



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova
SCUOLA DI DOTTORATO IN SCIENZE STORICHE
INDIRIZZO UOMO E AMBIENTE
CICLO XXIII

**RICOSTRUZIONE E PREVISIONE DELL'EVOLUZIONE MORFOLOGICA
DI UN ALVEO A FONDO GHIAIOSO (F. TAGLIAMENTO):
INTEGRAZIONE DI MODELLAZIONE NUMERICA, ANALISI GIS E
RILIEVI DI TERRENO**

Direttore della Scuola : Ch.ma Prof.sa Maria Cristrina La Rocca

Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof. Andrea Pase

Supervisore: Dr. Nicola Surian

Dottorando : Luca Ziliani

Luglio 2011

SOMMARIO

Riassunto	6
Abstract	7
Lista delle figure	8
Lista delle tabelle	12
Lista degli acronimi	14
1 Introduzione	1
1.1 Contesto della ricerca	2
1.2 Obiettivi della tesi	5
1.3 Organizzazione della tesi	6
Parte I – Variazioni morfologiche dell’alveo negli ultimi 200 anni	8
2 Tratto studio	9
2.1 Inquadramento geografico	9
2.2 Inquadramento geologico	12
2.3 Il bacino idrografico	13
2.4 Regime idrologico	14
3 Materiali e Metodi	15
3.1 Analisi GIS	15
3.1.1 Foto aeree e cartografia utilizzate	16
3.1.2 Dati prodotti	18
3.1.3 Stima dell’errore associato alle misure GIS	18
3.2 Rilievi topografici	22
3.2.1 Sezioni topografiche utilizzate	23
3.2.2 Rilievi topografici effettuati	25
3.2.3 Stima dell’errore associato alle misure topografiche di sezioni trasversali	27
3.3 Rilievi geomorfologici	29
3.3.1 Rilievi geomorfologici utilizzati	31
3.3.2 Rilievi geomorfologici effettuati	34
4 Risultati	35
4.1 Evoluzione morfologica nel lungo termine (1805 – 2000)	35
4.1.1 Variazioni di larghezza	35
4.1.2 Variazioni parametri morfologici	38
4.2 Evoluzione morfologica nel medio termine (1954 – 1993)	41
4.2.1 Variazioni di larghezza	41
4.2.2 Variazioni altimetriche	43
4.3 Evoluzione morfologica recente (1993 – 2009)	46
4.3.1 Variazioni di larghezza	46
4.3.2 Variazioni altimetriche	50
4.4 Analisi degli impatti antropici	51

4.4.1	Attività estrattiva di sedimenti in alveo	53
4.4.2	Interventi di canalizzazione a scala di tratto.....	55
4.4.3	Variazioni dell'uso del suolo nel bacino montano	57
4.4.4	Sistemazioni idraulico-forestali a scala di bacino.....	60
4.4.5	Impatti legati alla presenza di invasi artificiali	62
4.4.6	Variazioni del regime idrologico.....	63
5	Discussione.....	65
5.1	Test della tecnica di rilievo geomorfologico di Rinaldi, (2008)	65
5.2	Analisi combinata plano-altimetrica.....	68
5.3	Valutazione delle cause delle variazioni morfologiche	71
Parte II – Modellazione numerica dell'evoluzione morfologica dell'alveo		76
6	Modellazione in geomorfologia fluviale.....	77
6.1	Concetti generali.....	77
6.2	Modelli concettuali	80
6.3	Modelli empirico/statistici	81
6.4	Modelli analitici	82
6.5	Modelli fisici	83
6.6	Modelli numerici.....	85
6.6.1	Computational Fluid Dynamic Models (CFD).....	87
6.6.1.1	Concetti generali	87
6.6.1.2	Modellazione della componente idrodinamica	88
6.6.1.3	Modellazione dello sforzo di taglio al fondo	91
6.6.1.4	Modellazione del trasporto di sedimenti incoerenti al fondo.....	91
6.6.1.5	Modellazione degli effetti legati alle correnti secondarie	92
6.6.1.6	Modellazione dell'erosione spondale.....	93
6.6.1.7	Modellazione dei processi di erosione – deposizione	95
6.6.1.8	Modellazione dell'effetto della vegetazione	95
6.6.1.9	Scelta della dimensione del modello CFD	96
6.6.2	<i>Reduced Complexity Models (RCM)</i>	100
6.6.2.1	<i>Reduced Complexity Hydraulic Models (RCHM)</i>	101
6.6.2.2	<i>Rule-Based Model (RBM)</i>	102
6.6.2.3	<i>Cellular Automata Models (CA)</i>	103
6.6.2.3.1	Modello Murray-Paola (MP)	103
6.6.2.3.2	Modello Thomas, Nicholas, Quine (TNQ).....	106
6.7	<i>CAESAR (Cellular Automaton Evolutionary Slope And River model)</i>	109
6.7.1.1	Concetti generali	109
6.7.1.2	Modellazione della componente idrodinamica	113
6.7.1.3	Modellazione del trasporto di sedimenti al fondo.....	114
6.7.1.4	Modellazione dell'erosione spondale.....	115
6.7.1.5	Modellazione dei processi di erosione-deposizione.....	117
6.7.1.6	Modellazione degli effetti della vegetazione	118
6.7.1.1	Confronto tra i principali modelli cellulari	119
7	Dati utilizzati nella modellazione.....	120

7.1	Tratto studio.....	120
7.2	Serie idrometriche.....	120
7.3	Scala di deflusso	122
7.4	Dati topografici e LIDAR	123
7.5	Foto aeree	124
7.6	Granulometrie.....	125
8	Descrizione Fasi di lavoro	127
8.1	Applicazione esplorativa	129
8.2	Analisi di sensitività.....	129
8.3	Calibrazione e Validazione	130
9	Applicazione esplorativa.....	131
9.1	Materiali	131
9.2	Risultati.....	133
10	Analisi di sensitività	136
10.1	Inquadramento teorico.....	136
10.1.1	Concetti chiave.....	136
10.1.2	Metodi di <i>screening</i>	138
10.1.2.1	Metodo <i>One-at-a-time</i> (OAT) di Morris	138
10.1.3	Metodi basati sulla regressione	139
10.1.4	Metodi basati sulla varianza	140
10.1.4.1	Metodo di Sobol	140
10.1.4.2	Metodo di Saltelli.....	142
10.2	Materiali.....	144
10.3	Risultati	144
10.3.1	SA1 – Analisi con il metodo OAT Morris.....	144
10.3.1.1	Creazione del DOE	144
10.3.1.2	Risultati	148
10.3.1.3	Analisi	153
10.3.2	SA2 – Analisi con il metodo di Saltelli.....	163
10.3.2.1	Creazione del DOE	163
10.3.2.2	Risultati	164
10.3.2.3	Analisi	169
11	Calibrazione e Validazione.....	172
11.1	Inquadramento teorico.....	172
11.2	Calibrazione	173
11.2.1	Materiale	173
11.2.2	Risultati	173
11.3	Validazione.....	176
11.3.1	Materiale	176
11.3.2	Risultati	178
12	Discussione.....	182
12.1	Ricerca di una procedura di applicazione di un RCM.....	182
12.2	Applicazione di CAESAR a scale spazio-temporali di interesse gestionale.....	183

Parte III – Tendenze evolutive future	186
13 La previsione in geomorfologia fluviale.....	187
13.1 Calcolo del <i>sediment budget</i>	190
13.2 Scenari futuri	198
13.2.1 Scenario 1 - “non intervento”	200
13.2.2 Scenario 2 - rimozione totale di repellenti fluviali e difese spondali.....	202
13.2.3 Scenario 3 - aumento apporto solido da monte (ricircolo x 2)	205
13.2.4 Scenario 4 - riduzione dell’apporto solido da monte (ricircolo x 0.5)	207
14 Discussione.....	210
14.1 <i>Sediment budget</i>	210
14.2 Commenti ai risultati prodotti dalle simulazioni di scenario	212
14.3 Confronto tra indicazioni numeriche e modelli concettuali.....	217
Conclusioni.....	220
Appendici	224
A.1 Dati in <i>input</i> al modello	225
A.2 Dati in <i>output</i> prodotti dal modello.....	229
A.3 Descrizione degli indici di <i>performance</i> utilizzati	231
A.3.1 Riferimento bibliografico.....	231
A.3.2 <i>Performance</i> area bagnata (F_w)	232
A.3.3 <i>Performance</i> erosione-deposizione (F_e)	233
A.3.4 <i>Performance</i> vegetazionale (F_{veg})	234
A.3.5 <i>Performance</i> altimetrica (F_{sez})	234
A.3.6 <i>Performance</i> alveo attivo (F_{ac}).....	234
A.3.7 <i>Performance</i> velocità computazionale (F_{vel})	235
Bibliografia.....	236

*a Greta e Paola
e a tutta la mia famiglia*

Riassunto

Lo studio delle variazioni morfologiche e la previsione dell'evoluzione futura degli alvei fluviali rivestono un ruolo primario per la loro gestione e conservazione. Diverse tecniche applicate singolarmente conducono a una comprensione soddisfacente dello stato morfodinamico di un alveo fluviale, un approccio integrato è tuttavia auspicabile in quanto permette di sviluppare una conoscenza più robusta dei processi e permette di esprimere giudizi con livelli di confidenza più elevati.

In questo lavoro di ricerca è stato intrapreso lo sforzo di integrare e coniugare due approcci molto diversi dal punto di vista metodologico e concettuale, l'analisi GIS e di campo e la modellazione numerica morfodinamica. Il caso studio oggetto della ricerca è un tratto del fiume Tagliamento (Friuli Venezia Giulia) di circa 49 km impostato tra la stretta morfologica di Pinzano e la località San Mauro, coincidente grossomodo con il cosiddetto Medio Tagliamento.

Attraverso l'applicazione di tecniche GIS, rilievi topografici e rilievi geomorfologici è stato possibile ricostruire con elevato dettaglio le variazioni manifestate negli ultimi 200 anni dall'alveo del fiume Tagliamento. La quantificazione degli impatti antropici ha permesso di evidenziare i legami diretti causa-effetto esistenti con i processi di restringimento ed incisione avviati durante la prima metà del '900, cresciuti per intensità fino agli anni '90 e seguiti da una recente fase di recupero morfologico.

Al fine di supportare e completare le valutazioni emerse da quest'analisi storica, è stata intrapresa una via d'indagine morfologica alternativa modellistico-numerica. Le scale spazio-temporali interessate dall'analisi GIS (*Geographic Information System*) e di campo hanno vincolato la scelta ad un modello in grado di simulare ampi periodi temporali per contesti con dimensioni assimilabili a quelle del tratto studio. La scelta è ricaduta su un modello morfodinamico a schema cellulare denominato CAESAR (*Cellular Automaton Evolutionary Slope And River model*), appartenente alla classe di modelli cosiddetti a "complessità ridotta" (*Reduced Complexity Models*, RCM). La tipologia stessa del modello ha richiesto che fosse affrontata, in via preliminare alla sua calibrazione e validazione, un'approfondita analisi di sensitività. In seguito alla sua validazione il modello è stato applicato per un calcolo a scala di tratto del bilancio di sedimenti e per l'implementazione di una strategia "*what-if scenarios*". È stato così possibile far emergere la significativa variabilità longitudinale del trasporto al fondo effettivo medio annuo, l'influenza dell'attività erosiva laterale sulla dinamica complessiva dei sedimenti e la scarsa rilevanza sulle tendenze evolutive planimetriche della variazione di apporto solido in ingresso al tratto studio.

L'integrazione delle valutazioni numeriche e di analisi classica ha permesso di isolare le cause antropiche alla base delle variazioni morfologiche storiche e di esprimere valutazioni quantitativamente e concettualmente più fondate sulla possibile evoluzione morfologica futura del fiume Tagliamento.

Abstract

The study of channel adjustments and prediction of morphological channel evolution play a primary role in management and conservation river policies. Various techniques taken individually can reach a satisfactory degree of understanding of river morpho-dynamic, but an integrated approach is certainly desirable as it allows to develop a more robust knowledge of river processes and to make judgments with higher confidence levels.

In this research an effort has been undertaken to integrate and combine two approaches very different in terms of methodological and conceptual base: GIS-survey analysis, and numerical morphodynamics modelling. The case study has been a reach of the Tagliamento River (Friuli Venezia Giulia, Italy) of about 49 km in length from the Pinzano gorge to San Mauro. This reach coincides roughly with the so-called Middle Tagliamento.

Through the application of GIS techniques, topographic and geomorphological surveys it was possible to reconstruct the morphological adjustments undergone by Tagliamento River channel over the last 200 years. The quantification of the human activities also helped to highlight the existing link causes-effects with the processes of narrowing and incision started during the first half of the twentieth century, grew in intensity until the 1990s and followed by a recent morphological recovery phase.

Numerical modelling was undertaken in order to support and complete the results of the historical analysis. Space-time scales involved by the historical analysis have led to choose a numerical model that can simulate long time periods on spatial contexts with dimensions similar to those of the study reach. The choice has fallen on a morphodynamic cellular model called CAESAR (*Cellular Automaton Evolutionary Slope And River model*), which fall into to the so-called *Reduced Complexity Models* group (RCM). This type of model necessarily required that a thorough sensitivity analysis was carried out before of model calibration and validation. Following validation the model was applied to estimate sediment budgets at reach scale and it was used in a "what-if scenarios" evaluation framework. It was thus possible to bring out the longitudinal variability of the average sediment transport yield, the strong influence of lateral erosion on the sediment transport dynamics and the lack of relevance on the planimetric trend of variation in sediment supply *input* on the upstream section of the reach.

Integration of numerical evaluations and classic analysis results allowed to isolate the human impact that induced the historical channel adjustments and also to make quantitatively and conceptually based assessments about the likely future morphological evolution of the Tagliamento River.

Lista delle figure

Figura 1 - <i>Flow-chart</i> a descrizione dell'organizzazione interna alla tesi.....	6
Figura 2 - Inquadramento geografico del tratto di studio del Fiume Tagliamento.....	9
Figura 3 - Morfologie presenti nel tratto studio [A] in relazione alle pendenze locali [B] e al profilo di fondo [C] (rilievi 2001-2003).....	11
Figura 4 – Corografia dei principali affluenti del fiume Tagliamento con i rispettivi bacini afferenti.....	13
Figura 5 - Tipologia di documenti utilizzati	17
Figura 6 - Collocazione delle sezioni storiche	24
Figura 7 - Sottotratti oggetto dei rilievi topografici e geomorfologici 2010.....	25
Figura 8 - Confronto tra rilievi topografici 2003-2010 in corrispondenza della sezione “142-Turrida”	26
Figura 9 - Collocazione dei sottotratti oggetto di rilievo geomorfologico	33
Figura 10 - Variazione nel lungo termine [1805-anni90'] della larghezza media dell'alveo attivo (valori riferiti a tutto il tratto studio). Denominazione delle fasi modificata da Surian et al. 2009d.....	37
Figura 11 - Variazione nel lungo termine [1805-anni90'] della larghezza media dell'alveo attivo misurata per sottotratti kilometrici.....	38
Figura 12 - Rappresentazione planimetrica della variazione nel lungo termine del <i>pattern</i> morfologico. Valori riferiti al tratto vallivo compreso tra i sottotratti 24÷49.....	39
Figura 13 - Rappresentazione in percentuali della variazione nel lungo termine del <i>pattern</i> morfologico. Valori riferiti al tratto vallivo compreso tra i sottotratti 24÷49.....	39
Figura 14 - Variazione nel lungo termine del valore medio dell'indice di intrecciamento (<i>Braided Index - BI</i>). [A] Valori riferiti alla porzione compresa tra i sottotratti 3÷11. [B] Valori riferiti alla porzione compresa tra i sottotratti 3÷34	40
Figura 15 - [A] Variazione cumulata del valore di larghezza media dell'alveo attivo durante la Fase 2, medio termine (analisi distinta per sottotratti kilometrici). [B] Fasce di durata della fase di restringimento per ogni sottotratto.....	42
Figura 16 - Variazione nel medio termine [1954-1993] della larghezza media dell'alveo attivo misurata per sottotratti kilometrici.....	42
Figura 17 - Variazioni altimetriche desunte da rilievi topografici delle sezioni storiche distinte nei periodi [1970 – 1982] (A), [1982 – 1988] (B), [1988 – 2003] (C).....	44
Figura 18 - Variazioni altimetriche nette nel medio termine [1970 – 2003]. Associazione delle indicazioni da rilievi topografici in sezioni storiche [colonne in nero] e geomorfologici [colonne in rosso] in sottotratti a cavallo di sezioni storiche	45
Figura 19 - Variazione nel breve termine [1993-2009] della larghezza media dell'alveo attivo (valori riferiti a tutto il tratto studio).....	47
Figura 20 - Schematizzazione delle variazioni della larghezza media d'alveo attivo misurate per sottotratti kilometrici nel breve termine [1993-2009]. Fasce blu - sottotratti in allargamento planimetrico. Fasce rosse - sottotratti in restringimento. Fasce gialle - sottotratti invariati	48
Figura 21 - Variazione nel breve termine [1993-2009] della larghezza media dell'alveo attivo misurata per sottotratti kilometrici.....	49
Figura 22 - Variazioni altimetriche nette nel breve termine [2001/2003 - 2006/2010]. Associazione delle indicazioni da rilievi topografici in sezioni storiche [colonne in nero] e geomorfologici [colonne in rosso] in sottotratti a cavallo di sezioni storiche	50
Figura 23 - Andamento dei volumi estrattivi concessi (riferiti a tutto il bacino del fiume Tagliamento, dati pubblicati in Rinaldi et al, 2005).....	53
Figura 24 - Variazione temporale dell'estensione planimetrica dei siti di estrazione diretta in alveo (aree digitalizzate da foto aeree, estensioni riferite a tutto il tratto studio).....	54
Figura 25 - Distribuzione cumulata delle aree estrattive in alveo digitalizzate da foto aeree misurate per sottotratti kilometrici.....	54
Figura 26 - Variazione negli ultimi 200 anni del numero e dello sviluppo dei repellenti fluviali attivi nel tratto studio	56
Figura 27 - Variazione negli ultimi 200 anni del numero e dello sviluppo delle difese spondali attive nel tratto studio.....	56
Figura 28 - Variazione negli ultimi 200 anni dello sviluppo degli argini maestri nel tratto studio	57
Figura 29 - Mappatura variazioni copertura boschiva nei periodi 1927-2006[A] e 1828-2006 [B]	59
Figura 30 - Variazione negli ultimi 200 anni dell'uso del suolo nel bacino montano del fiume Tagliamento.....	60
Figura 31 - Curve cumulate di crescita temporale del numero delle principali opere di sistemazione idraulico - forestale attive nel bacino montano del Tagliamento.....	61

