
**Relazione sulla suscettibilità geo-idrologica e l'esposizione ai
pericoli geo-idrologici nel territorio del Comune di
Castelsantangelo sul Nera (MC)**

Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, del Consiglio Nazionale delle Ricerche

Indice

1	Autori.....	3
2	Acronimi e abbreviazioni	4
3	Sommario	5
4	Introduzione.....	6
5	Attività precedenti	7
5.1	Attività svolte dal CNR IRPI.....	7
5.2	Attività svolte da ISPRA	7
6	Fenomeni considerati.....	8
7	Procedura per la definizione delle condizioni di esposizione ai pericoli	9
7.1	Unità cartografica di riferimento	9
7.2	Descrizione della procedura	10
7.3	Frequenza temporale degli eventi.....	16
8	Dati	20
8.1	Modello digitale del terreno	20
8.2	Fotografie aeree	20
8.3	Carta inventario dei fenomeni franosi	21
8.4	Carta geologica.....	22
8.5	Cartografia PAI	22
9	Modelli	24
9.1	Modellazione dei fenomeni di caduta massi	24
9.2	Modellazione delle colate di detrito	24
9.3	Scenari evolutivi delle frane di scivolamento	33
10	Applicazione.....	34
10.1	Il capoluogo.....	34
10.2	La frazione di Nocelleto.....	36
10.3	La frazione di Nocria.....	38
10.4	La frazione di Gualdo.....	40
10.5	La frazione di Macchie.....	42
10.6	La frazione di Vallinfante.....	44
10.7	Aree potenzialmente urbanizzabili	46
11	Dati digitali.....	48
11.1	Dati in formato vettoriale	48
11.2	Dati in formato raster.....	51
12	Bibliografia.....	52

1 Autori

La relazione è stata redatta da (in ordine alfabetico):

Cinzia Bianchi	CNR IRPI
Francesco Bucci	CNR IRPI
Mauro Cardinali	CNR IRPI
Marco Cavalli	CNR IRPI
Stefano Crema	CNR IRPI
Fausto Guzzetti	CNR IRPI
Ivan Marchesini	CNR IRPI
Lorenzo Marchi	CNR IRPI
Mauro Rossi	CNR IRPI
Paola Salvati	CNR IRPI
Michele Santangelo	CNR IRPI

2 Acronimi e abbreviazioni

CdC	Centro di Competenza
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
DEM	Digital Elevation Model
DiComaC	Direzione di Comando e Controllo
DPC	Dipartimento della Protezione Civile
ECDF	Empirical Cumulative Distribution Function
EMS	European Macroseismic Scale
GIS	Geographical Information System
INGV	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
IRPI	Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
LiDAR	Light Detection and Ranging
MCS	Mercalli – Cancani – Sieberg
MSF	Modified Single Flow Direction
PAI	Piano di Assetto Idrogeologico
SAE	Soluzioni Abitative in Emergenza
SANF	Sistema di Allerta Nazionale per la previsione di Frane indotte dalle piogge
UCR	Unità Cartografica di Riferimento

3 Sommario

Su richiesta della Funzione Tecnica della Direzione di Comando e Controllo di Rieti, si è provveduto a valutare le condizioni di suscettibilità geo-idrologica e di esposizione a pericoli geo-idrologici di aree nel territorio del Comune di Castelsantangelo sul Nera (MC).

Nell'area oggetto di studio sono presenti diverse tipologie di fenomeni geo-idrologici potenzialmente pericolosi, fra i quali frane di scivolamento superficiali e profonde, crolli e cadute massi, colate di detrito, piene e piene improvvise, e valanghe. La presente relazione considera esclusivamente le tre tipologie di fenomeni ritenute di maggiore interesse, ed in particolare: (i) le frane di scivolamento, (ii) i crolli e le cadute massi, e (iii) le colate di detrito. La relazione non considera le piene e le piene improvvise, le valanghe, e le amplificazioni sismiche locali.

Per definire in modo per quanto possibile oggettivo e riproducibile le condizioni di suscettibilità e il conseguente livello di esposizione ai pericoli geo-idrologici considerati cui sono soggette le aree di studio, si è provveduto a definire una specifica procedura d'analisi. La procedura utilizza dati disponibili od acquisiti *ad hoc* per la zonazione, e restituisce una valutazione semi-quantitativa del grado di esposizione ai pericoli geo-idrologici a cui sono soggette le aree oggetto d'indagine, o parti di esse.

L'applicazione della procedura ha richiesto l'utilizzo di dati territoriali e di modelli di simulazione dei fenomeni geo-idrologici. I dati territoriali comprendono un modello digitale del terreno con una risoluzione al suolo di 10 m × 10 m, due voli di fotografie aeree stereoscopiche riprese rispettivamente nel 1955 a scala 1:55.000 e nel 1997 a scala 1:20.000, una carta inventario dei fenomeni franosi realizzata ad hoc, la carta geologica della Regione Marche, a scala 1:10.000, le cartografie del Piano di Assetto Idrogeologico disponibili per l'area di studio, oltre che la Carta Tecniche Regionale. I modelli utilizzati per la definizione dei livelli di suscettibilità sono stati il modello STONE, per la simulazione del processo di caduta massi, i modelli concettuali "Modified Single Flow Direction" e "r.randomwalk" per la simulazione dei fenomeni di colata di detrito, e un modello euristico per la definizione di possibili scenari evolutivi di frane di scivolamento, superficiali e profonde, già sperimentato in Umbria.

La procedura è stata applicata sia ad aree già edificate, sia ad aree non ancora edificate nel territorio del Comune di Castelsantangelo sul Nera. I risultati dell'applicazione della procedura sono descritti in dettaglio per sei centri abitati esistenti, fra i quali il capoluogo di Castelsantangelo sul Nera e le frazioni di Gualdo, Nocelleto, Nocria, Macchie e Vallinfante, e per l'intero territorio oggetto di studio. Nel primo caso, l'analisi ha definito le condizioni di esposizione ai pericoli considerati delle aree già edificate, ancorché danneggiate più o meno severamente dai sismi. Nel secondo caso, l'analisi ha permesso di individuare aree non edificate potenzialmente urbanizzabili, sulla base di criteri predefiniti.

4 Introduzione

Su richiesta della Funzione Tecnica della Direzione di Comando e Controllo (DiComaC) di Rieti, il Centro di Competenza (CdC) dell'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI), del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), ha provveduto a redigere questa relazione sulla **suscettibilità geo-idrologica** e sull'**esposizione ai pericoli geo-idrologici** di aree nel territorio del Comune di Castelsantangelo sul Nera (MC).

Scopo della relazione è illustrare le attività svolte e i risultati ottenuti per la definizione delle condizioni di **esposizione a fenomeni di caduta massi e crollo**, a fenomeni di **colata di detrito**, e a **frane di scivolamento**, in aree urbanizzate e non nel territorio del Comune di Castelsantangelo sul Nera, fortemente danneggiato dalla sequenza sismica che ha colpito il centro Italia a partire dal 24 agosto 2016¹.

Più in dettaglio, la relazione considera il **capoluogo**, posto in destra idrografica del Fiume Nera, alla confluenza fra lo stesso Fiume Nera e il Fosso di Rapegna, e le cinque frazioni di **Macchie**, **Nocelleto-Rapegna**, **Nocria**, e **Vallinfante**, per un totale di 28,75 km² (Figura 1). La relazione considera i centri abitati esistenti, ancorché fortemente danneggiati dai terremoti recenti, identificando le condizioni di esposizione ai citati “pericoli” geo-idrologici dei centri stessi, e di porzioni di essi.



Figura 1. Area di studio di Castelsantangelo sul Nera (MC).

¹ Il rilievo macrosismico degli effetti dei terremoti effettuato dall'INGV e dal DPC utilizzando rispettivamente la scala macrosismica europea (EMS) e la scala Mercalli–Cancani–Sieberg (MCS) indica le seguenti classi: Castelsantangelo sul Nera, 9 (aggiornato alla scossa del 30 ottobre); Gualdo, 9/10 (aggiornato alla scossa del 30 ottobre); Rapegna-Nocelleto, 7/8 (aggiornato alla scossa del 26 ottobre). Non si dispongono informazioni per le altre località considerate nello studio.

5 Attività precedenti

A seguito dei sismi del 24 agosto e del 30 ottobre 2016, nel territorio del Comune di Castelsantangelo sul Nera sono state svolte attività di sopralluogo, di rilevamento e di analisi utili all'identificazione di eventuali condizioni di pericolosità geologica s.l., e più in particolare di pericolosità geo-idrologica.

In questa sezione sono riassunte le principali attività svolte dal CNR IRPI e da ISPRA nelle aree oggetto di studio.

5.1 Attività svolte dal CNR IRPI

Il CNR IRPI ha svolto sopralluoghi mirati a verificare le condizioni di rischio geo-idrologico, e per la localizzazione di aree idonee per l'installazione di moduli SAE. Inoltre, il CNR IRPI ha svolto un sopralluogo mirato a verificare le cause dell'incremento di portata che ha caratterizzato le sorgenti del Fiume Nera dopo l'evento sismico del 30 ottobre 2016, e le conseguenti mutate condizioni di rischio geo-idrologico per il capoluogo.

5.2 Attività svolte da ISPRA

ISPRA ha svolto sopralluoghi mirati a verificare le cause dell'incremento di portata che ha caratterizzato le sorgenti del Fiume Nera dopo l'evento sismico del 30 ottobre 2016, e le conseguenti mutate condizioni di rischio geo-idrologico in particolare per il centro abitato di Castelsantangelo sul Nera.

6 Fenomeni considerati

Nell'area oggetto di studio sono presenti diversi **fenomeni** geologico-idrologici (“**geo-idrologici**”) **potenzialmente pericolosi** (“**pericoli**”), fra i quali (i) **frane di scivolamento** superficiali e profonde, (ii) **crolli e cadute massi**, (iii) **colate di detrito**, (iv) piene e piene improvvise (“*flash flood*”), e (v) valanghe. Si tratta di fenomeni che nelle aree oggetto di studio sono in gran parte naturali, e che sono diffusi e frequenti nell'Appennino centrale.

La relazione **considera** le tre tipologie di fenomeni ritenute di maggiore interesse nelle aree oggetto di studio, ed in particolare (i) le **frane** di scivolamento, (ii) i **crolli** e le **cadute massi**, e (iii) le **colate di detrito**.

La relazione **non considera** le **piene** e le **piene improvvise**, le **valanghe**, e le **amplificazioni sismiche locali**. I fenomeni di amplificazione sismica sono considerati dagli studi e delle indagini di microzonazione sismica, con un diverso grado di approfondimento a seconda del livello della microzonazione (Gruppo di lavoro “Indirizzi e criteri generali per la microzonazione sismica”, 2008).

7 Procedura per la definizione delle condizioni di esposizione ai pericoli

Per definire in modo per quanto possibile “**oggettivo**” e “**riproducibile**” il livello di esposizione ai pericoli geo-idrologici (da **frana di scivolamento**, da **crolli e cadute massi**, da **colate di detrito**) cui sono sottoposte le aree oggetto di studio si è ritenuto utile definire una **procedura** specifica. La procedura è stata disegnata con l’obiettivo di fornire informazioni utili su dove sia possibile riparare o ricostruire gli edifici danneggiati dal sisma, e dove sia possibile delocalizzare i centri distrutti, o parte di essi. La procedura utilizza (“*input*”) dati disponibili od acquisiti *ad hoc* per la zonazione, e restituisce (“*output*”) una **valutazione semi-quantitativa del grado di esposizione ai pericoli geo-idrologici** a cui sono soggette le aree oggetto d’indagine, o parti di esse. In questo senso, la procedura si applica sia ad aree già edificate prima del sisma, ancorché ora danneggiate, sia ad aree non ancora edificate all’interno delle quali ricostruire gli abitati distrutti, o parte di essi.

La procedura considera esclusivamente i **pericoli geo-idrologici** indicati nella sezione 6, ossia **frane, cadute massi e crolli, colate di detrito**, e non considera gli altri pericoli pur potenzialmente presenti nell’area, e fra questi in particolare i fenomeni di piena e piena improvvisa (“*flash flood*”) e le valanghe. La procedura non considera neppure possibili condizioni di pericolo indotte dagli effetti dell’**amplificazione sismica locale**, che nelle aree oggetto d’indagine sono state certamente rilevanti, con accelerazioni di picco che localmente hanno superato valori di 0.45g. Di queste **limitazioni** si deve tenere conto nell’uso dei risultati della procedura.

Considerati i tempi e le informazioni disponibili per l’indagine, la natura e la complessità dei fenomeni di dissesto da investigare, e l’estensione delle aree oggetto di studio (Figura 1), la procedura ha necessariamente un carattere **speditivo ed euristico**. La procedura si basa sulle conoscenze empiriche e sulla comprensione dei fenomeni e dei processi presenti, o ragionevolmente ipotizzabili nelle aree oggetto di studio. Nonostante l’approccio speditivo ed euristico, la procedura formalizza i diversi passi interpretativi e le informazioni utilizzate per giungere alla definizione dell’esposizione ai pericoli dell’edificio o delle aree urbanizzabili nelle aree oggetto di studio, o in parti di esse. Ciò garantisce **trasparenza e replicabilità** al processo di zonazione dell’esposizione.

La procedura si applica allo stesso modo (i) ad aree già precedentemente edificate e danneggiate dai sismi, (ii) ad aree completamente distrutte e da delocalizzare, e (iii) ad aree non edificate all’interno delle quali delocalizzare i centri distrutti, o parti di essi. In questo senso, la procedura non è specifica o limitata alle sole aree oggetto della presente relazione, ma è **generale** e può essere applicata ad altre aree danneggiate dalla sequenza sismica che ha colpito l’Italia centrale a partire dal 24 agosto 2016.

7.1 Unità cartografica di riferimento

Propedeutica alla definizione dei livelli di esposizione (da frana di scivolamento, da caduta massi o crolli, da colata di detrito) è la scelta di una **unità cartografica di riferimento** (UCR), ossia dell’area minima (“elementare”) da utilizzare per la modellistica e per la zonazione della suscettibilità. In linea di principio, la procedura può utilizzare una varietà di UCR differenti (versanti elementari, emi-bacini, unità idrologiche, condizioni uniche, celle, suddivisioni amministrative, Guzzetti, 2005). Tuttavia, considerando il fatto che i modelli utilizzati (§ 9) elaborano i dati e producono i risultati in formato “raster” (“a griglia”), si è optato per l’utilizzo della “cella” (“elemento di griglia”) come UCR. Inoltre, considerando il fatto che i modelli

utilizzano tutti lo stesso modello digitale del terreno (DEM) per la simulazione dei fenomeni franosi (di caduta massi, di colata di detrito), si è deciso di utilizzare la cella del DEM quale UCR per la definizione e la zonazione della suscettibilità, e per la definizione dell'esposizione ai pericoli degli abitati e delle aree urbanizzabili.

7.2 Descrizione della procedura

La procedura si articola in **sei passi** ed è illustrata in Figura 2.

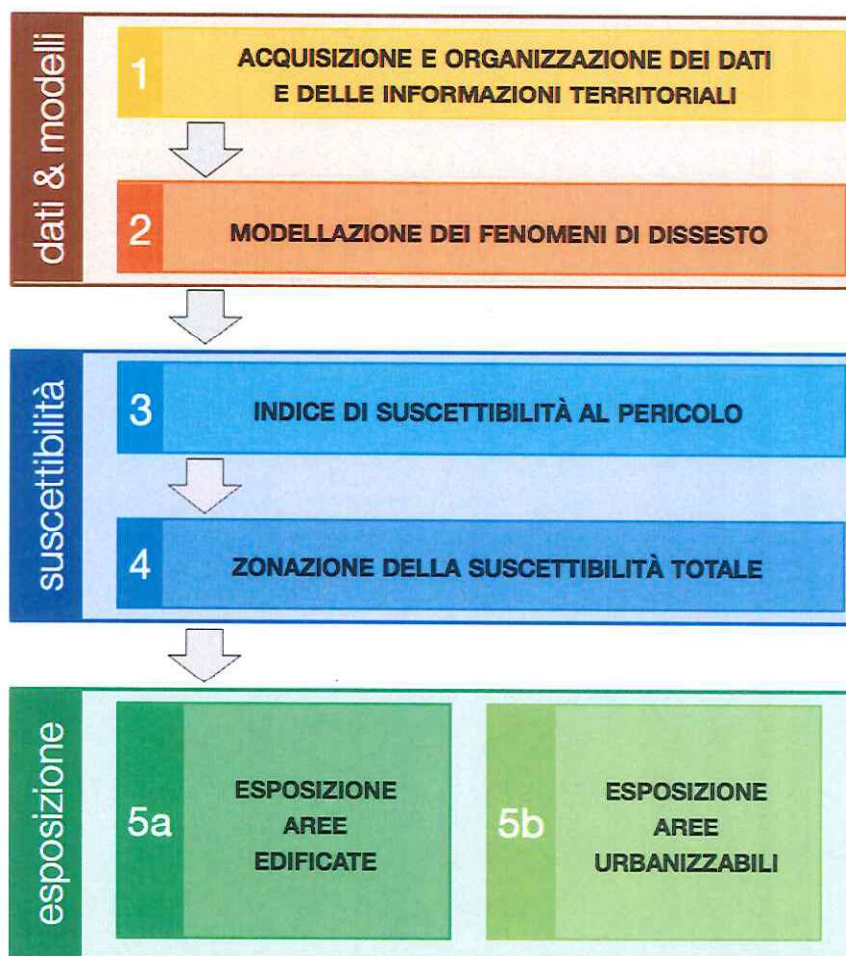


Figura 2. Schema della procedura utilizzata per la definizione della suscettibilità e dell'esposizione ai pericoli geo-idrologici.

7.2.1 *Acquisizione e organizzazione dei dati e delle informazioni*

Il **primo** passo della procedura (1 in Figura 2) consiste nella **raccolta** e nell'**organizzazione** dei dati e delle **informazioni territoriali** necessarie. Si tratta in particolare dei seguenti livelli informativi, organizzati in un GIS:

- Modello Digitale del Terreno (DEM) (§ 8.1);
- Carta inventario dei fenomeni franosi (§ 8.3);
- Carta geologica (§ 8.4);
- Cartografie dei Piani di Assetto Idrogeologico (§ 8.5);

7.2.2 Modellazione dei fenomeni di dissesto

Il **secondo** passo della procedura (2 in Figura 2) consiste nella modellazione dei tre fenomeni di dissesto (“**pericoli**”) considerati, ossia (i) i **crolli** e le **cadute massi**, (ii) le **colate di detrito** e (iii) le **frane di scivolamento**. Le tre diverse tipologie di dissesto sono trattate separatamente, in quanto pongono “pericoli” differenti. Inoltre, i tre pericoli possono coesistere in una stessa area, anche con livelli d’intensità differenti. La procedura non considera tuttavia i possibili “effetti domino” o “a cascata”, ossia la possibilità che un particolare fenomeno, nel corso della propria evoluzione spaziale o temporale inneschi una diversa tipologia di dissesto (ad esempio, una frana di scivolamento che evolve in colata di detrito).

- Per la definizione della **suscettibilità** ai fenomeni di **caduta massi** e di **crolli**, è utilizzato il modello STONE (Guzzetti et al., 2002, 2004), sviluppato per la modellazione semplificata del processo di caduta (“scendimento”) massi in aree vaste e in modo spazialmente distribuito². Oltre alla mappa delle aree di origine dei crolli, definite dall’analisi foto-interpretativa, dei tre “output” del modello numerico STONE la procedura considera esclusivamente la “mappa delle traiettorie di caduta”, ossia la mappa che indica per ogni cella il numero di traiettorie di caduta transitate (in volo o in rotolamento) attraverso la cella stessa, indipendentemente dalla velocità e dall’altezza di caduta di massi (virtuali). Celle che presentano più traiettorie di caduta sono considerate più suscettibili di celle che presentano meno (o nessuna) traiettorie di caduta.
- Per la definizione della **suscettibilità** connessa ai fenomeni di **colata di detrito** sono utilizzati due diversi modelli, ed in particolare: (i) il modello concettuale “*Modified Single Flow Direction*” (MSF, Huggel et al., 2003), e (ii) il modello concettuale distribuito “*r.randomwalk*” (Mergili et al. 2015)³. I due modelli producono risultati localmente differenti sia per un diverso approccio modellistico, sia per la diversa implementazione dei modelli nei rispettivi codici di calcolo. Questo è un fatto normale nella modellazione dei fenomeni di dissesto, ed in particolare delle colate di detrito. I due modelli sono stati successivamente combinati, secondo la procedura descritta nella sezione (§ 9.2.4), per ottenere una sola cartografia della suscettibilità connessa alle colate di detrito.
- Per la definizione della **suscettibilità** connessa alle **frane di scivolamento** si è scelto di definire, in modo euristico, possibili **scenari di evoluzione** delle singole frane, o di gruppi di frane limitrofe, così come proposto da Cardinali et al. (2002) e da Reichenbach et al. (2004)⁴. La procedura considera la presenza (o l’assenza) in ogni cella di un’area compresa in uno o più scenari evolutivi delle frane di scivolamento riconosciute e mappate nella carta inventario delle frane.

