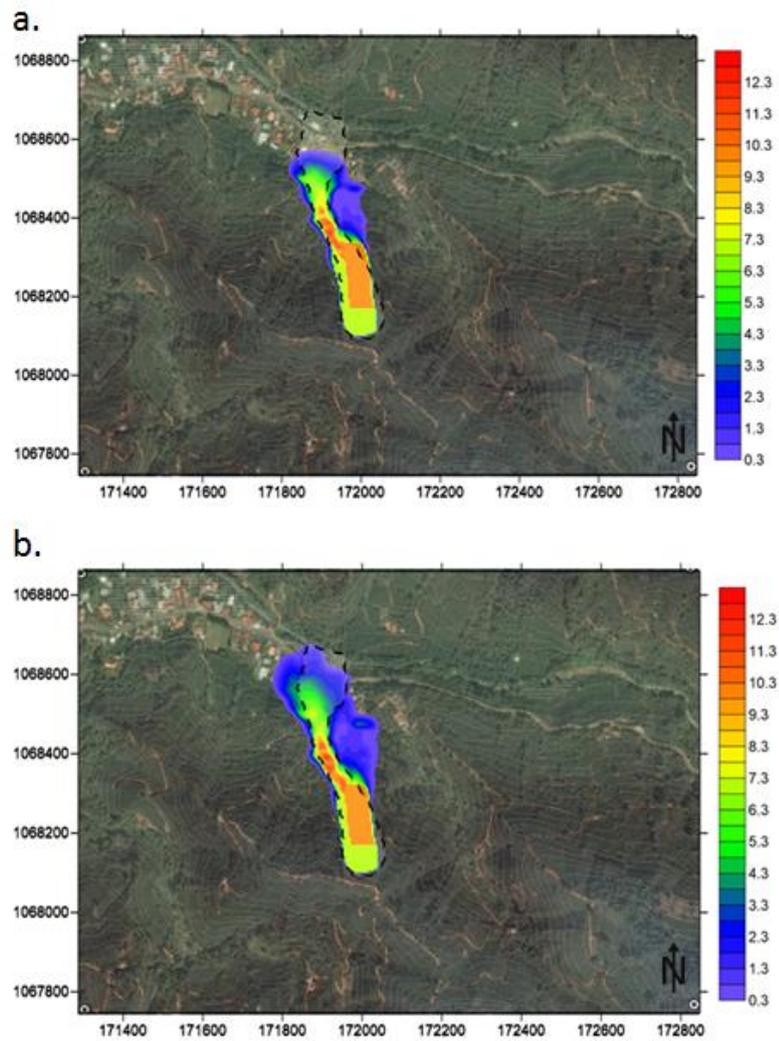


Figura 5.9 – Resultados da simulação de distância percorrida: (a) Calibração preliminar e (b) Calibração final.

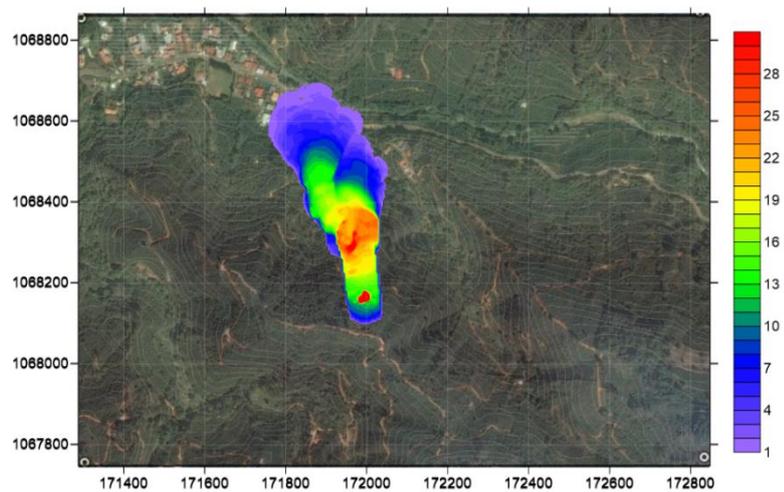


Figura 5.10 – Distribuição espacial de velocidades estimadas pelo programa DAN3D.

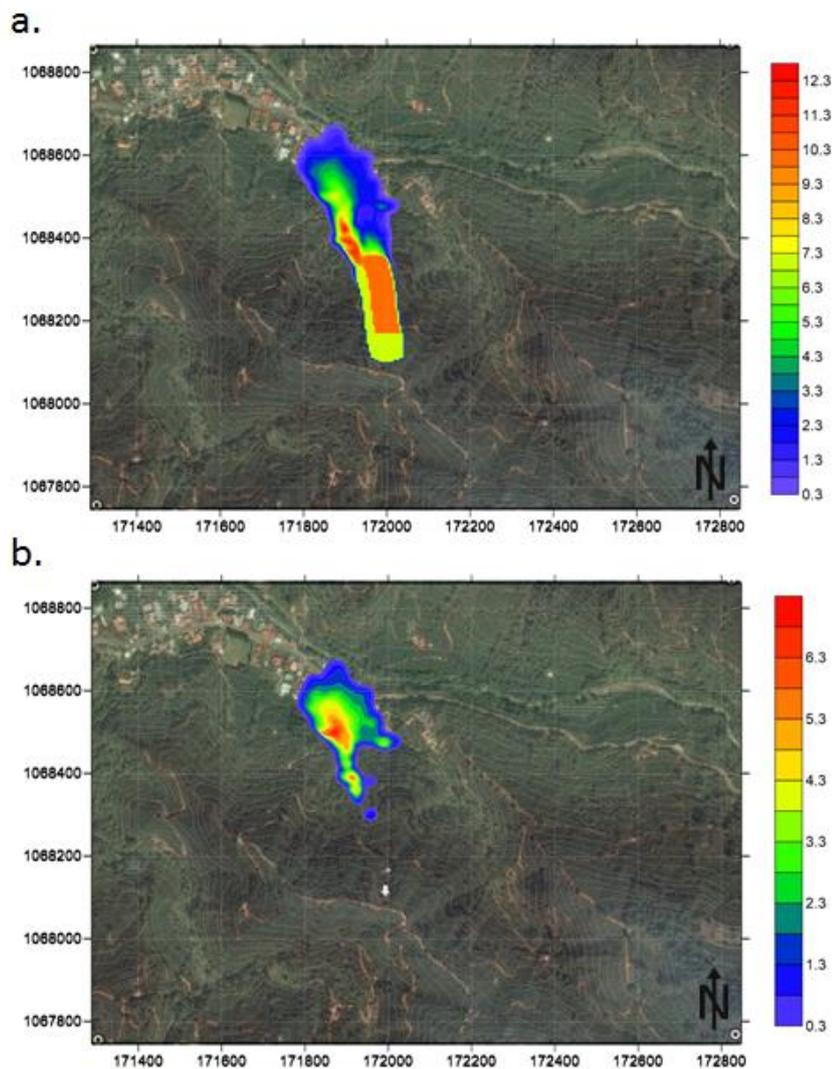


Figura 5.11 – Distribuição espacial de: (a) Altura máxima do fluxo; (b) Profundidade máxima de deposição - Llano de la Piedra.

A altura máxima do fluxo e a profundidade máxima de deposição também foram obtidas para pontos de controle ao longo do canal percorrido. Os valores de altura máxima do fluxo e profundidade máxima de deposição foram estimados a distâncias de 100, 200, 300, 400, 500 e 600 m da zona de iniciação, obtendo valores de 7,0, 10, 10,5, 6,0, 4,0 e 1,3 m, respectivamente para a altura máxima do fluxo e 0,0, 0,0, 3,7, 4,6, 2,7 e 1,2 m, respectivamente para altura máxima de deposição.

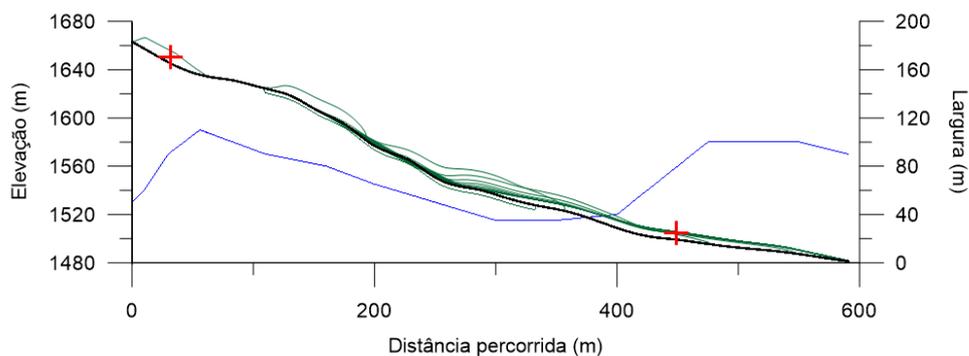
O movimento começou com um volume de material de 40.000 m³, resultando após a simulação com o DAN3D em um volume final de 100.000 m³ e uma área de deposição de 27.000 m². A distância percorrida calculada pelo DAN3D foi de 575 m e a extensão da área de deposição de 338 m.

5.2.3. Resultados da modelagem em 2D

A modelagem 2D do fluxo utilizando o programa DAN-W foi realizada considerando os dados de perfil e geometria, em função da topografia descrita na caracterização do evento no item 4.2.

Para manter a consistência com as análises realizadas em 3D, foi utilizada a reologia de atrito para simular o movimento rotacional e a reologia de Voellmy na zona de transporte e deposição, com coeficiente de atrito de 0,2 e fator de turbulência de 100 m/s^2 . Erosão no canal foi modelada como se só acontecesse na zona de transporte do movimento, assim na zona de iniciação e deposição se supõe que seu valor é nulo. Mesmo assim às vezes acontece que o canal erode na zona de deposição aumentando o volume final do evento. Neste caso foi definida uma profundidade de erosão máxima de 5,0 m na zona de transporte devido a que o material corresponde a um solo argilo-siltoso.

