

# Un indice per la valutazione della connettività dei sedimenti: applicazione ad un bacino montano sistemato

Antonino Labate<sup>1</sup>, Maria Francesca Cataldo<sup>1</sup>, Giuseppe Bombino<sup>1</sup>,  
Demetrio Antonio Zema<sup>1</sup>, Carolina Boix-Fayos<sup>2</sup> e Joris de Vente<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento AGRARIA, Università Mediterranea di Reggio Calabria

<sup>2</sup> Departamento de Conservación de Suelos y Agua y Manejo de Residuos Orgánicos

## 1. Introduzione

La produzione e la mobilità dei sedimenti, pur avendo origine all'interno dei bacini idrografici, esercita i suoi effetti anche al di fuori di questi, avendo un ruolo nel mantenimento degli equilibri morfologici sino alla linea di costa. Per questo motivo è importante comprendere i fattori che influenzano il fenomeno erosivo e la connettività dei sedimenti in un'ottica pianificatoria integrata volta alla tutela del paesaggio. La connettività dei sedimenti è espressa dalla continuità di trasporto del materiale solido sui versanti (e da questi verso le aste fluviali) e lungo il reticolo idrografico (Hooke, 2003). La presenza di opere trasversali (ad esempio le briglie) e longitudinali (muri di sponda) di sistemazione idraulica può comportare significative variazioni nella circolazione dei sedimenti a scala di bacino; la modifica dell'assetto plano-altimetrico dell'alveo indotta dalle briglie, più in particolare, determina (i) la formazione di un cuneo di sedimentazione (a monte delle stesse) e l'erosione/incisione a valle, (ii) la creazione di aree di deposito nell'interfaccia versante/reticolo idrografico, nonché (iii) l'alterazione dell'equilibrio che regola l'apporto del materiale solido verso le aree costiere. Nonostante si siano compiuti notevoli progressi nella comprensione dei fattori che condizionano la mobilità dei sedimenti all'interno del bacino idrografico (Hooke, 2006), meno frequenti risultano, tuttavia, gli studi che indagano la loro connettività in presenza di opere di sistemazione idraulica.

Diversi sono gli indici disponibili in letteratura per valutare il grado di connettività tra gli elementi costituenti il bacino idrografico (Borselli *et al.*, 2008, Cavalli *et al.*, 2013).

Recentemente, Quiñonero-Rubio *et al.* (2013) hanno proposto un indice, chiamato *Catchment Connectivity Index* (nel prosieguo CCI), la cui applicazione in ambiente mediterraneo (Alto Taibilla, sud-est della Spagna) si è rivelata semplice e speditiva. Tale indice, tuttavia, presenta un non trascurabile grado di soggettività nella definizione dei valori da attribuire ad alcuni sub-indici che lo compongono. Ulteriori indagini si rendono dunque necessarie per assicurare maggiore oggettività all'applicazione del metodo, anche ai fini di una sua più agevole diffusione.

## 2. Obiettivi

Il presente lavoro propone una modifica del *Catchment Connectivity Index* messo a punto da Quiñonero-Rubio *et al.* (2013), attraverso una applicazione al caso-studio del bacino montano Sant'Agata (Calabria meridionale), sistemato con briglie e rimboschito, avente condizioni climatiche e geomorfologiche tipiche dell'ambiente mediterraneo. Inoltre, al fine di comprendere l'influenza delle sistemazioni intensive ed estensive sulla connettività dei sedimenti, l'indice (mCCI, *modified CCI*) è stato applicato in due diverse finestre temporali: nel 1955 (*ante operam*), e nel 2012 (*post operam*, dopo oltre un cinquantennio dalla loro realizzazione, assumendo che tale intervallo di tempo sia idoneo per il raggiungimento di una condizione di equilibrio all'interno del sistema versante-alveo).

## 3. Materiali e metodi

### 3.1. Area di studio

È stata presa in esame la parte montana del bacino idrografico Sant'Agata (figura 1), che si estende per 17.43 km<sup>2</sup> sul massiccio dell'Aspromonte. L'asta principale ha origine a 1649 m s.l.m. ed ha una lunghezza di 11.2 km, con pendenza media del 29%.

La litologia dominante è rappresentata da micascisti, anfiboliti, filliti, quarziti e gneiss granitici (ARSSA, 2003); la classe tessiturale prevalente del suolo è franco-sabbiosa. Dalla fotointerpretazione e classificazione secondo lo standard *Corine Land Cover* (CLC), l'uso del suolo prevalente nel 1955 è di tipo forestale (43.4% dell'area totale del sottobacino). I cespuglieti occupano l'8.5% della superficie, le aree agricole il 15% ed i pascoli naturali un ulteriore 15%, mentre la restante parte non ha copertura vegetale. Nel 2012 la copertura forestale, in prevalenza costituita dagli imboschimenti realizzati negli anni '60, interessa oltre la metà della superficie totale (67.7%). La restante area è occupata da cespuglieti (12%), aree agricole (20%) e suolo nudo (EEA, 2016).

Nel sottobacino in studio attualmente si rileva la presenza di 10 briglie, costruite negli anni '60 per ridurre l'intensità dei fenomeni erosivi e di trasporto dei sedimenti durante gli eventi di piena.

