

Technical Notes
Ottobre 2023
Issue TN0297

*REMHI
Regional Models
and geo-
Hydrological
Impacts*

Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A.

By **Giuliana Barbato,**
Paola Mercogliano,
Roberta Padulano,
Matteo Pesce,
Mario Raffa,
Mattia Scalas
Fondazione CMCC
Centro Euro-
Mediterraneo sui
Cambiamenti Climatici
roberta.padulano@cmcc.it
paola.mercogliano@cmcc.it

**Gianluigi Fiori, Vincenzo
Patrino, Davide Ritossa,**
Luciano Venditti,
Gerardo Ventafridda
Acquedotto Pugliese S.p.A.
v.patruno@aqp.it
l.venditti@aqp.it

SUMMARY Questo report si concentra sulla stima degli effetti del cambiamento climatico sull'erosione dei suoli causata dalla pioggia nei bacini idrografici che rappresentano l'asset "invasi superficiali". Utilizzando metodologie empiriche proposte da Padulano et al. (2021 e 2023), l'analisi si basa su dataset preesistenti come il Demo Case "Soil Erosion in Italy" e il Progetto HIGHLANDER. L'obiettivo è valutare il materiale potenzialmente mobilitato durante eventi estremi di pioggia, che potrebbe influire sulla capacità di accumulo e sulla torbidità dell'acqua negli invasi. Sono stati esaminati dieci specifici bacini idrografici, valutando l'erosività della pioggia e l'erosione da pioggia per il periodo 1981-2010 e le previsioni 2021-2050, considerando tre scenari RCP (2.6, 4.5 e 8.5). I risultati offrono valori aggregati e mappe che illustrano la variabilità spaziale delle variabili studiate. Questo report tecnico è frutto dell'accordo di collaborazione stipulato tra la Fondazione CMCC e Acquedotto Pugliese S.p.A.

Keywords hydrology, water quality, climate change
DOI: <https://doi.org/10.25424/cmcc-6pa5-z469>

PREFAZIONE

Già nel novembre del 2021 Acquedotto Pugliese S.p.A. e la Fondazione CMCC (nel seguito identificati come AQP e CMCC) hanno siglato un accordo di collaborazione per mettere a fattor comune il proprio know-how ed affrontare il cambiamento climatico sulla base di una chiara, condivisa consapevolezza dei rischi e degli impatti e per definire modelli di approccio scientifici e, tuttavia, concreti e semplificati, per identificare gli interventi tecnici di adattamento e delineare piani di resilienza con riguardo al servizio idrico integrato e, in generale, all'utilizzo della risorsa idrica nel territorio di riferimento.

La complessità e l'ampiezza di tale obiettivo hanno condotto a ripartire l'impegno per distinti ambiti di rischio che intercettano le ricadute dei cambiamenti climatici sui processi del Servizio Idrico Integrato gestito da AQP.

La collaborazione è stata avviata operativamente nel gennaio 2022 e ha riguardato prioritariamente l'ambito della Sicurezza della Risorsa Idrica e, quindi, l'analisi degli effetti delle variazioni di determinati indicatori climatici, nel periodo 2021 – 2050, sulla disponibilità della risorsa idrica approvvigionata da AQP per il fabbisogno idropotabile della popolazione della regione Puglia. Le attività si sono concentrate in particolare sulle attuali fonti utilizzate da AQP, ovvero gli invasi superficiali, le sorgenti ed i pozzi, ed hanno esplorato altresì gli aspetti di competizione sulla risorsa idrica ed il possibile aumento dei consumi irrigui.

Questo ciclo di *Technical Notes* CMCC riassume i risultati delle attività riguardanti gli invasi superficiali e i relativi impatti del cambiamento climatico sulla quantità e qualità delle acque disponibili in futuro. Questa fonte, infatti, per sua natura risente in modo spiccato del cambiamento climatico e delle conseguenti variazioni nelle componenti del bilancio idrologico (precipitazioni medie ed estreme ed evapotraspirazione potenziale, tra le altre). Le *Technical Notes* CMCC incluse nella raccolta si focalizzano, in particolare, su diversi potenziali effetti del cambiamento climatico: sulla variazione nel regime delle portate medie e sulla variazione del numero e delle caratteristiche degli



Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi

eventi di siccità idrologica, che impattano sulla quantità della risorsa, e sulla variazione dell'intensità e frequenza degli eventi estremi di piena e di precipitazione e sulla variazione del tasso di erosione dei suoli, che impattano sulla qualità delle acque.



03

1. PREMESSA

Il presente documento ha lo scopo di mostrare i principali risultati elaborati dalla Fondazione CMCC nell'ambito dell'attività CG01.49.2.14 – Valori di Erosività (R-factor del modello RUSLE) proposti dal Demo Case “Soil Erosion in Italy” (Copernicus C3S) e integrati mediante metodologia empirica proposta da Padulano et al. (2021) per il target “Invasi superficiali – qualità”, con l'intento di fornire una nota metodologica che faciliti l'interpretazione delle analisi condotte. Come da titolo dell'attività, l'analisi si riferisce ad un dataset già esistente per alcune componenti, aggiornato proprio in occasione del progetto per altre, secondo la metodologia proposta da Padulano et al. (2021) e anche da Padulano et al. (2023), riferimento non ancora disponibile al momento della stesura dell'Allegato Tecnico alla Convenzione. I dataset preesistenti fanno riferimento al Demo Case “Soil Erosion in Italy”¹, sviluppato dal CMCC come showcase dei servizi Copernicus, e al Progetto HIGHLANDER², di caratura europea, di cui CMCC è partner (più precisamente, lo Use Case “Soil Erosion”³ di cui il CMCC è leader). A seguito di considerazioni di fattibilità, il contenuto della presente attività si può considerare esteso nella seguente forma: “Valori di Erosività (R-factor del modello RUSLE) e di relativa erosione (SL del modello RUSLE) derivanti da dataset CMCC e integrati mediante metodologia empirica proposta da Padulano et al. (2023)” per il target “Invasi superficiali – qualità”.

Scopo dell'attività è quello di effettuare una stima degli effetti del cambiamento climatico sul tasso annuo di erosione (da pioggia) dei suoli per i bacini idrografici che costituiscono l'asset “invasi superficiali” (Figure 1 e 2). Tale valutazione permette di

¹ <https://climate.copernicus.eu/soil-erosion-italy> Il Demo Case comprende sia il dataset “Soil Erosion Indicators for Italy from 1981 to 2080” (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-soil-erosion?tab=overview>) sia le applicazioni “Soil Erosion Explorer” (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-soil-erosion-explorer-italy?tab=app>) e “What-if analysis tool” (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-soil-erosion-what-if-analysis?tab=app>).

² HIGH-performance computing for smart LAND sERvices (<https://highlanderproject.eu/>).

³ <https://highlanderproject.eu/project/soil-erosion/>



avere una stima, seppur qualitativa, del materiale potenzialmente mobilitato in occasione di eventi estremi di pioggia, che, confluendo negli invasi, potrebbe comportare sia fenomeni di interrimento (e dunque di riduzione della capacità di accumulo disponibile) sia un incremento del livello di torbidità dell'acqua (e dunque maggiori oneri relativi al processo di potabilizzazione). Gli areali di riferimento sono i seguenti bacini:

1. “*Fortore*” (fiume Fortore, chiuso in corrispondenza della Diga di Occhito);
2. “*Conza*” (fiume Ofanto, chiuso in corrispondenza della Diga di Conza);
3. “*Traversa Santa Venere*” (fiume Ofanto, chiuso in corrispondenza della suddetta traversa);
4. “*Locone*” (fiume Locone, chiuso in corrispondenza della Diga del Locone);
5. “*Cogliandrino*” (fiume Sinni, chiuso in corrispondenza della Diga di Cogliandrino);
6. “*Traversa Sarmiento*” (fiume Sinni, chiuso in corrispondenza della suddetta traversa);
7. “*Monte Cotugno*” (fiume Sinni, chiuso in corrispondenza della Diga di Monte Cotugno);
8. “*Pertusillo*” (fiume Agri, chiuso in corrispondenza della Diga del Pertusillo);
9. “*Traversa Agri*” (fiume Agri, chiuso in corrispondenza della suddetta traversa);
10. “*Traversa Sauro*” (Torrente Sauro chiuso in corrispondenza della suddetta traversa).

Nello specifico, per ciascun bacino vengono valutati i valori medi annui sul trentennio di riferimento 1981-2010 e sull'orizzonte futuro 2021-2050 (per i tre scenari RCP 2.6, 4.5 e 8.5) di due variabili, precisamente l'erosività della pioggia [*rainfall erosivity*], e l'erosione da pioggia [*rainfall-induced soil erosion*]. La prima rappresenta il potere



CMCC Technical Notes

erosivo degli eventi di pioggia, strettamente legato all'intensità e alla durata, ed è dunque il parametro su cui il cambiamento climatico può avere un effetto. La seconda rappresenta la quantità di materiale potenzialmente mobilitabile, ed è funzione, oltre che dell'erosività, anche della suscettibilità del suolo ad essere eroso. Tale suscettibilità, funzione delle caratteristiche del terreno, è generalmente ritenuta invariata quando l'attenzione si focalizza sugli effetti del cambiamento climatico, sebbene essa possa naturalmente subire modifiche per effetto, soprattutto ma non solo, dell'azione dell'uomo.

I risultati consistono, per ciascun bacino, in valori aggregati delle due variabili a scala stagionale sul periodo presente e quello futuro, ed anche in mappe che mostrano, sotto alcune ipotesi chiarite nel presente documento, la variabilità spaziale delle grandezze oggetto di studio.

Figura 1: Overview degli invasi superficiali di interesse del Servizio Idrico Integrato AQP, con indicazione delle opere di sbarramento.

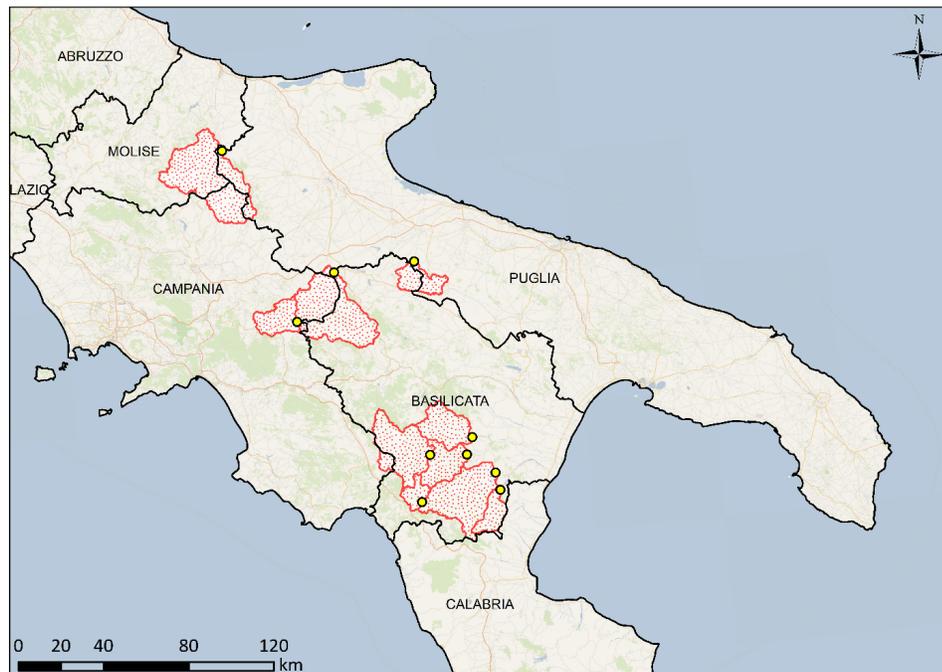




Figura 2: Zoom degli invasi superficiali di interesse del Servizio Idrico Integrato AQP, con indicazione delle opere di sbarramento.

07



2. NOTA METODOLOGICA: IL MODELLO RUSLE

La valutazione della Soil Erosion (SE), o Soil Loss (SL) effettuata nel presente documento si basa sulla ben nota Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE; Renard et al. 1997). Tale equazione rappresenta una modellazione empirica, fisicamente basata, dei principali processi alla base dell'erosione da pioggia e della loro interazione:

$$SL = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

In particolare, secondo la RUSLE, il materiale potenzialmente mobilitato, in termini di tonnellate medie annue per ettaro, può essere ottenuto come il prodotto di cinque fattori, di cui uno, R-factor, rappresenta l'azione erosiva della pioggia, mentre gli altri (K, LS, C e P) rappresentano le diverse caratteristiche del terreno in termini di topografia, proprietà bio-fisico-chimiche, gestione del suolo e attività antropiche. In sintesi:

- SL rappresenta l'erosione media annua per ettaro [*soil loss*] ($t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$),
- R-factor rappresenta l'erosività della pioggia [*rainfall erosivity*] ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ yr}^{-1}$),
- K-factor rappresenta l'erodibilità del suolo [*soil erodibility*] ($t \text{ ha hr ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$),
- LS-factor rappresenta la topografia [*slope length and slope steepness*] (adimensionale),
- C-factor rappresenta la copertura [*cover-management*] (adimensionale),
- P-factor rappresenta le pratiche di gestione del suolo [*support practices*] (adimensionale).



Data l'estrema semplicità del modello (seppure uno dei più usati ancora oggi) e le incertezze legate alla stima dei vari parametri (in particolare R-factor e P-factor), la letteratura consiglia di utilizzare i valori di SL risultanti non tanto in valore assoluto, bensì in termini comparativi, per effettuare una classificazione delle aree più o meno soggette ad erosione potenziale da pioggia. Ad oggi, SL calcolato secondo questa metodologia è utilizzato, in Europa, come indicatore di monitoraggio per un obiettivo di sviluppo sostenibile (SDG, *Sustainable Development Goal*), in particolare SDG-15 "Life on Land". In particolare, per il monitoraggio viene considerata la mappa di SL elaborata dal *Joint Research Center* della Comunità Europea (JRC; Panagos et al. 2015a e 2015b), che è frutto della sovrapposizione di altrettante mappe, una per ciascun fattore dell'Eq. 1, tutte elaborate e messe a disposizione da JRC. In particolare, la mappa di R-factor deriva dall'interpolazione di valori puntuali valutati su un consistente numero di stazioni meteorologiche distribuite sull'intero territorio europeo. Si anticipa qui che, per la presente attività, per i fattori K, LS, C e P verranno appunto utilizzate le mappe messe a disposizione da JRC; per R, invece, sarà considerato un approfondimento; i pro e i contro di tale scelta verranno discussi nei paragrafi successivi.

3. DATASET UTILIZZATI

3.1 K – FACTOR

Per il fattore di erodibilità del suolo è stato utilizzato il dataset JRC "Soil Erodibility High Resolution dataset for Europe"⁴, che presenta una risoluzione orizzontale di 500 metri.

