

Analisi di sensitività nella stima dell'erosione di suolo nelle Alpi con misure in situ e serie temporali Landsat

Martina Aiello ^(a), Renata Vezzoli ^(a), Francesco Polinelli ^(a), Federico Frassy ^(a), Francesco Rota Nodari ^(a), Maria Cristina Rulli ^(b), Giovanni Ravazzani ^(b), Chiara Corbari ^(b), Andrea Soncini ^(b), Davide Danilo Chiarelli ^(b), Corrado Passera ^(b), Daniele Bocchiola ^(b), Marco Gianinetto ^(a,*)

(a) Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, via Ponzio, 31, 20133 Milano, e-mail: marco.gianinetto@polimi.it

(b) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32, 20133 Milano

Riassunto

Questo lavoro si inserisce nell'ambito del progetto *Hydrogeological modeling for Erosion Risk Assessment from SpacE* (HERASE) finanziato da Fondazione Cariplo (Grant Nr.2016-0768) e che ha l'obiettivo di mettere a punto un modello per la stima dell'erosione dei suoli nel bacino alpino del fiume Oglio (~1800 km²). La metodologia di analisi è basata sul noto modello *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE), che stima l'erosione media annua in funzione di capacità erosiva delle precipitazioni, topografia, pedologia e copertura e uso dei suoli. In questa ricerca si propone un metodo alternativo per la stima dell'erosività della precipitazione in funzione della dinamica nivale e si rende dinamica la stima del parametro di copertura del suolo legandolo all'indice NDVI ricavato da una serie multi-temporale d'immagini Landsat (5, 7 e 8).

L'analisi di sensitività all'effetto delle variazioni inter- ed intra-annuali di precipitazione e copertura/uso del suolo rispetto alla formulazione tradizionale del modello RUSLE è stata integrata valutando due diverse formulazioni per i parametri topografico e pedologico. I risultati evidenziano che l'approccio proposto permette di identificare le aree maggiormente esposte al rischio erosione. Inoltre, descrivendo in modo più accurato la dinamica del fenomeno, è potenzialmente in grado di restituirne stime più precise.

Introduzione e scopo del lavoro

La *Soil Thematic Strategy* della Commissione Europea (COM (2012) 46 final) ha identificato l'erosione del suolo come uno dei principali problemi a scala Europea.

Uno studio recente del JRC (Panagos *et al.*, 2015c) mostra come l'area alpina sia caratterizzata dai tassi di erosione del suolo più elevati in Europa. Di conseguenza, un'accurata valutazione delle dinamiche spaziali e temporali dei fenomeni erosivi diventa fondamentale per la corretta gestione e pianificazione del territorio. Tuttavia, la modellistica ad oggi in uso per la stima dell'erosione nelle aree alpine è stata sviluppata per applicazioni in aree agricole a pendenza limitata. Per ovviare almeno in parte a queste limitazioni, il progetto HERASE propone una parametrizzazione alternativa del modello RUSLE (*Revised*

Universal Soil Loss Equation, Renard et al., 1997) in grado di includere la dinamica della copertura nivale e della copertura ed uso del suolo. In questo lavoro, si presenta la stima dinamica del tasso di erosione per la parte montana del bacino del fiume Oglio relativa al periodo 2003-2017, nonché la sensitività del modello ai diversi metodi di stima dei parametri di erodibilità del suolo e topografico.

Area di studio e dati

L'area di studio del progetto HERASE è il bacino del fiume Oglio chiuso a Sarnico, situato nell'area alpina e pre-alpina della Lombardia (Figura 1). L'area si estende per circa 1.800 km², ed include la Val Camonica, il gruppo montuoso delle Orobie, dell'Adamello (con l'area pertinente all'omonimo Parco Nazionale) e il gruppo dell'Ortles-Cevedale a Nord, nel Parco dello Stelvio.

La topografia presenta un dislivello di oltre 3300 metri, dai 185 [m.s.l.m.] di Sarnico ai 3538 [m.s.l.m.] dell'Adamello. Le precipitazioni medie annue sono pari a 1300 [mm a⁻¹]. I valori massimi di precipitazione liquida si verificano alla fine del periodo estivo/autunnale, mentre i minimi si raggiungono in inverno. La precipitazione nevosa è frequente da Ottobre a Maggio e la copertura nivale persiste ad elevate altitudini fino a Luglio.