A Figura 5.12 apresenta um resumo das principais características do evento modelado representadas pelo perfil do caso, superfície superior do evento, perfil de erosão definida para cada ponto, largura do canal e centros de gravidade inicial e final da corrida.



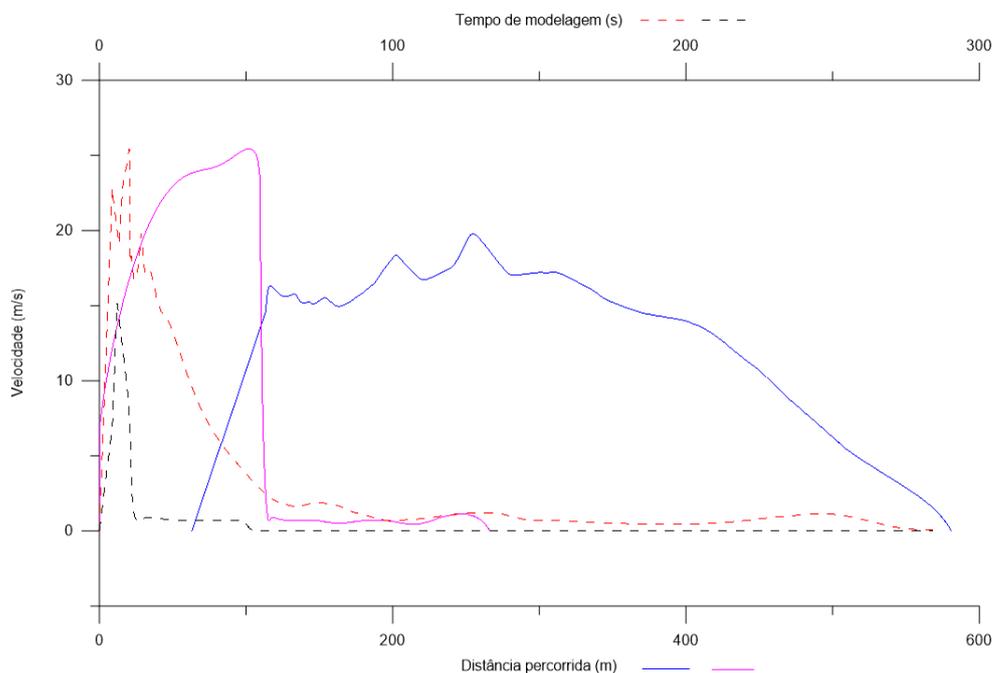
Legenda: Linha preta: perfil topográfico; Linha verde: superfície superior do movimento; Linha laranja: perfil de erosão definida em cada local; Linha azul: largura do canal; Cruzeiros vermelhas: centros de gravidade inicial e final do material.

Figura 5.12 – Principais características do fluxo no DAN-W – Llano de la Piedra.

A modelagem no DAN-W indicou uma distância percorrida pelo fluxo de 590 m e extensão da área de deposição de 335 m. Partiu-se de um volume inicial de

40.000 m³ que erodiu o canal e resultou num volume final de 100.800 m³ e uma área de deposição de 21.500 m².

As velocidades obtidas na modelagem são apresentadas na Figura 5.13 e correspondem a velocidade da frente do movimento, velocidade da parte traseira do movimento, velocidade máxima e velocidade mínima. Foram estabelecidos pontos de controle a diferentes distâncias da zona de iniciação do movimento: 100, 200, 300, 400, 500 e 550 m, nos quais foram obtidas as velocidades de 21, 18, 17, 14, 8 e 4 m/s, respectivamente.



Legenda: Linha azul: velocidade da frente do movimento; Linha rosa: velocidade da parte traseira do movimento; Linha vermelha: velocidade máxima; Linha preta: velocidade mínima.

Figura 5.13 – Variação da velocidade com a distância percorrida obtida da modelagem com o programa DAN-W - Calle Lajas.

5.2.4. Análise dos resultados

Apresenta-se uma comparação dos principais parâmetros obtidos das simulações realizadas com o DAN-W e o DAN3D. Os valores calculados com cada programa são comparados com os valores observados após o evento. Também são comparados entre si os resultados obtidos das duas modelagens para verificação de desempenho dos programas 2D e 3D.

A Tabela 5.4 apresenta os valores obtidos das análises realizadas. Os valores de distância percorrida obtidos das modelagens numéricas resultaram ser satisfatórios, pois a diferença percentual ficou entre 1 e 2% em comparação com o valor observado.

A extensão da área de deposição foi calculada pelas simulações satisfatoriamente, com diferenças percentuais entre 12 e 13%. Para a extensão da área de deposição, o DAN3D superestimou a distância em 38 m e o DAN-W em 35 m, portanto os valores se situam a favor da segurança no caso de projetos de obras de convivência.

Os valores numéricos de volume final mostraram diferenças do valor observado que variam entre 1 e 3%, sendo esta diferença desprezível para fins de projeto de estruturas de proteção de fluxos de detritos ou para análises de risco.

Valores da área de deposição obtidos com as modelagens apresentaram diferenças entre 4 e 14 %. Estes resultados demonstram que o DAN3D por ser um programa que utiliza um MED consegue obter melhores aproximações da distribuição final do material em comparação com o DAN-W que utiliza informação limitada de topografia, resultando em uma estimativa mais grosseira da área de deposição. Entretanto, devido à magnitude de evento considera-se que ambas as aproximações são razoáveis para um estudo de análise de risco.

De forma geral as diferenças percentuais entre os resultados das simulações são consistentes entre si, ressaltando que foram adotados os mesmos materiais e propriedades para as modelagens 2D e 3D.

Tabela 5.4 – Comparação de resultados numéricos do DAN-W e DAN3D e valores reais observados no fluxo de detritos - Llano de la Piedra.

Parâmetro	Valores observados e calculados			Diferenças Percentuais		
	Observado	DAN-W	DAN3D	DAN-W Observado	DAN3D Observado	DAN-W DAN3D
Distância percorrida (m)	580	590	575	2	1	3
Extensão da área de deposição (m)	300	335	338	12	13	1
Volume final (m ³)	100.000	100.800	97.500	1	3	3
Área de deposição (m ²)	25.000	21.500	26.000	14	4	17

Os valores calculados pelas modelagens 2D e 3D para velocidade são apresentados no gráfico da Figura 5.14 e os valores para vários pontos de controle ao longo da trajetória na Tabela 5.17.

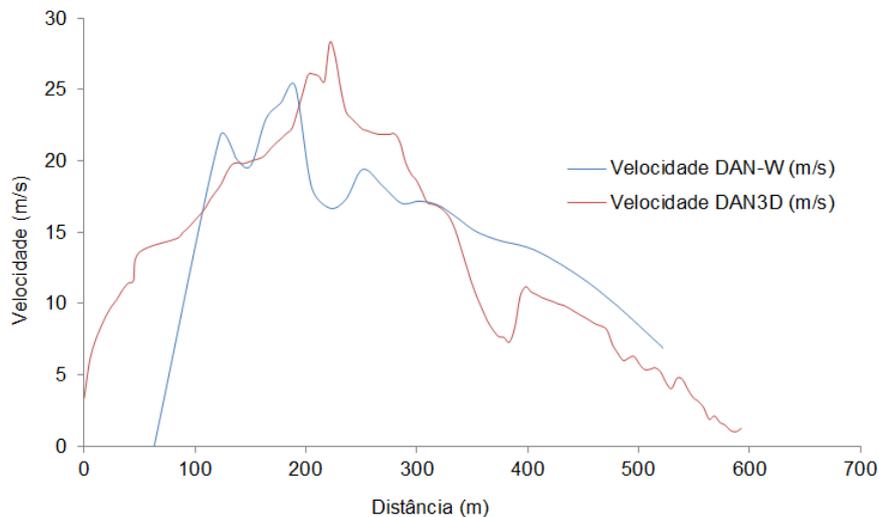


Figura 5.14 – Comparação das velocidades estimadas e calculadas em função da distância percorrida - Llano de la Piedra.

A análise da Figura 5.14 indica que os resultados das simulações em 2D e 3D são consistentes. No trecho inicial a maior variação de valores deve ser causada pelo tipo de abordagem de cada programa para construir a zona de iniciação, pois no caso do DAN-W insere-se a geometria de um sólido em 2D e para o DAN3D insere-se a topografia real do material de origem que foi deslocado.

Em relação às velocidades instantâneas em cada ponto de controle, a Tabela 5.5 mostra que os erros entre os valores calculados pelas modelagens variam de 11 a 33 %, com maior dispersão no trecho final da trajetória de fluxo, a 500 e 550 m da zona de iniciação.

Em relação aos valores calculados numericamente pelo DAN-W e DAN3D de altura máxima do fluxo, a Tabela 5.6 mostra erros que variam de 3 e 131 %. Os resultados reportam uma maior dispersão no último ponto de controle, trecho final da trajetória de fluxo, onde o DAN-W fornece valores de 3,0 m de altura e o DAN3D valores de 1,3 m. Para os resultados das profundidades de deposição, as porcentagens de erro variaram na faixa de 0 a 150 %, conforme indicado na Tabela 5.6 e novamente com a maior dispersão correspondente ao trecho final da viagem do fluxo de detritos.

Tabela 5.5 – Comparação de velocidades instantâneas numéricas - Llano de la Piedra.

Distância da zona de iniciação (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)		Diferenças percentuais DAN-W e DAN3D
	DAN-W	DAN-3D	
100	21	16	31
200	18	25	28
300	17	19	11
400	14	11	27
500	8	6	33
550	4	3	33

Tabela 5.6 – Valores numéricos de altura máxima do fluxo e profundidade máxima de deposição - Llano de la Piedra.