Figura 32 - Variazione temporale del numero delle realizzazioni di opere di sistemazione idraulico - forestale nel bacino montano del Tagliamento.....	61
Figura 33 - Oscillazione giornaliera osservabile presso la stazione di Pinzano [Villuzza,San Pietro] – effetto di <i>hydropeaking</i> dovuto agli scarichi programmati dal lago di Cavazzo della centrale di Somplago.....	63
Figura 34 - Serie idrometrica 1886 – 2010 presso la stazione di Venzone (livello rispetto allo zero idrometrico locale).....	64
Figura 35 - Esempi di <i>trend</i> plano-altimetrici nati dall'associazione della variazione nel tempo della quota media del fondo e della larghezza media misurata a livello di sottotratto normalizzata alla massima larghezza media dal 1954.....	68
Figura 36 - <i>Scatter plot</i> delle combinazioni di variazione plano - altimetriche ottenute dall'elaborazione di tutti dati storici disponibili.....	69
Figura 37 - Associazione temporale estesa agli ultimi 200 anni tra principali variazioni morfologiche plano-altimetriche mediate a scala di tratto e potenziali cause antropiche di modificazione.....	71
Figura 38 - Associazione tra tassi di variazione della larghezza media dell'alveo attivo e livelli medi su base annua dei livelli idrometrici presso Pinzano superiori al minimo massimo annuale (1.4 m - 2005). Linee di regressione che non considera il periodo 1986-1993	73
Figura 39 - Correlazione estesa agli ultimi 200 anni tra principali variazioni morfologiche plano-altimetriche mediate a scala di tratto e cause antropiche di modificazione.....	75
Figura 40 - Alcuni CEM di alvei fluviali. [A] modello a sei stadi di Simon (1989) da Rinaldi et al, 2011a, [B] modello di Surian e Rinaldi (2003), [C] modello di Surian et al. (2009e)	81
Figura 41 - Classificazione delle correnti secondarie (da Nezu, 2005)	93
Figura 42 - Schematizzazione dei campi di moto generati da correnti secondarie del primo tipo [A] (da Blanckaert e De, 2004) e del secondo tipo [B] (da Nezu, 2005)	93
Figura 43 - Rappresentazione schematica dei principali movimenti di arretramento spondale. Cedimenti con piano di scorrimento piano: (a) <i>shallow slip</i> , (b) <i>plane slip</i> , (c) <i>slab</i> . Cedimenti con piano di scorrimento rotazionale concavo: (d) <i>slope</i> , (e) <i>toe</i> , (f) base. Cedimenti "cantilever" (g) <i>shear</i> , (h) <i>beam</i> , (i) <i>tensile</i> (da Jagers, 2003)	94
Figura 44 - Schema concettuale che mette in relazione costi di applicazione e rischio di non attendibilità dei risultati di un modello con la complessità del modello stesso (Overton e Meadows, 1976).....	96
Figura 45 - Domini spazio-temporali di applicazione dei modelli CFD morfodinamici (modificato da Church, 2008). In arancione l'areale coperto dai modelli 3D, in verde 2D, in violetto 1D	97
Figura 46 - Stato dell'arte della modellazione numerica e del monitoraggio a scale spaziali applicative (da Formann et al, 2007)	98
Figura 47 - Schema tipo di modificazione morfologica del fondo in corrispondenza di una sezione fluviale in un modello 1D (da US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, 2008).....	98
Figura 48 - Domini spazio-temporali di applicazione dei modelli RCM per applicazioni fluviali e a scala di bacino (modificato da Church, 2008). In giallo è evidenziato il contesto di applicabilità.....	100
Figura 49 - Confronto tra gli schemi di calcolo dei modelli cellulari più noti in letteratura: [A] modello di Murray e Paola (1994, 1997, 2003), [B] modello CAESAR (Coulthard, 1999; Van De Wiel et al, 2007), [C] modello TNQ (Thomas e Nicholas, 2002), modificata da Cox et al, 2005 e Murray, 2007	106
Figura 50 - GUI di CAESAR versione 6.0 mod sviluppata in linguaggio Visual C#	110
Figura 51 - Rappresentazione schematica della procedura di " <i>flow-sweeping</i> " adottata da CAESAR per il calcolo della componente idraulica (da Flood Risk Management Research Consortium, 2006). 1.scansione bottom-up,3.scansione up-down,4.scansione left-right. Manca indicazione del terzo scan right-left	113
Figura 52 - Schema della distribuzione del sedimento solido al fondo durante una singola iterazione (modificato da Van De Wiel et al, 2007).....	115
Figura 53 - Schema esplicativo dell'algoritmo di erosione laterale (modificato da Coulthard e Van De Wiel, 2006).....	117
Figura 54 - Rappresentazione schematica del sistema multi- <i>layer</i> dinamico utilizzato da CAESAR (da Van De Wiel et al, 2007).....	118
Figura 55 - Inquadramento geografico del tratto oggetto della modellazione nella Parte II della tesi. [A] Collocazione degli idrometri analizzati; [B] <i>Skecth</i> del DEM LIDAR 2001 utilizzato come condizione di fondo al contorno; [C] <i>Skecth</i> delle Ortofoto 2001	121
Figura 56 - Scale di defusso utilizzata (dati GIAMT)	122
Figura 57 - Collocazione geografica delle sezioni topografiche a copertura del tratto oggetto di modellazione.....	124
Figura 58 - Collocazione geografica delle foto a coperture del tratto oggetto di modellazione	125
Figura 59 - Sezioni in cui sono stati effettuati i campionamenti granulometrici utilizzati.....	126
Figura 60 - Curve granulometriche cumulata e di frequenza corrispondenti alla scala adottata	126
Figura 61 - <i>Flow-chart</i> delle principali fasi del lavoro di modellazione con indicazione dei riferimenti ai capitoli del documento.....	127

Figura 62 - Quadro di sintesi relativo ai tratti e alle serie idrometriche utilizzate nelle principali fasi del lavoro	128
Figura 63 - Serie idrometrica oraria utilizzata per la fase esplorativa, l'analisi di sensitività (cap. 10) e la calibrazione (sottocapitolo 11.2). In rosso le basse portate escluse dalle simulazioni.....	131
Figura 64 - Evidenziazione dei deflussi nel periodo intercorso tra le foto aeree 2002 e i rilievi topografici 2003 utilizzati.....	132
Figura 65 - Sezione di immissione della portata liquida nella sezione di monte al tratto oggetto delle simulazioni. [A] distribuzione trasversale delle velocità prodotte da HEC-RAS. [B] individuazione planimetrica degli 8 settori corrispondenti ad altrettanti punti di immissione delle portate in CAESAR	133
Figura 66 - Confronto tra area bagnata nel 2002 e <i>output</i> del modello per la migliore delle simulazioni ottenute nella fase esplorativa.....	134
Figura 67 - Analisi di frequenza del rapporto tempo reale simulato / tempo macchina di calcolo per le simulazioni effettuate in questa fase. Campione di 74 simulazioni.....	135
Figura 68 - Alcuni risultati di <i>performance</i> F_w della SA1 - metodo OAT di Morris: a) dato vettoriale (digitalizzazione foto 2002); b) rasterizzazione del vettoriale (a) in celle 25x25; c) <i>output</i> associato alla simulazione n.102 relativo all'area bagnata a fine simulazione; d) elaborazione di <i>overlay</i> tra (b) e (c) con <i>performance</i> associata pari al 75%; e) <i>output</i> associato alla simulazione n.91 relativo all'area bagnata a fine simulazione; d) elaborazione di <i>overlay</i> tra (b) e (e) con <i>performance</i> associata pari al 17%;.....	149
Figura 69 - Alcuni risultati di <i>performance</i> F_e della SA1 - metodo OAT di Morris: a) <i>raster</i> con celle 25x25 ottenuto dal file "elev_diff.txt" caratterizzante il <i>pattern</i> erosivo-deposizionale della simulazione di riferimento; b) <i>raster</i> di <i>output</i> relativo alla simulazione n.52; c) elaborazione di <i>overlay</i> tra (a) e (b) con <i>performance</i> associata pari al 45%; d) <i>raster</i> di <i>output</i> relativo alla simulazione n.69; e) elaborazione di <i>overlay</i> tra (a) e (d) con <i>performance</i> associata pari al 2%;.....	152
Figura 70 - <i>Scatter plot</i> costruiti a partire dai valori di varianza e media associati agli effetti elementari risultanti per gli indici di <i>performance</i> F_w (a), F_e (b) e F_{vel} (c) analizzati nell'ambito del primo <i>step</i> dell'analisi di sensitività SA1 condotta adottando il metodo OAT di Morris	154
Figura 71 - <i>Rank</i> e raggruppamenti dei fattori analizzati con il metodo di Morris	161
Figura 72 - Alcuni risultati di <i>performance</i> F_{veg} della SA2 - metodo di Saltelli: a) dato vettoriale di copertura vegetale (digitalizzazione foto 2002); b) rasterizzazione del vettoriale (a) in celle 25x25; c) <i>output</i> associato alla simulazione n.88 relativo all'area occupata da vegetazione a fine simulazione; d) elaborazione di <i>overlay</i> tra (b) e (c) con <i>performance</i> associata pari al 75%; e) <i>output</i> associato alla simulazione n.91 relativo all'area occupata da vegetazione a fine simulazione; d) elaborazione di <i>overlay</i> tra (b) e (e) con <i>performance</i> associata pari al 90%;	166
Figura 73 - Alcuni risultati di <i>performance</i> F_{sez} della SA2 - metodo di Saltelli: - a) sezioni 129 rilievo 2003 [dato vettoriale]; b) corrispondente DEM 2001 [dato <i>raster</i>]; c) estrazione Z_{2001} e conversione del ΔZ_{reale} puntuale in formato <i>raster</i> ; d) <i>reclass</i> del dato <i>raster</i> ΔZ_{reale} ; e) dato <i>raster</i> $\Delta Z_{simulazione}$ associato alla simulazione n. 215 f) dato <i>raster</i> $\Delta Z_{simulazione}$ riclassificato g) operazione di somma algebrica tra (d) ed (f) (valore di <i>performance</i> associato pari a 74%).	168
Figura 74 - a) distribuzione dei valori di <i>performance</i> di velocità computazionale F_{vel} associati alle 246 simulazioni della SA di Saltelli; b) distribuzione dei valori di <i>performance</i> di area bagnata F_w ; c) distribuzione dei valori di <i>performance</i> di copertura vegetazionale F_{veg} ; d) distribuzione dei valori di <i>performance</i> altimetrica F_{sez}	169
Figura 75 - Griglia a descrizione del DOE di calibrazione. Ogni punto rappresenta una combinazione dei valori oggetto di calibrazione.....	174
Figura 76 - Risultati delle analisi <i>kriging</i> dei valori degli indici di <i>performance</i> calcolati per le simulazioni di calibrazione. Cerchiato il punto di massima <i>performance</i> individuato graficamente.....	175
Figura 77 - Idrogramma registrato presso la stazione di Pinzano [Villuzza-San Pietro] utilizzato per la validazione	176
Figura 78 - Confronto planimetrico tra <i>output</i> modello (simulazione di validazione con $spr = 1.5$) e dato reale 2009.....	179
Figura 79 - Suddivisione nei 32 settori utilizzati per il calcolo del bilancio di sedimenti.....	191
Figura 80 - Confronto visivo tra i <i>pattern</i> erosivo-deposizionali al variare del fattore spr	193
Figura 81 - Variazione longitudinale dei volumi di sedimenti movimentati da attività LATERALE e AL FONDO (grafici riprodotti al variare del fattore spr). Gli andamenti longitudinali sono stati ricostruiti attraverso un processo di media mobile a passo di 40 celle di 25 m.....	194
Figura 82 - Variazione logitudinale del trasporto solido al fondo medio annuo prodotto. Valori massimi-minimi-medi calcolati sul periodo 2001-2009	197
Figura 83 - Serie idrometrica storica misurata presso la stazione di Pinzano [Villuzza-San Pietro] dal 1/1/2000 al 28/2/2010.....	198
Figura 84 - Serie idrometrica di 80 anni utilizzata per tutti gli scenari futuri.....	199
Figura 85 - Scenario 1: Serie delle portate solide medie annue in <i>output</i> al tratto ricircolate secondo il fattore spr 1.5.....	200

Figura 86 - Scenario 1: Variazione della larghezza media dell'alveo attivo e variazione altimetrica media globale associata	200
Figura 87 – Scenario 1: Variazione longitudinale dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione	201
Figura 88 - Scenario 1: Variazione longitudinale cumulata dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione.....	201
Figura 89 - Scenario 2: collocazione delle strutture di canalizzazione presenti al 2001 e rimosse all'interno dello Scenario 2	202
Figura 90 - Scenario 2: Serie delle portate solide medie annue in <i>output</i> al tratto ricircolate secondo il fattore spr 1.5.....	203
Figura 91 - Scenario 2: Variazione della larghezza media dell'alveo attivo e variazione altimetrica media globale associata	203
Figura 92 – Scenario 2: Variazione longitudinale dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione	204
Figura 93 - Scenario 2: Variazione longitudinale cumulata dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione.....	204
Figura 94 - Scenario 3: Serie delle portate solide medie annue in <i>output</i> al tratto ricircolate secondo il fattore spr 2.....	205
Figura 95 - Scenario 3: Variazione della larghezza media dell'alveo attivo e variazione altimetrica media globale associata	206
Figura 96 – Scenario 3: Variazione longitudinale dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione	206
Figura 97 - Scenario 3: Variazione longitudinale cumulata dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione.....	207
Figura 98 - Scenario 4: Serie delle portate solide medie annue in <i>output</i> al tratto ricircolate secondo il fattore spr 0.5.....	208
Figura 99 - Scenario 4: Variazione della larghezza media dell'alveo attivo e variazione altimetrica media globale associata	208
Figura 100 – Scenario 4: Variazione longitudinale dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione	209
Figura 101 - Scenario 4: Variazione longitudinale cumulata dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione.....	209
Figura 102 - Confronto tra gli scenari in termini di variazione della larghezza media d'alveo attivo dal 2001 al 2080	216
Figura 103 - Confronto tra gli scenari in termini di variazione altimetrica media globale tra il 2001 e il 2080.....	216
Figura 104 - Confronto tra le curve cumulate associate ai volumi di sedimenti movimentati dai processi di erosione/deposizione laterale	216
Figura 105 - Confronto tra le curve cumulate associate ai volumi di sedimenti movimentati dai processi di erosione/deposizione al fondo	217
Figura 106 - Andamento del rapporto Larghezza alveo / Massima Larghezza Alveo del Tagliamento per il periodo 1805-2009 (linea rossa) inserito nel grafico delle traiettorie passate (modificato da Surian et al, 2009e)	218
Figura 107 - Associazione delle traiettorie da modello concettuale e modellazione numerica (modificato da Surian et al, 2009e).....	219
Figura 108 - Formato dei file ASCII a definizione di tutti i <i>raster</i> in <i>input</i> e <i>output</i> al modello.....	225
Figura 109 - Modifiche apportate alla GUI principale per l'immissione del file di vegetazione iniziale	226
Figura 110 – Formato file di definizione della composizione granulometrica del fondo.....	226
Figura 111 - GUI di inserimento dati granulometrici	227
Figura 112 – Formato della serie di portate liquide e solide richieste in <i>input</i> al modello	227
Figura 113 - Finestra grafica per la configurazione dei punti di immissione delle portate liquide e solide costitutive delle condizioni al contorno del modello	228
Figura 114 - Organizzazione del file di <i>output</i> “velocity_vectors.txt”	229
Figura 115 - Organizzazione del file di <i>output</i> “iterout.txt”	230

Lista delle tabelle

Tabella 1 - Caratteristiche dei principali sottobacini del bacino del Tagliamento (bacini di 2° ordine con estensione superiore a 35 km ²)	13
Tabella 2 - Riepilogo delle caratteristiche degli sbarramenti artificiali presenti nel bacino del Tagliamento	14
Tabella 3 - Riepilogo dei documenti cartografici e foto aeree utilizzati	17
Tabella 4 - Riepilogo dei fattori che determinano l'entità dell'errore associato alla valutazione planimetrica della larghezza di un alveo	19
Tabella 5 – Revisione bibliografica relativa alla stima dell'errore di valutazione GIS della larghezza di un alveo fluviale	20
Tabella 6 - Errori di misura della larghezza dell'alveo associati ai documenti cartografici e alle foto aeree utilizzati	20
Tabella 7 - Riepilogo delle campagne di rilievo topografico effettuate sul tratto studio	23
Tabella 8 - Sezioni storiche topografiche utilizzate	24
Tabella 9 - Riepilogo dei rilievi topografici 2010	26
Tabella 10 - Stima dell'errore altimetrico associato alle quote medie delle sezioni topografiche storiche utilizzate	28
Tabella 11 - Metodologie di rilievo/valutazione dello stato morfologico (modificato da Rinaldi et al, 2011a).....	30
Tabella 12 - Riepilogo delle caratteristiche dei rilievi geomorfologici 2007.....	32
Tabella 13 - Riepilogo dei sottotratti oggetto di rilievo geomorfologico	33
Tabella 14 - Riepilogo delle caratteristiche dei rilievi geomorfologici 2010.....	34
Tabella 15 - Analisi delle variazioni nel lungo termine della larghezza media dell'alveo attivo (valori riferiti a tutto il tratto studio).....	37
Tabella 16 - Stime desunte da rilievi geomorfologici della variazione altimetrica nel periodo 1954 - 1970	45
Tabella 17 - Riepilogo delle valutazioni relative alle variazioni altimetriche nel medio termine emerse dai rilievi geomorfologici 2007-2010	46
Tabella 18 - Riepilogo delle valutazioni relative alle variazioni altimetriche nel breve termine emerse dai rilievi geomorfologici 2007-2010	51
Tabella 19 - Revisione bibliografica degli studi focalizzati sulla correlazione tra variazioni morfologiche fluviali e cause antropiche/naturali.....	52
Tabella 20 – Riepilogo fonti dati uso del suolo	57
Tabella 21 - Tabella di collegamento tra le classi di uso del suolo adottate internamente alle fonti utilizzate per l'analisi.....	58
Tabella 22 - Riepilogo variazioni d'uso del suolo nel periodo 1828-1990-2006.....	59
Tabella 23 - Riepilogo variazioni d'uso del suolo nel periodo 1927-1990-2006.....	59
Tabella 24 - Numero di strutture realizzate nel bacino a monte di Pinzano nel periodo 1805-2010 (Dati Regione Friuli Venezia Giulia – Servizio WebGIS http://www.irdat.regione.fvg.it/Consultatore/GISViewer.jsp).....	62
Tabella 25 - Riepilogo dei risultati del <i>test</i> delle schede di rilievo geomorfologico applicato sul fiume Tagliamento	66
Tabella 26 - Analisi delle combinazioni piano - altimetriche ottenute	69
Tabella 27 - Riepilogo delle caratteristiche delle principali categorie di modelli esistenti in geomorfologia fluviale (modificato da Darby e Van De Wiel, 2003).....	79
Tabella 28 - Principali <i>routine</i> interne al codice di CAESAR	111
Tabella 29 - Confronto tra le caratteristiche dei principali modelli cellulari	119
Tabella 30 - Elenco delle stazioni idrometriche esistenti sull'asta del fiume Tagliamento analizzate	120
Tabella 31 - Stima dei tempi di ritorno associati ai livelli e alle portate presso la stazione di Venzone 1	123
Tabella 32 - Riepilogo delle sezioni topografiche disponibili sul tratto oggetto di modellazione	124
Tabella 33 - Riepilogo delle foto disponibili a copertura del tratto oggetto di modellazione	125
Tabella 34 - Scala granulometrica adottata in CAESAR	126
Tabella 35 - Descrizione dei dati di controllo disponibili ed utilizzati per la fase di applicazione esplorativa	131
Tabella 36 - Versioni del modello CAESAR testate durante la fase esplorativa	135
Tabella 37 - Descrizione dei dati di controllo disponibili ed utilizzati durante l'analisi di sensitività	144
Tabella 38 - Valori del parametro " <i>Flow distribution width</i> " e relativo schema di distribuzione all'interno di un singolo processo di <i>sweep</i> in una unica direzione	146
Tabella 39 - Elenco dei 12 parametri analizzati durante il primo <i>step</i> nella SA effettuato adottando il metodo OAT di Morris	147

