

METODOLOGIE GEOSPAZIALI PER IL MONITORAGGIO DELL'EUTROFIZZAZIONE DEI CORPI IDRICI*

Introduzione. – Il documento *Sustainable Development in the Mediterranean - Report 2020* (Riccaboni e altri, 2020) restituisce un focus sull'area del Mediterraneo con delineazione di opportune buone pratiche inserite all'interno degli obiettivi di sostenibilità da perseguire e raggiungere entro il decennio. Un'attenzione in tal modo concretizzata restituisce anche la consapevolezza dello status del Mar Mediterraneo come uno dei mari più inquinati (Baudena e altri, 2023), sul quale dunque interventi a sostegno del raggiungimento dei *Sustainable Development Goals* (SDGs) sarebbero fortemente raccomandati. All'interno della *Trasformazione 4. Sustainable Food, Land, Water, Oceans*, il Rapporto restituisce una serie di indicatori volti all'identificazione delle criticità da gestire e monitorare. Emerge nell'immediato la rilevanza delle pratiche di uso del terreno e delle acque, associando considerazioni sulla non sostenibilità dell'attività di pesca e sull'inquinamento in generale con un conseguente squilibrio dell'ecosistema acquatico definito eutrofizzazione (Sonarghare e altri, 2020). Trattasi di un fenomeno la cui mitigazione è oggetto di differenti SDGs (Neverova-Dziopak, Kowalewski, Preisner, 2023) e legato all'eccessiva concentrazione di comunità algali e di nutrienti (come azoto e fosforo) con contributo dell'influenza variabile di condizioni meteorologiche e relativi fattori, come precipitazioni, temperatura e irraggiamento solare, che influiscono sulla presenza di organismi eterogenei con prevalenza autotrofica; conseguenza è la decomposizione di un massiccio carico di biomassa, causando deossigenazione (diminuzione del livello di ossigeno disciolto), moria delle specie viventi e degrado dell'ecosistema (Viaroli e altri, 2015). La relazione del

* Il lavoro è frutto di una riflessione comune degli autori. Per l'attribuzione dei contributi, l'Introduzione è da attribuirsi a Sonia Malvica, "L'inquinamento delle acque" a Federico Cuomo e Sonia Malvica, le Conclusioni a Federico Cuomo, i restanti paragrafi (inclusa l'elaborazione cartografica) a Gianluca Scanu.

Mediterraneo con l'eutrofizzazione è tanto innegabile quanto complessa: l'area si configura, infatti, come un bacino semichiuso di tipo oligotrofico le cui concentrazioni di nutrienti sono in realtà basse, tuttavia le aree costiere (in particolare quelle settentrionali) sono interessate da eutrofizzazione dovuta all'attività antropica, quali scarichi industriali e fognari (Karydis, Kitsiou, 2012).

Va considerato che l'utilizzo dell'azoto e del fosforo come fertilizzanti ha ampiamente contribuito all'inquinamento degli ecosistemi terrestri e idrici, arrivando a un'eccedenza mondiale oltre i limiti di sicurezza, fenomeno rispetto al quale l'Europa ricopre un ruolo considerevole (eurlex.europa.eu). Lo stato dell'ecosistema costiero risulta correlato all'analisi della presenza di nutrienti secondo due fonti: quelle puntuali, rappresentate dall'impatto in precise zone identificabili delle acque reflue delle industrie e delle fognature, e quelle non puntuali, associate a un carico maggiore derivante dalle già citate attività antropiche, dalle condizioni atmosferiche e, non da ultimo, dall'erosione del terreno (Arhonditsis e altri, 2000). Attenzione l'eutrofizzazione significa, dunque, anche analizzare l'uso del suolo, le cui indagini beneficiano dell'utilizzo di programmi di calcolo volti al processamento delle immagini mediante le tecnologie fornite dal *Geographic Information System* (GIS). In accordo, il presente contributo si configura come presentazione del caso studio di alcuni bacini idrografici collocati nella Sardegna sud-occidentale: l'analisi pedologica è seguita da una elaborazione cartografica di confronto del rischio di erosione dell'area tra il 1984 e il 2014, che risulta associato all'uso del suolo nonché all'eccessivo carico antropico. Nello specifico, lo studio ha applicato i modelli USLE/RUSLE e CREAMS per l'analisi del carico di nutrienti: trattasi di strumenti di analisi delle problematiche ambientali spesso associati ad ulteriori modelli (come nel caso del CREAMS che, oltre all'USLE/RUSLE, considera anche l'indice di aridità di De Martonne). Attraverso una comparazione tra le immagini satellitari dei rispettivi anni e l'utilizzo dell'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) per la valutazione dei cambiamenti spazio-temporali della vegetazione (Cipoletti e altri, 2011; Pettorelli, 2013), i risultati suggeriscono la relazione tra l'erosione del terreno e il carico di nutrienti, con oltre un raddoppiamento del carico di azoto e fosforo; emergono anche delle considerazioni sui valori associati ai suoli coltivati in rapporto alla crescente area dedita, invece, alle attività industriali.

L'inquinamento delle acque. – Secondo il decreto legislativo 132/92, l'inquinamento delle acque sotterranee comprende:

lo scarico di sostanze o energia effettuato direttamente o indirettamente dall'uomo nelle acque sotterranee, le cui conseguenze siano tali da mettere in pericolo o la salute umana o l'approvvigionamento idrico, nuocere alle risorse viventi e al sistema ecologico idrico, o ostacolare altri usi legittimi delle acque (www.gazzettaufficiale.it).

