

Orientarsi nella scelta e nell'uso dei modelli SIMULARE VALANGHE DI NEVE DENSA

Davide Negri

davide96.negri@gmail.com

Carlo Bee

carlo.bee@unitn.it

Daniel Zugliani

daniel.zugliani@unitn.it

Giorgio Rosatti

giorgio.rosatti@unitn.it

Dipartimento DICAM, Università di Trento,
Via Mesiano 77, 38123 Trento, Italia

Michele Martinelli

A.I.A. Engineering S.r.l.,
Passaggio Benvenuto Disertori 36
38121, Trento, Italia
michele.martinelli@studioaia.it

Simulating dense snow avalanches using two-dimensional models is an increasingly popular activity among practitioners. This study aims to quantitatively assess the impact of different numerical integration techniques on the simulation results of three operational models that share the same physical-mathematical description of the avalanche phenomenon. Analysing some test cases made highlighting precise limits of purely numerical origin possible. Moreover, the reconstruction of three actual events, characterised by different avalanches and climatic conditions, brought to light various aspects linked to the numerical techniques and the limits of the physical-mathematical model employed. Although it does not claim to be exhaustive, we believe that this work can help to tackle the choice of the most suitable model with greater awareness, as well as to dwell, when observing the results, on the elements that require greater attention and critical sense, especially when considering forecasting applications in a context of climate change.

Un confronto sistematico tra alcuni modelli operativi 2D

Simulare valanghe di neve densa attraverso l'uso di modelli bidimensionali è una attività sempre più diffusa tra gli addetti ai lavori. L'obiettivo di questo approfondimento è quello di valutare quantitativamente l'impatto delle diverse tecniche di integrazione numerica sui risultati delle simulazioni di tre modelli operativi che condividono la stessa descrizione fisico-matematica del fenomeno valanghivo. L'analisi di alcuni casi test ha permesso di evidenziare precisi limiti di origine prettamente numerica mentre la ricostruzione di tre eventi reali, caratterizzati da tipologie di valanga e condizioni climatiche differenti, ha permesso di far emergere vari aspetti legati sia alle tecniche numeriche che ai limiti del modello fisico-matematico impiegato. Pur non avendo la pretesa di essere esaustivo, riteniamo che questo lavoro possa aiutare ad affrontare con maggior cognizione di causa la scelta del modello che si ritiene più adatto nonché ad imparare a soffermarsi, nell'osservazione dei risultati, sugli elementi che necessitano di maggior attenzione e senso critico, soprattutto in relazione ad applicazioni previsionali in un contesto di cambiamento climatico.



40 ANNI DI AINEVA

INTRODUZIONE

L'uso di modelli bidimensionali per la simulazione numerica di valanghe di neve densa è una attività che è sempre più diffusa sia tra i professionisti che tra i servizi pubblici che si occupano di valanghe. La disponibilità di DTM ad alta risoluzione sino alle vette delle montagne, i progressi della ricerca nel campo della modellazione numerica e la disponibilità di hardware sempre più potenti hanno reso l'uso dei modelli bidimensionali uno standard nelle attività di ricostruzione di eventi e di mappatura del pericolo.

Gli ingredienti che costituiscono un modello di simulazione numerica sono essenzialmente due: la descrizione fisico-matematica del fenomeno, cioè il sistema di equazioni differenziali derivanti da principi di conservazione della meccanica (a cui vanno aggiunte opportune ipotesi e relazioni algebriche per esprimere la resistenza al moto della neve) e la tecnica di integrazione numerica di queste equazioni differenziali. Negli ultimi anni sono stati sviluppati vari modelli che, nella loro versione operativa di base, condividono la descrizione fisico-matematica ma usano differenti approcci numerici. Questo ultimo aspetto, che a prima vista può risultare un dettaglio di secondaria importanza, ha in realtà un impatto significativo sulla qualità dei risultati che si possono ottenere: pur presentando la stessa descrizione fisico-matematica, differenti modelli possono produrre risultati che, in qualche caso, possono essere anche molto differenti.

L'obiettivo di questo approfondimento, derivato da una tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio presso il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Trento (Negri, 2023), è quello di valutare quantitativamente l'impatto delle tecniche di integrazione numerica impiegate in tre differenti modelli operativi, sui risultati relativi alla modellazione di differenti situazioni di moto di valanghe di neve densa.

I modelli qui considerati sono:

AvaFrame com1DFA: è un modello sviluppato da una partnership tra *Austrian Avalanche and Torrent Service* e *Austrian*

Research Centre for Forests afferenti a Federal Ministry Republic of Austria: Agriculture, Regions and Tourism, il codice è open source e può essere utilizzato come applicativo del software QGIS su PC. Nel proseguo dell'articolo, per brevità, si indicherà questo modello con AvaFrame.

► **RAMMS::AVALANCHE:** è un modello sviluppato dal *WLS Institute for Snow and Avalanche Research SLF* (Davos, Svizzera), il codice è proprietario e la sua gestione avviene tramite una interfaccia dedicata su PC. Nel proseguo dell'articolo, per brevità, si indicherà questo modello con RAMMS

► **TRENT2D*:** è un modello sviluppato dal *Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento*, il codice è proprietario e la sua gestione avviene tramite il sistema WEEZARD, un servizio online basato su piattaforma WebGIS.

Per un approfondimento relativo alla modellazione fisico-matematica e alle differenti tecniche numeriche usate da questi modelli si rimanda al **Box 1**.

La metodologia utilizzata per raggiungere l'obiettivo si basa sul confronto sistematico dei risultati di simulazioni effettuate con i tre codici di calcolo. Si sono utilizzati due set di simulazioni differenti: il primo gruppo, costituito da quattro casi differenti, considera moti molto semplici ed è stato concepito per evidenziare il comportamento numerico in relazione ad un singolo aspetto modellistico alla volta. Tre casi presentano soluzione analitica esatta per cui il confronto di questa con le soluzioni numeriche permette di calcolare l'errore di ciascun modello e quindi di avere una valutazione quantitativa dell'abilità della tecnica numerica di riprodurre quell'aspetto. Questo primo gruppo è presentato nella sezione Casi test. Il secondo gruppo di simulazioni è relativo alla riproduzione di alcuni eventi valanghivi reali ed è presentato nella sezione Ricostruzione di eventi. In questo caso, i campi di moto sono molto complessi e quindi la valutazione delle prestazioni non può che essere essenzialmente globale. Gli aspetti che possono essere considerati in questo set di simula-

zioni sono due: a) i differenti risultati che si ottengono dai differenti modelli a parità di parametri modellistici e b) la differenza tra i risultati numerici e le osservazioni di campo disponibili. Questo secondo aspetto non dipende solo dalle differenti tecniche numeriche, ma anche da possibili limiti nella descrizione fisico-matematica del fenomeno. Una trattazione approfondita di questi limiti va oltre gli obiettivi specifici di questo lavoro e pertanto ci limiteremo ad analizzare soltanto alcuni elementi.

Il frutto di questo lavoro vorrebbe da un lato essere un possibile supporto per una scelta ragionata del modello che si intende utilizzare, dall'altro fornire indicazioni utili per un uso operativo consapevole delle caratteristiche di ciascun codice di calcolo.

CASI TEST

Dei quattro test appartenenti a questo gruppo, i primi due sono relativi a situazioni statiche, il terzo a condizioni dinamiche mentre l'ultimo è relativo all'arresto di una valanga e quindi combina aspetti dinamici e statici. È bene sottolineare come le simulazioni relative a ciascun test sono state eseguite mentendo i valori dei parametri di resistenza costanti.

Test della vasca di neve ferma

Il primo caso affrontato è un test classico per valutare la capacità degli schemi numerici di mantenere in quiete un fluido confinato tra quattro pareti verticali e con superficie libera orizzontale (chiamata nel mondo scientifico *C-property*, vedi Bermúdez e Vazquez, 1994). Apparentemente, questa condizione statica può sembrare un caso banale e senza nessuna implicazione nelle applicazioni reali. La realtà è tuttavia diversa: la corretta rappresentazione numerica di queste condizioni è una sfida più impegnativa di quanto si pensi e influenza il risultato anche di simulazioni dinamiche in cui il campo di moto presenta contorni verticali o subverticali, quali canaloni incisi, terrapieni di contenimento, muri di deviazione, abitazioni ecc. La simulazione consiste nel considerare uno strato di neve ferma, di spessore costante, sul fondo di una vasca a pianta

In questo box si vanno a caratterizzare i tre modelli applicativi AvaFrame com1DFA, RAMMS::AVALANCHE e TRENT2D* che, seppur utilizzando la stessa descrizione fisico/matematica del problema, presentano discretizzazioni numeriche differenti. Per semplicità si presenta solamente l'approccio matematico monodimensionale, demandando la descrizione bidimensionale a specifici articoli indicati più avanti. Per un quadro delle variabili del moto e dei sistemi di riferimento usate nei modelli si faccia riferimento alla Fig. B1.