Tabella 40 - Valori adottati per la riclassificazione dei <i>raster</i> "elev_diff.txt" associati a tutti i <i>run</i> eseguiti per la SA di Morris.....	150
Tabella 41 - Valori adottati per la riclassificazione del <i>raster</i> "elev_diff.txt" associato al <i>pattern</i> erosivo-deposizionale della simulazione di riferimento	150
Tabella 42 - Possibili combinazioni dei valori associati al <i>raster</i> di somma algebrica (in rosso le combinazioni in discordanza, in verde quelle in concordanza di comportamento)	151
Tabella 43 - Statistiche descrittive dei valori di effetto elementare per ognuno dei parametri oggetto dell'analisi SA1 condotta applicando il metodo OAT di Morris	153
Tabella 44 - Descrizione statistica tramite <i>box-plot</i> dei risultati ottenuti con il metodo di Morris per tutti i 12 fattori analizzati.....	155
Tabella 45 - Sintesi della valutazioni discendenti dall'osservazione dei risultati dell'analisi di Morris	160
Tabella 46 - Classifica di significatività dei fattori ottenute analizzando i risultati emerse dal metodo di Morris.....	161
Tabella 47 - Risultati del primo step dell'analisi di sensitività condotta applicando il metodo OAT di Morris.....	162
Tabella 48 - Fattori analizzabili con dettaglio nella SA di secondo livello.....	163
Tabella 49 - Caratteristiche del DOE creato per la SA2 condotta adottando il metodo di Saltelli.....	164
Tabella 50 - Valori adottati per la riclassificazione raster $\Delta Z_{2001-2003}$ utilizzato per la SA2 condotta applicando il metodo di Saltelli	167
Tabella 51 - Valori adottati per la riclassificazione dei file "elev_diff.txt" associati ai <i>run</i> eseguiti per la SA2 condotta applicando il metodo di Saltelli.....	167
Tabella 52 - Stime dei valori degli indici di sensitività del primo ordine ottenuti per ogni stadio della SA2 condotta con il metodo di Saltelli.....	170
Tabella 53 - Stime dei valori degli indici di sensitività totali ottenuti per ogni stadio della SA2 condotta con il metodo di Saltelli	170
Tabella 54 - Descrizione dei dati di controllo disponibili ed utilizzati durante la validazione.....	176
Tabella 55 - Riepilogo dei risultati delle simulazioni di validazione e confronto con i dati reali 2009.....	178
Tabella 56 - Revisione bibliografica relativa alla stima del <i>sediment yield</i> medio annuo e confronto con i risultati ottenuti in sede di validazione.....	180
Tabella 57 - Riepilogo dei tempi macchina impiegati per ogni fase del lavoro condotta prima di passare alla validazione.....	183
Tabella 58 - Riepilogo delle principali caratteristiche di potenza di calcolo degli elaboratori utilizzati per effettuare tutte le simulazioni	183
Tabella 59 - Riepilogo dei risultati delle simulazioni effettuate nell'ambito dello <i>step 2</i> del calcolo del bilancio di sedimenti	192
Tabella 60 - Riepilogo dei rapporti tra i processi di movimentazione di sedimenti al fondo e lateralmente al variare del fattore di ricircolo spr.....	195
Tabella 61 - Riepilogo descrittivo degli scenari futuri affrontati	199
Tabella 62 - Confronto temporale tra le principali risposte prodotte dagli scenari futuri in termini di configurazione planimetrica e dinamica dei sedimenti	215
Tabella 63 - Dati relativi all'evoluzione planimetrica del tratto studio utilizzati per il confronto tra i risultati modellistici numerici e concettuali.....	218
Tabella 64 - Matrice delle possibili combinazioni a scala di <i>pixel</i> tra dato_reale / <i>output</i> _modello.....	231
Tabella 65 - Riepilogo dell'uso di indici di <i>performance</i> nella fasi di lavoro della Parte II della tesi.....	232
Tabella 66 - Matrice delle combinazioni dato_reale / <i>output</i> _modello per l'indice di <i>performance</i> F_w	233
Tabella 67 - Matrice delle combinazioni dato_reale / <i>output</i> _modello per l'indice di <i>performance</i> F_e	233
Tabella 68 - Matrice delle combinazioni dato_reale / <i>output</i> _modello per l'indice di <i>performance</i> F_{veg}	234
Tabella 69 - Matrice delle combinazioni dato_reale / <i>output</i> _modello per l'indice di <i>performance</i> F_{ac}	235

Lista degli acronimi

1D	<i>Modello monodimensionale</i>
2D	<i>Modello bidimensionale</i>
3D	<i>Modello tridimensionale</i>
CA	<i>Cellular Automata</i>
CAESAR	<i>Cellular Automaton Evolutionary Slope And River model</i>
CEM	<i>Conceptual Evolution Model</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamic model</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DGPS	<i>Differential GPS</i>
DOE	<i>Design Of Experiments</i>
DMV	<i>Deflusso Minimo Vitale</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulations</i>
DOD	<i>Difference Of DEM</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
FSM	<i>Froude Scale Models</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
IPS	<i>Modelli di meandro secondo Ikeda, Parker, Sawai</i>
LES	<i>Large Eddy Simulations</i>
LGM	<i>Last Glacial Maximum</i>
LHS	<i>Latin Hypercube Sampling strategy</i>
LIDAR	<i>Laser Imaging Detection And Ranging</i>
LWD	<i>Large Woody Debris</i>
NDS	<i>Nonlinear Dynamical Systems</i>
NES	<i>Navier-Stokes Equations</i>
OAT	<i>One At a Time method</i>
OOP	<i>Object Oriented Programming</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
RBM	<i>Rule-Based Model</i>
RCHM	<i>Reduced Complexity Hydraulic Model</i>
RCM	<i>Reduced Complexity Model</i>
RSME	<i>Root Square Mean Error</i>
SA	<i>Sensitivity Analysis</i>
SOC	<i>Self-Organized Criticality</i>
WFD	<i>Water Frame Directive</i>

1 Introduzione

1.1 Contesto della ricerca

“Rivers are the product of turbulent stream flow over myriad granular elements, vegetable matter, and solid refractory materials under strong, irregular forcing on effective timescales that range from seconds to centuries. They are complex systems because they are characterized by multiple scales of time and length that define a tightly integrated hierarchical set of subsystems, each of which exhibits some range of scale-free behaviour”

Church, 2008

Gli argomenti che costituiscono il nucleo di questo lavoro di ricerca, possono considerarsi fondamentalmente due: lo studio delle variazioni morfologiche degli alvei fluviali e la modellistica numerica morfodinamica. Il primo rappresenta indubbiamente un *focus* classico di forte richiamo che ha visto continui sviluppi anche molto recenti nella strumentazione di rilievo in campo (Wheaton, 2010) e negli applicativi *software* (Gurnell, 2003). Anche quello modellistico numerico può considerarsi un ambito di indagine ormai decisamente consolidato, seppur continui a manifestare margini di miglioramento e sviluppi talmente sorprendenti da ritenere che la disciplina si trovi ancora in uno stadio di “fiorente giovinezza” (Ferguson, 2008). La centralità di questi argomenti ma al tempo stesso il loro reciproco distacco metodologico e formale impone necessariamente una continua integrazione, fatta di scambi di dati e valutazioni; questa interdipendenza implica però investimenti novetoli in termini di tempo ed energia da dedicare sia all’indagine di campo e storica, sia all’attività di sviuppo e applicazione di modelli numerico-concettuali.

L’esigenza emersa maggiormente nell’ambito di questa tesi di dottorato, è stata proprio quella di insistere per fare avanzare il lavoro di ricerca su entrambi i fronti, dato di campo e modellazione, cercando di agganciare saldamente alla realtà ogni valutazione fatta “a tavolino” di fronte ad uno schema concettuale o ad una simulazione numerica. Nello specifico la realtà di campo ha trovato nel fiume Tagliamento un contesto di studio ideale per due motivi principali:

- negli ultimi 200 anni il bacino del fiume Tagliamento ha subito relativamente poche forme di impatto; dal punto di vista di chi indaga le variazioni morfologiche questo rappresenta un vantaggio non tanto per il carattere di semi-naturalità che ancora oggi caratterizza il Tagliamento, ma piuttosto perché con pochi fattori influenti risulta agevolato lo studio stesso del legame tra variazioni morfologiche e relative cause. L’assenza di invasi artificiali significativi e la sostanziale invarianza statistica del regime idrologico nel breve e nel lungo termine permettono di isolare gli altri potenziali fattori di impatto consentendo di valutarne più chiaramente l’effettiva rilevanza.
- Il Tagliamento costituisce una piacevole eccezione a livello nazionale per la ricchezza dei dati esistenti storici e recenti. Anche grazie ad una serie di progetti di ricerca recenti è stato evidenziato come pochissime altre realtà in Italia dispongano di una copertura dati così ingente come quella disponibile per il Tagliamento: foto aeree e cartografia storica, rilievi topografici recenti e storici, analisi granulometriche, dati LIDAR, dati idrometrici storici ed in tempo reale.

Insieme agli altri principali fiumi veneto-friulani il Tagliamento è stato oggetto di svariati studi geomorfologici (Surian e Rinaldi, 2003; Surian et al., 2009b). Le indagini estese a numerosi corsi d’acqua del centro-nord Italia nell’ambito di due progetti PRIN (PRIN2005 “Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali in Italia centro-settentrionale: tendenze evolutive, cause ed implicazioni applicative”, PRIN2007 “Tendenza evolutiva attuale e possibile dinamica futura degli alvei fluviali in Italia centro-settentrionale”) hanno mostrato una sorprendente corrispondenza temporale e di intensità tra le variazioni manifestate dalla maggior parte dei corsi d’acqua italiani nel secondo dopoguerra (Rinaldi et al., 2008b; Pellegrini et al., 2008). Le tecniche d’indagine applicate al tratto studio e illustrate nella Parte I della tesi sono le medesime utilizzate in questo contesto nazionale

di ricerca. Si tratta di metodologie ormai ampiamente consolidate in ambito scientifico come l'utilizzo di applicativi *software* GIS, il rilievo topografico DGPS e il rilievo geomorfologico. Gli spunti di maggiore novità in questa parte del lavoro sono discesi dal *test* condotto sul metodo di rilievo geomorfologico introdotto da Rinaldi (Rinaldi, 2007; Rinaldi, 2008; Surian et al, 2009b), e dal tentativo di affinare il modello concettuale di evoluzione (*Conceptual Evolution Model* - CEM) introdotto in Surian, 2006.

Lo sviluppo dei CEM costituisce un altro significativo punto di contatto tra le forme d'indagine classiche GIS e di campo con quella numerica. Le forme concettuali di modellazione sono state storicamente le più impiegate per spiegare processi e variazioni morfologiche, ma ancora oggi sono spesso utilizzate come primo *step* all'interno di un processo di modellazione esteso ad approcci quantitativi prettamente numerici (Darby e Van De Wiel, 2003). Entrando in questo ambito modellistico-numerico le alternative ai CEM si ampliano considerevolmente anche se le vie che possono essere intraprese continuano ad inserirsi necessariamente tra due alternative "estreme":

- la via cosiddetta "riduzionista" (Nicholas, 2005), che approfondisce e simula numericamente ogni singolo processo nella prospettiva di realizzare un modello che trovi nella complessità la soluzione più vicina possibile alla realtà.
- l'alternativa cosiddetta "costruzionista" (Wilcock e Iverson, 2003) o semplificata che si allontana da un approccio fisicamente basato e cerca vie alternative fondate sull'osservazione e sulla pratica della *Reduced Complexity Modelling* (RCM).

Si possono genericamente considerare RCM tutti quei modelli ridotti nella complessità concettuale di base che grazie ad una semplificazione anche spinta delle leggi della fluidodinamica, del trasporto solido e della dinamica vegetazionale garantiscono un sostanziale aumento della velocità di calcolo consentendo applicazioni a scale spazio-temporali intermedie impensabili per qualunque modello fisicamente basato CFD (*Computational Fluid Dynamic model*). RCM e CFD (2-3D) rappresentano solo due bande dello spettro modellistico-numerico, un *continuum* che parte dal più riduzionista CFD per arrivare fino al più semplificato modello numerico *Ruled-Based* (Brasington e Richards, 2007). In ambito geomorfologico, in modo del tutto speculare a quanto accaduto nel campo idrologico, complessi modelli CFD diffusosi solo di recente sono stati affiancati da nuovi modelli a complessità ridotta nati successivamente proprio con l'intenzione di ampliare le scale spaziali e temporali coperte dai modelli precedenti, nella convinzione della loro sostanziale inapplicabilità a determinate scale spazio-temporali.

A partire dal modello di Murray e Paola del 1994 hanno trovato ampio spazio in letteratura i modelli RCM cosiddetti cellulari, una classe oggi popolata da schemi sia idrodinamici (LISFLOOD - Bates e De Roo, 2000), sia morfodinamici (TNQ - Thomas e Nicholas, 2002, CAESAR - Coulthard et al, 2000). Nell'ambito di questo lavoro di tesi, il contesto di applicazione (tratto *braided* di circa 33 km e finestre temporali ampie fino ad 80 anni) e le indicazioni emerse da un approfondito lavoro di ricerca bibliografica hanno indotto ad utilizzare il modello CAESAR (*Cellular Automaton Evolutionary Slope And River model*) sviluppato a partire dal 1999 da T. Coulthard dell'Università di Hull.

Pur nella convinzione che, per applicazioni in ambito geomorfologico a scale spazio-temporali di rilievo, un approccio semplificato come quello adottato da CAESAR e dagli RCM in generale resti ad oggi l'unica alternativa possibile, si ritiene comunque essenziale sottoporre anche questa tipologia di modelli a complessità ridotta a strategie applicative rigorose (Brasington e Richards, 2007), ovvero strategie che devono prevedere analisi di sensitività, calibrazione e validazione ("*verification and validation in a pragmatic sense*" - Mosselman, 2010) secondo un *framework* applicativo classico rivalutato recentemente in Darby e Van De Wiel, 2003. E' ben nota la difficoltà e al tempo stesso l'importanza di sottoporre ogni modello numerico a procedure di *testing* quanto più rigorose; spesso tuttavia in contesti accademici le maggiori lacune modellistiche si manifestano proprio nelle fasi di verifica dei prodotti sviluppati, a differenza dei più noti applicativi commerciali sottoposti per necessità di mercato a *test* più rigorosi ed estensivi di quelli mediamente adottati da riviste scientifiche con procedure di *peer-review* (Mosselman, 2010). Pur mancando ancora oggi protocolli di *testing* che siano univocamente accettati dalla comunità scientifica, non si può

rinunciare a sottoporre a verifica anche i nuovi modelli RCM. Questi *test* non devono pretendere che gli RCM riproducano nel dettaglio forme e processi fluviali, ma che almeno dimostrino coerenza interna e macro-corrispondenza con il dato reale, nonché livelli di accuratezza conformi al loro grado elevato di semplificazione. Fissati questi punti di partenza comuni la competizione tra approcci semplificato e riduzionista è indubbiamente sana e produttiva. Lo sforzo continuo di sviluppare e sistematicamente testare un *range* di modelli permetterà al migliore di “sopravvivere” e causerà l’abbandono dei più “deboli”.

Sebbene in particolari circostanze un approccio modellistico possa essere più vantaggioso rispetto ad un altro, quest’ampia diversità tra i modelli esistenti dipinge ancora una volta l’incompletezza della nostra comprensione dei processi fluviali e riflette la difficoltà nel formulare predizioni in ambito geomorfologico (Wilcock e Iverson, 2003). Ad oggi non si può escludere completamente che la dinamica fluviale sia caratterizzata fondamentalmente da una complessità di natura prettamente deterministica e che quindi l’evoluzione di un alveo fluviale sia teoricamente riproducibile. Permangono tuttavia fattori intrinsecamente stocastici che di fatto rendono impossibili forme complete di previsione evolutiva: l’imprevedibilità a medio e lungo termine degli eventi di piena, la complessità della dinamica vegetazionale, l’incertezza prodotta da interazioni di secondo ordine tra i processi, la difficoltà alla caratterizzazione completa ed esatta dello stato iniziale di un sistema fluviale (Coulthard e Van De Wiel, 2010).

E’ evidente quindi il paradosso: ogni previsione in senso stretto resta attualmente improponibile a tutte le scale spazio-temporali, eppure la propensione ad intervenire in contesti fluviali di ogni genere presuppone implicitamente una previsione dei possibili impatti che un singolo intervento può avere sul sistema. Ogni soluzione a questi problemi non può prescindere dall’adozione di un modello, qualunque sia il suo grado di complessità. Senza modelli, nel senso più ampio del termine, ogni predizione rimane senza fondamento e correttezza. Il problema in ultima battuta si riduce quindi alla scelta del modello che fornisca le migliori risposte in relazione agli obiettivi, alle scale spaziali e temporali e al livello di precisione richiesto.

1.2 Obiettivi della tesi

Gli obiettivi della tesi sono molteplici e ripartiti tra le tre parti principali in cui essa è organizzata.

La Parte I, dedicata allo studio delle variazioni morfologiche subite dal Medio Tagliamento negli ultimi 200 anni, punta a perseguire i seguenti obiettivi:

1. testare l'attendibilità del metodo di rilievo geomorfologico di Rinaldi (2008) verificando la corrispondenza tra i *trend* altimetrici ricavati da rilievi topografici e le indicazioni emerse in sede di rilievo geomorfologico;
2. verificare l'applicabilità specifica al fiume Tagliamento del modello evolutivo concettuale introdotto da Surian (2006), nonché portare nuovi dati e considerazioni per una sua implementazione in relazione alla fase più recente di evoluzione morfologica dei fiumi veneto-friulani;
3. fornire indicazioni specifiche riguardo ai legami causa-effetto alla base delle variazioni morfologiche manifestate dal Tagliamento negli ultimi 200 anni.