K esprime la suscettibilità del suolo ad essere eroso, in funzione di proprietà quali il contenuto di materia organica, la tessitura, la struttura e la permeabilità. Tali parametri, che ad oggi sono deducibili dal dataset LUCAS (*Land Use/Cover Area frame Statistical*

⁴ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-erodibility-k-factor-high-resolution-dataset-europe>

survey; distribuito dal Copernicus Land Monitoring Service⁵) permettono il calcolo di K attraverso una formula empirica; le stime puntuali sono poi interpolate per ottenere un dataset spazialmente distribuito (Panagos et al. 2014).

3.2 LS – FACTOR

Per il fattore topografico è stato utilizzato il dataset JRC “LS – factor for the EU”⁶, che presenta una risoluzione orizzontale di 25 metri (Panagos et al. 2015c). Il fattore LS tiene conto, in maniera combinata, della pendenza e della lunghezza del pendio; pertanto, il suo calcolo richiede esclusivamente informazioni sull'altitudine. Il dataset utilizzato, in particolare, è ricavato a partire dal Modello Digitale del Terreno (DEM) dell'Unione Europea (EU-DEM), che presenta una risoluzione orizzontale appunto di 25 metri.

3.3 C – FACTOR

Per il fattore di gestione delle coperture è stato utilizzato il dataset JRC “Cover Management Factor for the EU”⁷, che presenta una risoluzione spaziale di 100 metri. I valori del fattore sono stati ottenuti sulla base di dataset pan-europei (CORINE Land Cover), attribuiti biofisici da dati satellitari e dati statistici sulle pratiche agricole e sulle colture (Panagos et al. 2015d). Il limite superiore di C è l'unità, che corrisponde al suolo nudo, privo di vegetazione, per il quale l'erosione è massima. Il valore medio europeo è 0.1043, con un'elevata variabilità. Le foreste hanno un valore di C pari a 0.00116, molto basso, mentre suoli con vegetazione sparsa hanno un C pari a 0.2651. Il fattore C è, tra tutti quelli dell'Eq. 1, il parametro su cui si può più facilmente agire, a scala decisionale, per ridurre il tasso di erosione, ipotizzando scenari futuri di uso del suolo e valutando gli effetti di una più opportuna rotazione delle colture. Allo stesso modo, tramite questo

⁵ <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/lucas>

⁶ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/ls-factor-slope-length-and-steepness-factor-eu>

⁷ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/cover-management-factor-c-factor-eu>



CMCC Technical Notes

fattore sono rapidamente quantificabili gli effetti di processi quali la deforestazione, l'espansione o l'abbandono delle aree agricole.

3.4 P – FACTOR

Il dataset utilizzato per P è il dato JRC “Support Practices Factor for the EU”⁸, che presenta una risoluzione spaziale di 1 km. Esso è ricavato a partire dal dataset LUCAS (*Land Use/Cover Area frame Statistical survey*) distribuito dal Copernicus Land Monitoring Service⁹. Tale fattore tiene conto di tutte quelle pratiche di gestione dell'erosione che comportano il controllo dei deflussi, ad esempio agendo sui percorsi preferenziali di drenaggio, sulla velocità e sui volumi dei deflussi. Minore è valore di P, maggiore è la riduzione dell'erosione rispetto all'assenza di pratiche di gestione (che corrisponde a un valore di P pari a 1). I valori di P associati alle diverse pratiche sono per lo più ricavati mediante *expert judgement* (Panagos et al. 2015e) e sono dunque associati ad una elevata incertezza, la maggiore tra tutti i parametri dell'Eq. 1.

3.5 R – FACTOR O “EROSIVITÀ”

R-factor rappresenta il valore medio su un periodo di riferimento della somma delle erosività di tutti gli eventi “erosivi” verificatisi nel periodo. Secondo la definizione di Wischmeier & Smith (1978), si dice “erosivo” un evento che ha un volume cumulato di almeno 12.7 mm, oppure che ha un volume di almeno 6.4 mm in 15 minuti; in altre parole, più un evento è intenso maggiore è l'azione erosiva che esso è in grado di esercitare sul suolo. Per l'applicazione nell'Eq. 1 viene usato come periodo di riferimento l'anno: R_a , espresso in $(MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ yr^{-1})$, è dunque il valore medio inter-annuale della somma degli R_s (dove “s” sta per storm event) di tutti gli eventi erosivi verificatisi in ciascun anno del periodo di osservazione. Allo stesso modo R_m , espresso in $(MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ month^{-1})$, è il valore medio inter-annuale della somma degli R_s di tutti gli eventi

⁸ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/support-practices-factor-p-factor-eu>

⁹ <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/lucas>



erosivi verificatisi in ciascun mese del periodo di osservazione. In termini matematici, secondo le definizioni date da Renard et al. (1997) e Wischmeier & Smith (1978), si ha:

$$R_s = (EI_{30})_s \quad (2)$$

dove E è l'energia dell'evento, in (MJ/ha), e I_{30} è la massima intensità dell'evento raggiunta in una finestra di 30 minuti. L'energia dell'evento è calcolata discretizzando l'evento di pioggia, per ciascun incremento " r " calcolando l'energia come prodotto del volume per l'energia specifica e_r , e sommando i valori così ottenuti per tutto l'evento:

$$E = \sum e_r \cdot \Delta V_r \quad (3)$$

$$e_r = 0.29 \cdot [1 - 0.72 \cdot \exp(-0.05 \cdot I_r)] \quad (4)$$

Potendo quindi calcolare R_s per ciascun evento erosivo mediante l'Eq. 1 con il supporto delle Eq. 3 e 4, si ha:

$$R_m = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^{S_{m_i}} R_s \quad (5)$$

$$R_a = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^{S_i} R_s = \sum_{m=1}^{12} R_m \quad (6)$$

Nelle Eq. 5 e 6, N indica il numero di anni di cui si compone il periodo di riferimento; i punta al generico anno del periodo di riferimento; m punta genericamente al mese dell'anno ($m=1$ corrisponde a gennaio, $m=12$ a dicembre); m_i punta ad un generico mese di uno specifico anno (ad esempio, m_3 punta al mese m del terzo anno del periodo di riferimento); s punta al generico evento erosivo; S_{m_i} è il numero di eventi erosivi occorsi nel mese m_i ; S_i è il numero di eventi erosivi occorsi nell'anno i . Per quanto riguarda il



CMCC Technical Notes

periodo di riferimento, secondo Meurersburger et al. (2012), affinché le medie R_m e R_a abbiano una certa robustezza, è necessario considerare un periodo di riferimento di almeno 20 anni, poiché possano essere ben colte le caratteristiche medie della pioggia e sia ridotto l'effetto di eventuali *outlier*.

Il grande limite nell'applicazione della definizione rigorosa di R-factor sta, dunque, nella necessità di avere dati di pioggia con risoluzione sub-oraria, di almeno 30 minuti, che sono di rado disponibili con ampie coperture temporali. Ad esempio, in Italia, questa tipologia di dati è disponibile di solito a partire dall'inizio degli anni 2000. Inoltre, gli effetti del cambiamento climatico sulle piogge di durata sub-oraria non sono ben colti, per effetto delle parametrizzazioni associate alle risoluzioni spaziali e temporali attualmente disponibili. In altre parole, i modelli climatici come quelli inclusi nell'iniziativa EURO-CORDEX¹⁰ non risolvono i processi convettivi (responsabili della tipologia di eventi di pioggia di interesse in questa analisi). A causa di queste considerazioni, sono nati nel corso degli ultimi decenni una serie di modelli empirici che consentono di stimare R-factor (medio mensile o, molto più spesso, medio annuo) a partire da valori cumulati di pioggia (mensili o annui) per i quali esistono dataset puntuali e distribuiti ampiamente validati, e per i quali le proiezioni climatiche sono in grado di dare informazioni più affidabili.

Per l'Europa, il dataset "Rainfall Erosivity in the EU and Switzerland (R-factor)"¹¹ messo a disposizione da JRC è stato calibrato utilizzando, limitatamente al territorio italiano, i dati provenienti un set di circa 250 stazioni meteorologiche con risoluzione sub-oraria, disponibili sulla finestra temporale 2002-2011. Attualmente tale dataset costituisce il riferimento ufficiale per l'intera Europa sul periodo presente. In termini di proiezioni, lo stesso JRC mette a disposizione una mappa di R-factor derivante dall'utilizzo di un ensemble di proiezioni (Panagos et al. 2017).

¹⁰ <https://www.euro-cordex.net/>

¹¹ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/rainfall-erosivity-european-union-and-switzerland>

Per l'Italia, esiste un modello empirico molto semplice (Padulano et al. 2023), calibrato su un set di 171 stazioni meteorologiche con risoluzione sub-oraria, che permette la stima di R_m in funzione della media inter-annuale della pioggia cumulata mensile P_m , in (mm) della quota del sito z , in (m s.l.m.m.), e della latitudine Lat , in ($^{\circ}$ Est):

$$R_m = \frac{P_m^{C_2}}{C_2 + z^{C_3} \cdot Lat^{C_4}} \quad (7)$$

dove $C_2 = 39.2$, $C_3 = 0.89$ e $C_4 = -0.63$. La Tabella 1 presenta invece i valori degli esponenti C_m per ciascun mese dell'anno.

Tabella 1. Valori dell'esponente C_m dell'Eq. 7

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C_m	1.82	1.82	1.82	1.86	1.92	2.07	2.15	2.09	2.05	1.99	1.88	1.79

R_a può essere calcolato come somma degli R_m estesa ai 12 mesi dell'anno. Allo stesso modo, R_{seas} (dove "seas" sta per *season*) può essere ottenuto sommando gli R_m sui mesi appartenenti alla stessa stagione. Nel presente documento si indica l'inverno con l'acronimo DJF (December-January-February), la primavera con l'acronimo MAM (March-Aprile-May), l'estate con l'acronimo JJA (June-July-August) e l'autunno con l'acronimo SON (September-October-November). Il modello presentato nell'Eq. 7 rappresenta un perfezionamento di quello proposto da Padulano et al. (2021) e successivamente utilizzato nel progetto HIGHLANDER, riferito esclusivamente a R_a ; a sua volta, quest'ultimo prende le mosse dall'analisi di una lunga lista di modelli empirici, di cui un ensemble è utilizzato nel Demo Case C3S "Soil Erosion in Italy".

Il modello in Eq. 7, calibrato alla scala puntuale, può essere esteso applicando direttamente l'Eq. 7, cella per cella, a un qualsivoglia dataset di precipitazione. Un confronto tra vari dataset disponibili presentato in Padulano et al. (2021) mette in

**CMCC Technical Notes**

evidenza l'opportunità di utilizzare la rianalisi ERA5-Land¹² per stimare R-factor, e quindi SL, sul periodo corrente. Con lo scopo di stimare gli effetti del cambiamento climatico, invece, Padulano et al. (2023) utilizza un ensemble di proiezioni climatiche (Tabella 2), bias-corrette a mezzo di ERA5-Land per mantenere consistenza.

La Figura 3 (tratta da Padulano et al. 2023) mostra l'andamento stagionale di R-factor, da cui si evincono alcuni pattern spaziali notevoli, ed in particolare l'effetto clusterizzante dell'arco Alpino (particolarmente in primavera ed estate) e di quello Appenninico (particolarmente in autunno). Le stagioni in cui si raggiunge la maggiore erosività sono l'autunno (che generalmente, rispetto all'inverno, presenta ampi cumulati di pioggia ma anche un gran numero di eventi particolarmente intensi) e l'estate, dove si raggiungono alti valori di erosività concentrati sull'arco alpino. Di contro, in primavera e in inverno l'erosività è minore, probabilmente a causa del minor numero di eventi estremi e della preponderanza di precipitazioni nevose (non erosive). Il Sud Italia risulta, in generale (e particolarmente per la Regione Puglia), caratterizzato da valori più bassi di R-factor per tutte le stagioni.

Tabella 2. Lista delle simulazioni climatiche utilizzate

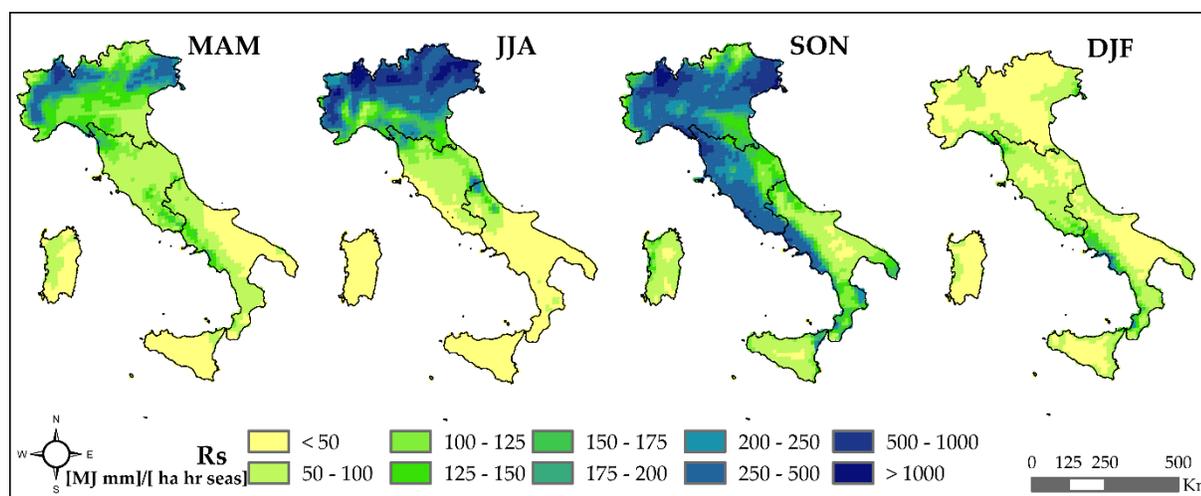
Global Climate Model (Institution)	Regional Climate Model (Institution)	historical period	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP8.5
CNRM-CM5	CCLM4-8-17 (CLM-Community, EU)	x		x	x
(CNRM-CERFACS, France)	RACMO22E (KNMI, Netherlands)	x	x	x	x
	RCA4 (SMHI, Sweden)	x		x	x
EC-EARTH					
(ICHEC, Ireland)	RACMO22E (KNMI, Netherlands)	x		x	x
IPSL-CM5A-MR					
(IPSL, France)	RCA4 (SMHI, Sweden)	x		x	x
HadGEM2-ES	CCLM4-8-17 (CLM-Community, EU)	x		x	x

¹² <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab%20=%20overview&tab=overview>

Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi

(UK Met Office, UK)	RACMO22E (KNMI, Netherlands)	x	x	x	x
	RCA4 (SMHI, Sweden)	x	x	x	x
MPI-ESM-LR (MPI, Germany)	CCLM4-8-17 (CLM-Community, EU)	x		x	x
	CSC-REMO2009 (MPI, Germany)	x	x	x	x
	RCA4 (SMHI, Sweden)	x	x	x	x
NorESM1-M (NCC, Norway)	HIRHAM5 (DMI, Denmark)	x		x	x

Figura 3: R-factor medio sul periodo di riferimento 1981-2010, ottenuto mediante l'Eq. 7 e cumulato sulle diverse stagioni (fonte: Padulano et al. 2023).