Le precipitazioni medie annue (registrate dalla stazione pluviometrica di Gambarie) si sono ridotte da 1820 mm (periodo 1930-1955) a 1571 mm (1955-2012).

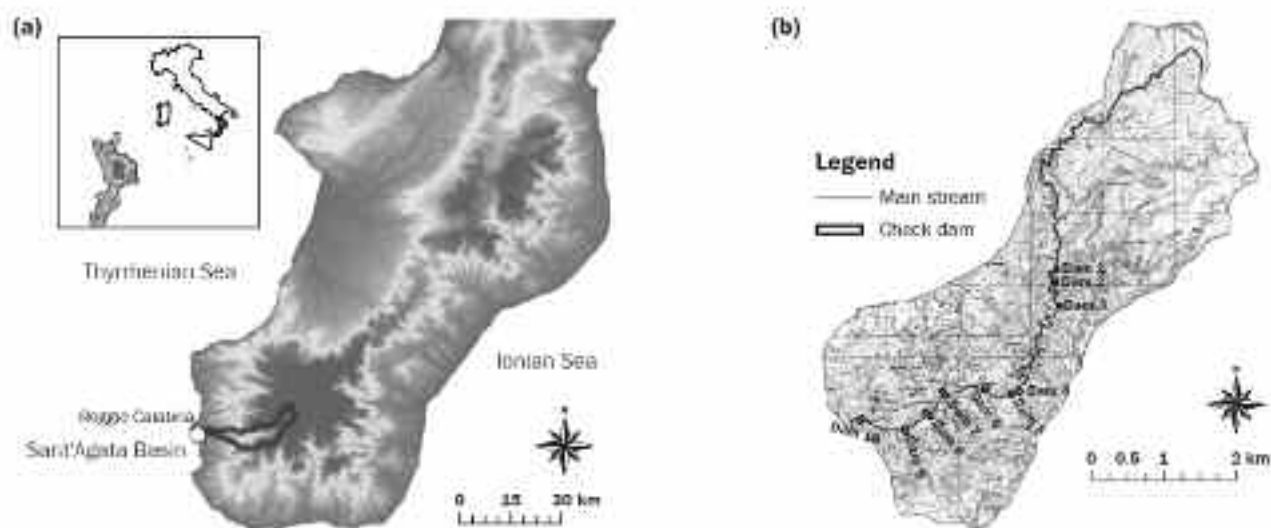


Figura 1. Bacino idrografico Sant'Agata: inquadramento generale (a) e ubicazione delle briglie nel sottobacino oggetto di studio (b)

### 3.2. Descrizione della metodologia di calcolo dell'indice CCI proposto da Quiñonero-Rubio et al. (2013)

Quiñonero-Rubio et al. (2013) basano il calcolo del CCI a scala di bacino/sottobacino idrografico su una valutazione semi-quantitativa di dati geomorfologici derivanti da analisi di foto aeree, da applicazione di modelli idrologici (WaTEM/SEDEM, Van Oost et al., 2000), da rilievi in campo e da elaborazioni di dati in ambiente GIS. Tali Autori hanno definito la seguente formula per il calcolo del CCI:

$$CCI = \left( \frac{TC_{max}}{TC_{min}} \right) \left( \frac{TE_{max} - TE_{min}}{100} \right) \left( \frac{GF_{max}}{GF_{min}} \right) \left( \frac{SP_{max}}{SP_{min}} \right) \left( \frac{FC_{max}}{FC_{min}} \right) \quad (1)$$

in cui il fattore TC (Transport Capacity) è la capacità di trasporto dei sedimenti all'interno del bacino idrografico (versanti e reticolo idrografico), TE (Trap Efficiency) è la capacità di accumulo dei sedimenti operata dalle sistemazioni idrauliche, GF è un fattore geomorfologico, SP (Stream Power) è la capacità di trasporto dei sedimenti nel solo reticolo idrografico e FC (Flow Conditions) indica il regime idrologico dell'asta idrografica (perenne o effimero); i pedici 'av' e 'max' indicano, rispettivamente, i valori medio e massimo dei fattori suddetti. I fattori risultano normalizzati nel dominio [0,1]; il CCI varia tra zero ed uno, indicando condizioni di connettività crescente avvicinandosi all'unità.

TC si ottiene dall'equazione:

$$TC = ktc \cdot R \cdot K \cdot A^{14} \cdot S^{14} \quad (2)$$

in cui R (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>) e K (t ha h ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>) sono i corrispondenti fattori dell'equazione RUSLE (Wischmeier e Smith, 1978), che stimano l'erosività potenziale della precipitazione e l'erodibilità del suolo, A (m<sup>2</sup>) è l'area contribuente alla formazione del deflusso ed S [m m<sup>-1</sup>] indica la pendenza longitudinale. I valori di ktc (-) derivano da una riclassificazione del fattore C della RUSLE, tali valori, calibrati facendo riferimento a precedenti lavori in cui è stato fatto uso del software WaTEM/SEDEM, corrispon-

dono a  $2 \cdot 10^{-6}$  per suolo con scarsa vegetazione e  $2 \cdot 10^{-5}$  per suolo ben coperto da vegetazione) (Boix-Fayos *et al.*, 2008; Quiñonero *et al.*, 2016).