La Parte II, concentrata sul tema della modellazione numerica del fiume Tagliamento, è stata impostata con le seguenti principali finalità:

1. individuare un modello numerico adatto per applicazioni a contesti spazio-temporali di interesse gestionale, ovvero capace di coprire, con tempi di calcolo e accuratezza accettabili, scale spaziali di alcune decine di chilometri e finestre temporali di alcune decine di anni;
2. sperimentare una procedura metodologica con valenza generale estendibile a modelli morfodinamici RCM che ne permetta un'applicazione efficace e completa;
3. confermare (secondo Oreskes et al. 1994) l'attendibilità del modello scelto nel caso specifico di applicazione ad un tratto fluviale a morfologia *braided*.

La Parte III della tesi, focalizzata sul tema della previsione morfologica fluviale, si propone di applicare il modello individuato e testato nella Parte II per raggiungere successivi obiettivi di:

1. calcolo del *sediment budget* di tratto (relativamente alla sola componente di sedimenti associata al trasporto solido al fondo);
2. sviluppo di una strategia "*what-if scenario*" che permetta di valutare gli effetti indotti da politiche gestionali dei sedimenti a scala locale o di bacino sulla morfologia del tratto studio e sulla dinamica di trasporto al fondo che lo caratterizza;
3. confronto tra i risultati prodotti da modellazione numerica con le indicazioni fornite dal modello concettuale definito in Surian et al, 2009e.

Ultimo per richiamo ma primario per importanza è l'obiettivo di pervenire ad un'integrazione effettiva e produttiva dei diversi approcci adottati in questo lavoro di ricerca, un'integrazione che conduca a valutazioni conclusive rafforzate e meno ambigue delle cause che hanno indotto le variazioni morfologiche del fiume Tagliamento negli ultimi 200 anni, nonché indicazioni, concettualmente e quantitativamente fondate, riguardo alle sue più probabili tendenze evolutive future.

1.3 Organizzazione della tesi

Come rappresentato in Figura 1 la tesi è stata organizzata in tre parti principali tra loro strettamente collegate, ma ciascuna con una propria autonomia; la *Parte I* interessa l'analisi dell'evoluzione morfologica storica manifestata negli ultimi 200 anni dal Medio Tagliamento, la *Parte II* sviluppa invece il tema della modellazione numerica applicata al medesimo tratto studio, la *Parte III* infine riguarda l'impostazione modellistica di scenari relativi ad una sua possibile evoluzione morfologica futura.

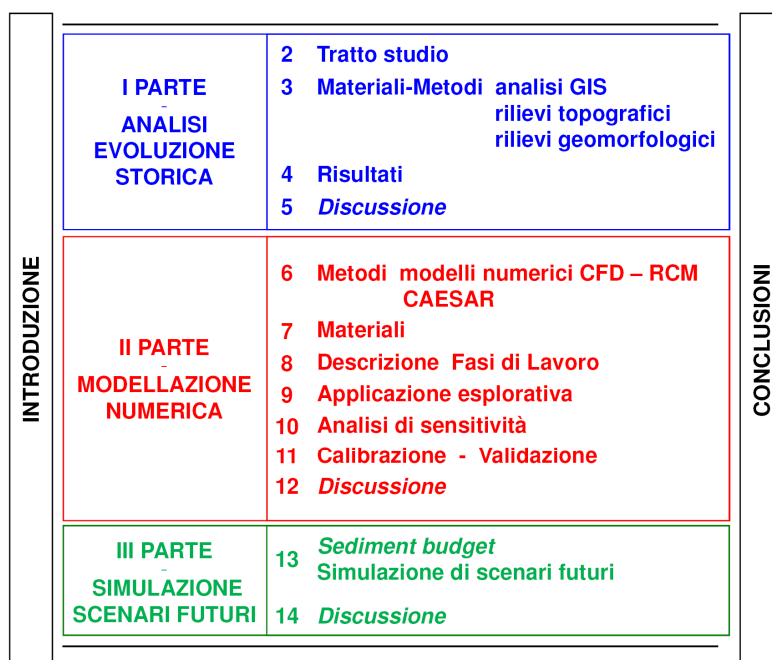


Figura 1 - *Flow-chart* a descrizione dell'organizzazione interna alla tesi

La Parte I inizia con il capitolo 2 dedicato all'inquadramento del fiume Tagliamento. I metodi adottati in questa parte del lavoro sono delineati nel capitolo 3, dove viene dedicato un sottocapitolo ad ogni specifica tecnica di indagine (analisi con *software* GIS - 3.1, rilievi topografici con DGPS - 3.2, rilievi geomorfologici di terreno - 3.3). All'interno del successivo capitolo 4, la descrizione dei risultati è organizzata in funzione delle fasi temporali di osservazione: evoluzione nel lungo termine (1805-2000 - 4.1), nel medio periodo (1954-1993 - 4.2) e nel breve termine (1993-2009 - 4.3). Un sottocapitolo a parte (4.4) è invece dedicato alla quantificazione delle forme di impatto antropico a cui il corso d'acqua è stato storicamente soggetto. La Parte I si chiude con il capitolo 5 rivolto esclusivamente alla discussione dei risultati; qui sono delineati i punti di forza delle valutazioni emerse ma vengono al contempo sollevate questioni e problematiche da affrontate nelle parti successive della tesi.

La Parte II è dedicata all'approccio modellistico numerico, scelto come forma di studio integrata all'analisi delineata nella Parte I. Un ampio capitolo introduttivo (6) è stato impostato con una doppia finalità: (i) delineare un quadro teorico quanto più completo sulla tematica della modellazione in ambito geomorfologico fluviale, (ii) motivare la scelta modellistica adottata in questo specifico contesto. Si è ritenuto opportuno dedicare ampio spazio non solo al contesto teorico della classe di appartenenza del modello scelto, ma anche alle classi alternative. Brevi sottocapitoli sono dedicati alle tipologie modellistiche alternative a quella scelta (modelli concettuali - 6.2, empirico-statistici - 6.3, analitici - 6.4, fisici - 6.5); ampio spazio viene invece dedicato alla classe dei modelli numerici (6.6), con particolare attenzione alle macro-classi di modelli cosiddetti CFD (6.6.1) e RCM (6.6.2). A seguire il sottocapitolo 6.7 è interamente riservato al modello morfodinamico RCM a schema cellulare scelto per l'applicazione al Tagliamento (CAESAR). Nel capitolo successivo (7) sono quindi descritti i materiali e i dati utilizzati in questa parte del lavoro. I seguenti punti dell'attività modellistica sono sinteticamente anticipati nel capitolo 8, inserito con l'intento specifico di delineare con chiarezza la successione delle fasi e le motivazioni che ne hanno guidato l'impostazione. Seguono quindi una serie di capitoli dedicati ciascuno ad una singola fase di lavoro: applicazione preliminare ed esplorativa (capitolo 9), analisi di sensitività del modello (capitolo 10), calibrazione e validazione (capitolo 11). All'interno di ogni capitolo è stata mantenuta la seguente struttura: contesto teorico (metodi), materiali, elaborazione ed analisi dei risultati. A chiusura della Parte II il capitolo 12 è stato dedicato alla discussione dei principali risultati.

La terza ed ultima parte della tesi si focalizza sulla tematica della previsione modellistica in ambito geomorfologico, con particolare riferimento alle potenzialità previsionali del modello scelto e validato nella Parte II. Nel capitolo 13 viene prima dedicato spazio al calcolo del bilancio di sedimenti a scala di tratto (13.1), quindi si passa alla descrizione dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche di alcuni scenari di evoluzione futura (sottocapitolo 13.2). Infine il capitolo 14 viene dedicato alla discussione organica dei risultati e al loro confronto con quelli prodotti da altri modelli concettuali descritti nel dettaglio nelle Parti I e II.

Nelle conclusioni vengono riprese ed integrate le valutazioni emerse distintamente nelle singole parti della tesi al fine di esprimere considerazioni di sintesi figlie di una compiuta integrazione di approcci modellistici e di campo.

Parte I – Variazioni morfologiche dell'alveo negli ultimi 200 anni

2 Tratto studio

2.1 Inquadramento geografico

Il fiume Tagliamento nasce nei pressi del Passo della Mauria (1,298 m s.l.m.) al confine tra le regioni Friuli Venezia Giulia e Veneto, nelle Dolomiti friulane. L'asta principale si sviluppa complessivamente per circa 178 km suddivisibili in tre segmenti principali: Alto, Medio e Basso Tagliamento (Figura 2). Il tratto montano, o Alto Tagliamento, attraversa la porzione orientale delle Alpi meridionali, la fascia prealpina carnica e l'anfiteatro morenico tilaventino; il Medio Tagliamento si apre nell'alta pianura friulana all'altezza di Pinzano e scende fino a Latisana; il Basso Tagliamento sfocia infine in Adriatico nei pressi di Lignano Sabbiadoro. Dal punto di vista amministrativo il bacino rientra quasi esclusivamente nella regione Friuli Venezia Giulia, ad eccezione delle golene del tratto confinante con il Veneto, che ricadono in comune di San Michele al Tagliamento, e di una minima percentuale di territorio ricadente nella provincia di Belluno. Le municipalità nel bacino sono 88 di cui una in provincia Venezia, tre in provincia di Belluno, sedici in provincia di Pordenone e le restanti 68 in provincia di Udine.

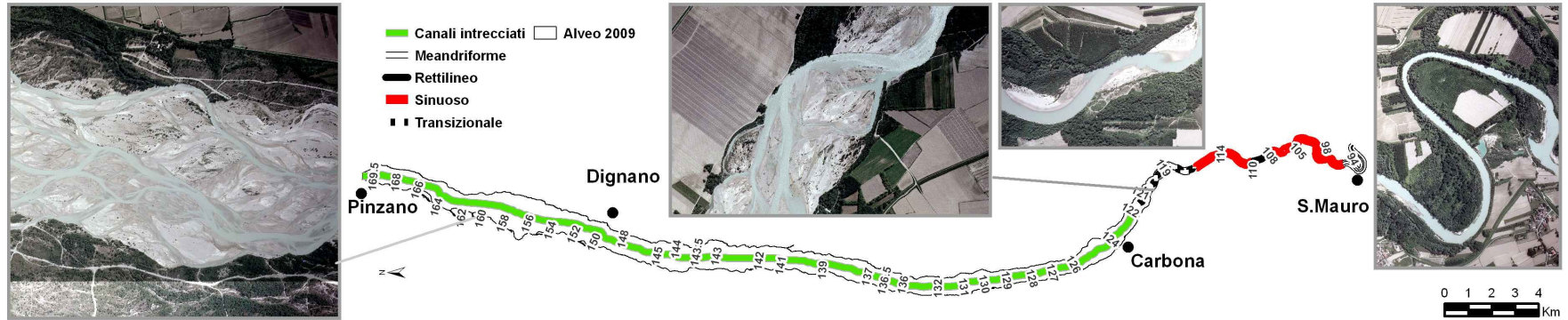


Figura 2 - Inquadramento geografico del tratto di studio del Fiume Tagliamento

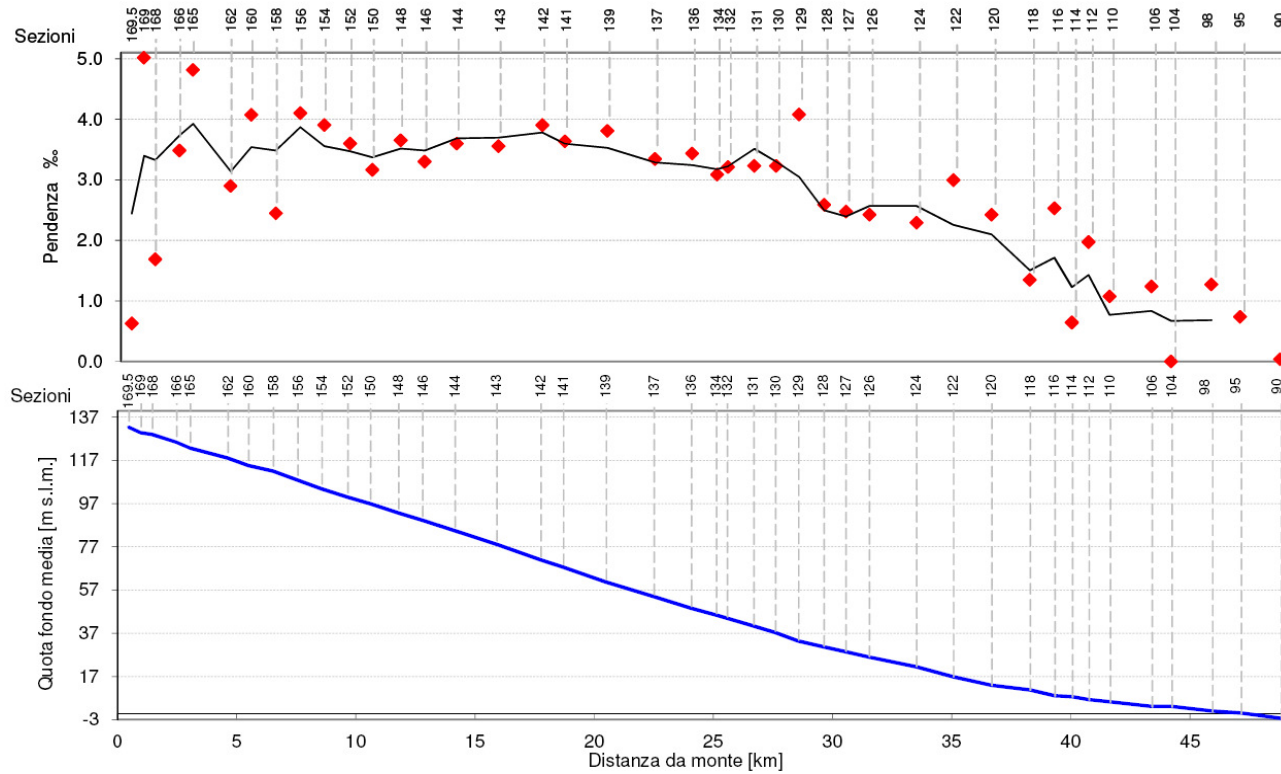
Il tratto oggetto dell'analisi storica dell'evoluzione morfologica s'interpone tra la stretta di Pinzano e la località San Mauro in comune di San Michele al Tagliamento, coincidendo pressoché totalmente con il Medio tratto del Tagliamento. Il tratto presenta una lunghezza di circa 49 km, assumendo tutte le morfologie fluviali classiche di un corso alpino nel suo passaggio dall'alta alla bassa pianura (Figura 3). La morfologia dominante è quella a canale intrecciati (*braided*) che a

valle di Pinzano caratterizza un tratto di lunghezza pari a circa 35 km (Figura 3). Nei pressi di Carbona (comune di San Vito al Tagliamento) circa 11 km a valle della fascia delle risorgive e del margine meridionale dell'alta pianura friulana, il profilo di fondo attuale del fiume mostra una significativa variazione di pendenza (Figura 3); in questo tratto la morfologia vira da un *braided* "puro" a transizionale (*wandering* – Church, 1983, Lenzi et al, 2000). La pendenza dell'intero tratto è compresa in un *range* 0 ÷ 5 ‰ (Figura 3).

[A]



[B]



[C]

Figura 3 - Morfologie presenti nel tratto studio [A] in relazione alle pendenze locali [B] e al profilo di fondo [C] (rilievi 2001-2003)

2.2 Inquadramento geologico

Il bacino montano è costituito da un substrato roccioso prevalentemente sedimentario e metamorfico la cui origine abbraccia un intervallo di circa 450 milioni di anni, dal Paleozoico al Quaternario; a nord della linea virtuale che segue l'alta Val Tagliamento, il Canal del Ferro e la Val Canale, prevalgono sedimenti silicatici, mentre nelle Alpi e Prealpi Giulie e nelle Prealpi Carniche predominano nettamente i substrati carbonatici.

Dal punto di vista litologico il bacino può suddividersi in tre principali macro-fasce ciascuna con sviluppo est-ovest (Monegato e Stefani, 2010), così organizzate da nord a sud:

- settore Ordoviciano – Permiano (460 – 310 Ma): unità paleozoiche sedimentarie e vulcaniche in parte metamorfosate che costituiscono quello che rimane dell'antica catena paleocarnica di orogenesi varisica (o ercinica). Questa catena rappresenta un'emergenza geologica di grande rilevanza a livello italiano e mondiale per la sua ricchezza fossilifera e per la comprensione delle dinamiche orogeniche alpine (Zanferrari, 2006).
- settore Permiano - Triassico medio (310 – 228 Ma). costituito prevalentemente da dolomie e rocce vulcaniche.
- settore Triassico inferiore – Cenozoico (228 - oggi): in questa restante parte del bacino del Tagliamento affiorano rocce la cui storia geologica appartiene solo al ciclo alpino, durante il quale è avvenuta la formazione del reticolo attuale nelle sue linee principali in seguito alla crisi di salinità del Messiniano (5.96 Ma).

Attenzione particolare deve essere dedicata alle forme quaternarie che caratterizzano le porzioni vallive e intravallive prodotte dall'azione glaciale e fluviale durante le ultime glaciazioni. Il Tagliamento presenta, infatti, uno dei più estesi anfiteatri morenici della catena alpina meridionale (estensione di circa 220 km²), eccezionale se relazionato alle modeste altezze dei rilievi presenti e all'estensione del suo bacino, ma spiegabile considerando i regimi pluviometrici odierni ed olocenici (Monegato et al, 2007). L'anfiteatro tilaventino è il risultato di due fasi glaciali principali, tradizionalmente denominate *Riss* e *Würm* (classificazione introdotta da Penck e Brückner, 1909, ormai abbandonata). Le classificazioni più recenti parlano di due distinti sistemi deposizionali glaciali, individuando il Sistema morenico di Spilimbergo più recente (25-16 ka BP) e quello più antico denominato di Plaino (120 ka BP - Monegato, 2006). Il corso attuale del Tagliamento corrisponde ad uno dei quattro principali scaricatori glaciali attivati a valle dell'arco morenico durante l'ultima fase glaciale (LGM, Last Glacial Maximum). L'attività del Tagliamento durante l'LGM ha prodotto una forma deposizionale cosiddetta "*megafan*" con apice a Pinzano e sviluppo planimetrico fino ed oltre al litorale attuale (Fontana et al, 2008). Subito dopo il raggiungimento della massima estensione del ghiacciaio tilaventino tra 18-19 ka BP, questo corpo sedimentario è stato oggetto di un'intensa attività erosiva spiegabile con la scarsità degli apporti solidi proveniente da monte in transito a Pinzano, sedimenti intrappolati all'interno dell'anfiteatro di neo-formazione. Questa incisione ha portato alla creazione dei terrazzi tardo-pleistocenici che ancora oggi si ammirano tra Pinzano e Ravis, con altezze massime di 40 m e degradanti progressivamente verso valle. L'erosione apicale ha prodotto opposte fasi deposizionali nelle parti più vallive del Tagliamento sviluppando una forma di conoide cosiddetta "telescopica" (Fontana et al, 2008).