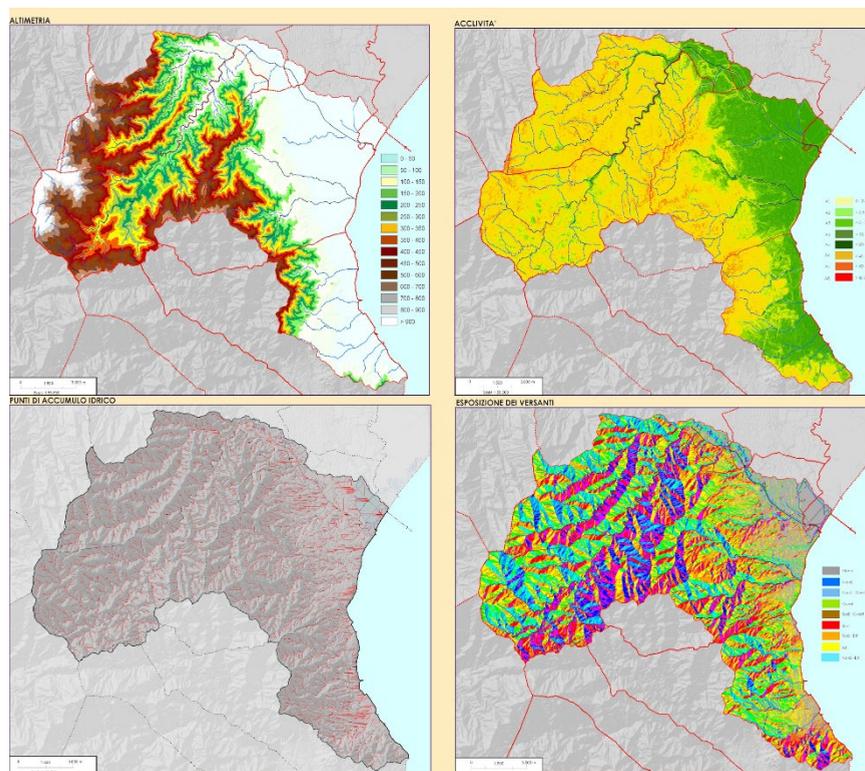
Negli ultimi decenni le risorse idriche hanno subito l'impatto negativo dell'incremento demografico e delle attività antropiche, ostacolando l'autodepurazione e dunque l'eliminazione delle sostanze inquinanti. Il progresso tecnologico, nell'ambito dell'urbanizzazione dagli anni '50, ha comportato una notevole immissione di sostanze contaminanti, con ingresso sia diretto che indiretto (inquinanti provenienti dall'atmosfera e dal suolo, piogge acide); a contribuire è stato anche l'inquinamento prodotto dalle sostanze organiche provenienti da scarichi domestici, agricoli, zootecnici, industriali (fattore biodegradabile) e da quelle inorganiche provenienti da lavorazioni industriali del settore chimico, metallurgico e conciario (fattore non biodegradabile). A ciò si associa il fattore termico, collegato a variazioni di temperatura del corpo idrico con l'apporto di acque calde dalle centrali termoelettriche e dai settori industriali. Un non trascurabile apporto deriva anche dalle fognature civili, la cui carica batterica è risultato delle attività domestiche e dei rifiuti riconducibili ai luoghi pubblici (Gobbi, Amodeo, 2004).

La qualità delle acque subisce dunque differenti forme di inquinamento, arrivando a configurazioni qualitative e quantitative degli inquinanti tali da provocare un degradamento permanente, di tipo sia estetico che funzionale. A tutto ciò è correlato il fenomeno dell'eutrofizzazione, ossia l'eccessivo accrescimento e la moltiplicazione di vegetali acquatici, per effetto della presenza di dosi elevate di sostanze nutritive: ciò denota la concentrazione massiva di fosforo e azoto, fino a superare la capacità recettiva di un corso d'acqua o di un bacino idrico, innescando, quindi, dei cambiamenti strutturali nella composizione delle specie vegetali ed un'eccessiva crescita dei medesimi. L'eutrofizzazione è analizzabile in termini di tipologie e cause (Akinnowo, 2023). In particolare, l'eutrofizzazione naturale è un fenomeno millenario con cui si identifica la

variazione di sostanze nutritive nell'ecosistema, a volte sfocianti nella perdita della capacità di autodepurazione da parte dei corpi idrici; l'eutrofizzazione culturale, invece, è di tipo antropogenico, ossia riconducibile a un aumento del carico di nutrienti dei corpi idrici a partire dalle attività umane, quali utilizzo di fertilizzanti, smaltimento delle acque reflue e acquacoltura (Sonarghare e altri, 2020). Oltre gli scarichi urbani, molte industrie hanno costruito i loro impianti lungo le aste fluviali, in modo da fornire il liquido necessario al loro ciclo produttivo e convogliare gli scarichi a valle (Martinis, 1997): nei bacini idrici può riscontrarsi abbondanza di sostanze di varia natura, da quelle particellate a quelle chimiche inorganiche (come i nitrati) e organiche, fino all'importante presenza di acidi umici, metano ed etano, moria di pesci e formazione di alghe tossiche (Sechi, 1986).

Il caso studio in Sardegna e la pedologia. – Il presente lavoro si focalizza sull'area dei bacini idrografici del Rio Santa Lucia, del Rio San Girolamo e di altri bacini minori che drenano una porzione dei Monti di Capoterra, situata nella parte sud-occidentale della Sardegna, a margine della regione geografica del Sulcis, tra il raccordo con il Campidano meridionale (o Campidano di Cagliari) e la costa occidentale del Golfo di Cagliari. Con un'estensione di superficie pari a 172 Km², l'area comprende principalmente i bacini idrografici del Rio Santa Lucia e del Rio San Girolamo che occupano, rispettivamente, una superficie di 108 e 27 Km. Il Rio Santa Lucia comprende a sua volta i due sub bacini costituiti dai Rii Gutturu Mannu e Guttureddu i quali, confluendo in prossimità della piana di Capoterra, danno origine al corso d'acqua principale la cui foce è situata nella laguna omonima. I restanti 37 Km² sono ripartiti tra gli altri bacini idrografici minori. Come si osserva nella figura 1, una buona parte dell'area esaminata si affaccia direttamente a mare, nel Golfo di Cagliari, tra le lagune di Santa Gilla e il promontorio di Sarroch sulle cui sponde, come noto, è installata la raffineria della Saras, l'unica della Sardegna.

Fig. 1 – Area di studio, i caratteri del territorio



Fonte: elaborazione degli autori

I confini che delimitano naturalmente tale sistema di bacini idrografici sono ad ovest il Monte Is Caravius e il Monte Arcosu, a nord il prolungamento orientale del Monte Arcosu e di Su Pranu de Assemini, ad est lo Stagno di Cagliari, a sud l'area denominata Su Guttaresti, dove vi è Monte Arrubiu e Punta su Gutturu Mannu. Dal punto di vista amministrativo, il sistema in esame ricade nei comuni di Capoterra, Uta, Assemini, Sarroch e Cagliari, quest'ultimo per una minima porzione, ed è interamente compreso nella provincia omonima.

Le suddivisioni amministrative coincidono, nella maggior parte dei casi, con i caratteri fisici del territorio: osservando i limiti comunali che separano l'isola amministrativa di Assemini da Uta e Capoterra, si può infatti riscontrare la corrispondenza, nella parte settentrionale, con l'asta fluviale del rio Gutturu Mannu che prosegue, nel settore occidentale e meridionale, con i suoi displuvi. Lo stesso andamento è confermato nel

limite occidentale del comune di Uta, con coincidenza nei displuvi del rio Gutturreddu e prosegue verso Nord lungo i crinali di Monte Arcosu.