Parâmetro	Distância da zona de iniciação (m)	DAN-W	DAN-3D	Diferença percentual DAN-W e DAN3D
Altura máxima do fluxo (m)	100	5,5	7,0	21
	200	10,3	10,0	3
	300	15,0	10,5	43
	400	9,0	6,0	50
	500	5,0	4,0	25
	600	3,0	1,3	131
Profundidade máxima de deposição (m)	100	0,0	0,0	-
	200	0,0	0,0	-
	300	3,7	3,7	0
	400	6,6	4,6	43
	500	5,5	2,7	104
	600	3,0	1,2	150

Deve-se lembrar que os parâmetros instantâneos (localizados) de velocidade, altura de fluxo ou profundidade máxima de deposição são importantes para o dimensionamento de estruturas de proteção em um local específico. Porém, é usual obter-se valores com muita dispersão e, portanto, porcentagens de erro altas.

Em geral as aproximações do DAN-W fornecem maiores valores que o DAN3D, porém considera-se que os valores do DAN3D são mais realistas pois baseiam-se num MED, enquanto as análises do DAN-W são baseadas no perfil do local que não consegue representar a dispersão real do material mobilizado no terreno. Isto também pode indicar maiores cuidados com as modelagens do DAN-W, pois seus resultados podem subestimar valores de altura de fluxo e profundidade de deposição.

5.3. Córrego D'Antas e Hospital São Lucas, Rio de Janeiro, Brasil

5.3.1. Calibração preliminar dos parâmetros

O evento do morro Duas Pedras consiste de dois fluxos de detritos que aconteceram simultaneamente nas encostas leste e norte do morro em direção ao Hospital São Lucas e Córrego D'Antas, onde ambos os eventos foram deflagrados por intensas precipitações. Para a modelagem destes eventos foi utilizada a reologia de Voellmy como nos outros eventos analisados nesta pesquisa.

Esta reologia baseia-se na calibração de dois parâmetros principais, o coeficiente de atrito e o coeficiente de turbulência. A calibração preliminar destes parâmetros foi realizada com o auxílio do módulo SENSAN, conforme metodologia descrita no item 4.1.

Neste caso foram inseridas duas *trimlines* diferentes e a avaliação destes parâmetros foi realizada individualmente. A Figura 5.15a mostra o ajuste preliminar para o caso de Córrego D'Antas com um coeficiente de atrito de 0,30 e para o caso do Hospital São Lucas apresentado na Figura 5.15b um coeficiente de atrito aproximado de 0,34.

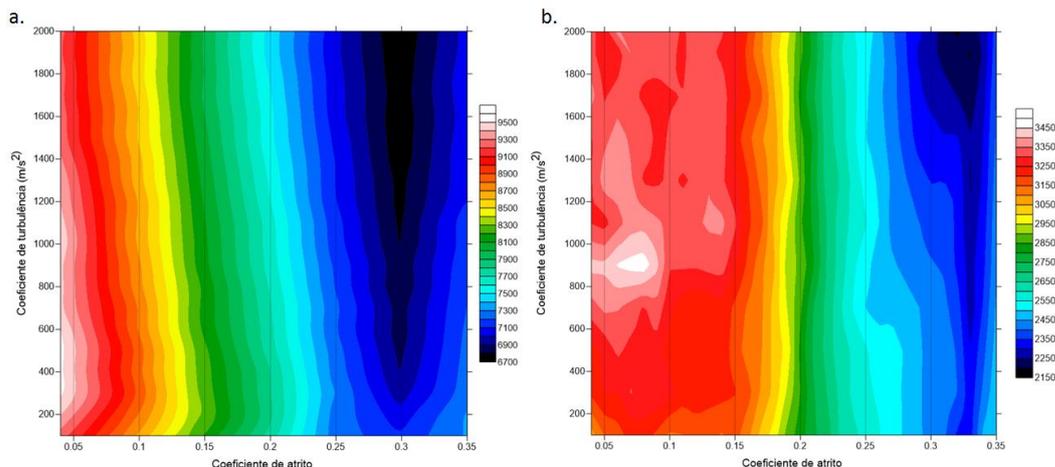


Figura 5.15 – Calibração preliminar de coeficiente de atrito: (a) Córrego D'Antas; (b) Hospital São Lucas.

5.3.2. Resultados da modelagem em 3D

A análise dinâmica em 3D do evento foi realizada com o programa DAN3D. Trabalhos pioneiros na modelagem do evento de Córrego D'Antas no programa DAN3D foram realizados por Pelizoni (2014).

Nesta pesquisa a modelagem foi realizada para os dois eventos simultaneamente, pois eles aconteceram ao mesmo tempo e os resultados da calibração preliminar sugerem que os coeficientes de atrito são similares. Após realizar várias simulações, foi estabelecido um coeficiente de atrito de 0,30 e o coeficiente de turbulência foi ajustado baseado em observações após o evento com um valor de 600 m/s^2 .

Foi utilizada uma taxa de erosão de 0,0035, calculada a partir da Equação 3.2 com diferentes profundidades máximas de erosão. Foram considerados 5 materiais; 2 exclusivos para o caso de Córrego D'Antas, 2 exclusivos para o caso de Hospital São Lucas e 1 em comum para os dois casos.

Para a zona de iniciação foram adotadas profundidades máximas de erosão de 0,1 m para Córrego D'Antas e 0,5 m para Hospital São Lucas, pois foi constatado um maior arraste de material na face leste do Morro. Na zona de transporte, foram estabelecidas profundidades de erosão de 0,5 m para Córrego D'Antas e 2,0 m para Hospital São Lucas, visto que o talvegue formado na encosta leste é mais proeminente do que a erosão sofrida pela encosta norte. Na zona de deposição a profundidade de erosão foi definida como nula.

Velocidades em diferentes pontos foram calculadas para realizar uma comparação com a calibração 2D. As velocidades foram obtidas a cada 100 m desde a zona de iniciação até atingir a distância percorrida total. Os resultados obtidos das modelagens são apresentados na Tabela 5.8 e Tabela 5.11 para Córrego D'Antas e na Tabela 5.14 para o Hospital São Lucas.

A distribuição espacial das velocidades resultantes da modelagem com o DAN3D é mostrada na Figura 5.16.

A distribuição de altura máxima do fluxo e a altura máxima de deposição após o evento, calculadas com DAN3D para toda a trajetória do fluxo são apresentadas na Figura 5.17.

Os valores pontuais destas simulações são apresentados na Tabela 5.9 e Tabela 5.12 para o caso de Córrego D'Antas, e Tabela 5.15 para o caso do Hospital São Lucas.

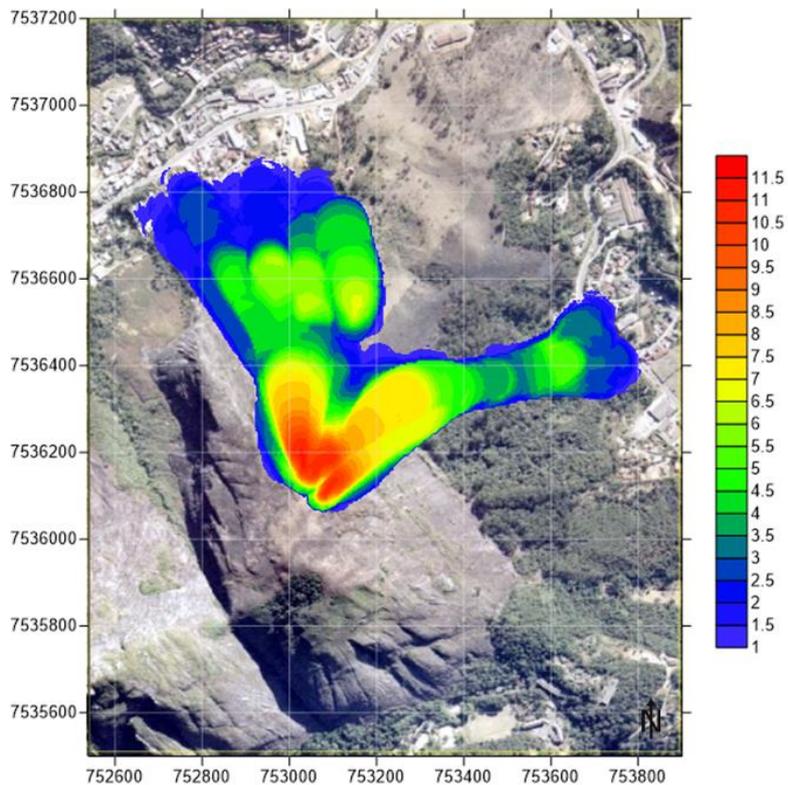


Figura 5.16 – Distribuição espacial de velocidades estimadas pelo programa DAN3D – Córrego D'Antas e Hospital São Lucas.

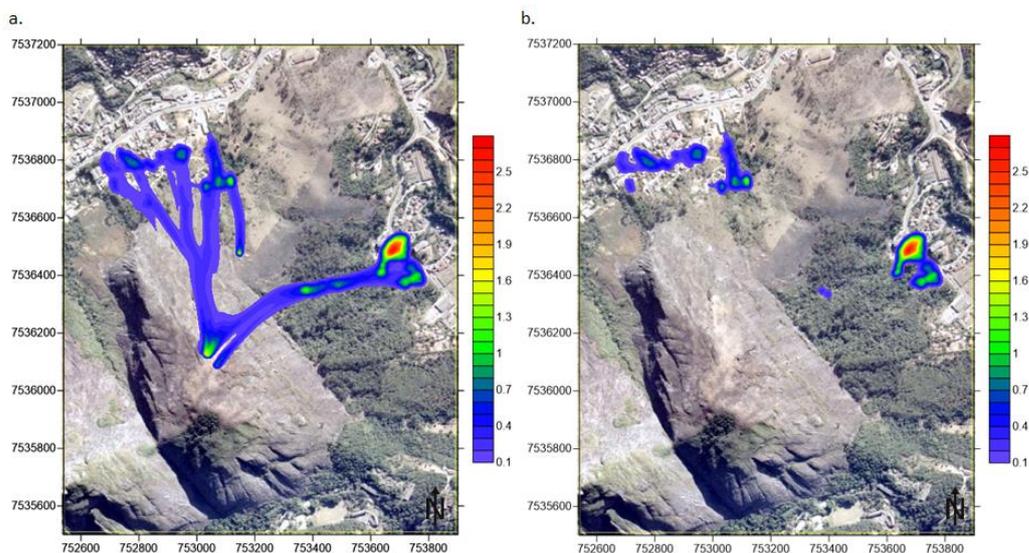


Figura 5.17 – Distribuição espacial de: (a) Altura máxima do fluxo e (b) Profundidade máxima de deposição - Córrego D'Antas e Hospital São Lucas.