2.3 Il bacino idrografico

Il bacino imbrifero del fiume Tagliamento ha un'estensione totale di circa 2,870 km² (Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 1998), dalla tipica forma ad imbuto, con un reticolo idrografico di sviluppo dendritico a ventaglio strutturato a partire dalle aste del Tagliamento (Figura 4). L'estensione del bacino montano chiuso a Pinzano risulta pari a circa 2,350 km² come sinteticamente riportato nella seguente Tabella 1. L'unico sottobacino a carattere montano, ma che confluisce a valle di Pinzano è quello del Torrente Cosa (Tabella 1, Figura 2).

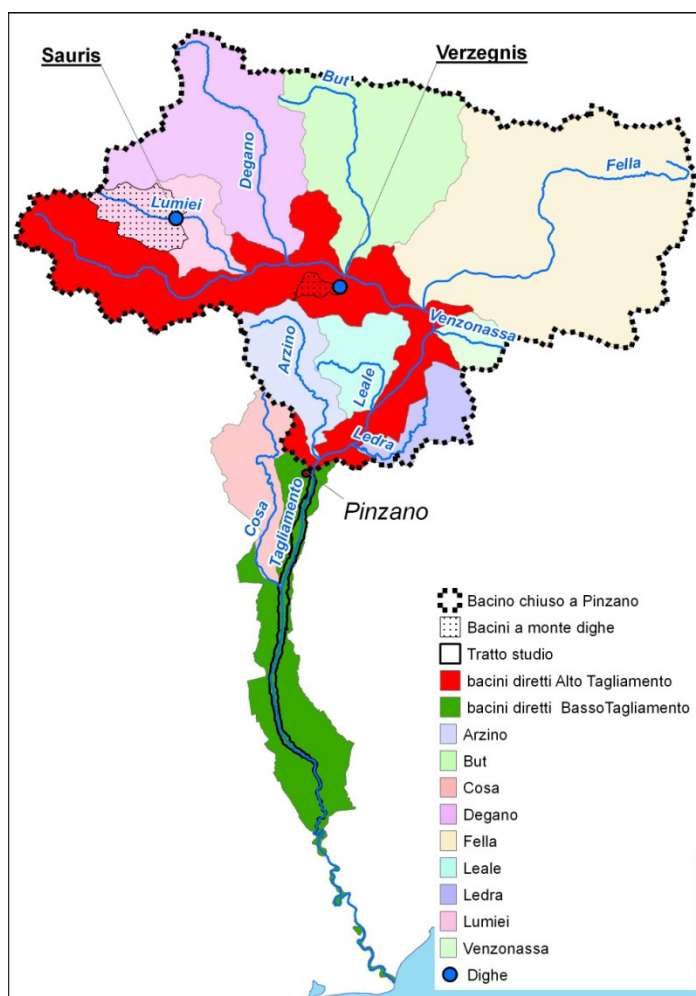


Figura 4 – Corografia dei principali affluenti del fiume Tagliamento con i rispettivi bacini afferenti

Nome affluente	Lunghezza [km]	Estensione sottobacino afferente [km ²]
Arzino	28.3	118.7
But	35.0	325.5
Cosa	31.9	111.8
Degano	37.8	325.6
Fella	53.1	710.6
Leale	16.0	88.9
Lumiei	24.1	125.7
Venzonassa	9.8	38.8
Tagliamento a monte di Pinzano [*]	83.5	504.1
Tagliamento a valle di Pinzano [*]	94.5	250.8

[*] aree di afflusso diretto o attraverso corsi minori con sottobacini afferenti di 2° ordine con estensione < 35km²

Tabella 1 - Caratteristiche dei principali sottobacini del bacino del Tagliamento (bacini di 2° ordine con estensione superiore a 35 km²)

Dal 1948 è stata avviata la realizzazione di un sistema di produzione di energia idroelettrica a scala di bacino gestito attualmente da Edipower, comprendente 14 impianti di produzione (Paronuzzi, 2006) e 2 invasi con volume significativo, quello di Sauris e di Verzegnis (Figura 4). Complessivamente la quota parte del bacino sottesa a questi invasi artificiali corrisponde a circa 69.7 Km², pari a circa il 2.9% dell'intero bacino chiuso a monte di Pinzano (Tabella 2).

Nome dell'invaso	Nome corso d'acqua sbarrato	Volume [Mm ³]	Estensione bacino a monte [km ²]
Sauris	Lumiei	72.5	60.5
Verzegnis	Ambiesta	3.5	9.2
		Totale	69.7

Tabella 2 - Riepilogo delle caratteristiche degli sbarramenti artificiali presenti nel bacino del Tagliamento

2.4 Regime idrologico

Il bacino del Tagliamento rappresenta una delle regioni più piovose d'Italia, con un valore medio stimato pari a circa 2,150 mm/anno associato ad una forte variabilità intra-regionale condizionata da fattori orografici che inducono massimi cumulati nella fascia prealpina (monti Musi) con valori compresi tra 2,500 e 3,100 (punte di 3,600 mm/anno sono state raggiunte nel trentennio 1961 – 1990) e minimi nelle zone pianeggianti e costiere con piovosità prossima a quella media nazionale (1,000 mm/anno - Paronuzzi, 2006). Il regime pluviometrico sulla maggior parte del bacino è tipicamente alpino con due picchi stagionali corrispondenti alle stagioni autunnale (massimo principale di ottobre-novembre) e primaverile (massimo secondario maggio-giugno).

Il regime dei deflussi rispecchia l'andamento stagionale delle piogge con una distribuzione degli eventi di piena più significativi in autunno e in tarda primavera, periodo questo in cui ai deflussi contribuisce anche lo scioglimento nivale. Le differenze tra i deflussi di magra e quelli di massima possono raggiungere anche due ordini di grandezza, passando da valori di 10-40 m³/s a picchi che superano i 3,000 – 4,000 m³/s (Maione e Machne, 1982). Alla stazione idrometrica di Pioverno, nel periodo 1932 – 1973 è stato valutato un valore medio di portata pari a circa 81 m³/s, un minimo storico di 15 m³/s e un massimo stimato per l'evento del novembre 1966 pari a 4,050 m³/s (Surian et al, 2009a).

3 Materiali e Metodi

L'analisi morfologica di un alveo fluviale e delle sue variazioni richiede l'adozione di tecniche che coprono un ventaglio disciplinare molto ampio e variegato. Esse possono essere organizzate in tre categorie principali:

- analisi con tecniche GIS (*Geographics Informations Systems* - 3.1);
- rilievi topografici degli alvei fluviali (3.2);
- analisi granulometrica per la caratterizzazione sedimentologica;
- rilievo geomorfologico di campo (3.3).

Obiettivo comune a tutti questi metodi di indagine è la parametrizzazione di determinate caratteristiche morfologiche rappresentative del corso d'acqua e la valutazione delle loro eventuali variazioni spazio-temporali.

3.1 Analisi GIS

Negli ultimi 20 anni la geomorfologia fluviale ha vissuto un significativo sviluppo anche grazie alla diffusione di nuovi strumenti informatici per la gestione numerica di dati cartografici e immagini telerilevate. Questi *software* hanno accresciuto enormemente la capacità di produzione di dati quali/quantitativi e con essi la possibilità di analisi spazio-temporali con le più svariate finalità (analisi statistiche, analisi dei processi fluviali, modellazione, ecc). Le tecniche GIS garantiscono la possibilità di manipolare, visualizzare e analizzare reciprocamente in modo reiterato ed agevole dati provenienti da svariate fonti, soprattutto documenti cartografici e immagini aeree/satellitari (Gilvear e Bryant, 2003) mantenendo minima l'influenza dell'operatore sul dato finale. L'uso dei GIS ha rivoluzionato la velocità e le modalità con cui i dati morfometrici possono essere raccolti, permettendo di ottenere informazioni più dettagliate di quanto non fosse stato possibile in passato (Gurnell et al, 2003).

I primi lavori in ambito fluviale riguardanti proprio l'applicazione di *software* GIS risalgono alla prima metà degli anni '90 (Downward et al, 1994; Gurnell et al, 1994; Marston et al, 1995; Gurnell, 1997). A seguire l'applicazione di *software* GIS è divenuta una pratica sostanzialmente implicita in numerosissimi lavori di ricerca, in modo particolare negli studi di valutazione delle variazioni morfologiche (Winterbottom e Gilvear, 2000; Winterbottom, 2000; Liebault e Piegay, 2001; Kondolf et al, 2002; Wasklewicz et al, 2004; Surian et al, 2009d).

La potenza dei GIS quali strumenti per l'integrazione, la manipolazione e la visualizzazione dei dati non hanno distolto l'attenzione dagli errori intrinseci nel dato importato ed elaborato e dalla propagazione e amplificazione degli errori stessi. Negli ultimi anni diversi autori si sono dedicati alla stima dell'incertezza posizionale associabile al dato geografico numerico, seguendo la convinzione diffusa che non basta "produrre" il dato, ma è egualmente rilevante associare ad esso una stima della sua attendibilità e un'indicazione delle principali fonti di errore. In alcuni lavori la stima dell'errore è stata di tipo empirico ma senza analisi sistematiche e *test* estesi (Liebault e Piegay, 2001; Kondolf et al, 2002; Rinaldi, 2003; Surian et al, 2009d; Surian, 1999; Surian et al, 2008), in altri il risultato di veri e propri *test* (Gurnell et al, 1994; Gurnell, 1997; Winterbottom, 2000). Altre esperienze invece hanno riguardato in modo specifico il legame tra qualità del dato e singole fonti di errore in particolare l'errore di georeferenziazione delle foto aeree (Hughes et al, 2006). Infine alcuni studi hanno inquadrato il problema in termini analitici cercando relazioni con valenza più generale tra entità dell'errore e fonte (Mount et al, 2003; Mount e Louis, 2005).

3.1.1 Foto aeree e cartografia utilizzate

Un quadro sintetico dei documenti utilizzati per l'analisi GIS è riportato nella seguente Tabella 3. Si tratta complessivamente di 320 foto aeree (scala variabile tra 1:34,000 [1993] – 1:12,000 [1966], in bianco e nero [1954-1993], e a colori [1997-2009]) e 32 elementi cartografici (scala variabile tra 1:86,400 [1833] – 1:5,000 [1986-88]).

Grande parte dei dati sono stati reperiti, georeferenziati e vettorializzati dallo scrivente in periodi precedenti all'attività di dottorato. Tuttavia la totalità delle elaborazioni dei dati GIS (affiancata al reperimento del materiale più recente - anno 2009) è stata effettuata contestualmente all'attività di ricerca. Per il dettaglio si rimanda alla seguente Tabella 3.

Caratteristiche					Elementi digitalizzati					
Anno	tipo foto / cartografie	quantità elementi georeferiti	scala	risoluzione [dpi]	[m/pixel]	Lunghezza del tratto coperto [km]	alveo - isole	difese - argini	cave	aree bagnate
1805	c.storica	7	28,800	350		48	x	x		
1833	c.storica	3	86,400	450		49	x	x		
1891	c.IGM	8	25,000	400		49	x	x		
1927	c.IGM	3	25,000	400		46	x	x		
1954	Aeree	10	29,545	300	2.50	49	x	x	x	
1966	Aeree	24	12,273	800	0.40	24	x	x	x	
1970	Aeree	46	13,636	800	0.41	49	x	x	x	
1981	Aeree	7	19,455	800	0.65	24	x	x	x	
1983	Aeree	3	18,045	800	0.55	9	x	x	x	
1986	Aeree	9	19,545	1,200	0.42	21	x	x	x	
1986	CTR	6	5,000	400		21				
1988	Aeree	9	17,500	1,200	0.35	18	x	x	x	
1988	CTR	5	5,000	400		18	x	x		
1993	Aeree	8	34,480	1,200	0.80	49	x	x	x	
1997	Aeree	19	26,739	800	0.70	49	x	x	x	
1999	Aeree	4	20,080	235	0.85	9	x	x	x	
2001	Ortofoto	80			0.50	49	x	x	x	x
2002	Aeree	10	18,000	400	0.78	8	x	x		x
2003	Ortofoto	19			0.50	49				
2006	Aeree	19	18,444	600	0.85	29	x	x		
2007	Aeree	35	18,084	600	0.86	49	x	x		
2009	Aeree	18	17,489	1,800	0.29	49	x	x	x	X
Totale		352								
<i>In giallo gli elementi georeferenziati e digitalizzati contestualmente al lavoro di tesi</i>										

Tabella 3 - Riepilogo dei documenti cartografici e foto aeree utilizzati

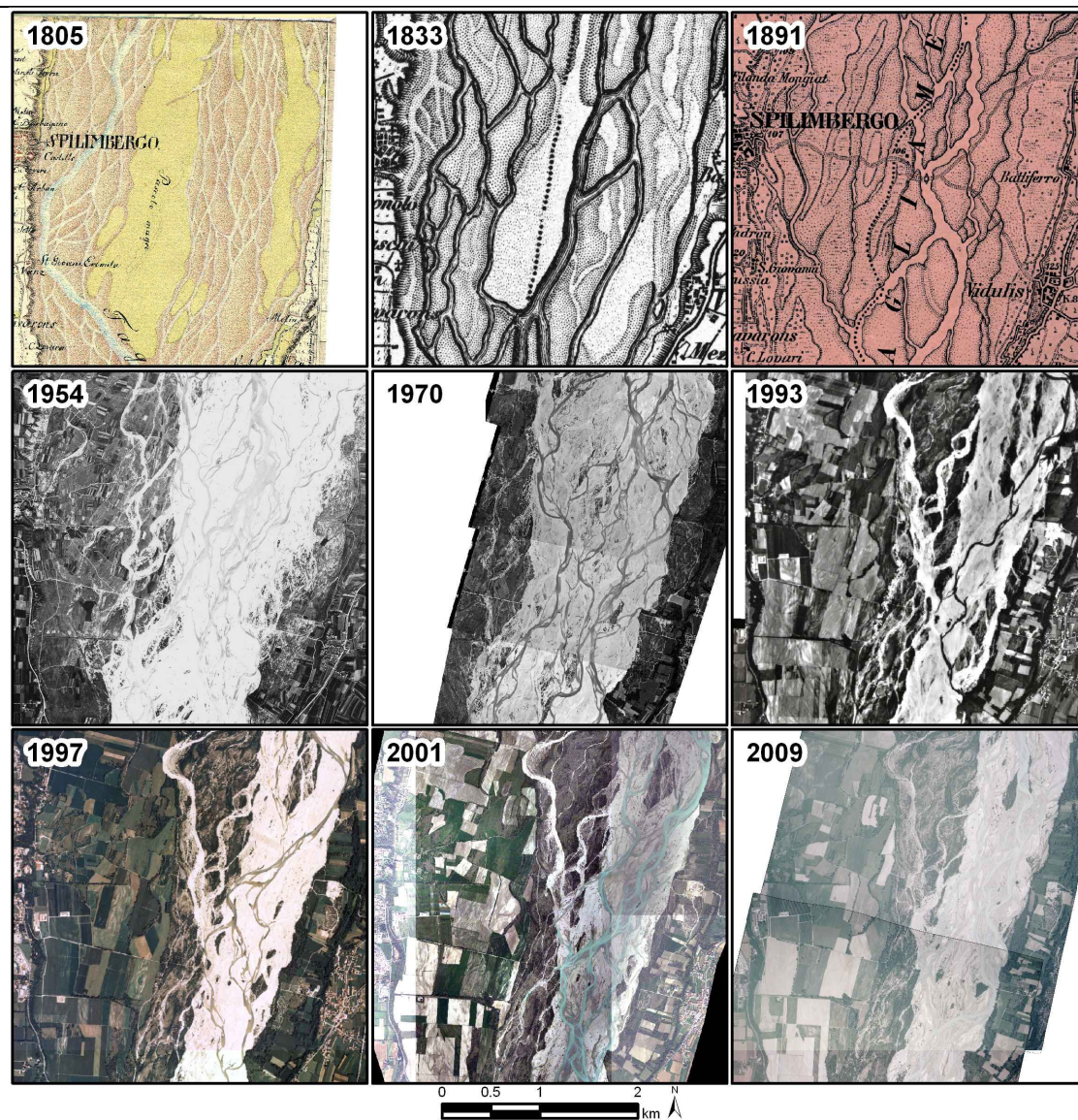


Figura 5 - Tipologia di documenti utilizzati

3.1.2 Dati prodotti

Per tutte le annate disponibili (fatta eccezione per il 2003) sono state digitalizzate le seguenti informazioni:

- margini dell'alveo (secondo la definizione riportata in Surian et al, 2009b). Utilizzando documenti planimetrici non è stato possibile individuare esattamente i limiti del cosiddetto limite di *bankfull* (alveo a rive piene). Il limite tracciato può comunque considerarsi coincidente in prima approssimazione con il *barfull stage* che probabilmente in alvei con morfologie e dimensioni come quelle del Tagliamento corrisponde alla larghezza prodotta dalla portata formativa del fiume (Thorne et al, 1993; Surian, 1999). Nei casi dubbiosi si è ritenuto ammissibile procedere nella digitalizzazione lasciando che fosse l'interpretazione dello scrivente a discriminare l'appartenenza o meno di porzioni fluviali all'alveo stesso. Nel caso specifico, l'interpretazione si è basata implicitamente sull'assegnazione soggettiva del grado di attività delle superfici definito considerando principalmente il grado ed il tipo di copertura vegetale interpretabile da foto o cartografia (come pure in Gurnell et al, 1994; Gurnell, 1997; Winterbottom, 2000). Causa le limitate differenze di quota tra le varie superfici morfologiche, in fase di digitalizzazione non si è ritenuto di supportare la digitalizzazione con una visualizzazione in stereoscopia dell'alveo.
- margini delle isole fluviali. Nota l'importanza della dinamica delle isole nella guida delle variazioni morfologiche (Zanoni et al, 2008, Comiti et al, 2011), è stata necessaria la digitalizzazione non solo dei margini più esterni degli alvei, ma anche dei margini delle isole fluviali. Le unità digitalizzate non sono però state classificate secondo la denominazione proposta in studi condotti proprio sul Tagliamento da Gurnell e Petts (2006 - isole pioniere, *building island*, *complex island*, *floodplain dissection island*). Nella restante parte del testo si parlerà di alveo o alveo attivo, a seconda che nel valore della larghezza sia ricompresa o meno la larghezza delle isole.
- aree di estrazione di sedimenti in alveo o nei terrazzi fluviali (4.4.1).
- difese spondali laterali, pennelli fluviali ed argini (4.4.2).
- per le tutte le annate sono stati ricavati i valori dell'indice di intrecciamento (*Braided Index* - BI) calcolato come valore medio del numero di canali attivi con acqua conteggiati in corrispondenza di tutte le sezioni topografiche definite al capitolo 3.2.1 (Ashmore 1991, 1991a; Bridge, 1993; Thorne, 1997; Egozi e Ashmore, 2008).