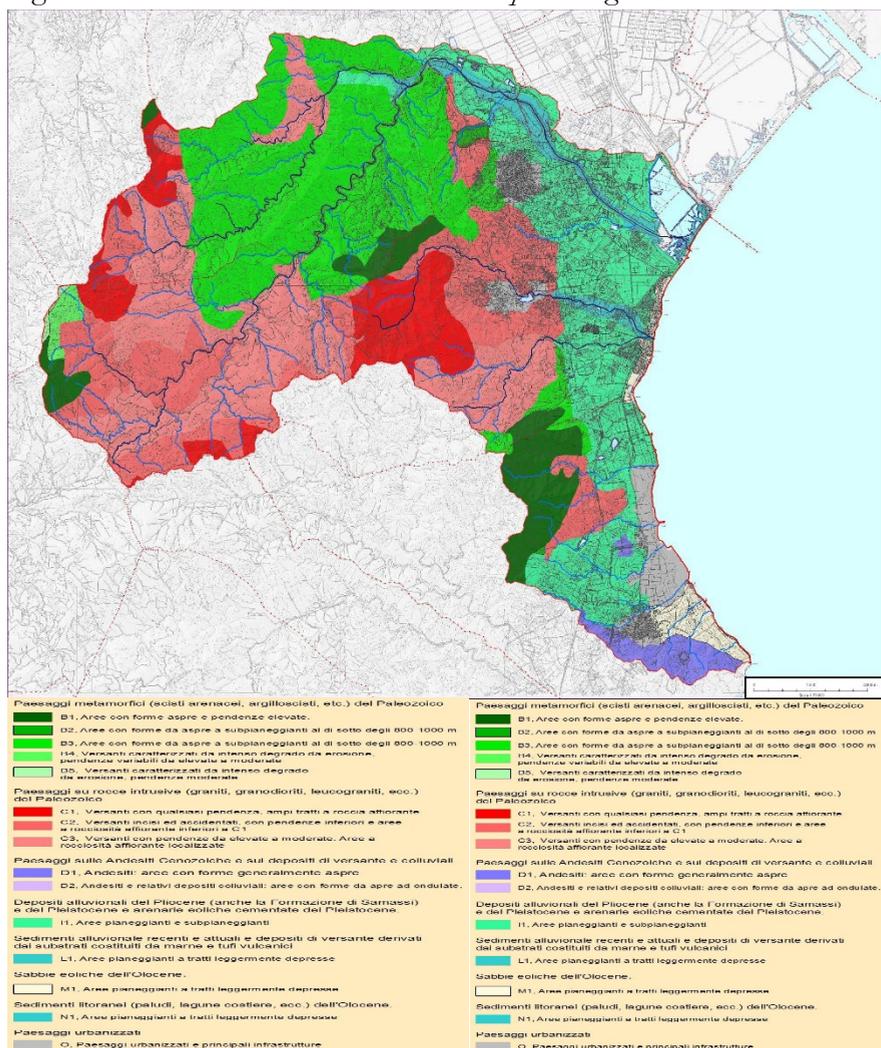
L'altimetria dell'area di studio presenta quote che variano dal livello del mare ai 1114 metri del Monte Is Cavarius. L'altezza media è di circa 255 metri, ma la conformazione del massiccio montuoso consente di raggiungere, in diversi punti, delle quote elevate che si avvicinano e, a volte, superano i 1000 metri, come nel caso del Monte Lattias (1086 m), del Monte Arcosu (946 m) e del Monte Seddas (850 m). Questo fa sì che l'acclività che caratterizza i versanti presenti un valore medio di 18,50°, tuttavia, nei settori di testata del bacino, soprattutto laddove affiorano rocce poco erodibili, come i graniti, l'inclinazione della superficie topografica si mantiene più elevata, raggiungendo in qualche caso anche valori di 85°. Tale sistema montuoso è prossimo al mare, per cui tali acclività consentono una forte velocità nello scorrimento delle acque incanalate nei sistemi idrografici che arrivano spesso allo sversamento con valori particolarmente elevati non avendo avuto la possibilità di sedimentare a monte.

Sulla base dei dati pubblicati dal Servizio Idrografico Nazionale per le vicine stazioni termopluviometriche e pluviometriche presenti all'interno e in prossimità dell'area di studio, e in accordo con la classificazione bioclimatica proposta da Rivas-Martinez (Rivas-Martinez, Sanchèz-Mata, Costa, 1999), l'area si denota per un clima mediterraneo, essendo il periodo di siccità ($P < 2T$) sempre superiore a due mesi dopo il solstizio d'estate. La temperatura media annua è compresa tra l'isoterma dei 15,5°C e quella dei 16°C. Per lo studio delle precipitazioni sono state elaborate le misure rilevate nelle stazioni del bacino idrografico le quali, ubicate a quote differenti, rivelano sostanziali variazioni di piovosità in rapporto all'altitudine. I valori delle precipitazioni medie annue in alcune stazioni interne al bacino ed ubicate alla base dei monti, come Capoterra e Uta, nel periodo considerato, si aggirano intorno a 544 mm; la stagione più piovosa è quella invernale con i massimi apporti meteorici concentrati nei mesi di novembre e di dicembre, mentre la più arida è quella estiva, con apporti scarsi o nulli nel mese di luglio.

Dall'elaborazione dei dati della Carta dei Suoli e conseguente elaborazione cartografica, è emerso che l'area di studio può essere suddivisa mediante la classificazione delle unità delle terre (U.d.T.) o unità cartografiche, ovvero la suddivisione del territorio in porzioni

cartografabili e caratterizzate da un'elevata omogeneità di natura geolitologica, morfologica, vegetazionale e pedologica a cui può corrispondere una certa situazione di dissesto idrogeologico; esse vengono identificate attraverso l'attribuzione di lettere alfabetiche maiuscole che vanno dalla A alla O, in base all'unità di paesaggio riscontrate mediante la consultazione della carta dei suoli della Sardegna redatta da Aru e collaboratori (1991; www.sardegnaportalesuolo.it).

Fig. 2 – La carta dell'Unità delle Terre con rispettiva legenda



Fonte: elaborazione degli autori

Di seguito si riporta l'indagine pedologica dell'area (fig. 2):

- L'unità delle Terre B1 ha una superficie di 964,79 ha e può essere osservata in qualsiasi condizione morfologica, da quella pianeggiante a quella collinare, su di un substrato, poco o nulla alterato, costituito da formazioni metamorfiche del Paleozoico intercalate da filoni di varia natura.

- L'Unità delle Terre B2 presenta una superficie territoriale pari 45,16 ha; si può riscontrare su aree dalla morfologia collinare la cui pietrosità superficiale varia da scarsa a moderata; rocciosità e pietrosità sono elevate e risultano correlate a un notevole pericolo di erosione.

- L'Unità delle Terre B3 ricopre una superficie di 4034,91 ha, al suo interno si possono rilevare forme morfologiche da aspre a subpianeggianti al di sotto degli 800-1000 m; la pietrosità superficiale varia da scarsa a moderata, mentre la sua rocciosità e pietrosità risulta elevata.

- L'Unità delle Terre B4 rappresenta una superficie pari a 101,29 ha del territorio, e riscontra superfici dalla morfologia collinare. La pietrosità superficiale è variabile (da scarsa a moderata); la rocciosità affiorante è sensibilmente inferiore all'Unità B3, e caratterizza le aree con presenza di filoni particolarmente resistenti all'alterazione.

- L'Unità delle Terre B5 è quella con la minor superficie della categoria B, infatti ha un'estensione molto ridotta pari a 19,10 ha e può essere osservata in prevalenza su superfici caratterizzate da intenso degrado da erosione e con morfologie variabili da pianeggianti a debolmente ondulate. La rocciosità affiorante, molto scarsa, è dovuta per lo più a blocchi di notevoli dimensioni.