Com a finalidade de conseguir realizar uma comparação entre as análises realizadas em 2D e as análises realizadas em 3D o evento de fluxo de detritos de Córrego D'Antas foi simulado como dois canais diferentes. A Figura 5.18 apresenta a estratégia desta simulação com duas zonas: i) Zona 1 corresponde aos canais 1 e 4, e ii) Zona 2 corresponde aos com os canais 2 e 3.



Figura 5.18 – Fluxos de detritos de Córrego D'Antas divididos em duas zonas para a realização das modelagens.

Para o fluxo de Córrego D'Antas, a distância percorrida foi calculada em 790 m para a Zona 1 e 770 m para a Zona 2. A extensão da área de deposição foi determinada igual a 110 e 190 m para a Zona 1 e Zona 2, respectivamente. O volume final foi calculado igual a 10.500 m³ e 7.500 m³ para a Zona 1 e Zona 2, respectivamente. A área de deposição resultou em 19.750 m² para a Zona 1 e 14.900 m² para a Zona 2.

No caso do evento do Hospital São Lucas, a distância total percorrida foi calculada em 840 m, a extensão da área de deposição em 190 m, o volume final em 12.500 m³ e a área de deposição em 23.580 m².

5.3.3. Resultados da modelagem em 2D

As simulações com o programa DAN-W foram realizadas considerando os parâmetros reológicos adotados no programa DAN3D e o perfil e dados de geometria de acordo com a informação de topografia descrita na caracterização do evento no item 4.2.3.

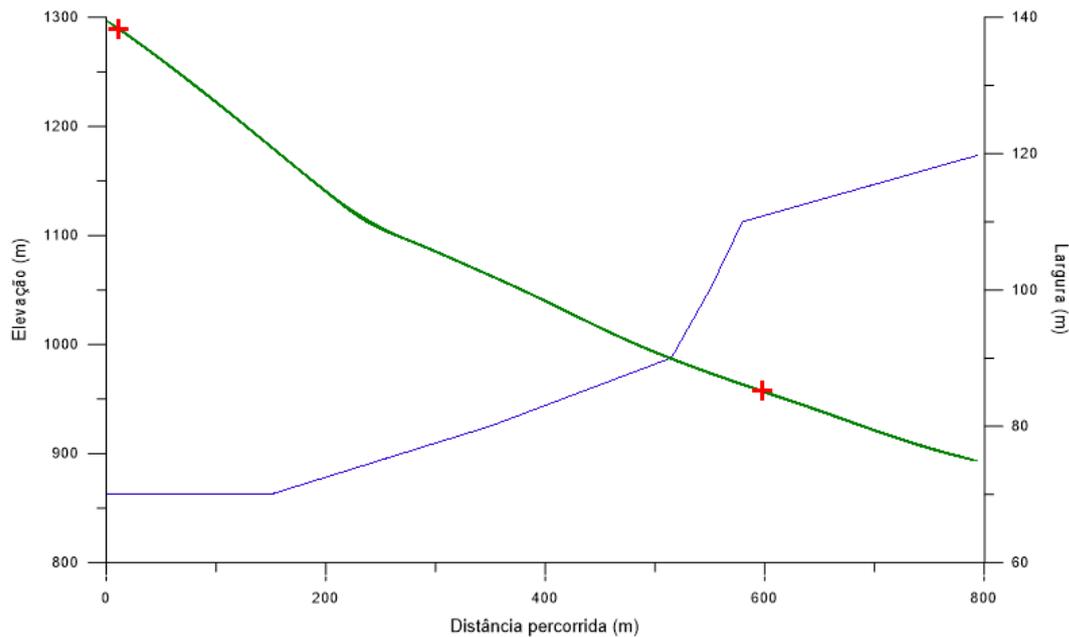
Os resultados da modelagem com o programa DAN-W são divididos para cada caso, tendo assim resultados para Córrego D'Antas e resultados para Hospital São Lucas. Isto se deve às limitações da entrada de topografia do *software* DAN-W, que não permite inserir ambos eventos simultaneamente.

5.3.3.1. Córrego D'Antas

Como explicado anteriormente, o fluxo de detritos de Córrego D'Antas apresentou três canais preferenciais e um canal secundário (Figura 5.18). Portanto, para a modelagem 2D, foi utilizada a estratégia de agrupar os canais nas Zonas 1 e 2. Desta forma, os canais 1 e 4 são analisados em uma mesma modelagem 2D e os canais 2 e 3 em uma outra modelagem.

Para ambas as modelagens do evento foram utilizados três materiais para manter a consistência com a modelagem realizada em 3D, na qual foi utilizado um material para cada zona. Os valores de coeficiente de atrito de 0,3 e coeficiente de turbulência de 600 m/s^2 foram mantidos. A profundidade de erosão foi definida em 0,5 m para a zona de transporte da Zona 1 e de 0,3m para a zona de transporte da Zona 2.

A Figura 5.19 apresenta os principais parâmetros de entrada do DAN-W para o fluxo de detritos da Zona 1, correspondentes ao perfil, superfície superior do evento, perfil de erosão, largura do canal e centros de gravidade inicial e final da corrida.

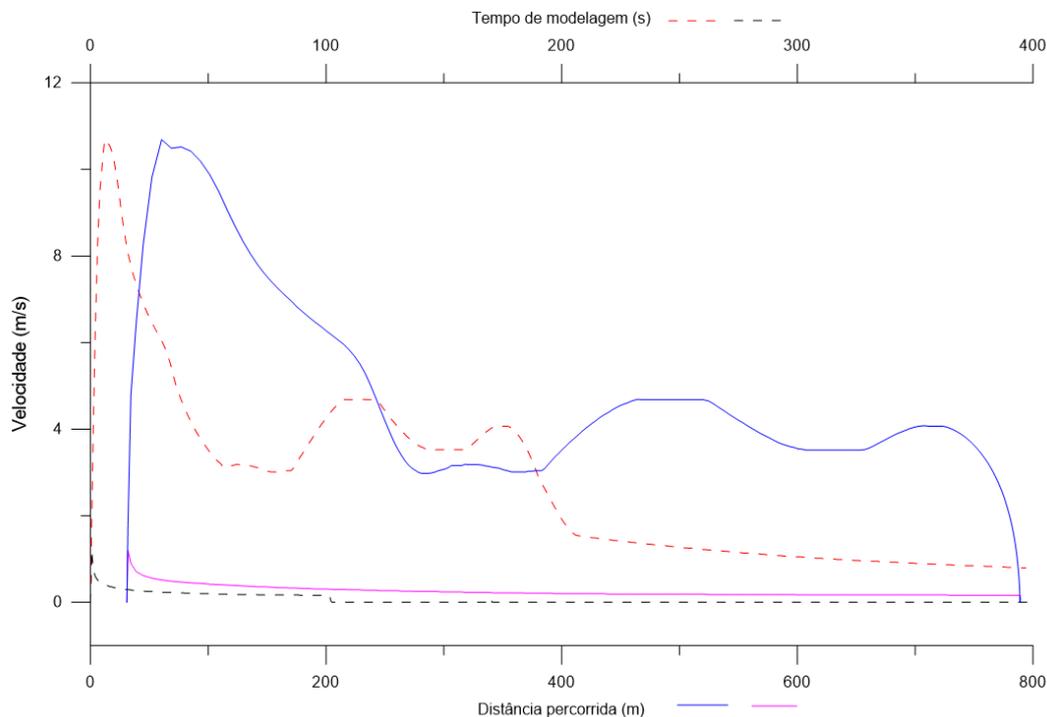


Legenda: Linha preta: perfil topográfico; Linha verde: superfície superior do movimento; Linha laranja: perfil de erosão definida em cada local; Linha azul: largura do canal; Cruzes vermelhas: centros de gravidade inicial e final do material.

Figura 5.19 – Principais características do fluxo no DAN-W – Zona 1 de Córrego D’Antas.

Os resultados da modelagem no DAN-W para a Zona 1 indicaram uma distância percorrida pelo fluxo de 850 m e extensão da área de deposição de 90 m. O movimento começou com um volume inicial de 1.000 m^3 , que erodiu o canal e resultou em um volume final de 11.800 m^3 e uma área de deposição de 15.000 m^2 .

As velocidades obtidas na modelagem 2D são apresentadas na Figura 5.20 e representam a velocidade da frente do movimento, velocidade da parte traseira do movimento, velocidade máxima e velocidade mínima. Foram estabelecidos pontos de controle a diferentes distâncias da zona de iniciação do movimento: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 e 750 m, para as quais foram determinadas velocidades de 9,9, 6,2, 3,2, 3,5, 4,7, 3,5, 3,6 e 3,5 m/s, respectivamente.