² Per una descrizione del modello numerico STONE si rimanda a § 9.1.

³ Per una descrizione dei modelli utilizzati per la simulazione delle colate di detrito si rimanda a § 9.2.

⁴ Per una descrizione della procedura utilizzata per la definizione di possibili scenari evolutivi delle frane di scivolamento si rimanda a § 9.3.

È utile chiarire che tutti i modelli, inclusi gli scenari evolutivi delle frane di scivolamento, sono affetti da **incertezze**, che dipendono dai dati e dalle informazioni utilizzate per costruire i modelli (incertezza epistemica), e dalla variabilità naturale che caratterizza i fenomeni oggetto della modellazione (incertezza aleatoria). Di questo si deve tener conto nell'utilizzo dei modelli.

7.2.3 *Indice di suscettibilità*

Il **terzo** passo della procedura (3 in Figura 2) consiste nella definizione di un **indice di suscettibilità** per **ciascun pericolo** considerato. Per ognuna delle 585.501 celle di 10 m × 10 m che rappresentano l'area di Castelsantangelo sul Nera (Figura 1), l'indice identifica in modo univoco i **“livelli di suscettibilità”** indotti dai quattro pericoli considerati (crolli e cadute massi, colate di detrito, frane profonde, frane superficiali). Per l'identificazione dei livelli di suscettibilità, l'indice utilizza un codice posizionale definito **“indice di suscettibilità del pericolo”**, analogamente a quanto proposto da Cardinali et al. (2002) e da Reichenbach et al. (2004). L'indice di suscettibilità del pericolo è dato da quattro cifre, che singolarmente hanno valori intero da 0 a 4. Nell'indice, la posizione del carattere ha i seguenti significati:

- (a) La **prima** cifra a sinistra può assumere valore 0 o 4, ed esprime la possibilità che una “cella” (“elemento di griglia”) sia attraversata da cadute massi, così come indicato dalla modellazione dei fenomeni di crollo (§ 9.1). Il valore 4 indica la presenza di traiettorie di crollo nella cella, e il valore 0 indica l'assenza di traiettorie di crollo nella cella.
- (b) La **seconda** cifra da sinistra può assumere valore da 0 a 4, ed indica la classe di probabilità di colate di detrito, ossia la possibilità che una cella sia attraversata da colate di detrito. Il valore deriva dalla combinazione dei risultati dei modelli dei fenomeni di colata descritti precedentemente (§ 9.2) con le evidenze riportate nella carta inventario dei fenomeni franosi. In particolare, la mappa assume il valore della classe di probabilità risultante dalla modellazione (0, 1, 2, 3, 4) quando questa è al di fuori dei depositi di colate di detrito identificate attraverso la foto-interpretazione. Viceversa, all'interno dei depositi di colate di detrito identificate con la foto-interpretazione la mappa assume valore massimo (4). Nella mappa così prodotta, i valori da 1 a 4 indicano le classi di probabilità di attraversamento di traiettorie di colate di detrito per una data cella. Il valore 0 indica l'assenza di colate di detrito.
- (c) La **terza** cifra da sinistra può assumere valore 0 o 3, ed indica se una cella è interessata da scenari evolutivi di frane profonde (§ 9.3). Il valore 3 indica la presenza di scenari evolutivi per frane profonde in una cella, e il valore 0 indica l'assenza di scenari evolutivi per frane profonde nella cella.
- (d) La **quarta** cifra da sinistra può assumere valore 0 o 4, ed indica se una cella è interessata da scenari evolutivi di frane superficiali (§ 9.3). Il valore 4 indica la presenza di scenari evolutivi per frane superficiali in una cella, e il valore 0 indica l'assenza di scenari evolutivi per frane superficiali nella cella.

Per descrivere la suscettibilità di ciascuna cella ai diversi pericoli, gli indici di suscettibilità dei pericoli sono stati combinati in un indice posizionale composto da quattro cifre, definito **“indice di suscettibilità specifica”**. Nell'indice composto, da sinistra verso destra, ciascuna cifra replica rispettivamente l'indice di suscettibilità (i) per il pericolo di crolli e cadute massi, (ii) di colate di detrito, (iii) di frane profonde e (iv) di frane superficiali. L'**indice di suscettibilità specifica** può assumere 40 valori differenti, uno per ciascuna delle possibili combinazioni degli indici di suscettibilità per ciascun pericolo.

7.2.4 Zonazione della suscettibilità

Il **quarto** passo della procedura (4 in Figura 2) consiste nella **zonazione della suscettibilità totale** nelle aree oggetto d'indagine. La zonazione avviene adottando un gruppo di regole che consentono di raggruppare i 40 diversi valori dell'indice di suscettibilità in **5 classi di suscettibilità totale**, definite sulla base di raggruppamenti dell'indice di suscettibilità specifica. La Tabella 1 mostra le relazioni tra gli indici di suscettibilità dei singoli pericoli (prime quattro colonne da sinistra), l'indice di suscettibilità specifica (quinta colonna da sinistra) e le classi di suscettibilità totale (sesta colonna da sinistra), espresse da un colore diverso, e da un valore intero compreso fra 0 e 4.

Tabella 1: Indici di suscettibilità specifica e classi di suscettibilità totale.

Indici di suscettibilità				Suscettibilità	
Crolli	Colate	Frane profonde	Frane superficiali	Specifica	Totale
0	0	0	0	0000	0
0	0	0	3	0003	1
0	0	4	0	0040	2
0	0	4	3	0043	2
0	1	0	0	0100	1
0	1	0	3	0103	1
0	1	4	0	0140	2
0	1	4	3	0143	2
0	2	0	0	0200	2
0	2	0	3	0203	2
0	2	4	0	0240	3
0	2	4	3	0243	3
0	3	0	0	0300	3
0	3	0	3	0303	3
0	3	4	0	0340	3
0	3	4	3	0343	3
0	4	0	0	0400	3
0	4	0	3	0403	3
0	4	4	0	0440	3
0	4	4	3	0443	3
4	0	0	0	4000	3
4	0	0	3	4003	3
4	0	4	0	4040	3
4	0	4	3	4043	3
4	1	0	0	4100	3
4	1	0	3	4103	3
4	1	4	0	4140	3
4	1	4	3	4143	3
4	2	0	0	4200	4
4	2	0	3	4203	4
4	2	4	0	4240	4
4	2	4	3	4243	4
4	3	0	0	4300	4
4	3	0	3	4303	4
4	3	4	0	4340	4
4	3	4	3	4343	4
4	4	0	0	4400	4
4	4	0	3	4403	4
4	4	4	0	4440	4
4	4	4	3	4443	4

Le **cinque classi di suscettibilità totale** sono espresse con un numero intero compreso tra 0 e 4, per indicare: **0, suscettibilità molto bassa**; **1, suscettibilità bassa**; **2, suscettibilità media**; **3, suscettibilità elevata**; e **4, suscettibilità molto elevata**. Di seguito sono elencati i criteri utilizzati per il raggruppamento in **classi di suscettibilità totale**.

- (a) Sono assegnate alla **classe 0 (verde scuro in Tabella 1)** le celle nelle quali tutte le cifre del codice sono pari a 0, ossia le celle che non risultano essere suscettibili a nessuno dei pericoli considerati (§ 6).
- (b) Sono assegnate alla **classe 1 (verde chiaro in Tabella 1)** le celle non suscettibili a crolli (prima cifra 0) o a frane profonde (terza cifra 0), e possono essere suscettibili a frane superficiali (quarta cifra 0 o 3) e/o a colate con classe di probabilità massima pari a 1 (seconda cifra 0 o 1).
- (c) Sono assegnate alla **classe 2 (giallo in Tabella 1)** le celle non suscettibili a crolli (prima cifra 0), e suscettibili a frane profonde (ultime due cifre 40) o profonde e superficiali (ultime due cifre 43), eventualmente associate a colate di detrito con classe di probabilità massima pari a 1 (seconda cifra 0 o 1). Rientrano nella classe le celle con colate di detrito con classe di probabilità medio-bassa (seconda cifra 2), eventualmente associate a frane superficiali (quarta cifra 0 o 3).
- (d) Sono assegnate alla **classe 3 (arancione in Tabella 1)** le celle suscettibili a crolli (prima cifra 4) associate a colate di detrito con classe di probabilità massima bassa (seconda cifra 0 o 1), eventualmente a frane profonde e/o superficiali (ultime due cifre 00, 40, 03 o 43). Rientrano nella classe le celle non suscettibili a crolli (prima cifra 0) e suscettibili a colate di detrito con classe di probabilità medio-alta o alta (seconda cifra 3 o 4), ed eventualmente a frane profonde e/o superficiali (ultime due cifre 00, 40, 03 o 43). Infine, rientrano nella classe le celle non suscettibili a crolli (prima cifra 0), suscettibili a colate con classe di probabilità medio-bassa (seconda cifra 2) ed a frane profonde, o profonde e superficiali (ultime due cifre 40 o 43).
- (e) Sono assegnate alla **classe 4 (rosso in Tabella 1)** le celle suscettibili a crolli (prima cifra 4) associate a colate di detrito con classe di probabilità medio-bassa, medio-alta o alta (seconda cifra 2, 3 o 4), ed eventualmente a frane profonde e/o superficiali (ultime due cifre 00, 03, 40, o 43).

7.2.5 Valutazione dell'esposizione ai pericoli

Il **quinto** passo della procedura (5 in Figura 2) consiste nell'identificazione dell'esposizione ai pericoli considerati (a) delle aree edificate presenti nell'area oggetto di studio, e (b) di porzioni di territorio potenzialmente urbanizzabili. L'**esposizione** è definita come "lo stato di persone, strutture, infrastrutture, capacità produttive e qualunque altro bene tangibile collocato in aree soggette a pericoli naturali" (UNISDR, 2009). Nel lavoro, sono considerati come "elementi esposti" tutte le strutture, le infrastrutture e le persone esposte ai pericoli geo-idrologici considerati (§ 6). Per la definizione dell'esposizione delle aree edificate (strutture e infrastrutture) (5a in Figura 2) e delle aree potenzialmente urbanizzabili (5b in Figura 2), la zonazione della suscettibilità totale è utilizzata per determinare la possibile interazione di un elemento esposto con uno dei pericoli geo-idrologici considerati. Pertanto, un elemento che insiste in un'area caratterizzata da una suscettibilità totale molto elevata (4 in Tabella 2) è considerato soggetto ad un grado di esposizione ai pericoli molto elevato (4 in Tabella 2), e un elemento posto in un'area caratterizzata da una suscettibilità bassa (1 in Tabella 2) è considerato soggetto ad un grado di esposizione ai pericoli basso (1 in Tabella 2).

Tabella 2: Classi di suscettibilità totale e di esposizione.

Suscettibilità totale	Esposizione	Nome classi
0	0	Molto bassa
1	1	Bassa
2	2	Media
3	3	Elevata
4	4	Molto elevata

7.2.5.1 Esposizione delle aree urbanizzabili

La perimetrazione delle aree potenzialmente urbanizzabili (5b in Figura 2) si basa sull'applicazione di una procedura che utilizza quattro criteri:

- (i) Il **primo** criterio considera l'esposizione ai pericoli. Assume come **non idonee** le aree caratterizzate da un'**esposizione molto elevata** (classe 4, Tabella 2), e identifica le aree rimanenti. Il criterio mira ad evitare aree molto suscettibili ai pericoli geo-idrologici.
- (ii) Il **secondo** criterio considera la quota del terreno, ricavata dal DEM, e identifica le aree a **quota inferiore a 1000 metri**. Il criterio ha lo scopo di identificare porzioni di territorio poste a quote simili o inferiori a quelle degli abitati esistenti.
- (iii) Il **terzo** criterio considera la pendenza del terreno, ricavata dal DEM. Identifica le aree caratterizzate da **pendenze medie inferiori a 10°**, e da una deviazione standard delle pendenze inferiore a 5°. I valori di pendenza sono stati calcolati in una finestra mobile circolare di 90 m diametro (9 "celle"), corrispondente all'estensione media degli isolati di Castelsantangelo sul Nera (circa 6000 m²). I valori di pendenza sono quelli medi del capoluogo di Castelsantangelo sul Nera e della frazione di Nocelleto, assunti come valori di riferimento. Il criterio mira ad identificare aree con caratteristiche morfometriche simili a quelle di aree già edificate nel territorio del Comune di Castelsantangelo sul Nera.
- (iv) Il **quarto** criterio considera l'estensione complessiva di ciascuna area potenzialmente idonea, e definisce **non idonee** tutte le aree che, pur soddisfacendo le prime tre condizioni, hanno una **superficie totale inferiore a 2000 m²**. Il criterio garantisce che l'eventuale ricostruzione non sia realizzata in aree frammentate.
- (v) Il **quinto** criterio si applica alle aree che soddisfano i primi tre criteri, e identifica porzioni di territorio contigue di **estensione maggiore di 2000 m²**.

La procedura è stata applicata all'intera area di studio (Figura 1) per la quale è stata valutata l'esposizione ai pericoli geo-idrologici delle aree potenzialmente urbanizzabili, come mostrato nella sezione § 10.7 e in Figura 32.

7.2.5.2 Esposizione delle aree edificate

L'**esposizione delle aree edificate** (5a in Figura 2) si basa sulla sovrapposizione in un GIS dei livelli di suscettibilità totale e della mappatura dell'edificato, quest'ultima ottenuta dalla Carta Tecnica Regionale a scala 1:10.000 della Regione Marche, e aggiornata in base alle informazioni disponibili attraverso la piattaforma Google Earth™. La procedura è stata applicata ai sei nuclei abitati nel Comune di Castelsantangelo sul Nera per i quali è stata valutata l'esposizione ai pericoli geo-idrologici, come illustrato in dettaglio nella sezione § 10 e nella Figura 15 (Castelsantangelo sul Nera), Figura 18 (Nocelleto), Figura 21 (Nocria), Figura 24 (Gualdo), Figura 27 (Macchie) e Figura 31 (Vallinfante).

7.3 Frequenza temporale degli eventi

7.3.1 Considerazioni generali

Nella definizione della procedura per la valutazione semi-quantitativa del grado di esposizione ai pericoli geo-idrologici a cui sono soggette le aree oggetto d'indagine (§ 7.2) si è deciso di **non considerare la componente temporale dei pericoli**, ossia la frequenza degli eventi, ovvero il loro tempo di ritorno. Per questo motivo, nella procedura si fa riferimento alla **suscettibilità** (§ 7.2.3, 7.2.4) e non alla pericolosità (3 e 4 in Figura 2). Le ragioni della scelta sono di natura teorica (concettuale) e pratica (operativa).

Dal punto di vista **teorico**, la modellazione della probabilità d'occorrenza temporale di eventi naturali quali le frane è realizzata utilizzando semplici modelli probabilistici basati su distribuzioni note, fra le quali le più comuni sono le distribuzioni di Poisson, binomiale, di Weibull ed esponenziale (Glade, 1988; Coe et al., 2000; Crovelli, 2000; Guzzetti, 2005; Guzzetti et al., 2005; Rossi et al., 2010; Witt et al., 2010). Indipendentemente dal modello probabilistico, i singoli eventi sono considerati "puntuali nel tempo" e "casuali nel tempo". I modelli permettono di ottenere stime temporali dell'occorrenze degli eventi (o del tempo medio fra eventi successivi) a condizione che siano soddisfatte alcune assunzioni, fra le quali (Crovelli, 2000; Guzzetti, 2005): (i) gli eventi devono essere fra loro indipendenti, ossia il numero di eventi in periodi di tempo differenti sono fra loro indipendenti; (ii) la probabilità che un evento avvenga in un dato periodo è proporzionale alla lunghezza del periodo; (iii) la probabilità che si verifichi più di un evento in un periodo di tempo breve è molto piccola; (iv) la distribuzione di probabilità del numero degli eventi è la stessa per tutti i periodi di uguale lunghezza; e (v) la ricorrenza media degli eventi osservata in passato rimarrà invariata nel futuro (stazionarietà). La validità delle stime temporali dell'occorrenze degli eventi (o del loro tempo di ritorno medio) dipende dall'aderenza dei fenomeni a queste assunzioni. Per le frane, (i) l'aderenza alle assunzioni date è difficile da provare, in particolare in aree geografiche di limitata estensione o per le quali non si hanno serie storiche (cataloghi) con numerosi eventi, e (ii) le assunzioni non sono sempre soddisfatte. Nel seguito si fanno due esempi.

La prima assunzione (**indipendenza** degli eventi) presuppone che gli eventi "non si condizionino fra di loro". Ciò implica che le condizioni "fisiche" (meteorologiche, morfologiche, geologiche, idrologiche, di uso e copertura del suolo) che portano al verificarsi di un evento non cambino al verificarsi di una frana. L'assunzione è violata da molte frane, ed in particolare dalle frane di crollo e dalle colate di detrito. È noto che a seguito di una caduta di massi o di una colata, la probabilità che si verifichi dalla stessa area sorgente, o da nuove aree sorgenti limitrofe, un nuovo crollo o una nuova colata di detrito sarà più elevata (nel caso il volume franato abbia destabilizzato altri volumi instabili) o più bassa (nel caso la frana abbia ridotto sensibilmente o eliminato i volumi instabili). L'occorrenza di un evento precedente condiziona quindi (aumentando o riducendo) la probabilità d'occorrenza degli eventi successivi, **violando l'assunzione d'indipendenza** degli eventi.

La quinta assunzione (**stazionarietà** della serie storica) presuppone che nel periodo di riferimento (del catalogo e/o della previsione) non cambino le condizioni che portano al verificarsi degli eventi di frana. Se questa assunzione può essere considerata accettabile per periodi di tempo brevi (alcuni anni) e all'interno di aree geografiche ridotte, certamente non è soddisfatta per periodi temporali lunghi (decine o centinaia di anni) e in aree vaste. Nel corso di decenni o secoli, cambia il clima e con esso le condizioni meteorologiche, cambia la copertura e l'uso del suolo, e cambia l'impatto antropico sull'ambiente e il territorio. Questi fattori hanno un'influenza sulla franosità, che quindi cambia nel tempo, **violando l'assunzione di stazionarietà** della serie storica.

Dal punto di vista **operativo**, la definizione e/o la modellazione della frequenza (o della probabilità d'occorrenza temporale) di eventi di frana, di qualsivoglia tipologia, presuppone la disponibilità di un'adeguata serie storica d'eventi sulla base della quale effettuare le analisi (Glade, 1988; Coe et al., 2000; Crovelli, 2000; Rossi et al., 2010; Witt et al., 2010). Per l'area oggetto di studio non è disponibile una **serie storica** (un catalogo) **d'eventi di frana** s.l. (crolli, colate di detrito, frane di scivolamento) da poter utilizzare per definire con un qualche grado di accuratezza, e fatte salve le considerazioni descritte nel paragrafo precedente, la frequenza temporale degli eventi di frana, ed in particolare la frequenza dei fenomeni di colata di detrito o di caduta massi.

Per l'alta Valnerina si hanno informazioni storiche relative ad eventi geo-idrologici (Figura 3, Tabella 3). Inondazioni hanno colpito l'area nel 1492 e nel 1494, nel 1600, nell'agosto del 1661 e del 1667, e il 13-15 ottobre 1670. Colate di detrito sono riportate nel 1723 e nel 1807. Una piena particolarmente distruttiva colpì il paese di Visso nel 1858. Il 27 e 28 luglio del 1906 un evento alluvionale particolarmente distruttivo interessò il territorio compreso fra Castelsantangelo sul Nera e Ussita. Le abitazioni di entrambi i centri furono inondate da colate di detrito e dal fango. A Castelsantangelo sul Nera si contarono quattro vittime (Guzzetti e Cardinali, 1991), e il locale cimitero fu inondato dal detrito proveniente dal Fosso delle Brece che attraversa la frazione di Nocria (Tabella 3). Informazioni su eventi storici di colata di detrito lungo il Fosso di Varogna, che interessa l'abitato di Nocelleto (§ 10.2), sono state reperite dal Parco Nazionale dei Monti Sibillini. Infine, l'analisi delle fotografie aeree stereoscopiche in bianco e nero, a scala 1:33.000 circa, riprese nel 1955 (§ 8.2) mostra chiaramente come il Fosso di Varogna fosse stato al tempo interessato di recente da colate di detrito. Nei tempi più recenti, eventi di sono avuti nel 1990, nel 1996, nel 2003, nel 2013 e nel 2016 (Tabella 3).