**TE** esprime la limitazione della mobilità dei sedimenti tenendo conto della capacità di immobilizzazione a tergo delle opere di sistemazione idraulica; tale fattore rappresenta la “trap efficiency” proposta da Brown (1943):

$$TE = 100 \cdot \left( 1 - \frac{1}{1 + 0.0111 \cdot D \cdot \frac{C}{W}} \right) \quad (3)$$

dove C rappresenta la capacità di trattenuta dei sedimenti esplicita dall’opera ( $m^3$ ), W è la superficie del sottobacino ( $km^2$ ), D è un valore compreso tra 0.046 e 1 (con una media di 0.1), funzione delle caratteristiche del cuneo di sedimentazione a monte dell’opera.

**GF** esprime il grado di connettività dei sedimenti di un sottobacino in base alle condizioni geomorfologiche rilevate alla confluenza di un’asta idrografica con quella principale, assumendo rispettivamente i valori di 1 o 0.5 se l’asta affluente è connessa o meno con l’asta principale.

**SP** (Stream Power), diversamente dal fattore TC, non tiene conto dell’uso del suolo, in quanto valuta esclusivamente il trasporto solido lungo il reticolo idrografico. SP è direttamente proporzionale all’area contribuente (A) ( $m^2$ ) ed alla pendenza del terreno (S) ( $m \cdot m^{-1}$ ); ‘m’ ed ‘n’ sono due valori empirici, assunti pari a 1.4 nello studio di Quiñonero-Rubio *et al.*, come suggerito da Prosser e Rustomji (2000):

$$SP = A^m \cdot S^n \quad (4)$$

FC discrimina la condizione di continuità o discontinuità del deflusso superficiale in un’asta idrografica: tratti perenni sono interessati dal deflusso tutto l’anno, mentre tratti effimeri alternano periodi di deflusso a periodi secchi (Calabrese *et al.*, 2010); il fattore relativo assume valori rispettivamente di 0.5 o 1 nel caso il regime idrologico dell’asta presenti intermittenza stagionale o sia perenne.

### 3.3. Modifiche proposte all’indice originale e metodologia di calcolo dell’indice mCCI

Il software WaTEM/SEDEM richiede due valori per il sub-fattore ktc di TC, che non possono esprimere dettagliatamente la variabilità della copertura vegetale del bacino idrografico. Per questo motivo si propone la sostituzione di ktc con il fattore C dell’equazione RUSLE (di uso maggiormente consolidato in letteratura scientifica) per ottenere più di due classi.

Per il calcolo del fattore TE del CCI, viene attribuito ad un suo sub-fattore (D) un valore tra 0.046 e 1 secondo l’esperienza di campo dell’operatore; nel mCCI si suggerisce di sostituire il valore fornito dall’equazione di Brown (1943) con una stima più affidabile ed oggettiva degli effetti delle opere di sistemazione in alveo. Viene identificata e mappata tramite GPS la zona di sedimentazione a monte di ogni briglia (tramite rilievi in campo che individuano il cambiamento di alcuni fattori geomorfologici, quali la granulometria del fondo alveo, la pendenza longitudinale, ecc.) (Bombino *et al.*, 2008, Bombino *et al.*, 2009; Zema *et al.*, 2014). Basandosi sulla sua geometria, viene calcolato il volume di accumulo dei sedimenti, considerando il cuneo di sedimentazione come un prisma di base trapezia secondo la formula (Castillo *et al.*, 2007; Zema *et al.*, 2014):

$$V_S = \frac{1}{2} (l_s + l_b) \cdot h \cdot w_s \quad (5)$$

in cui  $V_S$  è il volume del cuneo di sedimentazione ( $m^3$ ),  $l_s$  è la lunghezza (m),  $w_s$  è la larghezza media (m), S è la superficie di base ( $m^2$ ) ed h è l’altezza misurata dalla base della gaveta dell’opera (m).

Tuttavia, anche i fattori GF ed FC presenti nel calcolo del CCI di Quiñonero-Rubio *et al.* (2013) richiedono osservazioni dirette in campo, con assegnazione di valori di 0.5 o 1 dettati dall’esperienza personale dell’operatore, la cui attendibilità potrebbe in alcuni casi essere imperfetta. Per ottenere una valutazione più oggettiva ed affidabile del fattore GF, il GF originale viene sostituito nel mCCI dal valore della curvatura del terreno (profile and tangential curvatures), calcolata in ambiente GIS. La curvatura longitudinale ( $GF_{long}$ ) rappresenta il valore di convessità/concavità del terreno in direzione perpendicolare alle curve di livello (Smith *et al.*, 2012; Shary, 1995; Florinsky, 1998);  $GF_{long}$  misura la variazione della pendenza e tiene conto della sua influenza sulla velocità della corrente e, di conseguenza, sulla capacità di distacco dei sedimenti (Zeuberger e Thorne, 1987. Per calcolare la curvatura longitudinale in ogni pixel, si tiene conto dei valori di quota delle celle vicine, in una finestra mobile di 3 x 3 celle ed applicando una regres-

sione polinomiale a 6 parametri per ottenere di volta in volta il valore del pixel centrale.

La curvatura tangenziale ( $GF_{tan}$ ) è stimata in maniera analoga a quella longitudinale, ma in direzione parallela alle curve di livello. Gli indici di curvatura, pertanto, forniscono informazioni sulla forma locale del terreno (grado di concavità o convessità). Se  $GF_{long}$  e  $GF_{tan}$  vengono standardizzati, come descritto più avanti, il campo di variazione di tali parametri ricade tra 0 (valori positivi di curvatura, suolo convesso) e 1 (valori negativi di curvatura, suolo concavo).