- L'Unità delle Terre C1, di estensione pari a 1198,22 ha riscontrato una morfologia variabile (dalla pianeggiante all'accidentata collinare), in presenza di un substrato costituito dai graniti e dai complessi filoniani del ciclo magmatico ercinico e dai relativi depositi colluviali.

- L'Unità cartografica C2 si osserva in versanti incisi ed accidentati con pendenze di entità moderata e rocciosità affiorante sensibilmente inferiore a quella dell'Unità C1; la sua superficie si estende per 2726,95 ha.

- L'Unità cartografica C3 ricopre una superficie di 2951,65 ha ed è caratterizzata da versanti di pendenza variabile (da moderata a elevata) con rocciosità affiorante e sensibilmente inferiore a quella caratterizzante le Unità C1 e C2.

- L'Unità cartografica D1 presenta versanti con pendenze da moderate a elevate e ricopre un'estensione di 323,60 ha.

- L'Unità cartografica D2 è quella con un'estensione minore di tutte le unità delle terre, con una superficie pari a 0,56 ha. Al suo interno le aree sono caratterizzate da forme ondulate con versanti generici e versanti incisi, le pendenze sono da elevate a moderate.

- L'Unità delle terre I1 ha un'estensione di 3109,42 ha, può essere osservata su una morfologia da pianeggiante a ondulata su di un substrato costituito da depositi alluvionali antichi di varia granulometria.

- L'Unità cartografica L1 ha un'estensione superficiale di 446,63 ha, al suo interno si ritrova una morfologia pianeggiante su di un substrato costituito da alluvioni recenti e, quindi, estremamente variabile nelle sue caratteristiche mineralogiche e tessiturali.

- L'Unità cartografica M1 osservata ha una superficie di 327,32 ha, la morfologia varia da pianeggiante a debolmente ondulata su di un substrato costituito da depositi eolici recenti (dune) a tratti rimodellati dall'azione antropica. Pietrosità superficiale e rocciosità affiorante sono assenti.

- L'unità delle terre N1 ha una superficie che ricade nell'area di studio pari a 116,83 ha, al suo interno si può osservare una morfologia da pianeggiante a depressa in prossimità delle foci e degli stagni costieri. La copertura vegetale, ove presente, è costituita da specie fortemente igrofile o alofile.

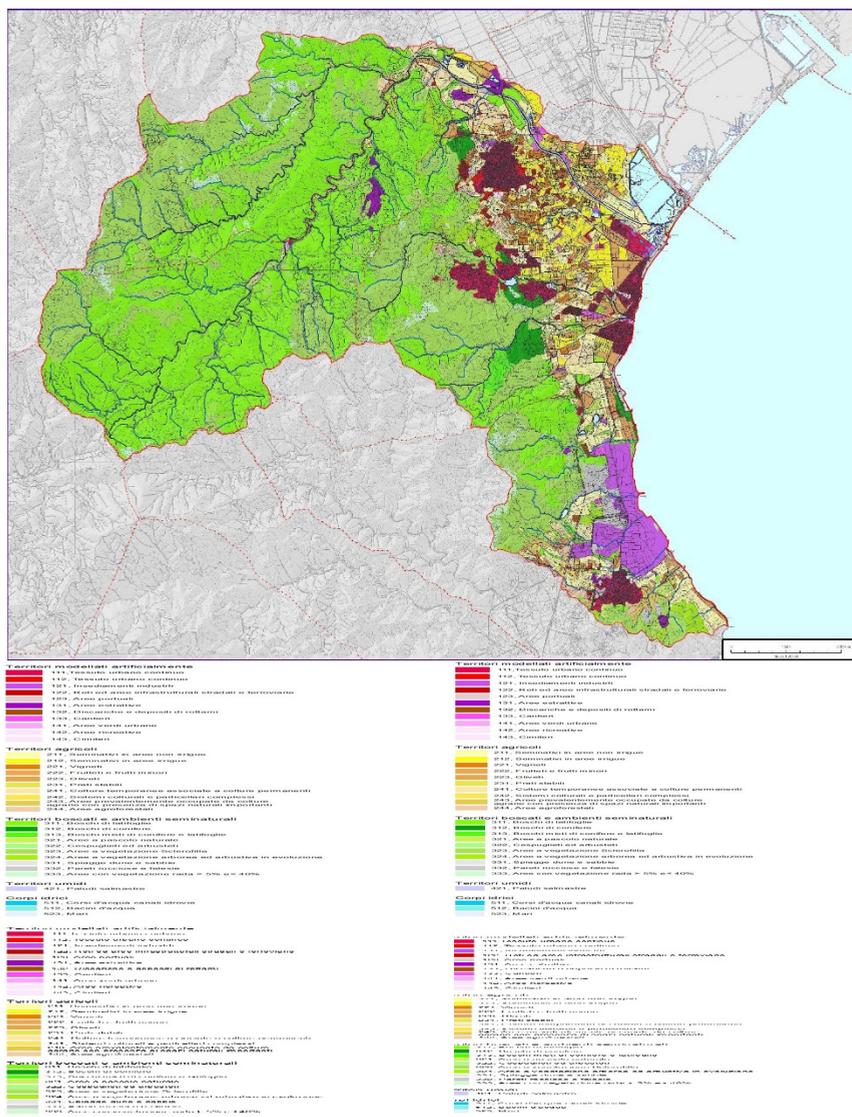
- L'unità delle terre O è relativa alle aree urbane e industriali e ricopre una superficie pari a 617,07 ha.

L'uso del suolo. – Per lo studio degli usi del suolo o delle coperture del suolo (*land use*) si usano le rappresentazioni cartografiche derivate dalla lettura di foto aeree o da immagini satellitari seguite da campagne di verifiche a terra, spesso integrate da analisi automatiche fondate su programmi di calcolo che tengano conto delle differenze di cromatismo delle immagini, oppure su analisi spaziali eseguite con tecniche GIS. La rappresentazione è corredata da una legenda, di solito articolata, che anche in Italia si rifà alla classificazione del progetto CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover (CLC) sviluppato, come noto, negli anni novanta dalla Comunità europea per la creazione di un sistema informativo per la gestione dei dati territoriali (Cumer, 1994) e per il rilevamento e il monitoraggio della copertura e uso del suolo. Coordinata dalla Commissione Europea e dall'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA), la prima realizzazione di un progetto CLC risale al 1990, e prevede

la classificazione degli usi del suolo mediante 5 macro classi di tipo gerarchico, a loro volta suddivisibili in 5 livelli di approfondimento. Ogni categoria è contrassegnata da un numero compreso tra 1 e 5, a cui corrisponde una determinata destinazione d'uso: si distinguono dunque territori modellati artificialmente, agricoli, boscati/seminaturali e umidi, nonché corpi idrici. Da tale classificazione si ottiene un'idea generale della suddivisione territoriale e, per una ricerca più approfondita, è possibile utilizzare i quattro livelli di approfondimento rimanenti per poter analizzare il territorio e le sue componenti. Il primo livello è suddiviso in 5 classi, il secondo è caratterizzato dalla presenza di 15 classi e rappresenta la copertura del suolo alla scala 1:5.000.000, il terzo livello presenta 44 classi e presenta un dettaglio alla scala 1:100.000, i livelli successivi sono associati a una presenza più rara.