3.6 CRITICITÀ E OPPORTUNITÀ RELATIVE ALL'UTILIZZO DEL DATASET NELLA CONVENZIONE

Seppure costituisca il riferimento corrente, il dataset distribuito da JRC presenta alcune limitazioni che ne impediscono l'utilizzo diretto nel presente documento. In particolare:

- L'ensemble di proiezioni utilizzato per la stima di R-factor è meno ampio rispetto a quello considerato sia nel presente documento, sia nei dataset di SL elaborati dal CMCC nei progetti menzionati in premessa (si tratta di un



CMCC Technical Notes

unico modello, per giunta globale, ovvero HadGEM2 sotto RCP 4.5). Inoltre, tali proiezioni sono bias-corrette utilizzando il dataset WorldClim, basato su un'interpolazione non fisicamente basata di dati puntuali (Padulano et al. 2023).

- I dataset di precipitazione utilizzati sia per il periodo corrente che per il futuro presentano una copertura temporale non consistente rispetto al presente documento, e neanche alle valutazioni IPCC (in particolare, sul periodo presente vengono considerati solo 20 anni). Ad esempio, per l'orizzonte futuro JRC esplicita una variazione attesa tra l'anno 2050 e l'anno 2010, senza mediare all'interno del trentennio.
- Sebbene vengano fatte valutazioni alla scala stagionale, la mappa distribuita da JRC fa riferimento ai soli valori medi annui di SL e R, trascurando effetti di compensazione la cui esistenza è stata dimostrata (Padulano et al. 2023). In altre parole, possono esistere aree dove, mediamente nell'anno, è attesa una diminuzione di SL e dei rischi ad essa connessi, ma in quelle stesse aree i rischi potrebbero invece aumentare in specifiche stagioni.
- La mappa JRC è ottenuta a mezzo di una operazione di *downscaling* spaziale estremamente spinta rispetto alla risoluzione orizzontale delle proiezioni, che potrebbe presentare dunque criticità in termini di preservazione del segnale.
- Sebbene le performance dell'interpolazione siano mediamente soddisfacenti, la procedura è ottimizzata sull'intero territorio europeo, e dunque i risultati sui bacini oggetto di studio presentano un potenziale margine di miglioramento.

Sulla base di tali limitazioni è stata concepita la possibilità di un miglioramento nell'approccio metodologico al calcolo di SL (Padulano et al., 2021 e 2023) particolarmente focalizzato sulla stima di R-factor. R-factor è infatti l'unico parametro rappresentativo dell'azione erosiva della pioggia, e dunque quello sottoposto ai

potenziali effetti del cambiamento climatico. Come già menzionato, l'approccio per il calcolo di R-factor è stato pubblicato (Padulano et al. 2021 alla scala annuale, Padulano et al. 2023 a livello mensile) ma applicato solo su base annua (progetto HIGHLANDER). L'applicazione su base mensile è dunque un elemento di innovazione inserito ad hoc per la presente attività. Invece, gli altri parametri sono quelli già disponibili nell'ambito del progetto HIGHLANDER, che a loro volta sono direttamente derivati dai dataset JRC.

Date le condizioni al contorno derivanti dallo stato dell'arte, pur essendo il dataset di R-factor realizzato appositamente per questa attività, vi sono comunque alcune criticità nel suo utilizzo nell'ambito della Convenzione, tra cui:

- Il numero di catene di simulazione climatica (12) è inferiore a quello di default scelto per la convenzione (14). Ciò implica che la valutazione delle incertezze legate all'utilizzo di un ensemble di catene è meno robusta, sebbene il numero sia comunque, per gli standard vigenti, elevato.
- Di tutte le catene modellistiche proposte in Tabella 2 sono presenti, nell'ensemble più ampio considerato nelle attività della Convenzione, solo la seconda, quarta, settima, ottava, decima e undicesima. Per tutte le altre, infatti, non sono disponibili simulazioni sotto RCP 2.6 (la disponibilità di tutti e tre gli scenari di concentrazione è stato infatti un *driver* nella scelta dell'ensemble per la Convenzione). Fa eccezione il quarto modello in Tabella 2, per il quale, nell'ultimo anno, si è resa disponibile anche la proiezione sotto RCP 2.6. Il fatto che, in questa attività, il numero di proiezioni sotto RCP 2.6 sia inferiore a quelle disponibili sotto gli altri scenari rende le valutazioni ad esso legate meno robuste.
- Il dataset di riferimento per il periodo corrente (1981-2010) è ERA5-Land, mentre quello utilizzato, di default, nelle attività della Convenzione è E-OBS. La scelta era ricaduta su ERA5-Land in Padulano et al. (2021 e 2023) poiché esso è un prodotto operativo, che viene cioè aggiornato con continuità, mentre per il dataset E-OBS nuove versioni vengono rilasciate con cadenza irregolare. Nella presente attività, si è preferito conservare ERA5-Land poiché cambiarlo con E-OBS avrebbe comportato



CMCC Technical Notes

la necessità di ripetere le operazioni di bias correction, con un notevole aggravio computazionale.

- I dataset presentati nella precedente sezione hanno una risoluzione orizzontale diversa. Al fine di poterli utilizzare conservando il più possibile il contenuto informativo dei diversi layer, si è deciso di riportare tutti i dataset ad un grigliato ottenuto aggregando il fattore LS dalla sua risoluzione nativa (25 m) alla risoluzione target di 250 m. Per i fattori la cui risoluzione nativa è inferiore (K, P ed R), il downscaling è stato ottenuto ipotizzando il valore del fattore costante all'interno della cella originaria. Per R-factor, inoltre, tutti i risultati sono state riportati a un grigliato di pari risoluzione (quella dell'ensemble EURO-CORDEX) ma regolare, per consentire il ricorso a strumenti convenzionali di mappatura (mappe di tipo raster con formati quali ESRI grid o Geotiff).

4. NOTA METODOLOGICA: ANALISI E RESTITUZIONE DEI RISULTATI

In questa sezione viene presentato un approfondimento sull'approccio e le modalità utilizzate per analizzare il dataset oggetto di studio, descritto in precedenza, nonché per restituire i risultati in un modo che sia rigoroso ma, allo stesso tempo, di immediata interpretazione e che garantisca flessibilità.

4.1 ANALISI DELLE INCERTEZZE

Le incertezze associate alle stime effettuate in questa attività sono di diversa natura, tra cui:

- I. Incertezze legate all'utilizzo di un qualsivoglia modello al posto di osservazioni di erosione. Tali incertezze sono impossibili da quantificare poiché non esiste una raccolta sistematica di questa tipologia di dati, se non isolata a pochi casi studio nel mondo, non generalizzabili. Nello stato dell'arte, la misura di riferimento per l'erosione da pioggia è considerata essere l'output del modello RUSLE; tutti i modelli alternativi vengono quindi validati rispetto a questo.

- II. Incertezze legate all'utilizzo di un modello semplificato. Come descritto nella Nota metodologica, nel presente lavoro è stata utilizzata un'espressione di R-factor semplificata, che non necessita di osservazioni di pioggia sub-orarie ma di semplici cumulati mensili. Sebbene tale metodologia sia stata ampiamente validata e sia l'oggetto di numerose pubblicazioni e progetti internazionali, essa non è il riferimento ufficiale dell'Unione Europea. La quantificazione di tale fonte di incertezza non è oggetto di questa attività, ma è ampiamente documentata in Padulano et al. (2021).
- III. Incertezze legate alla scelta di un dataset di riferimento per la bias correction dell'input di precipitazione. Nella presente attività, il dataset di R-factor deriva dall'utilizzo di un dataset di precipitazione rappresentato da ERA5-Land, che viene inoltre utilizzato per la bias correction delle proiezioni di precipitazione tramite il metodo "Quantile Delta Mapping" (Cannon et al. 2015). L'incertezza derivante dall'uso di ERA5-Land è ampiamente descritta in Padulano et al. 2021, dove vengono presentati confronti con altri dataset (sia osservativi sia di rianalisi). Invece, il confronto con altre tecniche di bias correction non è al momento oggetto di studio.
- IV. Incertezze legate alla variabilità spaziale dei fattori. Una volta accettate le assunzioni del modello, ciascuno dei parametri è rappresentato da una mappa, mentre l'output finale delle valutazioni è un unico valore aggregato per ogni singolo bacino. La variabilità spaziale verrà portata in conto nel presente documento in modo esplicito: tuttavia, si anticipa qui che essa è modesta.
- V. Incertezze legate all'utilizzo di un ensemble di modelli climatici (Tabella 2). Tali incertezze consistono nella variabilità dei risultati in termini di R-factor e SL allorché il modello di erosione vede in input diverse catene di simulazione climatica. Tale variabilità può essere facilmente quantificata

CMCC Technical Notes

confrontando tra loro i diversi output disponibili. L'approccio con cui tale fonte di incertezza può essere analizzata non è univoco: tuttavia, lo stato dell'arte solitamente fa riferimento ad un approccio di tipo statistico, in cui il valore più vicino alla "verità" è il valore medio, lo scostamento medio dalla "verità" è la deviazione standard. In altre parole, l'insieme delle realizzazioni di portata ottenute utilizzando in input al modello idrologico diverse simulazioni climatiche viene trattato come un vero e proprio campione statistico.

Per quanto riguarda le fonti di incertezza dalla prima alla terza, ai fini di questa attività si ritiene che la procedura di validazione cui il dataset in oggetto è stato sottoposto (Padulano et al. 2021 e 2023) sia sufficiente per ritenere il dato affidabile, come testimoniato dall'inclusione di questo prodotto, almeno al suo stato embrionale, all'interno del servizio Copernicus Climate Change Service (C3S). Per quanto riguarda la variabilità spaziale, nei risultati l'analisi di tale incertezza verrà proposta in modo strutturato fornendo, per ogni bacino, il valore della media spaziale, della deviazione standard spaziale dei valori massimo e minimo. Per quanto riguarda l'ultima fonte di incertezza, questa naturalmente riguarda il dataset di R-factor, che è l'unico parametro dell'Eq. 1 che dipende dall'informazione di pioggia: l'incertezza manifestata da SL coincide dunque con quella di R-factor. L'analisi di questa tipologia di incertezza viene, in questa attività, trattata in modo rigoroso secondo quanto segue.

La media tra tutte le catene modellistiche, che prende il nome di "ensemble mean" (EM), rappresenta la migliore approssimazione della verità, e sarà quindi il principale risultato fornito. La "deviazione standard" (DS) associata alla media esprime la variabilità del campione: maggiore è la deviazione standard, più grande è la variabilità. Tuttavia, il valore assoluto di DS non è interpretabile se non in proporzione al valore di EM: valori di deviazione alti, associati a valori medi bassi, esprimono una maggiore aleatorietà rispetto ad analoghi valori di deviazione associati però a valori medi alti. Appare dunque utile considerare il "coefficiente di variazione" (CV), definito come rapporto tra DS e EM,



che quantifica *di quante volte* la deviazione standard è maggiore della media. Quanto più è alto il valore di CV, tanto più è grande DS rispetto ad EM, tanto più è grande l'incertezza associata alla stima della "verità". Tuttavia, una soglia di accettazione di CV può essere imposta soltanto in modo arbitrario, a seconda dello scopo delle analisi e dei dati a disposizione. Un campione statistico di soli 12 elementi (tanti quante sono le catene di simulazione climatica considerate per RCP 4.5 e 8.5, mentre per RCP 2.6 il numero si riduce a 5) è ridotto (solitamente si fa riferimento ad un'ampiezza pari a 10 come quella minima per analisi statistiche) e foriero di valutazioni poco robuste: in altre parole, l'aggiunta di anche solo un elemento potrebbe cambiare significativamente la stima, soprattutto di DS. È quindi atteso che le presenti analisi forniscano incertezze elevate associate alla stima della "verità", poiché dato il numero esiguo di elementi (ma un'ampiezza pari a 14, quante sono le catene di simulazione climatica adottate in altre attività della Convenzione, sarebbe comunque da considerarsi ridotta) sarebbe irrealistico pretendere un'incertezza più contenuta.

4.2 ANALISI DELL'EROSIVITÀ

Per ciascuna catena di simulazione climatica, per ciascuno scenario di concentrazione e per ciascuna finestra temporale di interesse (periodo di riferimento 1981-2010 e orizzonte futuro 2021-2050), i valori di R-factor medi stagionali sono stati mappati sui bacini di interesse. È stato già dimostrato da Padulano et al. (2023) che i risultati alla scala annuale sono poco significativi, poiché frutto di una importante compensazione tra quanto accade durante le diverse stagioni. Si ricorda che, per ottenere i valori di R-factor medi su base stagionale, per ciascun trentennio (1981-2010 e 2021-2050) prima vengono calcolati i cumulati mensili medi di precipitazione, e con questi viene poi applicata l'Eq. 7 con i coefficienti in Tabella 1; quindi, R-factor medio stagionale R_{seas} è la somma degli R-factor medi mensili sui tre mesi che compongono ciascuna stagione.

In linea di principio, le analisi possono essere condotte con due approcci:



1. Analizzando separatamente i valori di R-factor sul periodo di riferimento e sull'orizzonte futuro, in altre parole fornendo, per ciascuno dei due periodi, un valore "vero" (EM) e l'incertezza (DS e/o CV).
2. Analizzando la variabile "variazione di R-factor" valutata come differenza (percentuale) tra i valori futuri e quelli correnti, fornendo per quest'ultima una stima del valore "vero" (EM) e l'incertezza (DS e/o CV).

Si noti che, al variare della catena climatica usata come input, i valori di R-factor medio stagionale sul periodo di riferimento a rigore non coincidono perfettamente, ma sono tanto più vicini quanto più la procedura di bias correction dei dati climatici raggiunge un'efficienza del 100%. Tuttavia, per le simulazioni di precipitazione utilizzate come input per il calcolo di R-factor, non sono disponibili i risultati della bias correzione sul periodo di riferimento, ma solo sull'orizzonte futuro. L'unico dato a disposizione per valutare le condizioni di erosività sul periodo di riferimento è quello usato per la bias correzione, cioè ERA5-Land: la mappa di R-factor medio stagionale calcolata utilizzando ERA5-Land come input rappresenta quindi il riferimento di questa attività, certo, e dunque privo di variabilità. Invece, per l'orizzonte futuro, la variabilità di R-factor è significativa, in funzione di quanto ciascuna catena di simulazione climatica è sensibile all'aumento di temperatura causato dal particolare scenario di concentrazione adottato come condizione iniziale e al contorno.