Per quanto riguarda i dati territoriali usati in questo studio, si è fatto riferimento ai geoportali di Regione Lombardia (<http://www.geoportale.regione.lombardia.it/>) e della comunità montana della Valle Camonica (www.geoportale.cmvallecamonica.bs.it/). In particolare, sono stati usati i seguenti dati:

- Mappa di copertura e uso del suolo DUSAF (2000, 2007, 2015);
- Mappa litologica del terreno;
- Modello Digitale di Elevazione del terreno.

I dati meteorologici (precipitazione e temperatura) sono stati reperiti dal portale di ARPA Lombardia (<http://www.arpalombardia.it/siti/arpalombardia/meteo>). In particolare, si sono utilizzati i dati orari relativi al periodo 2003-2017 di 30 pluviometri e 28 termometri distribuiti sul territorio in esame (Figura 1).

Le immagini Landsat-5, Landsat-7 e Landsat-8 acquisite tra il 2002 e il 2017 (20) sono state utilizzate per produrre mappe di NDVI da cui derivare serie temporali del parametro di copertura ed uso del suolo. I dati satellitari sono stati pre-elaborati mediante calibrazione radiometrica e correzione atmosferica standard, tenendo in considerazione la stagione di acquisizione e le caratteristiche morfologiche dell'area.

Il modello di erosione RUSLE

Il RUSLE è un modello empirico sviluppato negli Stati Uniti ma, ad oggi, utilizzato in tutto il mondo per la stima dei tassi di erosione del suolo per effetto delle precipitazioni. Tra le caratteristiche che hanno favorito la sua diffusione vi sono la relativa facilità di reperire i dati necessari e la semplicità della sua formulazione:

$$E = R \cdot C \cdot K \cdot LS \cdot P \quad [1],$$

dove:

E rappresenta perdita di suolo annuo per unità di superficie [t/ha/yr]

R è il parametro di erosività della precipitazione [MJ mm/h/ha/yr]

C è il parametro di copertura ed uso del suolo [-]

K è il parametro di erodibilità del suolo [t ha h/ha/MJ/mm]

LS è il parametro topografico [-]

P è il parametro di pratica anti-erosiva [-]

Nel nostro studio abbiamo scelto di discretizzare l'erosività della precipitazione (parametro R) a passo mensile per valutare l'impatto della sua variabilità temporale sulla stima. La copertura ed uso del suolo (parametro C) è stata invece aggiornata con passo stagionale (estate: Marzo-Agosto, inverno: Settembre-Febbraio) per valutare l'impatto della sua dinamicità sulla stima. Infine, abbiamo trascurato il parametro di pratica anti-erosiva (parametro P), assumendolo pari all'unità. Di conseguenza, per ognuna delle otto simulazioni riassunte in Tabella 1, abbiamo simulato il tasso di erosione (E) stagionale. La Figura 2 mostra invece il tasso di erosione medio annuo relativo al periodo di simulazione 2003-2017.

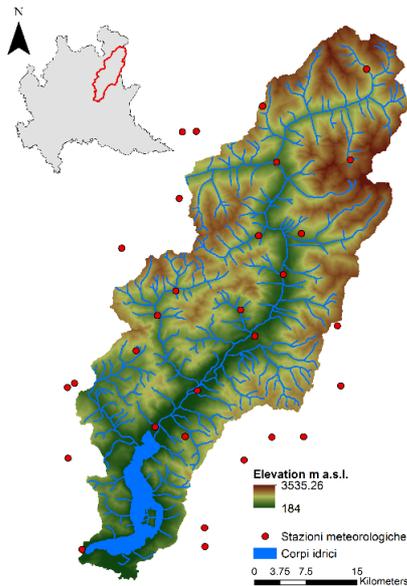


Figura 1 – Area di studio e posizione delle stazioni meteorologiche utilizzate.

Codice simulazione	R	C	K	LS
S02	R1	C0	K1	LS1
S03	R2	C0	K1	LS1
S04	R1	C0	K2	LS1
S05	R1	C0	K1	LS2
S06	R1	C1	K1	LS1
S07	R1	C2	K1	LS1
S08	R1	C3	K1	LS1
S10	R2	C3	K2	LS2

Tabella 1 – Codifica delle simulazioni e loro configurazione parametrica.