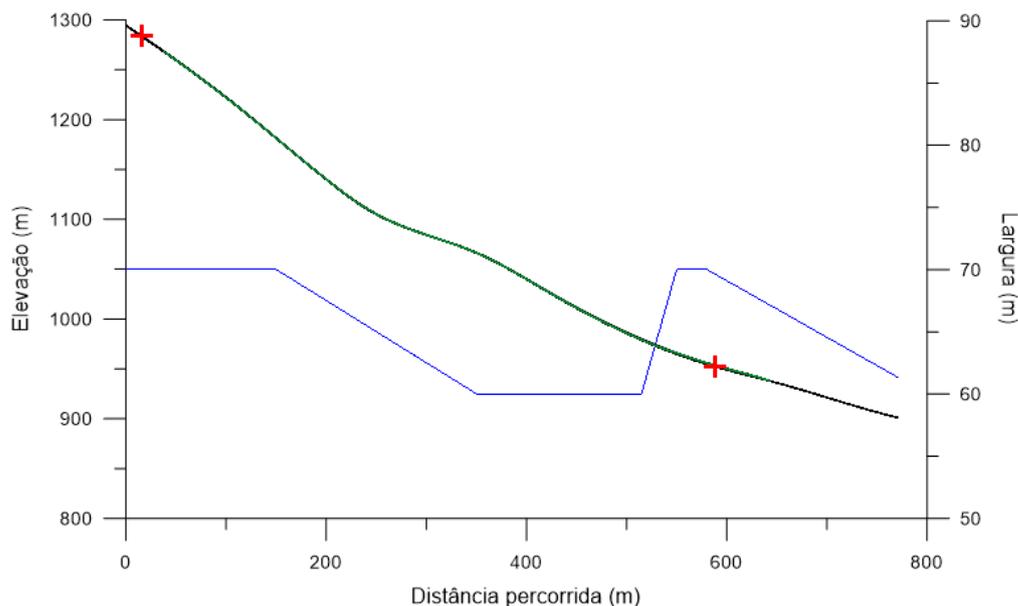
Legenda: Linha azul: velocidade da frente do movimento; Linha rosa: velocidade da parte traseira do movimento; Linha vermelha: velocidade máxima; Linha preta: velocidade mínima.

Figura 5.20 – Variação da velocidade com a distância percorrida obtida da modelagem com o programa DAN-W – Zona 1 de Córrego D´Antas.

A altura máxima do fluxo foi obtida nos pontos de controle colocados a cada 100 m desde a zona de iniciação até a zona de deposição, correspondendo a 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 e como último ponto a distância de 750 m. O DAN-W estimou valores de altura máxima de fluxo iguais a 0,37, 0,16, 0,15, 0,15, 0,3, 0,2, 0,6 e 0,8 m, respectivamente.

A profundidade máxima de deposição também foi determinada a cada 100 m, obtendo resultados de 0,0 m de profundidade até 500m de distância e 0,2, 0,6 e 0,6 m de profundidade para 600, 700 e 750 m de distância, respectivamente.

A Figura 5.21 apresenta os principais parâmetros de entrada do DAN-W para o fluxo de detritos da Zona 2, referentes ao perfil do caso, superfície superior do evento, perfil de erosão, largura do canal e centros de gravidade inicial e final da corrida.

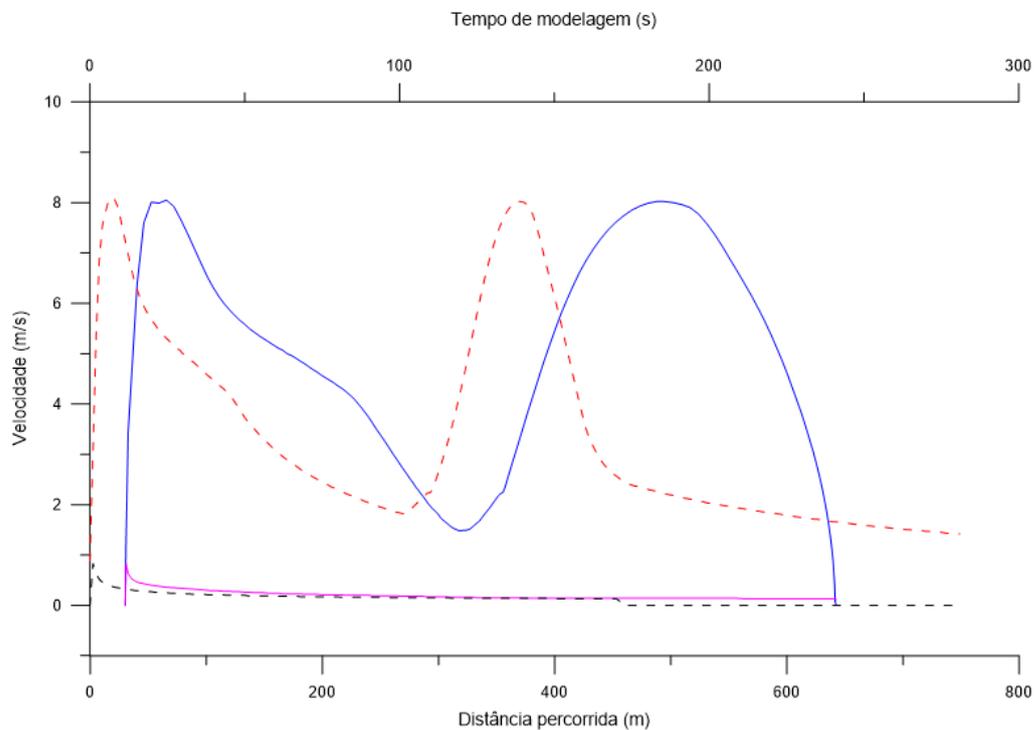


Legenda: Linha preta: perfil topográfico; Linha verde: superfície superior do movimento; Linha laranja: perfil de erosão definida em cada local; Linha azul: largura do canal; Cruzes vermelhas: centros de gravidade inicial e final do material.

Figura 5.21 – Principais características do fluxo no DAN-W – Zona 2 de Córrego D'Antas.

Os resultados da modelagem no DAN-W para a Zona 2 indicaram uma distância percorrida pelo fluxo de 750 m e extensão da área de deposição de 250 m. Partiu-se de um volume inicial de 500 m^3 , que erodiu o canal e resultou num volume final de 7.540 m^3 e uma área de deposição de 13.500 m^2 .

As velocidades obtidas na modelagem são mostradas na Figura 5.22 e correspondem às velocidade da frente do movimento, da parte traseira do movimento e velocidades máxima e mínima. Foram estabelecidos pontos de controle a diferentes distâncias da zona de iniciação do movimento: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 e 750 m, para as quais foram obtidas velocidades de 6,8, 4,6, 2,8, 5,5, 8,0, 4,5, 1,0 e 0,0m/s, respectivamente.



Legenda: Linha azul: velocidade da frente do movimento; Linha rosa: velocidade da parte traseira do movimento; Linha vermelha: velocidade máxima; Linha preta: velocidade mínima.

Figura 5.22 – Variação da velocidade com a distância percorrida obtida da modelagem com o programa DAN-W – Zona 2 de Córrego D´Antas.

A altura máxima do fluxo também foi obtida para cada ponto de controle, a a cada 100 m desde a zona de iniciação até a zona de deposição, referentes a 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700m e, como último ponto, 750 m. O DAN-W estimou valores de altura máxima de fluxo iguais a 0,25, 0,15, 0,15, 0,15, 0,3, 0,6, 0,49 e 0,0 m, respectivamente.

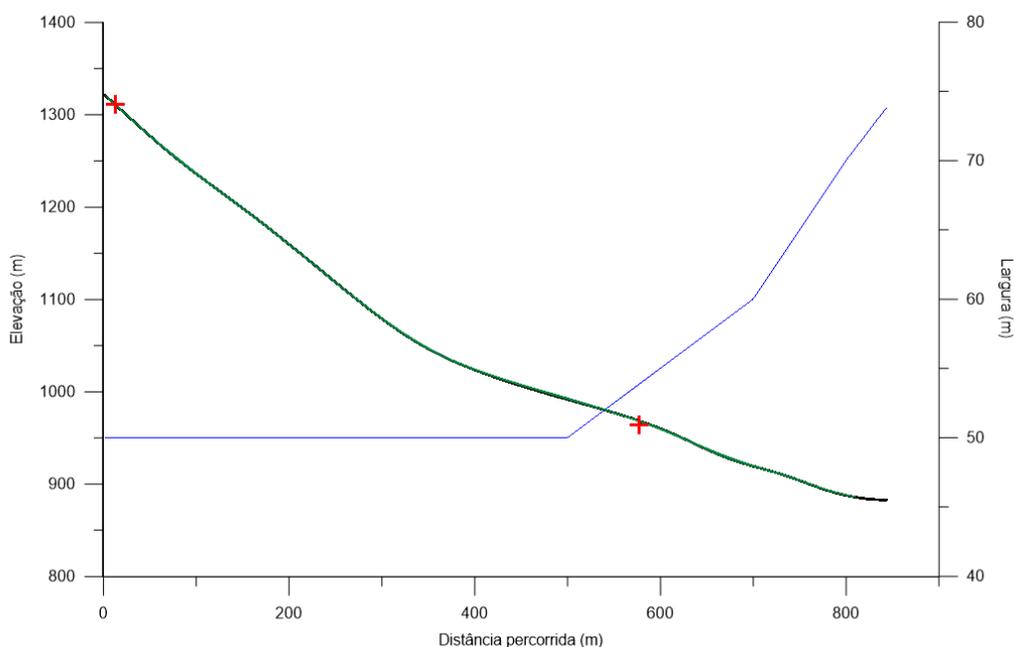
A profundidade máxima de deposição também foi determinada para cada 100 m, obtendo resultados de 0,0 m de profundidade até 500 m de distância e 0,17, 0,40 e 0,0 m de profundidade para 600, 700 e 750 m de distância, respectivamente. Na Tabela 5.12, estes valores são comparados com os obtidos pela modelagem 3D.

5.3.3.2. Hospital São Lucas

Para a modelagem do fluxo de detritos do Hospital São Lucas foram utilizados três materiais para manter a consistência com a modelagem realizada em 3D. Os valores de coeficiente de atrito de 0,3 e coeficiente de turbulência de 600

m/s² foram mantidos e profundidades de erosão de 0,1 e 0,5m foram utilizadas para a zona de iniciação e transporte, respectivamente.

A Figura 5.23 apresenta os principais parâmetros de entrada do DAN-W para o fluxo de detritos representados pelo perfil e superfície superior do evento, perfil de erosão, largura do canal e centros de gravidade inicial e final da corrida.

