

L'INDICE DI QUALITÀ MORFOLOGICA (IQM) PER LA VALUTAZIONE E LA CLASSIFICAZIONE IDROMORFOLOGICA DEI CORSI D'ACQUA

THE MORPHOLOGICAL QUALITY INDEX (MQI) FOR STREAM EVALUATION AND HYDROMORPHOLOGICAL CLASSIFICATION

MASSIMO RINALDI^(*), NICOLA SURIAN^(**), FRANCESCO COMITI^(***) & MARTINA BUSSETTINI^(****)

^(*) Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - e-mail: mrinaldi@dicea.unifi.it

^(**) Università degli Studi di Padova - Dipartimento di Geografia

^(***) Libera Università di Bolzano - Facoltà di Scienze e Tecnologia

^(****) Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Roma

RIASSUNTO

Viene presentata la struttura generale di una nuova metodologia, denominata *IDRAIM* (sistema *IDRomorfologico di valutazione, Analisi e Monitoraggio dei corsi d'acqua*), che permette di valutare ed analizzare le condizioni morfologiche di un corso d'acqua. In particolare, viene illustrato l'Indice di Qualità Morfologica (*IQM*) dei corsi d'acqua appositamente sviluppato ai fini della classificazione idromorfologica richiesta nell'ambito della Direttiva Quadro Acque dell'Unione Europea (*Dir* 2000/60/CE o *WFD*).

Il metodo, basato sull'integrazione di rilievi sul terreno ed interpretazione di immagini telerilevate, è strutturato in tre fasi: inquadramento e suddivisione in tratti del corso d'acqua; valutazione dello stato attuale; monitoraggio.

La suddivisione iniziale in tratti si basa principalmente sulle condizioni fisiche del bacino, il grado di confinamento del corso d'acqua e la morfologia dell'alveo. La valutazione delle condizioni attuali viene realizzata attraverso l'uso di una serie di schede che consentono un'analisi guidata dei seguenti aspetti: (a) continuità (longitudinale e laterale) del corso d'acqua; (b) configurazione morfologica dell'alveo; (c) configurazione della sezione; (d) struttura e substrato del fondo; (e) vegetazione nella fascia perfluviale. I precedenti aspetti vengono analizzati relativamente alle tre seguenti componenti: (1) funzionalità geomorfologica; (2) artificialità; (3) variazioni morfologiche. Viene utilizzato un sistema a punteggi per ottenere un Indice di Alterazione Morfologica (*IAM*) e un Indice di Qualità Morfologica (*IQM*), in base ai quali classificare il tratto in esame del corso d'acqua. La fase di monitoraggio consente di valutare il mantenimento, o le eventuali variazioni, delle attuali condizioni morfologiche.

TERMINI CHIAVE: *Indice di Qualità Morfologica dei corsi d'acqua, idromorfologia, Direttiva Quadro Acque, valutazione morfologica, IDRAIM*

INTRODUZIONE

La Direttiva Quadro Europea "Acque" (Water Framework Directive o *WFD*: EUROPEAN COMMISSION, 2000) introduce gli aspetti idromorfologici come elementi da valutare, oltre a quelli fisico-chimici e biologici, per giungere ad una classificazione dello stato ecologico dei corsi d'acqua. Nonostante l'impostazione innovativa della *WFD*, al-

ABSTRACT

The general structure of a new methodology, named *IDRAIM* (sistema *IDRomorfologico di valutazione, Analisi e Monitoraggio dei corsi d'acqua*), aimed at a hydromorphological assessment and analysis of streams is presented. In particular, a stream Morphological Quality Index (*MQI*) developed for the hydromorphological classification required by the European Water Framework Directive 2000/60/EC (*WFD*) is illustrated.

The methodological approach is based on integration of field surveys with remote sensing and *GIS* analyses. The complete procedure is composed by three parts: initial setting and classification; evaluation of the present morphological state and monitoring. The initial classification is mainly based on catchment physiographic conditions, channel confinement and morphology. The evaluation of present morphological conditions is carried out by using a series of forms allowing a guided analysis of the following aspects: (a) longitudinal and lateral continuity; (b) channel pattern; (c) cross-sectional configuration; (d) bed structure and substrate; and (e) vegetation in the riparian corridor.

The analysis is carried out with reference to the foregoing five aspects by three components: (1) geomorphic functionality; (2) artificiality; (3) channel changes. A scoring system is used to obtain a Morphological Alteration Index (*MAI*) and a Morphological Quality Index (*MQI*). It is proposed that the two indices will allow to classify the morphological conditions of a stream. The monitoring phase should then allow for a future assessment of possible variations of the present morphological conditions.

KEY WORDS: *stream Morphological Quality Index, hydromorphology, Water Framework Directive, morphological assessment, IDRAIM*

INTRODUCTION

The Water Framework Directive (*WFD*) (EUROPEAN COMMISSION, 2000) introduces hydromorphology as one of the elements to be evaluated, besides water quality and biological aspects, in order to obtain an evaluation and classification of the stream ecological state. Notwithstanding the innovations of the *WFD*, some limita-

cuni aspetti cruciali possono compromettere il raggiungimento degli obiettivi fondamentali della direttiva stessa, ad esempio la mancanza di metodologie adeguate per la valutazione degli aspetti idromorfologici.

Attualmente non esiste ancora una piena comprensione di quali siano gli aspetti ed i parametri morfologici più strettamente correlabili con lo stato di salute ecologico di un corso d'acqua, seppure numerose ricerche si siano dedicate recentemente a questo argomento (si veda ad es. KAIL & HERING, 2009; WYZGA *et alii*, 2009; GURNELL *et alii*, 2009). Esiste tuttavia un ampio consenso sul fatto che il funzionamento dei processi geomorfologici del corso d'acqua e le sue condizioni di equilibrio dinamico promuovono spontaneamente la diversità di habitat ed il funzionamento degli ecosistemi acquatici e ripariali (PALMER *et alii*, 2005; CLARKE *et alii*, 2003).

Le metodologie finora più frequentemente proposte per valutare gli aspetti idromorfologici ai fini della WFD si identificano con le procedure note come 'rilievo degli habitat fluviali' ('*river habitat survey*': si veda ad es. il metodo RHS in UK, RAVEN *et alii*, 1998), le quali sono adatte a caratterizzare la presenza e diversità di habitat fisici ma non consentono una reale valutazione degli aspetti idrologici e geomorfologici del corso d'acqua in quanto si basano su approcci di tipo ecologico. E' pertanto crescente l'esigenza di adottare un approccio basato sulla considerazione e comprensione dei processi geomorfologici che determinano il funzionamento fisico del corso d'acqua, che possa non solo consentire una classificazione dello stato morfologico attuale, ma anche supportare un'analisi delle pressioni e degli impatti, fondamentali per la progettazione di misure finalizzate al miglioramento delle condizioni morfologiche ed ecologiche e per il monitoraggio dell'efficacia di queste misure. In tale direzione si collocano alcuni esempi di nuove metodologie sviluppate in Spagna (OLLERO *et alii*, 2007) ed in Francia (metodo SYRAH, CHANDESRIIS *et alii*, 2008).

Partendo da questi presupposti, l'obiettivo della ricerca è stato quello di sviluppare un sistema di indagine, valutazione e classificazione morfologica dei corsi d'acqua a scala nazionale che presenti una serie di requisiti precedentemente sottolineati (ad esempio scale spaziali adeguate per una comprensione dei processi fisici, considerazione delle tendenze evolutive) e che al tempo stesso sia sufficientemente semplice ed operativo da poter essere adottato ai fini della WFD (RINALDI *et alii*, 2010). Nel presente lavoro viene presentata la struttura generale di questa nuova metodologia e alcuni risultati delle prime applicazioni svolte su alcuni corsi d'acqua italiani.

RASSEGNA DEI METODI ESISTENTI PER LA VALUTAZIONE IDROMORFOLOGICA

Il termine "idromorfologia" viene introdotto dalla WFD (EUROPEAN COMMISSION, 2000), e richiede di considerare i seguenti aspetti: (a) esistenza ed entità delle alterazioni del regime delle portate liquide; (b) alterazioni del flusso liquido e di sedimenti a causa di barriere artificiali; (c) modificazioni della morfologia dell'alveo, incluse le costrizioni al libero movimento del corso d'acqua (SEAR *et alii*, 2003). Facendo seguito alla WFD ed in accordo alle definizioni adottate da

tions are recognised, among which hydromorphology appears to be the component taken least into consideration, such as to eventually compromise the achievement of the fundamental objectives of the directive.

Nowadays a full comprehension of morphological aspects and parameters more strictly correlated to the ecological state of a stream are still missing, even though several efforts have been recently devoted to this issue (see for example: KAIL & HERING, 2009; WYZGA *et alii*, 2009; GURNELL *et alii*, 2009). A wide consensus however exists on the fact that geomorphic processes of streams and their dynamic equilibrium conditions spontaneously promote habitat diversity and functioning of aquatic and riparian ecosystems (e.g. CLARKE *et alii*, 2003; PALMER *et alii*, 2005).

However, the approach used up to now in most European countries tends to reflect '*river habitat survey*' procedures (see for example the RHS in UK, RAVEN *et alii*, 1998), which are suitable to characterize the presence and diversity of physical habitats but which have not been developed to comply with the WFD requirements. Therefore, there is an increasing need for an approach based on the consideration and understanding of geomorphological processes responsible for river functioning, that can be used not only for a classification but also for supporting analyses of pressures and impacts, and design of mitigation measures. Some examples of new methods currently developed in Spain (OLLERO *et alii*, 2007) and in France (SYRAH procedure - CHANDESRIIS *et alii*, 2008) are in this direction.

The aim of this research is to develop a system of stream morphological assessment and classification at national level with a series of requisites previously detailed (adequate spatial scales, consideration of processes and trends of channel evolution, etc.) which, at the same time, would be sufficiently simple and practical (RINALDI *et alii*, 2010). In this paper, the general structure of this new methodology and some results of first applications to Italian streams and rivers are presented.

REVIEW OF EXISTING METHODS FOR HYDROMORPHOLOGICAL EVALUATION

The term "hydromorphology" has been introduced by the WFD (EUROPEAN COMMISSION, 2000), and includes consideration of: (a) the extent of modification to the flow regime; (b) the extent to which water flow, sediment transport and the migration of biota are impacted by artificial barriers; (c) the extent to which the morphology of the river channel has been modified, including constraints to the free movement of a river across its floodplain (SEAR *et alii*, 2003). Follow-

vari autori (si veda ad es. CEN, 2004; NEWSON & LARGE, 2006; MAAS & BROOKES, 2009; VOGEL, 2011), l'idromorfologia può essere definita come quella disciplina che, integrando l'idrologia e la geomorfologia fluviale, studia i processi e le forme fluviali, le loro interazioni con le pressioni antropiche e le implicazioni sui processi ecologici.

In campo internazionale sono stati sviluppati da diversi anni numerosi metodi che si basano sul censimento degli habitat fisici e della diversità di forme fluviali, noti anche come procedure di 'rilievo degli habitat fluviali' ('*river habitat survey*'). Tra i metodi utilizzati in Europa rientranti in questa categoria si possono annoverare il *River Habitat Survey (RHS)* (RAVEN *et alii*, 1998), il *National Physical Habitat Index* (National Environmental Research Institute) in Danimarca, il *Physical S.E.Q.* (AE, 1998) in Francia, ed infine il *Caravaggio* (BUFFAGNI *et alii*, 2005), adattamento dell'RHS al contesto italiano e mediterraneo. Bisogna tuttavia considerare che tali metodologie non sono state originariamente sviluppate per soddisfare i requisiti della stessa Direttiva. Tra i loro principali limiti si rimarkano i seguenti: (a) usano approcci basati sulle forme e non includono considerazioni sui processi e sulle tendenze evolutive; (b) utilizzano 'condizioni di riferimento' in termini di forme (presenza e numero di determinate caratteristiche) facendo uso di 'tratti di riferimento' nelle attuali condizioni (seppure possono essere già in parte alterati); (c) la scala spaziale di indagine (quella del 'sito', cioè con lunghezza dell'ordine di qualche centinaio di m) non può essere considerata adeguata per una reale diagnosi e comprensione degli aspetti morfologici, in quanto l'alterazione fisica in un sito è conseguenza di processi e cause che coinvolgono scale più ampie; (d) tali procedure poco si adattano ad un'analisi delle pressioni e degli impatti finalizzata alla progettazione di misure e alle successive verifiche della loro efficacia, come richiesto nei piani di gestione previsti dalla WFD. Si consideri ad esempio un tratto di alveo che abbia subito intense modificazioni morfologiche (incisione, restringimento) negli ultimi decenni, come è molto frequente in corsi d'acqua italiani (SURIAN *et alii*, 2009). Attraverso il metodo RHS si effettua un censimento delle forme attuali (ad es. barre, riffles, pools, ecc.) e del loro numero, pertanto il risultato potrebbe essere relativamente elevato (si pensi ad esempio ad un tratto trasformatosi da una morfologia a canali intrecciati ad una a canale singolo ma comunque caratterizzato da una relativa variabilità morfologica), trascurando completamente le alterazioni dei processi legate alle variazioni morfologiche (ad es. disconnessione con la piana inondabile, perdita di habitat in alveo e nella fascia perifluviale, ecc.). Inoltre, il valore dell'indice RHS potrebbe variare notevolmente a seconda della scelta del sito di applicazione (500 m di lunghezza), che potrebbe risentire di situazioni locali.