Dal punto di vista delle azioni di adattamento, è chiaro che il valore assoluto di erosività e di erosione da attendersi in futuro è più utile della variazione, poiché esso può fungere, ad esempio, da valore di riferimento per la progettazione di interventi. L'informazione della variazione è invece sufficiente quando si voglia più che altro individuare e descrivere eventuali pericoli che possano insorgere o inasprirsi per effetto del cambiamento climatico. Ci sono però ulteriori considerazioni che possono far



convergere verso l'uno o l'altro approccio. Ad esempio, utilizzare in input precipitazioni provenienti da proiezioni climatiche permette appunto di tenere conto dell'effetto del cambiamento climatico sui valori di R-factor e quindi di SL; tuttavia, estendere le analisi a orizzonti temporali futuri, anche lontani, senza tenere conto di altri cambiamenti, ad esempio legati al *land cover*, alle proprietà dei suoli, o a interventi antropici sul bacino, possono fornire risultati, in termini di valori futuri, non attendibili. La valutazione della "variazione" permette invece di isolare l'effetto del cambiamento climatico, e la variazione può essere applicata a qualsivoglia riferimento: misurazioni che possano rendersi disponibili, oppure, in mancanza di osservazioni, i risultati di un modello più raffinato. Tale considerazione è particolarmente utile per questa attività, dove, per R-factor, esiste un dataset, già menzionato, della Comunità Europea per il periodo di riferimento: in questo caso, l'informazione più interessante da ritenere dalla presente analisi sarebbe la variazione attesa, da applicarsi al riferimento ufficiale.

5. SUSCETTIBILITÀ ALL'EROSIONE

In questa sezione vengono riportate le mappe dei parametri di suscettibilità dei suoli all'erosione per i bacini di interesse, raggruppati per contiguità geografica per una migliore visualizzazione. La trattazione è effettuata separatamente rispetto all'erosività della pioggia poiché si tratta, in questo caso, semplicemente della sintesi di dati già esistenti.

Le Figure da 4 a 7 rappresentano la distribuzione rispettivamente dei fattori C, K, LS e P utilizzati per il calcolo di SL sia sul periodo di riferimento (1981-2010) sia per l'orizzonte futuro (2021-2050), sotto l'ipotesi che essi non subiscano modificazioni, giacché il focus è sull'effetto del cambiamento climatico.

I vari bacini, divisi in tre pannelli per contiguità geografica, mostrano valori abbastanza omogenei dei vari fattori, come dimostrato dalla Tabella 3, che ne presenta la media e la variabilità spaziale.



Figura 4: K – factor (erodibilità del suolo) sui bacini di interesse. A sinistra il bacino del Fortore; al centro i bacini di Conza, Traversa Santa Venere e Locone; a destra i bacini di Pertusillo, Traversa Agri, Traversa Sauro, Cogliandrino, Monte Cotugno, Traversa Sarmento.

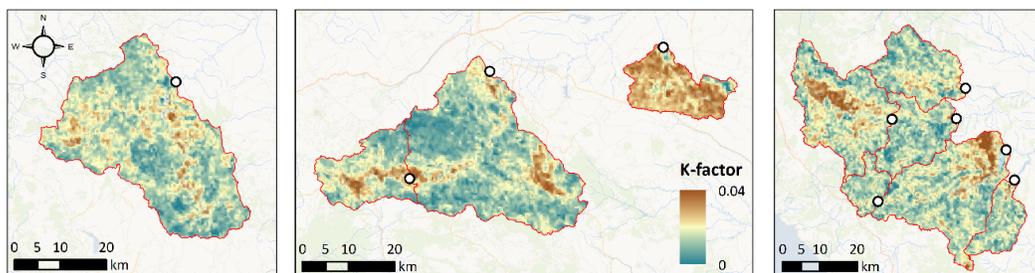


Figura 5: LS – factor (topografia) sui bacini di interesse. A sinistra il bacino del Fortore; al centro i bacini di Conza, Traversa Santa Venere e Locone; a destra i bacini di Pertusillo, Traversa Agri, Traversa Sauro, Cogliandrino, Monte Cotugno, Traversa Sarmento.

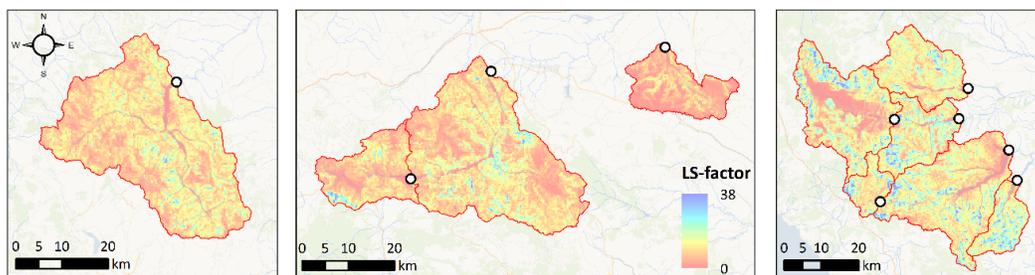


Figura 6: C – factor (copertura del suolo) sui bacini di interesse. A sinistra il bacino del Fortore; al centro i bacini di Conza, Traversa Santa Venere e Locone; a destra i bacini di

Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi

Pertusillo, Traversa Agri, Traversa Sauro, Cogliandrino, Monte Cotugno, Traversa Sarmento.



25

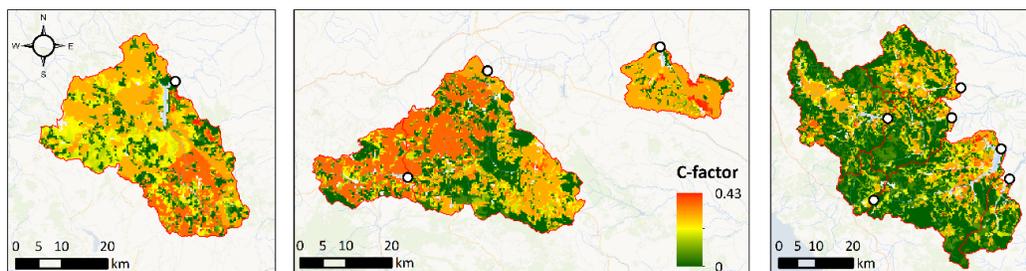


Figura 7: P – factor (pratiche di gestione) sui bacini di interesse. A sinistra il bacino del Fortore; al centro i bacini di Conza, Traversa Santa Venere e Locone; a destra i bacini di Pertusillo, Traversa Agri, Traversa Sauro, Cogliandrino, Monte Cotugno, Traversa Sarmento.

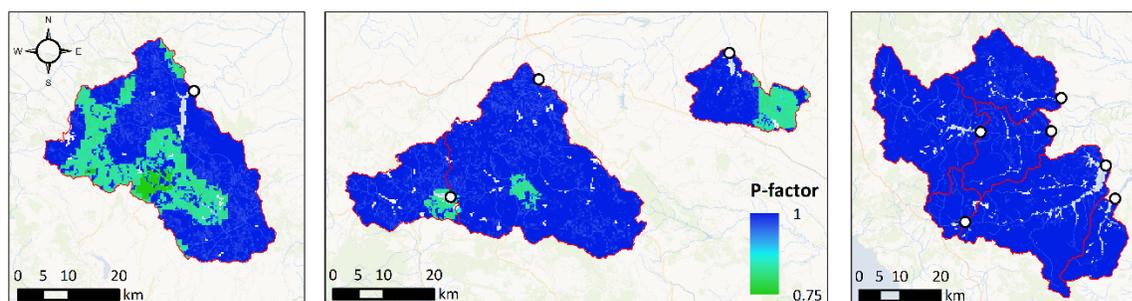


Tabella 3. Valori notevoli risultanti dall'aggregazione del dataset di LS – factor (adimensionale) sui bacini di interesse

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard
Fortore	3.061	0.030	16.772	1.536
Locone	1.481	0.030	5.881	1.126
Cogliandrino	4.582	0.040	18.163	2.573
Monte Cotugno	4.054	0.030	30.392	2.443
Traversa Sarmento	5.448	0.335	30.924	2.632
Traversa Sauro	4.269	0.240	26.700	2.071



26

CMCC Technical Notes

Traversa Santa Venere	3.016	0.030	15.851	1.706
Pertusillo	3.859	0.030	26.453	2.839
Conza	2.570	0.030	20.507	1.804
Traversa Agri	4.694	0.166	38.144	2.539

Tabella 4. Valori notevoli risultanti dall'aggregazione del dataset di K – factor ($t\ ha\ hr\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$) sui bacini di interesse

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard
Fortore	0.021	0.010	0.034	0.003
Locone	0.027	0.011	0.037	0.003
Cogliandrino	0.020	0.012	0.029	0.002
Monte Cotugno	0.022	0.010	0.040	0.004
Traversa Sarmiento	0.021	0.013	0.038	0.003
Traversa Sauro	0.021	0.012	0.034	0.003
Traversa Santa Venere	0.020	0.012	0.036	0.003
Pertusillo	0.022	0.010	0.036	0.004
Conza	0.022	0.013	0.035	0.004
Traversa Agri	0.020	0.010	0.032	0.003

Tabella 5. Valori notevoli risultanti dall'aggregazione del dataset di C – factor (adimensionale) sui bacini di interesse

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard
Fortore	0.147	0.000	0.298	0.075

Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi

Locone	0.173	0.001	0.393	0.067
Cogliandrino	0.041	0.001	0.225	0.055
Monte Cotugno	0.071	0.000	0.415	0.082
Traversa Sarmento	0.052	0.001	0.430	0.072
Traversa Sauro	0.088	0.001	0.339	0.085
Traversa Santa Venere	0.133	0.001	0.285	0.095
Pertusillo	0.070	0.001	0.290	0.082
Conza	0.165	0.001	0.269	0.096
Traversa Agri	0.056	0.001	0.318	0.072



27

Tabella 6. Valori notevoli risultanti dall'aggregazione del dataset di P – factor (adimensionale) sui bacini di interesse

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard
Fortore	0.950	0.765	1.000	0.069
Locone	0.957	0.828	1.000	0.064
Cogliandrino	0.999	0.971	1.000	0.003
Monte Cotugno	0.999	0.970	1.000	0.004
Traversa Sarmento	0.999	0.973	1.000	0.003
Traversa Sauro	0.997	0.970	1.000	0.006
Traversa Santa Venere	0.992	0.828	1.000	0.024
Pertusillo	0.999	0.970	1.000	0.003
Conza	0.985	0.830	1.000	0.040
Traversa Agri	0.999	0.970	1.000	0.004

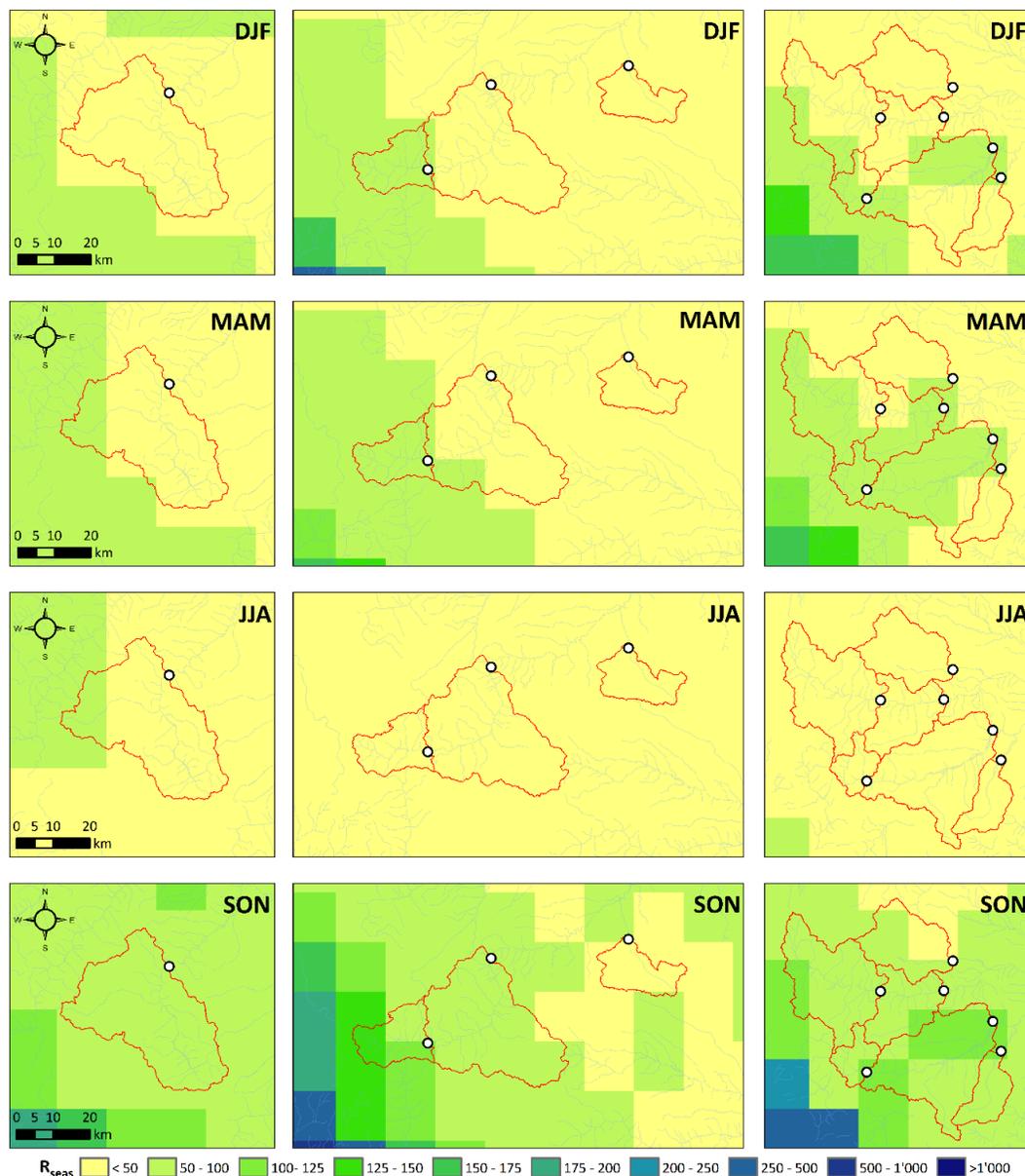
6. EROSIVITÀ DELLA PIOGGIA

La Figura 8 rappresenta la distribuzione del fattore R utilizzato per il calcolo di SL sul periodo di riferimento (1981-2010). I pannelli di Figura 8 rappresentano uno zoom delle mappe proposte in Figura 3, relative all'intero territorio italiano per le quattro stagioni. Si evince che sugli areali oggetto di interesse esiste una forte omogeneità territoriale nei valori di R-factor: i bacini si trovano in prossimità della catena appenninica, zona di transizione verso i valori generalmente bassi di erosività che caratterizzano il versante sud-adriatico per tutte le stagioni, con un lieve aumento in autunno (Figura 3). Si vede infatti in Figura 8 come, per tutte le stagioni ad eccezione dell'autunno, i valori di R tendano a salire muovendosi verso il lato sinistro (ovest) dei pannelli.