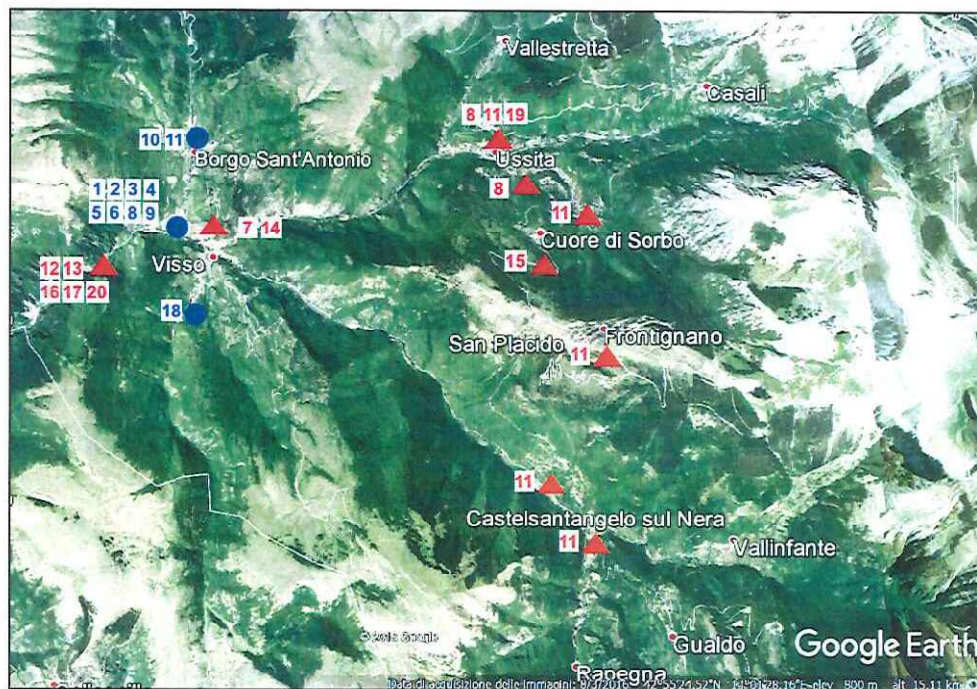


Figura 3. Distribuzione geografica di eventi geo-idrologici storici nell'alta Valnerina. I pallini blu indicano inondazioni, e i trinagoli rossi frane di diversa tipologia. Le fonti sono riportate in Tabella 3.

Tabella 3. Eventi geo-idrologici storici nell'alta Valnerina. Tipo: CD, colata di detrito; CM, caduta massi; CR, crollo; CX, frana complessa; F, frana; I, inondazione; PT, piena torrentizia.

N	Località	Data	Tipo	Fonte
1	Visso	1492	I	Venanzangeli (1988) L'Alto Nera - storia, etnografia, arte e guida degli itinerari turistico-culturali
2	Visso	1494	I	Franconi (2009) Relazione Ambrosio Magete
3	Visso	1600	I	Franconi (2009) Relazione Ambrosio Magete
4	Visso	ago1661	I	Venanzangeli (1988) L'Alto Nera - storia, etnografia, arte e guida degli itinerari turistico-culturali
5	Visso	ago1667	I	Franconi (2009) Relazione Ambrosio Magete. Appennino Camerte
6	Visso	13-15 ott 1670	I	Franconi (2009) Relazione Ambrosio Magete. Appennino Camerte
7	Visso	fine ott 1723	CD	Franconi (2006) Appennino Camerte, 13
8	Visso, Fluminata, Ussita (Chiesa di S. Ippolito)	28-29 lug 1807	CD	Venanzangeli (1988) L'Alto Nera - storia, etnografia, arte e guida degli itinerari turistico-culturali.
9	Visso	23 giu 1858	I	Riccioni (1902) Saggi e memorie storiche della città di Visso
10	Villa Sant'Antonio	25 ago 1858	I	Riccioni (1902) Saggi e memorie storiche della città di Visso
11	Castelsantangelo sul Nera, Fosso delle Breccie, Borgo Sant'Antonio, Calcara, Fluminata, Monte Cornaccione	27 lug 1906	CD, I	Guzzetti e Cardinali (1991) Debris-flow phenomena in the Central Apennines of Italy. Terra Nova 3, 619-627
12	Visso, SS 209	4 ott 1971	CR	Archivio progetto AVI
13	Visso, SS 209	20 set 1979	CR	Archivio progetto AVI
14	Visso, via Macereto, Torre	12 dic1990	CX	Archivio progetto AVI
15	SP Ussita – Castelsantangelo sul Nera	1996		Archivio progetto AVI
16	Visso, SS 209	12 mag 1996	CR	Archivio progetto AVI
17	Visso, SS 209	Dic 1999		Archivio progetto AVI
18	Borgo San Giovanni	6 giu 2003	PT	Studi e indagini per la relazione della verifica della compatibilità idraulica e per l'invarianza idraulica delle trasformazioni territoriali. Relazione illustrativa, luglio 2016
19	Ussita	12 nov 2013	F	Il Messaggero online, 12 novembre 2013
20	Visso, SS 209	8 set 2016	CM	http://www.cronachemaceratesi.it

La relativa scarsità di informazioni relative ad eventi storici (Tabella 3) non può essere considerata un'evidenza dell'assenza dei fenomeni, o della loro bassa frequenza temporale. L'arca oggetto di studio è remota, scarsamente abitata, e attraversata da poche vie di comunicazione. È quindi possibile che in passato si siano verificati fenomeni che non sono stati notati, o che non sono stati

riportati nelle cronache. Allo stesso modo, non si ritiene che la mancata evidenza degli effetti di fenomeni recenti (ad esempio, sulla copertura del suolo) possa essere considerata una prova della mancata occorrenza dei fenomeni. I crolli e le colate di detrito possono essere caratterizzati da volumetrie ridotte, le cui evidenze (morfologiche, idrologiche, ecc.) possono essere facilmente obliterate da azioni antropiche (ad esempio, la rimozione di massi o del materiale detritico, le coltivazioni) e naturali (ad esempio, la crescita della vegetazione).

In conclusione, la definizione per aree territoriali ristrette (come quella oggetto di studio) e per periodi temporali relativamente brevi (alcune decine di anni), della frequenza di accadimento di fenomeni franosi resta un problema scientificamente, tecnicamente e operativamente aperto, e per il quale i livelli d'incertezza sono necessariamente elevati, o molto elevati.

7.3.2 Condizioni pluviometriche per il possibile innesco di colate di detrito

Rimanendo valide le considerazioni fatte nella sezione precedente (§ 7.3.1), si è tentata un'analisi per stimare i possibili tempi di ritorno delle condizioni pluviometriche che possono innescare colate di detrito nell'area oggetto di studio. Allo scopo, si sono utilizzate informazioni relative ad un evento verificatosi all'incirca alle ore 20:00 del 5 luglio 2012 a San Pellegrino di Norcia⁵; un'area dalle condizioni fisiografiche simili a quelle dell'area oggetto di studio.

Per l'analisi, sono stati selezionati tre pluviometri prossimi all'area interessata dall'evento di colata di detrito, per i quali erano a disposizione misure di pioggia nell'archivio del Sistema di Allerta Nazionale per la previsione di Frane indotte dalla pioggia in Italia (SANF). Per ogni pluviometro, si è provveduto a: (i) estrarre dall'archivio la serie pluviometrica disponibile, a scala oraria; (ii) calcolare le piogge cumulate per periodi di 1, 3 e 6 ore; (iii) determinare le funzioni di distribuzione cumulata empirica (EDCF) per le piogge cumulate nei tre periodi; (iv) sulla base delle EDCF così ottenute, calcolare la probabilità di non superamento delle piogge registrate prima dell'evento di colate di detrito; ed infine (v) stimare i tempi di ritorno delle piogge cumulate, per i tre periodi considerati.

Dall'analisi è possibile concludere che l'evento di colata di detrito che ha interessato l'abitato di San Pellegrino di Norcia si è verificato a seguito di piogge intense e di breve durata, caratterizzate da cumulate pari a circa 40 mm in un'ora. Nel periodo di circa 15 anni per il quale sono disponibili le misure pluviometriche, nell'area di San Pellegrino e nelle zone limitrofe le stazioni pluviometriche hanno registrato tra 3 e 5 volte condizioni pluviometriche simili, o più severe, a quelle occorse il 5 luglio 2012. Ciò corrisponde a tempi di ritorno medi delle piogge compresi tra 3 e 7 anni.

L'area di Castelsantangelo sul Nera si trova ad una distanza di circa 15 km da San Pellegrino, e il regime pluviometrico è simile. L'analisi delle EDCF relative alle misure di pioggia raccolte da una stazione pluviometrica posta nei pressi di Monte Cornaccione ha mostrato condizioni pluviometriche simili a quelle che hanno innescato la colata di detrito del 2012 a San Pellegrino di Norcia, con tempi di ritorno inferiori. I dati a disposizione indicano che, in 15 anni, eventi pluviometrici con tempi di ritorno compresi tra 3 e 6 anni hanno registrato cumulate orarie pari o superiori a 60 mm, più che sufficienti ad innescare colate di detrito, là dove vi sia materiale sufficiente alla formazione di una colata.

⁵ Informazioni ottenute da una "Scheda di Sopralluogo Dissesto Idrogeologico" redatta dalla Regione Umbria il 6 luglio 2012.

8 Dati

In questa sezione sono descritti i dati territoriali utilizzati per la modellistica e per le analisi della suscettibilità e dell'esposizione ai pericoli geo-idrologici considerati (§ 6).

8.1 Modello digitale del terreno

Per l'area di Castelsantangelo sul Nera si è utilizzato il DEM "TINITALY", prodotto e distribuito dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) a partire da diverse fonti informative (Tarquini et al., 2007, 2012). Il DEM ha una risoluzione al suolo di 10 m × 10 m (Figura 3).

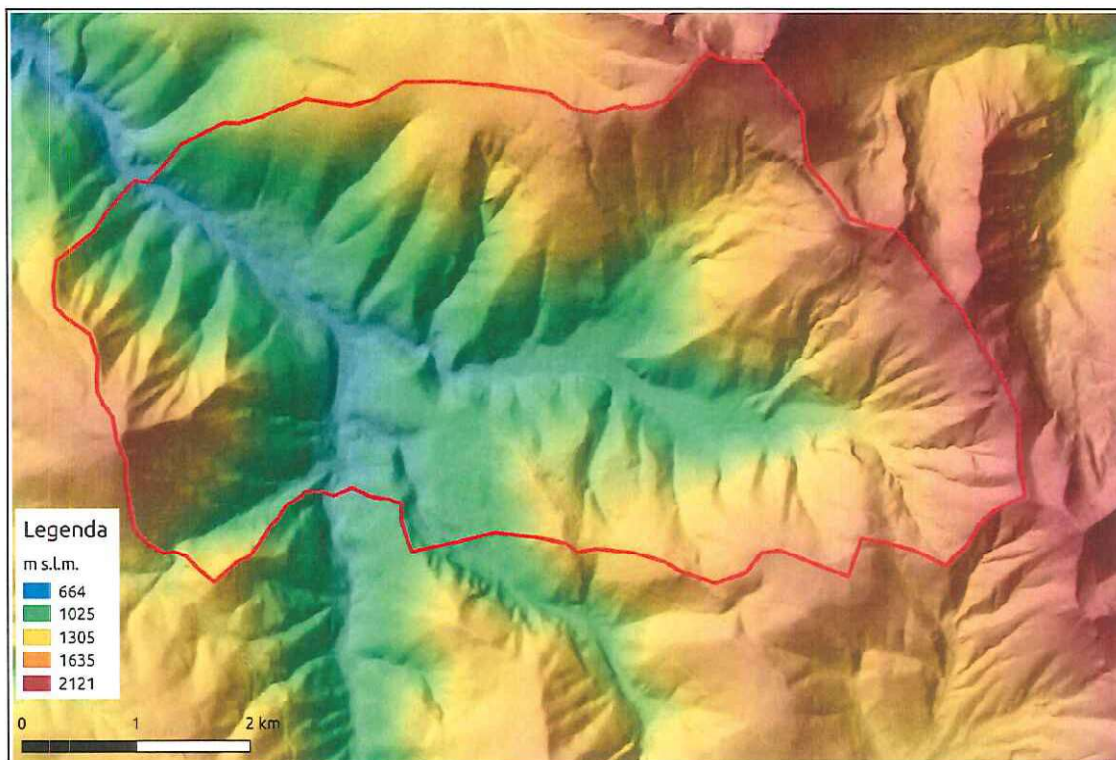


Figura 4. Morfologia dell'area di studio di Caselsantangelo sul Nera ottenuta a partire dal DEM "TINITALY": Fonte: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

8.2 Fotografie aeree

Per la produzione della carta inventario dei fenomeni franosi sono stati utilizzati due voli di fotografie aeree stereoscopiche riprese (i) nel 1955, in bianco e nero, a scala 1:33.000 ca., e (ii) nell'ottobre del 1997, in bianco e nero, a scala 1:20.000 ca. Quest'ultimo volo venne realizzato immediatamente a seguito degli eventi sismici che interessarono l'Appennino umbro-marchigiano nel settembre-ottobre del 1997.

8.3 Carta inventario dei fenomeni franosi

La Figura 5 mostra la carta inventario dei fenomeni franosi prodotta per l'area di Castelsantangelo sul Nera. La carta è stata realizzata attraverso uno studio geomorfologico basato sull'analisi comparata di immagini aeree stereoscopiche riprese in due anni diversi, associata a mirati controlli di campagna. Le informazioni sui fenomeni franosi presenti nella carta inventario sono utilizzate dalla procedura (i) **direttamente**, per individuare le aree dove i dissesti sono presenti e sono stati riconosciuti, e (ii) **indirettamente**, come input per i modelli di suscettibilità e per la definizione degli scenari evolutivi delle frane di scivolamento (§ 9.3).

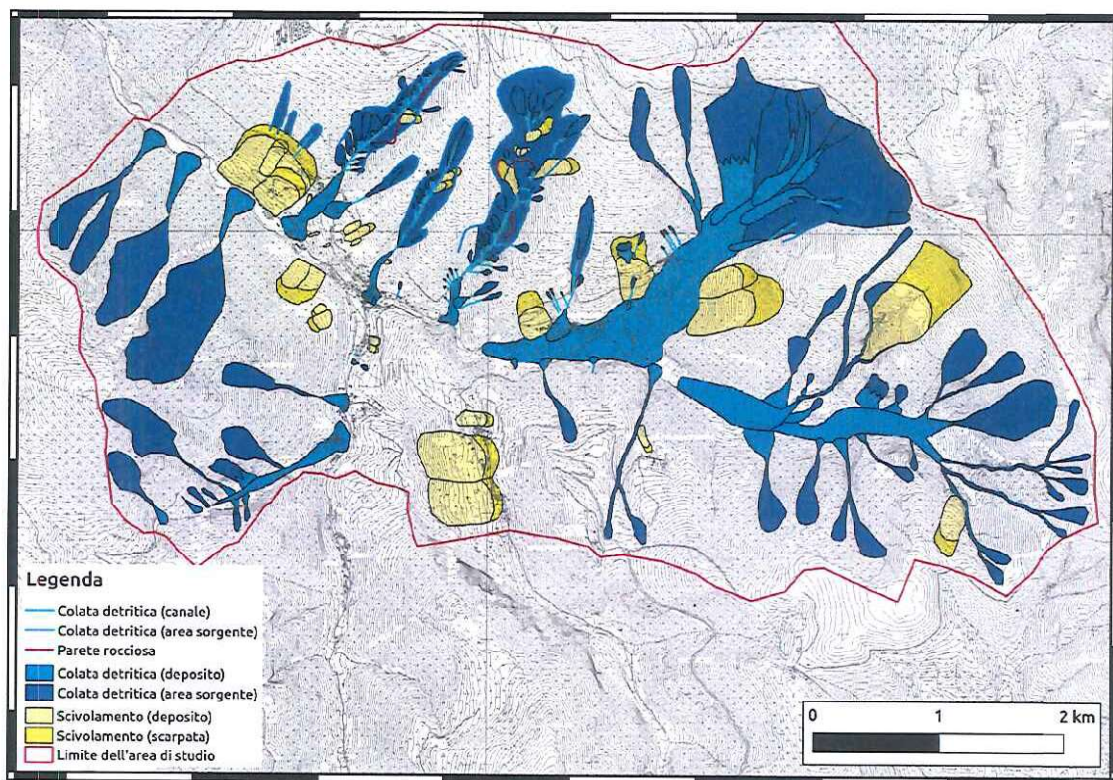


Figura 5. Carta inventario dei fenomeni franosi per l'area di Caselsantangelo sul Nera.

L'inventario dei fenomeni franosi (Figura 5) si estende per circa 28,7 km² nella parte alta del bacino idrografico del Fiume Nera. L'area di studio comprende il capoluogo di Castelsantangelo sul Nera e le frazioni di Nocria, Vallinfante, Macchie, Gualdo e Nocelleto. Nella carta sono rappresentate le principali tipologie di frana, distinte in **scivolamenti**, **colate di detrito** e **crolli**. Le colate di detrito sono rappresentate da un'area sorgente, e da un'area di trasporto e deposizione.

Nella parte alta del bacino del Fiume Nera sono diffuse le colate di detrito, anche di notevoli dimensioni che presentano aree sorgenti localmente in forte evoluzione morfologica e depositi con volumi considerevoli, anche superiori a 20 milioni di m³ (Guzzetti e Cardinali, 1991). Le frazioni di Vallinfante e di Macchie si localizzano in prossimità di colate di detrito di particolare estensione. Nella restante parte dell'area di studio le colate di detrito si sviluppano prevalentemente lungo gli impluvi principali, al termine dei quali sono presenti le aree di deposito, spesso a forma di conoide,

sulle quali sorgono porzioni estese degli abitati di Castelsantangelo sul Nera e Nocelleto, e porzioni delle frazioni di Nocria e di Vallinfante.

Alcuni delle frane di scivolamento riportate nella carta inventario interessano parti delle frazioni di Nocria, Vallinfante e Gualdo. I crolli sono invece diffusi nelle aree di alimentazione delle grandi colate di detrito. Si nota che i recenti eventi sismici, ed in particolare il forte terremoto del 30 ottobre 2016, hanno prodotto numerose cadute massi, crolli anche di volumetria consistente ($> 1 \times 10^2 \text{ m}^3$) e scivolamenti di detrito lungo le parti più elevate delle aree di alimentazione delle colate di detrito più estese (ad esempio nell'area sottostante Passo Cattivo, a NE di Vallinfante).

8.4 Carta geologica

Le informazioni geologiche sono state reperite dalla Carta Geologica della Regione Marche, a scala 1:10.000 (Portale cartografico della Regione Marche). Nell'area, il substrato è caratterizzato da rocce calcaree e calcaree marnose stratificate, appartenenti alla successione carbonatica umbro-marchigiana (Figura 6). Lungo i versanti sono presenti coperture detritiche riconducibili a depositi di versante e di frana. Il Fiume Nera e il Torrente Rapedagna scorrono prevalentemente sui loro depositi alluvionali. È degno di nota il fatto che tutti i centri abitati sorgano su coperture detritiche, di varia tipologia.