In ambito nazionale, oltre al già citato Caravaggio, è certamente da ricordare l'*IFF (Indice di Funzionalità Fluviale: SILIGARDI et alii, 2007)*, il quale tuttavia mira a valutare sinteticamente la funzionalità ecologica complessiva attuale di un tratto fluviale e non nasce dall'esigenza di valutare specificatamente gli aspetti idromorfologici in base al loro scostamento rispetto ad una situazione di riferimento. Recentemente è stata inoltre realizzata una proposta metodologica di valutazione integrata dello stato ecologico (*FLEA: Fluvial Ecosystem Assessment*) (NARDINI *et alii*, 2008), specifica per le esigenze della

ing the WFD, and according to definitions adopted by various authors (e.g. CEN, 2004; NEWSON & LARGE, 2006; MAAS & BROOKES, 2009; VOGEL, 2011), hydromorphology can be defined as the discipline that, by integrating hydrology and fluvial geomorphology, aims to study fluvial forms and processes, their interactions with human impact, and consequent implications on ecological processes.

Over recent years, several methods have been developed in many countries, that are based on a census of physical habitats and diversity of fluvial forms, also known as river habitat survey procedures. Among those adopted in Europe and included in this category the following can be mentioned: the *River Habitat Survey (RHS)* (RAVEN *et alii*, 1998), the *National Physical Habitat Index* (National Environmental Research Institute) in Denmark, the *Physical S.E.Q.* (AE, 1998) in France, and the *Caravaggio* (BUFFAGNI *et alii*, 2005), the latter deriving from the RHS adapted to the Italian and Mediterranean context. It has to be considered that such methods were not originally developed to satisfy the requirements of the WFD. Among the main limitations of these methodologies, we note the following: (a) they make use of a 'form-based approach' and do not include considerations on processes and trends of adjustment; (b) as a consequence, they define 'reference conditions' in terms of forms (presence and number of given features) making use of 'reference reaches' in the present conditions (although they can be partially altered); (c) the spatial scale of investigation (coinciding with the 'site', with a length of the order of some hundreds of meters) is inadequate for a real diagnosis and comprehension of morphological problems, as physical degradation of a site is generally the consequence of processes and causes at a wider scale; (d) these procedures are not appropriate for an analysis of pressures and impacts aimed at the design of restoration actions, as required by the WFD. For example, let us consider a channel reach subject to intense adjustments (incision, narrowing) during the last decades, as very frequently occurred along many Italian rivers (SURIAN *et alii*, 2009). By using the RHS method, a census of present forms (i.e. bars, riffles, pools) and their number is carried out, therefore the result could be relatively good (e.g. a reach changing from a braided to a single-thread morphology, but still maintaining a diversity of forms), completely neglecting the alterations of processes related to the channel adjustments (e.g. disconnection with floodplain, loss of aquatic and riparian habitats, etc.). Furthermore, the RHS value could significantly vary depending on the site of application (length of 500 m), that could reflect local conditions.

In Italy, besides the Caravaggio, it is certainly to be mentioned the *IFF (Indice di Funzionalità Fluviale: SILIGARDI et alii, 2007)*, that evaluate the overall ecological functionality of a river reach. However, this was not developed to evaluate the degree of deviation from a given reference condition, neither does it include the hydromorphological aspects in some detail. Recently, a methodological framework of integrated assessment of the ecological status has been proposed (*FLEA: Fluvial Ecosystem Assessment*) (NARDINI *et alii*, 2008), that is specific for the requirements of the WFD and

WFD e che include gli elementi di qualità idromorfologica.

Recentemente, si registra uno sviluppo crescente di nuovi metodi che denotano una maggiore considerazione dei processi geomorfologici, l'impiego di scale temporali sufficientemente ampie e di metodologie adatte agli scopi (analisi in ambiente GIS) affiancate alle indagini sul terreno. In questo ambito si segnalano le nuove metodologie sviluppate in Spagna (*Indice Idro-Geomorfologico, IHG: OLLERO et alii, 2007*) ed in Francia (*SYRAH: Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau, CHANDESRES et alii, 2008*).

Per completare questa breve rassegna, è utile citare due metodologie che, seppure non finalizzate all'applicazione della WFD, mirano ad una valutazione ed analisi geomorfologica dei corsi d'acqua ai fini della gestione e riqualificazione. In questa categoria si può annoverare il *Fluvial Audit* nel Regno Unito (EA, 1998), una procedura strutturata finalizzata alla definizione di strategie di gestione del corso d'acqua e/o programmazione di interventi. Infine, un esempio particolarmente significativo è quello del *River Styles Framework* (Australia), una procedura metodologica organica di analisi geomorfologica di un sistema fluviale sviluppata da BRIERLEY & FRYIRS (2005).

STRUTTURA COMPLESSIVA DEL METODO IDRAIM

La definizione dell'Indice di Qualità Morfologica dei corsi d'acqua (IQM) si inserisce in una più ampia struttura metodologica (*IDRAIM*) finalizzata, oltre che alla classificazione dello stato morfologico attuale, anche ad una successiva analisi delle cause di alterazione ed al monitoraggio delle tendenze evolutive.

La procedura generale di classificazione e monitoraggio si basa, coerentemente con quanto richiesto dalla WFD, sulla valutazione dello scostamento delle condizioni attuali rispetto ad un certo stato di riferimento. La definizione di uno stato di riferimento per gli aspetti idromorfologici è particolarmente problematica: la comunità scientifica internazionale è ormai concorde nel rinunciare a considerare come stato di riferimento una situazione 'primitiva' completamente indisturbata in quanto, oltre che di ardua definizione, sarebbe associata a condizioni a scala di bacino completamente diverse dalle attuali e non definibili, dato che la loro compromissione in Europa è avvenuta secoli se non millenni addietro. Si ritiene opportuno far riferimento, in maniera più pragmatica, a quelle condizioni che esisterebbero, nelle attuali condizioni del bacino, in assenza di influenza antropica in alveo, nelle zone riparie e nella pianura adiacente. Recentemente si rimarca sempre di più la necessità di far riferimento ad una 'immagine guida' coincidente con una condizione di equilibrio dinamico (CLARKE *et alii*, 2003; PALMER *et alii*, 2005), ovvero di mobilità dell'alveo, e di considerare 'processi di riferimento' o 'interazioni tra forme e processi di riferimento' (BERTOLDI *et alii*, 2009) piuttosto che 'forme di riferimento'. Inoltre è importante la comprensione delle tendenze evolutive, recenti ed attuali, del sistema fluviale (indicate anche come 'traiettorie di evoluzione': BRIERLEY & FRYIRS, 2005; DUFOUR & PIÉGAY, 2009), non già nell'ottica di un recupero di una condizione passata, quanto piuttosto per far sì che le azioni future siano compatibili con il *trend* di aggiustamento morfologico del

includes the elements of hydromorphological quality.

Recently, an increasing development of new methods denoting a stronger geomorphological component has been observed, with an increasing consideration of physical processes, and the employment of sufficiently wide temporal scales and additional methods (remote sensing, GIS) to integrate field surveys. In this context, new methods developed in Spain (*Indice Idro-Geomorfologico, IHG: OLLERO et alii, 2007*) and in France (*SYRAH: Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau, CHANDESRES et alii, 2008*) can be mentioned.

Finally, it is useful to mention some other methods existing in other countries, not directly aimed at the application of the WFD but to a stream evaluation and geomorphological analysis with scopes of management and restoration. In this category the *Fluvial Audit* (EA, 1998) is included, a structured procedure aimed at the definition of management strategies and/or interventions. Another particularly significant example is that of the *River Styles Framework* (Australia), an organic methodological procedure for a detailed geomorphological analysis of a fluvial system developed by BRIERLEY & FRYIRS (2005).

OVERALL STRUCTURE OF THE METHOD IDRAIM

The definition of the stream Morphological Quality Index (MQI) lies in a wider methodological framework (*IDRAIM*) also aimed at a subsequent analysis of causes and monitoring of trends of evolution, further to a classification of the present morphological state.

The general procedure of classification and monitoring is based, according to the WFD requirements, on evaluating the deviation of present conditions from a given reference state. Definition of a reference state for hydromorphology is problematic, and the scientific community is nowadays in agreement to renounce considering a 'pristine', completely undisturbed condition because, besides being extremely difficult to be defined, it would be associated to watershed conditions completely different from the present. It is therefore more appropriate to refer to those conditions that would exist, in the present watershed conditions, but in absence of human disturbances along the channel and adjacent river corridor. Recently, it has been increasingly necessary to refer to a 'guiding image' coinciding with a condition of 'dynamic equilibrium' (CLARKE *et alii*, 2003; PALMER *et alii*, 2005), i.e. of channel mobility, and to consider 'reference processes' or 'reference process-form interactions' (BERTOLDI *et alii*, 2009) rather than 'reference forms'. Furthermore it is important the comprehension of the evolutive trends, recent and present, of the fluvial system (in some cases also indicated as 'trajectory': BRIERLEY & FRYIRS, 2005; DUFOUR & PIÉGAY, 2009), not in the perspective of the recovery to a past condition but to ensure that future actions would be compatible with the trends of channel adjustment. To this aim, we can refer to recent researches in the fields of fluvial geomorphology and dynamics carried out at national scale during the last years, by which the procedures of analysis of channel changes have been improved and channel evolution conceptual models have

corso d'acqua. A tal fine, si può fare riferimento alle recenti esperienze di ricerca nel campo della geomorfologia e dinamica fluviale condotte durante gli ultimi anni in ambito nazionale, nell'ambito delle quali si sono perfezionate le procedure di analisi delle variazioni morfologiche e si sono sviluppati modelli concettuali di evoluzione (si veda ad es. RINALDI, 2008; RINALDI *et alii*, 2008; SURIAN *et alii*, 2008, 2009).

Partendo da queste premesse, la valutazione delle condizioni attuali ed il monitoraggio futuro si basano su un approccio integrato, facendo uso sinergico delle due principali metodologie impiegate nello studio geomorfologico dei corsi d'acqua, vale a dire l'analisi e le misure sul terreno e l'impiego di immagini telerilevate e tecniche GIS. Per quanto riguarda le scale spaziali di analisi, viene adottato un approccio di suddivisione gerarchica (*hierarchical nested approach*: BRIERLEY & FRYIRS, 2005), distinguendo le seguenti unità di dimensioni decrescenti: bacino idrografico; unità fisiografica e segmento fluviale (con lunghezze dell'ordine delle decine di km); tratto (con lunghezze normalmente dell'ordine di 1-5 km), costituente l'unità elementare per le analisi GIS; sito, consistente in un sottotratto campione e costituente l'unità elementare di rilevamento sul terreno; unità sedimentaria, utile per misure di dettaglio (ad esempio misure granulometriche dei sedimenti del fondo).

Complessivamente, l'analisi morfologica comprende le seguenti fasi (Fig. 1):

- 1) Inquadramento e suddivisione iniziale: vengono delineati i principali aspetti che determinano la configurazione e le caratteristiche del reticolo idrografico di un bacino e viene effettuata una prima suddivisione dello stesso in segmenti e tratti, funzionale alle fasi successive (solamente per bacini con area drenata >10 km²).
- 2) Valutazione dello stato attuale: lo stato dei tratti definiti in precedenza viene valutato sulla base delle condizioni attuali (funzionalità, artificialità) e delle variazioni recenti.
- 3) Monitoraggio: per alcuni tratti, scelti come rappresentativi, vengono misurati i parametri ritenuti significativi per valutare se la qualità morfologica del corso d'acqua rimane inalterata o se tende verso un miglioramento o peggioramento.

been developed (see for example RINALDI, 2008; RINALDI *et alii*, 2008; SURIAN *et alii*, 2008, 2009).

Starting from these premises, the evaluation of present conditions and future monitoring are based on an integrated approach, making a synergic use of the two main methodologies employed in the geomorphological study of rivers, that are field survey and interpretation, and remote sensing and GIS analyses. Regarding the spatial scales, a hierarchical nested approach is adopted (BRIERLEY & FRYIRS, 2005), considering the following spatial units of decreasing hierarchy: catchment; physiographic units and fluvial segments (the latter having lengths of the order of tens of km); stream reaches (with lengths normally of the order of 1-5 km), corresponding to the basic unit for remote sensing and GIS analyses; sites, consisting in a representative sub-reach and corresponding to the basic unit for field survey; sedimentary units, useful for measurements of detail (for example grain size analysis of bed sediments).

The overall procedure of morphological analysis includes (Fig. 1):

- 1) Initial setting and classification: the main physical aspects determining the configuration and characteristics of the hydrographic network are identified, and a first delineation of the rivers in segments and reaches is carried out.
- 2) Evaluation of the current morphological conditions: the morphological state of the river reaches previously defined is evaluated in terms of present conditions (functionality, artificiality), and recent channel changes.
- 3) Monitoring: for some reaches, selected as representative, a series of parameters are measured to evaluate if the morphological quality of the stream remains unaltered or is changing.