Analisi di sensitività

Sensitività alla parametrizzazione della erosività della precipitazione (R)

Nel modello RUSLE, il parametro R rappresenta la capacità dell'impatto di una goccia d'acqua di provocare distacco e spostamento di particelle di suolo. In questo studio abbiamo considerato due diverse formulazioni.

- **Formulazione R1:** questo è l'approccio tradizionale RUSLE. Per ogni pluviometro il parametro R è stato stimato a scala giornaliera con il codice di calcolo RIST (USDA, 2017). Successivamente, il dato è stato aggregato a scala mensile e spazializzato con il metodo dell'inverso della distanza al quadrato. Questo approccio tende a sovrastimare l'erosività della precipitazione in inverno poiché non discrimina tra precipitazione liquida e solida (simulazioni S02, S04, S05, S06, S07 e S08).

- **Formulazione R2:** questo approccio è basato sul modello di Sun *et al.* (2002), integrato con la stima della precipitazione liquida attiva (Corbari *et al.*, 2009) (simulazioni S03 e S10). Tale formulazione permette di tener conto della dinamica della copertura nivale nella stima del parametro R a scala mensile:

$$R = 10 \cdot \sum_{t=1}^{n_{ore}} 0.0138 \cdot i_{a,t}^2 \quad [2]$$

dove:

n_{ore} è il numero di ore del mese considerato

$i_{a,t}$ è l'intensità della precipitazione liquida attiva [mm/h].

La precipitazione liquida attiva $i_{a,t}$ è funzione della precipitazione osservata i_t , della temperatura T_t [°C] e dell'equivalente idrico nivale SWE_t [mm] indicativo della copertura nivale al suolo:

$$SWE_t = SWE_{t-1} + \begin{cases} + \min\left(\max\left(0, \frac{T_t - T_{inf}}{T_{sup} - T_{inf}}\right), 1\right) \cdot i_t, & i_t > 0, \\ - \min(\max(C(T_t - T_b), 0), SWE_{t-1}), & i_t = 0 \end{cases} \quad [3]$$

$$i_{a,t} = \begin{cases} 0, & T_t < T_{sup} \text{ o } SWE_t > 0 \\ i_t, & T_t \geq T_{sup} \text{ o } SWE_t = 0 \end{cases} \quad [4]$$

dove:

T_{inf} [°C] è la temperatura al di sotto della quale si ha solo precipitazione solida

T_{sup} [°C] è la temperatura al di sopra della quale si ha solo precipitazione liquida

T_b [°C] è la temperatura al di sopra della quale si ha fusione nivale

Per utilizzare le equazioni (2)-(4) è stato necessario spazializzare i dati di input meteorologici per tenere conto delle variazioni locali di temperatura e di copertura nivale e dei loro effetti sul parametro R. Il confronto tra le stime del parametro R con le due metodologie mette in evidenza come, mediando nello spazio e nel tempo, l'approccio R1 produca valori di R mediamente più elevati rispetto alla formulazione R2 ($\mu_{R1}=1094$ [MJ mm/h/ha/yr], $\mu_{R2}=439$ [MJ mm/h/ha/yr]), mentre la dispersione del valore mediato nel tempo è comparabile nei due approcci ($\sigma_{R1}=141$ [MJ mm/h/ha/yr], $\sigma_{R2}=163$ [MJ mm/h/ha/yr]). Ne segue che l'uso della formulazione R2 stima un tasso di erosione minore (Figura 2): il valor medio passa da 32 [t/ha/yr] (S02) a 10 [t/ha/yr] (S03) e le aree ad alto tasso di erosione ($E > 65$ [t/ha/yr]) si riducono dal 10% (S02) al 4.3% (S03), per lo più concentrate in zone a elevata quota/pendenza, quindi, maggiormente esposte a fenomeni erosivi.

Sensibilità alla parametrizzazione della copertura e uso del suolo (C)

Nel modello RUSLE il parametro C rappresenta il livello di protezione dall'erosione fornito dall'uso e copertura del suolo: valori bassi del parametro C indicano una maggiore protezione. In questo studio abbiamo considerato quattro diverse formulazioni.