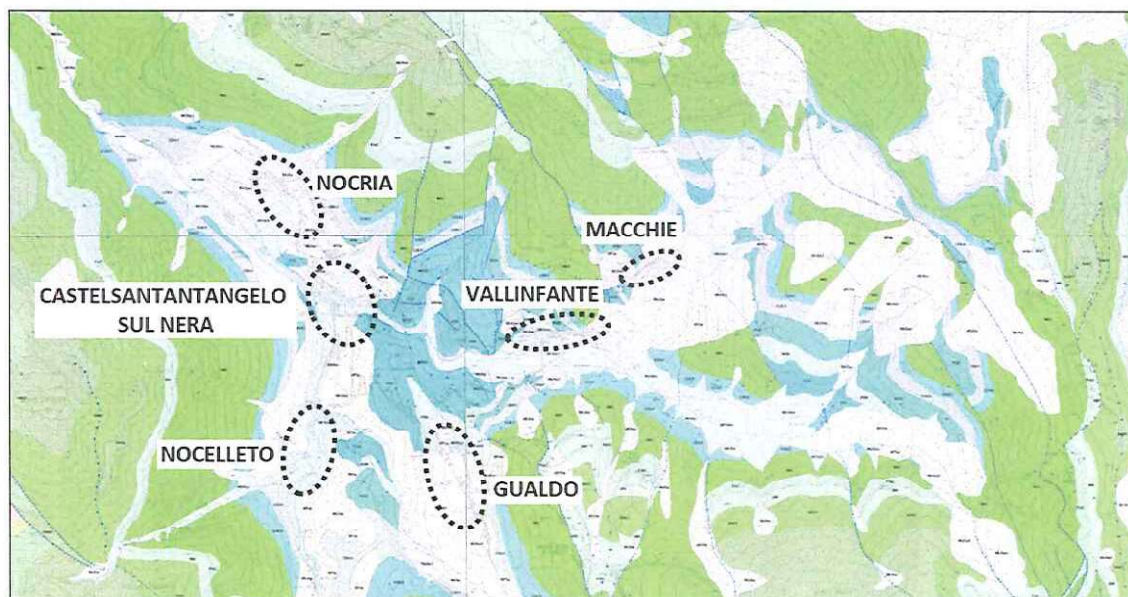


Figura 6. Carta geologica per l'area di Castelsantangelo sul Nera. Fonte: Portale cartografico della Regione Marche.

8.5 Cartografia PAI

Per l'area di Castelsantangelo sul Nera il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) è stato consultato attraverso il portale cartografico dell'Autorità di Bacino del Tevere (<http://www.abtevere.it>) (Figura 7).

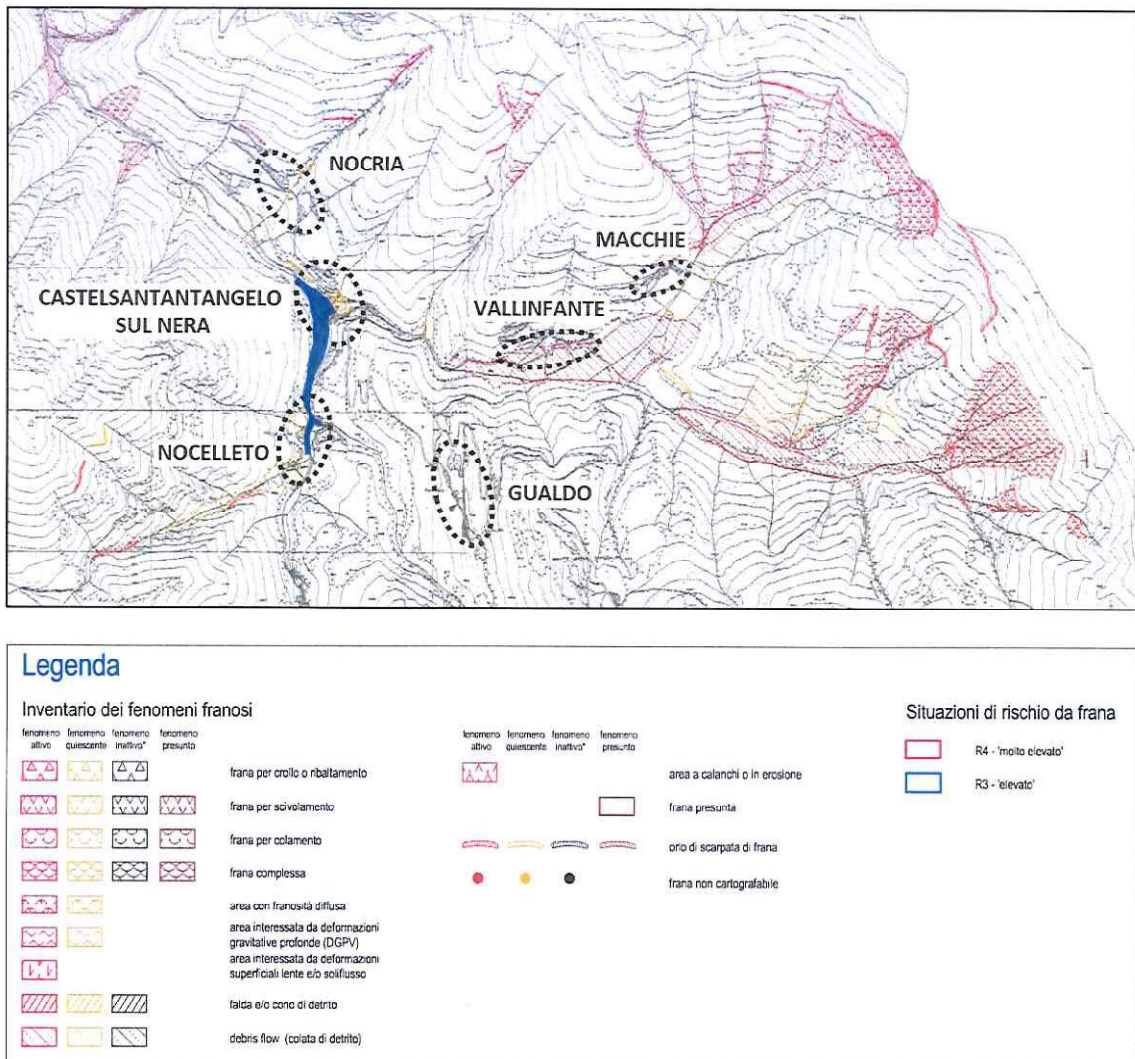


Figura 7. Carta del Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) per l'area di Castelsantangelo sul Nera. Fonte: Portale cartografico della Regione Marche.

Nell'area, il "PAI frane" riporta la presenza di: (i) frane di scivolamento, classificate come quiescenti, (ii) colate di detrito ("debris flow"), classificate come attive o quiescenti, che si estendono principalmente nei pressi degli abitati di Vallinfante, Macchie e Nocelleto, (iii) frane di crollo, classificate come attive, distribuite prevalentemente lungo il versante di Monte Bove Sud, e (iv) depositi di conoidi detritici quiescenti, localizzati nei pressi di Castelsantangelo sul Nera, Nocelleto e Nocria.

Il "PAI alluvioni" riporta un'area classificata a rischio idraulico da medio a molto elevato che si estende lungo il fondovalle del Torrente Rapegna, tra gli abitati di Nocelleto e Castelsantangelo sul Nera (poligono blu in Figura 7).

9 Modelli

In questa sezione sono descritti in modo sintetico i modelli utilizzati per la definizione dei livelli di suscettibilità da cadute massi e da colate di detrito, e per la stima degli scenari evolutivi delle frane di scivolamento.

9.1 Modellazione dei fenomeni di caduta massi

Per la modellazione dei fenomeni di **caduta massi** si è utilizzato il software STONE (Guzzetti et al., 2002, 2004). Per simulare il processo fisico di caduta massi, STONE implementa un approccio del tipo “*lumped mass*” nel quale un masso (“virtuale”) è considerato privo di dimensioni (“adimensionale”) e con la massa concentrata nel baricentro. STONE effettua una simulazione cinematica del masso in caduta. Per effettuare la simulazione, STONE necessita della definizione (i) delle possibili aree di distacco dei massi (“aree sorgenti”), (ii) del numero di massi “lanciati” da ciascuna area sorgente, (iii) della velocità iniziale e dell’angolo di distacco del masso, (iv) di una soglia di velocità al di sotto della quale il masso si ferma, nella simulazione. Oltre a questi parametri, STONE necessita (v) di un DEM che descriva la topografia dell’area oggetto di studio, e (vi) dei coefficienti di attrito dinamico al rotolamento, e di restituzione (normale e tangenziale) dell’energia nei punti di impatto.

STONE considera l’incertezza insita nei dati di input e nel processo di caduta (i) lanciando un numero variabile di massi da ciascuna cella di un’area sorgente, e (ii) variando in modo casuale l’angolo orizzontale di uscita dal masso, il coefficiente di attrito di rotolamento dinamico, e i coefficienti di restituzione normale e tangenziale di energia nei punti d’impatto. Utilizzando tecnologie GIS, STONE calcola le traiettorie di caduta dei singoli massi simulati in tre dimensioni. Le informazioni delle singole traiettorie di caduta (in formato vettoriale) sono quindi utilizzate da STONE per produrre tre mappe “raster” che mostrano, per ogni cella: (i) il numero delle traiettorie (massi) che attraversano la cella, (ii) la massima velocità calcolata lungo tutte le traiettorie che hanno attraversato la cella, e (iii) la massima distanza da terra di tutte le traiettorie che hanno attraversato la cella (Guzzetti et al., 2002). Le tre mappes “raster” possono a loro volta essere utilizzate per definire livelli di pericolosità da caduta di massi (Guzzetti et al., 2004).

In Figura 8 è mostrata la mappa del numero di traiettorie che hanno interessato le celle nell’area di Castelsantangelo sul Nera. Le zone sorgenti del modello sono state ottenute massimizzando le risultanze del modello in funzione dei crolli osservati in aree limitrofe a seguito del terremoto.

9.2 Modellazione delle colate di detrito

Considerata la base dati topografica disponibile (§ 8.1), i tempi ristretti per effettuare le analisi su porzioni di territorio estese, e la scarsità di informazioni disponibili, per le simulazioni delle colate di detrito sono stati utilizzati **modelli concettuali**. A differenza dei più complessi modelli fisicamente basati, i modelli concettuali non rappresentano nel dettaglio i fenomeni e i processi fisici delle colate di detrito, ma descrivono i comportamenti delle colate basandosi su relazioni empiriche semplificate. L’utilizzo di modelli più complessi, basati su principi fisici o misure di campo, è raccomandabile ove dove si disponga di informazioni sulle caratteristiche meccaniche e fisiche dei materiali coinvolti nei processi, sui tempi di ritorno degli stessi, e su eventi storici da utilizzare per la calibrazione e la validazione delle simulazioni.

Per le simulazioni sono stati utilizzati due modelli concettuali, (i) il modello “Modified Single

Flow Direction” (MSF) (Huggel et al., 2003), e il modello “r.randomwalk” (Mergili et al. 2015).

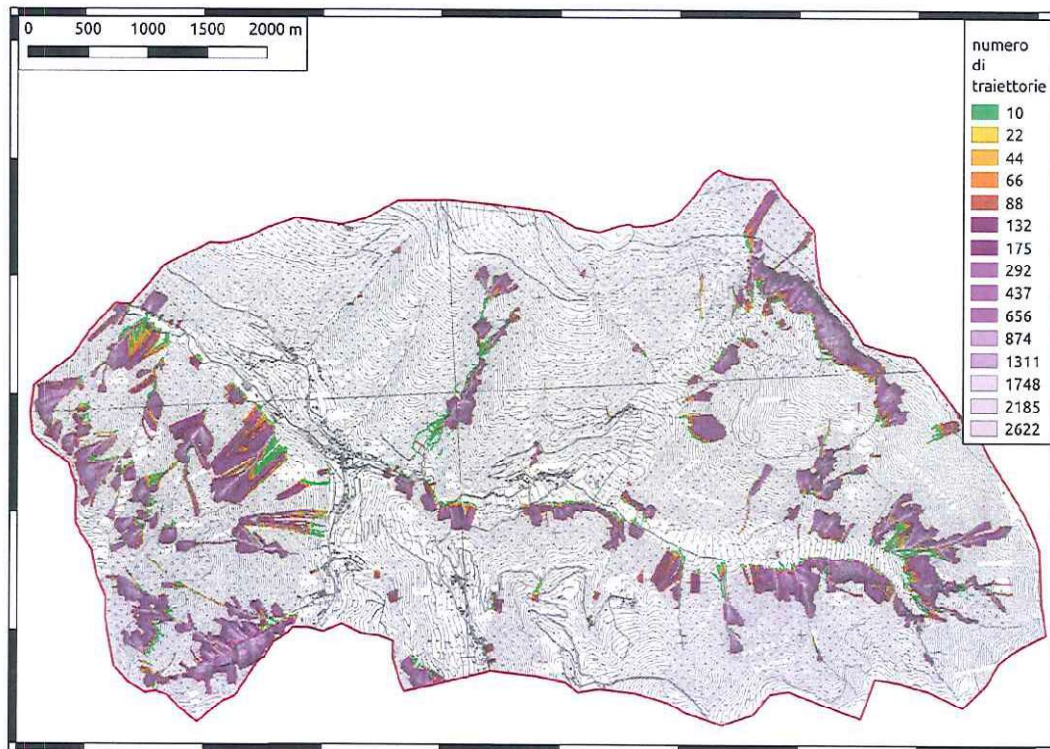


Figura 8. Simulazione del fenomeno di cadute massi con il modello STONE.

9.2.1 Modello “Modified Single Flow Direction”

“Modified Single Flow Direction” (MFS) è un modello concettuale per lo studio dei movimenti di massa facilmente implementabile in ambiente GIS (Gruber et al., 2009). Gli input richiesti dal modello sono: (i) la localizzazione dei punti di inizio delle colate di detrito, e (ii) un DEM che rappresenti adeguatamente la superficie topografica. Il risultato del modello è una previsione speditiva delle aree potenzialmente affette dai fenomeni di colata di detrito, ed una caratterizzazione preliminare della probabilità d’occorrenza spaziale ad esse associate. In questo contesto, la probabilità fornita dal modello va intesa come un indice qualitativo di suscettibilità, e non come una probabilità formalmente corretta in senso matematico.

Il modello MSF si basa su due assunzioni. La prima, è che la colata di detrito si propaghi verso valle a partire da un singolo punto d’innesco. La seconda, è che il flusso della colata segua la direzione di massima pendenza, calcolata utilizzando l’algoritmo “D8”. MSF permette di calcolare più direzioni di deflusso, a partire dai risultati dell’algoritmo D8. Il modello incorpora una “funzione di diversione” Fd , che permette al flusso di deviare fino a 45° su entrambi i lati rispetto alla direzione di massima pendenza. Identificate le aree potenzialmente interessate da una colata di detrito, una funzione Pq assegna ad ogni cella una probabilità qualitativa che dipende da una terza funzione Fr , che modula (aumenta) la resistenza del flusso all’aumentare della deviazione dello

stesso dalla direzione di massima pendenza. Il valore di Fr aumenta verso valle all'aumentare della distanza dal punto d'innescio, e aumenta lateralmente all'aumentare della resistenza al flusso con un angolo di 45° dalla direzione di massima pendenza. Il rapporto tra la distanza orizzontale L tra ogni cella e il punto d'innescio, e il valore di Fr , è quindi un indice di probabilità (suscettibilità) che la cella venga interessata da una colata di detrito (Pq), $Pq_i = L_i / Fr_i$.

La mappa dei valori di Pq indica la massima area potenziale d'invasione delle colate, ed individua aree più o meno soggette ad essere interessate da colate di detrito. Il rapporto H/L , dove H è la differenza di quota tra il punto di innescio e ogni cella del DEM, ed L è la lunghezza del percorso della colata, è utilizzato dal modello come condizione di arresto della colata. Un valore ragionevole del rapporto H/L è stimabile dall'analisi di dati empirici relativi a diversi tipi di movimenti di massa (Gruber et al., 2009). Per le colate di detrito nelle Alpi, in letteratura è individuato un valore minimo di $H/L = 0,19$ (11°) (Rickenmann, 1999; Huggel et al., 2003).

9.2.2 Modello “r.randomwalk”

Il modello concettuale “r.randomwalk” (Mergili et al., 2015) è implementato in un software per l'analisi della propagazione dei movimenti di massa di tipo “colata” sviluppato per operare in un GIS Open Source (GRASS GIS). Il modello adotta un approccio di tipo Monte Carlo per simulare i percorsi delle colate di detrito a partire da sorgenti di rilascio note (pre-definite), che possono essere puntuali o areali. I percorsi delle colate sono modellati evitando che il flusso si concentri lungo tracciati lineari, non realistici per colate di detrito, e sono condizionati dalla pendenza locale del terreno e da regole che forzano il perpetuarsi della direzione di flusso. “r.randomwalk” è in grado di lavorare “in parallelo” simulando un gran numero di “random walk” (“percorsi casuali”, ciascuno rappresentativo di una singola traiettoria), a partire da ogni area sorgente. Ogni “percorso casuale” simulato dal modello segue una traiettoria che è condizionata dalla topografia locale (rappresentata dal DEM). La traiettoria termina, e la colata si arresta, quando è soddisfatta una “condizione di arresto” predefinita. Possono essere utilizzate diverse “condizioni d'arresto”, che si basano per lo più su relazioni empiriche definite in letteratura. Una delle condizioni più utilizzate è quella che si basa sul rapporto H/L (dislivello/distanza percorsa, analogamente a quanto detto per il modello MSF). Possono anche essere utilizzate relazioni che si basano sul volume del materiale rilasciato, o sulla velocità del flusso. “r.randomwalk” è in grado di produrre diversi tipi di cartografie. Per questo studio si è utilizzata la mappa della “frequenza d'impatto” (“impact frequency”) che indica il numero totale di “percorsi casuali” (ciascuno corrispondente ad una diversa colata simulata) che hanno transitato per ogni “cella” considerata dal modello.

Il modello “r.randomwalk” consente di calibrare i possibili valori dell'angolo di arresto da utilizzare per la successiva modellazione. In particolare, è possibile confrontare i risultati del modello con le cartografie delle aree di deposizione di fenomeni noti nell'area di studio. Si possono così ottenere informazioni sulla distribuzione statistica dei minimi valori del rapporto H/L , calcolati per ciascun “percorso casuale” all'interno delle aree già interessate da fenomeni di colata.

9.2.3 Definizione delle aree sorgenti delle colate

Le aree sorgenti delle colate di detrito sono un dato essenziale richiesto da entrambi i modelli di simulazione, “MSF” e “r.randomwalk”, e sono state individuate in modi diversi per i due diversi modelli.

Per il modello “r.randomwalk”, le aree sorgenti sono quelle mappate nella carta inventario dei

fenomeni franosi (Figura 5), individuate attraverso l'analisi foto-interpretativa. Per il modello MSF, le aree sorgenti sono state individuate combinando le informazioni disponibili nella carta inventario dei fenomeni franosi (Figura 5) ad un approccio morfometrico basato sulla relazione empirica tra la pendenza locale del terreno e l'area contribuente, calcolata dal DEM TINITALY. La relazione, derivata empiricamente da Zimmermann et al. (1997) a partire da eventi di colata in Svizzera (Wichmann e Becht, 2005), e applicata con successo in contesti regionali italiani nelle Alpi (Cavalli e Marchi, 2006; Cavalli et al., 2015), è espressa dall'equazione $S = 0.32 \times A^{-0.2}$, dove S è la pendenza locale (m/m) e A l'area contribuente (km^2). Le celle individuate come potenziali sorgenti d'innescio devono eccedere la soglia definita dall'equazione. L'approccio si basa sul fatto che, in presenza di sedimento disponibile alla mobilizzazione, l'innescio di una colata di detrito canalizzata dipende dal superamento di valori critici di portata liquida e di pendenza del canale. La relazione inversa fra l'area contribuente e la pendenza del canale esprime (pur con una semplificazione della complessità dei processi di innescio delle colate) il concetto che nei canali a più forte pendenza è sufficiente per l'innescio una portata liquida inferiore rispetto ai canali con valori di pendenza meno elevati.

Per questo studio, si è assunto che per valori di pendenza locale maggiori di 38° , valore prossimo all'angolo di attrito interno dei materiali detritici presenti nelle zone d'innescio delle colate di detrito, la quantità di materiale detritico mobilizzabile sia modesta o trascurabile. Tali aree sono state escluse dalle possibili zone d'innescio di colata. Per l'area contribuente, si è assunto un valore pari a 20 km^2 , ritenuto ampiamente cautelativo.

Un'indicazione di tipo areale che arricchisce l'informazione puntuale relativa alle celle individuate come possibili aree d'innescio di colate di detrito è data dalla una mappa di densità (Figura 9), che ha permesso di individuare le aree dove è maggiore la concentrazione dei potenziali punti d'innescio, contribuendo all'identificazione delle situazioni di maggior pericolo lungo le aste torrentizie e i versanti. Tale informazione, integrata con le aree sorgenti di sedimento mappate attraverso la foto-interpretazione (Figura 5), è stata utilizzata per individuare i punti d'innescio da utilizzare come input per il modello MSF. I punti sono stati localizzati, in via cautelativa, nel tratto più a monte delle potenziali aree d'innescio individuate su base morfometrica.