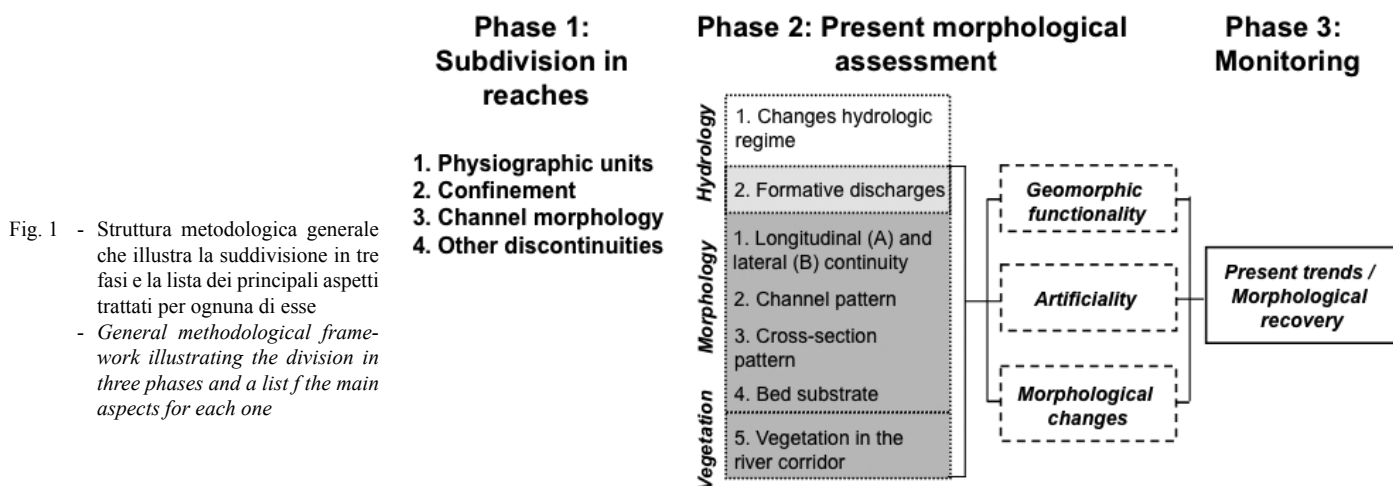


Fig. 1 - Struttura metodologica generale che illustra la suddivisione in tre fasi e la lista dei principali aspetti trattati per ognuna di esse - General methodological framework illustrating the division in three phases and a list of the main aspects for each one

Per la valutazione dello stato attuale, coerentemente a quanto riportato nelle norme CEN (2002) e richiesto dalla *WFD*, vengono considerati i seguenti aspetti: (1) continuità longitudinale e laterale; (2) configurazione morfologica (o pattern); (3) configurazione della sezione; (4) struttura e substrato dell'alveo; (5) caratteristiche della vegetazione nella fascia perifluviale.

La valutazione dello stato morfologico avviene poi sulla base di tre componenti:

- (1) Funzionalità geomorfologica: si basa sull'osservazione delle forme e dei processi del corso d'acqua nelle condizioni attuali e sul confronto con le forme ed i processi attesi per la tipologia fluviale presente nel tratto in esame.
- (2) Elementi artificiali: si valutano la presenza, frequenza e continuità delle opere e degli interventi antropici che possano avere effetti sui vari aspetti morfologici considerati.
- (3) Variazioni morfologiche: vengono valutate le variazioni morfologiche relativamente recenti (con particolare riferimento, per le variazioni planimetriche, agli ultimi 50-60 anni), al fine di verificare se il corso d'acqua abbia subito alterazioni fisiche (ad es. incisione, restringimento) e stia ancora modificandosi a causa di perturbazioni antropiche non necessariamente ancora presenti.

Secondo questa impostazione, le condizioni di riferimento per un corso d'acqua in un dato tratto possono essere così descritte: (a) funzionalità dei processi, ossia una condizione di equilibrio dinamico; (b) assenza di artificialità; (c) assenza di variazioni significative nella configurazione morfologica, larghezza e quota del fondo negli ultimi decenni.

Come schematicamente rappresentato in Fig. 1, l'analisi morfologica qui trattata include solo quegli aspetti idrologici legati alle alterazioni delle portate formative, ovvero di quelle portate ritenute più significative in termini di processi geomorfologici e che quindi determinano la forma dell'alveo. Le variazioni complessive del regime idrologico (con particolare riferimento alle portate di magra) sono analizzate separatamente e descritte in ISPRA (2009). In sintesi, l'analisi del regime idrologico è effettuata in corrispondenza di una sezione trasversale di un corso d'acqua sulla base di un Indice di Alterazione del Regime Idrologico, *IARI*, che fornisce una misura dello scostamento del regime idrologico osservato rispetto a quello naturale che si avrebbe in assenza di pressioni antropiche. Lo *IARI* è costruito a partire dai dati di portata liquida (misurati o stimati), dipendentemente dalla qualità e consistenza dei dati stessi, mediante il confronto tra le portate giornaliere e/o mensili che effettivamente transitano attraverso la sezione fluviale e le corrispondenti portate naturali (stimate con diverse metodologie). L'integrazione degli aspetti morfologici e di quelli idrologici permette infine la caratterizzazione e classificazione idromorfologica completa di un corso d'acqua.

For the current morphological state assessment, coherently with CEN (2004) standards and WFD requirements, the following aspects are considered: (a) longitudinal and lateral continuity; (b) channel pattern; (c) cross-section configuration; (d) bed structure and substrate; (e) vegetation in the riparian corridor. Then, the following three components of morphological analysis are considered:

- (1) Geomorphological functionality: based on the observation of forms and processes in the present conditions, and their comparison with forms and processes normally associated to that river typology.
- (2) Artificial elements: presence, frequency and continuity of artificial structures and interventions.
- (3) Channel changes: recent morphological variations (with particular reference, for the planimetric changes, to the last 50-60 years).

Following this framework, the reference conditions for a study reach can be identified with the following: (a) functionality of the processes, corresponding to dynamic equilibrium conditions; (b) absence of artificiality; (c) absence of significant adjustments of form, size and bed elevation in a time interval of the last decades.

As schematically represented in Fig. 1, the morphological analysis here described only includes those hydrological aspects related to alterations of formative discharges, i.e. those with more significant effects on morphological processes. The overall changes in the hydrologic regime (with particular emphasis on low discharges) are analysed separately and described in ISPRA (2009). In synthesis, the analysis of the hydrological regime is carried out on a stream section on the basis of a Hydrological Regime Alteration Index, *HRAI*, that provides a measure of the deviation between the observed hydrological regime and the natural regime in absence of human pressures. The index *HRAI* is obtained, dependent on available river discharge data quality and consistency, by comparing the daily and/or monthly discharges actually flowing through the cross section and the corresponding natural discharges. The integration of morphological and hydrological aspects allows for a complete characterization and classification of stream hydromorphology.

INQUADRAMENTO E SUDDIVISIONE IN TRATTI

La prima fase della procedura di valutazione morfologica ha lo scopo di fornire un inquadramento delle condizioni fisiche del corso d'acqua in esame e soprattutto di effettuare una prima suddivisione e classificazione in tratti relativamente omogenei, funzionale alle fasi successive di analisi. Questa fase è a sua volta suddivisa nei seguenti step:

- (1) Inquadramento e definizione delle unità fisiografiche. Ha lo scopo di effettuare una prima suddivisione in macro-aree (unità fisiografiche) e macro-tratti (segmenti).
- (2) Definizione del grado di confinamento. Lo scopo è di caratterizzare più in dettaglio le condizioni di confinamento (alveo confinato, semiconfinato o non confinato), procedendo ad una prima suddivisione dei segmenti in tratti.
- (3) Definizione della morfologia dell'alveo. Si procede ad una definizione delle tipologie morfologiche presenti, utilizzando criteri diversi a seconda che si tratti di alvei confinati oppure semi- e non confinati.
- (4) Suddivisione in tratti. Si giunge alla definizione finale dei tratti tenendo conto, oltre che del confinamento e della morfologia dell'alveo, di altri fattori quali presenza di affluenti significativi, pendenza dell'alveo, artificializzazione, dimensioni della pianura, ecc.

Come esempio di questa fase iniziale, si riporta il caso di studio del Fiume Cecina (Toscana) illustrato in Fig. 2, nella quale sono rappresentate le unità fisiografiche, i segmenti ed i tratti. Il bacino è suddiviso in tre unità fisiografiche: (1) unità collinare montuosa dei rilievi interni: è una zona prevalentemente collinare ma con porzioni anche fino a circa 1000 m s.l.m., facente parte dei rilievi interni appenninici ("Colline

GENERAL SETTING AND SUBDIVISION IN REACHES

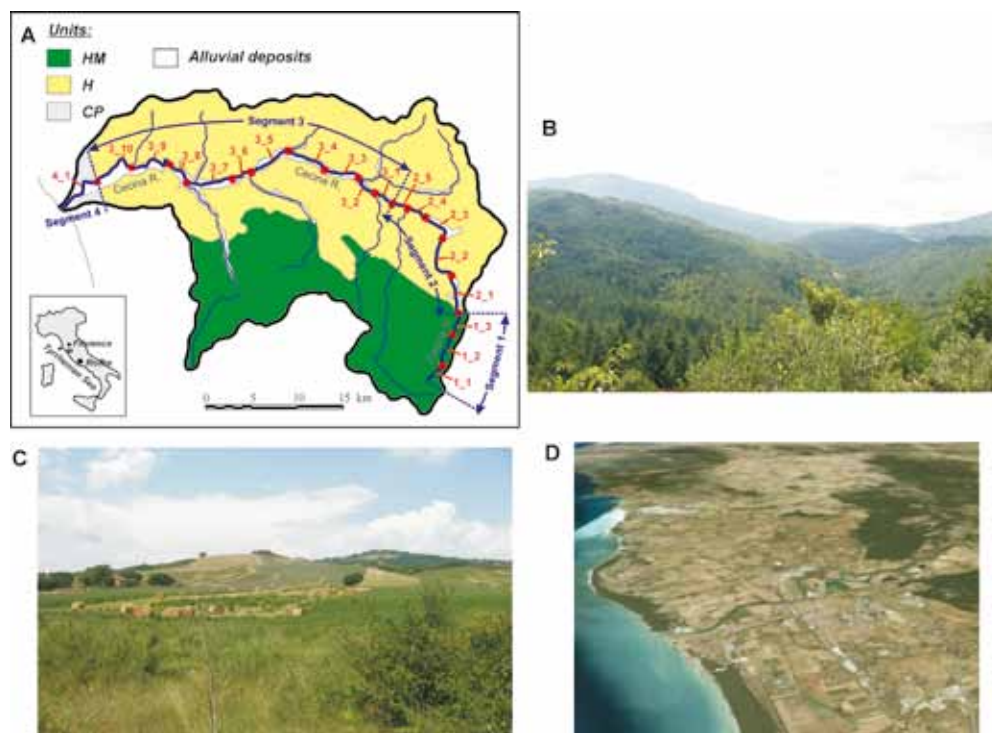
The first phase of the evaluation procedure provides a general setting of the physical conditions of the river and to carry out a first classification in relatively homogeneous reaches, functional to subsequent analyses. This phase is divided in the following steps:

- (1) General setting and identification of the physiographic units. A first division of the watershed in macro-areas (physiographic units) and in corresponding macro-reaches (segments) is carried out.
- (2) Definition of the confinement degree. River confinement (confined, semi-confined, unconfined) is characterized more in detail, obtaining a preliminary subdivision of segments in reaches.
- (3) Definition of channel morphology. Channel morphology is then defined, using different criteria for confined and semi-unconfined river reaches.
- (4) Division in reaches. The final definition of reaches takes into account, besides confinement and channel morphology, additional factors such as hydrologic discontinuities, channel slope, artificiality, alluvial plain size, etc.

As an example of initial classification, the case of the Cecina River (Tuscany) is illustrated in Fig. 2, where the physiographic units, river segments and reaches are reported. The watershed is divided in three physiographic units: (1) hilly - mountainous unit: it is a mainly hilly zone but with portions up to 1000 m a.s.l., included in the inner apenninic reliefs ("Metalliferous hills"), with a substrate predominantly composed of sedimentary rocks of the Ligurian and Tuscan units, with significant presence of magmatic

Fig. 2 - Fase iniziale di inquadramento e suddivisione in tratti: esempio relativo al Fiume Cecina. A) Definizione delle unità fisiografiche, segmenti e tratti del Fiume Cecina. HM: unità collinare-montuosa dei rilievi interni appenninici; H: unità collinare; CP: unità di pianura costiera. B) Foto panoramica relativa all'unità collinare-montuosa. C) Foto relativa all'unità collinare; D) Immagine satellitare relativa all'unità di pianura costiera

- Phase of initial classification: the example of the Cecina River. A) Definition of the physiographic units, segments and reaches for the Cecina River. HM: Hilly-mountainous unit of the Apenninic inner reliefs; H: Hilly unit; CP: Coastal plain unit; B) Photo showing the hilly-mountainous physiographic unit. C) Photo showing the hilly physiographic unit.; D) Satellite image of the coastal plain unit



Metallifere”), con substrato costituito in prevalenza da rocce sedimentarie delle successioni ligure e toscane, con significativa presenza di rocce magmatiche intrusive; (2) unità collinare: comprende un’ampia fascia collinare che occupa gran parte del bacino, caratterizzata prevalentemente da rocce tenere del Miocene e del Pliocene, inclusi affioramenti di depositi marini (nella fascia prospiciente alla costa) e fluviali del Quaternario; (3) unità di pianura costiera: è limitata agli ultimi 4 km circa del Fiume Cecina, caratterizzata da depositi alluvionali recenti e dune costiere, assenza di confinamento e pendenze basse. Dall’intersezione delle unità fisiografiche con il tracciato del Fiume Cecina si ricava una prima suddivisione in 3 segmenti. La porzione di fiume all’interno dell’unità collinare è tuttavia ulteriormente suddivisa in due segmenti in base alle condizioni generali di confinamento: il segmento 2 è costituito da un’alternanza di tratti semiconfinati e tratti confinati; il segmento 3 è caratterizzato dalla presenza continua di depositi alluvionali e di conseguenza da soli tratti semi- e non confinati. L’ulteriore suddivisione in tratti tiene conto delle differenze di morfologia dell’alveo e di ulteriori elementi di discontinuità. Il corso d’acqua risulta suddiviso in 19 tratti (su una lunghezza totale del fiume di circa 80 km, quindi i tratti hanno una lunghezza media dell’ordine di circa 4.2 km), con i codici identificativi di ogni tratto definiti in ordine crescente all’interno di ogni segmento (come riportato in Fig. 2).

VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI MORFOLOGICHE ATTUALI

La procedura di valutazione delle condizioni morfologiche attuali si applica ad un qualunque tratto definito nella fase precedente, analizzandone le tre componenti: (1) funzionalità geomorfologica; (2) artificialità; (3) variazioni morfologiche. Tali aspetti vengono studiati attraverso l’ausilio di apposite schede di valutazione, che consentono un’analisi guidata attraverso l’impiego integrato di analisi di immagini telerilevate, in ambiente GIS, e rilevamenti sul terreno. A tal fine vengono usati un certo numero di indicatori, intesi di seguito in senso lato per indicare attributi o descrittori qualitativi dei vari aspetti considerati: ogni indicatore è poi valutato attraverso una o più variabili quantitative o qualitative (per alcuni indicatori, soprattutto per la funzionalità, si fa ricorso a valutazioni interpretative piuttosto che a parametri). Le schede si differenziano, per alcuni indicatori, a seconda della tipologia fluviale, in modo da consentire una valutazione relativa alle caratteristiche morfologiche della tipologia d’alveo alla quale il tratto analizzato appartiene. In particolare modo, sono definiti due protocolli di valutazione per le due situazioni di: (1) alvei confinati; (2) alvei semi- o non confinati. Le variazioni morfologiche vengono analizzate solo per i corsi d’acqua di grandi dimensioni (larghezza alveo > 30 m), sia per quelli semi / non confinati che per quelli confinati. Nelle Tab. 1, 2 e 3 sono riportati gli indicatori utilizzati rispettivamente per la funzionalità, l’artificialità e le variazioni morfologiche e le possibili risposte in forma sintetica. Per ogni indicatore sono definite nella maggior parte dei casi tre possibili risposte (solo per alcuni indicatori se ne prevedono due o più di tre): (A) condizioni inalterate o alterazioni poco significative; (B) condizio-

intrusive rocks; (2) hilly unit: it includes a wide area occupying most of the watershed, predominantly characterized by soft rocks of Miocene and Pliocene, and Quaternary marine and fluvial deposits; (3) coastal plain unit: it is limited to about the last 4 km of the Cecina River, and it is characterized by recent alluvial deposits and coastal dunes, absence of confinement, and low gradients. From the intersection of the physiographic units with the Cecina river course, a first division in 3 segments is obtained. However, the portion of river included in the hilly unit is further divided in two segments based on the confinement: segment 2 is an alternation of semiconfined and confined reaches; segment 3 is characterized by the continuous presence of alluvial deposits and, as a consequence, only by semi- unconfined reaches. The further division in reaches accounts for the differences in channel morphology and other elements of discontinuity. It results that the river is divided in a total of 19 reaches (on a total length of the river of about 80 km, implying that the reaches have a mean length of 4.2 km), with the identification codes of each reach defined in increasing order for each segment (as reported in Fig. 2).

EVALUATION OF PRESENT MORPHOLOGICAL CONDITIONS

The assessment of present morphological conditions is applied to any reach defined in the previous phase by analyzing three components: (1) geomorphological functionality; (2) artificiality; (3) morphological channel changes. Such aspects are investigated by using specific evaluation sheet forms that allow for a guided analysis by an integrated approach of remote sensing / GIS and field surveys. For this scope, a number of indicators are used, where each indicator is evaluated by one or more quantitative or qualitative variables (for some indicators, particularly for the functionality, interpretative observations rather than quantitative parameters are used). Two evaluation protocols are defined for the two situations of: (1) confined channels; (2) semi- unconfined channels. Morphological changes are evaluated for large channels (width > 30 m), either for semi- unconfined and for confined streams. In Tab. 1, 2 and 3 the indicators for the functionality, artificiality, and channel changes respectively are reported, with the possible answers in a synthetic form.

For each indicator, three possible answers are defined in most cases (except for a limited number with two or more than three answers): (A) unaltered conditions or not significant alterations; (B) intermediate conditions; (C) high alterations. A “Guide to the answers” is coupled with the evaluation forms, explaining in detail the meaning of each indicator and providing practical indications to identify the correct answer. The complete evaluation forms, together with the Guide to the answers and a Technical guidebook (RINALDI

THE MORPHOLOGICAL QUALITY INDEX (MQI) FOR STREAM EVALUATION AND HYDROMORPHOLOGICAL CLASSIFICATION

Continuity		
F1	Longitudinal continuity in sediment flux and wood	
A	Absence of alteration in the continuity of sediment and wood	0
B	Slight alteration (obstacles to the flux but with no interception)	3
C	Strong alteration (discontinuity of channel forms and interception of sediment and wood)	5
F2	Presence of a modern floodplain <i>(applicable only to UNC)</i>	
A	Presence of a continuous (>66% of the reach) and wide floodplain	0
B	Presence of a discontinuous (10+66%) floodplain of any width or >90% but narrow	3
C	Absence of a floodplain or negligible presence (≤10 of any width)	5
<i>Not evaluated in case of mountain streams along steep (>3%) alluvial fans</i>		
F3	Hillslopes – river corridor connectivity <i>(applicable only to C)</i>	
A	Full connectivity between hillslopes and river corridor (>90%)	0
B	Connectivity between hillslopes and river corridor for a significant portion of the reach (33+90%)	3
C	Connectivity between hillslopes and river corridor for a small portion of the reach (≤33%)	5
F4	Processes of bank retreat <i>(applicable only to UNC)</i>	
A	Presence of frequent retreating banks particularly along outer banks of bends	0
B	Infrequent retreating banks because impeded by bank protections and/or scarce channel dynamics	2
C	Complete absence of retreating banks, or widespread presence of unstable banks by mass failures	3
<i>Not evaluated in case of straight – sinuous channels of low energy (lowland rivers, low gradients and/or bedload)</i>		
F5	Presence of potentially erodible corridor <i>(applicable only to UNC)</i>	
A	Presence of a wide potentially erodible corridor (EC) for a length >66% of the reach	0
B	Presence of a narrow potentially EC for >66%, or wide but for 33-66% of the reach	2
C	Presence of a potentially EC of any width but for ≤33% of the reach	3
Morphology		
F6	Bed configuration – valley slope <i>(applicable only to C)</i>	
A	Bed forms consistent with the mean valley slope	0
B	Bed forms not consistent with the mean valley slope	3
C	Complete alteration of bed forms for the presence of artificial bed	5
<i>Evaluated only for alluvial single-thread channels</i>		
F7	Forms and processes typical for the channel pattern <i>(applicable to all UNC; C: only B/W)</i>	
A	Absence (<5%) of alteration of the natural heterogeneity of forms expected for that river type	0
B	Alterations for a limited portion of the reach (≤33%)	3
C	Consistent alterations for a significant portion of the reach (>33%)	5
F8	Presence of typical fluvial forms in the alluvial plain <i>(applicable only to lowland UNC)</i>	
A	Presence of alluvial plain forms (oxbow lakes, secondary channels, etc.)	0
B	Presence of traces of alluvial plain forms (abandoned after the 1950s) but with possible reactivation	2
C	Complete absence of alluvial plain forms	3
<i>Evaluated only in case of meandering rivers (now or in the past) within a lowland plain physiographic unit</i>		
F9	Variability of the cross-section	
A	Absence (≤5%) of alteration of the cross-section natural heterogeneity (width and depth)	0
B	Presence of alteration (cross-section homogeneity) for a limited portion of the reach (≤33%)	3
C	Presence of alteration (cross-section homogeneity) for a significant portion of the reach (>33%)	5
<i>Not evaluated in case of straight – sinuous channels of low energy (lowland rivers, low gradients and/or bedload)</i>		
F10	Structure of the channel bed	
A	Natural heterogeneity of bed sediments and no significant clogging	0
B	Evident armouring or clogging in various portions of the site	2
C1	Evident and widespread (>90%) armouring or clogging, or (only UNC) occasional substrate outcrops	5
C2	Widespread substrate outcrops (>33% of the reach) (UNC) or widespread substrate alteration by bed revetments (>33% of the reach) (C and UNC)	6
<i>Not evaluated for sand-bed rivers, and for deep rivers when it is not possible to observe the channel bed</i>		
F11	Presence of in-channel large wood	
A	Presence of large wood	0
C	Absence of large wood	3
<i>Not evaluated above the tree-line and in streams with natural absence of riparian vegetation</i>		
Vegetation		
F12	Width of functional vegetation in the fluvial corridor	
A	High width of functional vegetation	0
B	Intermediate width of functional vegetation	2
C	Low width of functional vegetation	3
<i>Not evaluated above the tree-line</i>		
F13	Linear extension of functional vegetation	
A	Linear extension of functional vegetation >90% of maximum available length	0
B	Linear extension of functional vegetation 33+90% of maximum available length	3
C	Linear extension of functional vegetation ≤33% of maximum available length	5
<i>Not evaluated above the tree-line</i>		

Tab. 1 - Indicatori di funzionalità utilizzati per la fase di valutazione, possibili risposte e relativi punteggi.
 UNC: alvei semi- non confinati; C: alvei confinati; B/W: braided/wandering
 - Functionality indicators used for the evaluation phase, possible answers, and relative scores. UNC: semi- unconfined channels; C: confined channels; B/W: braided/wandering

Upstream alteration of longitudinal continuity		
A1	Upstream alteration of discharges	
A	No significant alteration ($\leq 10\%$) of formative discharges and with return period > 10 years	0
B	Significant alteration ($> 10\%$) of discharges with return period > 10 years	3
C	Significant alteration ($> 10\%$) of formative discharges	6
A2	Upstream alteration of sediment transport flux	
A	Absence or negligible presence of structures of interception of sediment fluxes	0
B1	Presence of dams for drainage area 5-33%, and/or weirs or check dams with total interception of bedload and drainage areas 33-66%, and/or weirs or check dams with partial interception of bedload and drainage areas $> 33\%$ (UNC) or $> 66\%$ (C)	3
B2	Presence of dams for drainage area 33-66%, and/or weirs or check dams with total interception of bedload and drainage areas $> 66\%$	6
C1	Presence of dams for drainage area $> 66\%$	9
C2	Presence of a dam at the upstream boundary of the reach	12
Alteration of longitudinal continuity in the reach		
A3	Alteration of discharges in the reach	
A	No significant alteration ($\leq 10\%$) of formative discharges and with return period > 10 years	0
B	Significant alteration ($> 10\%$) of discharges with return period > 10 years	3
C	Significant alteration ($> 10\%$) of formative discharges	6
A4	Alteration of sediment transport in the reach	
A	Absence of structures of interception of sediment fluxes (dams, check dams, weirs)	0
B	Presence of open or consolidation check dams with relatively low density	4
C	Presence of retention or consolidation check dams with relatively high density	6
	<i>In case of extremely high density of structures of interception and/or other transversal structures (see A9), add</i>	
		12
A5	Crossing structures	
A	Absence of crossing structures (bridges, fords culverts)	0
B	Presence of some crossing structure (≤ 1 every 1000 m in average in the reach)	2
C	Presence of many crossing structure (> 1 every 1000 m in average in the reach)	3
Alteration of lateral continuity		
A6	Bank protections	
A	Absence or localized presence of bank protections ($\leq 5\%$ total length of the banks)	0
B	Presence of protections for $\leq 33\%$ total length of the banks (sum of both banks)	3
C	Presence of protections for $> 33\%$ total length of the banks (sum of both banks)	6
	<i>In case of extremely high density of bank protection ($> 80\%$) add</i>	
		12
A7	Artificial levees <i>(applicable only to UNC)</i>	
A	Levees absent or distant, or presence of levees close or at contact $\leq 10\%$ total length of the banks	0
B	Medium presence of levees close and/or at contact (at contact $\leq 50\%$ bank length)	3
C	High presence of levees close and/or at contact (at contact $> 50\%$ bank length)	6
	<i>In case of extremely high density of levees at contact ($> 80\%$) add</i>	
		12
Alteration of channel morphology and/or substrate		
A8	Artificial changes of river course <i>(applicable only to UNC)</i>	
A	Absence of artificial changes of river course in the past (meanders cut-off, channel diversions, etc.)	0
B	Presence of changes of river course for $\leq 10\%$ of the reach length	2
C	Presence of changes of river course for $> 10\%$ of the reach length	3
A9	Other bed stabilization structures	
A	Absence of structures (bed sills/ramps) and revetments absent or localised ($\leq 5\%$)	0
B	Limited presence of structures (≤ 1 every n , where $n=200$ m for C, $n=1000$ m for NC) and/or revetments ($\leq 15\%$ impermeable and/or $\leq 25\%$ permeable)	3
C1	Presence of many structures (> 1 every n) and/or significant bed revetments ($\leq 33\%$ impermeable and/or $\leq 50\%$ permeable)	6
C2	Presence of impermeable bed revetments $> 33\%$ and/or permeable revetments $> 50\%$	8
	<i>In case of widespread bed revetment ($> 80\%$) add</i>	
		12
Interventions of maintenance and removal		
A10	Sediment removal	
A	Absence of recent (last 20 years) and past (from 1950s) significant sediment removal activities	0
B	Moderate activities in the past (from 1950s) but absent during last 20 years	3
C	Intense activities in the past, or moderate in the past but present during last 20 years	6
A11	Wood removal	
A	Absence of removal of woody material at least during the last 20 years	0
B	Partial removal of woody material during the last 20 years	2
C	Total removal of woody material during the last 20 years	5
	<i>Not evaluated above the tree-line</i>	
A12	Vegetation management	
A	No cutting interventions on riparian vegetation during the last 20 years	0
B	Selective cuts and/or clear cuts over $\leq 50\%$ of the reach during the last 20 years	2
C	Clear cuts over $> 50\%$ of the reach during the last 20 years	5
	<i>Not evaluated above the tree-line</i>	