L'intero tratto è stato suddiviso in sottotratti di lunghezza pari a circa 1 km, numerati in modo progressivo da monte verso valle (1 – 49). L'individuazione dei sottotratti è stata fatta attraverso una procedura automatica utilizzando in modo combinato i *software* ArcGIS 9.0 e Idrisi 15 che ha annullato la soggettività di tracciamento degli assi fluviali e di troncamento dei tratti. Il calcolo della larghezza è stato effettuato a scala di tratto come valore di larghezza media per tratto (area / lunghezza asse - Surian et al, 2008). Solo per la misura delle variazioni nel breve termine si è proceduto anche nella misura della larghezza in corrispondenza di sezioni trasversali tracciate a passo di 25 m (sottocapitolo.4.3.1), in linea con la maggior parte dei lavori di letteratura (Gurnell et al, 1994; Gurnell, 1997; Winterbottom, 2000; Liebault e Piegay, 2001; Rinaldi, 2003).

3.1.3 Stima dell'errore associato alle misure GIS

Associati ai dati prodotti con *software* GIS esistono inevitabilmente errori di posizione che possono essere ricondotti a tre principali classi:

- e_g - *residual distortion error* (Mount et al, 2003), dovuto al procedimento di georeferenziazione – errore di tipo sistematico (vedi anche 3.2.3);

- e_d - *ground feature identification error* (Mount et al, 2003), dovuto al riconoscimento del margine dell'alveo. Errore a componente prevalente casuale quindi definibile come accidentale (vedi anche 3.2.3);
- e_c - dovuto al metodo di calcolo della larghezza (errore di tipo sistematico – vedi anche 3.2.3).

Internamente a queste macro-classi si possono riconoscere specifiche variabili dipendenti e indipendenti che influenzano direttamente o indirettamente la precisione e l'accuratezza associate alla valutazione della larghezza di un alveo fluviale. Una breve sintesi dei principali fattori è riportata nella seguente Tabella 4.

FORTE	Cod.	Descrizione della variabile	Tipo variabile	Variabili indipendenti associate
ERRORE DI GEOFERENZIAZIONE	e_{g1}	Quota di volo	I	
	e_{g2}	Tipo di macchina da presa	I	
	e_{g3}	Risoluzione di scansione del fotogramma	I	
	e_{g4}	Precisione del documento usato per la georeferenziazione	I	
	e_{g5}	Tipo di trasformazione di georeferenziazione	I	
	e_{g6}	Uso del suolo e orografia nelle fasce perfluviali (aree di collocazione di Ground Control Point per la georeferenziazione)	I	
	e_{g7}	Omogeneità e numerosità dei ground control point	D	e_{g5}
	e_{g8}	Scala fotogramma	D	e_{g1} , e_{g2}
ERRORE DI IDENTIFICAZIONE PLANIMETRICA DEL MARGINE FLUVIALE	e_{d8}	Scala fotogramma	D	e_{g1} , e_{g2}
	e_{d1}	Altezza spondale	I	
	e_{d2}	Pendenza spondale	I	
	e_{d3}	Copertura vegetazionale spondale	I	
	e_{d4}	Periodo di volo	I	
	e_{d5}	Esperienza dell'operatore nella fotointerpretazione	I	
	e_{d6}	Scala di visualizzazione in fase di digitalizzazione	I	
	e_{d7}	Densità dei punti a composizione dei margini (<i>streaming</i>)	I	
e_{d8}	Precisione planimetrica del margine utilizzato come riferimento per la stima dell'errore	I		
PROCEDURA DI CALCOLO DELLA LARGHEZZA PER SEZIONI FISSE	e_{c1}	Errore di posizione planimetrica dei capisaldi di identificazione delle sezioni	I	
PROCEDURA DI CALCOLO DELLA LARGHEZZA EQUIVALENTE (Area / Lunghezza tratto)	e_{c2}	Tecniche di identificazione dell'asse geometrico dell'alveo	I	
	e_{c3}	Tipo di <i>software</i> GIS utilizzato	I	
D: variabile DIPENDENTE; I: variabile INDIPENDENTE				

Tabella 4 - Riepilogo dei fattori che determinano l'entità dell'errore associato alla valutazione planimetrica della larghezza di un alveo

La complessità del problema non ha permesso di intraprendere *test* estensivi realizzati ad hoc per una stima dell'errore associato ai valori estratti in questo lavoro di ricerca; in alternativa si è ritenuto di prendere come riferimento alcune delle valutazioni e dei risultati riportati in letteratura (Tabella 5).

Riferimento bibliografico	Sintesi dei risultati
Hughes et al, 2006	$e_g : 4 \pm 1$ m
Mount e Louis, 2005	$\pm 5,5 - 10,5$ m
Mount et al, 2003	singola foto $\pm 5,4$ m; per confronto tra foto ± 6.1
Kondolf et al, 2002	$\pm 4 - 7$ m
Liebault e Piegay, 2001	± 10 m
Winterbottom, 2000	$e_g : \pm 3$ m - $e_d : \pm 2$ m
Gurnell et al, 1994; Gurnell, 1997	$e_g : \pm 5,5$ m - $e_d : \pm 2$ m

Tabella 5 – Revisione bibliografica relativa alla stima dell'errore di valutazione GIS della larghezza di un alveo fluviale

Tutti documenti sono stati georeferenziati utilizzando come riferimento le Carte Tecniche Regionali a scala 1:5,000 delle Regioni Friuli Venezia Giulia e Veneto, disponibili in formato vettoriale. Per ogni foto aerea è stata utilizzata una trasformazione polinomiale di secondo grado e GCP (*Ground Control Point*) in numero variabile tra 20 ÷ 30 (secondo l'abbondanza locale di punti di appoggio a terra), ottenendo valori di RSME (*Root Square Mean Error*) compreso tra 2 ÷ 4 m. Per i documenti cartografici (1805, 1833, 1891) invece il numero del GCP è stato necessariamente inferiore e in taluni casi la trasformazione adottata è stata di primo ordine per evitare locali forti deformazioni del documento causa la scarsità di punti.

In definitiva, facendo riferimento in particolare alle stime del valore di e_g indicate da Hughes et al (2006) associate ai valori di RSME ottenuti, ai *test* effettuati da Gurnell et al. (1994), e Winterbottom (2000) che riportano valori prossimi di ± 2 m per l'errore di digitalizzazione ed ad alcuni riscontri in campo attraverso l'uso di GPS si sono assunti i seguenti valori di errore totale associabili a singole misure di larghezza dell'alveo.

anno	tipo foto / documento cartografico	scala	risoluzione [dpi]	tipo	Errore totale singola misura di larghezza [m]
1805	c. storica	28,800	350	Colori	± 20
1833	c. storica	85,000	450	B/N	± 25
1891	c. IGM	25,000	400	B/N	± 20
1927	c. IGM	25,000	400	B/N	± 20
1954	aeree	29,545	300	B/N	± 10
1966	aeree	12,273	800	B/N	± 5
1970	aeree	13,636	800	B/N	± 6
1981	aeree	19,455	800	B/N	± 6
1983	aeree	18,045	800	B/N	± 6
1986	aeree	19,545	1200	B/N	± 6
1988	aeree	17,500	1200	B/N	± 6
1993	aeree	34,480	1200	B/N	± 8
1997	aeree	26,739	800	Colori	± 6
1999	aeree	20,080	235	Colori	± 6
2001	ortofoto			Colori	± 5
2002	aeree	18,000	400	Colori	± 5
2006	aeree	18,444	600	Colori	± 5
2007	aeree	18,084	600	Colori	± 5
2009	aeree	17,489	1800	Colori	± 5

Tabella 6 - Errori di misura della larghezza dell'alveo associati ai documenti cartografici e alle foto aeree utilizzati

Assumendo le misure di larghezza in ogni elemento indipendenti l'una dall'altra e quindi considerando aleatorio l'errore intrinseco nella misura effettuata in un elemento rispetto a quella ricavata da un altro, il calcolo dell'errore associato alla variazione di larghezza tra due annate deve essere calcolato come somma quadratica degli errori (Mount et al, 2003). Nei risultati quindi le soglie di incertezza per la valutazione delle variazioni di larghezza saranno calcolate per ciascuna coppia di annate messe a confronto, tenendo conto di questa propagazione dell'errore (capitoli 4.1.1, 4.2.1, 4.3.1).

3.2 Rilievi topografici

L'uso di dati prodotti da rilievi topografici permette di produrre due tipologie di dati che sono di particolare interesse in geomorfologia fluviale: sezioni trasversali e profili longitudinali. Sezioni rilevate perpendicolarmente all'asta fluviale forniscono informazioni relativamente alla forma e alla quota media locale dell'alveo, rappresentano una base indispensabile per la misura di indici morfometrici (larghezza, profondità, *thalweg*, asimmetria del canale, ecc.) o idraulici (valore dell'area bagnata di *bankfull*, raggio idraulico, ecc. - Gurnell et al, 2003). Generalmente un rilievo topografico di sezioni trasversali dovrebbe iniziare nella piana inondabile o nel terrazzo inferiore (per alvei non incisi) o comunque nel terrazzo più alto e procedere attraversando piana – sponde – alveo fino a chiudere il rilievo sull'omologa superficie più alta presente sul lato opposto. Un dettaglio sufficiente dovrebbe permettere di identificare chiaramente la topografia delle superfici più antiche, i profili spondali comprensivi di eventuali cedimenti e accumuli al piede, i margini delle aree bagnate, il *thalweg* e ogni altra barra attiva. Annotazioni dovrebbero inoltre essere prese in corrispondenza della transizione tra la vegetazione delle fasce riparie e quella d'alveo (Simon e Castro, 2003).

I profili longitudinali di fondo possono essere ricostruiti utilizzando diversi tipi di dati (*thalweg*, quota media del fondo, quota idrometrica in condizioni di magra, ecc.). Essi permettono di ricavare informazioni riguardo alla pendenza media del corso d'acqua, alle caratteristiche morfologiche del fondo (presenza di *pool*, scalini di fondo, *nickpoint* regressivi, cambi di pendenza, - Simon e Castro, 2003) e le sue variazioni nel tempo (Rinaldi, 2003). Il rilievo di un profilo del *thalweg* dovrebbe idealmente interessare un tratto di lunghezza pari almeno a $6 \div 30$ volte la larghezza media dell'alveo, specialmente se l'intenzione è quella di determinare la pendenza media del canale (Simon e Castro, 2003).

L'uso in geomorfologia fluviale di sezioni topografiche e/o profili longitudinali è stato storicamente molto ampio (Trimble, 1998; Gurnell et al, 2003), soprattutto in studi di valutazione delle variazioni altimetriche degli alvei fluviali (Liebault e Piegay, 2001; Kondolf et al, 2002; Surian e Rinaldi, 2003; ; Surian, 2006; Surian et al, 2008; Surian et al, 2009e), dell'erosione spondale (Lawler, 1993; Rinaldi e Casagli, 1999; Luppi et al, 2009) e dell'analisi del *sediment budget* (Griffiths, 1979; Carson e Griffiths, 1989; Martin e Church, 1995; Ham e Church, 2000; Surian e Cisotto, 2007).

In funzione del grado di dettaglio richiesto dal rilievo, della strumentazione a disposizione e delle condizioni di rilievo in campo, possono essere usate svariate tecniche di rilievo topografico:

- stazione totale,
- livelle ottiche,
- laser terrestre,
- GPS.

Le applicazioni GPS costituiscono ormai una pratica diffusa nell'ambito della geomorfologia fluviale che ha avuto una forte espansione negli ultimi 10 anni, soprattutto per la produzione di rilievi estesivi, di alta precisione e la produzione di DEM (Brasington et al, 2000; Casas et al, 2006; Cheng e Granata, 2007; Wheaton, 2008; Wheaton et al, 2010). A partire dalla prima metà degli anni '90, in cui il sistema GPS è stato messo in servizio, è stata prodotta una serie notevole di specifiche pubblicazioni a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti (Hofmann-Wellenhof et al, 1992-2001; Van Sickle, 1996; Guochang, 2003-2007; Gomarasca, 2004). Contestualmente a questo lavoro di ricerca sono stati effettuati alcuni rilievi proprio utilizzando un sistema GPS, come brevemente descritto al sottocapitolo 3.2.2.

3.2.1 Sezioni topografiche utilizzate

Le valutazioni per le variazioni altimetriche si sono basate sull'elaborazione di svariati rilievi topografici relativi ad una serie di sezioni fluviali storiche. Si tratta complessivamente di 63 sezioni, per un totale di 168 rilievi, suddivisi in 7 campagne di misura (1970 – 1982 – 1988 – 2001 – 2003 – 2006 – 2010; vedi Tabella 8). La distribuzione delle sezioni lungo il tratto è piuttosto uniforme (Figura 6), ma nel tempo i rilievi non sono stati eseguiti in modo estensivo e completo in quanto le campagne di rilievo sono state effettuate da diversi enti e operatori con diverse finalità (Tabella 7). Per questo solo in poche sezioni è disponibile una buona serie temporale di rilievi topografici, fino ad un massimo di 4-5 valori (Tabella 8).

Anno	Ente attuatore	Rilevatori	Strumenti di rilievo	Totale sezioni rilevate
1970	Magistrato alle Acque Venezia	n.d.	livella ottica	29
1982	Magistrato alle Acque Venezia	Studio Barigazzi, Parma	livella ottica	56
1988	Magistrato alle Acque Venezia	n.d.	livella ottica	27
2001	Autorità di Bacino dei fiumi dell'Alto Adriatico	GeoTop S.a.S. di Borghetto L.&C. - Treviso	stazione totale	13
2003	Autorità di Bacino dei fiumi dell'Alto Adriatico	n.d.	GPS	30
2006	Università di Trieste	Dip. di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine – Pisani, Zacchigna	stazione totale	10
2010	Università di Padova	Dip. Geografia - Ziliani, Golfieri	GPS Leica Viva	3

Tabella 7 - Riepilogo delle campagne di rilievo topografico effettuate sul tratto studio

Num. sezione	1970	1982	1988	2001	2003	2006	2010
Pinzano 170		x	x	x			
169BIS		x	x	x			
169		x	x	x		x	
168		x	x	x			
166		x	x	x			
165			x	x			
164		x					
162		x	x	x			
Gaio 160		x	x	x		x	
Baseglia 158		x	x	x			X
156		x	x	x			
Spilimbergo 154		x	x	x			X
152		x	x	x			
Dignano 150		x	x	x			
149		x					
148		x			x		
Gradisca 146		x			x		
145		x					
144		x			x		
143BIS		x					
S. Odorico 143		x			x		
142		x			x		X
141		x			x		
140a						x	
139	x	x	x		x		
137	x	x	x		x		
136BIS		x					
136	x	x			x		
Ponte Delizia 134	x	x	x		x		
132		x			x		
131		x			x		
130	x		x			x	
S. Vidotto 129		x			x		
128					x		
127		x			x		
126	x	x	x		x	x	
Carbona 124	x	x	x		x		
122	x	x			x	x	
121	x	x	x				
S. Paolo 120					x		
119	x	x				x	
118	x	x	x		x		
Madrisio 116	x	x			x		
115	x	x	x				
114	x	x			x	x	
ussons 112		x	x		x		
110	x	x	x		x		
108	x	x					
107	x	x	x				
Fraforeano 106					x	x	
105	x	x					
104	x	x	x		x		
102	x	x					
100	x	x					
99	x	x	x				
Ronchis 98	x	x			x		
97	x	x					
96						x	
95	x	x			x		
94	x	x					
93	x	x					
92	x	x					
90	x	x			x		
Totali	29	56	27	13	30	10	3

Tabella 8 - Sezioni storiche topografiche utilizzate

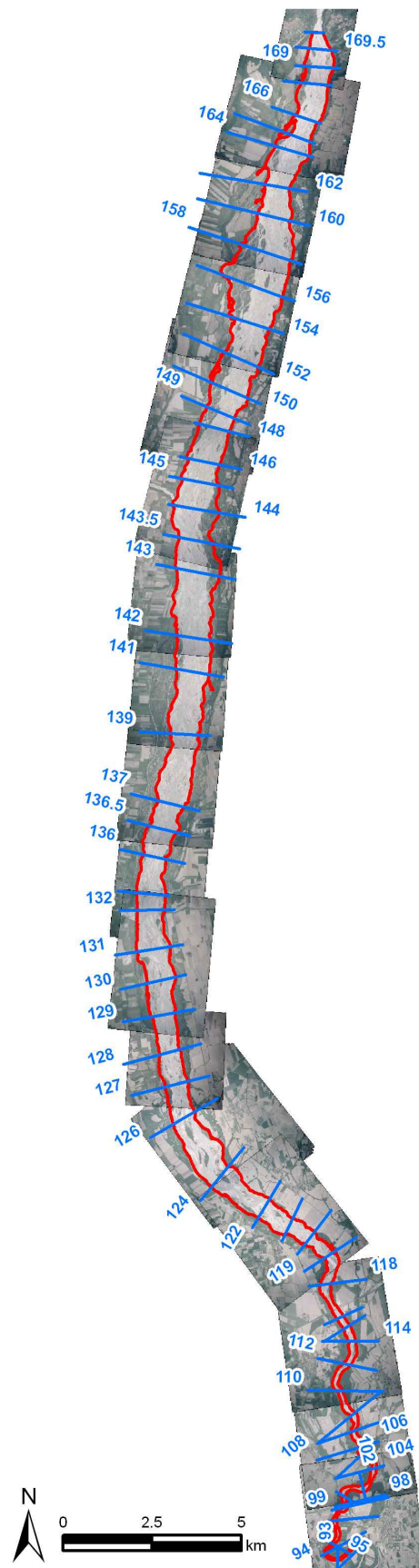


Figura 6 - Collocazione delle sezioni storiche

3.2.2 Rilievi topografici effettuati

I rilievi topografici effettuati contestualmente a questo lavoro di ricerca hanno riguardato tre sezioni storiche del Tagliamento (142, 154 e 158 - Figura 7) che ricadono nella parte più a monte del tratto studio, in tratti con morfologia *braided* e larghezza tra le maggiori attualmente presenti (Figura 8). La scelta è stata condizionata innanzitutto dall'intenzione di effettuare durante la stessa uscita di campo rilievi topografici e geomorfologici (per motivi di economicità); da qui è discesa la necessità di effettuare rilievi geomorfologici anche in questa parte del tratto rimasta esclusa dalla campagna di rilievi geomorfologici effettuata nel 2007 (Tabella 13, Figura 9).