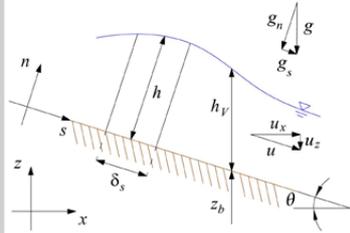


Fig. B1: Schema dei sistemi di riferimento e variabili utilizzate nei diversi modelli

Le equazioni del moto

I modelli analizzati descrivono le valanghe di neve densa tramite un approccio a fluido continuo ed omogeneo, pertanto impiegando equazioni differenziali alle derivate parziali (comunemente chiamate in ambito scientifico *Partial Differential Equations* o PDEs) che descrivono bilanci di massa e di quantità di moto. Inoltre, poiché le dimensioni planimetriche del moto di una valanga risultano almeno un ordine di grandezza più grandi rispetto allo spessore in movimento, le equazioni risentono delle approssimazioni di "acque basse" (o *shallow flow*): la velocità è parallela al fondo, la pressione risulta idrostatica lungo la normale al fondo e le variabili mediate lungo lo spessore descrivono adeguatamente il moto.

Al set di equazioni differenziali appena descritto, viene poi aggiunta una equazione algebrica, detta anche equazione di chiusura, che descrive lo sforzo al fondo generato dal moto della valanga. Tutti e tre i modelli impiegano la seguente formulazione proposta da Voellmy (1955):

$$\tau_0 = p_b \mu + \rho \frac{g u^2}{\xi}$$

dove p_b indica la pressione sul fondo, μ il coefficiente di attrito coulombiano, g il modulo dell'accelerazione di gravità, u la velocità e ξ un coefficiente di scabrezza.

Seppur utilizzando gli stessi bilanci di massa e quantità di moto, e pertanto le stesse equazioni, nei tre modelli, esse sono scritte in maniera leggermente diversa. Infatti, lo stesso set di equazioni può essere scritto utilizzando diversi sistemi di riferimento: intrinseco dove gli assi s e n indicano le direzioni tangenziale e normale al fondo, oppure globale in cui gli assi coordinati x e z rappresentano le direzioni orizzontale e verticale. Inoltre, le equazioni possono essere derivate con un approccio Lagrangiano (si definisce un sistema e lo si segue valutando come variano le sue proprietà nel tempo) o Euleriano (si fissa un volume di controllo e si valuta come variano le proprietà al suo interno nel tempo). Nella Tabella 1 si riporta la tipologia di scrittura delle equazioni usate per tre modelli operativi analizzati.

Modello	Sistema di riferimento	Approccio
AvaFrame com1DFA	Intrinseco	Lagrangiano
RAMMS::AVALANCHE	Intrinseco	Euleriano
TRENT2D*	Globale	Euleriano

Tab. 1: Sistema di riferimento e approccio utilizzato per descrivere le equazioni del moto dello specifico modello operativo.

Il modello AvaFrame com1DFA

Il modello AvaFrame com1DFA (Tonnel et al., 2023), nella sua versione monodimensionale, è descritto dalle seguenti equazioni che descrivono rispettivamente il bilancio di massa e di quantità di moto:

$$\rho \frac{d}{dt}(\delta s h) = 0$$

$$\rho h \frac{d}{dt}(u) = \rho h g_s + \rho g_n h \frac{dh}{ds} - \tau_0$$

dove ρ è la densità della valanga, h il tirante di neve normale al fondo, δs la lunghezza del volume lagrangiano considerato, g_s e

Infine, la pressione al fondo, utilizzata nel valutare lo sforzo al fondo vale:

$$p_b = \rho g_n h$$

Inoltre, il modello presenta alcune funzionalità specifiche che permettono di considerare l'*entrainment* della neve dal fondo, la possibile anisotropia delle pressioni, la resistenza al moto determinata dalla presenza di ostacoli fissi e parzialmente l'effetto della curvatura. Tuttavia, per un corretto confronto con gli altri due modelli, queste specifiche funzionalità non vengono né descritte né impiegate nei casi applicativi descritti.

Il sistema di equazioni differenziali è risolto numericamente tramite un metodo che combina un approccio particellare ed un approccio su griglia. Con questo particolare metodo, la massa iniziale della valanga viene suddivisa in un numero finito di particelle con una certa massa e si valuta l'evoluzione spazio-temporale delle stesse tramite i seguenti passi: (i) identificazione del gradiente del tirante tramite una metodologia SPH semplificata; (ii) campionamento della massa delle particelle una griglia con celle regolari; (iii) identificazione del tirante come rapporto tra massa e dimensione della cella; (iv) campionamento del tirante sulle particelle; (v) valutazione della velocità tramite la risoluzione del bilancio di quantità di moto (trascurando lo sforzo al fondo e il termine gravitativo) per le singole particelle in cui la derivata temporale è discretizzata con il metodo di Eulero; (vi) modifica della velocità di ogni singola particella considerando dapprima il termine gravitativo e successivamente quello legato allo sforzo al fondo; (vi) valutazione della nuova posizione delle singole particelle. Per i dettagli si rimanda all'articolo di Tonnel et al. (2023).

Il modello RAMMS::AVALANCHE

Le equazioni di bilancio di massa e di quantità di moto che descrivono il modello RAMMS::AVALANCHE (Christen et al., 2010) nella sua versione monodimensionale sono le seguenti:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s}(u h) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(u h) + \frac{\partial}{\partial s}\left(u^2 h + g_n \frac{h^2}{2}\right) = \rho h g_s - \frac{\tau_0}{\rho}$$

mentre per la pressione al fondo, utilizzata nel valutare lo sforzo al fondo, viene utilizzata la stessa espressione usata nel modello AvaFrame. Il modello, inoltre, presenta uno specifico modulo aggiuntivo che permette di considerare gli effetti della curvatura ma, per un corretto confronto con gli altri due modelli, si esclude dalla specifica analisi.

Le equazioni vengono risolte numericamente con un approccio ai volumi finiti con i flussi alla Godunov. In particolare, le equazioni sono discretizzate su celle quadrangolari in cui i flussi (cioè, i termini derivanti dalle derivate spaziali) vengono valutati con un solutore HLL. Per garantire un'accuratezza del secondo ordine nel tempo, l'integrazione temporale è invece svolta con il metodo di Runge-Kutta Huen. Per i dettagli si rimanda all'articolo di Christen et al. (2010). Il modello arresta la valanga quando la quantità di moto dell'intera valanga all'istante t risulta inferiore o uguale ad una prefissata frazione della massima quantità di moto istantanea raggiunta dalla valanga sino al tempo t :

$$\left(\sum \rho u h\right)_t \leq K \left(\sum \rho u h\right)_{max}$$

dove la sommatoria viene fatta su tutte le celle. La grandezza K , non essendo direttamente presente nelle equazioni che descrivono il moto, diventa un ulteriore parametro del modello e va opportunamente definito dall'utente.

Il modello TRENT2D*

Le equazioni differenziali che descrivono il bilancio di massa e di quantità di moto del modello TRENT2D* (Zugliani e Rosatti, 2021) sono le seguenti:

$$\frac{\partial h_V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_x h_V) = 0$$