Figura 8: R – factor (erosività della pioggia) stagionale sui bacini di interesse per il periodo di riferimento 1981-2010. A sinistra il bacino del Fortore; al centro i bacini di Conza, Traversa Santa Venere e Locone; a destra i bacini di Pertusillo, Traversa Agri, Traversa Sauro, Cogliandrino, Monte Cotugno, Traversa Sarmento.



Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi



I valori di R (si tratta, in particolare, di R_{seas}) aggregati sui singoli bacini sono inoltre presentati in Tabella 7, assieme a valori notevoli quali il massimo e il minimo raggiunti nel bacino, ed inoltre la deviazione standard. Come si può notare in particolare dai valori di deviazione standard, molto più piccoli del valore medio per tutti i bacini e tutte le stagioni, la variabilità spaziale di R all'interno del bacino è molto ridotta.

Tabella 7. Valori notevoli di R_{seas} ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ yr^{-1}$) sul periodo di riferimento 1981-2020 per i bacini di interesse

DJF				
Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard
Fortore	43.7	35.8	51.8	3.0
Locone	34.7	30.1	37.8	2.2
Cogliandrino	53.2	45.2	65.2	6.5
Monte Cotugno	51.2	42.9	65.2	6.6
Traversa Sarmento	44.6	42.9	52.1	2.0
Traversa Sauro	33.9	29.7	46.1	5.6
Traversa Santa Venere	43.9	36.5	67.6	4.3
Pertusillo	47.7	32.1	66.7	6.7
Conza	64.2	55.3	75.5	8.0
Traversa Agri	45.0	40.0	53.2	4.0
MAM				
Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard
Fortore	47.5	37.3	58.2	4.7
Locone	38.5	34.6	43.6	1.6
Cogliandrino	63.1	54.0	77.4	7.5
Monte Cotugno	60.4	40.5	77.4	8.6
Traversa Sarmento	46.6	40.5	57.9	4.3
Traversa Sauro	38.8	32.6	53.4	7.0
Traversa Santa Venere	46.7	39.7	72.5	4.5
Pertusillo	56.6	37.2	73.2	7.5
Conza	69.4	60.3	80.1	8.2
Traversa Agri	53.2	46.6	65.2	5.6
JJA				



30

Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard
Fortore	36.9	22.6	51.0	9.0
Locone	24.1	22.9	27.9	0.8
Cogliandrino	34.4	29.3	49.8	6.9
Monte Cotugno	40.6	24.1	49.8	6.0
Traversa Sarmento	30.9	22.2	37.9	4.0
Traversa Sauro	19.5	15.7	30.3	4.8
Traversa Santa Venere	23.9	20.0	31.4	2.6
Pertusillo	26.3	18.2	31.1	3.0
Conza	30.8	29.0	34.0	1.7
Traversa Agri	29.5	22.5	43.9	6.4

SON

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard
Fortore	70.1	53.6	89.2	6.9
Locone	48.0	46.6	51.9	1.1
Cogliandrino	89.4	76.7	116.2	12.5
Monte Cotugno	97.2	75.5	116.2	11.3
Traversa Sarmento	86.5	75.5	103.1	7.3
Traversa Sauro	53.5	44.5	78.7	11.5
Traversa Santa Venere	64.6	49.9	117.0	10.1
Pertusillo	80.6	50.3	112.0	13.1
Conza	114.8	95.0	143.6	18.9
Traversa Agri	77.0	64.5	101.6	11.1



31

I valori di media spaziale presentati in Tabella 7 sono proprio i valori di riferimento di R_{seas} ; si ricorda che essi non costituiscono un'ensemble mean, poiché sono



CMCC Technical Notes

semplicemente il frutto dell'applicazione del modello in Eq. 7 utilizzando come input il dataset di precipitazione ERA5-Land.

Le Figure 9, 10 e 11 presentano invece le mappe di R-factor (ensemble mean EM) sotto gli scenari RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5; i valori aggregati sui bacini di interesse (media spaziale, valori massimo e minimo, deviazione standard e variazione percentuale) sono riportati, per le varie stagioni, nelle Tabelle 8, 9 e 10 rispettivamente.

Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi

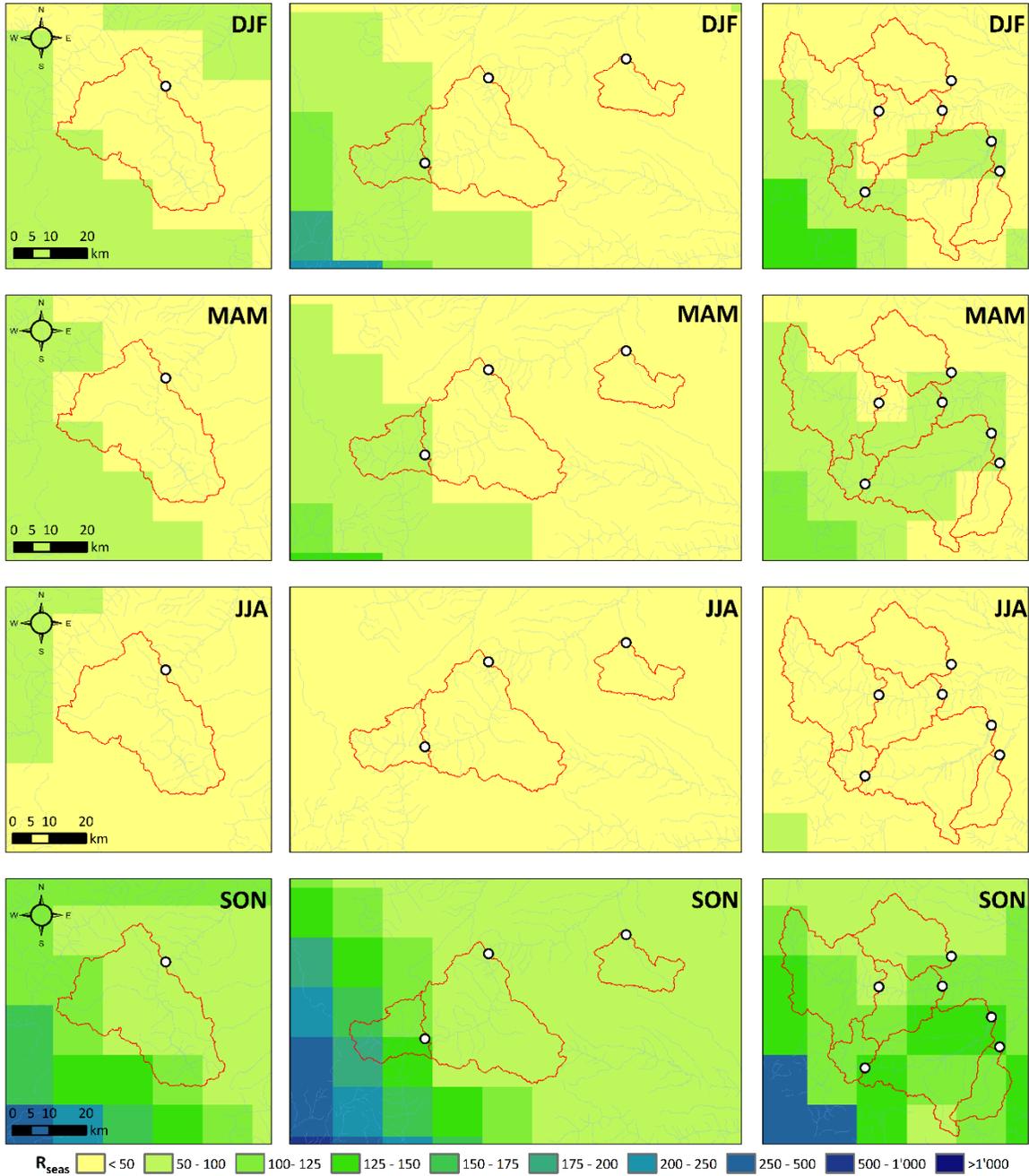
Figura 9: R-factor (erosività della pioggia) stagionale sui bacini di interesse per l'orizzonte futuro 2021-2050 e lo scenario RCP 2.6. A sinistra il bacino del Fortore; al centro i bacini di Conza, Traversa Santa Venere e Locone; a destra i bacini di Pertusillo,



33



Traversa Agri, Traversa Sauro, Cogliandrino, Monte Cotugno, Traversa Sarmento. Valori espressi in ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ seas}^{-1}$).



Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi



35

Figura 10: R-factor (erosività della pioggia) stagionale sui bacini di interesse per l'orizzonte futuro 2021-2050 e lo scenario RCP 4.5. A sinistra il bacino del Fortore; al centro i bacini di Conza, Traversa Santa Venere e Locone; a destra i bacini di Pertusillo, Traversa Agri, Traversa Sauro, Cogliandrino, Monte Cotugno, Traversa Sarmento. Valori espressi in $(MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ seas^{-1})$.

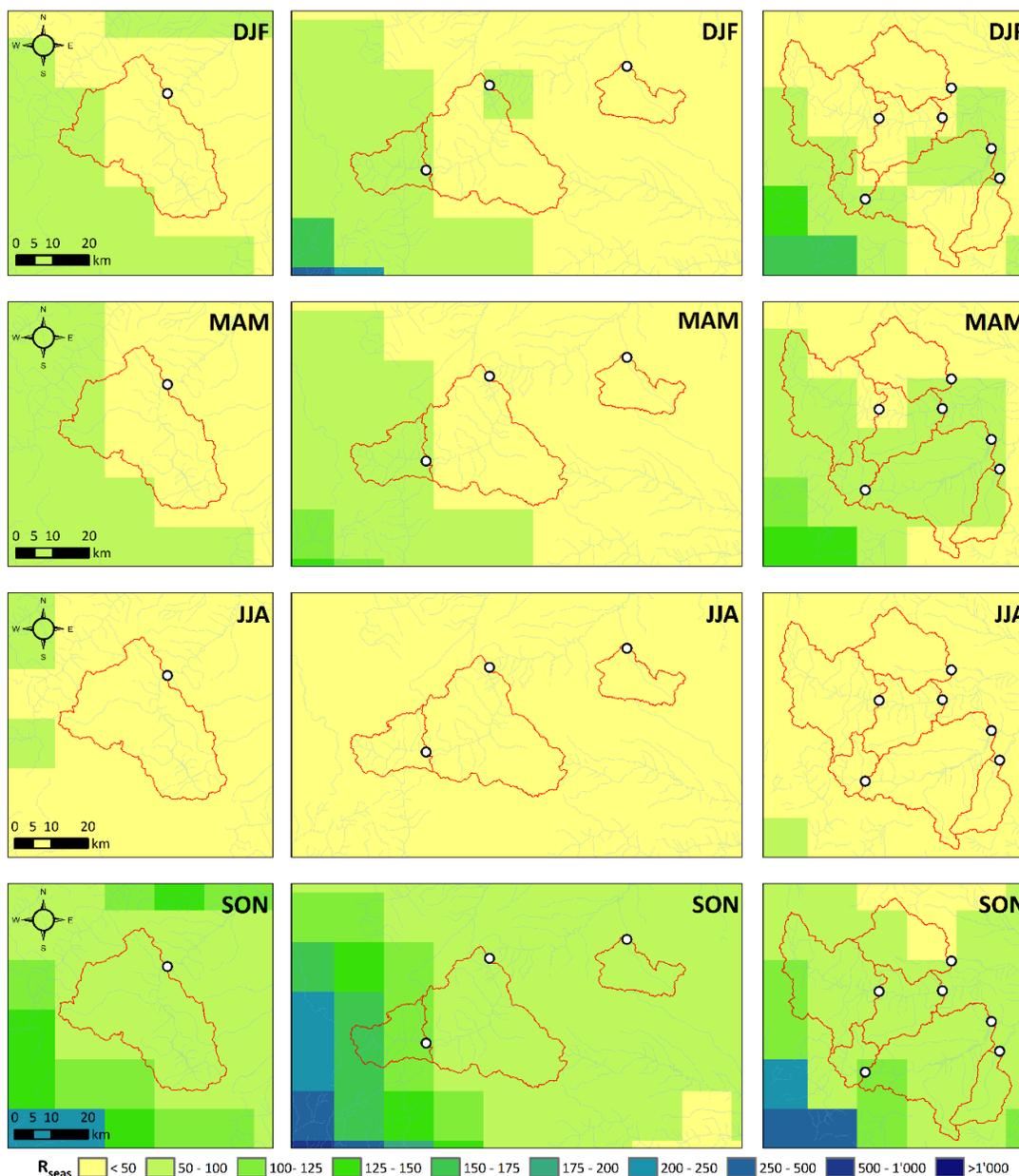
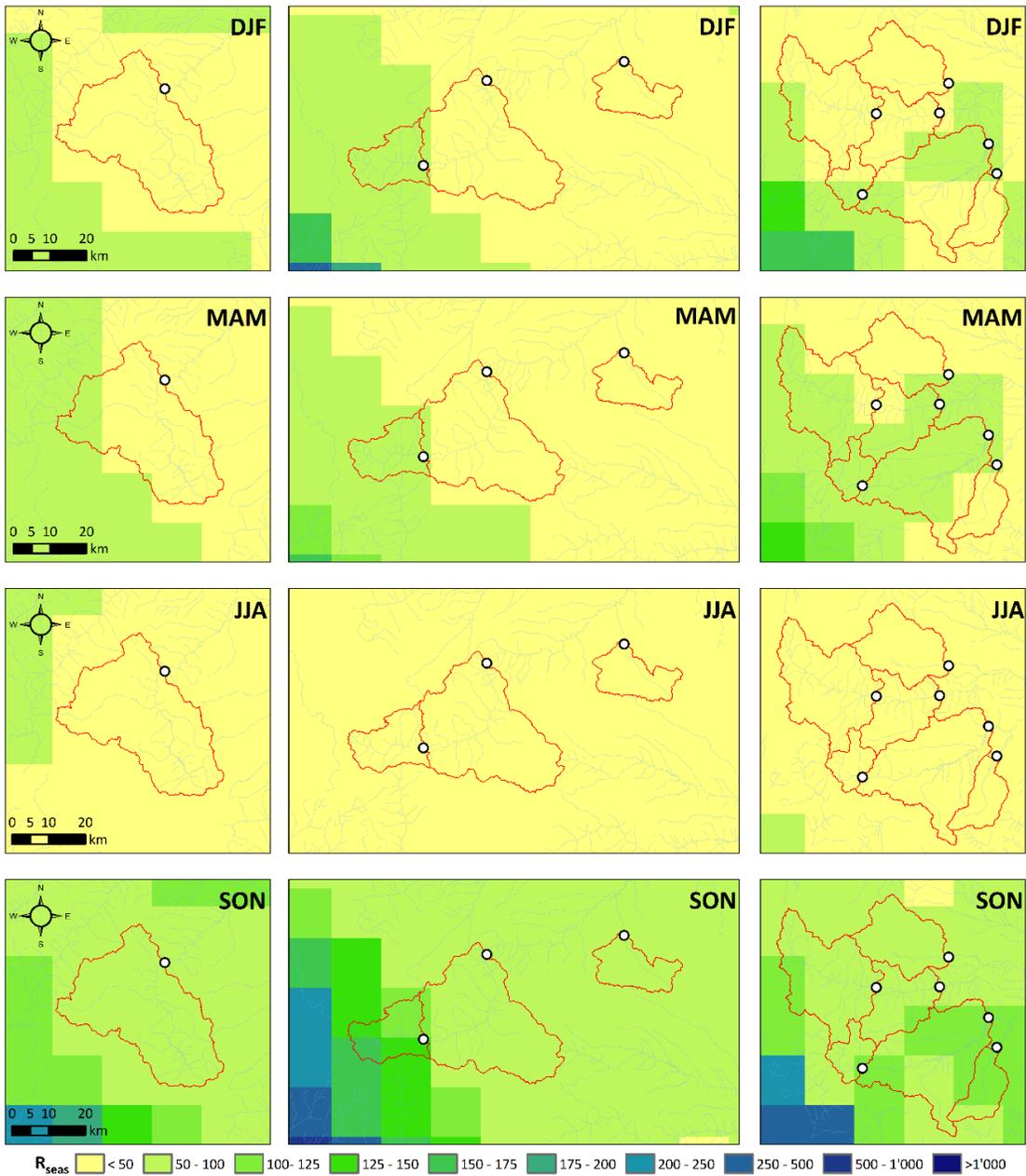