9.2.4 Risultati delle modellazioni delle colate di detrito

La Figura 10A mostra il risultato della simulazione effettuata con il modello MSF (Gruber et al., 2009). I valori mostrati nella mappa indicano la probabilità che una "cella" possa essere interessata dalla traiettoria di una colata di detrito. Come condizione di arresto si è utilizzato un valore minimo di $H/L = 0,19$, corrispondente a 11° (Huggel et al., 2003; Rickenmann, 1999). Nella Figura 10B i valori della mappa di Figura 10A sono stati riclassificati in 4 classi, sulla base dei quartili e della mediana della distribuzione di frequenza dei valori. Si è così ottenuta una mappa di classi di probabilità (suscettibilità) nella quale tutte le classi hanno lo stesso numero di "celle", ossia la stessa estensione areale. Nella mappa, il valore 1 rappresenta la classe con probabilità spaziale di occorrenza (suscettibilità) più bassa, e il valore 4 indica la classe con probabilità spaziale di occorrenza più elevata. I valori 2 e 3 indicano classi di probabilità intermedie, medio-bassa (2) e medio-alta (3).

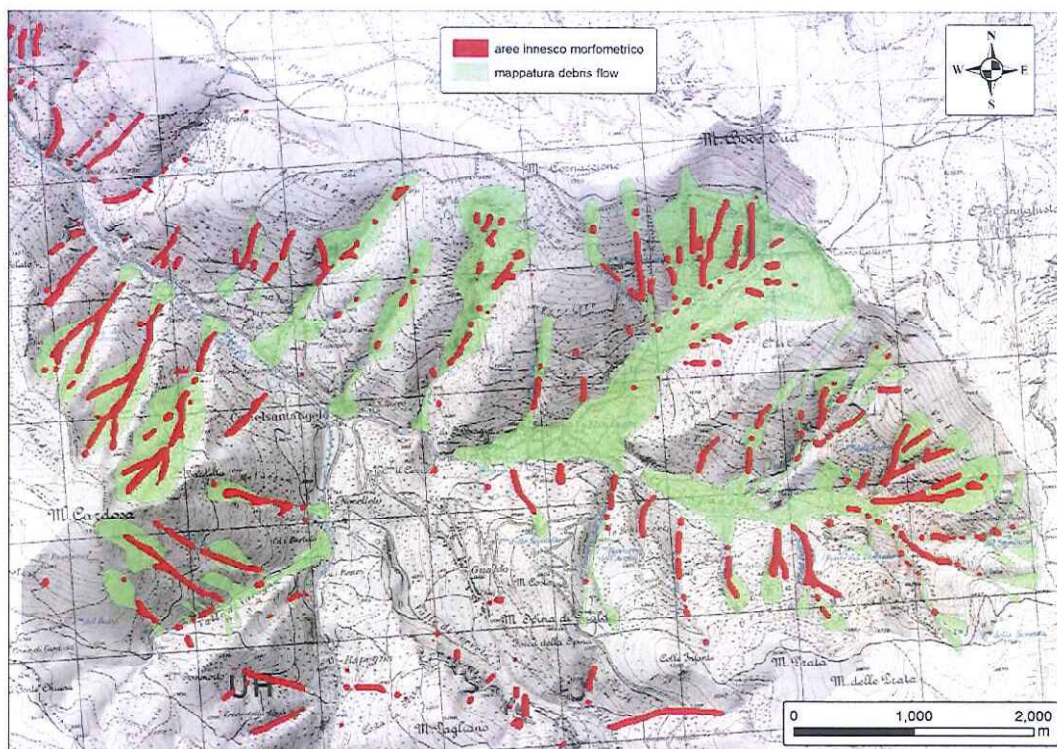


Figura 9. Mappa delle aree ad alta densità di punti d'innesco per l'area di Castelsantangelo sul Nera.

La Figura 11A mostra il risultato della simulazione effettuata con il modello “r.randomwalk” (Mergili et al., 2015). Nella mappa, i valori indicano il numero di volte in cui un “percorso casuale” (ossia, una traiettoria di colata) è transitato per ogni “cella”. Maggiore è il numero di traiettorie di colata, maggiore è la suscettibilità (probabilità spaziale) del territorio ad essere interessato da una colata di detrito. Per la simulazione sono stati utilizzati 100 “percorsi causale” generati da ogni “cella” delle aree sorgenti (per un totale di oltre 41.000 “celle”). Le simulazioni sono state eseguite assumendo un intervallo di valori per i possibili angoli di arresto compresi fra 14° e 36° . Tale intervallo è stato definito sulla base delle risultanze della calibrazione effettuata utilizzando i depositi di colata noti e mappati nell'area di studio (Figura 5). Allo scopo, sono state effettuate simulazioni assumendo valori molto bassi del rapporto H/L come criterio di arresto, e sono state calcolate le distribuzioni empiriche dei valori degli angoli di arresto ($\text{atan}(H/L)$) in corrispondenza del limite dei poligoni che rappresentano i depositi di colata noti. Da questa distribuzione sono stati estratti il 90° e il 10° percentile, utilizzati per definire il campo ammissibile dei valori dell'angolo di arresto nelle successive simulazioni Monte Carlo.

In Figura 11B i valori della mappa di Figura 11A sono stati riclassificati in 4 classi sulla base dei quartili e della mediana della distribuzione di frequenza dei valori ottenuti. Si è così prodotta una mappa di classi di probabilità (suscettibilità), nella quale ogni classe ha lo stesso numero di “celle” (ossia, la stessa estensione areale). Nella mappa, il valore 1 rappresenta la classe con probabilità spaziale di occorrenza (suscettibilità) più bassa, mentre il valore 4 individua la classe di celle a suscettibilità più elevata.

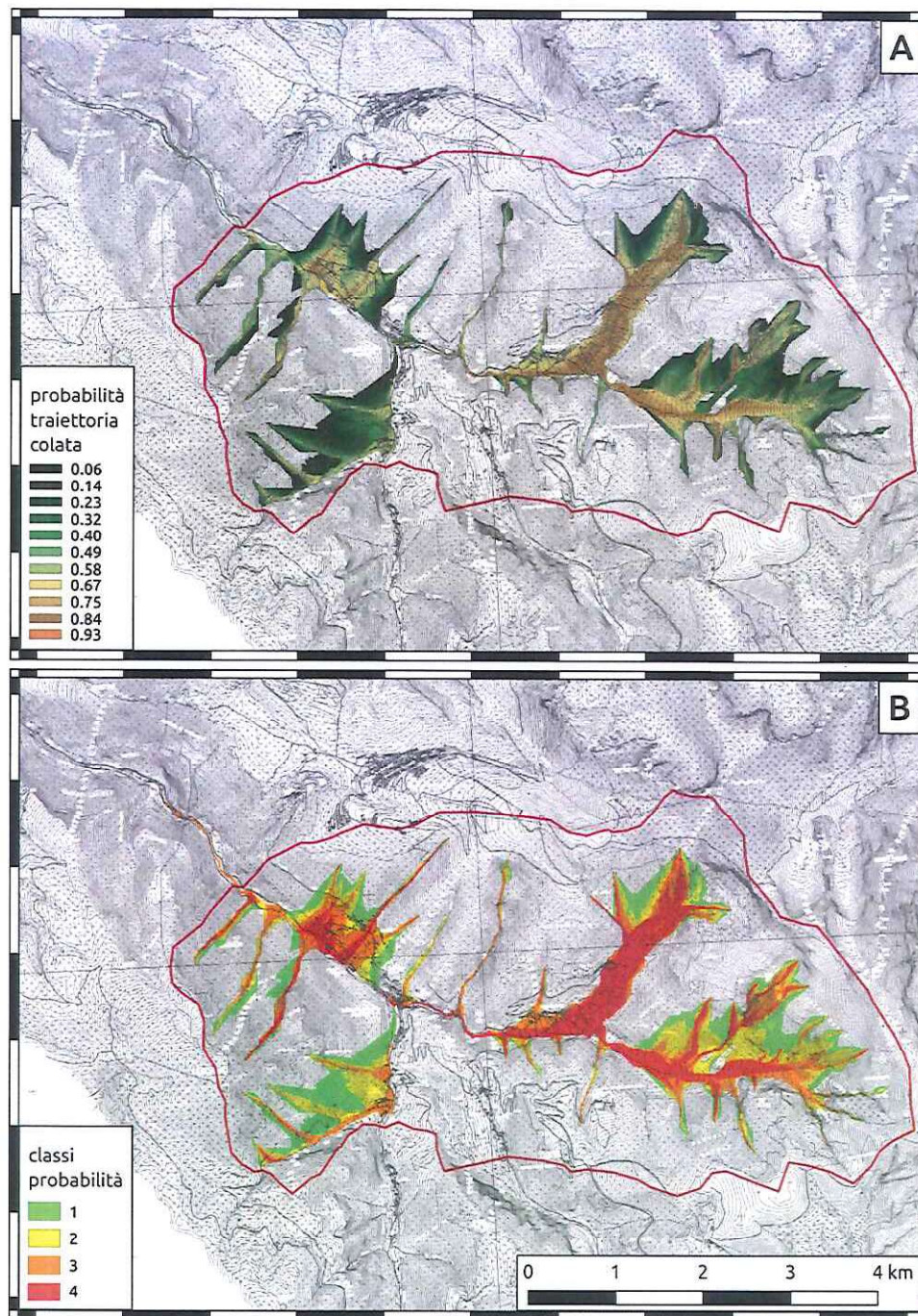


Figura 10. Simulazione delle colate di detrito con il modello "MSF" nell'area di Castelsantangelo sul Nera. (A) Probabilità che il sito sia interessato dalla traiettoria di una colata (suscettibilità alle colate di detrito). (B) Riclassificazione dei valori della mappa (A), in 4 classi.

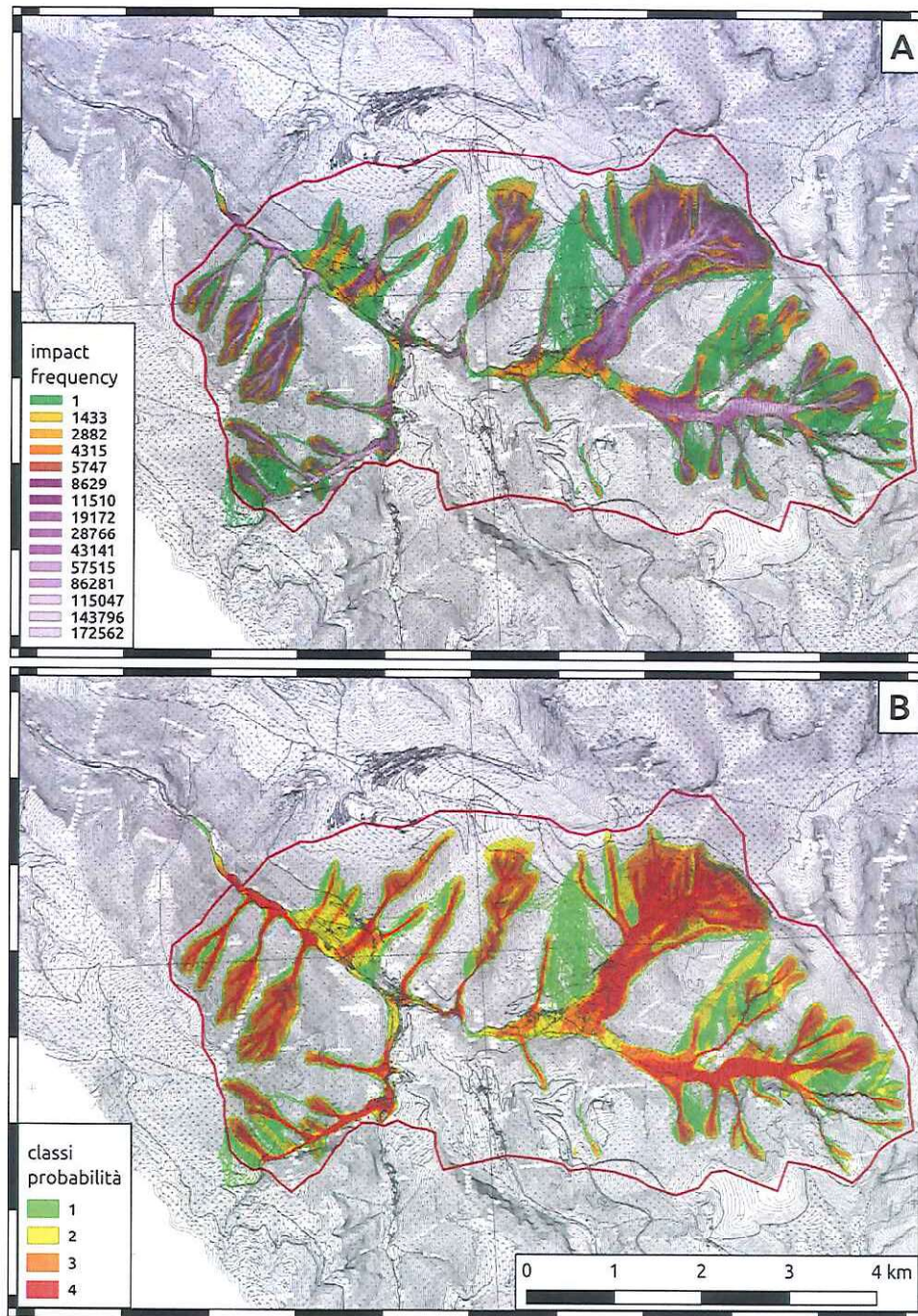


Figura 11. Simulazione delle colate di detrito con il modello "r.randomwalk" nell'area di Castelsantangelo sul Nera. (A) Numero di volte che una "cella" è stata interessata dal passaggio di una traiettoria di un "percorso casuale" (suscettibilità alle colate di detrito). (B) Riclassificazione dei valori della mappa (A), in 4 classi.

Le mappe delle classi di probabilità sono state quindi combinate, per ottenere una mappa di sintesi dei risultati ottenuti con i due diversi modelli (MSF e r.randomwalk). Allo scopo è stata prima prodotta una mappa dell'indice di probabilità combinato (Figura 12A), utilizzando il seguente criterio: $indice\ probabilità = (classi\ probabilità\ r.randomwalk) \times 10 + (classi\ probabilità\ MSF)$. La mappa di Figura 12A contiene valori compresi tra 1 e 44, che sono stati riclassificati utilizzando lo schema riportato nella Tabella 4. La mappa finale dell'indice di probabilità (suscettibilità) da colata di detrito è mostrata nella Figura 12B.

Tabella 4. Schema di riclassificazione utilizzato per definire le classi della mappa dell'indice di probabilità (Figura 12A) a partire dai valori della mappa dell'indice di probabilità (Figura 12B).

		Classe di probabilità del modello "r.randomwalk"				
		0	10	20	30	40
Classi di probabilità del modello MSF	0	00	10	20	30	40
	1	01	11	21	31	41
	2	02	12	22	23	24
	3	03	13	32	33	34
	4	04	14	42	43	44

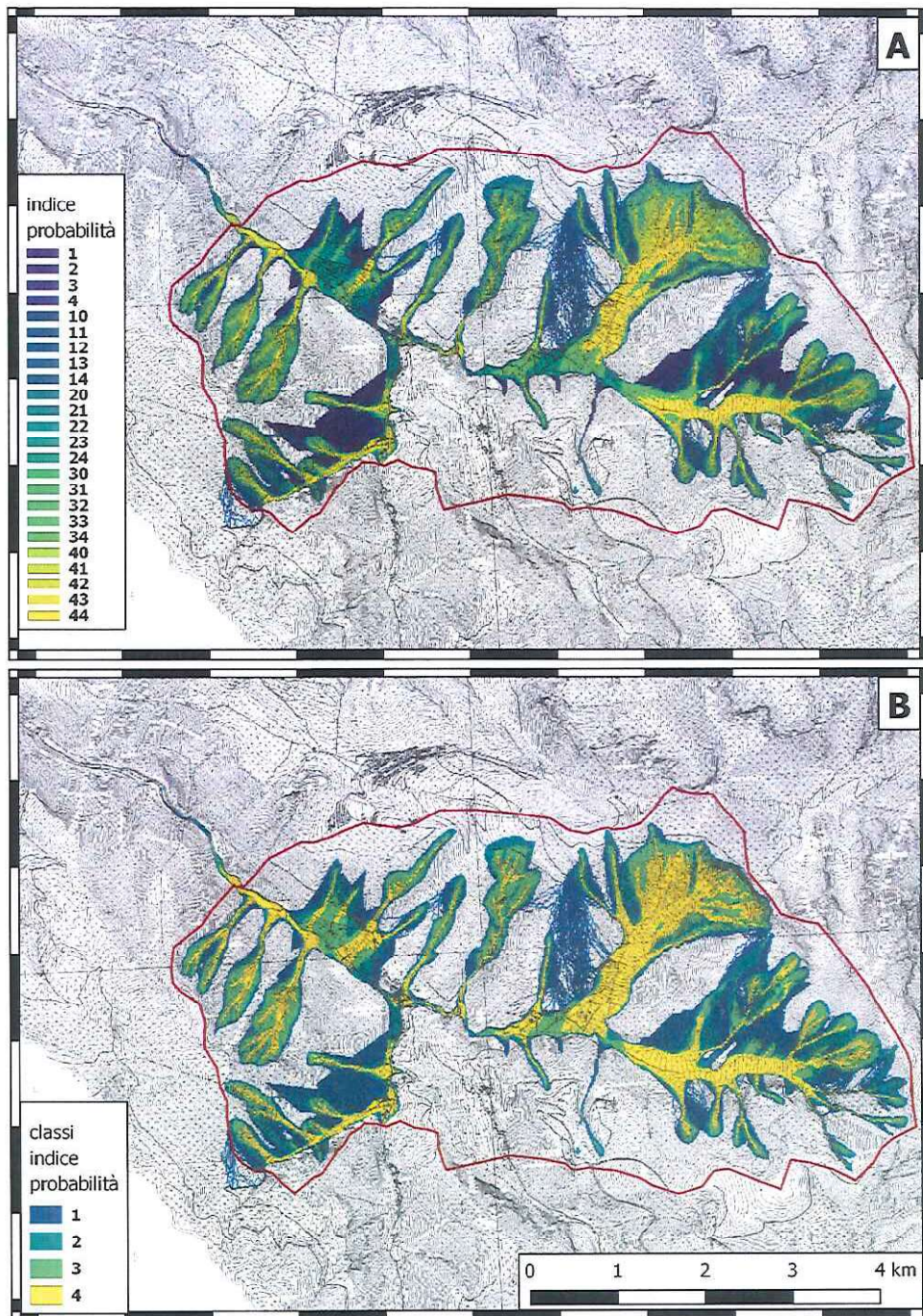


Figura 12. (A) Indice delle classi di suscettibilità alle colate di detrito ottenuto combinando i risultati dei modelli MSF (Figura 10) e r.randomwalk (Figura 11). (B) Riclassificazione della mappa mostrata in (A) sulla base dello schema dato nella Tabella 4.

9.3 Scenari evolutivi delle frane di scivolamento

Per l'area di studio, si è provveduto a definire i possibili **scenari evolutivi** delle frane di scivolamento individuate attraverso l'interpretazione visiva delle fotografie aeree stereoscopiche. Per lo scopo, si è utilizzata la procedura proposta da Cardinali et al. (2002) e da Reichenbach et al. (2004), precedentemente applicata a 79 centri abitati in Umbria.

La procedura prevede l'individuazione del possibile scenario evolutivo del dissesto (o "area di pericolosità da frana"), ossia la stima della possibile distanza di propagazione, di retrogressione e di espansione laterale, del singolo movimento franoso, o di gruppi di frane simili per tipologia ed intensità, in caso di una loro ri-mobilizzazione parziale o totale, o dell'occorrenza di nuove frane.

Lo scenario evolutivo definisce quindi l'area di possibile (o probabile) espansione dei movimenti franosi esistenti, o dell'occorrenza di nuove frane in base all'intensità e alla tipologia del movimento, alla morfologia del versante, ed alle condizioni litologiche locali. Gli scenari evolutivi delle frane sono definiti su base geomorfologica, valutando in modo euristico la possibile tendenza evolutiva dei movimenti franosi presenti nell'area oggetto di studio, e comprendono sia l'area attualmente riconosciuta in frana, sia le zone di possibile influenza, diretta od indiretta, della frana stessa.

In Figura 13 sono rappresentati gli scenari evolutivi delle frane di scivolamento per l'area di Castelsantangelo sul Nera.