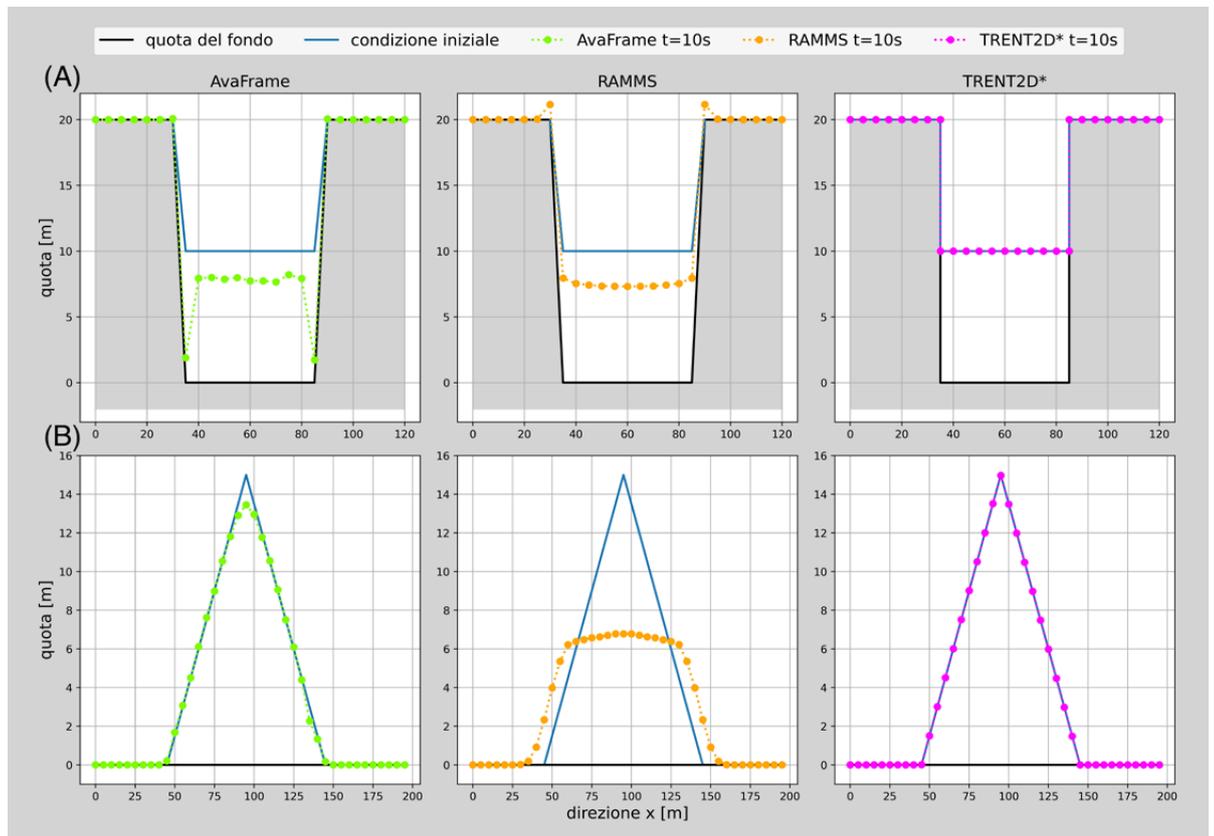
$$\frac{\partial}{\partial t}(u_x h_V) + \frac{\partial}{\partial x}\left(u_x^2 h_V + g \cos^2 \theta \frac{h_V^2}{2}\right) + g h_V \cos^2 \theta \frac{\partial z_b}{\partial x} = -\frac{\tau_0}{\rho}$$

dove h_V indica il tirante di neve misurato verticalmente, $u_x = u \cos \theta$ è la proiezione orizzontale della velocità, θ è l'angolo di inclinazione del fondo valutato rispetto l'orizzontale, g è il modulo dell'accelerazione di gravità e z_b è la quota del fondo. Per quanto riguarda la pressione sul fondo essa risulta:

$$p_b = \rho g \cos^2 \theta h_V$$

Fig. 1 - Sezione di mezzeria per: (A) test della vasca di neve ferma, (B) test della piramide di neve ferma.

Linea continua: quota del fondo e della neve all'istante iniziale.
Linea con markers: soluzione dopo 10 secondi.



quadrata e con fondo orizzontale. Dal momento che non è presente nessuna forza in grado di indurre movimento e la velocità iniziale è nulla, la soluzione esatta altro non è che la condizione iniziale mantenuta in maniera indefinita nel tempo.

In Fig. 1(A) vengono rappresentati, per ogni modello impiegato, i grafici della superficie libera lungo la sezione di mezzeria della vasca dopo dieci secondi di simulazione. Nel caso di AvaFrame si può innanzitutto notare che le pareti laterali non sono rappresentate con linee verticali bensì con linee fortemente inclinate. Questo è dovuto alla scelta del sistema di riferimento intrinseco che perde di validità nel caso di pareti verticali per cui si deve in ogni caso approssimare una parete verticale con una molto inclinata. Si nota inoltre come la superficie nella neve non sia perfettamente orizzontale e il livello finale sia ben al di sotto di quello iniziale. Questo implica che, durante la simulazione, avviene un moto a cui è associata una perdita di massa. Secondo gli sviluppatori, questo fenomeno è dovuto al fatto che l'elevata curvatura del fondo in prossimità delle pareti molto inclinate non rispetti l'ipotesi di limitata curvatura

che sta alla base del sistema di equazioni impiegate nel modello e ciò determina un errore in fase di inizializzazione della massa di neve.

Anche nel caso di RAMMS, le pareti laterali non sono verticali a causa del sistema di riferimento intrinseco utilizzato. La neve posta su questi piani inizia a muoversi generando un moto oscillatorio dal bordo al centro della vasca (e viceversa). Parte della massa fuoriesce dalla vasca stessa e si ferma sul bordo superiore. Nell'istante riportato in figura, l'oscillazione presenta un minimo al centro della vasca.

Nel caso di TRENT2D* si può notare come, grazie al sistema di riferimento assoluto, le pareti laterali possano essere rappresentate come effettivamente verticali e la soluzione finale presenti, correttamente, assenza di movimento.

Test della piramide di neve ferma

Il secondo test è stato messo a punto per verificare l'approssimazione numerica della tensione tangenziale al fondo in condizioni statiche. Si consideri una piramide di neve ferma, a base quadrata, le cui facce presentano una data pendenza. In queste condizioni, l'equazione della conservazio-

ne della quantità di moto si riduce ad una espressione in cui la condizione limite di pendenza delle facce è quella per cui la tangente dell'angolo che la superficie forma con l'orizzontale uguaglia il coefficiente di attrito Coulombiano μ .

In Fig. 1(B) si possono osservare i risultati delle simulazioni dello scenario di condizione limite dopo 10 s di simulazione. Nel caso di AvaFrame vi è solo un leggero abbassamento del vertice della piramide ma nel complesso la condizione limite è verificata. Nel caso di RAMMS invece, la piramide crolla e non si arresta, continuando ad espandersi sul piano orizzontale mantenendo, per buona parte del collasso, le facce della piramide parallele alla condizione iniziale. Infine, la soluzione fornita da TRENT2D* preserva correttamente la staticità della neve.

Anche questo test, come il precedente, ha una valenza che va oltre al caso specifico in quanto la qualità della soluzione numerica nel caso statico ha un impatto sulla qualità della soluzione numerica anche in condizioni quasi-statiche quali quelle che si determinano in prossimità della zona di arresto della valanga. A questo proposito si veda il test dell'arresto riportato più avanti.

Test del moto 1D uniformemente accelerato

L'obiettivo di questo terzo test è quello di quantificare l'errore numerico dei vari modelli in condizioni dinamiche. Esso consiste nel rilascio di un prisma di neve di altezza costante in un canale rettilineo che presenta larghezza e pendenza costante. Nello sviluppo del moto, questo prisma si deforma sul fronte e sulla coda, mentre il nucleo centrale si muove con un moto accelerato mantenendo lo spessore costante. Per questo nucleo è possibile calcolare la soluzione analitica che descrive come varia la velocità nel tempo (Zugliani e Rosatti, 2021).

La Fig. 2(A) presenta, nel pannello di sinistra, la sezione longitudinale del canale all'istante iniziale e dopo 20 s. Tutti i modelli sviluppano fronte e coda ma nel caso di AvaFrame, a causa della sua natura ibrida griglia-particellare, non compare un vero e proprio nucleo con altezza costante ma piuttosto una porzione di soluzione che presenta oscillazioni spaziali di altezza e velocità molto contenute. Al contrario, RAMMS e TRENT2D* presentano un nucleo ben definito.

Il pannello di destra della Fig. 2(A) presenta l'errore relativo (modulo della differenza tra soluzione numerica e analitica diviso il valore della soluzione analitica) delle velocità ottenute con i tre modelli al variare del tempo. Nel caso di AvaFrame, come valore rappresentativo della velocità è stato considerato il valore medio di tutti i punti che compongono il nucleo. Si può notare come questo modello, tra i tre considerati, presenti gli errori più elevati. Si è inoltre cercato di capire se all'aumentare del numero di particelle in cui viene suddiviso inizialmente il prisma (risoluzione spaziale, vedi Box 1) e conseguentemente al diminuire della massa associata ad ogni particella, diminuisce l'errore. Contrariamente a ciò che ci si aspetta, all'aumentare della risoluzione l'errore cresce.