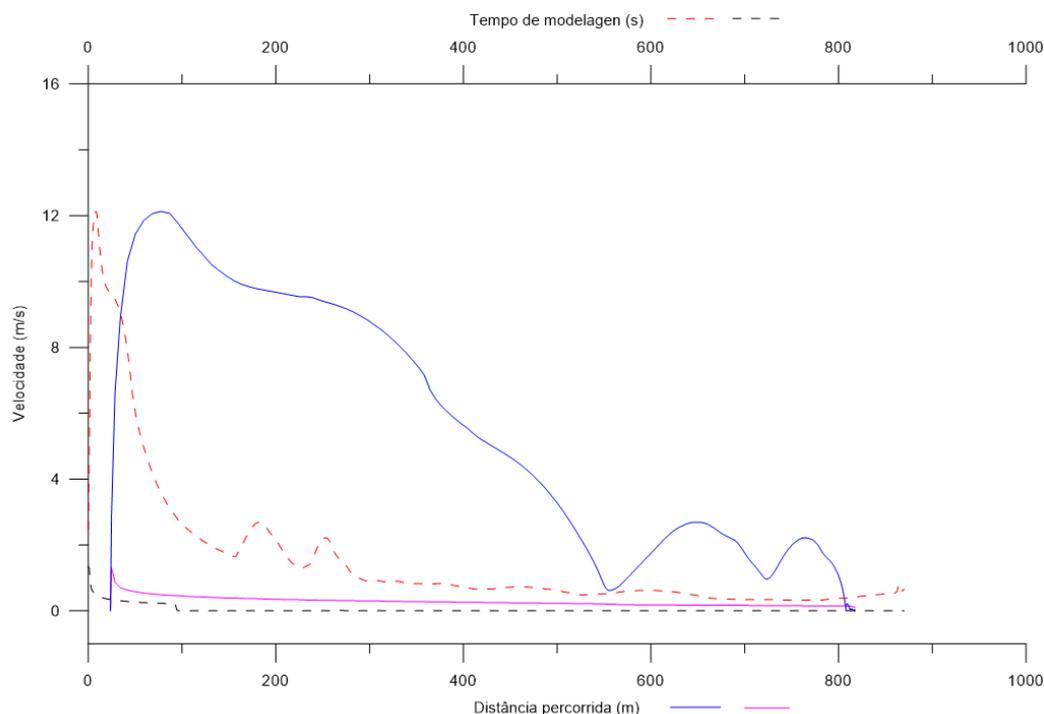


Legenda: Linha preta: perfil topográfico; Linha verde: superfície superior do movimento; Linha laranja: perfil de erosão definida em cada local; Linha azul: largura do canal; Cruzes vermelhas: centros de gravidade inicial e final do material.

Figura 5.23 – Principais características do fluxo no DAN-W – Hospital São Lucas.

Os resultados da modelagem no DAN-W indicaram uma distância percorrida pelo fluxo de 815 m e extensão da área de deposição de 200 m. O movimento começou com um volume de 1.000 m³, que erodiu o canal e resultou num volume final de 16.440 m³ e uma área de deposição de 22.500 m².

As velocidades obtidas na modelagem são apresentadas na Figura 5.24 e se referem à velocidade da frente do movimento, da parte traseira do movimento, máxima e mínima. Foram estabelecidos pontos de controle a diferentes distâncias da zona de iniciação do movimento: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 e 800 m, para os quais foram determinadas velocidades de 11,4, 9,5, 8,7, 5,6, 3,6, 2,0, 2,1 e 1,5 m/s, respectivamente.



Legenda: Linha azul: velocidade da frente do movimento; Linha rosa: velocidade da parte traseira do movimento; Linha vermelha: velocidade máxima; Linha preta: velocidade mínima.

Figura 5.24 – Variação da velocidade com a distância percorrida obtida da modelagem com o programa DAN-W – Hospital São Lucas.

A altura máxima do fluxo foi obtida nos pontos de controle localizados a 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 e 800m de distância da zona de iniciação, resultando em alturas máximas de fluxo iguais a 0,42, 0,25, 0,25, 0,82, 1,46, 0,30 e 0,95 m, respectivamente.

A profundidade máxima de deposição também foi determinada a cada 100 m, obtendo resultados de 0 m de profundidade até 400m de distância e 0,8, 0,3, 0,95 e 1,5 m de profundidade para 500, 600, 700 e 800 m de distância, respectivamente.

5.3.4. Análise dos resultados

Apresenta-se uma comparação dos principais parâmetros obtidos das simulações realizadas com o DAN-W e DAN3D. Os valores calculados com cada programa são comparados com os valores observados e medidos após o evento. Seguidamente comparam-se os resultados obtidos da modelagem em 2D com os obtidos da modelagem em 3D.

A encosta de Córrego D'Antas foi dividida em duas zonas para fazer as análises. A zona 1 corresponde com os canais de fluxo 1 e 2 e a zona 2 com os canais 3 e 4 mostrados na Figura 5.18.

5.3.4.1. Córrego D'Antas – Zona 1

A Zona 1 de Córrego D'Antas compreende uma zona de iniciação com aproximadamente 1.000 m³ de volume inicial. A Tabela 5.7 apresenta os valores obtidos das análises realizadas na Zona 1 de Córrego D'Antas.

Figura 5.7 – Comparação de resultados numéricos do DAN-W e DAN3D e valores reais observados no fluxo de detritos - Zona 1 de Córrego D'Antas.

Parâmetro	Valores observados e calculados			Diferenças Percentuais		
	Observado	DAN-W	DAN3D	DAN-W Observado	DAN3D Observado	DAN-W DAN3D
Distância percorrida (m)	780	850	790	9	1	8
Extensão da área de deposição (m)	115	90	110	22	4	18
Volume final (m ³)	10.000	11.800	10.500	18	5	12
Área de deposição (m ²)	20.000	15.000	19.750	25	1	24

As diferenças percentuais para a distância percorrida obtidas numericamente em relação ao valor observado no evento variam entre 1 e 9%. A extensão da área de deposição foi aproximada pelas simulações numéricas com diferença percentual entre 4 e 22%. Estes parâmetros são considerados de grande importância para as medidas de proteção e convivência.

As simulações reportam resultados de volume final com variação porcentual entre 5 e 18% e as áreas de deposição entre 1 e 25%.

Em geral, as diferenças percentuais entre os resultados das simulações 2D, 3D e os valores observados ficaram entre 1 e 25 %, reforçando que os modelos são consistentes entre si. Naturalmente, as maiores diferenças percentuais são referentes aos resultados do programa DAN-W, pois os dados de entrada topográficos são mais limitados do que o DAN3D que trabalha com o MED do local.

A Figura 5.25 apresenta a variação de velocidade com a distância da zona de iniciação calculada com as modelagens numéricas 2D e 3D ao longo da trajetória

do fluxo de detritos. A Tabela 5.8 apresenta um resumo destes resultados e os erros percentuais.

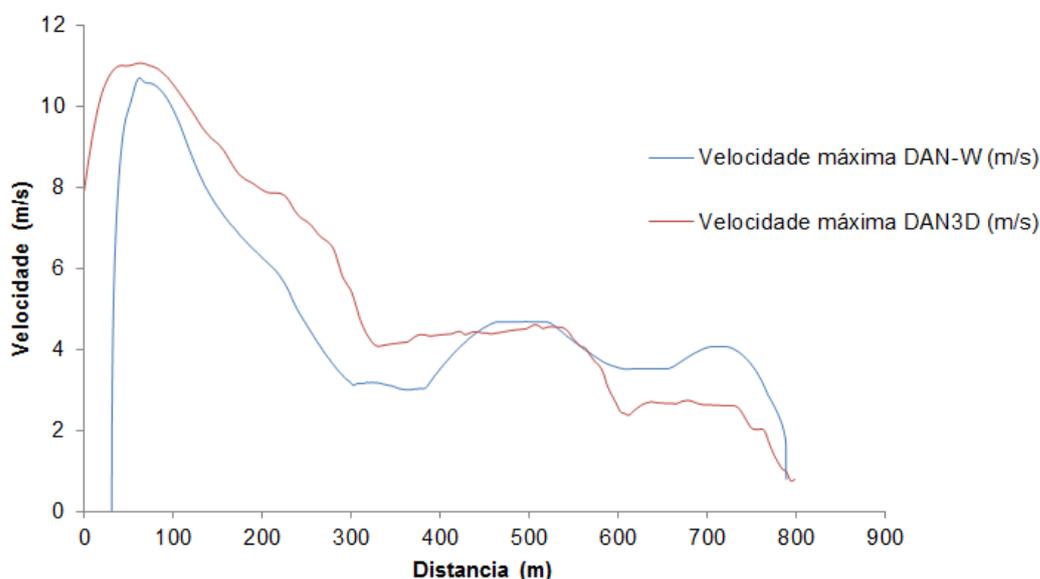


Figura 5.25 – Comparação das velocidades máximas calculadas com DAN-W e DAN3D em função da distância percorrida - Zona 1 de Córrego D'Antas.

Tabela 5.8 – Comparação de velocidades instantâneas numéricas - Zona 1 de Córrego D'Antas.

Distância da zona de iniciação (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)		Diferenças percentuais DAN-W e DAN3D
	DAN-W	DAN-3D	
100	9,9	10,5	6
200	6,2	7,9	22
300	3,2	5,5	42
400	3,5	4,3	19
500	4,7	4,5	4
600	3,5	2,5	40
700	3,6	2,6	38
750	3,5	2,0	75

A Figura 5.25 indica a mesma tendência dos resultados em ambas as modelagens. Entretanto, no trecho inicial, entre os 0 e 400 m de distância percorrida, as velocidades calculadas pelo DAN-W são inferiores às calculadas pelo DAN3D. Por sua vez, no trecho final, entre os 400 e 500 m de distância percorrida, as velocidades calculadas pelo DAN3D são inferiores às calculadas pelo DAN-W.