L'FC originale che compare nell'indice CCI è sostituito in mCCI da un parametro ricavato da una analisi in tre fasi: (a) analisi delle precipitazioni (P) che generano deflussi con tempo di ritorno pari a due anni (che determinano la forma dell'alveo attivo dei torrenti in ambiente mediterraneo) (Leopold *et al.*, 1964; Gregory e Walling, 1973; Richards 1982) ed aventi durata pari al tempo di corrivazione del bacino (derivato dal tempo di ritardo calcolato secondo Watt e Chow, 1985; Chang-Xin, 1993); (b) applicazione del metodo SCS-CN (Soil Conservation Service, 1972) per il calcolo delle perdite idrologiche (S) del sottobacino sotteso al punto in cui si calcola il deflusso superficiale; (c) confronto fra i valori P e 0.2S (se  $P > 0.2S$ , il deflusso nel tratto viene considerato permanente e  $FC = 1$ , diversamente  $FC = 0.5$ ).

Infine, la procedura di standardizzazione dei fattori del CCI proposta da Quiñonero-Rubio *et al.*, (2013) che utilizza il rapporto  $\frac{Z_{max}}{Z_{min}}$  viene modificata nel mCCI per tenere conto della presenza di valori estremi ("outlier") nel DEM (dovuti a punti singolari o errori di elaborazione), che altererebbero irrealisticamente i risultati del calcolo. Viene pertanto proposta la procedura di standardizzazione  $\frac{Z - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}}$  per ogni fattore tranne che per GF, per cui si ricorre alla relazione  $\frac{GF_{max} - GF}{GF_{max} - GF_{min}}$  e per TE che, diversamente dagli altri fattori, è espresso in termini percentuali e quindi già standardizzato. Infine, l'indice finale di connettività dei sedimenti mCCI è calcolato come il logaritmo in base 2 del prodotto dei fattori componenti e sopra descritti, diversamente dalla forma originale (in cui il calcolo logaritmico non veniva applicato), per restringere il campo di variazione dell'indice e quindi migliorare l'interpretazione quantitativa dei valori estremi dello stesso. Essendo i fattori del mCCI variabili nell'intervallo [0, 1], il logaritmo in base 2 varierà nell'intervallo  $(-\infty, 0]$ . L'equazione per il calcolo di mCCI assume, dunque, la forma:

$$mCCI = \log_2 \left[ \left( \frac{TE - TE_{min}}{TE_{max} - TE_{min}} \right) \left( \frac{GF_{max} - GF}{GF_{max} - GF_{min}} \right) \left( \frac{SP - SP_{min}}{SP_{max} - SP_{min}} \right) \left( \frac{FC - FC_{min}}{FC_{max} - FC_{min}} \right) (Q - Q_2) \right] \quad (6)$$

Per ottenere valori di mCCI in un dominio di valori positivi [0,  $\infty$ ), si impiega la trasformazione:

$$\max\{mCCI\} - |mCCI|$$

#### 4. Risultati e discussione

La capacità di trasporto dei sedimenti, TC, confrontata tra le due finestre temporali studiate (1955 – 2012), risulta maggiore nel secondo periodo, di quasi il 18% (figura 2) rispetto al primo.

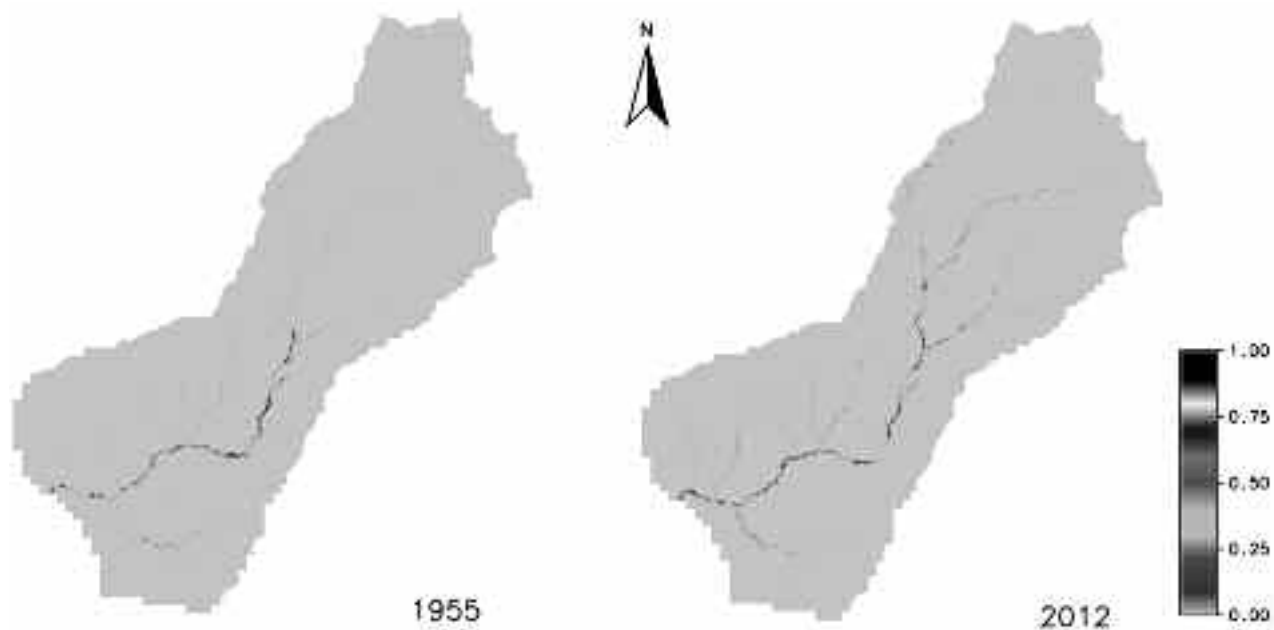
Ciò ha evidenziato come, a parità degli altri parametri, il cambiamento di uso del suolo abbia avuto una maggiore influenza sulla capacità di trasporto dei sedimenti, rispetto all'influenza determinata dalle precipitazioni le quali hanno mostrato un decremento sia in termini di quantità medie annue sia del loro indice R di erosività (Wischmeier e Smith, 1978) diminuito di circa il 13% tra il 1955 e il 2012.