- **Formulazione C0:** per ogni classe DUSAF (anno 2015) abbiamo assegnato un valore univoco di C secondo quanto proposto nella letteratura (Panagos *et al.* 2015a, Gianinetto *et al.*, 2018) (simulazioni S02, S03, S04 e S05).

- **Formulazione C1:** l'assegnazione dei valori di C è analoga al metodo C0 ma dinamica. Invece di usare la mappa DUSAF del 2015 come rappresentativa del periodo 2003-2017, si è assunta la mappa DUSAF del 2000 come

rappresentativa per il periodo 2003-2006, quella del 2007 per il periodo 2007-2014 e quella del 2015 per il periodo 2005-2017 (simulazione S06).

- **Formulazione C2:** per la stima dei valori di C abbiamo usato la serie temporale Landsat e la relazione esponenziale con l'NDVI proposta per l'Italia da Van der Knijff *et al.* (2000). Questa parametrizzazione tende a sovrastimare C (Gianinetto *et al.*, 2018), quindi a sottostimare la protezione offerta dalla vegetazione, soprattutto nel periodo invernale (simulazione S07).

- **Formulazione C3:** in questo caso abbiamo integrato le mappe DUSAF con la serie temporale Landsat (simulazioni S08 e S10). Analogamente alla formulazione C1, per ogni classe DUSAF abbiamo definito dei valori di riferimento del parametro C (Panagos *et al.*, 2015a, Gianinetto *et al.*, 2018). In questo caso, però, non abbiamo definito una corrispondenza univoca ma un intervallo di valori ammissibili. Successivamente, abbiamo determinato il valore del parametro C per ciascun pixel immagine mediante linearizzazione nel seguente modo:

$$C = \begin{cases} NDVI_{min} = \mu_{NDVI} - \sigma_{NDVI} \\ NDVI_{max} = \mu_{NDVI} + \sigma_{NDVI} \\ C_{max}, NDVI < NDVI_{min} \\ C_{min}, NDVI > NDVI_{max} \\ C_{max} + \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} (C_{min} - C_{max}), NDVI_{min} \leq NDVI \leq NDVI_{max} \end{cases} \quad [5]$$

L'utilizzo dei medesimi valori soglia per immagini estive ed invernali garantisce la coerenza, nello spazio e nel tempo, delle stime stagionali del parametro C. Inoltre, la scelta di vincolare i valori estremi del parametro C con valori di letteratura permette di limitare l'effetto di sovrastima osservata nel metodo C2.

La disponibilità di immagini satellitari invernali ed estive permette alle formulazioni C2 e C3 di descrivere sia le variazioni stagionali che quelle inter-annuali del parametro C. In tali formulazioni, le porzioni di territorio non appartenenti ad una delle classi di copertura vegetate del DUSAF sono state mascherate e il parametro C è stato posto pari a 0.

Le parametrizzazioni C0 e C1 mostrano valori molto simili ($\mu_{C0}=0.039$; $\mu_{C1}=0.042$; $\sigma_{C0}=\sigma_{C1}=0.075$; $max_{C0}=max_{C1}=0.345$). Tale similitudine si ritrova anche nei tassi di erosione simulati S02 e S06, rispettivamente 32 [t/ha/yr] e 33 [t/ha/yr] (deviazione standard pari a 119 [t/ha/yr] e 121 [t/ha/yr]). In entrambi i casi, circa il 10% dell'area di studio viene segnalata come caratterizzata da alta erosione (Figura 2).

La parametrizzazione C2 restituisce invece valori mediamente più elevati rispetto ai casi precedenti ($\mu_{C2}=0.092$; $\sigma_{C2}=1.0$). Ciò è probabilmente da imputare all'assenza di un estremo superiore per la relazione esponenziale applicata. Anche il tasso di erosione simulato risulta mediamente più elevato ($\mu_{S07}=85$ [t/ha/yr]; $\sigma_{S07}=226$ [t/ha/yr]) e una porzione maggiore dell'area di studio (24%) è classificata ad alta erosione (Figura 2).