La soluzione fornita da RAMMS è invece decisamente più accurata di quella di AvaFrame (si noti che il diagramma è logaritmico nelle ordinate), ma oltre i 30 s la soluzione risente dell'effetto delle pareti, e quindi non è stata più rappresentata perché fuori scala. La soluzione fornita da TRENT2D* è quella che presenta errori più limitati in tutto il periodo di simulazione.

Test dell'arresto

Questo ultimo test è stato messo a punto per quantificare il comportamento degli algoritmi d'arresto dei modelli. Esso consiste nel rilascio di un prisma di neve (tirante normale al fondo di 5 m) su di un piano con pendenza costante pari al 30% (ossia un'inclinazione di 16.7°); dopo un tratto di lunghezza orizzontale pari a 1 km, la pendenza cambia e diventa orizzontale. È quindi un test dove ad una prima parte dinamica accelerativa, segue una fase decelerativa sino all'arresto e alla relativa condizione statica che ne consegue. Si fa notare che la legge di resistenza alla Voellmy, che è impiegata in tutti i modelli e che dipende da due parametri, è in grado di descrivere il processo di arresto. Il moto è bidimensionale e non ha soluzione analitica, per cui si può fare solo un confronto tra i vari modelli.

Nella Fig. 2(B), il pannello di sinistra riporta, oltre alla posizione iniziale di rilascio e la traccia del cambio di pendenza, l'estensione massima raggiunta dalla neve mentre nel pannello di destra viene presentata una sezione longitudinale (indicata con linea nera orientata nel pannello di sinistra)

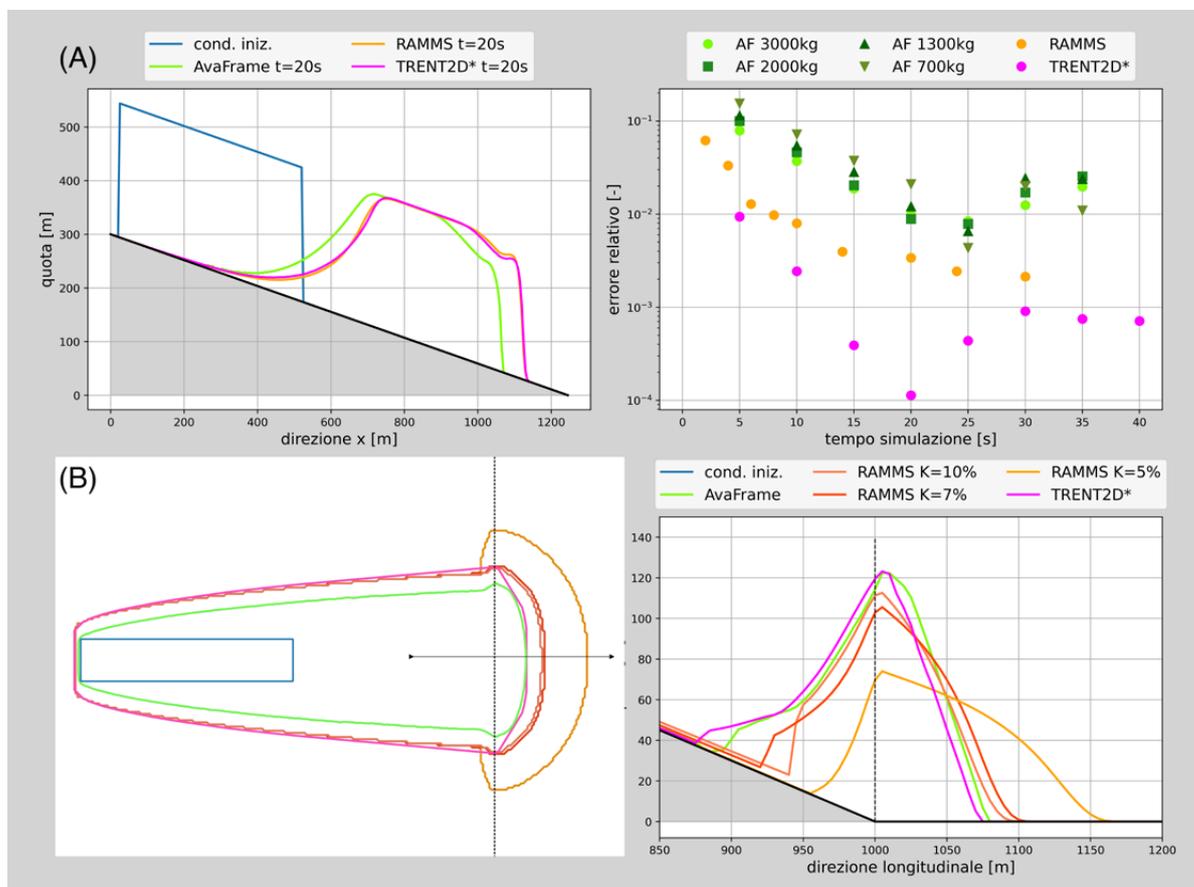


Fig. 2 - (A) Test del moto 1D uniformemente accelerato. A sinistra la sezione longitudinale a due istanti temporali (quello iniziale e dopo 20 secondi) dove il tirante di neve normale al fondo risulta ingrandito di 50 volte. A destra l'errore relativo della velocità al variare del tempo. (B) Test dell'arresto. A sinistra la massima estensione planimetrica ottenuta con i tre modelli, la zona di rilascio iniziale e la traccia del cambio di pendenza; a destra la sezione longitudinale nella zona del cambio di pendenza nell'istante di arresto. Il tirante di neve normale al fondo è ingrandito di 5 volte.

40 ANNI DI AINEVA

che riporta l'altezza della neve normale al fondo quando sono state raggiunte le condizioni statiche.

Si può notare come AvaFrame e TRENT2D* presentino dei risultati comparabili: la distanza massima del fronte dal cambio di pendenza ed il valore massimo dell'accumulo è molto simile mentre l'estensione laterale è maggiore per TRENT2D*. Questo risultato conferma le indicazioni ottenute nei test statici e dinamici precedenti. Anche nel caso di RAMMS si ha una conferma delle indicazioni già ottenute, in particolare del fatto che questo codice non implementa in maniera corretta la legge di resistenza per cui la condizione statica non viene mantenuta e la neve continua a muoversi. Per ovviare a questo problema, il modello utilizza una condizione di arresto (o meglio, una condizione di termine della simulazione, non di velocità nulla) descritta nel Box 1, condizione non fisicamente basata, bensì dipendente dall'algoritmo numerico impiegato. In altre parole, mentre il modello fisico-matematico contempla solo due parametri, il modello numerico ne considera arbitrariamente tre. Per questo motivo, si sono eseguite tre simulazioni utilizzando un valore del parametro K (vedi Box1 per la definizione) pari a 10%, 7% e a 5% rispettivamente. Nei primi due casi i risultati sono abbastanza vicini ai risultati degli altri due modelli, mentre col valore del 5% la distanza percorsa nel piano è molto maggiore e di conseguenza il valore massimo dell'accumulo è molto inferiore. Si vuole sottolineare come, da altri test effettuati (ma non riportati qui) emerge che il valore di K che rende più simili i risultati di RAMMS ai risultati degli altri due modelli non è costante ma dipende da caso a caso.

RICOSTRUZIONE DI EVENTI

Questo secondo gruppo di simulazioni è relativo ad alcuni eventi reali avvenuti in siti valanghivi della Regione Veneto. Si sono scelti due eventi di versante, situati uno in zona dolomitica e l'altro in zona prealpina, ed uno incanalato, situato in zona dolomitica. La scelta di due casi simili

(valanga di versante), ma avvenuti in zone diverse, permette di indagare anche degli elementi legati alle differenze climatiche tra le due catene montuose. Infatti, al netto delle configurazioni meteorologiche che possono influenzare, anche significativamente, le caratteristiche delle singole stagioni invernali, la zona prealpina si caratterizza per precipitazioni elevate a carattere equinoziale con inverni non molto piovosi. Il manto nevoso è solitamente distribuito irregolarmente e, soprattutto negli ultimi anni, discontinuamente nell'arco della stagione invernale. Il caso in esame poi, situato sul gruppo del Monte Baldo, oltre che per la quota inferiore alle Dolomiti e la prossimità alla pianura, si distingue per la presenza mitigatrice del Lago di Garda. In questo contesto, i problemi valanghivi attesi con maggior frequenza sono legati alla neve bagnata e alle valanghe di slittamento. Nella parte centro-settentrionale della provincia di Belluno, invece, le Dolomiti presentano precipitazioni invernali leggermente inferiori ma spesso a carattere nevoso fino a fondovalle. Questa peculiarità, unita a temperature inferiori e una quota media decisamente più elevata, porta ad una stagione con un manto nevoso continuamente presente al suolo più lunga, sebbene l'orografia complessa ne accentui la variabilità spaziale. È lecito aspettarsi una maggiore varietà nelle tipologie dei problemi valanghivi presenti, in quanto la maggiore persistenza della neve al suolo, con spessori maggiori del manto e periodi anche miti alternati a periodi di freddo intenso, permettono un più complesso sviluppo di metamorfismi tra i grani.