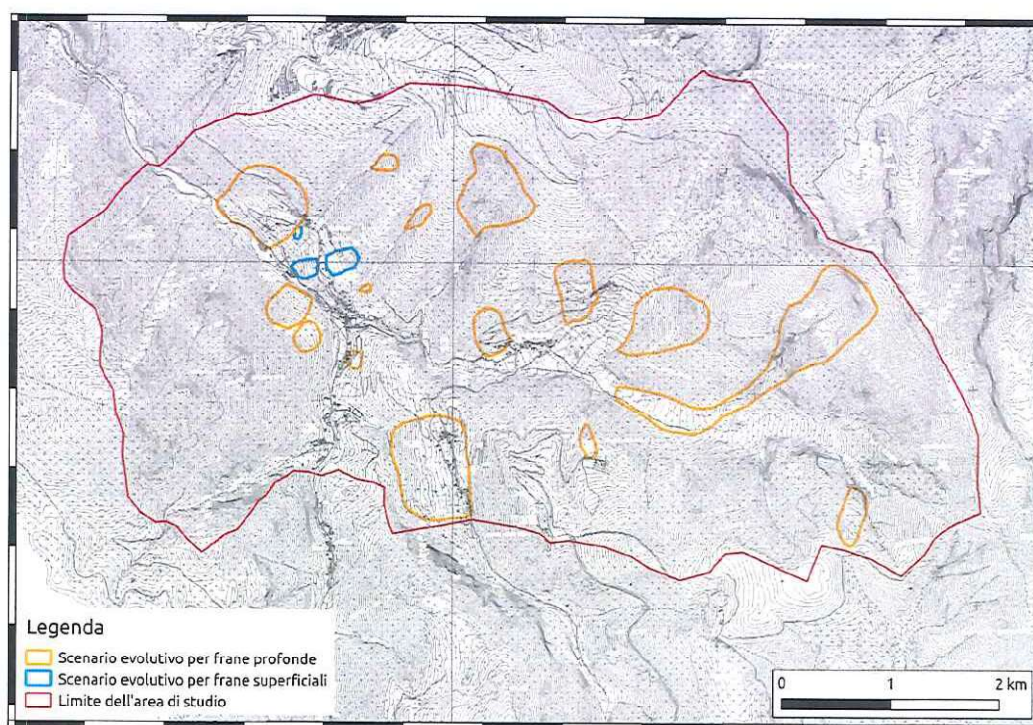


Figura 13. Scenari evolutivi delle frane di scivolamento per l'area di Castelsantangelo sul Nera.

10 Applicazione

In questa sezione sono riassunti i risultati dell'applicazione della procedura descritta nelle sezioni precedenti alle aree di studio nel Comune di Castelsantangelo sul Nera (Figura 1).

10.1 Il capoluogo

Il capoluogo di Castelsantangelo sul Nera si sviluppa prevalentemente lungo il fondovalle, alla confluenza del Torrente Rapegna con il Fiume Nera. La parte centrale dell'abitato sorge su di una conoide potenzialmente soggetta al transito di colate di detrito provenienti dal Fosso di S. Angelo (Figura 14). La parte NO dell'abitato, posta all'interno delle Mura Castellane, si estende lungo un versante che non risulta interessato né da movimenti franosi (Figura 14) né da quanto previsto dalla modellistica (Figura 15).

Le parti dell'abitato poste ad E e ad O, lungo la valle del Fiume Nera, sono interessate dal potenziale transito di colate di detrito, previste dalla modellistica (Figura 15). La parte dell'abitato posta a S, lungo la valle del Torrente Rapegna, è interessata dal potenziale transito di colate di detrito, previste dalla modellistica, (Figura 15) e dalla possibile evoluzione di frane di scivolamento (Figura 14). La parte centrale dell'abitato è quella più esposta (classe di esposizione 3) ai pericoli geo-idrologici (Figura 16) dovuta all'alta probabilità di transito di colate di detrito previste dalla modellistica (Figura 15) e dalla presenza di una conoide detritica documentata nella carta inventario.

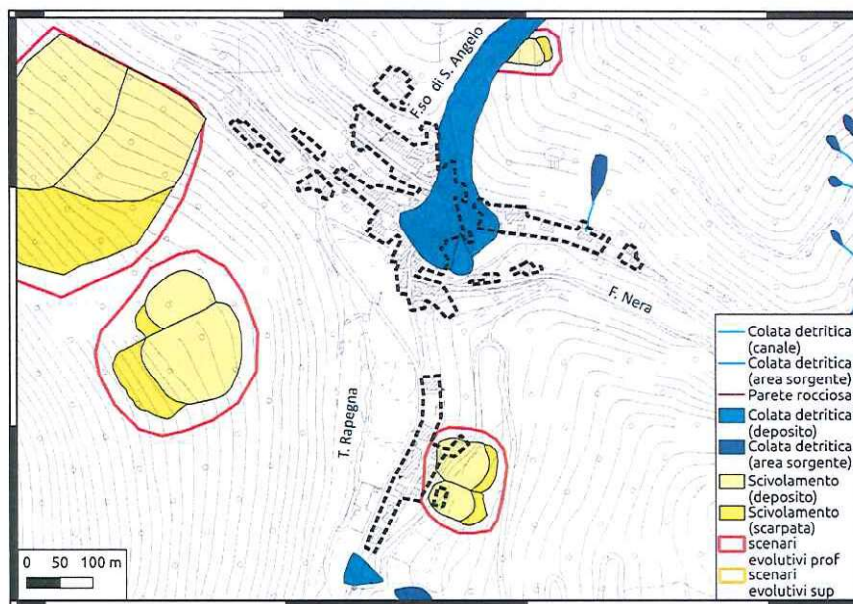


Figura 14. Capoluogo di Castelsantangelo sul Nera. Carta inventario delle frane, inclusi gli scenari evolutivi per le frane profonde e superficiali.

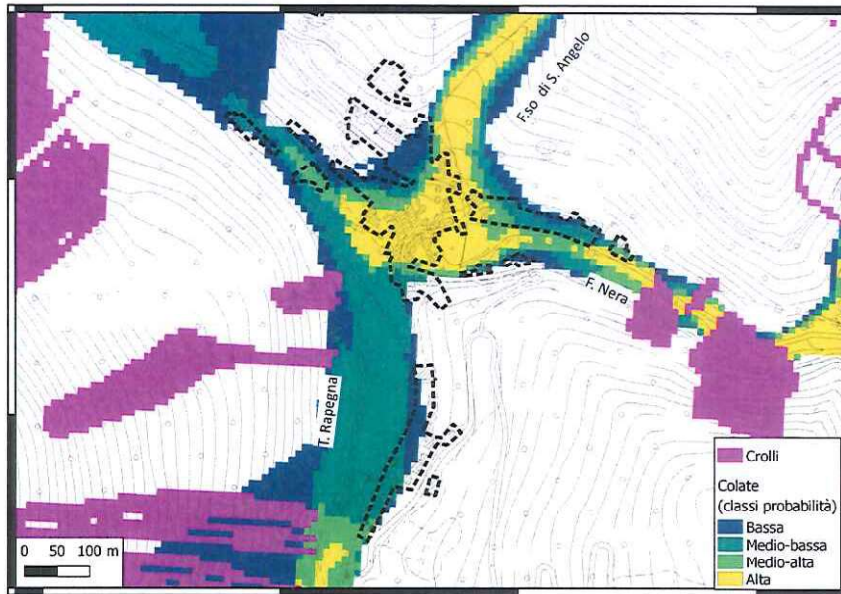


Figura 15. Capoluogo di Castelsantangelo sul Nera. Modellistica delle colate di detrito e dei crolli.

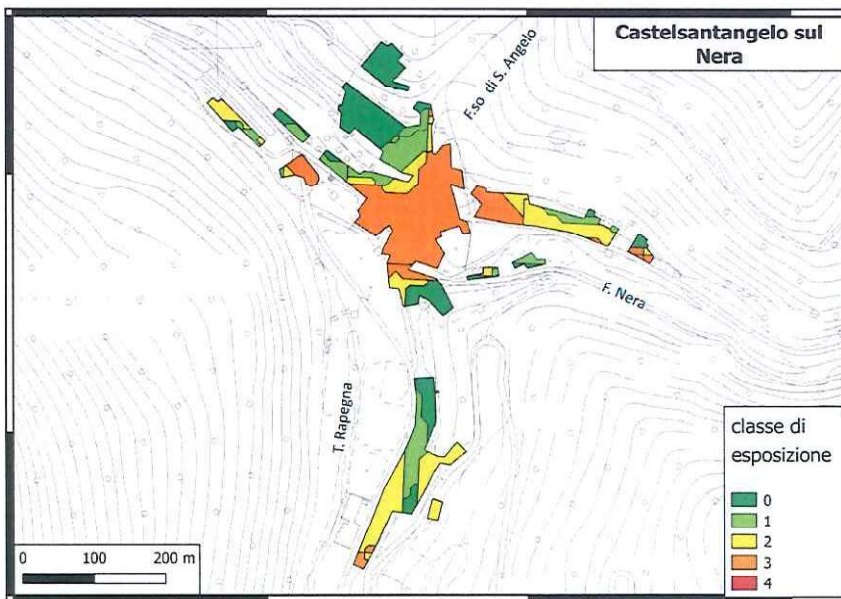


Figura 16. Capoluogo di Castelsantangelo sul Nera. Classi di esposizione dell'edificato ai pericoli geo-idrologici.

10.2 La frazione di Noccelto

L'abitato di Noccelto si sviluppa prevalentemente in un'area di fondovalle, alla confluenza del Torrente Varogna con il Torrente Rapegna.

La parte dell'abitato posta in sinistra idrografica del Torrente Rapegna sorge su due conoidi potenzialmente soggetti al transito di colate di detrito provenienti rispettivamente dal Torrente Varogna (SO) e da un corso d'acqua minore (O) (Figura 17).

La parte dell'abitato posta in destra idrografica del Torrente Rapegna si estende lungo un versante che non risulta interessato da movimenti franosi. La parte dell'abitato posto nella zona di fondovalle è interessata dal potenziale transito di colate di detrito, previste dalla modellistica (Figura 18).

Le zone occidentale e centrale dell'abitato sono le più esposte (classe di esposizione 3) ai pericoli geo-idrologici (Figura 19), a causa della elevata probabilità di transito di colate di detrito, previste dalla modellistica e documentate nella carta inventario.

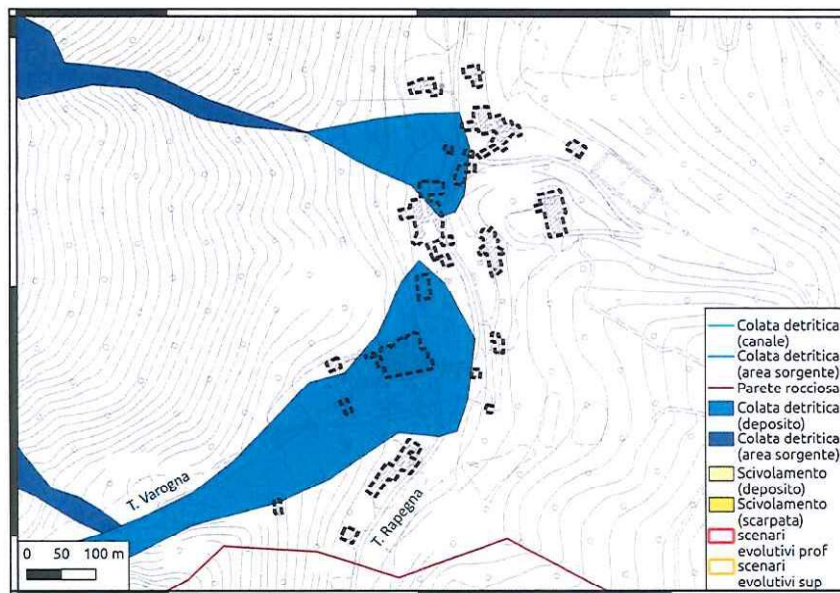


Figura 17. Abitato di Noccelto. Carta inventario delle frane, inclusi gli scenari evolutivi per le frane profonde e superficiali.

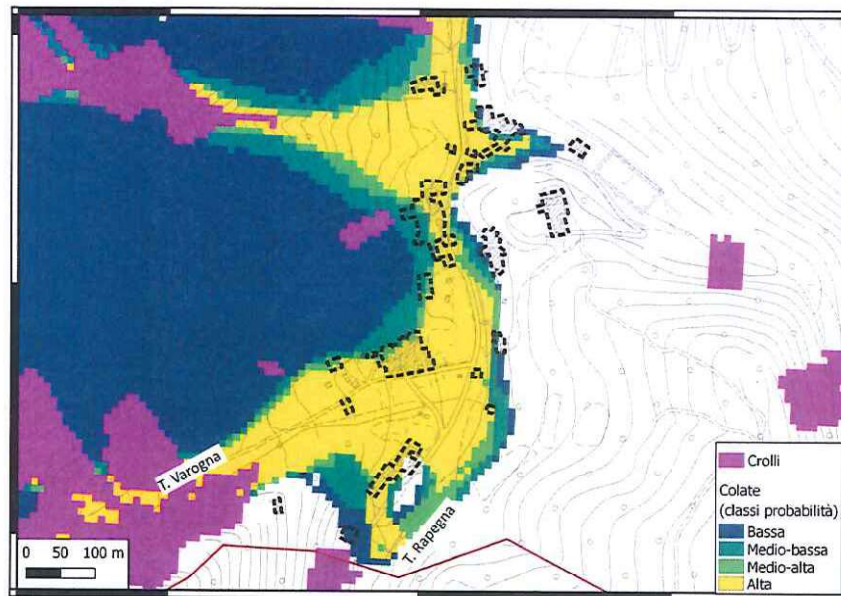


Figura 18. Abitato di Noccello. Modellistica delle colate di detritico e dei crolli.

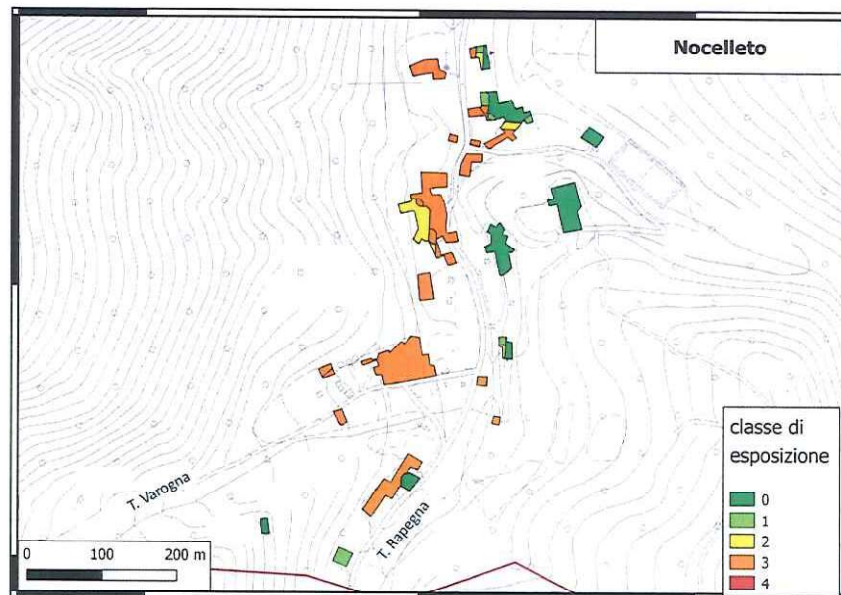


Figura 19. Abitato di Noccello. Classi di esposizione dell'edificato ai pericoli geo-idrologici.

10.3 La frazione di Nocria

L'abitato di Nocria si sviluppa a mezza costa, lungo un versante in destra idrografica del fiume Nera, in corrispondenza dell'incisione valliva del Fosso delle Brece.

La porzione dell'abitato ubicata in sinistra idrografica del Fosso delle Brece sorge su di una conoide potenzialmente soggetta al transito di colate di detrito provenienti dal Rio Falcone (ENE), e interferisce parzialmente con un deposito derivante dall'accumulo di colate di detrito provenienti dal Fosso delle Brece (NE) (Figura 20). La parte dell'abitato posta in destra idrografica del Fosso delle Brece si estende lungo un versante interessato da estese frane di scivolamento, che includono 2/3 dell'abitato (Figura 20). L'area è parzialmente esposta al potenziale transito di colate di detrito, previste dalla modellistica (Figura 21). Il nucleo più antico di Nocria, che sorge tra il Fosso delle Brece e la scarpata di una estesa frana di scivolamento, non risulta invece interessato da movimenti franosi.

Le parti dell'abitato più esposte (classe di esposizione 3) ai pericoli geo-idrologici (Figura 22), sono ubicate: (i) in sinistra idrografica del Fosso delle Brece, nella parte alta del versante; (ii) in destra idrografica del Fosso delle Brece, nella parte medio-bassa del versante; e (iii) nella zona di fondovalle. Nel primo caso, la classe 3 è dovuta alla alta probabilità di transito di colate di detrito, previste dalla modellistica e documentate nella carta inventario delle frane. Nel secondo caso, la classe 3 è dovuta alla coesistenza di probabilità medio-alta di transito di colate di detrito (previste dalla modellistica), e di frane di scivolamento. Nel terzo caso, la classe 3 è dovuta a probabilità alte e medio-alte di transito di colate di detrito, previste dalla modellistica.

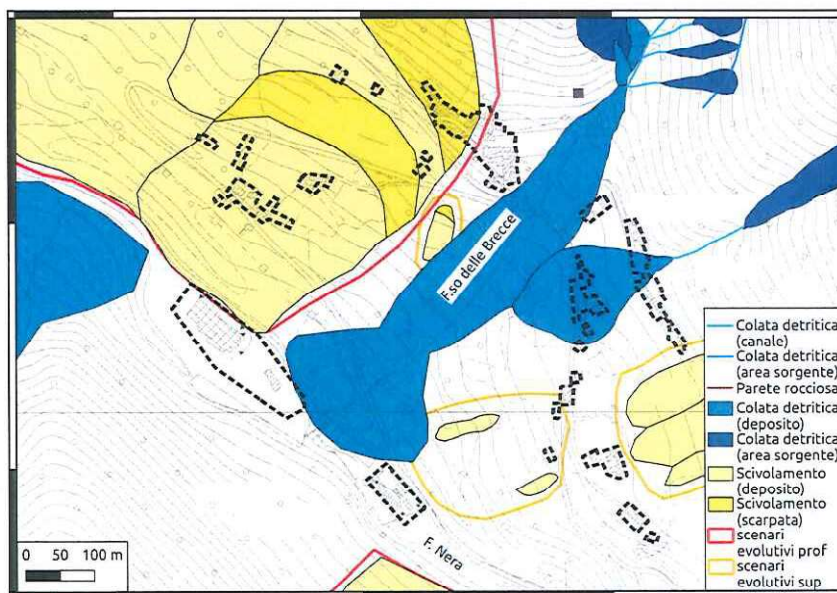


Figura 20. Abitato di Nocria. Carta inventario delle frane, inclusi gli scenari evolutivi per le frane profonde e superficiali.

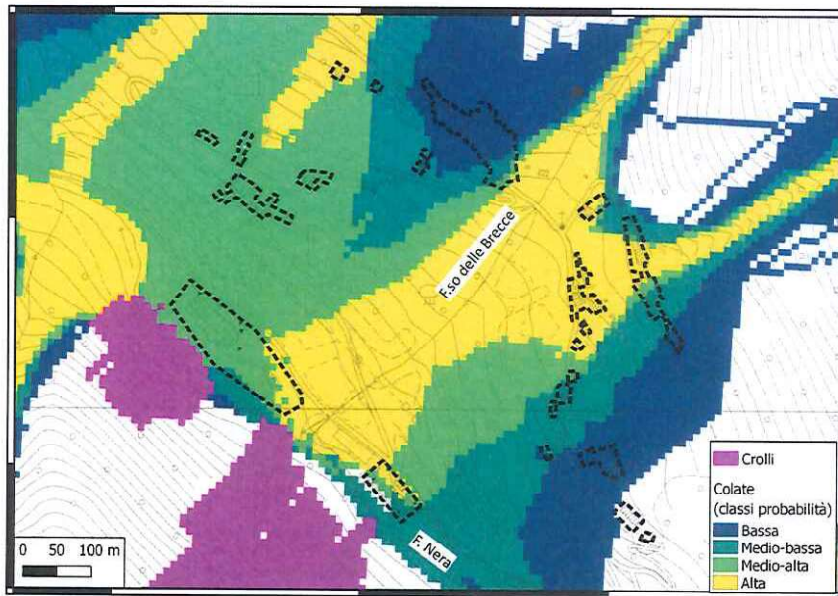


Figura 21. Abitato di Nocria. Modellistica delle colate di detrito e dei crolli.