Tab. 2 - Indicatori di artificialità utilizzati per la fase di valutazione, possibili risposte e relativi punteggi.
- *Artificiality indicators used for the evaluation phase, possible answers, and relative scores.*

V1	Changes in channel pattern	<i>(applicable only to large channels)</i>
A	Absence of changes of channel pattern from 1950s	0
B	Change to a similar channel pattern from 1950s	3
C	Change to a different channel pattern from 1950s	6
<i>For confined channels, only classes A or B are applied</i>		
V2	Changes in channel width	<i>(applicable only to large channels)</i>
A	Absent or limited changes ($\leq 15\%$) from 1950s	0
B	Moderate changes ($15\div 35\%$) from 1950s	3
C	Intense changes ($> 35\%$) from 1950s	6
<i>For confined channels, only classes A or B are applied</i>		
V3	Bed-level changes	<i>(applicable only to large channels)</i>
A	Negligible bed-level changes (≤ 0.5 m)	0
B	Limited or moderate bed-level changes ($0.5\div 3$ m)	4
C1	Intense bed-level changes (> 3 m)	8
C2	Very intense bed-level changes (> 6 m)	12
<i>For confined channels, class C2 is not applied</i>		

Tab. 3 - Indicatori delle variazioni morfologiche utilizzati per la fase di valutazione, possibili risposte e relativi punteggi. Tali indicatori si applicano solo nel caso di alvei grandi (larghezza > 30 m)
 - *Functionality indicators used for the evaluation phase, possible answers, and relative scores. Such indicators are applied only to large channels (width > 30 m)*

ni intermedie; (C) forti alterazioni. Alle schede è abbinata una “Guida alle risposte” che spiega nel dettaglio il significato dell’indicatore e fornisce indicazioni pratiche per l’identificazione della risposta. Le schede complete, con relativa Guida alle risposte e Manuale tecnico-operativo (RINALDI *et alii*, 2010), sono disponibili sul sito ISPRA all’indirizzo web <http://www.sintai.sinanet.apat.it/view/index.faces>.

Per poter giungere ad una classificazione è stato necessario definire una procedura oggettiva di valutazione. Il criterio qui utilizzato rientra tra i sistemi di valutazione a punteggi, ovvero si assegnano agli indicatori considerati dei punteggi proporzionali all’importanza che ciascuno di essi assume nella valutazione complessiva.

La procedura sviluppata, seppure relativamente semplice, include un numero elevato di indicatori (28): piuttosto che selezionare pochi fattori ritenuti più significativi (di difficile definizione), si è ritenuto infatti di dover procedere in modo da prendere in considerazione tutti gli aspetti necessari per una valutazione complessiva (“audit” nella terminologia anglosassone). Ad esempio le alterazioni antropiche sono prese in esame sia dal punto di vista della presenza di elementi di artificialità, che dei loro impatti sulla funzionalità dei processi geomorfologici e sulle variazioni morfologiche indotte da tali alterazioni. Gli indicatori relativi alla funzionalità richiedono un certo livello interpretativo delle forme e dei processi morfologici (ovvero uso di indicatori qualitativi), piuttosto che essere basati sulla misura di determinati parametri; pertanto è necessario che l’applicazione sia svolta da personale esperto, con adeguata estrazione professionale e preparazione specifica sull’argomento (geomorfologia fluviale).

Per ogni indicatore, nelle schede sono riportati i punteggi da attribuire ad ognuna delle possibili risposte, in maniera direttamente proporzionale al grado di alterazione, vale a dire in senso crescente da A (valore 0) a C (valore massimo per l’indicatore). Anche in conformità con le richieste della Direttiva, nel sistema è stato inoltre introdotto un giudizio sul grado di confidenza per ognuna delle risposte (distinguendo

et alii, 2010), are reported on the ISPRA web page at <http://www.sintai.sinanet.apat.it/view/index.faces>.

In order to obtain a classification, it has been necessary to define an objective evaluation procedure. The criterion here utilized is included within the evaluation scoring systems: scores are assigned to each indicator proportionally to its importance in the overall evaluation.

The procedure developed, although relatively simple, includes a high number of indicators (28): rather than to select few significant indicators, it was preferred to consider all aspects for an overall assessment or audit, in order to achieve a systematic and organized analysis of the problem. For example, human disturbances are evaluated in two ways: on one hand as artificial elements, on the other hand their impacts on the functionality of processes and on channel adjustments are assessed. Indicators of functionality require some interpretative level of morphological forms and processes, rather than the measurement of given parameters, therefore they need expertise and specific knowledge of the field of investigation.

For each indicator, the scores to be assigned to each answer are reported on the evaluation form, proportionally to the degree of alteration, that is in increasing order from A (score 0) to C (maximum score for that indicator). Furthermore, in the evaluation system a judgement on the degree of confidence is introduced for each answer, considering high, medium, and low confidence. In fact, cases with missing information or data are possible. It is therefore useful to distinguish the different cases a posteriori. Such system can allow for obtaining a simplified estimation of the overall uncertainty degree associated with the final evaluation, that is the range of variation of the final score, calculating for those answers not having high confidence the values that should be assigned in case of different answer.

tra livello di confidenza alto, medio e basso). Possono infatti esserci dei casi in cui si ha un'oggettiva mancanza di informazioni precise o dati, a differenza di altre risposte che sono date con assoluta certezza; è quindi opportuno, a posteriori, poter distinguere questi diversi casi. Tale sistema può inoltre consentire di ottenere una stima (seppure semplificata) del grado di incertezza complessivo, ovvero del *range* di variazione del punteggio finale, calcolando per le risposte con confidenza non elevata i valori che sarebbero stati attribuiti nel caso di risposta differente.

Per quanto riguarda la valutazione finale, si calcola inizialmente lo scostamento totale S_{tot} , definito come sommatoria dei punteggi attribuiti a tutti gli indicatori. Si definisce poi un Indice di Alterazione Morfologica (*IAM*), come:

$$IAM = S_{tot} / S_{max} \quad (1)$$

dove S_{max} corrisponde al massimo scostamento che si può ottenere per la tipologia d'alveo in esame (corrisponde cioè alla somma dei punteggi attribuibili alla classe *C* per tutte le domande applicabili al caso in esame). Tale indice varia quindi da un minimo di 0 (nessuna alterazione) ad un massimo di 1 (massima alterazione).

Per quanto riguarda il punteggio relativo all'artificialità, va considerato che un alveo, pur non avendo una presenza contemporanea nello stesso tratto di tutti i possibili elementi di artificialità, può presentare poche tipologie di opere ma con elevata densità. Per tener conto di ciò, si definiscono alcune condizioni di elevata artificialità relativamente alle opere di maggiore impatto (opere trasversali, rivestimenti del fondo, difese di sponda ed arginature) alle quali viene attribuito un punteggio aggiuntivo (pari a 12) quando la loro densità o continuità è al di sopra di una certa soglia.

Si definisce quindi l'Indice di Qualità Morfologica (*IQM*) come complementare del precedente, ovvero:

$$IQM = 1 - IAM \quad (2)$$

Tale indice assume quindi un valore 0 nel caso di massima alterazione, ed un valore di 1 nel caso di raggiungimento delle condizioni di riferimento (massima funzionalità, minima artificialità e minime variazioni). Sulla base dell'*IQM* si definiscono infine cinque classi di qualità morfologica, come segue: (1) elevato, $IQM > 0.85$; (2) buono, $IQM = 0.7 \div 0.85$; (3) moderato o sufficiente, $IQM = 0.5 \div 0.7$; (4) scadevole o scarso, $IQM = 0.3 \div 0.5$; (5) pessimo o cattivo, $IQM = 0 \div 0.3$.

I punteggi relativi ai vari indicatori ed i limiti delle classi di qualità morfologica sono stati verificati e meglio definiti a seguito di una fase di test che è stata condotta su circa 60 tratti rappresentativi di diverse condizioni morfologiche (confinati, semi- e non confinati, meandriiformi, a canali intrecciati, ecc.) e di varie situazioni di antropizzazione (da corsi d'acqua relativamente naturali a fortemente antropizzati).

APPLICAZIONI DELL'INDICE DI QUALITÀ MORFOLOGICA

I principali corsi d'acqua interessati dalla fase di test sono i seguenti: Arno, Brenta, Cecina, Esino, Foglia, Magra, Metauro, Ofanto, Panaro, Piave, Scrivia, Tagliamento, Tevere, Trebbia, Volturno. Di seguito si riportano

Regarding the final score, initially the total deviation S_{tot} from non altered conditions is calculated as sum of the scores assigned to all indicators. A Morphological Alteration Index (*MAI*) is then defined as:

$$MAI = S_{tot} / S_{max} \quad (1)$$

where S_{max} is the maximum possible deviation for the given stream typology (it corresponds to the sum of scores of class *C* for all the questions applicable to the study case). Such an index ranges therefore from a minimum of 0 (no alteration) to a maximum of 1 (maximum alteration).

Regarding the score of artificiality, an additional score (of 12) is assigned to conditions of extremely high density for some type of intervention (weirs, revetments, bank protections, and levees).

A stream Morphological Quality Index (*MQI*) is then defined as

$$MQI = 1 - MAI \quad (2)$$

complementary to the previous one, that is:

Such an index, contrary to the *MAI*, assumes a value of 0 in case of maximum alteration, and a value of 1 in case of reference conditions (corresponding to maximum functionality, minimum artificiality and minimum channel changes). Based on *MQI*, five classes of morphological quality are defined as follows: (1) very good or high, $MQI > 0.85$; (2) good, $MQI = 0.7 \div 0.85$; (3) moderate, $MQI = 0.5 \div 0.7$; (4) poor, $MQI = 0.3 \div 0.5$; (5) very poor or bad, $MQI = 0 \div 0.3$.

The scores assigned to the indicators and the limits of the quality classes have been verified and better defined on the basis of a testing phase carried out on about 60 reaches representative of different morphological conditions (confined, semi- unconfined, meandering, braided, etc.) and of various situations of artificiality (ranging from relatively natural to highly artificial streams).

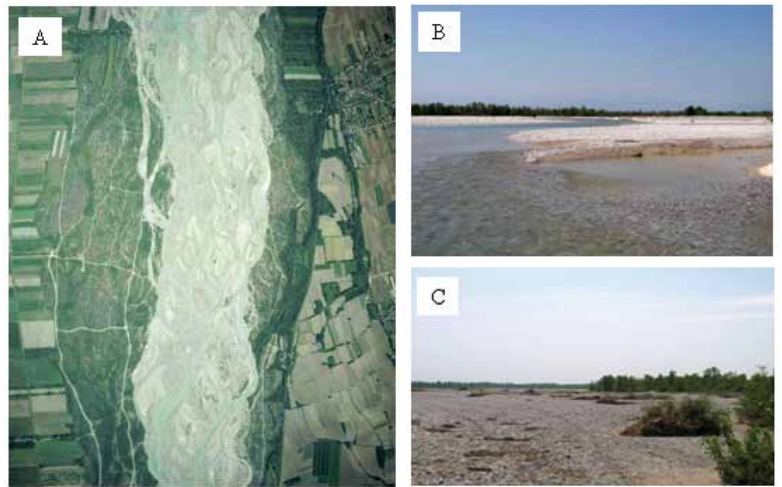
APPLICATIONS OF THE MORPHOLOGICAL QUALITY INDEX

The main rivers included in the testing phase are the following: Arno, Brenta, Cecina, Esino, Foglia, Magra, Metauro, Ofanto, Panaro, Piave, Scrivia, Tagliamento, Tevere, Trebbia, Volturno.

Fig. 3 - Torrente Sentino presso la gola di Frasassi (IQM=0.92: elevato). A) sponda in roccia; B) fondo in sedimenti e configurazione a riffle-pool
 - *Sentino stream along the Frasassi Gorge (MQI=0.92: very good). A) rocky bank; B) channel bed composed of sediments and riffle-pool configuration*



Fig. 4 - Fiume Tagliamento presso Turrída (IQM=0.87: elevato). A) foto aerea del 2009 del tratto in esame che mostra una tipica morfologia a canali intrecciati e la presenza di una significativa fascia perifluviale con vegetazione arborea; B) particolare dei canali e delle barre; C) particolare del detrito legnoso in alveo e della vegetazione ripariale
 - *Tagliamento River near Turrída (MQI=0.87: very good). A) aerial photo of 2009 of the study reach showing a typical braided morphology and a riparian zone which has a notable extent; B) photo of channels and bars; C) large woody debris within the channel and riparian vegetation (in the background)*



alcuni esempi di applicazione dell'IQM, ordinati per valori decrescenti dell'indice ed illustrando le principali caratteristiche e motivi di criticità.