Tutti i dati relativi agli eventi (quindi *shapefiles* del percorso delle valanghe, modelli 7 AINEVA con informazioni su spessore di neve distaccatosi e volumi coinvolti, materiale fotografico) sono stati forniti da ARPA Veneto - Centro Valanghe di Arabba. I DTM necessari per svolgere le simulazioni sono stati invece reperiti sul portale cartografico nel sito della Regione Veneto (Regione Veneto, 2020). Per delimitare l'area di distacco si è seguita la metodologia proposta da Maggioni e Gruber (2003), cercando di

rimanere il più possibile coerenti con le informazioni disponibili.

Come nei casi test, viene eseguito un confronto tra i risultati ottenuti dai tre modelli a partire dalle stesse condizioni iniziali e dagli stessi valori dei parametri di resistenza. Per ogni sito valanghivo si è considerato un primo scenario caratterizzato da valori dei parametri di resistenza costanti su tutto il dominio di calcolo scelti sulla base della tipologia di evento, delle sue dimensioni, della morfologia del territorio e del tempo di ritorno, come proposto da Gruber e Bartelt (2007) e tabellato nel manuale di RAMMS (WSL-SLF, 2022). Questo primo scenario permette anche di avere qualche indicazione sulla valenza predittiva dei valori forniti dalla suddetta tabella in zone climaticamente differenti da quelle usate per derivare i valori.

Un secondo scenario considera ancora valori costanti dei parametri di resistenza ma la scelta viene fatta in modo tale da ridurre il più possibile la differenza tra i risultati delle simulazioni e i dati relativi all'evento reale. Questo scenario permette anche di avere qualche indicazione sui possibili limiti della legge di resistenza alla Voellmy. Infine, per la valanga incanalata, si considera un terzo scenario in cui si utilizzano i valori dei parametri di resistenza ottenuti dall'algoritmo di spazializzazione automatica disponibile nel modello RAMMS (WSL-SLF, 2022). Questa opzione del software fornisce, per ogni cella del dominio di calcolo, una coppia di valori μ e ξ in base alle caratteristiche geometriche nell'intorno del punto (quota, pendenza e curvatura) e alle dimensioni dell'evento. Tale scenario, non riproducibile con AvaFrame in quanto non contempla la possibile variabilità spaziale dei parametri di resistenza, permette anche di avere qualche indicazione sulla efficacia della spazializzazione automatica.

In tutte le simulazioni di questo gruppo, il parametro K di RAMMS è stato posto pari a 5%, valore proposto come default.

Valanga di versante in zona dolomitica

Il primo evento considerato è una valanga di versante distaccatasi nel comune di Li-

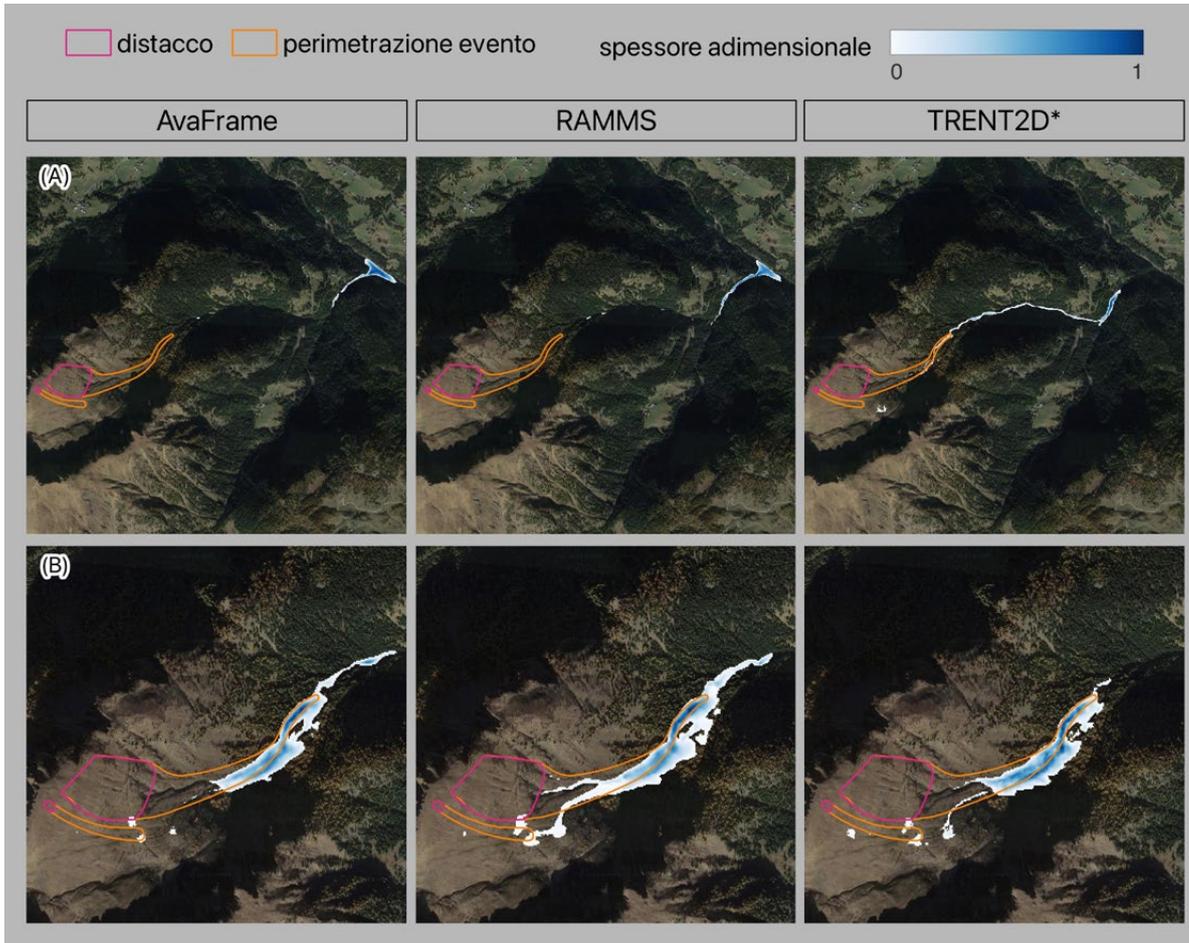


Fig. 3 - Distribuzione dello spessore adimensionale di neve per il caso della valanga di versante in zona dolomitica all'istante finale della simulazione per i diversi modelli usando (A) $\mu=0.18$ e $\xi=3000 \text{ m/s}^2$ e (B) $\mu=0.30$ e $\xi=2000 \text{ m/s}^2$.

vinallongo del Col di Lana (BL). Le relative informazioni sono state ottenute dal modello 7 AINEVA per la valanga n. 44.

Per il primo scenario, seguendo le indicazioni della tabella del manuale di RAMMS, si sono attribuiti i seguenti valori ai parametri: $\mu=0.18$ e $\xi=3000 \text{ m/s}^2$. In Fig. 3(A) vengono rappresentate, per ogni modello, le mappe dello spessore di neve adimensionalizzato con il rispettivo valore massimo, all'istante finale della simulazione, sovrapposte al poligono che delimita l'evento, come ricostruito dagli osservatori di campo. Da una prima osservazione si nota che in nessun caso vi è somiglianza tra l'evento reale e quello simulato: in tutti e tre i modelli la neve scorre per distanze molto più lunghe rispetto a quanto rilevato, fino a raggiungere il fondovalle. Ciò è chiaramente imputabile ad una errata stima dei parametri di resistenze al moto. RAMMS e AvaFrame, in particolare, restituiscono accumuli molto simili per forma ed estensione, con il primo che presenta una maggior quantità di neve ferma lungo il percorso, mentre il secondo concentra tutta la neve nel tratto finale.

Anche TRENT2D* fa registrare una buona quantità di massa ferma lungo il percorso. Questo modello inoltre prevede l'arresto della valanga diverse centinaia di metri più a monte. Le differenze riscontrate tra i modelli sono ascrivibili primariamente al diverso algoritmo di calcolo della resistenza e conseguente arresto, come già fatto notare nei casi test.