La parametrizzazione C3 produce valori congruenti con le casistiche C0 e C1 ($\mu_{C3}=0.039$; $\sigma_{C3}=0.078$). La simulazione S08 si discosta poco in termini di statistiche aggregate dalla simulazione S02 ($\mu_{S08}=36.8$ [t/ha/yr]; percentuale di aree ad elevata erosione: 10.9%), pur presentando una maggiore variabilità geografica ($\sigma_{S08}=141$ [t/ha/yr]) (Figura (2)).

Sensitività alla parametrizzazione della erodibilità del suolo (K)

Nel modello RUSLE, il parametro K rappresenta la vulnerabilità del suolo all'erosione. La sua determinazione utilizzando la formulazione proposta in Renard *et al.* (1997) richiede la conoscenza della frazione di sostanza organica, della curva granulometrica, della tessitura e della classe di permeabilità del suolo. Poiché solo alcune di queste informazioni erano disponibili per l'area di studio, il parametro K è stato stimato con due metodi alternativi.

- **Formulazione K1:** il parametro K è stato ricavato dalla mappa prodotta dal JRC (Panagos *et al.*, 2014) basata sulla formulazione proposta in Renard *et al.* (1997), ricampionando l'originale griglia di 100m ad una risoluzione spaziale di 30m (simulazioni S02, S03, S05, S06, S07 e S08).

- **Formulazione K2:** il parametro K è stato stimato sulla base della tessitura e del contenuto di sostanza organica nel suolo (Fantappiè *et al.*, 2015) ricavati dalla mappa pedologica di Regione Lombardia, previa verifica dell'accordo con i valori calcolati a partire dalle analisi di laboratorio di 27 campioni di suolo (Panagos *et al.*, 2014) prelevati in siti significativi dell'area di studio (simulazioni S04 e S10).

La parametrizzazione K1 presenta una maggior variabilità spaziale rispetto a quella K2. Tuttavia, tale variabilità sembra non influenzare le statistiche del parametro K (i valori sono in [t ha h/ha/MJ/mm]): valore medio ($\mu_{K1}=0.0228$, $\mu_{K2}=0.0236$), deviazione standard ($\sigma_{K1}=0.0097$, $\sigma_{K2}=0.0112$) e i valori massimi ($max_{K1}=0.0481$, $max_{K2}=0.0487$) sono molto simili. Ciononostante, la simulazione S04 restituisce una stima del tasso di erosione (23 [t/ha/yr]) inferiore rispetto alla simulazione S02 (32 [t/ha/yr]), mentre la percentuale di aree ad alta erosione rimane quasi invariata (rispettivamente il 9% e il 10%) (Figura 2).

Sensitività alla stima del parametro topografico (LS)

In letteratura esistono diverse formulazioni analitiche del parametro topografico LS. In questo studio abbiamo considerato due diverse alternative.

- **Formulazione LS1:** il parametro LS è stato ricavato con l'equazione di Mitasova *et al.* (1996), una delle formulazioni maggiormente implementate nei GIS. Questa relazione utilizza l'area contribuente unitaria in ingresso alla cella (simulazioni S02, S03, S04, S06, S07 e S08).

- **Formulazione LS2:** il parametro LS è stato ricavato con l'equazione di Desmet e Govers (1996). Questa è la relazione usata dal JRC per la stima scala europea (Panagos *et al.*, 2015b) (simulazioni S05 e S10).

Le variazioni della stima LS1 sono fortemente influenzate dalle variazioni locali della topografia mentre la stima LS2, pur rimanendo coerente con la topografia, presenta una minor variabilità locale. Un analogo comportamento si osserva nella distribuzione dei tassi di erosione. Le parametrizzazioni LS1 e LS2 differiscono in termini di valor medio ($\mu_{LS1}=29.6$; $\mu_{LS2}=13.0$) e deviazione standard ($\sigma_{LS1}=38.7$; $\mu\sigma_{LS2}=15.0$). Queste differenze si riflettono nella stima dei tassi di erosione. Prendendo come riferimento la simulazione S05, con la parametrizzazione LS2 otteniamo un tasso medio di erosione pari a 14 [t/ha/yr] (deviazione standard pari a 41 [t/ha/yr]), valore che sale a 32 [t/ha/yr] (deviazione standard pari a 119 [t/ha/yr]) per la parametrizzazione LS1 (simulazione S02). Poiché le stime del parametro LS2 sono mediamente inferiori alle stime del parametro LS1, anche l'area stimata come fortemente

erodibile si riduce al 7% rispetto al 10% della simulazione S02. Tuttavia la distribuzione spaziale di tali aree è coerente nelle due simulazioni (Figura 2).