Dall'analisi dei dati del caso studio in oggetto, è emerso un uso del territorio prevalentemente orientato ai territori boscati e alle aree seminaturali (3° classe), in quanto la loro superficie rappresenta oltre il 70% del totale, pari a 12.435,32 ha, seguita dai territori agricoli (2 classe) con una superficie di 3221,94 ha, pari a circa il 18 % e infine dai territori modellati artificialmente con circa l'8% della superficie, pari a 1434,05 ha, il restante 2% circa è suddiviso in modo equo tra le classi 4 e 5 che ricoprono una superficie totale di circa 65 ha. Osservando la figura 3, la distribuzione delle aree boschive e seminaturali sembra prevalere su tutto il bacino idrografico, con presenza maggiore nella parte più montuosa e collinare del bacino idrografico e in prossimità dell'alveo fluviale del Rio S. Lucia. La capacità d'uso del suolo rivela, invece, un territorio destinato all'uso agricolo, presente soprattutto nella piana di Capoterra e lungo le pendici collinari del bacino idrografico, che corrisponde alle classificazioni della LCC I-II-III ed indirizza verso un uso agricolo intensivo; la distribuzione dei centri urbani principali è collocata alle pendici collinari, con le aree destinate all'industria situate nelle foci dei fiumi e quelle turistiche nella fascia costiera, andando a occuparla quasi interamente.

Fig. 3 – Carta dell'Uso del Suolo con rispettiva legenda



Fonte: elaborazione degli autori

Applicazione del modello USLE. – Allo scopo di monitorare l’erosione del suolo, a partire dalla prima metà del secolo scorso l’agenzia United States Department of Agriculture (USDA) avviò una serie di sperimentazioni che, con il contributo di Wischmeier e Smith (1978), portarono alla delineazione di un primo modello empirico diretto all’analisi (su media

annuale) dell'azione erosiva per dilavamento: trattasi dell'Universal Soil Loss Equation (USLE), perfezionato verso la fine del decennio con l'introduzione del Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In accordo ai modelli, il potenziale erosivo di un territorio è calcolabile attraverso l'espressione (Panizza, 1988):

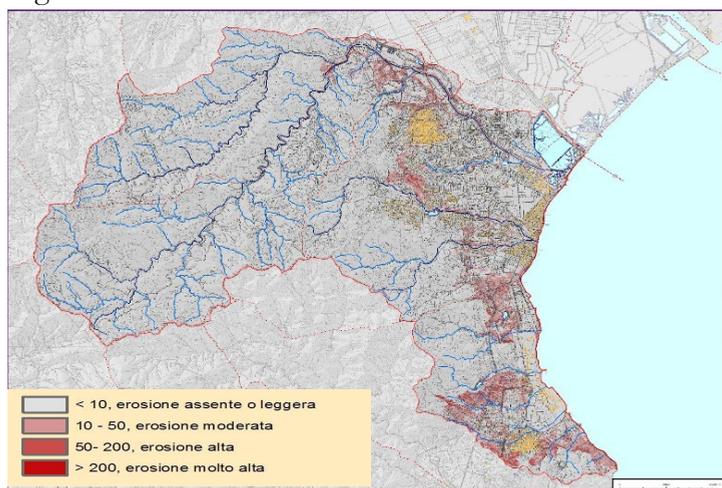
$$E = R * K * L * S * C * P$$

dove E esprime la perdita di suolo media annua per ettaro; R misura la capacità erosiva (legata a intensità e costanza) delle precipitazioni, maggiore con il loro livello di irregolarità; K è legato all'erodibilità di un suolo secondo la specifica composizione, coesione e granulometria; L è dato dal rapporto tra la perdita di suolo in un versante di una data lunghezza e la perdita di suolo in un versante con identiche caratteristiche di lunghezza pari a 22.1, in quanto la lunghezza di un pendio condiziona l'incremento della velocità e conseguentemente l'energia cinetica di dilavamento dell'acqua; S coincide con il rapporto tra la perdita di suolo in un versante con una data pendenza e la perdita di suolo in un versante con identiche caratteristiche, la cui pendenza è del 9%, e anche l'aumento del grado di acclività causa un accrescimento dell'energia cinetica dell'acqua e quindi il suo grado di erosione; C equivale al rapporto tra la perdita di superficie relativa all'area di uso del suolo e a un'altra uguale coltivata secondo la pratica agricola del maggese; P è un parametro che restituisce il rapporto tra la perdita di suolo con opportune pratiche di controllo dell'erosione e quella legata a lavorazione secondo linee di massima pendenza, considerando dunque le tecniche di sistemazione e di difesa dei terreni presenti all'interno del bacino idrografico, quali terrazzamenti e gradonamenti.

Dalle elaborazioni cartografiche relative al rischio di erosione del 1984 e del 2014 è emerso che il territorio preso in esame è soggetto nella parte orientale ad un alto rischio di erosione, dovuto prevalentemente alla sua antropizzazione e alle destinazioni d'uso dell'area: il confronto delle figure 4 e 5 restituisce un grado di erosione alto, con valori che vanno da 50 e oltre i 200 e ricadenti all'interno delle unità cartografiche di tipo I1, ovvero aree caratterizzate da depositi alluvionali, pedologicamente non soggette ad un forte rischio erosivo ma che, a causa della forte antropizzazione del territorio, sono state interessate da un aumento e da una traslazione verso

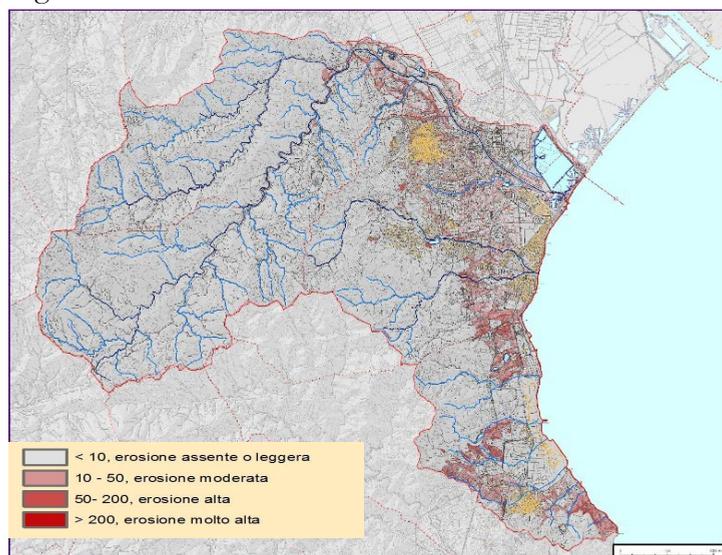
valle delle aree interessate dall'erosione. La predisposizione della parte orientale del territorio al rischio di dilavamento può essere attribuita alla prossimità di aree dall'orografia molto elevata e caratterizzate da forte acclività, con pendenze che vanno dal 40% sino a superare l'80%.