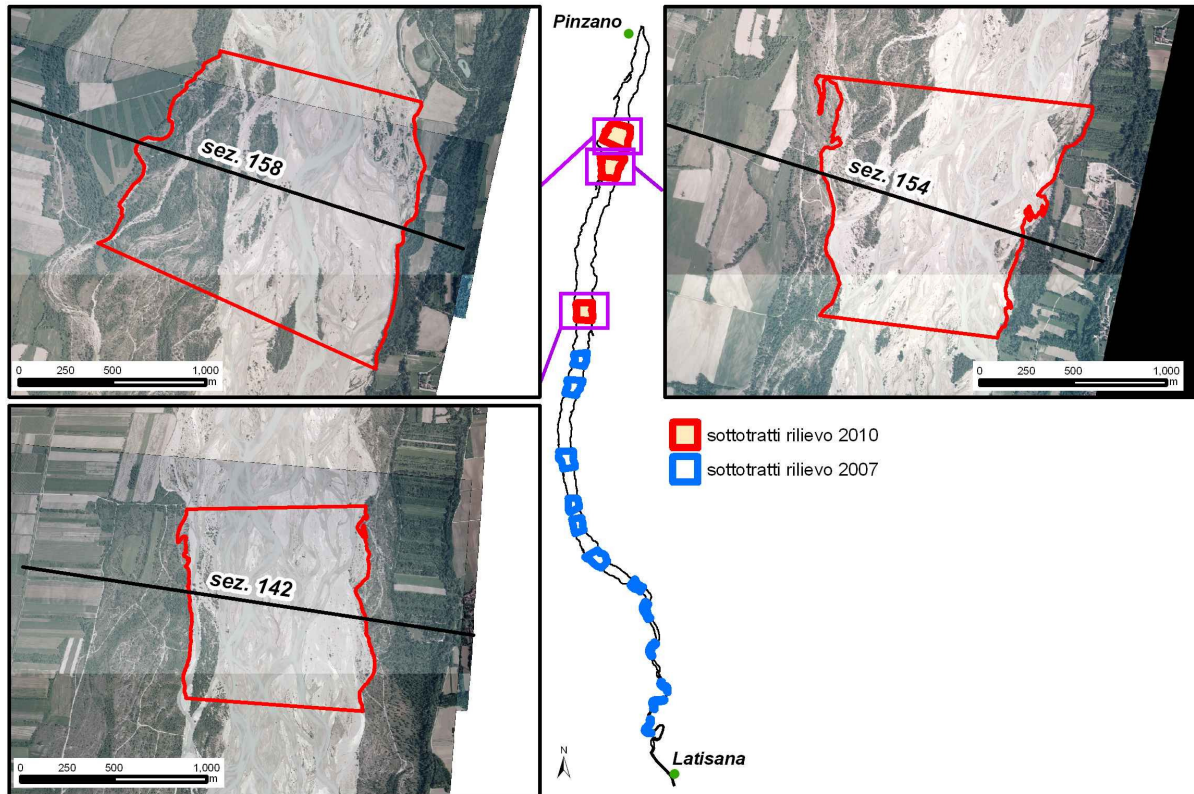


Figura 7 - Sottotratti oggetto dei rilievi topografici e geomorfologici 2010

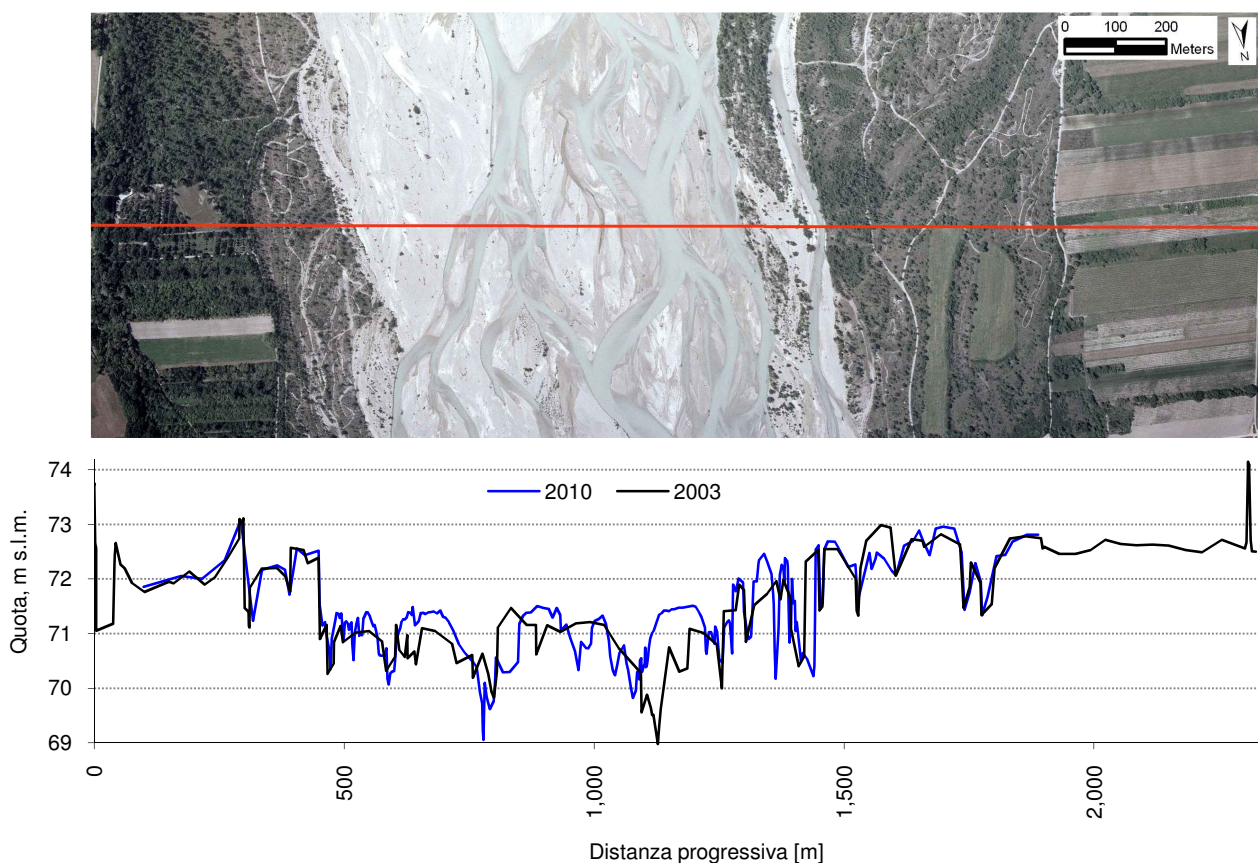


Figura 8 - Confronto tra rilievi topografici 2003-2010 in corrispondenza della sezione “142-Turrida”

I rilievi sono stati eseguiti utilizzando un GPS differenziale Leica Viva in modalità RTK, producendo rilievi con densità ed incertezza come riportati nella seguente Tabella 9.

Sezione	Totale punti battuti	Stima incertezza altimetrica media [cm]	Larghezza alveo [m]	Distanza media tra punti [m]
142	229	2.9	987	4.31
154	590	1.5	1,180	2.00
158	351	2.0	1,524	4.34

Tabella 9 - Riepilogo dei rilievi topografici 2010

Per collocare planimetricamente la sezione di rilievo ed agganciare le quote ellissoidiche GPS a quelle ortometriche si sono utilizzati i capisaldi dall’Autorità di Bacino dei fiumi dell’Alto Adriatico (due per ogni sezione, posti agli estremi in destra e sinistra idrografica), materializzati a terra e noti nei valori di coordinate planimetriche (S.d.R. Gauss-Boaga Roma40) e nelle quote ortometriche prodotte da livellazione a terra. Il mantenimento della corretta direzione di rilievo lungo la congiungente i capisaldi di ogni sezione è stato possibile grazie ad un applicativo *software* installato sul *controller* del GPS Leica (modello CS15), che durante il rilievo in tempo reale indica all’operatore la sua distanza ortogonale dall’asse della sezione. La scelta di effettuare rilievi in modalità differenziale utilizzando due antenne (base-rover distanza reciproca massima pari a 3 km) senza appoggiarsi alle reti di stazioni permanenti GPS esistenti (rete dell’Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale di Trieste e della Regione Friuli Venezia Giulia) è stata

indotta dalla locale instabilità e debolezza del segnale telefonico necessario per la trasmissione delle correzioni dalla rete fissa.

3.2.3 Stima dell'errore associato alle misure topografiche di sezioni trasversali

In topografia si parla normalmente di tre principali categorie di errori:

- grossolani (dovuti a sviste dell'operatore – la misura differisce dal valore medio più di tre volte lo scarto quadratico medio);
- sistematici (errori dovuti all'impiego dello strumento che alterano la misura con un errore a segno costante, normalmente eliminabile);
- accidentali (errori casuali indipendenti dovuti all'operatore, allo strumento, all'ambiente; errori inevitabili alla base della teoria degli errori).

Al pari delle misure di larghezza da GIS (3.1.3), anche per le misure topografiche esiste una vasta gamma di fattori che possono indurre errori, grossolani, sistematici, ma soprattutto accidentali:

- errori generati dagli operatori che eseguono il rilievo, sia attraverso l'interpretazione della forma della sezione e quindi della scelta dei punti di rilievo, sia attraverso la precisione con cui sono in grado di ricollocare e rilevare la stessa sezione a distanza di tempo. In proposito risulta di fondamentale importanza la monumentazione di capisaldi che materializzino a terra la sezione (Simon e Castro, 2003).
- posizionamento a terra dello strumento dovuto alla granulometria del sedimento sciolto e alla non perfetta verticalità dello stesso (Wheaton, 2008; Wheaton et al, 2010).
- disturbo della copertura vegetale o della presenza di battenti idrici eccessivi.
- intrinseca imprecisione nello strumento topografico utilizzato (messa in stazione, distorsione ottica, scarsa qualità del segnale GPS, ecc.).
- scarsità di dettaglio nel rilievo (quantità di punti rilevati per ogni profilo trasversale). La densità di punti battuti è significativamente inferiore nei rilievi più vecchi (1970, 1982, 1988), ma confrontabile in quelli recenti (2001, 2003, 2006, 2010).

Anche per l'errore associabile ai rilievi topografici risulta estremamente difficoltosa una quantificazione specifica degli errori plano-altimetrici assoluti o, nel caso di comparazione di rilievi, della loro propagazione. A questo si affianca d'indisponibilità di stime dell'incertezza associata ai rilievi non effettuati direttamente durante l'attività di tesi (la maggior parte) per i quali non sono stati reperiti capitolati di misura o verifiche della bontà del dato.

Si è ritenuto di semplificare il problema facendo le seguenti assunzioni:

- valore medio della quota del fondo assunto come unico parametro di interesse per la stima dell'incertezza di tutto il rilievo;
- valore di incertezza assunto uguale per tutte le sezioni rilevate in ogni campagna di misura;
- assenza di errori grossolani e sistematici;
- stima di massima dell'incertezza di ogni campagna elaborata considerando solo la tipologia di strumentazione topografica e la densità di punti rilevati.

In definitiva si sono assegnati i valori di incertezza (inteso come *range* all'interno del quale si può ritenere che ricada il 95% delle misure ovvero all'interno del quale ricade la misura affetta da errore) inseriti nella seguente Tabella 10.

Anno campagna rilievi	Stima incertezza altimetrica media [cm]
1970	± 7
1982	± 7
1988	± 10
2001	± 3
2003	± 5
2006	± 3
2010	± 5

Tabella 10 - Stima dell'errore altimetrico associato alle quote medie delle sezioni topografiche storiche utilizzate

Per il confronto altimetrico tra due sezioni si è assunta anche indipendenza tra i valori ottenuti per ogni singola sezione e quindi per il calcolo della propagazione dell'errore si è proceduto nella somma quadratica dei valori di incertezza come da teoria degli errori e svariata letteratura (Brasington et al, 2000; Brasington et al, 2003; Lane et al, 2003).

3.3 Rilievi geomorfologici

A partire dalla seconda metà degli anni '90 svariati autori, primi fra tutti quelli di scuola inglese e americana (Simon e Downs, 1995; Thorne, 1998), hanno sviluppato procedure e schemi pratici che costituissero un riferimento per il rilevamento geomorfologico fluviale di campo. Da allora sono state sviluppate e diffuse varie metodologie di rilievo, ciascuna caratterizzata da specifiche:

- (1) finalità (progettazione di interventi di riqualificazione, classificazione morfologica, censimento di habitat fluviali, ecc.);
- (2) contesti di applicabilità;
- (3) scala spaziale di indagine (sito, tratto, reticolo);
- (4) finestra temporale di valutazione delle variazioni morfologiche (stato attuale e/o variazione passata);
- (5) *focus* principali di indagine (dinamica dei sedimenti, forme e/o processi geomorfologici, processi spondali);
- (6) livello di approfondimento richiesto per l'indagine;
- (7) tecniche di supporto richieste (uso di *software* GIS, rilievi topografici, ecc.).

Tutti i metodi mantengono una caratteristica comune, quella di prevedere *“la raccolta di informazioni morfologiche, in genere attraverso l'uso di schede da compilare durante il sopralluogo sul terreno, che riportino in maniera sistematica ed organizzata le osservazioni e le misure quantitative da effettuare”* (Rinaldi, 2008; Rinaldi et al, 2011a).

Un aspetto particolare che riguarda solo alcune delle metodologie esistenti è l'aderenza alle linee di valutazione dello stato morfologico fluviale presentate nella Direttiva Quadro Europea “Acque” (Water Framework Directive o WFD 2000/60) ovvero il primo ed unico riferimento normativo europeo ed italiano che affronta il problema della definizione dello stato idromorfologico di un corso d'acqua.

Riprendendo il manuale di Rinaldi et al, 2011a, nella seguente Tabella 11 si è cercato di ricostituire un quadro estremamente sintetico delle principali metodologie note in letteratura (per approfondimenti vedere anche *“Water Framework Directive: A desk study to determine a methodology for the monitoring of the “morphological conditions” of Irish Rivers (2002-W-DS/9). Final Report. Prepared for the Environmental Protection Agency by Central Fisheries Board and Compass Informatics”*).

	Rilievo habitat fluviali	Descrizione morfologica attuale	Analisi dei processi fluviali	Analisi delle variazioni passate	Uso di tecniche GIS, dati da telerilevamento	Scala spaziale di applicabilità	Livello di approfondimento	Metodo secondo la WFD 2000/60	Nazione	Riferimento bibliografico
Stream Habitat Survey (SHS)	x	x				Sito			Germania	LAWA, 2000
National Physical Habitat Index	x	x				Sito			Danimarca	NERI, (National, Environmental, Research, Institute), 1999
River Habitat Survey (RHS)	x	x				Sito				Raven et al, 1998
Core Assessment of River hAbitat Value and hydro-morpholoGical cOndition (CARAVAGGIO)	x	x				Sito			Italia	Buffagni et al, 2005
Indice di Funzionalità Fluviale (IFF)	x	x				Sito			Italia	Siligardi, 2007
HIDRI – Protocolo para la valoracion de la calidad hidromorfológica de los rios	x	x	Scarsa					x	Spagna	Agència, Catalana, de, l'Aigua, 2006
AusRivAS Physical Habitat Assessment Protocol	x	x	Scarsa	Scarsa				x	Irlanda, Australia	Parsons et al, 2002
Danish Stream Habitat Index	x	x	Scarsa	Scarsa				x	Danimarca, Slovacchia	Pedersen e Baatrup-Pedersen, 2003
Large River Survey	x	x	Scarsa	Scarsa				x	Germania, Slovacchia	Fleischhacker e Kern, 2002
Indice Idro-Geomorfologico (IHG)		x		x	x				Spagna	Ollero et al, 2007
Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau (SYRAH)		x		x	x				Francia	Chandesris et al, 2008; Chandesris et al, 2009; Chandesris et al,
FLEA: Fluvial Ecosystem Assessment		x		x	x	Tratto		Parziale	Italia	CIRF, 2006
Fluvial Audit		x	x	x	x	Tratto			Regno Unito	Sear et al, 2003
Stream Reconnaissance Field Survey		x	x	x	x	Tratto	Alto		Regno Unito	Simon e Downs, 1995; Thorne, 1998
Natural Channel Design RiverMorph WARSSS		x							USA	Rosgen, 1994
River Styles Framework		x	x	x	x	Sistema fluviale	Molto alto		Australia	Brierley e Fryirs, 2005a
Rinaldi, 2007		x	x	x	x	Tratto	Alto		Italia	Rinaldi, 2007; Rinaldi, 2008; Surian et al, 2009b; Surian et al, 2009b
sistema di valutazione IDRomorfologica, Analis e Monitoraggio dei corsi d'acqua – (IIDRAIM)		x	x	x	x	Tratto	Medio	x	Italia	Rinaldi et al, 2011a; Rinaldi et al, 2011b

Tabella 11 - Metodologie di rilievo/valutazione dello stato morfologico (modificato da Rinaldi et al, 2011a)

Tra le metodologie riportate in Tabella 11 si è scelto di applicare in questo lavoro l'ultima versione delle schede di rilievo geomorfologico proposte in Surian et al, 2009b. I motivi della scelta sono svariati:

- mantenere omogeneità con i rilievi geomorfologici effettuati nel 2007 (Ziliani e Surian, 2007; Surian et al, 2008) eseguiti utilizzando le schede di rilievo proposte per la prima volta da Rinaldi nel 2007 ma pubblicate nel 2008, quindi riviste in Surian et al, 2009b (versione sostanzialmente assimilabile alla prima pubblicata nel 2008);
- le schede dedicano adeguato dettaglio e approfondimento alla raccolta di evidenze di campo per la valutazione delle variazioni morfologiche nel breve (ultimi 15 anni) - medio termine (ultimi 50 anni), *focus* del presente lavoro di ricerca;
- l'attività di ricerca del dottorato è rientrata nel progetto di rilevanza nazionale PRIN 2007 "*Tendenza evolutiva attuale e possibile dinamica futura degli alvei fluviali in Italia centro-settentrionale*", nell'ambito del quale le schede di rilievo sono state testate su numerosi tratti fluviali italiani tra cui quelli scelti per il Tagliamento.

Le schede utilizzate presentano le seguenti tre principali sezioni:

- (1) "*Caratteristiche morfologiche attuali*": dedicata alla caratterizzazione morfologica del tratto al momento del rilievo (dimensioni, morfologia, forme di fondo, sponde, componente vegetale, opere antropiche, ecc.);
- (2) "*Variazioni morfologiche*": pensata appositamente per la quantificazione delle variazioni piano-altimetriche nel medio termine;
- (3) "*Tendenze attuali*": dedicata alla quantificazione delle variazioni piano-altimetriche nel breve termine (10-15 anni), associata all'indicazione dello stato morfologico del tratto (Incisione; Incisione/Equilibrio; Equilibrio; Equilibrio/Aggradazione; Aggradazione).