Confronto tra parametrizzazione tradizionale ed HERASE

L'ultimo confronto presentato è quello tra una parametrizzazione RUSLE tradizionale (simulazione S02) e la parametrizzazione dinamica che considera sia la stagionalità sia la variabilità meteorologica, nivale e vegetativa (simulazione S10). A parità di tutti gli altri parametri, la parametrizzazione R2 comporta una riduzione del tasso medio di erosione del 68% rispetto alla parametrizzazione R1 (simulazione S03 vs S02). Analogamente, con la parametrizzazione LS2 il tasso medio di erosione diminuisce del 56% (simulazione S05 vs S02). Non stupisce quindi che i risultati delle simulazioni S10 (R2, C3, K2, LS2) e S02 (R1, C0, K1, LS1) differiscano di un ordine di grandezza (Figura 2).

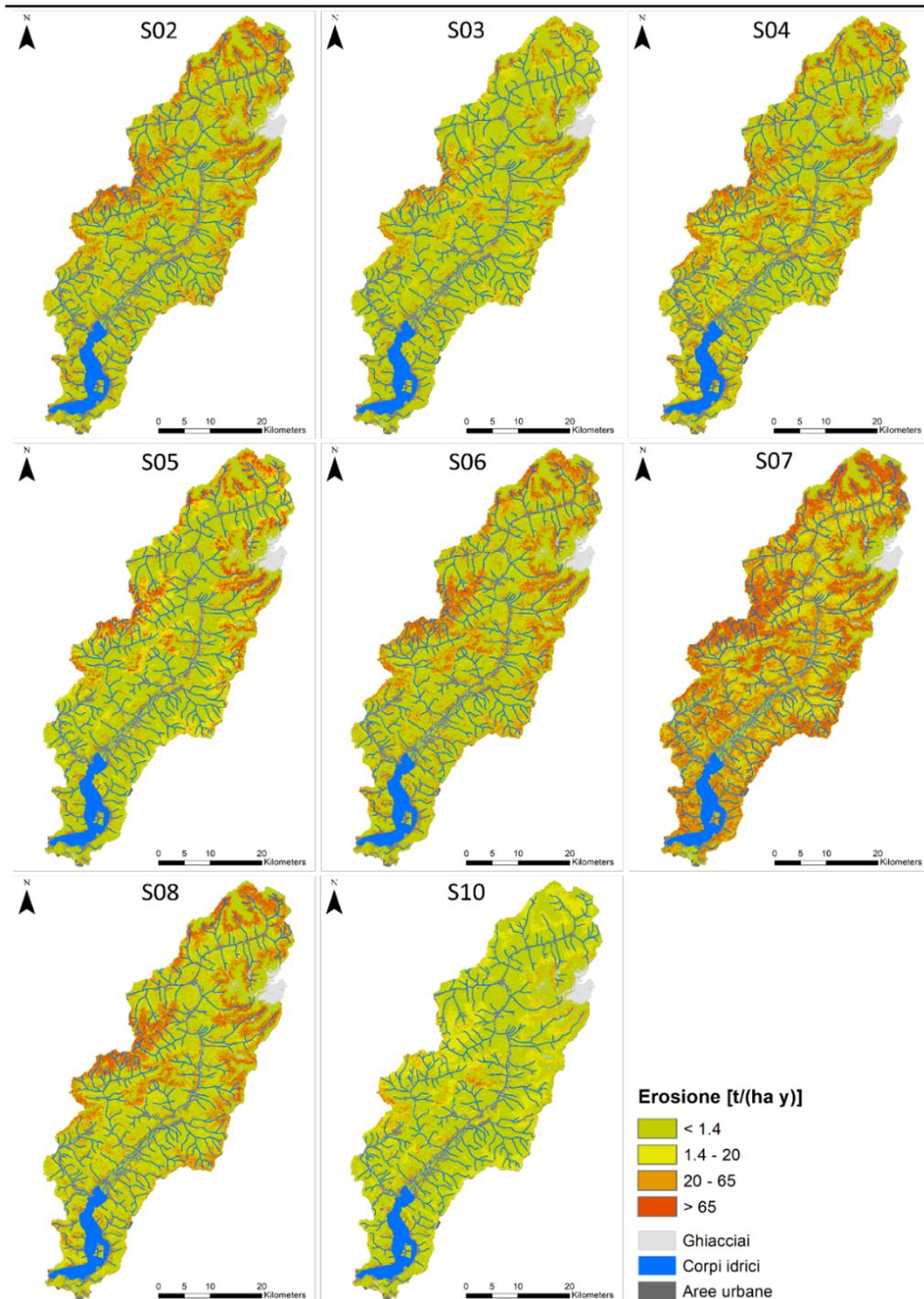


Figura 2 – Mappe di erosione relative alle simulazioni di Tabella 1.

Conclusioni

L'analisi di sensitività ha evidenziato l'impatto di ciascuna formulazione parametrica nella stima del tasso di erosione medio. L'effetto più rilevante è dato dal parametro R (-68%), seguito dal parametro LS (-56%) e dal parametro K (-27%). La parametrizzazione della copertura e uso del suolo (C) ha dimostrato di avere un impatto più limitato nella stima del tasso di erosione medio (+15% trascurando la parametrizzazione C2, risultata meno affidabile). Tuttavia, è il parametro che presenta la correlazione più elevata con il tasso di erosione (>0.50). Inoltre, l'approccio dinamico nella stima del parametro C permette di valutare separatamente i contributi della stagione estiva e di

quella invernale, consentendo di programmare interventi mirati per contrastare l'erosione.

Ringraziamenti

Questo lavoro è parte del progetto *Hydrogeological modeling for Erosion Risk Assessment from Space* (HERASE), finanziato da Fondazione Cariplo per gli anni 2017-2019 (Grant Nr.2016-0768). Gli autori ringraziano anche: i) il Parco dell'Adamello e la Comunità Montana della Val Camonica per il supporto e l'interesse mostrato e per la condivisione dei dati necessari; ii) l'Ufficio Territoriale Regionale di Brescia di Regione Lombardia per le informazioni e i dati relativi all'area di studio; iii) ENEL Produzione per la fornitura dei dati relativi ai tassi di interrimento delle dighe e iv) il Servizio Glaciologico Lombardo per il supporto e l'interesse manifestato al progetto HERASE.