Torrente Sentino presso la gola di Frasassi (Marche). Il primo esempio riportato è quello di un torrente montano in un tratto confinato, con larghezza media di 12 m e pendenza di 0.004. L'alveo è classificato infatti come confinato a canale singolo, le sponde sono spesso costituite da roccia affiorante (Fig. 3A), il fondo alterna punti di affioramento del substrato a sottotratti con presenza di sedimento ciottoloso e ghiaioso e configurazione a riffle - pool (Fig. 3B). Le pendenze del fondo non sono infatti molto elevate in quanto il corso d'acqua non è nel suo tratto iniziale ma in una zona di raccordo tra due tratti semiconfinati. Le variazioni morfologiche non sono prese in esame data la larghezza ridotta (<30 m) del corso d'acqua. Non si riscontrano significative alterazioni rispetto alle condizioni attese, eccetto che per gli indicatori F3 ed F12 (connessione versanti - corso d'acqua ed ampiezza della fascia di vegetazione perifluviale connessa al corso d'acqua) che si collocano in classe B a causa della presenza di una strada su un lato del corso d'acqua a ridosso dell'alveo lungo tutto il tratto. Non esistono opere a monte che possano produrre significative alterazioni delle portate formative e delle portate solide. Pertanto risulta $IQM=0.92$ ed il tratto si classifica come elevato.

Fiume Tagliamento presso Turrída (Friuli Venezia Giulia). In questo tratto, situato nell'alta pianura friulana, il corso d'acqua è non confinato in quanto le scarpate dei terrazzi antichi presenti (un terrazzo è chiaramente visibile nel margine destro di Fig. 4A) lasciano un ampio spazio

Sentino stream along the Frasassi gorge. The first example is a mountain stream along a confined reach, with a mean channel width of 12 m and slope of 0.004. The channel is classified as confined single thread, banks are often composed by rock outcropping (Fig. 3A), the channel bottom alternates some point of substrate outcropping to subreaches with cobble and gravel and a riffle-pool configuration (Fig. 3B). Channel gradient is in fact not very high, as the stream is not in its initial part but at the passage between two semi-confined reaches. Channel changes are not considered given the limited channel width (<30 m). There are not significant alterations compared to the expected conditions, except for the indicators F3 and 4 (hillslopes - stream connection and width of functional vegetation) that are in class B given the presence of a road on the side of the stream along all the reach. There are not significant structures upstream that can produce alterations to formative discharges, while the existence of weirs upstream slightly alters the sediment discharge (A2 in class B1). The final result is $MQI=0.92$ and the reach is classified as very good.

Tagliamento River near Turrída. In this reach, located in the Upper Friulian Plain, the river is unconfined since the old terraces (one terrace is clearly visible in the right side of Fig. 4A) are far apart allowing a wide space for lateral mobility (more than 3 km). The river displays a braided morphology and has the following characteristics: the bed is mainly made of gravels; channel width ranges from 800 m to 1000 m; average channel slope is 0.003. The elements

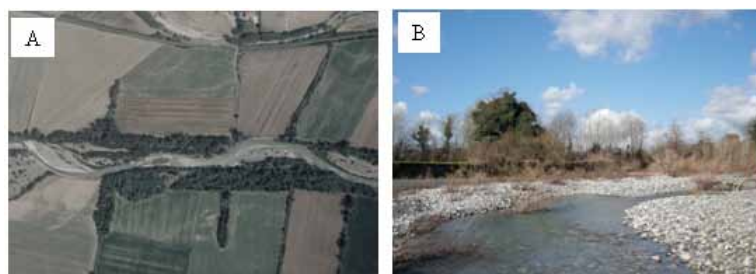


Fig. 5 - Fiume Cecina presso Casino di Terra (IQM=0.78: buono). A) Foto aerea del 2006 di una parte del tratto che evidenzia la tipica morfologia sinuosa a barre alternate; B) particolare del tratto che evidenzia la variabilità morfologica associata alla diversificazione di forme e la presenza di sponde in erosione (sullo sfondo)

- Cecina River near Casino di Terra (MQI=0.78: good). A) Aerial photo of 2006 of part of the reach highlighting the typical morphology sinuous with alternate bars; B) particular of the reach showing the morphological variability associated to a diversification of forms and presence of retreating banks (on the back)

di divagazione (superiore ai 3 km). L'alveo ghiaioso ha una morfologia a canali intrecciati, una larghezza variabile tra 800 e 1000 m ed una pendenza media di 0.003. Gli elementi di alterazione della qualità morfologica sono molto limitati, in relazione ad un'antropizzazione contenuta, se confrontata con altri fiumi italiani, sia nel bacino montano che nell'area di pianura. Questi elementi sono: (1) interventi di rimozione di sedimenti avvenuti soprattutto negli anni '70 - '80 e, molto probabilmente, di materiale legnoso; (2) variazioni morfologiche che hanno comportato una significativa riduzione della larghezza dell'alveo (circa del 50 % rispetto agli anni '50) e un'incisione moderata (circa 1.5 m). Il tratto è risultato avere un $IQM=0.87$, e viene pertanto classificato come elevato.

Fiume Cecina presso Casino di Terra (Toscana). Si tratta di un corso d'acqua non confinato che scorre in una pianura relativamente stretta in ambito collinare (tratto 3_7 in Fig. 2), con area del bacino sotteso di circa 635 km². L'alveo è classificato come sinuoso a barre alternate (Fig. 5A), con fondo ghiaioso e configurazione a *riffle-pool*, pendenza media di 0.003, larghezza media di circa 50 m. I principali elementi di alterazione sono costituiti da: (1) presenza di alcune briglie a monte (A2 in classe B1); (2) moderata attività di escavazione in passato (A10 in classe B1), che a sua volta è stata responsabile di alcune significative variazioni morfologiche (moderato restringimento ed incisione, con V2 e V3 entrambi in classe B); (3) altri elementi localizzati di artificialità nel tratto (ponte, soglie). Nonostante tali alterazioni, l'alveo presenta alcuni pregi, essendo caratterizzato da una certa mobilità laterale, una buona diversificazione morfologica (Fig. 5B), presenza di una piana inondabile attiva, seppure stretta e discontinua, e di una fascia potenzialmente erodibile, assenza di argini, presenza di una fascia di vegetazione spontanea perifluviale piuttosto continua anche se di larghezza intermedia, ecc. Il risultato finale è $IQM=0.78$, pertanto il tratto si classifica come buono.

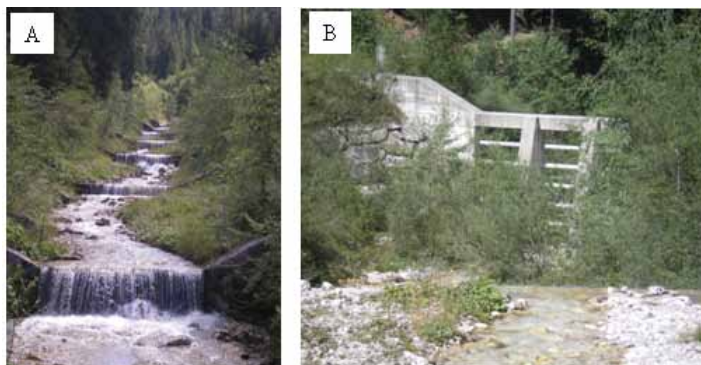
Furkelbach (Rio di Furcia) in Val Pusteria (Provincia Autonoma di Bolzano). Il torrente Furkelbach (o Furcia) è un affluente in sinistra idrografica del F. Rienza (Val Pusteria, Provincia Autonoma di Bolzano), interamente appartenente ad un'unità fisiografica di "area montuosa alpina". La sua area drenata è pari a 23.4 km². Il tratto analizzato (1.7 km di lunghezza, tra quota 1310 e 1148 m s.l.m., per una pendenza media del 9.5%) si presenta confinato a canale singolo con larghezza media di circa 8 m. Il Furkelbach rappresenta il tipico caso di torrente alpino fortemente alterato dalle sistemazioni idrauliche, dalla presenza di una strada ad esso adiacente che altera la continuità tra versante e corso d'acqua e dagli interventi di manutenzione della vegetazione perifluviale. La funzionalità

that determine alterations of morphological quality are very few, due to a relatively low human impact, if compared to other Italian rivers, in the drainage basin and in the alluvial plain. The elements of alteration are: (1) in-channel sediment removal, which occurred mainly in the 1970s and 1980s, and, likely, removal of large woody debris; (2) channel adjustments which have led to significant channel narrowing (about 50%, referring to channel width in the 1950s) and moderate incision (about 1.5 m). The reach has $MQI=0.87$, and is classified as very good.

Cecina River near Casino di Terra. It is an unconfined river that flows within a relatively narrow plain in a hilly physiographic unit (reach 3_7 in Fig. 2), with watershed area of about 635 km². The channel is classified as sinuous with alternate bars (Fig. 5A), with a gravel bed and *riffle-pool* configuration, mean slope of about 0.003, mean width of about 50 m. The main elements of alteration are: (1) presence of some weirs upstream (A2 in class B1); (2) moderate sediment mining in the past, in turn responsible for some significant channel adjustments (moderate narrowing and incision, with V2 and V3 both in class B); (3) some localized artificial elements in the reach (bridge, sills, etc.). Notwithstanding such alterations, the river presents some positive aspects, being characterized by some lateral mobility, a good morphological diversity (Fig. 5B), presence of a modern floodplain (even though narrow and discontinuous) and of a potential erodible corridor, absence of levees, presence of a corridor of spontaneous vegetation (continuous but of intermediate width). The final result is $MQI=0.78$, therefore the reach is classified as good.

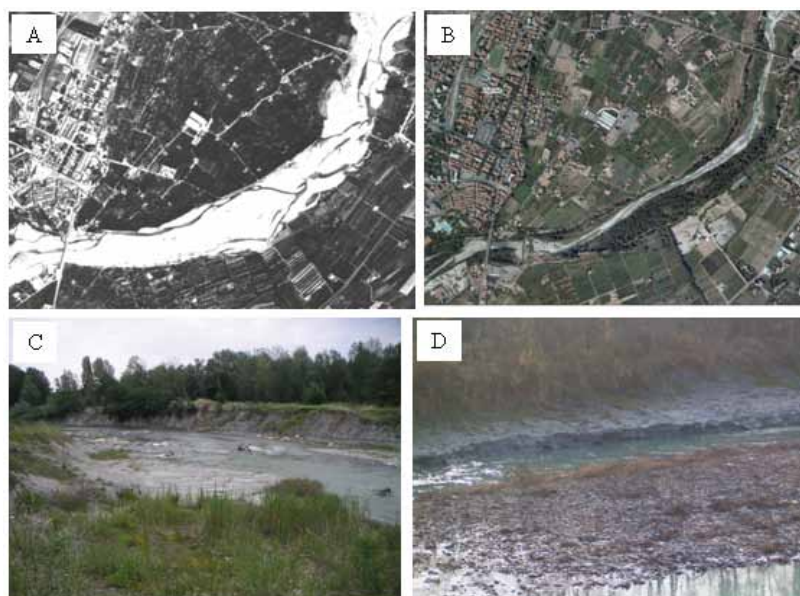
Furkelbach (Furcia Torrent) in Val Pusteria. The torrent Furkelbach (or Furcia) is a left tributary of Rienza River (Val Pusteria, Provincia Autonoma di Bolzano), entirely belonging to a physiographic unit of "alpine mountain area". Its drainage area is 23.4 km². The analysed reach (length of 1.7 km, from 1310 to 1148 m a.s.l., with a mean bed slope of 9.5%) is a single-thread confined stream with a mean channel width of about 8 m. The Furkelbach represents a typical case of alpine torrent strongly altered by hydraulic structures, presence of an adjacent road that alters the hillslope - stream continuity, and maintenance interventions on riparian vegetation. However geomorphic functionality results of intermediate level. Regarding artificiality, the highest criticality is represented by the presence of 67 weirs in the reach (Fig. 6A), with a result-

Fig. 6 - Torrente Furkelbach in Val Pusteria (IQM=0.46: scadente). A) Il tratto analizzato visto da valle: è evidente l'influenza delle briglie di consolidamento sulla morfologia d'alveo, che non presenta strutture naturali a gradinata come invece sarebbe naturale in base alla pendenza media (9.5%), l'artificialità della vegetazione perfluviale soggetta a taglio periodico, e l'assenza totale di materiale legnoso in alveo; B) la briglia filtrante di trattenuta presente subito a monte del tratto indagato



- *Torrent Furkelbach (Furcia) in Val Pusteria (MQI=0.46: poor). The analysed reach from downstream: it is evident the influence of the several weirs on channel morphology, that does not present a natural channel bed configuration with cascades as expected for the given channel slope (9.5%), the artificiality of riparian vegetation subject to periodic cutting, and the total absence of woody material within the channel; B) the open check dam immediately upstream of the reach*

Fig. 7 - Fiume Panaro presso Vignola (IQM=0.40: scadente). A) Foto aerea del 1954 che mostra un alveo largo a canali intrecciati; B) foto aerea del 2003 che mette in evidenza il drastico restringimento e la variazione della configurazione morfologica (canale singolo); C) particolare del tratto che mette in evidenza le sponde instabili e le superfici terrazzate derivanti dalla forte incisione; D) particolare che mette in evidenza l'affioramento di argilla sul fondo ed alla base delle sponde causato dall'incisione



- *Panaro River near Vignola (MQI=0.40: poor). A) Aerial photo of 1954 showing a wide braided channel; B) aerial photo of 2003 highlighting the drastic narrowing and change in channel pattern (single thread); C) particular of the reach showing high unstable banks and terraced surfaces deriving from the strong incision; D) particular showing the clay outcropping on the channel bed and basal banks*

geomorfologica risulta comunque nel complesso di valore intermedio. Considerando l'artificialità, la maggiore criticità è certamente rappresentata dal fatto che nel tratto sono presenti 67 briglie di consolidamento (Fig. 6A), per una frequenza pari quindi a 4 ogni 100 m (pertanto A4 è in classe C con ulteriori 12 punti assegnati per l'elevatissima densità di opere). Inoltre, poco a monte (400 m) del tratto analizzato è presente una briglia di trattenuta filtrante di notevoli dimensioni (Fig. 6B, A2 in classe B1). Tra gli altri elementi di artificialità, sono da considerare alcune difese longitudinali (A6 in classe B) e la rilevante attività di rimozione e prelievo della vegetazione perfluviale e del materiale legnoso (classe C per gli indicatori A11 e A12). In definitiva, l'IAM è pari a 0.54 e l'IQM a 0.46, ovvero il tratto presenta una qualità morfologica *scadente*.