A Tabela 5.8 permite uma melhor comparação dos resultados, considerando as velocidades instantâneas nos pontos de controle a cada 100 m. Observa-se que as diferenças percentuais variam de 4 a 75%, com as maiores diferenças correspondentes ao trecho final da trajetória do fluxo de detritos.

A Tabela 5.9 apresenta os valores numéricos obtidos com Dan-W e DAN3D referentes à altura máxima do fluxo e profundidade máxima de deposição. As diferenças percentuais entre os resultados das duas modelagens variam de 5 e 50 %.

Tabela 5.9 – Valores numéricos de altura máxima do fluxo e profundidade máxima de deposição - Zona 1 de Córrego D'Antas.

Parâmetro	Distância da zona de iniciação (m)	DAN-W	DAN-3D	Diferença percentual DAN-W e DAN3D
Altura máxima do fluxo (m)	100	0,37	0,40	8
	200	0,16	0,26	38
	300	0,15	0,23	35
	400	0,15	0,17	12
	500	0,3	0,20	50
	600	0,2	0,16	25
	700	0,6	0,70	14
	750	0,8	0,60	33
Profundidade máxima de deposição (m)	100	0,0	0,0	0
	200	0,0	0,0	0
	300	0,0	0,0	0
	400	0,0	0,0	0
	500	0,0	0,0	0
	600	0,2	0,0	0
	700	0,6	0,46	30
	750	0,6	0,57	5

5.3.4.2. Córrego D'Antas – Zona 2

A Zona 2 de Córrego D'Antas compreende uma zona de iniciação com aproximadamente 500 m³ de volume inicial. A Tabela 5.10 apresenta os valores obtidos das análises realizadas na Zona 2 de Córrego D'Antas.

Tabela 5.10 – Comparação de resultados numéricos do DAN-W e DAN3D e valores reais observados no fluxo de detritos - Zona 2 de Córrego D'Antas.

Parâmetro	Valores observados e calculados			Diferenças Percentuais		
	Observado	DAN-W	DAN3D	DAN-W Observado	DAN3D Observado	DAN-W DAN3D
Distância percorrida (m)	770	750	770	3	0	3
Extensão da área de deposição (m)	200	250	190	25	5	32
Volume final (m ³)	7.000	7.540	7.500	8	7	1
Área de deposição (m ²)	15.000	13.500	14.900	10	1	9

Os valores de distância percorrida obtidas com as modelagens numéricas variam de 0 a 3% em reação aos valores observados no evento. A extensão da área de deposição foi aproximada pelas simulações numéricas com diferença percentual entre 5 e 25%. As simulações numéricas reportam resultados de volume final com variação percentual entre 7 e 8% do valor observado e as áreas de deposição entre 1 e 10%. Estes valores são importantes para a realização de análises de risco.

Em geral, as diferenças percentuais entre os resultados das simulações 2D, 3D e os valores observados variaram entre 1 e 32 %, reforçando que os modelos são consistentes entre si. Naturalmente, as maiores diferenças percentuais são obtidas com os resultados do programa DAN-W, pois o *input* de topografia é mais limitado do que o DAN3D que trabalha com um MED do local.

A Figura 5.26 apresenta a variação de velocidade com a distância da zona de iniciação calculada com as modelagens numéricas 2D e 3D ao longo da trajetória do fluxo de detritos. Observa-se que a mesma tendência dos resultados em ambas as modelagens. Note-se que acontece o mesmo que na Zona 1, onde no trecho inicial, entre os 0 e 400 m de distância percorrida, as velocidades calculadas pelo DAN-W são inferiores as calculadas pelo DAN3D. No trecho final, entre os 400 e 500 m de distância percorrida, as velocidades calculadas pelo DAN3D são inferiores às calculadas pelo DAN-W.

A Tabela 5.11 apresenta um resumo destes resultados e os erros percentuais, considerando as velocidades obtidas nos pontos de controle a cada 100 m. As diferenças percentuais se encontram no intervalo de 10 a 42%. Nota-se ainda que no último ponto de controle não é possível comparar os valores, pois a distância percorrida pelo DAN-W foi inferior à calculada pelo DAN3D.

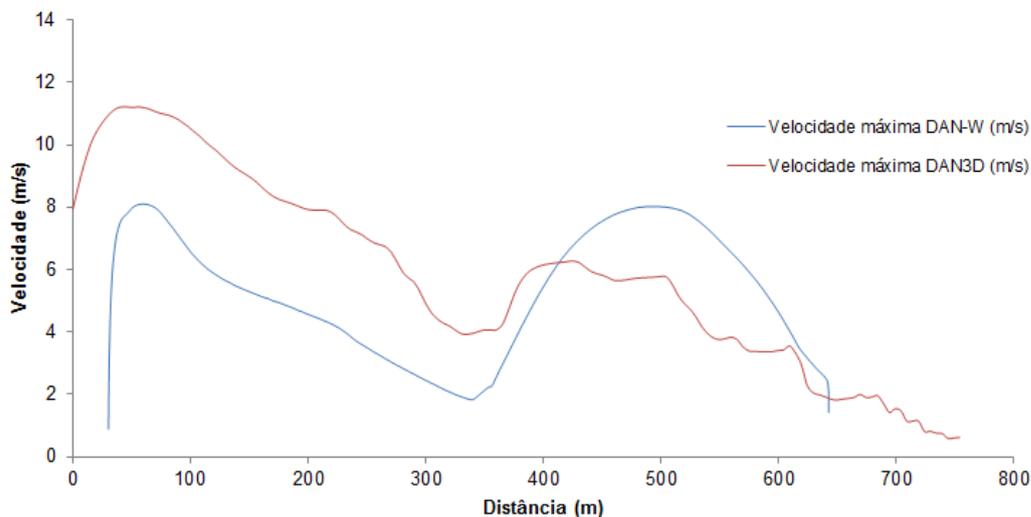


Figura 5.26 – Comparação das velocidades máximas calculadas com DAN-W e DAN3D em função da distância percorrida - Zona 2 de Córrego D'Antas.

Tabela 5.11 – Comparação de velocidades instantâneas numéricas - Zona 2 de Córrego D'Antas.

Distância da zona de iniciação (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)		Diferenças percentuais DAN-W e DAN3D
	DAN-W	DAN-3D	
100	6,8	10,4	35
200	4,6	7,9	42
300	2,8	4,8	42
400	5,5	6,1	10
500	8,0	5,7	40
600	4,5	3,4	32
700	1,0	1,5	33
750	-	0,6	-

Em relação aos valores determinados numericamente pelo Dan-W e DAN3D referentes à altura máxima do fluxo e a profundidade máxima de deposição, a Tabela 5.12 resume os resultados e os compara entre si. As diferenças percentuais variam de 0 a 32 % para estes parâmetros.

Tabela 5.12 – Valores numéricos de altura máxima do fluxo e profundidade máxima de deposição - Zona 2 de Córrego D'Antas.

Parâmetro	Distância da zona de iniciação (m)	DAN-W	DAN-3D	Diferença percentual DAN-W e DAN3D
Altura máxima do fluxo (m)	100	0,25	0,35	29
	200	0,15	0,20	25
	300	0,15	0,22	32
	400	0,15	0,20	25
	500	0,30	0,25	20
	600	0,60	0,49	22
	700	0,49	0,51	4
	750	-	0,20	-
Profundidade máxima de deposição (m)	100	0,00	0,00	-
	200	0,00	0,00	-
	300	0,00	0,00	-
	400	0,00	0,00	-
	500	0,00	0,00	-
	600	0,17	0,23	26
	700	0,40	0,40	0
	750	-	0,20	-

5.3.4.3. Hospital São Lucas

No caso do Hospital São Lucas foi considerado um volume inicial de 1.000 m³ de material. A Tabela 5.13 apresenta os valores obtidos das análises realizadas para o fluxo de detritos.

Os valores de distância percorrida obtidos pelas modelagens numéricas resultaram ser satisfatórios, pois as diferenças percentuais variam entre 1 e 2 % em relação ao valor observado/medido após o fluxo de detritos.

A extensão da área de deposição foi aproximada pelas simulações numéricas com diferença percentual entre 5 e 10 %, correspondendo a uma variação de apenas 10 m em relação ao valor observado no evento. A Figura 5.27 mostra a capacidade dos dois programas de modelar um depósito de material que ficou no meio da encosta, conforme constatado em campo.

Tabela 5.13 – Comparação de resultados numéricos do DAN-W e DAN3D e valores reais observados no fluxo de detritos - Hospital São Lucas.

Parâmetro	Valores observados e calculados			Diferenças Percentuais		
	Observado	DAN-W	DAN3D	DAN-W Observado	DAN3D Observado	DAN-W DAN3D
Distância percorrida (m)	830	815	840	2	1	3
Extensão da área de deposição (m)	200	180	190	10	5	5
Volume final (m ³)	12.000	16.440	12.500	37	4	32
Área de deposição (m ²)	25.000	22.500	23.580	10	6	5

As modelagens numéricas forneceram valores de volume final que variam entre 4 e 37% do valor estimado para o evento. O programa DAN-W superestimou o valor em 4.440 m³ e o DAN3D subestimou o valor em 500 m³. Estes resultados evidenciam a importância dos dados de topografia e comprovam a maior capacidade do DAN3D, visto que fornece uma melhor aproximação ao utilizar um MED, ao contrário do DAN-W que utiliza apenas um perfil baseado em dados topográficos.

Valores da área de deposição obtidos com as modelagens apresentaram diferenças percentuais entre 6 e 10% em relação ao valor observado no evento. O DAN3D apresentou a melhor aproximação, porém subestimou o valor observado em 1.420 m³. Estes resultados comprovam novamente que o DAN3D consegue obter melhores aproximações da distribuição final do material em comparação com o DAN-W. Porém, pela magnitude de evento considera-se que ambas as aproximações são razoáveis para um estudo de análise de risco.