Figura 11: R-factor (erosività della pioggia) stagionale sui bacini di interesse per l'orizzonte futuro 2021-2050 e lo scenario RCP 8.5. A sinistra il bacino del Fortore; al centro i bacini di Conza, Traversa Santa Venere e Locone; a destra i bacini di Pertusillo, Traversa Agri, Traversa Sauro, Cogliandrino, Monte Cotugno, Traversa Sarmento. Valori espressi in $(MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ seas^{-1})$.





Nelle Tabelle 8, 9 e 10, per ogni bacino la media spaziale è dunque il valore sintetico sul bacino dell'ensemble mean EM di R_{seas} sull'orizzonte futuro 2021-2050; la deviazione standard riportata rappresenta la sua variabilità spaziale, mentre la deviazione standard DS associata all'uso di un ensemble di modelli climatici non è riportata in queste tabelle. Inoltre, nelle Tabelle da 8 a 10 la variazione percentuale di R_{seas} è ottenuta confrontando l'ensemble mean in queste tabelle con il valore di riferimento in Tabella 7. Non si tratta di un'approssimazione, poiché l'oggetto del confronto è un riferimento privo di variabilità.

Tabella 8. Valori notevoli di R_{seas} ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ seas^{-1}$) sull'orizzonte 2021-2050 e lo scenario RCP 2.6 per i bacini di interesse

DJF					
Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	45.7	37.5	58.6	2.8	4.5%
Locone	38.7	34.2	43.2	2.3	11.5%
Cogliandrino	55.0	43.9	73.6	9.6	3.4%
Monte Cotugno	52.0	39.9	73.6	9.5	1.6%
Traversa Sarmento	42.2	39.9	51.4	2.5	-5.4%
Traversa Sauro	33.0	29.3	46.0	5.8	-2.6%
Traversa Santa Venere	46.4	37.4	72.3	5.0	5.5%
Pertusillo	48.2	30.6	71.0	8.0	0.9%
Conza	69.4	59.6	80.3	8.8	8.1%
Traversa Agri	44.1	38.6	52.8	4.4	-2.0%
MAM					
Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	42.6	33.2	51.4	4.1	-10.4%
Locone	34.6	30.8	39.9	1.8	-10.2%



38

CMCC Technical Notes

Cogliandrino	58.3	52.1	68.6	5.3	-7.7%
Monte Cotugno	58.8	36.6	68.6	7.7	-2.6%
Traversa Sarmento	44.2	36.6	62.7	6.0	-5.1%
Traversa Sauro	39.7	32.8	55.9	7.7	2.3%
Traversa Santa Venere	44.3	38.7	67.4	4.1	-5.2%
Pertusillo	54.9	38.3	68.7	6.2	-3.1%
Conza	64.6	57.1	72.8	6.6	-7.0%
Traversa Agri	53.5	47.7	65.2	5.4	0.6%

JJA

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	33.3	18.5	48.6	9.3	-9.9%
Locone	23.7	20.3	30.1	1.2	-1.7%
Cogliandrino	31.9	27.9	45.5	6.0	-7.2%
Monte Cotugno	41.1	27.9	45.5	5.1	1.1%
Traversa Sarmento	36.1	28.0	45.5	4.2	17.1%
Traversa Sauro	19.5	15.5	29.9	4.8	-0.2%
Traversa Santa Venere	24.5	19.6	30.3	3.5	2.5%
Pertusillo	25.3	18.2	28.5	2.4	-3.6%
Conza	27.7	26.3	28.7	0.8	-10.1%
Traversa Agri	29.3	23.3	44.4	6.4	-0.9%

SON

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	93.2	72.5	130.1	10.1	33.1%
Locone	62.3	60.5	69.9	2.0	29.9%
Cogliandrino	113.2	101.7	138.1	11.9	26.6%
Monte Cotugno	122.3	98.8	138.1	11.1	25.9%

Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi

Traversa Sarmento	113.7	98.8	130.6	8.8	31.5%
Traversa Sauro	80.8	68.9	109.1	13.5	51.0%
Traversa Santa Venere	84.2	62.6	144.2	12.4	30.2%
Pertusillo	109.3	78.9	140.1	12.1	35.7%
Conza	144.4	121.8	183.0	22.9	25.7%
Traversa Agri	104.8	94.1	127.2	10.3	36.2%



Tabella 9. Valori notevoli di R_{seas} ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ seas^{-1}$) sull'orizzonte 2021-2050 e lo scenario RCP 4.5 per i bacini di interesse

DJF					
Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	45.3	37.5	52.7	3.1	3.5%
Locone	36.6	31.5	41.6	2.7	5.4%
Cogliandrino	53.5	45.1	67.2	7.1	0.6%
Monte Cotugno	51.8	41.0	67.2	8.0	1.2%
Traversa Sarmento	44.0	41.0	56.6	3.3	-1.2%
Traversa Sauro	35.1	31.4	47.2	5.5	3.5%
Traversa Santa Venere	46.1	37.4	71.3	5.0	4.9%
Pertusillo	48.3	32.9	68.0	6.8	1.1%
Conza	67.6	58.3	78.2	8.2	5.2%
Traversa Agri	45.6	41.5	53.1	3.6	1.5%
MAM					
Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	47.1	36.8	57.9	5.1	-0.8%
Locone	37.3	32.6	41.4	1.6	-3.1%



CMCC Technical Notes

Cogliandrino	61.3	55.8	75.7	6.5	-2.9%
Monte Cotugno	63.7	41.6	75.7	8.1	5.5%
Traversa Sarmiento	49.5	41.6	66.5	5.8	6.1%
Traversa Sauro	39.3	32.5	56.7	8.1	1.5%
Traversa Santa Venere	46.1	39.3	68.4	4.3	-1.2%
Pertusillo	55.3	37.4	68.9	6.8	-2.2%
Conza	66.1	58.7	74.7	6.6	-4.8%
Traversa Agri	55.5	47.3	70.0	6.8	4.2%

JJA

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	29.9	17.8	40.9	7.3	-18.9%
Locone	21.9	18.4	25.8	1.2	-9.3%
Cogliandrino	29.6	26.8	40.7	4.7	-14.2%
Monte Cotugno	39.6	27.2	44.2	4.7	-2.5%
Traversa Sarmiento	33.9	25.6	43.8	4.5	9.7%
Traversa Sauro	19.8	16.3	30.8	4.9	1.6%
Traversa Santa Venere	21.5	17.7	25.2	2.3	-10.2%
Pertusillo	23.6	18.1	27.6	2.0	-10.2%
Conza	24.8	24.1	27.3	1.1	-19.3%
Traversa Agri	29.5	23.8	44.2	6.2	0.0%

SON

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	82.5	64.5	105.1	7.2	17.8%
Locone	55.7	53.6	62.0	1.4	16.2%
Cogliandrino	87.4	76.2	104.5	9.6	-2.3%
Monte Cotugno	93.1	76.2	104.5	8.0	-4.2%

Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi

Traversa Sarmento	90.4	76.4	98.1	4.6	4.6%
Traversa Sauro	56.0	48.5	81.2	11.2	4.7%
Traversa Santa Venere	74.6	56.2	124.7	12.6	15.3%
Pertusillo	78.6	52.3	115.2	12.6	-2.4%
Conza	128.5	110.2	158.0	19.5	11.9%
Traversa Agri	77.0	64.9	96.7	9.9	0.0%



41

Tabella 10. Valori notevoli di R_{seas} ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ seas^{-1}$) sull'orizzonte 2021-2050 e lo scenario RCP 8.5 per i bacini di interesse

DJF					
Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	43.0	36.1	49.8	2.9	-1.7%
Locone	38.4	33.7	42.9	2.2	10.4%
Cogliandrino	51.6	45.2	64.0	6.1	-3.0%
Monte Cotugno	52.2	41.3	64.0	6.8	2.0%
Traversa Sarmento	45.9	41.3	56.8	2.9	2.9%
Traversa Sauro	35.6	31.8	49.2	6.1	5.0%
Traversa Santa Venere	44.5	36.9	66.9	4.3	1.2%
Pertusillo	46.8	33.1	64.8	6.0	-1.9%
Conza	63.7	54.9	73.6	7.8	-0.8%
Traversa Agri	46.5	41.6	54.6	4.2	3.3%
MAM					
Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	45.3	35.8	55.4	4.7	-4.7%
Locone	36.3	32.3	41.9	2.0	-5.7%



42

CMCC Technical Notes

Cogliandrino	57.8	51.9	68.6	5.4	-8.4%
Monte Cotugno	59.6	38.0	68.6	7.5	-1.3%
Traversa Sarmento	46.1	38.0	62.9	5.9	-1.2%
Traversa Sauro	37.6	31.3	55.8	8.2	-3.0%
Traversa Santa Venere	44.6	38.2	65.8	3.9	-4.5%
Pertusillo	52.9	35.2	66.7	6.7	-6.6%
Conza	63.0	56.1	70.4	6.1	-9.2%
Traversa Agri	52.7	44.4	66.7	6.9	-0.9%

JJA

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	32.9	19.5	47.6	8.7	-10.8%
Locone	26.2	21.3	33.8	1.5	8.8%
Cogliandrino	30.8	27.6	41.5	4.6	-10.5%
Monte Cotugno	37.8	25.0	42.3	4.2	-6.9%
Traversa Sarmento	30.7	23.9	39.5	4.0	-0.4%
Traversa Sauro	20.4	16.0	32.9	5.6	4.3%
Traversa Santa Venere	24.2	18.8	29.7	3.5	1.3%
Pertusillo	25.2	18.8	28.5	2.1	-4.1%
Conza	28.3	26.4	31.2	1.4	-8.0%
Traversa Agri	29.8	23.7	42.3	5.9	1.0%

SON

Invaso	Media spaziale	Minimo	Massimo	Deviazione standard	Variazione
Fortore	78.6	61.5	99.2	6.5	12.1%
Locone	54.3	51.8	61.0	1.4	13.2%
Cogliandrino	93.0	83.6	113.7	9.9	4.0%
Monte Cotugno	102.1	82.4	113.7	8.6	5.1%

Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi

Traversa Sarmento	101.7	82.4	110.3	5.6	17.6%
Traversa Sauro	62.2	52.3	92.2	13.5	16.2%
Traversa Santa Venere	76.0	58.0	125.8	10.9	17.5%
Pertusillo	85.6	58.3	116.9	11.6	6.2%
Conza	126.5	108.5	154.2	18.0	10.1%
Traversa Agri	85.8	73.5	105.5	10.3	11.5%

Le Tabelle 8, 9 e 10 (deviazione standard) confermano, innanzitutto, l'elevata omogeneità spaziale di R-factor, coerente con le ridotte dimensioni dei bacini di interesse rispetto alla risoluzione orizzontale del dataset. In secondo luogo, i valori ottenuti mostrano l'elevato effetto di compensazione del processo di erosione alla scala stagionale. Se, infatti, le variazioni attese sono quasi sempre negative (soprattutto in primavera ed estate) o comunque di modesta entità (soprattutto in inverno), sono visibili forti variazioni positive per tutti i bacini e per tutti gli scenari in autunno. Ciò implica che, se i valori annui di variazione (ottenibili, con qualche approssimazione, sommando le variazioni stagionali) risultano generalmente negativi, indice di una diminuzione del pericolo di erosione (almeno per la quota parte legata all'azione della pioggia), sono in realtà da attendersi forti incrementi di questo pericolo concentrati nella stagione annuale. È da segnalare che tale risultato è estremamente coerente con le variazioni positive attese sugli indicatori di precipitazione estrema per l'area del Distretto, anch'esse particolarmente elevate nella stagione autunnale. Tale coerenza testimonia l'elevata efficacia del modello empirico contenuto nell'Eq. 7, che, pur facendo riferimento ai cumulati mensili di pioggia, riesce a cogliere, grazie alla calibrazione effettuata su base mensile (Tabella 1) il legame fisico tra l'erosività espressa da R – factor e le caratteristiche dei singoli eventi di pioggia erosivi.



6.1 ANALISI DELL'INCERTEZZA ASSOCIATA ALLA STIMA DELL'EROSIVITÀ

Nella Tabella 12 sono riportate le variazioni attese in futuro rispetto al periodo presente, ed in particolare l'ensemble mean EM della variazione (si tratta della media spaziale dell'ensemble mean della variazione), la sua deviazione standard DS (si tratta quindi della media spaziale della deviazione standard della variazione) e il coefficiente di variazione CV. I valori di riferimento e quelli di EM della variazione sono già riportati nelle tabelle precedenti. Si confronti ad esempio la Tabella 12 (pannello RCP 2.6. stagione DJF) con la Tabella 8, per la stagione DJF. In particolare, "EM" in Tabella 12 coincide con la "variazione" della Tabella 8; invece, "DS" in Tabella 12 costituisce una nuova informazione. Non sono presenti, nella Tabella 12, informazioni circa la variabilità spaziale di EM (in altre parole, la dispersione spaziale della media) né di DS (in altre parole, la dispersione spaziale della deviazione standard); l'informazione di variabilità spaziale è invece disponibile su richiesta.