Fiume Panaro presso Vignola (Emilia Romagna). E' un tratto non confinato compreso tra Vignola e Savignano (lunghezza di circa 2 km), sull'apice del conoide (unità fisiografica di alta pianura appenninica), con pendenza media di 0.007 e larghezza media di 96 m. Rappresenta un caso con una forte degradazione fisica, seppure l'artificialità non è

ing frequency of about 4 for each 100 m (therefore A4 is in class C with further 12 scores assigned because of the very high density). Furthermore, slightly upstream (400 m) there is a big open check dam (Fig. 6B, A2 in class B1). Other artificiality elements include some bank protections (A6 in class B), and the relevant removal and cutting of riparian vegetation and wood (A11 and A12 in class C). Summarising, *MAI* is equal to 0.54 and *MQI* to 0.46, meaning that the quality of the reach is poor.

Panaro River near Vignola. It is an unconfined reach between Vignola and Savignano (length of about 2 km), along the apex of an alluvial fan (physiographic unit of high Apenninic plain), having a mean channel slope of 0.007, and a mean width of 96 m. It represents a case of very strong physical degradation, although the artificiality is not at maximum levels, demonstrated by drastic changes in channel pattern and width (Fig. 7A e B), and of the channel bed (incision >6m), mainly related to past intensive mining activity and reduction of upstream sediment supply. Therefore the indicators of channel

Fig. 8 - Fiume Arno a Firenze (IQM=0.11: pessimo). A) Immagine satellitare del 2007 che evidenzia come il tratto interessa un'area fortemente urbanizzata. B) Particolare che mostra la presenza di difese di sponda continue (con funzione di argini) e l'omogeneità di sezione

Arno River in Florence (MQI=0.11: very poor). A) Satellite image of 2007 showing how the reach crosses a highly urbanized area. B) Particular showing the presence of bank protections (with function of levees) and the homogeneity of cross section



ai massimi livelli, testimoniata da marcate variazioni di configurazione e larghezza (Fig. 7A e B) e del fondo (incisione >6 m), e prevalentemente legata ad una forte attività estrattiva nel passato e alla riduzione degli apporti solidi da monte. Pertanto gli indicatori di variazioni morfologiche (V1, V2 e V3) risultano con punteggi massimi. Le altre principali criticità sono rappresentate dalla presenza di briglie nei tratti a monte e nel tratto stesso (A2 in classe B2 e A4 in classe B), assenza di piana inondabile (Fig. 7C), alterazione del substrato per affioramenti diffusi di argilla (F10 in classe C2, Fig. 7D) e impoverimento della diversità di forme attesa, a loro volta legati alla forte incisione. Il risultato finale è $IQM=0.40$, risultando quindi classificato come scadente.

Fiume Arno a Firenze (Toscana). Si tratta di un tratto non confinato in ambito di pianura (unità fisiografica di pianura intermontana), ben rappresentativo di un fiume di grandi dimensioni che attraversa una zona densamente urbanizzata (Fig. 8A). Attualmente l'alveo si classifica come rettilineo, con pendenza media di circa 0.0018 e larghezza media di 115 m. L'artificialità del tratto è molto forte, a causa della presenza continua di opere longitudinali, ed in parte trasversali, che impediscono ogni dinamica di tipo laterale e verticale (Fig. 8B), compromettendone anche gran parte delle funzionalità morfologiche. La stessa continuità longitudinale del tratto a monte è alterata a causa della presenza di dighe e numerose briglie. La presenza continua di difese di sponda e argini causa l'attribuzione di punteggi aggiuntivi agli indicatori A6 e A7, pertanto l'artificialità raggiunge il massimo punteggio. Il risultato finale è $IQM=0.11$, risultando quindi classificato come *pessimo*.

Torrente Gadria presso Lasa (Provincia Autonoma di Bolzano). Il Torrente Gadria (Val Venosta, Provincia Autonoma di Bolzano), affluente in sinistra idrografica del F.Adige, è un collettore oggetto di fenomeni di colata detritica molto frequenti, in media 1-2 per anno. Il bacino (area drenata di circa 14 km²) è molto ripido e dissestato per frane superficiali. Il tratto analizzato (2.2 km) è quello terminale e che

changes (V1, V2 and V3) result with maximum scores. Other main critical points are represented by presence of weirs upstream and in the reach (A2 in class B2 and A4 in class B), absence of modern floodplain (Fig. 7C), alteration of bed substrate with widespread clay outcrops (F10 in class C2) (Fig. 7D), and reduction of morphological diversity, in turn related to the strong incision. The final result is $MQI=0.40$, therefore the reach is classified as poor.

Arno River in Florence. It is an unconfined reach within a plain (physiographic unit of intermountain plain), well representative of a large river crossing a densely urbanized area (Fig. 8A). The channel is classified as straight - sinuous, with mean slope of 0.0018, and mean channel width of 115 m. The artificiality of the reach is very high, because of the continuous presence of lateral structures, and in part transversal, that prevent any kind of lateral and vertical dynamics (Fig. 8B), compromising most of the morphological functionalities. Upstream longitudinal continuity is also altered due to the presence of dams and several weirs. The continuous presence of bank protections and levees in the reach causes the assignment of additional scores to the indicators A6 and A7, therefore the artificiality reaches the maximum score. Furthermore channel changes are at maximum score (very high incision and no planimetric changes in a channel not free to adjust). The final result is $MQI=0.11$, therefore the reach is classified as very poor.

Gadria Torrent near Lasa. It is a left tributary of the Adige River,

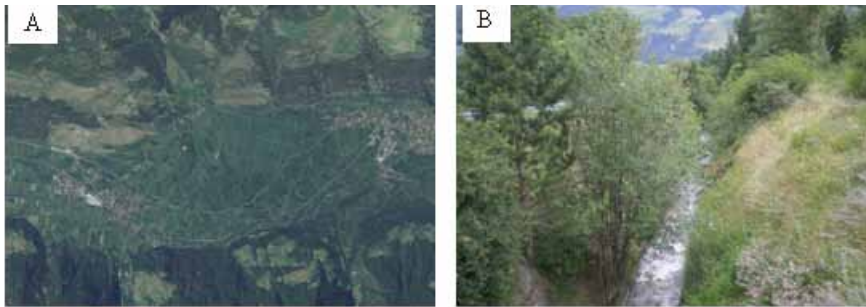


Fig. 9 - Torrente Gadria presso Lasa (IQM=0.04: pessimo). A) Foto aerea del 2006 che evidenzia il conoide attraversato dal corso d'acqua nel tratto di studio (cunettoni). B) Particolare che mostra il cunettoni del Torrente Gadria.
- Gadria Torrent near Lasa (MQI=0.04: very poor). A) Aerial photo of 2006 showing the alluvial fan crossed by the stream along the study reach. B) Particular showing the artificial configuration of the stream.

scorre attraverso il conoide (Fig. 9A), uno dei maggiori d'Europa, e di conseguenza presenta le caratteristiche di essere non confinato seppure in ambito montano. L'alveo lungo il tratto in analisi è stato oggetto di sistemazione alla fine del XIX secolo, quando è stato costruito un cunettoni selciato seguendo un tracciato rettilineo (Fig. 9B) al fine di convogliare la colata fino all'Adige. Successivamente a monte del tratto è stata costruita una briglia di trattenuta a fessura la quale ora arresta tutto il sedimento in una piazza di deposito. La funzionalità geomorfologica risulta al minimo per quasi tutti gli indicatori (tranne F1). L'artificialità risulta elevata (classe C) solo per un numero relativamente ridotto di indicatori. Tuttavia, essendo l'alveo completamente artificiale sia per quanto riguarda le sponde che il fondo, vengono attribuiti i punteggi aggiuntivi agli indicatori A6, A7 e A9, portando al massimo il punteggio dell'artificialità. Ne risulta un *IQM* pari a 0.04 (classe *pessima*).

MONITORAGGIO

In generale, per quanto riguarda gli aspetti idromorfologici, si possono distinguere due metodologie di monitoraggio:

- (1) Monitoraggio non strumentale: consiste nella ripetizione periodica della procedura di valutazione dello stato morfologico attuale appena descritta. Oltre ad un nuovo rilievo sul terreno ed all'eventuale aggiornamento degli elementi di artificialità, esso richiede possibilmente l'analisi di nuove immagini telerilevate al fine di poter aggiornare la valutazione delle variazioni morfologiche. Tale monitoraggio può permettere di individuare se ci sia un mantenimento delle condizioni morfologiche o se esistano delle evidenze di un miglioramento o peggioramento (rispettivamente attraverso un incremento o riduzione dell'Indice di Qualità Morfologica). Si tratta di una procedura relativamente rapida che tuttavia non consente un'analisi approfondita delle eventuali cause di alterazione e trend di aggiustamento morfologico.
- (2) Monitoraggio strumentale: richiede l'effettuazione di alcune misure periodiche sul terreno (oltre che da immagini telerilevate), per analizzare in maniera più sistematica le eventuali variazioni morfologiche (p.e. variazioni di larghezza e di quota del fondo). Tale monitoraggio, come ovvio, è più oneroso del precedente ma può consentire di analizzare più approfonditamente le cause e le tendenze di aggiustamento morfologico in atto. Un elenco dei parame-

subject to very frequent channelized debris flows, 1-2 per year in average. The catchment (drainage area of about 14 km²) is very steep and subject to frequent surficial landslides. The analyzed reach (2.2 km) crosses the Gadria alluvial fan, one of the biggest in Europe, and consequently presents the characteristics of an unconfined reach in a mountain physiographic context. The channel was channelized at the end of the XIX century, when a straight course with bed revetment was carried out (Fig. 9), with the aim to convey the debris flows down to the Adige River. Later, an open check dam was built just upstream to stop all the sediment. Geomorphological functionality is at the minimum for most of the indicators (except F1). The artificiality is high (class C) only for relatively few indicators. However, the continuous presence of bank protections, levees, and bed revetments implies the assignment of additional scores to indicators A6, A7 and A9, causing a maximum artificiality score. The resulting *MQI* is equal to 0.04 (very poor).

MONITORING

Two monitoring methodologies can be identified:

- (1) Non instrumental monitoring: it consists of repeating periodically the procedure for the assessment of the current morphological conditions. Besides a new field survey and updating the artificial elements, it possibly requires an analysis of new images to evaluate possible channel changes. This monitoring activity allows to verify a conservation of the previous morphological state or evidence of recovery or further reduction of the morphological quality. It is a relatively rapid procedure that does not allow a detailed analysis of possible causes of alteration and trends of adjustment.
- (2) Instrumental monitoring: it requires to carry out periodic field measurements (other than from remote sensing) to analyze in a more systematic way possible channel changes (i.e. channel width or bed elevation changes). This monitoring activity is obviously more onerous but can allow to analyze more in detail causes and trends of channel adjustments. A list of natural morphological elements to monitor is shown in Tab. 4, while monitoring artificial elements corresponds to an updating of the data base of interventions.

For the WFD implementation, non instrumental monitoring is identified with the so called surveillance monitoring and it is ap-

Morphological element	Method of survey and relative spatial scale	Stream typology
1.1 Discharge	- Hydrometric measurements on existing gauging stations	- All
1.2 Lateral extension and continuity of modern floodplain	- Remote sensing (reach)	- Only semi- unconfined channels
1.3 Length of retreating banks and rates of retreat	- Remote sensing (reach)	- Only semi- unconfined channels
2.1 Sinuosity index	- Remote sensing or field measurement (small channels) (reach)	- All
2.2 Braiding index	- Remote sensing (reach) - Field measurement (site)	- All excluding single thread
2.3 Anastomosing index	- Remote sensing (reach) - Field measurement (site)	- All excluding single thread
2.4 Bars and islands sizes	- Remote sensing (reach)	- Only large channels
2.5 Morphological pattern	- Remote sensing (reach) - Field measurement (site and/or reach)	- Only large channels - All
2.6 Channel slope	- Survey of bed profile, possibly extended from site to reach	- All
3.1 Channel width	- Remote sensing (reach) - Survey of cross-sections (site)	- Only large channels - All
3.2 Channel depth	- Survey of cross-sections (site)	- All
3.3 Width to depth ratio	- Survey of cross-sections (site)	- All
3.4 Bed-level changes	- Survey of bed profile extended from site to reach	- All
4.1 Grain size of bed sediment	- Pebble counts (sedimentary unit) - Volumetric sample (sedimentary unit)	- Wadable gravel-bed rivers - Sandy and/or not wadable rivers
4.2 Bed structures: armouring ratio and clogging	- Qualitative evaluation (site) - Grain size analysis (sedimentary unit) in case of high armouring	- Only wadable gravel-bed rivers
4.3 In-channel large woody storage	- Field counting (site) - Remote sensing (site)	- Single thread rivers - large wandering/braided rivers

Tab. 4 - Aspetti morfologici, parametri, metodologie e scansione spaziale per il monitoraggio strumentale
- *Morphological aspects, parameters, methodologies, and spatial scale for the instrumental monitoring*

tri relativi agli elementi naturali da monitorare è riportato in Tab. 4, mentre per gli elementi artificiali il monitoraggio si identifica con il costante aggiornamento dei catasti delle opere.