Fig. 4 – *Erosione dei suoli nel 1984*



Fonte: elaborazione degli autori

Fig. 5 – *Erosione dei suoli nel 2014*



Fonte: elaborazione degli autori

Applicazione del modello CREAMS. – Per calcolare il carico di fosforo o di azoto all'interno del bacino idrografico, è stato utilizzato il modello del CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), sviluppato dalla USDA (1980). L'applicazione del modello necessita la conoscenza delle dinamiche naturali ed antropiche, che interagiscono all'interno dell'area di studio: nel caso del presente lavoro, sono state valutate le dinamiche idrogeologiche, erosive e inquinanti, in quanto la distribuzione dei nitrati e fosfati è strettamente legata alla concentrazione che essi hanno nelle acque di ruscellamento, all'interno degli eventi meteorici, e al contenuto presente nei sedimenti erosivi e nelle acque di percolazione, i quali a loro volta sono strettamente collegati alle caratteristiche dei suoli e alla destinazione d'uso. Per determinare il carico dei nutrienti (fosforo e azoto) presenti nei sedimenti derivanti dall'azione erosiva dell'acqua, sono stati impiegati i dati ricavati dal modello USLE.

Il carico dei fosfati e nitrati all'interno del bacino idrografico (tab. 1) può essere condizionato in maniera determinante dal tipo di uso del suolo, pertanto si è tenuto conto del carico possibile nell'area di studio, partendo dall'analisi delle tabelle fornita dal Ministero dell'Ambiente.

Tab. 1 – *Carico dei nutrienti corrispondenti agli usi del suolo*

Usi del Suolo	Coefficienti	
	Fosforo (P)	Azoto (N)
Urbano	0,34 Kg annuo per residente	2 Kg annuo per residente
Industria	10 % dell'urbano	10 Kg annuo per operaio
Suolo non coltivato	0,1 Kg ettaro annuo	2 Kg ettaro annuo
Suolo coltivato	0,6 Kg ettaro annuo	4 Kg ettaro annuo

Fonte: elaborazione degli autori

Da una prima analisi quantitativa emerge che il carico potenziale (C_p), determinato dai fattori di carico e dalle unità di riferimento, ovvero dalle dimensioni delle sorgenti inquinanti e dalla loro intensità unitaria, è pari a 8.232,21 Kg/anno di fosforo, mentre l'azoto ha un carico potenziale di 90.139,17 Kg/anno, la cui distribuzione emerge dall'andamento dei nutrienti del 1984 e il 2014 (tab. 2).

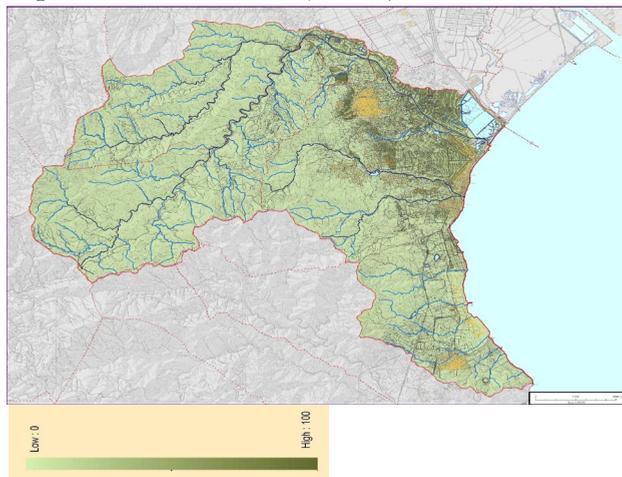
Tab. 2 – *Risultati relativi alle analisi dei nutrienti nel 1984 e nel 2014*

Usi del suolo	Carico fosforo	Carico Azoto	Superficie interessata
1984			
Urbano	4070,48	23944	441,11
Industria	407,048	25390	327,81
Suolo non coltivato	1183,04	23660,85	11830,42
Suolo coltivato	2571,64	17144,31	4286,08
2014			
Urbano	9674,02	56906	953,46
Industria	967,402	11180	440,88
Suolo non coltivato	1243,53	24870,63	12435,31
Suolo coltivato	1933,16	12887,74	3221,93

Fonte: elaborazione degli autori

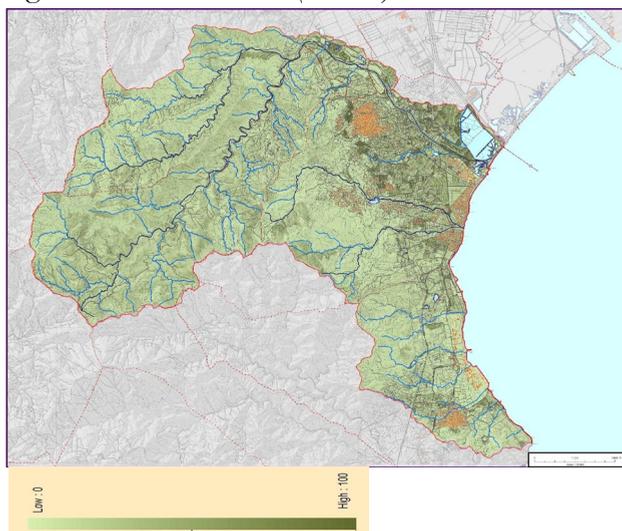
È stata poi calcolata la concentrazione dei nutrienti presenti all'interno del sedimento eroso: questo ha richiesto la valutazione del rapporto di arricchimento del nutriente, prima di poter identificare la quantità di elementi trasportati dal sedimento erosivo (SEDN o SEDP). Le figure 6 e 7 restituiscono il confronto dell'evoluzione di SEDP tra il 1984 e 2014: l'aumento della concentrazione di fosforo ha intaccato porzioni sempre maggiori di territorio, a causa dell'incremento dei sedimenti prodotti dall'azione erosiva delle acque meteoriche, nonché della crescita dei nutrienti presenti nel territorio, soprattutto quelli legati all'industria e all'aumento della popolazione con un incremento del 42,07%.