Per la Tabella 12 sono state utilizzate varie campiture per dare un'idea immediata dei risultati. Per i valori di riferimento di R-factor è stata considerata una campitura verde in cui il riempimento completo corrisponde a un valore maggiore o uguale a $60 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ seas}^{-1}$. Per l'ensemble mean della variazione, è stata utilizzata una campitura rosso-blu in cui il rosso pieno corrisponde a una variazione (diminuzione) minore o uguale al -20%, il blu pieno corrisponde a una variazione (aumento) maggiore o uguale a +20%. Il CV presenta una campitura gialla in cui il massimo riempimento corrisponde a un valore maggiore o uguale a 1.5. Tutte le soglie sono state stabilite arbitrariamente in base all'insieme delle realizzazioni. Una sintesi dei risultati ottenuta mediando le varie quantità tra i diversi bacini è mostrata in Tabella 14, al fine di trarre conclusioni generali sull'effetto dei diversi scenari sul territorio.

Dall'analisi delle Tabelle 12 e 13 si evince che le variazioni attese presentano un considerevole pattern stagionale, essendo quasi sempre negative in primavera ed estate, quasi sempre positive in autunno e inverno. Tuttavia, in inverno l'entità delle variazioni è piuttosto bassa, sebbene associata a valori di riferimento ragguardevoli,



mentre la stagione che presenta in valore assoluto le variazioni maggiori è l'autunno. Confrontando gli scenari, per l'autunno (dove le variazioni positive sono le maggiori) lo scenario RCP 2.6 appare il più critico, seguito da RCP 8.5 e infine da RCP 4.5; lo stesso pattern si ripete in primavera. Al contrario, in estate le maggiori variazioni si hanno proprio sotto RCP 4.5, mentre in inverno si ha una sostanziale equivalenza, in media, tra RCP 4.5 e RCP 2.6. Le variazioni positive autunnali appaiono ancor più significative se si osserva che esse sono sempre associate a valori di riferimento alti; il contrario accade per le variazioni negative estive, dove invece i valori di riferimento sono i minimi nell'anno.

Tabella 12. Per ciascun bacino, valori di riferimento di R_{seas} , in $[MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ seas^{-1}]$; ensemble mean EM della variazione attesa di R_{seas} , in [%], deviazione standard DS



associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione. Tutti i valori sono aggregati sul bacino.

DJF										
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Fortore	43.7	4.5	18.7	4.1	3.5	13.1	3.7	-1.7	15.9	9.3
Locone	34.7	11.5	19.3	1.7	5.4	14.9	2.7	10.4	26.5	2.5
Cogliandrino	53.2	3.4	9.9	2.9	0.6	16.4	29.0	-3.0	16.3	5.5
Monte Cotugno	51.2	1.6	16.0	9.7	1.2	22.7	19.4	2.0	21.9	10.8
Traversa Sarmento	44.6	-5.4	23.4	4.3	-1.2	25.6	20.9	2.9	26.7	9.2
Traversa Sauro	33.9	-2.6	28.5	11.0	3.5	24.4	7.0	5.0	25.5	5.1
Traversa Santa Venere	43.9	5.5	16.8	3.0	4.9	14.0	2.9	1.2	17.3	14.5
Pertusillo	47.7	0.9	13.2	14.8	1.1	17.7	16.1	-1.9	16.4	8.5
Conza	64.2	8.1	17.7	2.2	5.2	12.2	2.4	-0.8	17.1	20.4
Traversa Agri	45.0	-2.0	21.8	11.1	1.5	22.3	15.1	3.3	24.1	7.2
MAM										
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Fortore	47.5	-10.4	13.7	1.3	-0.8	17.7	22.3	-4.7	15.2	3.2
Locone	38.5	-10.2	11.1	1.1	-3.1	14.6	4.7	-5.7	15.6	2.7
Cogliandrino	63.1	-7.7	14.3	1.9	-2.9	18.1	6.3	-8.4	19.3	2.3
Monte Cotugno	60.4	-2.6	14.4	5.4	5.5	19.3	3.5	-1.3	19.3	15.4
Traversa Sarmento	46.6	-5.1	12.7	2.5	6.1	20.8	3.4	-1.2	17.2	14.6
Traversa Sauro	38.8	2.3	10.3	4.4	1.5	19.7	13.1	-3.0	16.4	5.5
Traversa Santa Venere	46.7	-5.2	11.8	2.3	-1.2	16.1	13.1	-4.5	16.5	3.6
Pertusillo	56.6	-3.1	11.5	3.8	-2.2	19.0	8.5	-6.6	18.2	2.8
Conza	69.4	-7.0	13.6	1.9	-4.8	15.9	3.3	-9.2	17.8	1.9
Traversa Agri	53.2	0.6	9.4	15.1	4.2	20.5	4.9	-0.9	18.7	21.0
JJA										
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Fortore	36.9	-9.9	24.0	2.4	-18.9	27.0	1.4	-10.8	26.5	2.4
Locone	24.1	-1.7	21.2	12.7	-9.3	38.4	4.1	8.8	41.3	4.7
Cogliandrino	34.4	-7.2	18.0	2.5	-14.2	42.3	3.0	-10.5	31.5	3.0
Monte Cotugno	40.6	1.1	27.1	25.2	-2.5	56.7	22.6	-6.9	34.6	5.0
Traversa Sarmento	30.9	17.1	36.0	2.1	9.7	53.2	5.5	-0.4	33.1	78.1
Traversa Sauro	19.5	-0.2	17.4	74.1	1.6	61.7	38.6	4.3	35.3	8.2
Traversa Santa Venere	23.9	2.5	20.8	8.2	-10.2	42.2	4.1	1.3	35.3	27.1
Pertusillo	26.3	-3.6	13.7	3.8	-10.2	48.0	4.7	-4.1	36.8	9.0
Conza	30.8	-10.1	20.5	2.0	-19.3	31.0	1.6	-8.0	27.8	3.5
Traversa Agri	29.5	-0.9	18.6	20.4	0.0	66.8	1474.0	1.0	39.7	38.4
SON										
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Fortore	70.1	33.1	37.6	1.1	17.8	25.0	1.4	12.1	25.4	2.1
Locone	48.0	29.9	28.9	1.0	16.2	23.9	1.5	13.2	22.6	1.7
Cogliandrino	89.4	26.6	36.2	1.4	-2.3	22.5	9.6	4.0	18.8	4.7
Monte Cotugno	97.2	25.9	49.6	1.9	-4.2	26.9	6.4	5.1	26.4	5.2
Traversa Sarmento	86.5	31.5	48.0	1.5	4.6	34.6	7.6	17.6	33.2	1.9
Traversa Sauro	53.5	51.0	46.1	0.9	4.7	27.4	5.8	16.2	22.5	1.4
Traversa Santa Venere	64.6	30.2	40.0	1.3	15.3	21.4	1.4	17.5	21.1	1.2
Pertusillo	80.6	35.7	46.8	1.3	-2.4	20.9	8.6	6.2	18.8	3.0
Conza	114.8	25.7	34.5	1.3	11.9	22.2	1.9	10.1	17.3	1.7
Traversa Agri	77.0	36.2	46.3	1.3	0.0	27.5	1554.3	11.5	23.9	2.1



L'incertezza associata a tutte le stime è alta, come testimoniato dagli alti valori di CV sia in Tabella 12 sia in Tabella 13. A riprova di quanto illustrato nella Nota metodologica, valori alti di CV sono associati a valori di EM molto piccoli in valore assoluto: nei casi limite di EM tendente a zero, vi sono due valori di CV “stranamente” elevati, corrispondenti a Traversa Agri sotto RCP 4.5 per l'estate e l'autunno. Questi due valori sono stati esclusi dalla sintesi in Tabella 13. Appare particolarmente interessante notare, dalla Tabella 12 (ma anche dalla Tabella 13) che le variazioni maggiori (che si verificano quasi sempre in autunno per le variazioni positive sotto tutti gli scenari, in estate per quelle negative sotto RCP 4.5) sono quelle associate alla minore incertezza, ovvero ai valori più bassi di CV. Inoltre, valori molto bassi di CV sono spesso associati alle variazioni attese sotto RCP 2.6, che, però, presentano un'ulteriore fonte di incertezza data dal minor numero di catene di simulazione climatica disponibili.

Il bacino che presenta il maggiore aumento di R-factor è Traversa Sauro sotto RCP 2.6 in autunno: per questo scenario, comunque, tutti i bacini presentano un aumento consistente. Il bacino che presenta la maggiore diminuzione di R-factor è Conza sotto RCP 4.5 in primavera. La condizione per cui le variazioni attese sono mediamente trascurabili per tutti i bacini è l'inverno sotto tutti gli scenari (specialmente sotto RCP 4.5), seguita dalla primavera sotto RCP 4.5.

Tabella 13. Mediamente sul territorio (tra i bacini), valori di riferimento di R_{seas} , in [MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ seas⁻¹]; ensemble mean EM della variazione attesa di R_{seas} , in [%] e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Stagione	Riferimento (1981-2010)	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
DJF	46.2	2.6	18.5	6.5	2.6	18.3	11.9	1.7	20.8	9.3
MAM	52.1	-4.8	12.3	4.0	0.2	18.2	8.3	-4.5	17.4	7.3
JJA	29.7	-1.3	21.7	15.3	-7.3	46.7	9.5	-2.5	34.2	17.9
SON	78.2	32.6	41.4	1.3	6.2	25.2	4.9	11.4	23.0	2.5



7. EROSIONE DEL SUOLO

Sovrapponendo le mappe di R-factor (presente e futuro) alle mappe descrittive dei fattori LS, K, C e P, si ottengono le mappe di Soil Loss (Eq. 1) per il periodo di riferimento e per l'orizzonte futuro. Data la grande differenza tra le risoluzioni orizzontali dei vari fattori della RUSLE, appare più corretto fornire non la distribuzione spaziale, bensì i valori di Soil Loss aggregati alla scala di bacino. La Tabella 14 mostra quindi, per ciascuno dei bacini di interesse, la media spaziale di Soil Loss sul periodo di riferimento 1981-2010 e le variazioni attese nell'orizzonte futuro 2021-2050 per gli scenari RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5 nelle varie stagioni. La variazione in tabella è dunque da intendersi come media spaziale dell'ensemble mean della variazione.

Infine, è proposta una classificazione dei bacini in base al valore di Soil Loss medio annuo (Figura 12) e in base della variazione attesa nei vari scenari di concentrazione (Figura 13). La classificazione è proposta per la sola stagione autunnale, in cui sono massimi sia i valori di riferimento dell'erosione, sia le variazioni attese in futuro.

Figura 12: Classificazione dei bacini in base a SL (verde intenso = SL minimo, rosso intenso = SL massimo) per il periodo di riferimento 1981-2010 nella stagione autunnale. A sinistra il bacino del Fortore; al centro i bacini di Conza, Traversa Santa Venere e Locone; a destra i bacini di Pertusillo, Traversa Agri, Traversa Sauro, Cogliandrino, Monte Cotugno, Traversa Sarmento.





Tabella 14. Per ciascun bacino, valori medi (spaziali e in termini di ensemble mean di R-factor) di SL di riferimento, in (ton ha⁻¹ seas⁻¹) e variazioni percentuali attese, in [%], per i tre scenari.

Invaso	DJF				MAM			
	Riferimento (1981-2010)	Variazione RCP 2.6	Variazione RCP 4.5	Variazione RCP 8.5	Riferimento (1981-2010)	Variazione RCP 2.6	Variazione RCP 4.5	Variazione RCP 8.5
Fortore	0.4	4.8	3.6	-1.5	0.4	-10.3	-0.7	-4.6
Locone	0.2	11.5	5.3	10.5	0.2	-10.3	-3.1	-5.8
Cogliandrino	0.2	4.2	0.9	-2.4	0.2	-7.8	-1.9	-8.3
Monte Cotugno	0.3	0.5	2.3	3.7	0.3	0.1	7.5	1.4
Traversa Sarmiento	0.2	-5.1	-0.7	3.3	0.3	-4.1	6.9	-0.2
Traversa Sauro	0.2	-2.5	3.7	5.2	0.3	2.2	1.4	-3.1
Traversa Santa Venere	0.3	5.8	5.2	1.3	0.3	-5.5	-1.0	-4.4
Pertusillo	0.2	1.1	1.2	-1.9	0.2	-3.1	-2.4	-6.7
Conza	0.5	8.0	5.2	-0.8	0.5	-6.9	-4.7	-9.0
Traversa Agri	0.2	-1.8	1.7	3.9	0.2	1.3	4.4	-0.2
Invaso	JJA				SON			
	Riferimento (1981-2010)	Variazione RCP 2.6	Variazione RCP 4.5	Variazione RCP 8.5	Riferimento (1981-2010)	Variazione RCP 2.6	Variazione RCP 4.5	Variazione RCP 8.5
Fortore	0.3	-9.4	-18.8	-10.6	0.6	32.4	18.1	12.3
Locone	0.1	-1.9	-9.1	8.5	0.3	30.4	16.2	13.2
Cogliandrino	0.1	-7.1	-13.8	-11.0	0.3	25.9	-3.6	3.5
Monte Cotugno	0.2	5.1	2.0	-3.5	0.5	26.6	-3.9	5.5
Traversa Sarmiento	0.2	17.6	10.4	0.0	0.5	31.3	3.7	16.7
Traversa Sauro	0.1	-0.3	1.9	4.1	0.4	51.4	5.1	16.4
Traversa Santa Venere	0.2	3.2	-9.9	2.2	0.4	29.8	16.0	17.6
Pertusillo	0.1	-3.8	-10.6	-4.2	0.3	35.0	-2.4	6.0
Conza	0.2	-9.7	-19.1	-7.5	0.8	25.9	12.2	10.4
Traversa Agri	0.1	-0.6	0.6	2.3	0.3	36.8	0.3	12.3