Riferimenti bibliografici

- Gianinetto M, et al. (2018), "Satellite-based cover management factor assessment for soil water erosion in the Alps", *Atti del congresso SPIE 2018*
- USDA (2017), "Rainfall Intensity Summarization Tool (RIST v3.98)" Ultimo accesso Settembre 2018, www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=3251
- Fantappiè M et al. (2015), "Soil erosion risk, Sicilian Region (1:250,000 scale)", *Journal of Maps*, 11(2):323-341
- Panagos P et al. (2015a), "Estimating the soil erosion cover-management factor at the European Scale", *Land Use Policy*, 48:38-50
- Panagos P et al. (2015b), "A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water", *Geosciences*, 5:117-126
- Panagos P et al. (2015c), "The new assessment of soil loss by water erosion in Europe", *Environmental Science & Policy*, 54:438-447
- Panagos P et al. (2014), "Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS", *Science of the Total Environment*, 479-480:189-200
- European Commission (2012), "The implementation of the Soil Thematic Strategy and ongoing activities", COM (2012) 46.
- Corbari C et al. (2009), "Elevation based correction of snow coverage retrieved from satellite images to improve model calibration", *Hydrology and Earth System Sciences*, 13:639-649
- Sun H et al. (2002), "Contour-based digital elevation modeling of watershed erosion and sedimentation: Erosion and sedimentation estimation tool (EROSET)", *Water Resources Research*, 38(11):1233
- Van der Knijff JM et al. (2000), Soil erosion risk assessment in Europe. European Soil Bureau. European Commission, JRC Scientific and Technical Report, EUR 19044 EN.
- Renard KG et al. (1997), "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)". Agricultural Handbook, U.S.D.A., Washington, DC, 404 pp.
- Desmet P, Govers G (1996), "A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units", *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5):427-433
- Mitasova H et al. (1996), "Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS", *International Journal of Geographical Information Science*, 10(5):629-641