Per il fattore geomorfologico, GF, (figura 3), come atteso, mostra valori più elevati nel reticolo idrografico che, grazie alla concavità della sezione trasversale e all'energia cinetica del deflusso, rappresenta la direzione preferenziale di mobilitazione dei sedimenti all'interno del bacino.

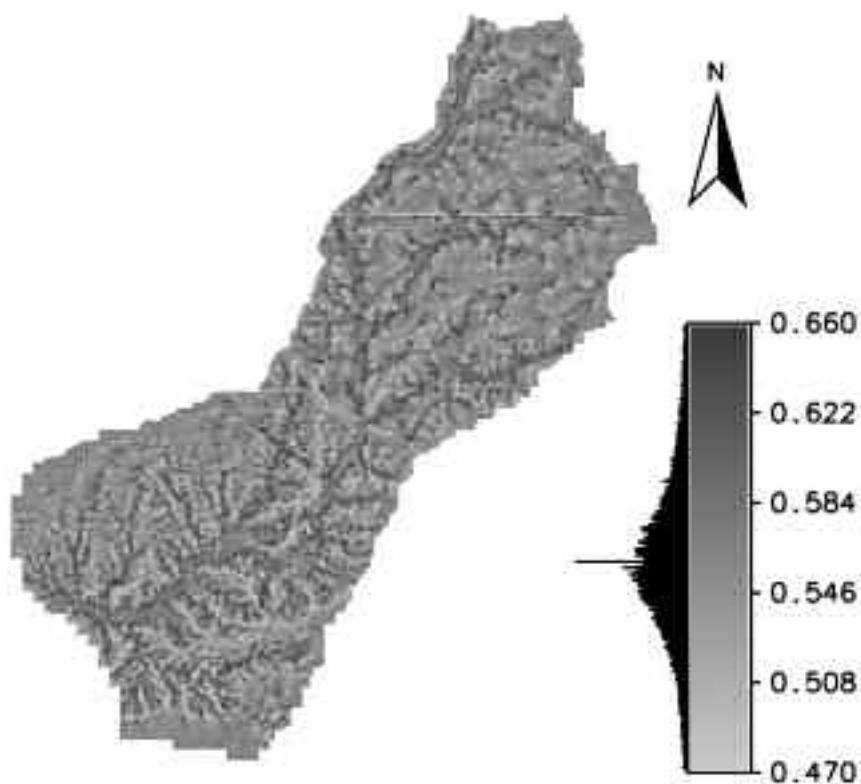
I valori degli altri fattori dell'indice modificato, mCCI, non presentano modifiche confermando quanto ci si aspettava. Il calcolo del mCCI, effettuato separatamente per i due periodi, evidenzia significative differenze, come si può evincere dall'analisi delle mappe della connettività del sottobacino oggetto di studio (figura 4), in cui si apprezza un incremento dei valori di connettività sia lungo il reticolo idrografico, sia sui versanti.

Il confronto delle distribuzioni di frequenza dei valori del mCCI nei due periodi (figure 5 e 6) mostra un generale spostamento verso valori più elevati tra il 1955 ed il 2012; si rileva una riduzione nel 2012 delle aree con valori del mCCI compresi tra 5 e 15 ed un incremento di quelle con valori del mCCI tra 15.3 e 35, con un incremento massimo del 18% in corrispondenza del valore medio (circa 18 unità) in confronto al valore medio di circa 15 unità nel 1955.





**Figura 2.** Mappe del fattore TC dell'indice mCCI nel sottobacino montano della fiumara Sant'Agata



**Figura 3.** Mappa del fattore GF dell'indice mCCI nel sottobacino montano della fiumara Sant'Agata

La distribuzione dei valori dell'indice calcolato in entrambi gli anni in tutti i punti del sottobacino è assimilabile ad una distribuzione normale; il reticolo idrografico presenta, come atteso, i valori più elevati (in questo caso, maggiori del valore medio in entrambi i periodi), mentre il valore più frequente (moda della distribuzione) di mCCI (pari a 14.5 nel 1955 ed a 17.3 nel 2012) ricade sui versanti, che ricoprono nel sottobacino una area molto più vasta rispetto al reticolo.