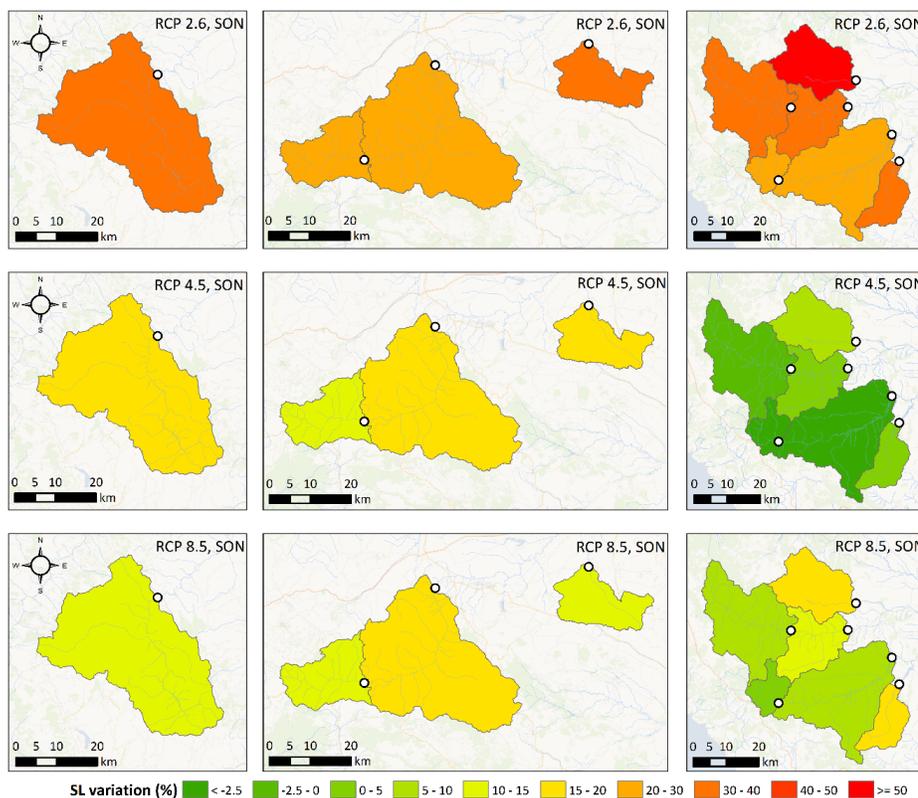
Per quanto riguarda la condizione attuale (Figura 12), Conza e Fortore risultano i bacini caratterizzati dai maggiori valori di erosione su tutte le stagioni, con i valori più alti in autunno (ciò vale per tutti i bacini); Sarmiento e Monte Cutugno risultano avere valori intermedi; tutti gli altri bacini presentano i valori minimi. Si nota comunque dalla Tabella 14 che, per la stagione autunnale, in sostanza i valori correnti di SL risultano abbastanza omogenei, con un range complessivo di valori che va da 0.3 (Locone, Cogliandrino, Pertusillo e Traversa Agri) a 0.8 (Conza) tonnellate per ettaro all'anno. Per quanto

CMCC Technical Notes

attiene le variazioni attese in futuro (Figura 13), si nota come lo scenario RCP 2.6 sia decisamente il più gravoso, con valori autunnali di aumento previsti a breve termine compresi tra il 25.9% (Cogliandrino e Conza) e il 51.4% (Traversa Sauro). La situazione appare quindi alquanto allarmante in particolare per il bacino sotteso alla Diga di Conza, che presenta i massimi valori di erosione nel periodo di riferimento abbinati a una variazione futura tra le maggiori. Per gli altri scenari, le variazioni attese sono sempre in aumento ma più contenute, con lo scenario RCP 4.5 appena più gravoso per Fortore e Locone, e lo scenario RCP 8.5 leggermente più gravoso per tutti i bacini del pannello a destra in Figura 13.

Figura 13: Classificazione dei bacini in base alla variazione di SL per l'orizzonte futuro 2021-2050 nella stagione autunnale, per gli scenari RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5. A sinistra il bacino del Fortore; al centro i bacini di Conza, Traversa Santa Venere e Locone; a destra i bacini di Pertusillo, Traversa Agri, Traversa Sauro, Cogliandrino, Monte Cotugno, Traversa Sarmento.

Variazioni attese sull'erosione dei suoli per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di interrimento degli invasi



8. DISCUSSIONE

L'analisi dell'erosione presente e futura nei bacini di interesse di AQP prospetta uno scenario controintuitivo, in cui giocano un ruolo importante ma di non facile interpretazione sia le variazioni attese nei cumuli di precipitazione, sia le variazioni attese negli estremi, con un ruolo fondamentale della stagionalità. Sotto l'ipotesi che l'unico fattore su cui il cambiamento climatico possa avere una influenza sia R-factor, e accettate le assunzioni e le semplificazioni alla base dell'approccio RUSLE, in termini di Soil Loss (che, si ricorda, rappresenta il materiale potenzialmente mobilitato dal processo di erosione da pioggia) i bacini analizzati presentano un comportamento spazialmente omogeneo. Essi infatti sono caratterizzati da valori di riferimento di SL molto simili, e sono attese variazioni future, a parità di scenario di concentrazione, molto simili. Tali variazioni vanno nel senso di un aumento di SL soprattutto nella stagione



CMCC Technical Notes

autunnale e soprattutto sotto lo scenario RCP 2.6 e, secondariamente, RCP 8.5. Sono invece attese variazioni anche negative soprattutto in estate e in primavera, e soprattutto sotto lo scenario RCP 2.6.

Il pattern stagionale di erosione, legato, essenzialmente, al ciclo stagionale dell'erosività o R-factor (essendo gli altri parametri statici), mette in evidenza i limiti degli approcci correnti per la valutazione e il monitoraggio dell'erosione, che fanno solitamente riferimento alle sole medie annuali. I maggiori pericoli attesi per l'autunno sono concordi da un lato con gli aumenti nei cumulati attesi sull'area nella stessa stagione (quando invece, in termini medi annui, i cumulati sono attesi diminuire), e ciò è frutto della semplificazione del processo rappresentata dall'Eq. 7; dall'altro lato sono concordi con gli aumenti attesi nella criticità degli eventi estremi, sempre nella stessa stagione, e ciò è indicativo del fatto che la calibrazione stagionale (anzi, mensile), dell'esponente C_m dell'Eq. 7 ben rappresenta la dipendenza dell'energia erosiva delle caratteristiche degli eventi di pioggia, che sono significativamente diverse da stagione a stagione. I due aspetti del fenomeno si combinano in modo non sempre intuitivo a causa della non-linearità dell'Eq. 7, con le variazioni attese di precipitazione amplificate più o meno dall'esponente C_m nella loro trasformazione in variazioni di erosività e quindi di erosione.

Una volta accettate le semplificazioni insite nel modello empirico descritto dall'Eq. 7, le catene di simulazione climatica utilizzate in input (Tabella 2) sono estremamente concordi nella stima dei valori stagionali di R-factor da attendersi per l'orizzonte futuro (dati disponibili su richiesta). Tuttavia, il metodo qui utilizzato per produrre il dataset di erosività e, di conseguenza, di erosione, è diverso da quello ufficiale JRC (Panagos et al. 2015a). Se quindi si volesse ritenere dalla presente analisi la sola informazione legata alla variazione futura, rispetto al periodo presente, bisogna ricordare che tale informazione è caratterizzata da una notevole incertezza, essendo le variazioni medie attese molto basse, e in alcuni casi prossime allo zero.

Le incertezze associate alla stima delle variazioni maggiori, ed in particolare quelle positive, sono significativamente basse: ciò conferisce a tali stime una elevata affidabilità. È però da notare che le variazioni positive massime si hanno sotto lo scenario RCP 2.6, per il quale sono disponibili solo 5 catene di simulazione climatica, cosa che rende le stime fatte per questo scenario poco robuste. Accettate queste limitazioni, il fatto che lo scenario per il quale si hanno i maggiori aumenti di erosione sia proprio RCP 2.6, quello cioè meno gravoso in termini di concentrazione di gas serra, ribadisce la necessità di intraprendere nell'immediato azioni di adattamento che consentano di gestire quei cambiamenti fisici che, dunque, non sono più evitabili. Si nota, comunque, che la maggiore criticità dello scenario RCP 2.6 ha luogo nell'orizzonte a breve termine, mentre nulla dicono le analisi presentate riguardo l'orizzonte futuro a lungo termine, in cui la concentrazione di gas serra va stabilizzandosi su valori ben inferiori rispetto a RCP 8.5.

Le analisi testimoniano che il bacino che presenta il maggiore valore di Soil Loss è Conza, seguito dal bacino del Fortore. Ciò è particolarmente concorde con valutazioni legate alla natura dei suoli. Infatti, il bacino dell'invaso di Conza ricade in terreni di natura prevalentemente argillosa (il bacino di Conza interessa le unità litostratigrafiche sin-postorogeniche del Supersistema di Ariano Irpino), che risultano essere fortemente erodibili, anche per basse velocità di ruscellamento stante la granulometria delle particelle che caratterizzano i terreni limo-argillosi (< 0.02 mm - Classificazione AGI), in particolare dopo periodi di essiccamento (stagione estiva o lunghi periodi secchi) favorito dalla formazione di *mud cracks*. Invece, il bacino del Fortore interessa prevalentemente una Formazione sabbioso-arenacea e argilloso-marnosa, talora con livelli e lenti di calcarenite e in minor misura da arenarie tenere o cementate, quindi trattasi di terreni con granulometria più grossolana ed in parte cementati.

Le informazioni di dettaglio, soprattutto riguardanti la variabilità spaziale, troppo gravose e poco utili da inserire nel testo principale sono disponibili su richiesta agli autori. In particolare, è possibile osserare da



CMCC Technical Notes

questo materiale, per i tre scenari, la mappa della deviazione standard associata alla stima della variabile R_{seas} sull'orizzonte futuro 2021-2050; è altresì possibile, per i tre scenari, osservare la mappa dell'ensemble mean EM e della deviazione standard DS della variazione attesa di R_{seas} . Ad ultimo, è possibile osservare per ciascun bacino e ciascuno scenario, oltre ai valori di riferimento di R_{seas} , i valori (dimensionali) attesi in futuro di R_{seas} . Si nota, in particolare, che i valori di CV associati alla stima del valore di erosività da attendersi in futuro sono estremamente bassi.

9. CONCLUSIONI E MESSAGGI CHIAVE

L'erosione dei suoli è stata presa in considerazione in questa attività come efficace proxy dei pericoli connessi alla degradazione dei suoli e al dilavamento dei bacini in occasione di eventi di pioggia, con produzione di sedimenti il cui arrivo negli invasi oggetto di studio potrebbe comportare fenomeni di interrimento con conseguente riduzione della capacità di invaso. **Un aumento futuro dell'erosione SL (generata da un aumento dell'erosività o R-factor, mentre i fattori legati al suolo sono considerati costanti) indica dunque un aumento del pericolo di interrimento per effetto del cambiamento climatico.** Al contrario, una diminuzione di SL (generata da una diminuzione di R-factor) comporta invece una diminuzione di questo pericolo per effetto del cambiamento climatico.

A livello medio annuo e mediato sull'intero territorio (mediando cioè i valori in Tabella 13), **lo scenario RCP 2.6 comporta il maggiore aumento di erosività (+7.3%)**, seguito da RCP 8.5 (+1.5%) e infine da RCP 4.5 (+0.4%). Scendendo nel dettaglio stagionale, sempre mediamente sul territorio, l'autunno è certamente la stagione in cui l'aumento del pericolo è massimo (+32.6% sotto RCP 2.6, +11.4% sotto RCP 8.5, +6.2% sotto RCP 4.5): la variazione è tanto più significativa se si considera che essa è associata a valori di riferimento che sono i massimi nell'anno. Le variazioni meno rilevanti (che, per altro, indicano una diminuzione del pericolo) si verificano invece in estate, e sono massime sotto RCP 4.5 (-7.3%), seguite da RCP 8.5 (-2.5%) e infine RCP



2.6 (-1.3%): esse non solo sono piccole in valore assoluto, ma sono anche associate a valori di riferimento che sono i minimi nell'anno.

Il bacino che presenta il maggiore aumento di erosività è Traversa Sauro (+51% sotto RCP 2.6 in autunno), che però presenta un valore di riferimento tra i più bassi tra tutti i bacini. I bacini che invece presentano i valori di riferimento più alti sono **Conza e Monte Cotugno: per il primo è previsto un aumento di erosività del +25.7% sotto RCP 2.6, +11.9% sotto RCP 4.5 e +10.1% sotto RCP 8.5; per il secondo è previsto un aumento del +25.9% sotto RCP 2.6, +5.1% sotto RCP 8.5 e addirittura una diminuzione del -4.2% sotto RCP 4.5.** Tutti i valori attesi per i vari bacini sono riportati in Tabella 12.

Tutte le variazioni attese appena riportate sono associate ad incertezze, in termini di coefficiente di variazione, molto alte. Il motivo di ciò va ricercato soprattutto nella decisione di rappresentare i risultati come variazioni, e nel ridotto numero di catene di simulazione climatica utilizzate. Le motivazioni, le assunzioni e le limitazioni associate ai risultati qui presentati sono ampiamente descritte nella Nota metodologica e nella Discussione. Tuttavia è significativo notare che l'incertezza è particolarmente ridotta quando le variazioni sono, in valore assoluto, elevate. In altre parole, **c'è maggiore confidenza sulle stime per quei bacini e scenari in cui è previsto un forte aumento o una forte diminuzione del pericolo.**

Infine, è utile notare che, in media sul territorio, i maggiori aumenti di erosione sono previsti in quella stagione (l'autunno) per la quale i valori di riferimento sono già elevati. In altre parole, **il pericolo aumenta per quella stagione in cui il pericolo è già oggi elevato.** Andando ad esaminare i singoli bacini, tuttavia, non è necessariamente vero che il maggiore aumento di erosione si abbia laddove vi è già oggi il maggiore valore di riferimento.

BIBLIOGRAPHY

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>

Meusburger, K., Steel, A., Panagos, P., Montanarella, L., & Alewell, C. (2012). Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 167-177. <https://doi.org/10.5194/hess-16-167-2012>

Padulano, R., Rianna, G., & Santini, M. (2021). Datasets and approaches for the estimation of rainfall erosivity over Italy: A comprehensive comparison study and a new method. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 100788. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100788>

Padulano, R., Santini, M., Mancini, M., Stojiljkovic, M., & Rianna, G. (2023). Monthly to seasonal rainfall erosivity over Italy: Current assessment by empirical model and future projections by EURO-CORDEX ensemble. *CATENA*, 223, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106943>

Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., Alewell, C. Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS, *Science of Total Environment*, 479–480 (2014) pp. 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.010>

Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rousseva, S., ... & Alewell, C. (2015a). Rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment*, 511, 801-814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., ... & Alewell, C. (2015b). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental science & policy*, 54, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>



Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K. (2015c) A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*, 5: 117-126. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, C., Alewell, C., Lugato, E., Montanarella, L., (2015d). Estimating the soil erosion cover-management factor at European scale. *Land Use policy journal*. 48C, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Van Der Zanden, E. H., Poesen, J., & Alewell, C. (2015e). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental science & policy*, 51, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012>

Panagos, P., Ballabio, C., Meusburger, K., Spinoni, J., Alewell, C., & Borrelli, P. (2017). Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. *Journal of Hydrology*, 548, 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.006>

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture handbook*, 703.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.