Fig. 6 – *Sedimento erosivo (SEDP) del 1984*



Fonte: elaborazione degli autori

Fig. 7 – *Sedimento erosivo (SEDP) del 2014*



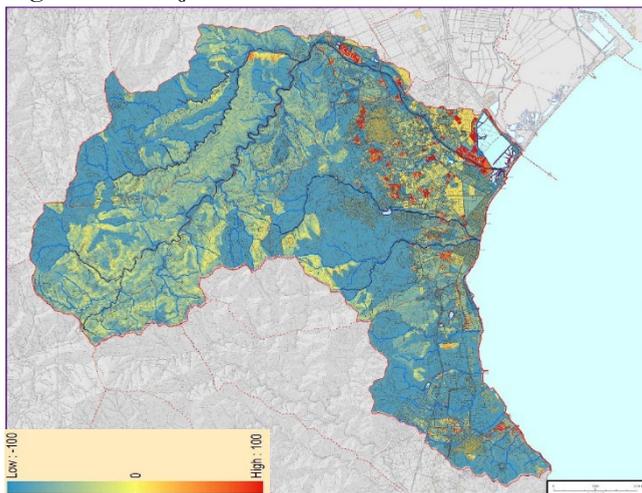
Fonte: elaborazione degli autori

Discussione dei risultati. – Dal confronto tra le immagini satellitari del 1984 (anno della ripresa satellitare dell'area con lo spettro dell'infrarosso) e del 2014, supportato dall'impiego dell'indice NDVI, è stato possibile ottenere delle elaborazioni grafiche a evidenza della variazione di uso del suolo in relazione all'aumento dell'antropizzazione, ponendo in risalto il ruolo svolto da quest'ultima nella trasformazione e/o accelerazione dei

processi ambientali. L'indice di erosione dei suoli è risultato essere l'elemento maggiormente interessato dalle trasformazioni territoriali nel periodo osservato; come si può notare, infatti, le aree più esposte all'erosione sono quelle pianeggianti, in quanto nelle aree montuose (nonostante la presenza di suoli poco impermeabili e pedologicamente propensi all'erosione) la copertura vegetale fa sì che il grado di erosione sia quasi nullo. Nel corso degli anni l'erosione ha visto un incremento ascrivibile probabilmente alla frammentazione agraria del territorio e alla sua costante urbanizzazione. I risultati confermano la connessione dei processi ambientali con la struttura del territorio, e come una sia pur modesta alterazione sia in grado di determinare un cambiamento delle loro dinamiche.

L'analisi del carico di nutrienti contenuto nei sedimenti, effettuata mediante il modello CREAMS, ha evidenziato la stretta connessione degli stessi (la cui concentrazione è legata alle destinazioni d'uso del territorio e al loro carico potenziale) con l'erosione. Dalle carte derivate emerge come il carico potenziale sia aumentato negli anni prevalentemente in funzione dell'incremento di popolazione (fig. 8): ciò ha comportato nel 2014 un carico di fosforo e di azoto da 4070 a 9674 Kg/annuo; la diminuzione del carico di nutrienti derivanti dai suoli coltivati può essere ascritta, invece, ad una riduzione delle aree agricole a favore degli insediamenti urbani e industriali.

Fig. 8 - *Variazione del SEDP tra il 1984 e il 2014*



Fonte: elaborazione degli autori

È stato possibile osservare, inoltre, come spesso la “naturale” pericolosità di alcuni processi ambientali possa trasformarsi in rischio per gli insediamenti e la popolazione residente all’interno del bacino idrografico, anche a causa dell’incremento della superficie impermeabile che aumenta il deflusso superficiale delle acque e la velocità di corrivazione di queste ultime, con un conseguente aumento della portata, essendo quest’ultima connessa strettamente al volume per unità di tempo. In questo caso si verifica un aumento del volume d’acqua con un tempo di ritardo molto minore, dovuto alla natura impermeabile dei terreni.

Pertanto, si può affermare che le analisi effettuate abbiano contribuito alla comprensione del rapporto tra processi ambientali e pianificazione, suggerendo l’attuazione di buone pratiche per l’uso di territori in cui sono presenti intensi processi di trasformazione territoriale che vanno a incidere su aree idraulicamente sensibili, come le foci di fiumi o torrenti, o le aree di possibile esondazione dei loro alvei, soprattutto se l’espansione dei centri urbani avviene nelle pianure soggette all’allargamento improvviso del letto dei corsi d’acqua. Una approfondita analisi della trasformazione e dell’evoluzione del territorio nel tempo, accompagnata da conoscenze di base delle caratteristiche, delle dinamiche dei suoli e del loro utilizzo, dovrebbe essere intrapresa a monte di possibili decisioni di pianificazione, con il supporto di analisi previsionali fondate sulla modellistica comportamentale. Questa, infatti, analizza i fattori e le componenti ambientali (come evidenziato in questo lavoro), quali il clima, la piovosità, il coefficiente di erodibilità dei suoli, il livello di artificializzazione delle coperture del terreno.

L’adozione di opportune *best practice* consentirebbe di controllare e mitigare, se non eliminare del tutto, gli impatti che le nuove opere di urbanizzazione, come l’espansione di un nucleo urbano o la costruzione di un’infrastruttura viaria, possono avere sul territorio. Un esempio di mitigazione può essere quello di aumentare i tempi di ritardo della portata dei corsi d’acqua legati all’impermeabilizzazione dei suoli mediante l’utilizzo di fattori compensativi dell’impermeabilizzazione stessa. Si dovrebbe pensare anche alla riduzione del rischio di alluvioni mediante la costruzione di vasche di laminazione da realizzare a monte delle zone urbane che ricadono all’interno delle aree di esondazione: ciò implica la necessità di realizzare accumuli temporanei di acque per i quali occorre, tuttavia, disporre di una morfologia adeguata all’interno del bacino idrografico a monte del centro urbano.

Conclusioni. – La prima parte del presente contributo si è concentrata su una disamina dello stato attuale del Mar Mediterraneo, confermando una percezione diffusa che lo considera uno dei mari più inquinati al mondo. Sono state evidenziate le criticità derivanti dalle pratiche di sfruttamento del territorio e delle risorse idriche, evidenziando l'inquinamento generale e l'insostenibilità delle attività ittiche, con conseguenti fenomeni di eutrofizzazione. Il rapporto tra il Mediterraneo e l'eutrofizzazione è complesso: sebbene l'area si configuri come oligotrofica, le attività antropiche, quali gli scarichi industriali, agricoli e civili, hanno provocato l'eutrofizzazione delle aree costiere, soprattutto settentrionali: le principali cause di questo fenomeno sono, dunque, l'incremento demografico, l'industrializzazione e l'uso diffuso di pesticidi e fertilizzanti in agricoltura.

La seconda fase dell'indagine, focalizzata sui bacini idrografici del Rio Santa Lucia nell'area della Sardegna sud-occidentale ed inserita nel più ampio contesto di ricerca volto a comprendere le dinamiche ambientali del Mediterraneo, ha inteso identificare metodologie efficaci per la gestione sostenibile delle risorse naturali. L'utilizzo delle tecnologie geospaziali, quali i GIS, ha rappresentato un passo avanti verso una valutazione più accurata degli impatti delle attività umane sull'ambiente, consentendo di monitorare i cambiamenti del paesaggio, identificare le aree a rischio e sviluppare strategie mirate di mitigazione dei danni. L'analisi condotta sull'uso del suolo, basata su di un ampio confronto temporale (1984-2014) delle immagini satellitari, supportate dall'indice di vegetazione maggiormente utilizzato (NDVI), conferma uno scenario di trasformazione del paesaggio determinato essenzialmente da fattori antropogenici: l'espansione delle aree industriali e la conversione dei terreni agricoli hanno determinato cambiamenti significativi nell'uso delle risorse naturali ed idriche, con perdita di suolo e conseguenze dirette sull'equilibrio ecologico e sulla biodiversità delle aree osservate. Inoltre, l'analisi del carico di nutrienti nei sedimenti, condotta attraverso l'applicazione dei modelli USLE/RUSLE e CREAMS ha restituito rilevanti indicazioni sulla stretta connessione tra la distribuzione dei composti chimici nell'ambiente e il processo erosivo del suolo, fornendo un quadro completo della complessa e critica interazione tra le dinamiche ambientali e le attività antropiche. I risultati evidenziano un aumento significativo delle comunità algali e del carico di azoto e fosforo nel corso degli anni, suggerendo un legame stretto tra le pratiche agricole, la gestione del territorio e la qualità dell'ambiente acquatico circostante. Di conseguenza, i risultati della ricerca hanno evidenziato la stretta

correlazione tra processi ambientali ed idrici, dimostrando che anche una piccola modifica può influenzare significativamente le loro dinamiche. Si è anche osservato come la pericolosità intrinseca di alcuni fenomeni ambientali possa trasformarsi in un rischio per gli insediamenti e la popolazione residente all'interno del bacino idrografico.