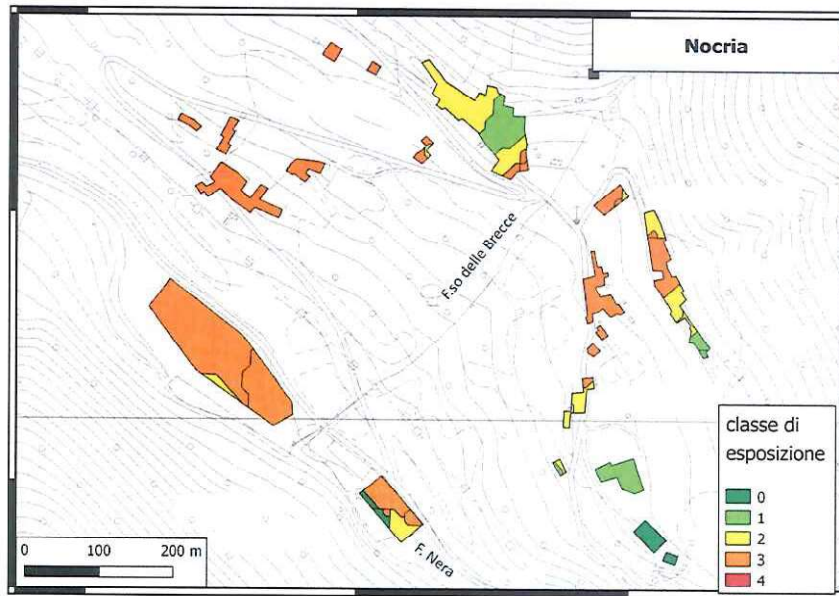


Figura 22. Abitato di Nocria. Classi di esposizione dell'edificato ai pericoli geo-idrologici.

10.4 La frazione di Gualdo

L'abitato di Gualdo si sviluppa in direzione NS, a mezza costa lungo il versante occidentale del Monte Spina di Gualdo.

Gran parte dell'abitato è localizzato in corrispondenza delle aree di scarpata di scivolamenti profondi. Fanno eccezione i due nuclei abitativi posti più a N e a S, che ricadono all'interno dello scenario evolutivo delle frane profonde (Figura 23). Gli edifici posti più a S sono interessati dal possibile transito di frane di crollo, come indicato dalla modellistica (Figura 24).

Oltre il 90% degli edifici di Gualdo ricadono nella classe di esposizione 2 (Figura 25), per la presenza di scenari evolutivi di frane di scivolamento profonde. Due porzioni limitate a S dell'abitato ricadono nella classe di esposizione 3, per la probabilità di transito di frane di crollo.

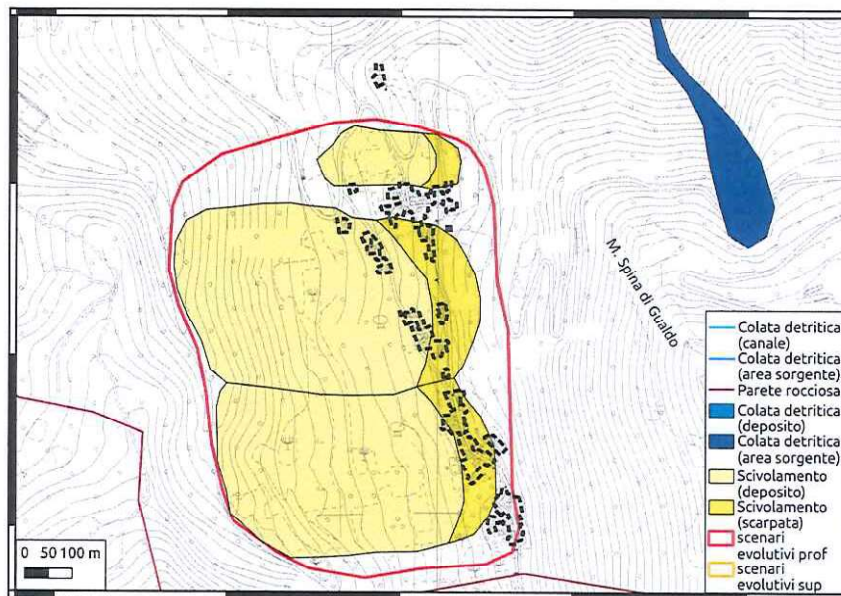


Figura 23. Abitato di Gualdo. Carta inventario delle frane, inclusi gli scenari evolutivi per le frane profonde e superficiali.

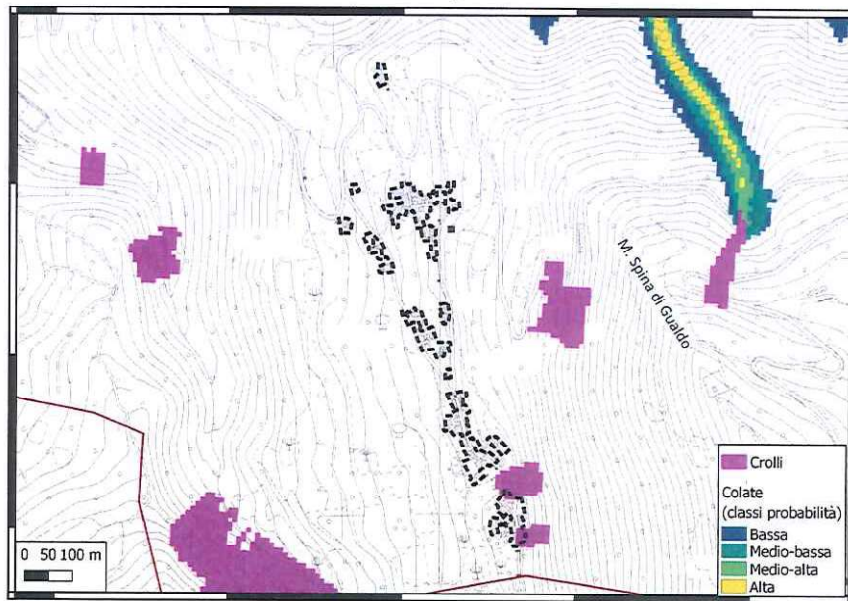


Figura 24. Abitato di Gualdo. Modellistica delle colate di detritico e dei crolli.

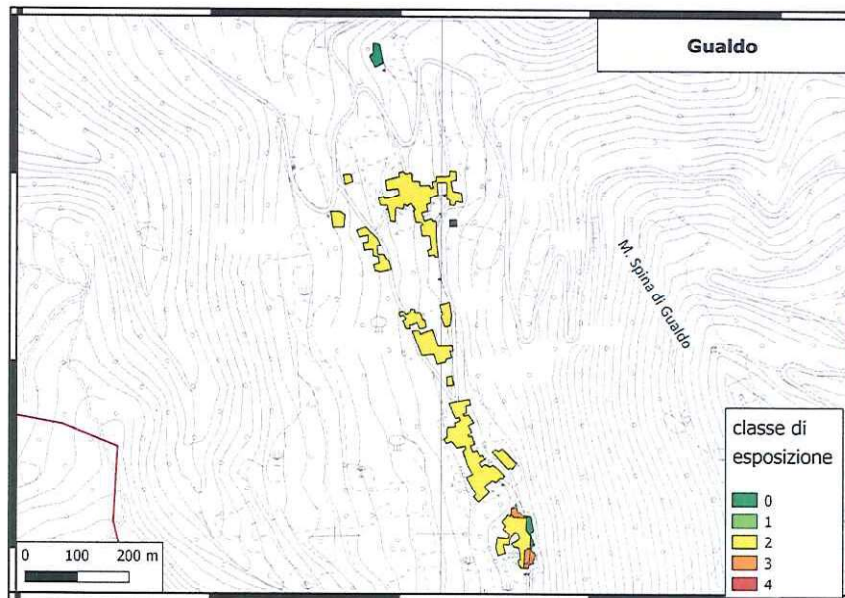


Figura 25. Abitato di Gualdo. Classi di esposizione dell'edificato ai pericoli geo-idrologici.

10.5 La frazione di Macchie

L'abitato di Macchie si sviluppa prevalentemente sul fondovalle, addossato alla base del versante.

La parte orientale dell'abitato sorge sulla zona marginale di una conoide (Figura 26), ed è potenzialmente soggetta al transito di colate di detrito (Figura 14) alimentate dalle numerose aree sorgenti poste a monte, e principalmente a NE dell'abitato. La parte occidentale dell'abitato insiste parzialmente sul deposito di una frana di scivolamento, il cui scenario evolutivo coinvolge un numero pressoché doppio di edifici (Figura 26). La parte centrale dell'abitato non interferisce con movimenti franosi mappati o modellati (Figure 26 e 27).

La Figura 28 evidenzia come le parti dell'abitato più esposte (classe di esposizione 3) ai pericoli geo-idrologici, sono ubicate (i) nella parte orientale, e (ii) nella parte occidentale del paese. Nel primo caso, la classe 3 è dovuta alla alta probabilità di transito di colate di detrito, previste dalla modellistica e documentate nella carta inventario delle frane. Nel secondo caso, la classe 3 è dovuta alla coesistenza di crolli (predetti dalla modellistica), di una frana di scivolamento, e del suo potenziale scenario evolutivo.

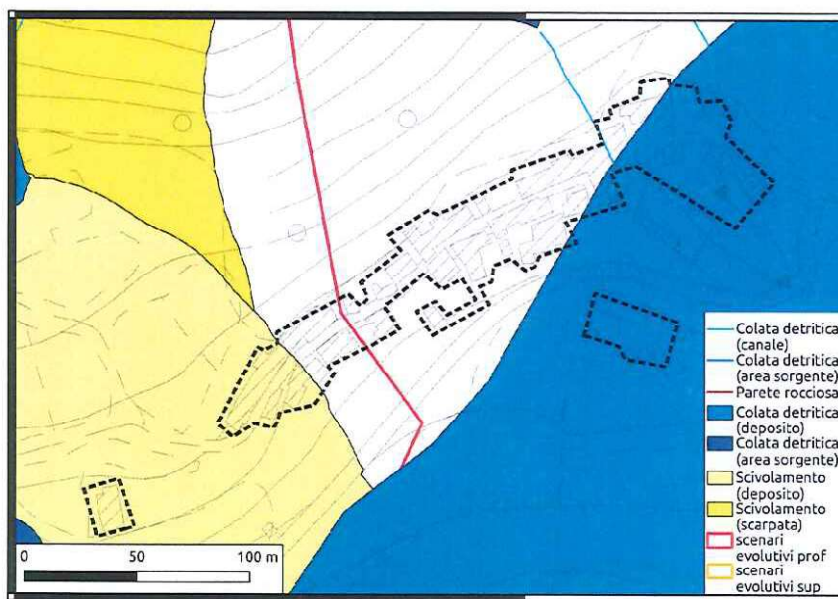


Figura 26. Abitato di Macchie. Carta inventario delle frane, inclusi gli scenari evolutivi per le frane profonde e superficiali.

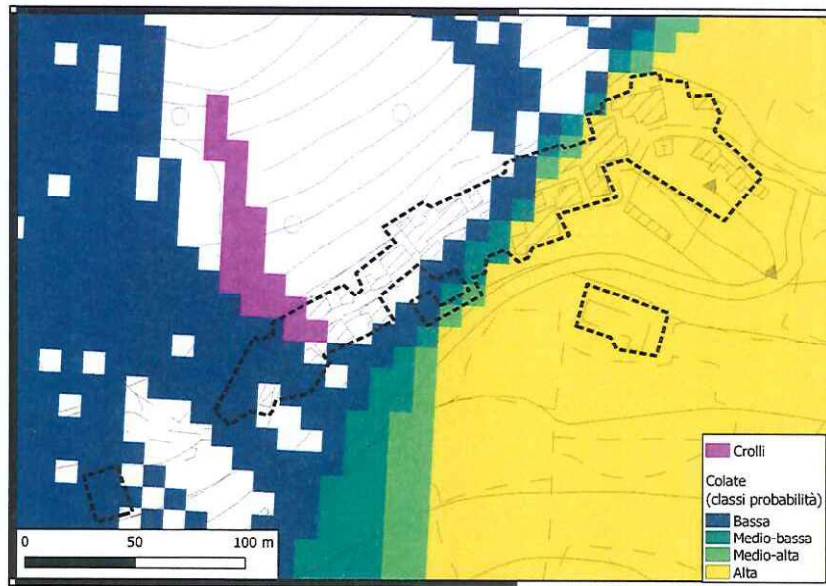


Figura 27. Abitato di Macchie. Modellistica delle colate di detritico e dei crolli.

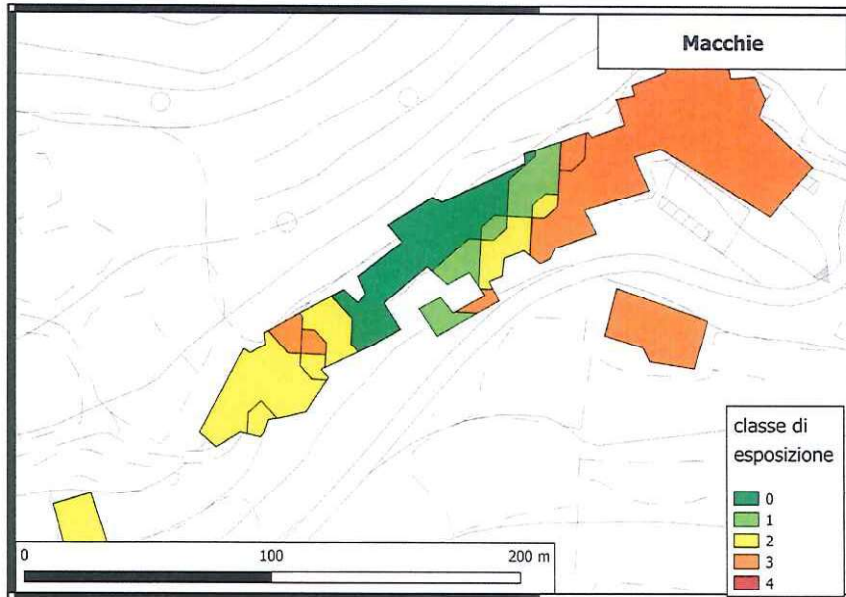


Figura 28. Abitato di Macchie. Classi di esposizione dell'edificato ai pericoli geo-idrologici.

10.6 La frazione di Vallinfante

L'abitato di Vallinfante si sviluppa in direzione EO, addossato alla base del versante con una forma stretta ad allungata che segue il margine settentrionale del fondovalle lungo il quale emergono le Sorgenti del Nera. La parte a NO dell'abitato si sviluppa all'interno di uno scenario evolutivo di frane profonde (Figura 29), mentre la parte centrale si sviluppa su di una conoide detritica esposta al potenziale transito di colate di detrito che provengono dal Fosso di S. Pietro, previste dalla modellistica con probabilità alta (Figura 30). La restante parte dell'abitato, posta più ad E ed a S, si estende all'interno di un deposito riconducibile all'accumulo di fenomeni di colata detritica, previsti dalla modellistica con probabilità medio-alta (Figure 28 e 29).

Oltre il 70% degli edifici di Vallinfante ricadono nella classe di esposizione 3 (Figura 31), riconducibile alla presenza di probabilità alta e medio-alta del transito di colate di detrito, previste dalla modellistica e documentate nella carta inventario delle frane. La parte a NO dell'abitato è nella classe di esposizione 2, per la presenza di scenari evolutivi per frane di scivolamento profonde.

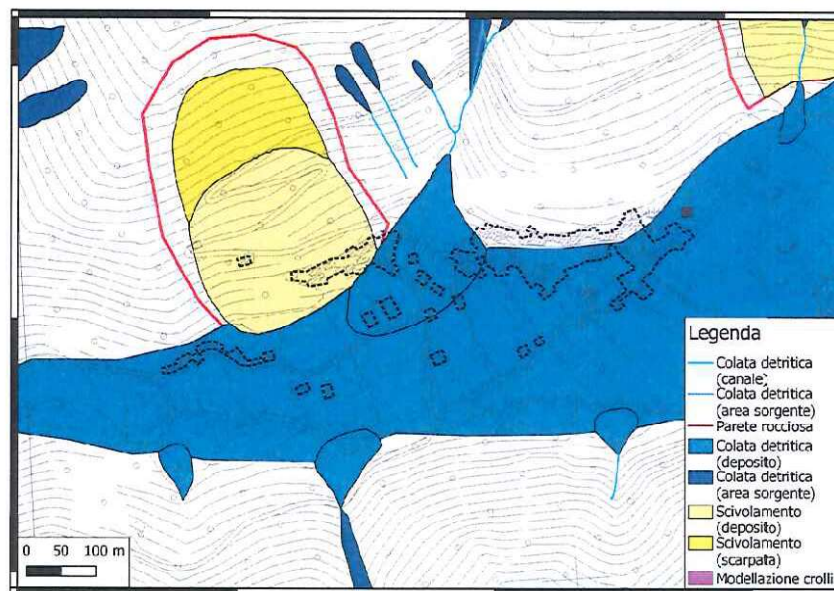


Figura 29. Abitato di Vallinfante. Carta inventario delle frane, inclusi gli scenari evolutivi per le frane profonde e superficiali.

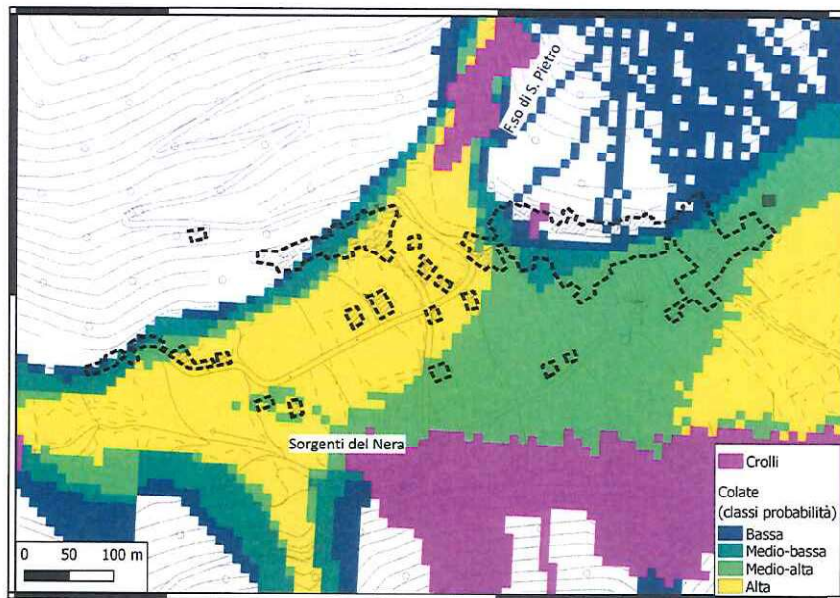


Figura 30. Abitato di Vallinfante. Modellistica delle colate di detrito e dei crolli.

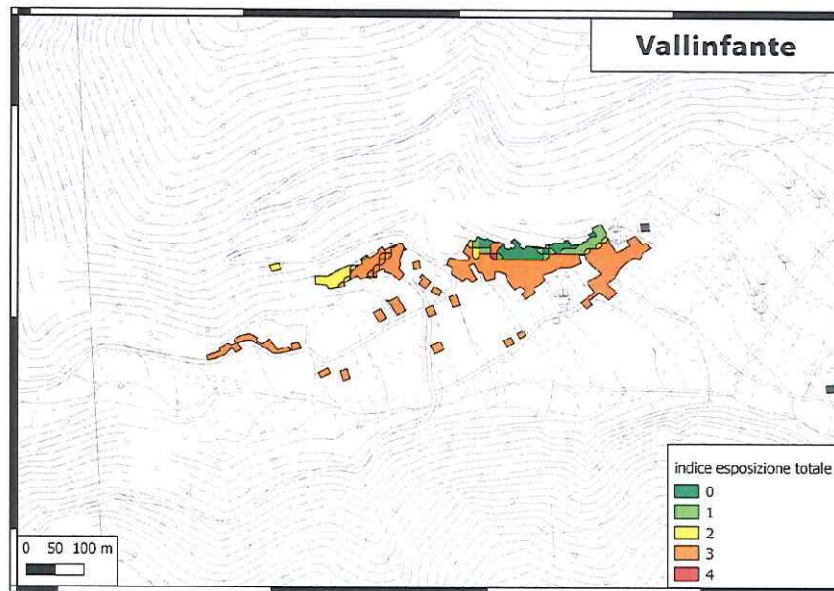


Figura 31. Abitato di Vallinfante. Classi di esposizione dell'edificato ai pericoli geo-idrologici.