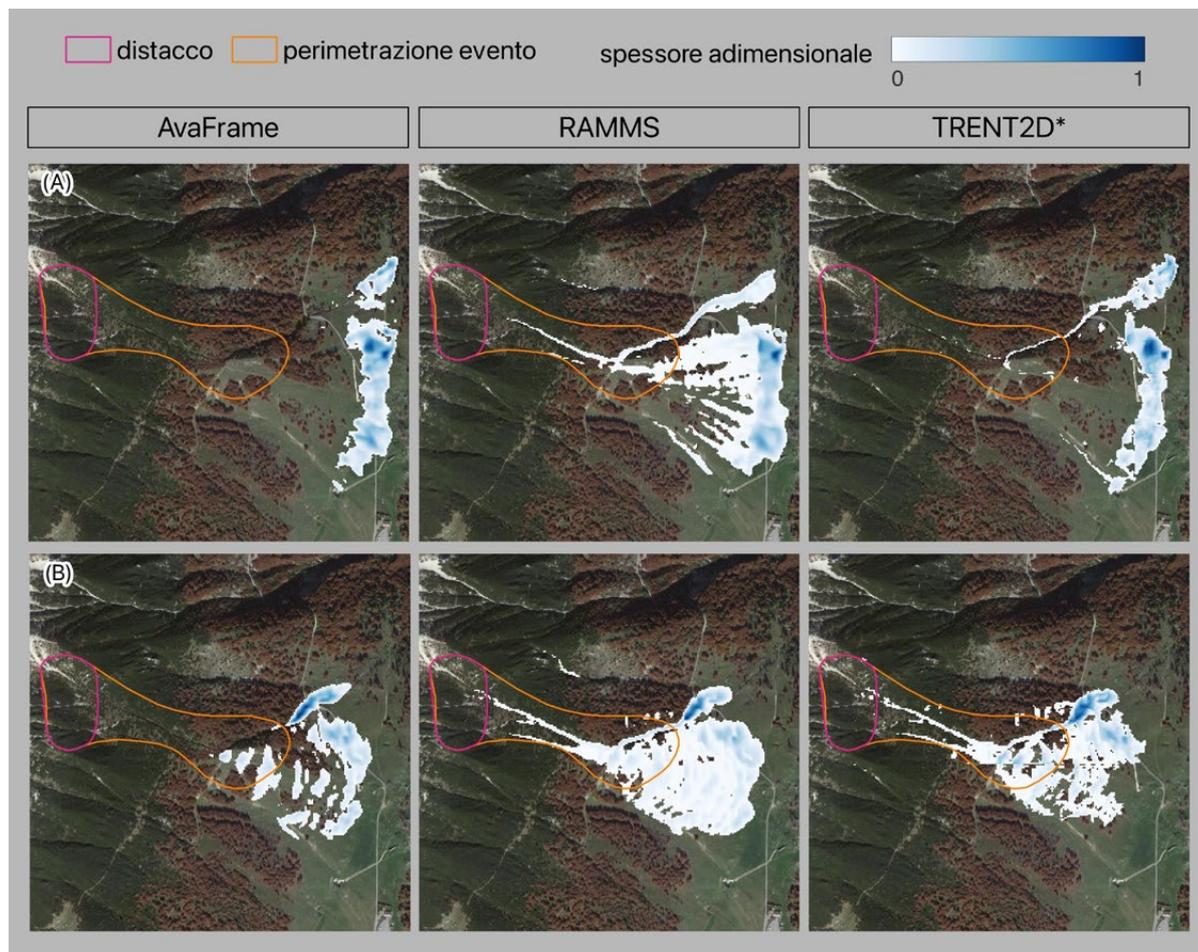
I valori dei parametri di resistenza scelti per il secondo scenario sono $\mu=0.30$ e $\xi=2000 \text{ m/s}^2$. È da notare come tali valori siano molto differenti rispetto a quelli tabellari adottati nello scenario precedente. Questo suggerisce come i valori di tale tabella debbano essere considerati con dovuta cautela per simulazioni di tipo previsionale ed una taratura su eventi noti è caldamente consigliata. I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 3(B). In questo caso, la valanga si arresta in una posizione molto più prossima a quella reale. Come per lo scenario precedente, i modelli AvaFrame e RAMMS presentano risultati molto simili tra loro mentre in TRENT2D* l'arresto è ancora una volta più a monte rispetto agli altri due. Inoltre, in questo caso non

si osserva la lingua di neve che negli altri due modelli si spinge lungo la vallata. La differenza tra evento reale e risultati ottenuti dalle modellazioni è inoltre influenzata, con buona probabilità, dall'effetto causato dalla presenza del bosco. Tuttavia, come già detto nell'Introduzione, l'approfondimento dei limiti della modellazione fisico-matematica considerata va oltre lo scopo di questo lavoro e pertanto non si sono considerati scenari che potessero considerare questo aspetto.

Valanga di versante in zona prealpina

Questo secondo caso di valanga di versante è caratterizzato da condizioni meteorologiche molto differenti rispetto al caso precedente. Ci si trova infatti quasi 200 km più a sud, in zona prealpina, sui versanti sud-orientali del Monte Baldo (comune di Ferrara di Monte Baldo, VR). Questo territorio, come detto in precedenza, è caratterizzato da una situazione climatica molto particolare e non tipicamente alpina. Tutto ciò si ripercuote sulla neve che è molto soggetta a cicli di gelo/disgelo e si presenta spesso come umida e molto co-

Fig. 4 - Distribuzione dello spessore adimensionale di neve per il caso della valanga di versante in zona prealpina all'istante finale della simulazione per i diversi modelli usando (A) $\mu=0.22$ e $\xi=2500 \text{ m/s}^2$ e (B) $\mu=0.32$ e $\xi=1500 \text{ m/s}^2$



esa. La valanga di versante considerata è la n. 2 e viene descritta dettagliatamente nel relativo *modello 7 AINEVA*.

Il primo scenario è stato ottenuto eseguendo le simulazioni con i valori tabellari $\mu=0.22$ e $\xi=2500 \text{ m/s}^2$ ed i relativi risultati, in termini di spessore di neve (adimensionalizzato rispetto al relativo valore massimo) all'istante finale della simulazione, sono riportati in Fig. 4(A). Si può osservare come anche in questo caso l'arresto fornito dai tre modelli sia molto diverso da quello reale, ma è tuttavia coerente con la morfologia del versante. La distribuzione finale della neve è piuttosto differente nei tre modelli ma la complessità del moto non permette di individuare in maniera chiara quale caratteristica di ciascun modello sia responsabile del risultato finale. Dal punto di vista modellistico, questi risultati evidenziano ancora una volta come i parametri derivanti da tabella non siano adeguati a questo tipo di condizione meteo-climatica.

Il secondo scenario è stato ottenuto modificando i parametri in modo da aumen-

tare in maniera significativa la resistenza al moto. I valori considerati sono $\mu=0.32$ e $\xi=1500 \text{ m/s}^2$. Come si può notare in Fig. 4(B), la variazione di questi coefficienti non si riflette in un altrettanto importante cambiamento negli output, poiché l'arresto della valanga si sposta verso monte solo di qualche decina di metri. La differenza tra i risultati dei vari modelli rimane significativa.

Da tutte le simulazioni effettuate su questo scenario è emersa una costante differenza tra evento simulato ed evento reale. Per arrivare a soluzioni confrontabili è necessario modificare pesantemente i valori assegnati ai parametri rispetto a quanto consigliato dalle tabelle fornite nel manuale di RAMMS. Una osservazione generale che si può fare analizzando questo gruppo di simulazioni è che i risultati sono fortemente influenzati dalla presenza di incisioni relative a corsi d'acqua effimeri o stagionali per cui la massa di neve tende ad incanalarsi e a scorrere in essi. L'evento reale, tuttavia, non sembra esserne stato influenzato. Una possibile spiegazione è

che queste piccole incisioni, al momento dell'accadimento della valanga, fossero state completamente riempite dalla neve e pertanto la configurazione della superficie di scorrimento fosse molto più liscia del DTM di riferimento. In questo caso, emerge chiaramente il problema della rappresentatività del DTM quale effettiva superficie di scorrimento per una valanga, problema non ancora risolto nella letteratura scientifica.