La ricerca ha, dunque, messo in evidenza lo stretto legame tra processi ambientali e pianificazione, indicando la necessità di adottare buone pratiche per la gestione del territorio, soprattutto in contesti vulnerabili dal punto di vista idrico, sottolineando l'importanza di adottare approcci integrati volti a ridurre la perdita di suolo e ad assicurare la sostenibilità delle risorse idriche sia nelle aree indagate del Sud Sardegna che del Mediterraneo.

BIBLIOGRAFIA

- AKINNAWO S.O, “Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies”, *Environmental Challenges*, 2023, 12, 100733, pp. 1-18.
- ARHONDITSIS G. E ALTRI, “Quantification of the effects of nonpoint nutrient sources to coastal marine eutrophication: applications to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean Sea”, *Ecological Modelling*, 2000, 129, 2-3, pp. 209-227.
- ARU A., BALDACCINI P., VACCA A. (a cura di), *Nota illustrativa alla carta dei suoli della Sardegna*, Cagliari, 1991.
- BAUDENA A. E ALTRI, “Low-Density Plastic Debris Dispersion beneath the Mediterranean Sea Surface”, *Environmental Science & Technology*, 2023, 57, 19, pp. 7503-7515.
- CIPOLETTI F. E ALTRI, “Analisi dei cambiamenti dell’uso del suolo attraverso l’utilizzo di immagini iperspettrali”, *Atti 15° Conferenza Nazionale ASITA*, 2011, pp. 651-656.
- COMMISSIONE EUROPEA, *Relazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo sull’attuazione della direttiva 91/676/CEE del Consiglio relativa alla protezione delle acque dall’inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole sulla base delle relazioni degli Stati membri per il periodo 2016-2019*, Bruxelles, 11 ottobre 2021.
- CUMER A., “Il progetto CORINE Land Cover in Italia: un modello da seguire”, *Documenti del Territorio*, 1994, 8.

- GAZZETTA UFFICIALE DELLA REPUBBLICA ITALIANA, *Decreto Legislativo 27 gennaio 1992, n. 132*
(www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/1992/02/19/41/so/34/sg/pdf).
- GOBBI L., AMODEO G., *Alcuni aspetti della gestione ambientale*, Roma, Aracne, 2004.
- KARYDIS M., KITSIOU D., “Eutrophication and environmental policy in the Mediterranean Sea: a review”. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184, pp. 4931-4984.
- MARTINIS B., *Geologia ambientale*, Torino, UTET, 1997.
- NEVEROVA-DZIOPAK E., KOWALEWSKI Z. PREISNER M., “The universal trophic index: new methodological approach to eutrophication monitoring and control”, *Aquatic Sciences*, 2023, 85, 6, pp. 1-16.
- PANIZZA M., *Geomorfologia Applicata, Metodi di applicazione alla pianificazione territoriale e alla valutazione d'impatto ambientale*, Roma, Carocci, 1988.
- PETTORELLI N., *The Normalized Difference Vegetation Index*, Oxford, Oxford University Press, 2013.
- PORTALE DEL SUOLO. OSSERVATORIO REGIONALE SUOLI DELLA SARDEGNA, *Carta dei suoli della Sardegna in scala 1:250.000*
(<http://www.sardegnaportalesuolo.it/cartografia/carte-dei-suoli/carta-dei-suoli-della-sardegna-scala-1250000.html>)
- RICCABONI A. E ALTRI, *Sustainable Development in the Mediterranean. Report 2020. Transformations to achieve the Sustainable Development Goals*, Siena, Sustainable Development Solutions Network Mediterranean (SDSN Mediterranean), 2020.
- RIVAS-MARTINEZ S., SANCHÈZ-MATA D., COSTA M., “North American boreal and Western temperate forest vegetation”, *Itinera Geobotanica*, 1999, 12, pp. 5-316.
- SECHI N., “Il problema dell'eutrofizzazione dei laghi. La situazione trofica degli invasi della Sardegna”, *Bollettino della Società Sarda di Scienze Naturali*, 25, 1986, pp. 49-62.
- SONARGHARE P.C. E ALTRI, “Causes and Effects of Eutrophication on Aquatic Life (A Review)”, *Essence. International Journal for Environmental Rehabilitation and Conservation*, 2020, 11, SP2, pp. 213-218.
- USDA, CREAMS. *A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*, Conservation research report n. 26, Washington, 1980.
- VIAROLI P. E ALTRI, “Eutrophication of the Mediterranean Sea: a watershed-cascading aquatic filter approach”, *Rendiconti Lincei*, 2015, 26, pp. 13-23.

WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., *Predicting rainfall erosion losses – A guide for conservation planning*, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook N° 537, Washington, 1978.

Geospatial methodologies for the monitoring of eutrophication of water bodies. – As collective awareness of environmental issues increases, the debate on water pollution becomes more focused on all anthropogenic activities (industrial, agricultural and domestic discharges, waste management) that cause water eutrophication. This paper aims to highlight how the use of GIS makes it possible to examine soil erosion and to calculate the theoretical load re-located over time in watersheds by human activities. The USLE/RUSLE and CREAMS models, coupled with satellitary data, allow to examine the evolution of land and watersheds. In the first part of the paper, the focus was on the Mediterranean, one of the most polluted seas on the planet; in the second part, the watersheds of the Rio Santa Lucia, Rio San Girolamo and other minor ones in south-western Sardinia were investigated. The research highlighted the connection between spatial planning and environmental processes, underlining the importance of best practices of territory management, especially in contexts with water vulnerability. The objective is to set up an integrated methodology to monitor soil erosion and eutrophication of water resources, in order to identify strategies and actions to mitigate these phenomena.

Keywords. – GIS, USLE/RUSLE and CREAMS models, Sardinia

Università degli Studi di Sassari, Dipartimento di Scienze Umanistiche e Sociali
glscanu@uniss.it

Università degli Studi di Sassari, Dipartimento di Scienze Umanistiche e Sociali
fcuomo@uniss.it

Università degli Studi di Sassari, Dipartimento di Scienze Umanistiche e Sociali
smalvica@uniss.it