Nel 2012 la superficie occupata dai boschi risulta incrementata del 24% rispetto al 1955 (grazie anche all'attività di imboschimento operata negli anni '60 ed alla raggiunta condizione di stabilità ecologica e strutturale delle formazioni forestali, ciò ha favorito una minore vulnerabilità del suolo all'energia cinetica delle piogge cui è conseguito un decremento della produzione di deflusso superficiale. Tale cambiamento ha però riguardato soprattutto la parte centrale del sottobacino; nella maggior parte della superficie rimanente

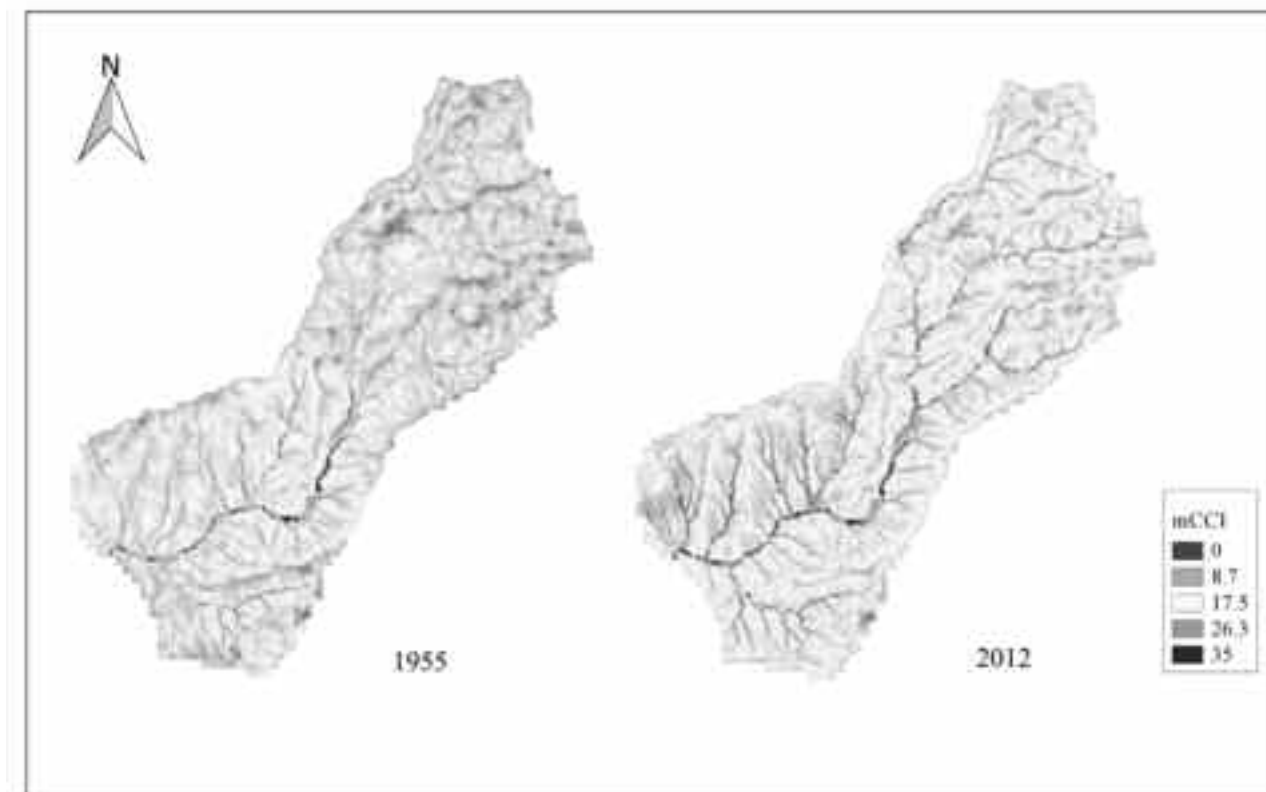


Figura 4. Mappe dei valori del mCCI nel sottobacino montano della fiumara Sant'Agata