Valanga incanalata in zona dolomitica

L'ultimo evento considerato riguarda una valanga incanalata, caratterizzata quindi da una geometria del campo di moto ben definita. In questo caso ci si aspetta molta meno variabilità spaziale dei risultati rispetto ai casi precedenti. Per evidenziare la traiettoria completa della valanga, in questo caso nelle figure si rappresenterà l'altezza massima raggiunta dalla neve in ciascuna cella durante l'intera simulazione (adimensionalizzata ancora una volta con il valore massimo di ciascuna simulazione). Eventi di questa tipologia sono



Fig. 5 - Distribuzione dello spessore adimensionale massimo di neve raggiunto, in ogni punto, durante la simulazione per il caso della valanga incanalata in zona dolomitica per i diversi modelli usando (A) $\mu=0.28$ e $\xi=1750 \text{ m/s}^2$ e (B) $\mu=0.32$ e $\xi=1350 \text{ m/s}^2$.

comuni lungo i ripidi versanti dolomitici, tipicamente molto segnati e scavati dal reticolo idrografico esistente. La valanga scelta (*modello 7 AINEVA n. 107*) si trova ancora nel comune di Livinallongo del Col di Lana (BL).

Il primo scenario è stato ottenuto considerando i valori costanti dei parametri suggeriti dalla tabella di RAMMS, che risultano essere $\mu=0.28$ e $\xi=1750 \text{ m/s}^2$. In Fig. 5(A) si può osservare che nel primo tratto di scorrimento i risultati sono molto simili tra di loro e in linea con l'evento reale. Nel secondo tratto invece, AvaFrame e RAMMS forniscono una soluzione dove una grande quantità di neve fuoriesce dal canale in prossimità delle curve e scivola sul pendio come se fosse una valanga di versante, con chiare conseguenze anche su posizione e forma dell'accumulo. Questo fenomeno è molto contenuto con TRENT2D*, dove la valanga segue più fedelmente il tracciato del canale. Molto probabilmente questo effetto è associato alla difficoltà, evidenziate da AvaFrame e RAMMS nel test della vasca di neve ferma di descrivere in

maniera dettagliata il moto lungo contorni molto inclinati.

Il secondo scenario è stato ottenuto aumentando la resistenza al moto, ponendo i valori dei parametri pari a $\mu=0.32$ e $\xi=1350 \text{ m/s}^2$. Ottenendole velocità di scorrimento più basse, si determina una minore fuoriuscita della neve dal canale, come si può notare dalla Fig. 5(B). Tuttavia, con AvaFrame ed in particolare con RAMMS, vi è ancora, soprattutto in corrispondenza dell'ultima curva, una certa massa che fuoriesce sul versante.

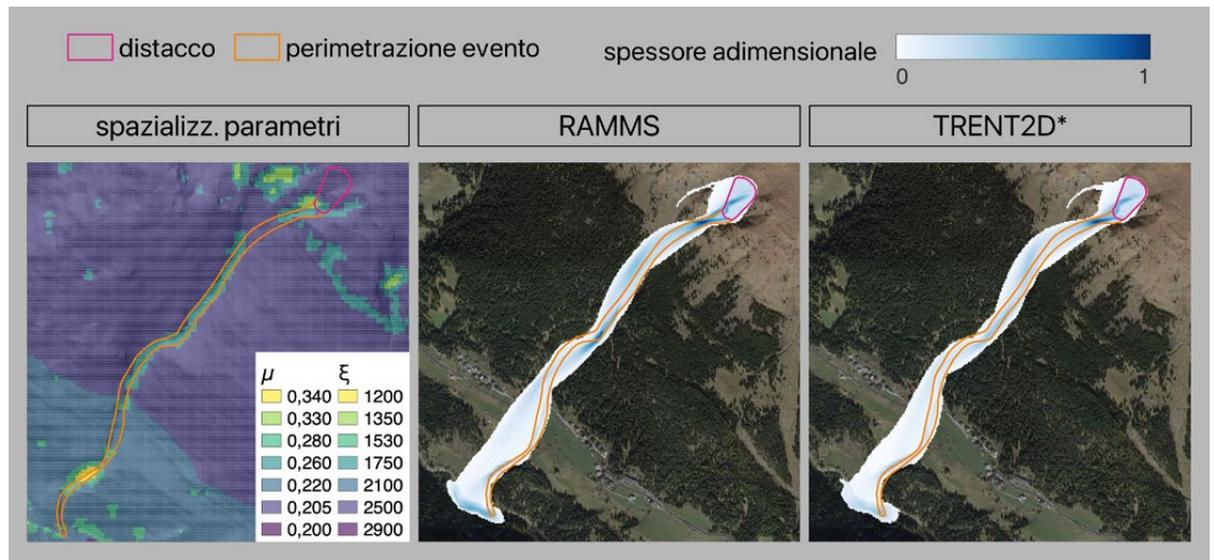
Il terzo scenario riguarda l'uso di valori spazialmente variabili dei parametri di resistenza forniti dalla specifica funzione di RAMMS. Le matrici di valori così ottenute sono rappresentate in Fig. 6, pannello di sinistra (ad ogni colore è associata una coppia di valori dei due parametri). È da sottolineare come l'algoritmo assegni, alla quasi totalità delle celle del dominio, dei valori tipici "di versante aperto", a cui corrispondono resistenze al moto piuttosto basse. Solo alcune ridotte porzioni di superficie sul fondo del canale presen-

tano valori dei parametri tipici delle valanghe incanalate.

Questo scenario è stato analizzato solo con RAMMS e TRENT2D* poiché AvaFrame non offre la possibilità di considerare parametri spazializzati. Come si può notare in Fig. 6 (pannelli centrale e di sinistra), a causa della ridotta resistenza al moto, la valanga fuoriesce dal canale pressoché ad ogni curva, anche con il modello TRENT2D*.

L'analisi dei risultati relativi a questo scenario suggerisce un paio di considerazioni. In primo luogo, nel moto che avviene in un canale, la descrizione dei versanti ripidi gioca un ruolo fondamentale anche in condizioni dinamiche. La seconda considerazione è di tipo modellistico. C'è una certa difficoltà a ricostruire il fenomeno, e può essere fatta solo utilizzando valori di resistenza superiori a quanto ci si potrebbe aspettare. Questo è dovuto alla particolarità della valanga considerata: dal materiale fotografico raccolto in fase di sopralluogo e allegato al modello 7 dell'evento emerge infatti che la neve è agglomerata in forme

Fig. 6 - Caso della valanga incanalata in zona dolomitica. Da sinistra a destra: valore e spazializzazione dei parametri, distribuzione dello spessore adimensionale massimo di neve raggiunto, in ogni punto, durante la simulazione ottenuta dai modelli RAMMS e TRENT2D*.



globali tondeggianti. Il moto della valanga deve quindi aver avuto un carattere che si avvicina più ai moti di fluidi granulari dilatanti più che a moti di fluidi alla Voellmy (fluido di Bingham con dipendenza quadratica dalla velocità) assunti dai modelli considerati.

CONCLUSIONI

Dal confronto sistematico dei risultati ottenuti con i modelli AvaFrame, RAMMS e TRENT2D* relativi ad un set di casi test e a un set di ricostruzioni di eventi reali si possono trarre alcune considerazioni conclusive:

- ▶ nella scelta di un modello, va posta attenzione sia alla descrizione fisico-matematica del fenomeno che all'approccio numerico impiegato: i tre modelli, pur considerando lo stesso set di equazioni differenziali e di espressioni per la resistenza al moto, presentano risultati che a volte differiscono in maniera significativa;
- ▶ è importante usare dei casi test semplici, possibilmente con soluzione nota a priori, per capire le caratteristiche di base di un approccio numerico; nei casi reali, infatti, la differenza tra i risultati delle simulazioni e quanto è stato rilevato in campo è dovuto sia a caratteristiche numeriche che a limiti modellistici, per cui è difficile distinguere quale componente sia responsabile delle differenze;
- ▶ è emersa l'importanza del sistema di riferimento utilizzato: AvaFrame e

RAMMS condividono un sistema di riferimento intrinseco mentre TRENT2D* usa un sistema di riferimento assoluto che si è rivelato più efficace nel caso di discontinuità nella superficie di scorrimento, quali asperità del terreno con pareti verticali;

- ▶ RAMMS presenta alcuni limiti nella descrizione di situazioni statiche o quasi-statiche quali quelle che si presentano nella fase di arresto della valanga; per ovviare a questo effetto, utilizza il parametro K (vedi Box 1) che però non è fisicamente basato e quindi va tarato di caso in caso, rendendo problematica la sua stima in simulazioni previsionali;
- ▶ l'ottica lagrangiana di AvaFrame porta in qualche caso a soluzioni con asimmetrie (per esempio il test della vasca di neve ferma e il test della piramide di neve ferma) ed oscillazioni (per esempio nel test del canale rettilineo) che si mantengono anche aumentando la risoluzione, cioè il numero di particelle con cui si discretizza la valanga;
- ▶ i valori tabellari dei parametri inseriti all'interno del manuale di RAMMS, mutuati principalmente dal lavoro di Gruber e Bartelt (2007), vanno utilizzati con molta cautela nelle simulazioni previsionali per due motivi:
 - ◆ essi derivano da un significativo numero di eventi geograficamente concentrati nelle Alpi Svizzere; ne consegue che tali valori possono risultare inadeguati a descrivere situazioni tipiche del versante sud

alpino, dove il clima è meno continentale, la neve è sovente appesantita da temperature più elevate e le precipitazioni influenzate dall'interazione delle perturbazioni con il mare Mediterraneo;

- ◆ a parità di parametri, come dimostrato dai casi test, i risultati delle simulazioni variano al variare del modello. Infatti, i valori tabellari sono stati valutati specificamente per RAMMS e quindi possono non essere del tutto adeguati per gli altri due modelli;
- ▶ la spazializzazione automatica dei parametri effettuata da RAMMS non sempre contribuisce ad ottenere ricostruzioni migliori rispetto a quelle ottenibili con valori costanti.