Em geral, as diferenças percentuais entre os resultados das simulações 2D e 3D ficaram entre 3 e 32 %, reforçando que os modelos são consistentes entre si.

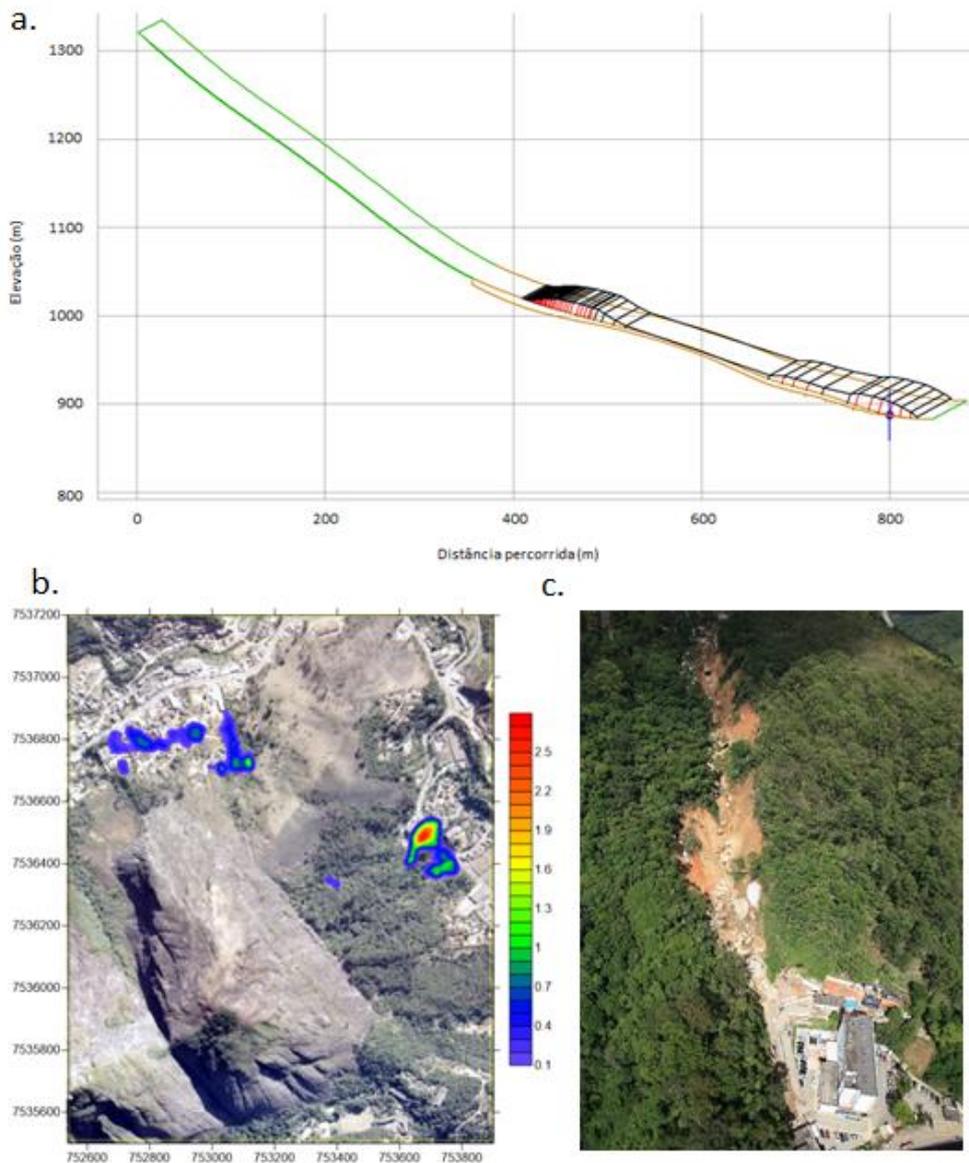


Figura 5.27 – Modelagens do fluxo de detritos do Hospital São Lucas mostrando material depositado no meio da encosta: (a) Resultados do DAN-W; (b) Resultados do DAN3D; (c) Vista aérea.

A Figura 5.28 apresenta a variação de velocidade instantânea com a distância da zona de iniciação calculada com as modelagens numéricas 2D e 3D ao longo da trajetória do fluxo de detritos. Observa-se que a mesma tendência dos resultados em ambas as modelagens. Entretanto, no trecho inicial, há uma variação relevante, a qual pode ser relacionada à forma de construção da zona de iniciação de cada programa.

A Tabela 5.14 apresenta um resumo destes resultados e os erros percentuais, considerando as velocidades obtidas nos pontos de controle a cada 100 m. As

diferenças percentuais se encontram no intervalo de 3 a 60%, sendo maiores no trecho final, após os 600 m.

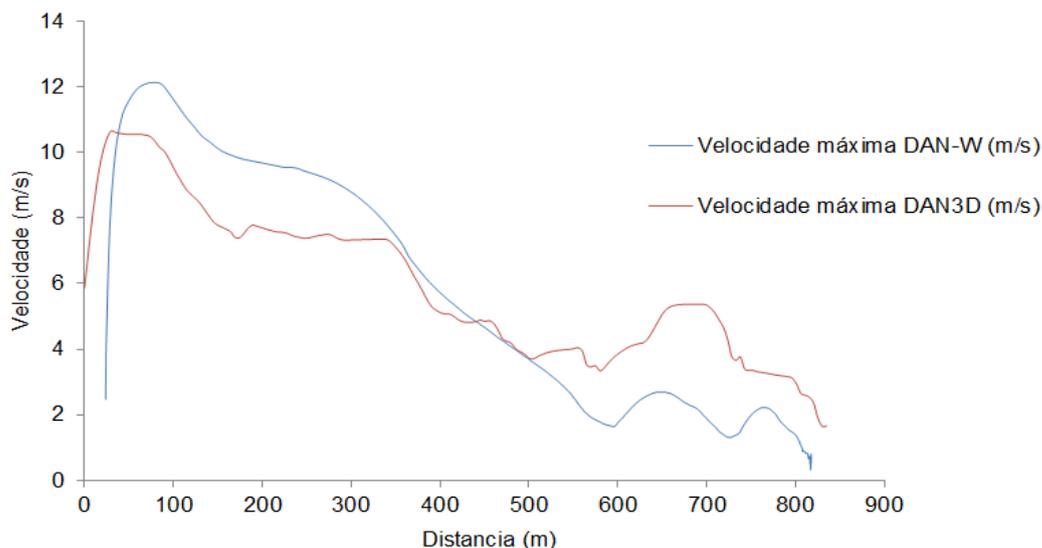


Figura 5.28 – Comparação das velocidades máximas calculadas com DAN-W e DAN3D em função da distância percorrida – Hospital São Lucas.

Tabela 5.14 – Comparação de velocidades instantâneas numéricas - Hospital São Lucas.

Distância da zona de iniciação (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)		Diferenças percentuais DAN-W e DAN3D
	DAN-W	DAN-3D	
100	11,4	9,5	20
200	9,5	7,7	23
300	8,7	7,3	19
400	5,6	5,1	10
500	3,6	3,7	3
600	2,0	3,8	47
700	2,1	5,3	60
800	1,5	2,9	48

A Figura 5.15 apresenta os valores numéricos obtidos do DAN-W e DAN3D para altura máxima do fluxo e a profundidade máxima de deposição em função dos pontos de controle a cada 100 m de distância da zona de iniciação. As modelagens 2D e 3D apresentam diferenças percentuais entre 5 e 33 % para estes parâmetros. Ressalta-se que a comparação de valores locais geralmente mostra grandes dispersões.

Tabela 5.15 – Valores numéricos de altura máxima do fluxo e profundidade máxima de deposição – Hospital São Lucas.

Parâmetro	Distância da zona de iniciação (m)	DAN-W	DAN-3D	Diferença percentual DAN-W e DAN3D
Altura máxima do fluxo (m)	100	0,42	0,35	20
	200	0,25	0,21	19
	300	0,25	0,20	25
	400	0,82	0,78	5
	500	1,46	1,20	22
	600	0,30	0,45	33
	700	0,95	1,00	5
	800	1,50	2,00	25
Profundidade máxima de deposição (m)	100	0,00	0,00	0
	200	0,00	0,00	0
	300	0,00	0,00	0
	400	0,00	0,00	0
	500	0,80	0,70	14
	600	0,30	0,00	-
	700	0,95	1,00	5
	800	1,50	2,00	25

Deve-se considerar que realizar comparações instantâneas de velocidade, altura de fluxo ou profundidade máxima de deposição é importante para a projeção de medidas de proteção, visto que é necessário conhecer o comportamento do movimento em um local específico. Porém, é possível encontrar diferenças percentuais entre os resultados, pois os valores obtidos às vezes apresentam grande dispersão num mesmo local.

5.3.4.4. Considerações finais

Este capítulo apresenta a metodologia para calibração dos parâmetros utilizada para encontrar uma primeira aproximação dos parâmetros reológicos de cada material. Também apresenta os resultados das análises realizadas no DAN3D, com as quais foram definidos os parâmetros a utilizar para cada material de acordo com a reologia escolhida. Também são apresentados os resultados das modelagens no programa DAN-W que utilizam os parâmetros definidos após a calibração no DAN3D. Finalmente, são comparados os resultados obtidos em cada modelagem (2D e 3D) com os valores medidos ou observados em campo e os valores obtidos das modelagens 2D com os obtidos das modelagens 3D.

De forma geral os valores entre as modelagens são consistentes, apresentando o mesmo comportamento qualitativo nos eventos. Porém, são encontradas variações significativas de até 50% em alguns casos de valores instantâneos. Desta forma, deve-se verificar o propósito da modelagem. Para a seleção e dimensionamento de medidas de proteção e convivência, os valores instantâneos são importantes e as diferenças devem ser estudadas com cuidado. Por sua vez, as análises de risco requerem a obtenção de diferentes cenários para um mesmo evento e aproximações de valores como distância percorrida e área de deposição se tornam prioritárias.