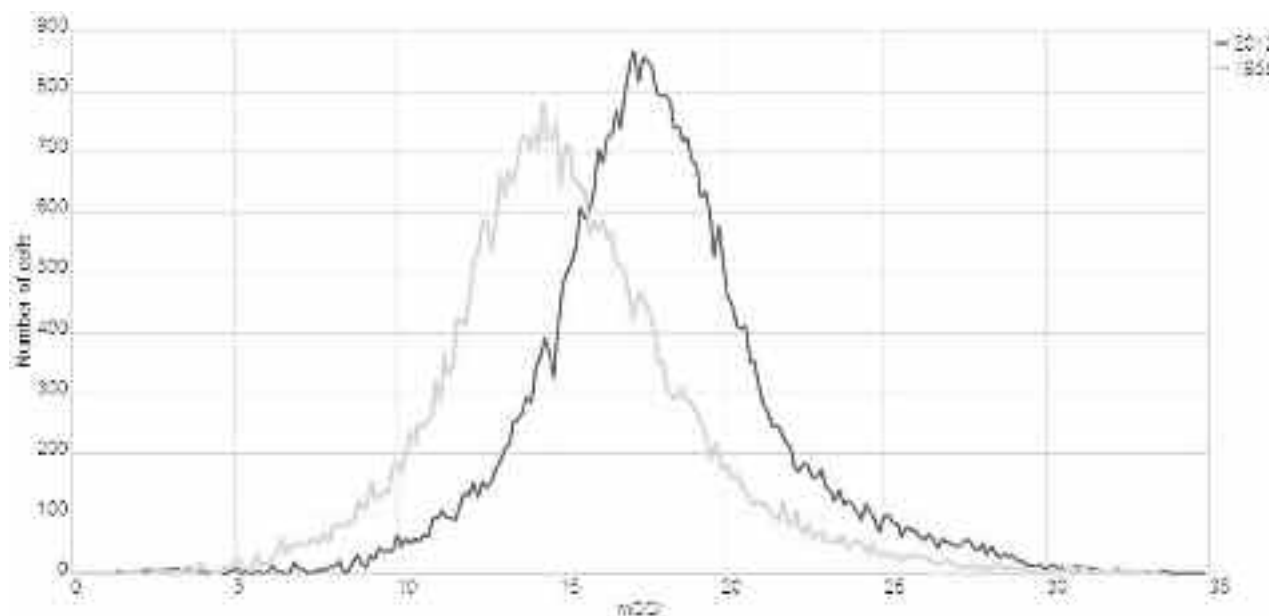


Figura 5. Distribuzione di frequenza dei valori del mCCI nel 1955 e nel 2012

il bacino è interessato da formazioni vegetali in evoluzione (cespuglieti di *Spartium junceum* L., *Cytisus* spp., ecc.) e da coltivazioni (*Triticum aestivum* L., *Avena sativa* L., ecc).

Non essendo disponibili informazioni sulla morfologia del corso d'acqua per il periodo di costruzione delle opere, non è stato possibile considerare una pendenza dell'alveo differente durante tale periodo rispetto all'attualità.

Nel complesso, le differenze riscontrate nella connettività tra i due periodi considerati risultano lievi, il che potrebbe sorprendere per un sottobacino interessato da così intense attività di sistemazione. Per esempio, anche se il valore medio del mCCI aumenta solo del 18% dal 2012 al 1955 (tabella 1), la variazione più consistente si coglie nella zona di riduzione dell'indice, che è di circa il 60%.

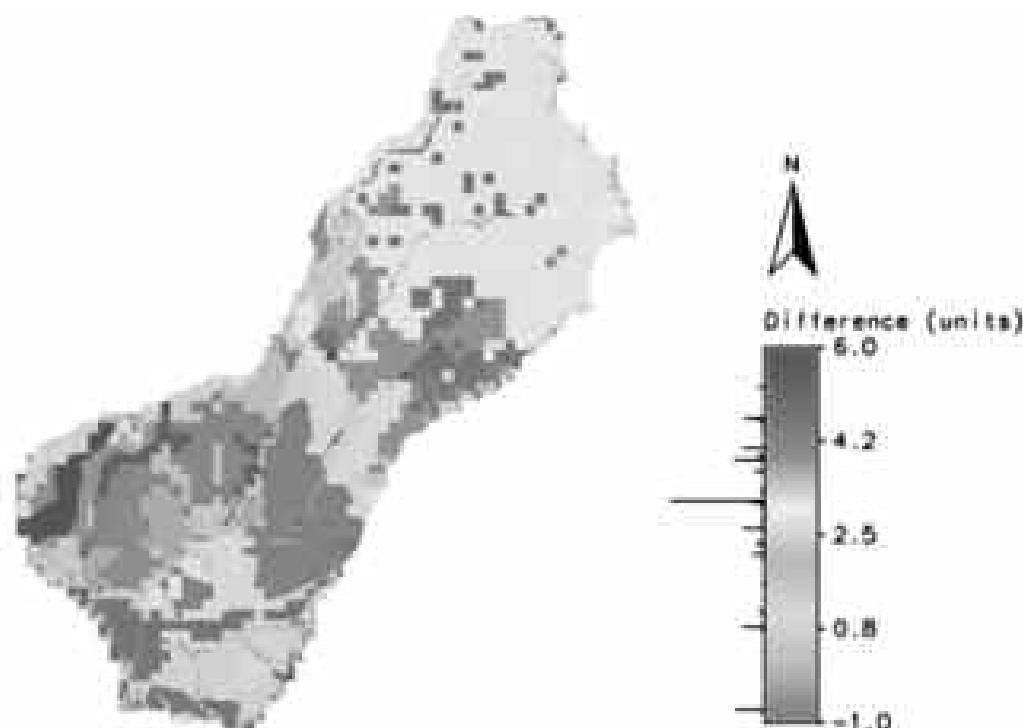


Figura 6. Mappa della differenza (in unità logaritmiche) dei valori del mCCI tra il 1955 ed il 2012

Presumibilmente, la disponibilità di un DEM con una risoluzione planimetrica maggiore di 20 x 20 m, come quella utilizzata in questo studio, potrebbe consentire una maggiore precisione nell'apprezzare con maggior dettaglio la variabilità morfologica dell'area di studio, essendo l'altimetria (e quindi la curvatura) del terreno, unitamente alla copertura vegetale ottenuta da fotointerpretazione o da carte di uso del suolo, che hanno un'influenza considerevole sull'indice finale.