In sintesi, il risultato di questo lavoro evidenzia come sia necessario conoscere un modello nelle sue due componenti (fisico-matematiche e numeriche) per usarlo in maniera consapevole e responsabile, non potendo prescindere dalla presa di coscienza che ciascuna soluzione modellistica porta con sé una serie di pregi e di difetti con cui l'utilizzatore deve necessariamente confrontarsi. Pur non avendo la pretesa di essere un lavoro esaustivo (il numero di casi è limitato, non tutte le peculiarità dei modelli sono state analizzate nel dettaglio, ...), alla luce di quanto illustrato in questo approfondimento sarà possibile affrontare con maggior cognizione di causa la scelta del modello più adatto nonché soffermarsi, nell'osservazione dei risultati,

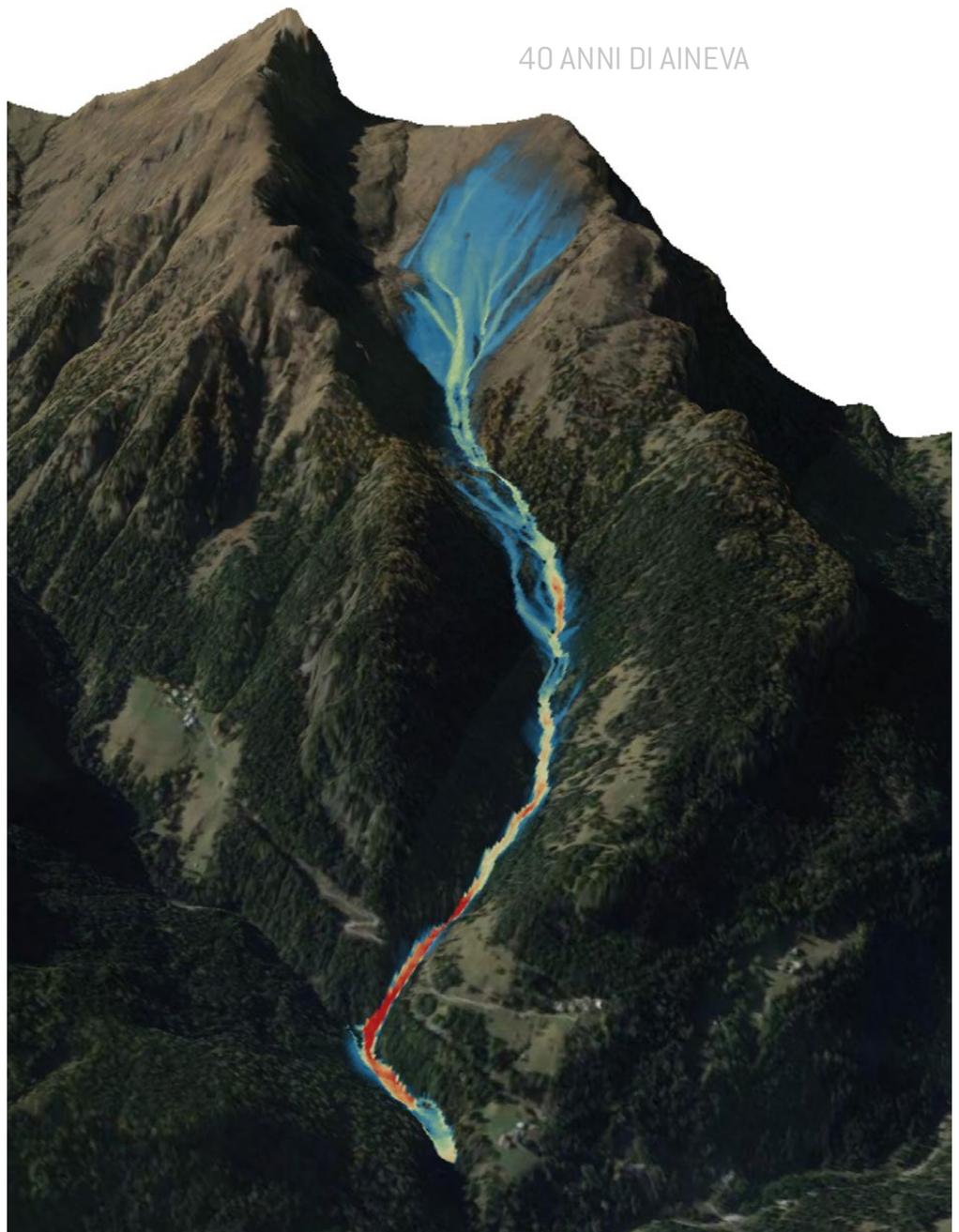
sugli elementi che necessitano di maggior attenzione e senso critico.

Una ultima osservazione riguarda la ricerca. Per avere una certa affidabilità previsionale, i modelli dovranno tenere conto degli effetti dei cambiamenti climatici in corso: da un lato sarà necessario capire le tipologie di valanghe più probabili nei prossimi anni, dall'altro si dovranno cercare descrizioni fisico-matematiche più complete, espressioni della resistenza al moto più aderenti alla realtà che ci aspetta, schemi numerici più accurati. Ed è proprio lungo queste direzioni che il gruppo di ricerca sulle valanghe del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento intende muoversi nel prossimo futuro, con lo scopo di produrre strumenti modellistici operativi sempre più affidabili.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro di tesi che viene riassunto in questo articolo è stato reso possibile grazie alla disponibilità offerta dallo studio A.I.A. Engineering di Trento, e in particolare dall'ing. Matteo Anderle, che ha messo a disposizione tempo e risorse.

Un ringraziamento particolare va anche a ARPA Veneto - Centro Valanghe di Arabba che, tramite Germano Dorigo, ha condiviso tutti i dati e il materiale cartografico relativi agli eventi ricostruiti.



Bibliografia

- Bermúdez, A. e Vazquez, M. E., Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms, *Computers & Fluids* 23(8), 1049-1071, 1994
- Christen, M.; Kowalski, J. e Bartelt, P., RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, *Cold Regions Science and Technology* 63(1-2), 1-14, 2010.
- Gruber, U. e Bartelt, P., Snow avalanche hazard modeling of large areas using shallow water numerical methods and GIS, *Environmental Modelling & Software* 22(10), 1472-1481, 2007.
- Maggioni, M. e Gruber, U., The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency, *Cold Regions Science and Technology* 37(3), 407-419, 2003.
- Negri, D., La simulazione numerica delle valanghe di neve densa: analisi e confronto dei modelli dinamici bidimensionali AvaFrame, RAMMS e TRENT2D*, tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Trento, 2023.
- Regione Veneto, Il GeoPortale Regionale, <https://idt2.regione.veneto.it/>, 2020.
- Tonnel, M.; Wirbel, A.; Oesterle, F. e Fischer, J.-T., AvaFrame com1DF (v1.3): a thickness-integrated computational avalanche module - theory, numerics, and testing, *Geoscientific Model Development* 16(23), 7013-7035, 2023
- Zugliani, D. e Rosatti, G., TRENT2D*: An accurate numerical approach to the simulation of two-dimensional dense snow avalanches in global coordinate systems, *Cold Regions Science and Technology* 190, 103343, 2021.
- Voellmy, A., Über die Zerstörungskraft von Lawinen, *Schweizerische Bauzeitung* 73, 159-162, 212-217, 246-249, 280-285, 1955WSL
- WSL-SLF, RAMMS::AVALANCHE User Manual, manuale utente v1.8.0, 2022.