10.7 Aree potenzialmente urbanizzabili

In questa sezione sono descritti i risultati dell'applicazione della procedura definita nei capitoli precedenti per l'identificazione di aree potenzialmente urbanizzabili nell'intero territorio analizzato (Figura 1). Le **aree potenzialmente urbanizzabili**, secondo i criteri descritti in § 7.2.5, si distribuiscono prevalentemente lungo le zone di fondovalle del Fiume Nera e del Torrente Rapegna, e localmente lungo i versanti in prossimità degli abitati di Nocria e di Gualdo (Figura 32).

Le aree identificate lungo i fondovalle sono generalmente più ampie, con estensione compresa tra 10.000 m² e 400.000 m², e presentano classi di esposizione potenziale da media (classe 2) ad elevata (classe 3). Le aree lungo i versanti sono di estensione generalmente più ridotta, variabile tra 2600 m² e 25.000 m², e presentano classi di esposizione potenziale da molto bassa (classe 0) ad elevata (classe 3).

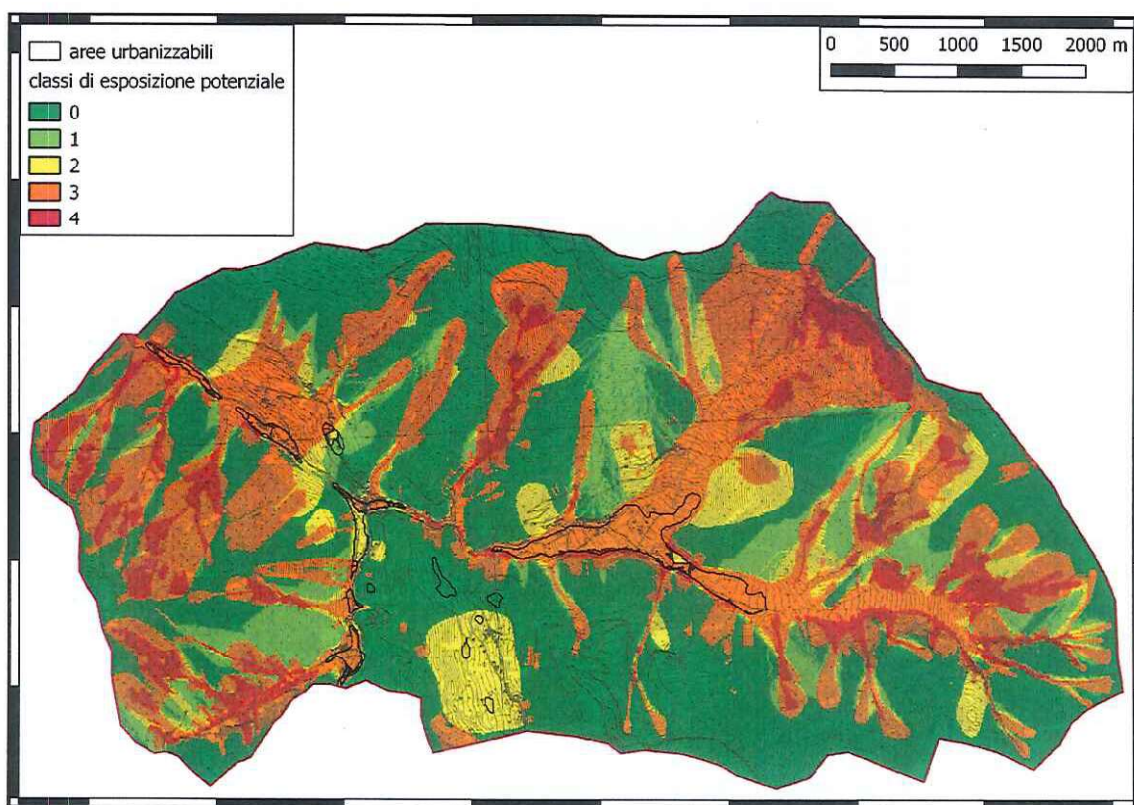


Figura 32. Classi di esposizione potenziale per gli ambiti territoriali nell'intorno di Castelsantangelo sul Nera, che presentano condizioni morfologiche confrontabili con quelle del centro abitato.

Nelle aree di fondovalle sono numerose le aree che soddisfano i criteri morfometrici e dimensionali considerati (cfr. § 7.2.5), ma che hanno valori di esposizione ai pericoli elevate (classe 3), principalmente a causa della probabilità alta e medio-alta di transito di colate di detrito previste dalla modellistica. Si precisa che la definizione delle classi di esposizione potenziale è relativa

esclusivamente ai pericoli geo-idrologici considerati (§ 6), e non considera i pericoli di natura idraulica fra i quali le piene e le piene improvvise (*“flash flood”*), potenzialmente rilevanti e pericolose nelle aree di fondovalle.

Tra le aree ubicate lungo i versanti, quelle che si trovano in prossimità dell’abitato di Gualdo, lungo il crinale del “Colle il Cerro”, hanno un’estensione variabile tra 3300 m² e 19.300 m², e presentano un’esposizione ai pericoli molto bassa (classe 0). Parti di queste aree sono state giudicate idonee al posizionamento di strutture abitative emergenziali (SAE).

Le aree territoriali limitrofe all’abitato di Gualdo hanno un’estensione massima di 6300 m² e presentano una esposizione ai pericoli media (classe 2), dovuta alla presenza di scenari evolutivi di frane profonde.

L’area identificata nei pressi della frazione di Nocria ha un’estensione di circa 25.000 m², con classi di esposizione potenziale elevata (classe 3), media (classe 2) e bassa (classe 1), dovute alla probabilità (suscettibilità) medio-alta, medio-bassa e bassa di transito di colate di detrito, previste dalla modellistica. L’area con esposizione potenziale bassa (classe 1) è stata valutata idonea al posizionamento di strutture abitative emergenziali (SAE).

Le aree non delimitate dai poligoni neri in Figura 32 non soddisfano almeno uno dei criteri di selezione descritti al punto § 7.2.5.

11 Dati digitali

In questa sezione sono elencati i dati territoriali utilizzati, le cartografie prodotte, e i risultati delle modellazioni effettuate nel corso dello studio. I **dati**, le **cartografie** e i **risultati** dei modelli elencati nella Tabella 5 sono parte integrante della relazione, e sono forniti in allegato in un **archivio “georeferenziato”** che contiene file in formato “raster” (“a griglia”) e in formato “vettoriale”; nel sistema di riferimento WGS84 UTM 33N (EPSG:32633). I file sono organizzati in due cartelle, denominate “raster” e “vettori”, rispettivamente per i dati “a griglia” e vettoriali.

Tabella 5. Elenco dei dati territoriali, delle cartografie, e dei risultati dei modelli. ID, identificativo univoco del file. Formato: R, raster; V, vettoriale.

ID	File	Descrizione	Formato
1	DEM.tif	DEM, realizzato da IRPI	R
2	slope_avg_k9.tif	Carta delle pendenze, derivata dal DEM con un kernel di 9×9 celle con operatore “media”	R
3	slope_sd_k9.tif	Carta delle pendenze, derivata dal DEM con un kernel di 9×9 celle con operatore “deviazione standard”	R
4	frane_pre1954.shp	Carta inventario delle frane, realizzata da IRPI	V
5	debrisflow_1997.shp	Carta inventario delle colate di detrito, realizzata da IRPI utilizzando fotografie aeree acquisite del 1997	V
6	debrisflow_pre1954.shp	Carta inventario delle sorgenti di colate di detrito, realizzata da IRPI utilizzando fotografie aeree del 1954	V
7	area_di_studio.shp	Delimitazione dell’area di studio	V
8	output_randomwalk.tif	Carta della frequenza di passaggio di traiettorie di colata ottenuta dal modello r.randomwalk	R
9	ind_randomwalk.tif	Carta dell’indice di probabilità per colate detritiche ottenuta dal modello r.randomwalk	R
10	output_MSF.tif	Carta della probabilità di passaggio di traiettorie di colata ottenuta dal modello MSF	R
11	ind_MSF.tif	Carta dell’indice di probabilità per colate detritiche, ottenuta dal modello MSF	R
12	ind_debrisflow.tif	Carta dell’indice di probabilità per le colate detritiche	R
13	classi_ind_debrisflow.tif	Carta delle classi dell’indice di probabilità per le colate detritiche	R
14	output_stone.tif	Carta del conteggio delle traiettorie di caduta massi, prodotta dal modello STONE, di IRPII	R
15	scenari_prof.shp	Carta degli scenari evolutivi per le frane profonde	V
16	scenari_sup.shp	Carta degli scenari evolutivi per le frane superficiali	V
17	indice_susc_scenari_sup.tif	Carta dell’indice di suscettibilità per frane superficiali	R
18	indice_susc_scenari_prof.tif	Carta dell’indice di suscettibilità per frane profonde	R
19	indice_susc_debrisflow.tif	Carta dell’indice di suscettibilità per colate detritiche	R
20	indice_susc_crolli.tif	Carta dell’indice di suscettibilità per crolli e cadute massi	R
21	susc_spec.tif	Carta dell’indice di suscettibilità specifica	R
22	susc_tot.tif	Carta dell’indice di suscettibilità totale	R
23	esposizione_aree_urbanizzabili.sqlite	Carta dell’esposizione delle aree potenzialmente urbanizzabili	V
24	edificato.shp	Carta dell’edificato	V
25	esposizione_edificato.sqlite	Carta dell’esposizione delle aree edificate	V

11.1 Dati in formato vettoriale

Nella Tabella 5, le carte con ID 4, 5 e 6 sono state realizzate attraverso l’interpretazione visiva di

fotografie aeree stereoscopiche (§ 8.3).

Nella carta inventario delle frane (file *frane_pre1954.shp*, ID 4 in Tabella 5), una stessa frana può essere rappresentata da più poligoni; ciò a causa della sovrapposizione parziale di frane di età relativa diversa. Per ottenere poligoni singoli (non frammentati) per le aree di corona e di deposito di ogni frana, si dovranno effettuare operazioni di “selezione” (“select”) e “dissoluzione” (“dissolve”) in ambiente GIS. Allo scopo potranno essere utilizzati i campi indicati in Tabella 6. Ad esempio, nel file *frane_pre1954.shp*, le frane di ciascuna classe di età relativa (“madre”, “figlia”) hanno un codice identificativo univoco (N_M per le frane madri, N_F per le frane figlie) associato ad un campo relativo alla tipologia (CL_M per le frane madri, CL_F per le frane figlie). Per ottenere tutte le frane “madri” con poligoni non frammentati, si potrà effettuare un’operazione di “dissoluzione” dei bordi dei poligoni utilizzando (i) l’identificativo della frana (N_M per le “frane madri”, Tabella 6), per i poligoni con identificativo diverso da “-99”, e (ii) la tipologia della frana (CL_M per le “frane madri”, Tabella 6), per i poligoni la cui tipologia non è “na”.

Tabella 6. Campi della tabella degli attributi per i poligoni rappresentati nelle carte con ID 4, 5 e 6 in Tabella 5. ID, ID in Tabella 5.

ID	Nome campo	Descrizione
4, 5, 6	N_M, N_F	Numero identificativo della frana madre (M), figlia (F)
4, 5, 6	CL_M, CL_F	Descrizione della tipologia di frana [madre (M), figlia (F)]
4, 5, 6	SHAPE_area	Area del poligono, in metri quadrati

La Tabella 7 elenca i codici utilizzati per indicare la tipologia degli elementi geomorfologici presenti nella carta inventario dei movimenti franosi (§ 8.3), ed in particolare le frane, e altri elementi, quali ad esempio terrazzi e depositi alluvionali.

Nell’archivio “georeferenziato”, le informazioni relative (i) all’esposizione delle aree urbanizzabili (ID 23 in Tabella 5) e (ii) all’esposizione dell’edificato (ID 25 in Tabella 5) sono fornite nel formato “spatialite” (*.sqlite*). La Tabella 8 elenca i campi e le descrizioni presenti nelle tabelle degli attributi delle mappe dell’esposizione delle aree urbanizzabili (ID 23) e dell’esposizione dell’edificato (ID 25).

Per la descrizione delle restanti mappe vettoriali (ID 7, 15, 16 e 24 in Tabella 5) si faccia riferimento al testo della relazione.

Tabella 7. Codici utilizzati nei campi della classificazione tipologica nelle mappe prodotte attraverso l'interpretazione di fotografie aeree (4, 5 e 6 in Tabella 5). ID, ID in Tabella 5.

ID	Elemento	Descrizione
4	Scivolamento [s]	Producono concavità e convessità della superficie topografica senza grandi disarticolazioni. Il movimento avviene lungo superfici curve o concave (scivolamenti rotazionali) o lungo superfici planari o debolmente ondulate (scivolamenti traslativi). L'estensione varia da poche decine di metri quadrati ad alcuni chilometri quadrati. Gli "scivolamento superficiali" sono indicati con "ss".
4	Area scarpata scivolamento [xs]	
4	Colata di terra [sef]	Interessano materiali prevalentemente argillosi, plastici, generalmente in pendii poco acclivi. Hanno forme strette ed allungate, caratterizzate da un canale generalmente stretto e da un accumulo che al piede è generalmente convesso.
4	Area scarpata colata di terra [xsef]	
4	Non applicabile [na]	
5	Colata di detrito [df]	Sono frequenti dove la produzione di detrito è abbondante (aree fratturate, depositi di frana, talus). Hanno forme strette ed allungate caratterizzate da un'area sorgente dove sono presenti debris slides o erosioni incanalate, da un canale generalmente stretto ed allungato e da un accumulo che al piede assume una caratteristica forma convessa. Le colate di detrito hanno aree comprese da poche decine di metri quadrati ad alcuni ettari.
6	Area sorgente di colata di detrito [xdf]	

Tabella 8. Campi della tabella degli attributi per i poligoni rappresentati nelle carte con ID 23 e 25 in Tabella 5.

Campo	Descrizione
area	Area del poligono, in metri quadrati
colate_pg_average	Media dei valori della classe di probabilità del modello r.randomwalk
colate_pd_average	Media dei valori della classe di probabilità del modello MSF
colate_average	Media dei valori della classe dell'indice di suscettibilità per colate detritiche
stone_average	Media dei valori delle 4 classi di probabilità (valori interi da 1 a 4) e delle celle con valore 0 (assenza di traiettorie) del modello STONE. Le classi da 1 a 4 sono definite utilizzando i quartili e la mediana del numero delle traiettorie per cella, in modo che ogni classe abbia la stessa estensione areale.
df_osserv_average	Media dei valori di presenza[4]/assenza[0] delle colate detritiche presenti nella carta inventario dei fenomeni franosi
lhz_sup_average	Media dei valori di presenza[3]/assenza[0] di scenari evolutivi di frane superficiali
lhz_prof_average	Media dei valori di presenza[4]/assenza[0] di scenari evolutivi di frane profonde
dem_average	Quota media nel poligono (DEM 10 × 10 m)
slope_average	Pendenza media nel poligono (DEM DEM 10 × 10 m)
indpos_average	Media dei valori dell'indice di suscettibilità specifica
indposrec_average	Media dei valori dell'indice di suscettibilità totale
espos_spec	Indice di esposizione specifica
espos_tot	Classe di esposizione totale

11.2 Dati in formato raster

Nell'archivio "georeferenziato", tutte le mappe in formato "griglia" hanno la stessa risoluzione (10 m × 10 m), e lo stesso posizionamento geografico assoluto del DEM.

Nella carta dell'indice della suscettibilità specifica (file *susc_spec.tif*, ID 21 in Tabella 5) il valore indicato in ciascuna cella è stato ottenuto come descritto nel seguito. Si è fatto in modo che: (i) l'indice di suscettibilità per frane superficiali (*indice_susc_scenari_sup.tif*) assumesse i valori 0 o 3; (ii) l'indice di suscettibilità per frane profonde (*indice_susc_scenari_prof.tif*) assumesse i valori 0 o 40; l'indice di suscettibilità per colate detritiche (*indice_susc_debrisflow.tif*) assumesse valori: 0, 100, 200, 300, o 400; e (iv) l'indice di suscettibilità per crolli e cadute massi (*indice_susc_crolli.tif*) assumesse i valori 0 o 4000. Si è proceduto quindi a sommare "cella per cella" le quattro "griglie" elencate. Si noti che i valori delle singole celle non sono necessariamente di quattro cifre, e che nella griglia sono presenti celle con valori 0, 3, 43 o 400. Tali codici, pur non essendo di quattro cifre, sono univocamente riconducibili all'effettivo indice di suscettibilità specifica (§ 7.2.4), antepoendo a tutti i valori non composti da quattro cifre tanti "0" quante sono le cifre necessarie per ottenere un codice a quattro cifre. Ad esempio: "3" indica "0003", e "43" indica "0043".

Per la descrizione delle restanti mappe vettoriali (file con Formato "R" in Tabella 5) si faccia riferimento al testo della relazione.

12 Bibliografia

- Cardinali M, Reichenbach P, Guzzetti F, Ardizzone F, Antonini G, Galli M, Cacciano M, Castellani M, Salvati P. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2, 57-72, 2002.
- Coe JA, Michael JA, Crovelli RA, Savage WZ. Preliminary Map Showing Landslide Densities, Mean Recurrence Intervals, and Exceedance Probabilities as Determined from Historic Records, Seattle, Washington, US Geological Survey Open-File Report 00-303. US Geological Survey: Reston, VA, 2000.
- Crovelli RA. Probability Models for Estimation of Number and Costs of Landslides, US Geological Survey Open File Report 00-249. US Geological Survey: Reston, VA, 2000.
- Glade T. Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zealand. *Environmental Geology*, 35(2-3), 160-174, 1998.
- Gruppo di lavoro "Indirizzi e criteri generali per la microzonazione sismica". Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Parti I e II. 2008.
- Guzzetti F. Landslide Hazard and Risk Assessment. PhD Thesis. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2005.
- Guzzetti F, Cardinali M. Debris-flow phenomena in the Central Apennines of Italy. *Terra Nova*, 3, 619-627, 1991.
- Guzzetti F, Crosta GB, Detti R, Agliardi F. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, 28, 1079-1093, 2002.
- Guzzetti F, Reichenbach P, Cardinali M, Galli M, Ardizzone F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72, 272-299, 2005.
- Guzzetti F, Reichenbach P, Ghigi S. Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, Central Italy. *Environmental Management*, 34, 191-208, 2004.
- Horton P, Jaboyedoff M, Rudaz B, Zimmermann M. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 869-885, 2013.
- Huggel C, Käab A, Haeblerli W, Krummenacher B. Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 647-662. 2003.
- Mergili M, Krenn J, Chu H-J. r.randomwalk v1, a multi-functional conceptual tool for mass movement routing. *Geoscientific Model Development*, 8, 4027-4043, 2015.
- Portale cartografico della Regione Marche: Carta Geologica scala 1:10.000 - <http://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Paesaggio-Territorio-Urbanistica/Cartografia/Repertorio/Cartageologicaregionale10000>
- Reichenbach P, Galli M, Cardinali M, Guzzetti F, Ardizzone F. Geomorphological Mapping to Assess Landslide Risk: Concepts, Methods and Applications in the Umbria Region of Central Italy. In: Glade et al. (eds) *9 Landslide Hazard and Risk*, John Wiley & Sons, pp. 429-468, 2004.
- Rossi M, Witt A, Guzzetti F, Malamud BD, Peruccacci S. Analysis of historical landslide time series in the Emilia-Romagna region, northern Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1123-1137, 2010.
- Tarquini S, Isola I, Favalli M, Mazzarini F, Bisson M, Pareschi MT, Boschi E. TINITALY/01: a new Triangular Irregular Network of Italy. *Annales Geophysicae* 50, 407-425, 2007.

- Tarquini S, Vinci S, Favalli M, Doumaz F, Fornaciai A, Nannipieri L. Release of a 10-m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyph-mode exploration via the web. *Computers & Geosciences*, 38, 168-170, 2012.
- UNISDR. Terminology of disaster risk reduction. *Int. Strat. Disaster Reduct.*, Geneva, Switzerland, 1-30, 2009.
- Witt A, Malamud BD, Rossi M, Guzzetti F, Peruccacci S. Temporal correlations and clustering of landslides. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1138-1156, 2010.