Statistica	mCCI		
	1955	2012	2012 vs 1955 (%)
Minimo:	$3.55 \cdot 10^{-14}$	$1.42 \cdot 10^{-14}$	-60
Massimo:	33.62	35.01	+4
Valore medio:	15.30	18.13	+18
Deviazione standard:	3.76	3.58	-5
Coefficiente di variazione (%):	24.58	19.73	-20
1° quartile:	12.99	16.01	+23
Mediana:	15.00	17.90	+19
3° quartile:	17.34	19.92	+15
90° percentile:	19.92	22.55	+13

Tabella 1. Statistiche descrittive e confronto tra i valori del mCCI nel 1955 e nel 2012

## 5. Conclusioni

L'utilizzo di informazioni derivanti da un modello digitale del terreno ha consentito di ridurre la soggettività nella determinazione di alcuni parametri dell'indice messo a punto da Quiñonero-Rubio *et al.* (2013) (come, ad esempio, i fattori TC, TE, GF e FC) e di automatizzare il processo di calcolo, riducendo la necessità di indagini di campo e facilitandone l'applicazione.

L'applicazione del *modified Catchment Connectivity Index* (mCCI) al caso-studio del sottobacino montano del torrente Sant'Agata prima (1955) e dopo (2012) la realizzazione di interventi (intensivi ed estensivi) di sistemazione idraulico-forestale ha evidenziato come nel corso di pochi decenni la modifica della connettività dei sedimenti sia stata determinata in misura prevalente dai cambiamenti di uso del suolo e, secondariamente, dall'azione delle briglie. Meno influente è il trend pluviometrico poiché nonostante la sua riduzione, la connettività dei sedimenti nel bacino è aumentata.

## Bibliografia

- ARSSA, 2003. *I suoli della Calabria - Carta dei suoli in scala 1:250.000 della regione Calabria*. Rubettino Editore. Catanzaro, pp 387.
- Boix-Fayós C., De Vente J., Martínez-Mena M., Barberá G.G., Castillo V., 2008. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield, *Hydrological Processes* 22, 4922-4935.
- Bombino G., Gurnell A.M., Tamburino V., Zema D.A., Zimbone S.M. 2008. Sediment size variation in torrents with check-dam: effects on riparian vegetation. *Ecological Engineering*, Elsevier, 32, 166-177. ISSN: 0925-8574.
- Bombino G., Gurnell A.M., Tamburino V., Zema D.A., Zimbone S.M. 2009. Adjustments in channel shape, sediment calibre and vegetation around check dams in the headwater reaches of mountain torrents, Calabria, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, Elsevier, 34, 1011-1021. ISSN: 0197-9337.
- Borselli L., Cassi P., & Torri D., 2008. *Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment*. Catena, 75(3), 268-277.
- Brown C.B., 1943. Discussion of Sedimentation in reservoirs, by J. Witzig, *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 69, 1493-1500.
- Castillo V.M., Mosch W.M., Conesa García C., Barberá G.G., Navarro Cano J.A., López-Bermúdez F., 2007. *Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid Mediterranean catchment*. El Cárcavo (Murcia, Spain), *Catena* 70(3): 416-427.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology* 188, 31-41.
- Chang-Xin J., 1993. Determination of basin lag time in rainfall-runoff investigations, *Hydrological processes*, ASCE 80, 1-25.
- Florinsky I.V., 1998. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models *International Journal of Geographical Information Science*, 12, 47-61.
- Hooke J., 2006. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region, *Geomorphology* 79, 311-335.
- Hooke J., 2003. Coarse sediment connectivity in river channel systems; a conceptual framework and methodology, *Geomorphology* 56 (1e2), 79e94.
- Prosser I.P., Rustomji P., 2000. Sediment transport capacity relations for overland flow, *Progress in Physical Geography* 24, 179-193.
- Quiñonero-Rubio J.M., Boix-Fayós C., De Vente J., 2013. Desarrollo y aplicación de un índice multifactorial de conectividad de sedimentos a escala de cuenca, *Cuadernos de Investigación Geográfica* 39, 203-223.
- Quiñonero-Rubio J. M., Nadeu E., Boix-Fayós C., and de Vente J., 2016. Evaluation of the effectiveness of forest restoration and check-dams to reduce catchment sediment yield, *Land Degrad. Develop* 27: 1018-1031. DOI: 10.1002/ldr.2331.
- Shary P., 1995. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures, *Mathematical Geology*, 27(3), 373-390.
- Smith M.J., Goodchild M. F., Longley P. A., 2012. *Geospatial Analysis - a comprehensive guide*, Electronic book. <http://www.spatialanalysisonline.com/output/>.
- Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P.J.J. 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology* 15, 577-589.
- Wischmeier W.H. and Smith D.D., 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses - a guide to conservation planning*. USDA, Agric. Handbook no. 537.
- Zema D. A., Bombino G., Boix-Fayós C., Tamburino V., Zimbone S. M., Fortugno D., 2014. «Evaluation and modeling of scouring and sedimentation around check dams in a Mediterranean torrent in Calabria, Italy» in *Journal of Soil and Water Conservation* July/August 2014, vol. 69 no. 4, 316-329.
- Zeverbergen, L. W., and C. R. Thorne., 1987. Quantitative Analysis of Land Surface Topography, *Earth Surface Processes and Landforms* 12.