Ai fini dell'implementazione della *WFD*, il monitoraggio non strumentale si applica al cosiddetto monitoraggio di sorveglianza e viene applicato ad un numero relativamente elevato di tratti nel bacino rappresentativi di contesti fisiografici e caratteristiche morfologiche diverse, mentre il monitoraggio strumentale va ad identificarsi con quello operativo ed investigativo, da condurre per un numero più limitato di tratti a rischio o di casi particolari.

CONCLUSIONI

La Direttiva Quadro Europea "Acque" introduce per la prima volta gli aspetti idromorfologici come elementi da considerare, oltre a quelli fisico-chimici e biologici (fauna ittica, macroinvertebrati, macrofite acquatiche, diatomee), per la valutazione dello stato ecologico di un corso d'acqua. A tal fine, in questa ricerca è stata sviluppata una nuova metodologia che permette di valutare ed analizzare le condizioni morfologiche di un corso d'acqua. Gli aspetti fondanti di questa metodologia, che la differenziano dalla maggior parte dei metodi proposti per una valutazione delle condizioni idromorfologiche, sono: (1) l'impiego di principi consolidati, a livello internazionale, nell'ambito della geomorfologia fluviale; (2) la considerazione delle

plied to a relatively high number of reaches in the watershed representative of different physiographic and morphologic conditions, while instrumental monitoring is identified with the operative or investigative monitoring, to be carried out for a limited number of reaches at risk or particular cases.

CONCLUSIONS

For the first time, the Water Framework Directive introduces hydromorphology as element to be considered, besides water quality and biological aspects, in order to obtain an evaluation and classification of the ecological state of streams. For this scope, in this research a new methodology has been developed, allowing for evaluating and analysing the morphological conditions of a stream.

Based on the applications carried out during the testing phase, the Morphological Quality Index (*MQI*) has resulted particularly effective in providing a synthetic judgement on morphological quality of streams with very different characteristics. In particular, the results obtained are considered appropriate compared to what was expected.

attuali conoscenze sulle tendenze evolutive dei corsi d'acqua italiani; (3) il riferimento a scale spaziali e temporali adeguate.

Sulla base delle applicazioni effettuate durante la fase di test, l'Indice di Qualità Morfologica (IQM) è risultato particolarmente efficace nel fornire un giudizio sintetico sulle condizioni morfologiche di corsi d'acqua anche con caratteristiche molto diverse. In particolar modo, l'indice ha fornito risultati giudicati appropriati rispetto a quanto atteso.

In conclusione, si riportano di seguito alcuni punti che è utile sottolineare.

- (1) Il numero di indicatori particolarmente elevato (28) rende l'applicazione del metodo piuttosto impegnativa. Si rimarca tuttavia che molti indicatori (in particolar modo quelli relativi alla funzionalità) si risolvono in un rapido accertamento sul terreno e/o da immagini. A tal fine, è tuttavia necessaria da parte dell'operatore una buona conoscenza della dinamica fluviale. L'inserimento del livello di confidenza nelle risposte aiuta nel caso di oggettiva mancanza di informazioni o dati.
- (2) La suddivisione nelle tre componenti di funzionalità, artificialità e variazioni può sembrare in alcuni casi ripetitiva. Tuttavia essa permette di separare concettualmente tali aspetti e poterli valutare attraverso appositi sub-indici.
- (3) L'indice IQM è utile per valutare le condizioni morfologiche a scala di tratto ed individuarne le principali criticità ed alterazioni. Per passare da una valutazione a scala di tratto ad un'analisi complessiva del sistema fluviale, è necessario estendere la procedura di valutazione esistente implementandola alla scala di bacino, in modo che sia funzionale ad un'analisi causa - effetto e di conseguenza all'individuazione di possibili strategie di mitigazione o recupero morfologico.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata finanziata dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Roma. Si ringraziano G. Braca, B. Lastoria, F. Piva e S. Venturelli di ISPRA per la loro collaborazione. L. Pellegrini (Università di Pavia), F. Filippi, A. Colombo e T. Simonelli (Autorità di Bacino del Fiume Po) sono particolarmente ringraziati, oltre che per la collaborazione nella fase di test, per i loro contributi nello sviluppo metodologico. Per la fase di test si ringraziano inoltre P. Aucelli, V. Benacchio, M. Ceddia, C. Cencetti, S. De Gasperi, P. De Rosa, A. Dignani, G. Duci, A. Fredduzzi, M. Micheli, E. Morri, O. Nesci, C. Roskopf, R. Antolini, V. Scorpio, D. Sogni, S. Teodori, V. Tiberi, F. Troiani. Gli autori ringraziano particolarmente C. Zuri che ha svolto un'intensa attività di test nell'ambito della propria tesi di laurea.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AGENCES DE L'EAU (1998) - *SEQ Physique. A system for the Evaluation of the Physical quality of watercourses*. Version 0.
- BERTOLDI W., GURNELL A., SURIAN N., TOCKNER K., ZANONI L., ZILIANI L. & ZOLEZZI G. (2009) - *Understanding reference processes: linkages between river flows, sediment dynamics and vegetated landforms along the Tagliamento River, Italy*. River Research and Applications, **25**: 501-516.

In conclusion, some points worth mentioning are reported as follows:

- (1) The particularly high number of indicators (28) makes the application of the method quite onerous. However, it has to be emphasized that many indicators (in particular those of functionality) rely on a rapid assessment in the field and/or from images. It is however required that the operator has a good knowledge of fluvial dynamics. The inclusion of a level of confidence in the answers helps in cases of objective lack of information or data.
- (2) The division in the three components, functionality, artificiality, and channel changes, may appear in some case as repetitive. However it allows to conceptually separate such aspects and evaluate them by specific sub-indices.
- (3) The MQI index is useful to assess the morphological conditions at reach scale and to identify the main problems and alterations. To move from a reach scale assessment to an overall analysis of the fluvial system, it is however necessary to implement the existing procedure at catchment scale, in order to allow for a causes - effects analysis, and consequently to identify possible strategies of mitigation or morphological recovery.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was funded by the National Institute for Environmental Research and Protection (ISPRA), Rome. Thanks to G. Braca, B. Lastoria, F. Piva, S. Venturelli (ISPRA), L. Pellegrini (University of Pavia), F. Filippi, A. Colombo, T. Simonelli (Autorità di Bacino del Fiume Po), P. Aucelli, V. Benacchio, M. Ceddia, C. Cencetti, S. De Gasperi, P. De Rosa, A. Dignani, G. Duci, A. Fredduzzi, M. Micheli, E. Morri, O. Nesci, C. Roskopf, R. Antolini, V. Scorpio, D. Sogni, S. Teodori, V. Tiberi, F. Troiani.

In particular, the Authors thank C. Zuri for conducting the tests in his thesis.

- BRIERLEY G.J. & FRYIRS K.A. (2005) - *Geomorphology and River Management. Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing, 398 pp.
- BUFFAGNI A., ERBA S. & CIAMPITIELLO M. (2005) - *Il rilevamento idromorfologici e degli habitat fluviali nel contesto della direttiva europea sulle acque (WFD): principi e schede di applicazione del metodo Caravaggio - Notiziario dei metodi analitici, 2, Istituto di Ricerca sulle Acque, CNR IRSA, 32-34.*
- CEN (2004) - *A guidance standard for assessing the hydromorphological features of rivers*. CEN, European Committee for Standardization, EN 14614, 24 pp.
- CHANDESRI S., MENGIN N., MALAVOI J.R., SOUCHON Y., PELLA H. & WASSON J.G. (2008) - *Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau. Principes et méthodes, v3.1*. Cemagref, Lyon Cedex, 81 pp.
- CLARKE S.J., BRUC-BURGESS L. & WHARTON G. (2003) - *Linking form and function: towards an eco-hydromorphic approach to sustainable river restoration*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **13**: 439-450.
- DUFOUR S. & PIÉGAY H. (2009) - *From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits*. *River Research and Applications*, **25**: 568-581.
- ENVIRONMENT AGENCY (1998) - *River Geomorphology: a practical guide*. Environment Agency, Guidance Note 18, National Centre for Risk Analysis and Options Appraisal, London, 56 pp.
- EUROPEAN COMMISSION (2000) - *Directive 2000/60 EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Official Journal L 327, 22/12/2000, 73 pp.
- GURNELL A., TUBINO M. & TOCKNER K. (2009) - *Linkages and feedbacks in highly dynamic alpine fluvial systems*. *Aquatic Science*, **71(3)**: 251-252.
- ISPRA (2009) - *Implementazione della Direttiva 2000/60/CE - Analisi e valutazione degli aspetti idromorfologici*. <http://www.sintai.sinanet.apat.it/view/index.faces>.
- KAIL J. & HERING D. (2009) - *The influence of adjacent stream reaches on the local ecological status of Central European mountain streams*. *River Research and Applications*, **25(5)**: 537-550.
- MAAS S. & BROOKES A. (2009) - *Fluvial Geomorphology*. In: *Environment Agency, Fluvial Design Guide, FDG2, 3-1 - 3-20*.
- NARDINI A., SANSONI G., SCHIPANI I., CONTE G., GOLTARA A., BOZ B., BIZZI S., POLAZZO A. & MONACI M. (2008) - *Problemi e limiti della Direttiva Quadro sulle Acque. Una proposta integrativa: FLEA (FLuvial Ecosystem Assessment)*. *Biologia Ambientale*, **22(2)**: 3-18.
- NEWSON M.D. & LARGE A.R.G. (2006) - *'Natural' rivers, 'hydromorphological quality' and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology*. *Earth Surface Processes and Landforms*, **31**: 1606-1624.
- OLLERO OJEDA A., BALLARÍN FERRER D., DÍAZ BEA E., MORA MUR D., SÁNCHEZ FABRE M., ACÍN NAVERAC V., ECHEVERRÍA ARNEDO M.T., GRANADO GARCÍA D., IBISATE GONZÁLEZ DE MATAUCO A., SÁNCHEZ GIL L. & SÁNCHEZ GIL N. (2007) - *Un índice hidrogeomorfológico (IHG) para la evaluación del estado ecológico de sistemas fluviales*. *Geographica*, **52**: 113-141.
- PALMER M.A., BERNHARDT E.S., ALLAN J.D., LAKE P.S., ALEXANDER G., BROOKS S., CARR J., CLAYTON S., DAHM C.N., SHAH J.F., GALAT D.L., LOSS S.G., GOODWIN P., HART D.D., HASSETT B., JENKINSON R., KONDOLF G.M., LAVE R., MEYER J.L., O'DONNELL T.K., PAGANO L. & SUDDUTH E. (2005) - *Standard for ecologically successful river restoration*. *Journal of Applied Ecology*, **42**: 208-217.
- RAVEN P.J., HOLMES N.T.H., DAWSON F.H., FOX P.J.A., EVERARD M., FOZZARD I.R. & ROUEN K.J. (1998) - *River Habitat Quality. The physical character of rivers and streams in the UK and Isle of Man*. *River Habitat Survey Report*, **2**: 34 pp.
- RINALDI M. (2008) - *Schede di rilevamento geomorfologico di alvei fluviali*. *Il Quaternario*, **21(1B)**: 353-366.
- RINALDI M., TERUGGI L.B., SIMONCINI C. & NARDI L. (2008) - *Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali: alcuni casi di studio dell'Appennino Settentrionale*. *Il Quaternario*, **21(1B)**: 291-302.
- RINALDI M., SURIAN N., COMITI F. & BUSSETTINI M. (2010) - *Manuale tecnico-operativo per la valutazione ed il monitoraggio dello stato morfologico dei corsi d'acqua*. Versione 0. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma, 191 pp, ISBN: 978-88-448-0438-1.
- SEAR D.A., NEWSON M.D. & THORNE C.R. (2003) - *Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology*. Defra/Environment Agency, R&D Technical Report FD1914, London, 233 pp.
- SILIGARDI *et alii* (2007) - *IFF2007, Indice di Funzionalità Fluviale. Nuova versione del metodo revisionata e aggiornata*. Manuale APAT 2007, 321 pp.
- SURIAN N., ZILIANI L., CIBIEN L., CISOTTO A. & BARUFFI F. (2008) - *Variazioni morfologiche degli alvei dei principali corsi d'acqua veneto-friulani negli ultimi 200 anni*. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, **21(1B)**: 279-290.
- SURIAN N., RINALDI M., PELLEGRINI L., AUDISIO C., MARAGA F., TERUGGI L., TURITTO O. & ZILIANI L. (2009) - *Channel adjustments in northern and central Italy over the last 200 years*. In: JAMES L.A., RATHBURN S.L., WHITTECAR G.R. (eds.), *Management and Restoration of Fluvial Systems with Broad Historical Changes and Human Impacts*. Geological Society of America Special Paper, **451**: 83-95.
- VOGEL R.M. (2011) - *Hydromorphology: scientific and engineering challenges for 2050*. In: GRAYMAN W.M., LOUCKS D.P. & SAITO L. (Eds), *Environment and Water Resources in 2050: A Vision and Path Forward, Emerging and Innovative Technology Committee*, EWRI. ASCE Press, 2011, in stampa.
- WYŻGA B., AMIROWICZ A., RADECKI-PAWLIK A. & ZAWIEJSKA J. (2009) - *Hydromorphological conditions, potential fish habitats and the fish community in a mountain river subjected to variable human impacts, the Czarny Dunajec, Polish Carpathians*. *River Research and Applications*, **25(5)**: 517-5360