Quest'ultima costituisce probabilmente la parte più innovativa del metodo, in quanto induce l'operatore ad una raccolta ed elaborazione di dati piano-altimetrici preliminare al rilievo, quindi lo guida in campo all'osservazione di specifiche evidenze (presenza di lobi di sedimentazione, abbondanza di *Large Woody Debris*, stato di corazzamento del fondo, ecc.) e misure geomorfologiche (differenze di quota tra superfici omologhe necessarie per la stima delle variazioni altimetriche locali – per approfondimenti di rimanda a Rinaldi et al., 2011b). Solo al termine del rilievo, incrociando il *set* di misure di campo con quelle reperite "a tavolino", viene richiesta la valutazione dello stato del tratto. Le evidenze che l'operatore può rilevare sono distinte in evidenze "diagnostiche" e "non diagnostiche", ovvero evidenze più indicative e rilevanti, ed evidenze per le quali è meno diretto il collegamento con la tendenza evolutiva ipotizzata. Per approfondimenti specifici si rimanda a Surian et al, 2009b.

Al momento attuale è ancora in corso la raccolta dei dati relativi all'applicazione del metodo per testarne il grado di attendibilità ed evidenziare i punti di debolezza delle schede di rilievo. I dati elaborati in questo lavoro e analizzati nei sottocapitoli 4.2 e 4.3, hanno permesso di costituire un campione statistico per un primo *test* del metodo.

3.3.1 Rilievi geomorfologici utilizzati

I rilievi geomorfologici disponibili sono complessivamente 15 svolti su tratti di lunghezza compresa tra 1 ÷ 2 km. Ogni sottotratto è stato individuato a cavallo di una tra le 63 sezioni storiche presentate in 3.2.1 da cui ne discende il codice identificativo (Tabella 13). La maggior parte dei rilievi è stata effettuata nel 2007 (n.12); tre sottotratti sono stati invece rilevati nell'ambito del presente lavoro di ricerca (Tabella 13, Figura 9).

I rilievi 2007 sono stati eseguiti durante il progetto di rilevanza nazionale PRIN 2005 "*Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali in Italia centro-settentrionale: tendenze evolutive, cause ed implicazioni applicative*", ed indicazioni di sintesi sono state riportate in alcuni recenti lavori (Ziliani

e Surian, 2007; Surian et al, 2008; Surian et al, 2009d). Nel 2007 la scelta dei tratti è stata condotta cercando di rilevare tutte le morfologie presenti, distribuendo omogeneamente i siti di rilievo lungo il tratto studio ma escludendo i tratti più a monte troppo rilevanti nelle dimensioni. In questa campagna di misure infatti i rilievi sono stati condotti utilizzando una livelletta manuale a portata ottica nell'ordine dei 30÷40 m. Sarebbe stato impensabile eseguire misure geomorfologiche in tratti fluviali ampi fino a 1,800 m. Diversamente durante i rilievi 2010 la disponibilità di un GPS ha permesso di estendere l'indagine nei tratti più a monte.

Nella seguente Tabella 12 è riportato un quadro di sintesi per la caratterizzazione dei rilievi 2007. Per l'analisi dei risultati si rimanda ai sottocapitoli 4.2 e 4.3.

Cod. tratto	Lunghezza tratto [m]	Larghezza media tratto misurata da foto aerea 2006 [m]	Morfologia attuale	n° misure geomorfologiche [*] per la valutazione delle VARIAZIONI MORFOLOGICHE NEL MEDIO TERMINE	n° misure geomorfologiche [*] per la valutazione delle TENDENZE MANIFESTATE NEL BREVE TERMINE
139	761	720	<i>Braided</i>	2	4
137	919	764	<i>Braided</i>	6	0
130	1,089	678	<i>Braided</i>	1	2
128	728	582	<i>Braided</i>	5	1
126	791	511	<i>Braided</i>	2	2
124	1,290	674	<i>Braided</i>	4	3
120	789	366	<i>Wandering</i>	4	3
118	1,076	192	Sinuoso	1	4
110	956	140	Sinuoso	1	3
104	844	122	Sinuoso	2	4
98	1,146	111	Sinuoso	2	0
94	1,300	70	Meandriforme	1	0
[*] per una definizione del concetto di "misure geomorfologiche" si veda il capitolo 3.3					

Tabella 12 - Riepilogo delle caratteristiche dei rilievi geomorfologici 2007

Num. sezione	2007	2010
Pinzano 170		
169BIS		
169		
168		
166		
165		
164		
162		
Gaio 160		
Baseglia 158	x	
156		
Spilimbergo 154	x	
152		
Dignano 150		
149		
148		
Gradisca 146		
145		
144		
143BIS		
S. Odorico 143		
142	x	
141		
140a		
139	x	
137	x	
136BIS		
136		
Ponte Delizia 134		
132		
131		
130	x	
S. Vidotto 129		
128	x	
127		
126	x	
Carbona 124	x	
122		
121		
S. Paolo 120	x	
119		
118	x	
Madrisio 116		
115		
114		
ussons 112		
110	x	
108		
107		
Fraforeano 106		
105		
104	x	
102		
100		
99		
Ronchis 98	x	
97		
96		
95		
94	x	
93		
92		
90		
Totali	12	3

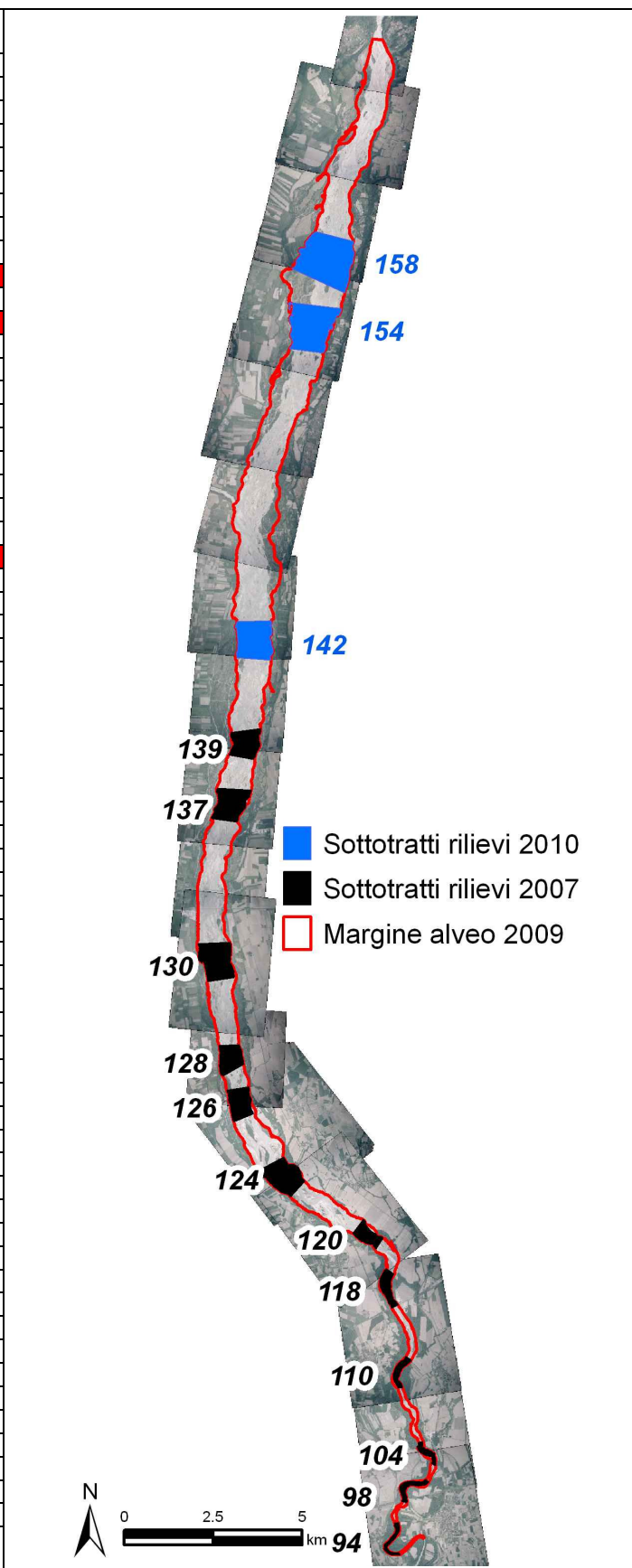


Tabella 13 - Riepilogo dei sottotratti oggetto di rilievo geomorfologico

Figura 9 - Collocazione dei sottotratti oggetto di rilievo geomorfologico

3.3.2 Rilievi geomorfologici effettuati

I rilievi geomorfologici effettuati nell'ambito del presente lavoro di tesi hanno interessato tre tratti a cavallo delle sezioni storiche 142, 154 e 158 (Figura 7).

L'occasione dei rilievi ha permesso di

- valutare sul campo la tendenza morfologica attuale (aggradazione - equilibrio - incisione);
- attraverso specifiche misure topografiche di dislivello tra superfici omologhe è stato possibile reperire alcune stime delle variazioni altimetriche avvenute nel medio termine (anni '70 / oggi) di significativo interesse considerando che in questa parte del tratto studio non si dispone di rilievi precedenti al 1982;
- testare la sussistenza reale di corrispondenza tra le indicazioni dal solo rilievo di campo con le rispettive evidenze geomorfologiche, e quelle emerse dal confronto tra i rilievi topografici (tra gli obiettivi della tesi indicati al capitolo 1.2).

Nella seguente Tabella 14 è riportato un quadro di sintesi per la caratterizzazione dei rilievi 2010. Per l'analisi dei risultati si rimanda ai sottocapitoli 4.2 e 4.3.

Cod. tratto	Lunghezza tratto [m]	Larghezza media tratto misurata da foto aerea 2006 [m]	Morfologia attuale	n° misure geomorfologiche per la valutazione delle VARIAZIONI MORFOLOGICHE NEL MEDIO TERMINE	n° misure geomorfologiche per la valutazione delle TENDENZE MANIFESTATE NEL BREVE TERMINE
158	1,332	964	<i>Braided</i>	4	4
154	1,278	978	<i>Braided</i>	2	3
142	1,058	902	<i>Braided</i>	3	3

Tabella 14 - Riepilogo delle caratteristiche dei rilievi geomorfologici 2010

4 Risultati

I risultati emersi dall'applicazione dei metodi descritti nei sottocapitoli precedenti (3.1, 3.2, 3.3) sono stati organizzati ed elaborati secondo tre finestre temporali principali:

- lungo termine 1805-2000 (4.1);
- medio termine 1954-1993 (4.2);
- breve termine 1993-2009 (4.3).

La scelta di questi periodi temporali di indagine riprende le fasi evolutive individuate in Surian et al, 2009d e in Surian et al, 2009e (si veda anche Figura 10).

Per ogni fase vengono enfatizzate le variazioni

- planimetriche di larghezza dell'alveo attivo;
- altimetriche (da confronto rilievi topografici e da rilievi geomorfologici);
- morfologiche (tipologia fluviale, indice di intrecciamento).

Tutti i risultati sono infine integrati dal sottocapitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** in cui sono analizzati nel dettaglio i principali fattori che possono aver guidato le variazioni manifestate dal Tagliamento negli ultimi 200 anni, ovvero

- attività estrattiva di sedimenti in alveo (4.4.1);
- interventi di canalizzazione a scala di tratto (4.4.2);
- interventi di sistemazione idraulico-forestali a scala di bacino (4.4.3);
- variazione dell'uso del suolo a scala di bacino (4.4.4);
- realizzazione di invasi artificiali (4.4.5);
- variazione del regime idrologico (4.4.6).

Nella discussione finale al capitolo 5 l'analisi comparata di tutti i risultati e delle cause conduce ad alcune valutazioni finali riguardanti le forme di manifestazione delle variazioni e i legami cause-effetti esistenti.

4.1 Evoluzione morfologica nel lungo termine (1805 – 2000)

4.1.1 Variazioni di larghezza

La finestra temporale compresa tra il 1805 e il 1954 può considerarsi coincidente con le prime due fasi di evoluzione dei principali corsi d'acqua italiani individuate in Surian et al, 2009d, ovvero la Fase evolutiva del XIX secolo (in questo contesto denominata Fase 0) e la Fase 1 ricompresa dalla fine del XIX secolo fino a metà del secolo scorso. L'analisi della variazione della larghezza dell'alveo nel lungo periodo fornisce risultati macroscopici veramente d'impatto. Il paragone infatti tra la configurazione morfologica attuale e quella di inizio Ottocento e inizio Novecento potrebbe definirsi "imbarazzante" per il Tagliamento "moderno". Le variazioni sono state notevolissime per entità ed estensione, anche se meno stupefacenti per rapidità e sincronismo rispetto a quelle del periodo 1970-anni '90.

La Figura 10 illustra in modo sintetico come la larghezza media dell'alveo attivo riferita a tutto il tratto studio subisce nel lungo termine una fortissima contrazione, passando da un massimo di circa 1,350 m nel 1833 ad un minimo di circa 545 m a metà degli anni '90 del secolo scorso, con un abbattimento di ben il 60% (Tabella 15).

Durante il XIX secolo i valori riportati in Figura 10 indicano una condizione di sostanziale stabilità della larghezza media dell'alveo. Mediamente le variazioni avvengono con tassi di allargamento di circa 2 m/anno tra il 1805 e il 1833. Con la stessa velocità media si manifesta il restringimento che interessa tutto il tratto dal 1833 al 1927. L'andamento sub-orizzontale della traiettoria nel periodo 1805-1927 non rende ragione del forte dinamismo del tratto e delle variazioni che comunque si manifestano a scala di sottotratti, evidenti nel grafico in Figura 11. Nel periodo 1805-1927 localmente si registrano enormi restringimenti ed allargamenti, con picchi di diminuzione della larghezza fino a 920 m (1833-1891, sottotratto 14) e picchi di allargamento di 500 ÷ 700 m (1833-1891, sottotratto 30). Tra il 1833 e il 1891 rilevantissimi restringimenti assoluti sono evidenti nei tratti di monte, fino all'altezza dei ponti di Casarsa della Delizia (sottotratto 29); da qui a valle invece la risposta planimetrica nello stesso periodo di tempo si manifesta principalmente di segno opposto, con allargamenti relativamente consistenti fino all'altezza di Fraforeano (sez. 106 – sottotratto 44).

Nel periodo 1891-1927 il restringimento sembra risparmiare solo pochi tratti a monte di Casarsa (sottotratti 22-22) e alcuni all'altezza di Spilimbergo (sottotratti 7-8). E' proprio questo il periodo in cui si assiste in modo definitivo alla storica migrazione del Tagliamento presso Spilimbergo e alla scomparsa del cosiddetto "Saletto di Dignano" (Pellegrini e Simeoni, 2005). Documenti Catastali e fonti storiche facevano ricadere il confine della diocesi di Dignano in sinistra idrografica con la sponda sinistra del Tagliamento, collocata "*poche centinaia di metri dal piede del castello di Spilimbergo*" (Pellegrini e Simeoni, 2005). La posizione di questo confine era legata al fatto che sulla sponda Dignanese tra il Tagliamento e il terrazzo pleistocenico permaneva storicamente il "Saletto di Dignano", ovvero una porzione pianeggiante morfologicamente non attiva, fittamente boscata e largamente sfruttata dalla popolazione locale per l'approvvigionamento di legname ad uso quotidiano. A partire dal XVI – XVIII sec. questa porzione di territorio venne progressivamente intaccata ed erosa dal fiume. A testimoniare esistono innumerevoli documenti storici che fanno riferimento a controversie locali tra i nascenti comuni rivieraschi riguardo proprio alla reale posizione del confine comunale, mutevole nella posizione come la sponda sinistra del Tagliamento. Ancora nelle carte del Von Zach del 1805 e in quelle del Regno Lombardo Veneto del 1833, al piede del castello di Spilimbergo permangono i canali principali del Tagliamento, e grandi isole si ritrovano al centro di quella fascia di 3 km compresa tra i terrazzi pleistocenici occupata integralmente dall'alveo fino al 1805. La lenta disattivazione della porzione fluviale al piede di Spilimbergo inizia proprio a percepirsi nella carta IGM del 1891, e appare ormai definitiva nel documento cartografico sempre IGM del 1927.

Complessivamente tra il 1833 e il 1927 si manifesta il 23% del restringimento totale calcolato per il periodo 1833-anni'90 (Tabella 15); dal 1927 ha avvio una significativa accelerazione del restringimento. Tra il 1927 e il 1954 i tassi medi annui di diminuzione della larghezza triplicano passando da 2 a 6 m/anno. In questo modo solo nel periodo 1927-1954 si consuma circa il 21% del restringimento globale 1833-anni '90 (Tabella 15).

Nel periodo 1927-1954 il restringimento interessa in modo particolare due macro-tratti, uno più a monte comprendente la porzione fluviale tra le sezioni 148-160 (sottotratti 6-11) ed un altro più a valle impostato tra la sezione 136 e la 124 (sottotratti 25-33). Solo a valle di Madrisio (sottotratti 40-46) si registrano significativi allargamenti d'alveo.

A partire dal 1950 fino al 1970, il processo di restringimento subisce un'ulteriore accelerazione, passando a tassi di circa 8 m/anno (Tabella 15). Inizia negli anni '50 la Fase evolutiva n. 2, descritta in Surian et al, 2009d e Surian et al, 2009e. L'alveo nel 1970 manifesta larghezze ancora ragguardevoli (valore medio di circa 880 m), ma ormai si è raggiunta una larghezza pari a solo il 65% del massimale di metà Ottocento, con circa il 60% del restringimento globale già alle spalle.

Tuttavia è proprio questo il periodo in cui inizia la fase più intensa di restringimento. I tassi tra il 1970 e la metà degli anni '80 raggiungono i 18 m/anno, quasi 10 volte superiori rispetto a quelli di fine Ottocento. L'accelerazione diminuisce nel decennio anni '80-anni '90, in cui prosegue intenso il restringimento ma si riscontrano i primi segni di un'inversione di tendenza (sottotratti 28-31, sottotratto 9). L'inversione si fa più netta nel decennio successivo durante la Fase 3 relativa

all'evoluzione recente in cui, con tassi di allargamento significativi (4 m/anno - Tabella 15), buona parte del tratto di studio manifesta una discreta ripresa nelle dimensioni dell'alveo attivo.

Osservando ancora il grafico in Figura 11, appaiono valori davvero ragguardevoli di restringimento, cumulato con picchi di 2,000 m nel sottotratto 8 all'altezza di Carpaccio (sez. 156) e valori naturalmente degradanti scendendo verso valle fino ai minimi di tratti monocursali (circa 120 m).

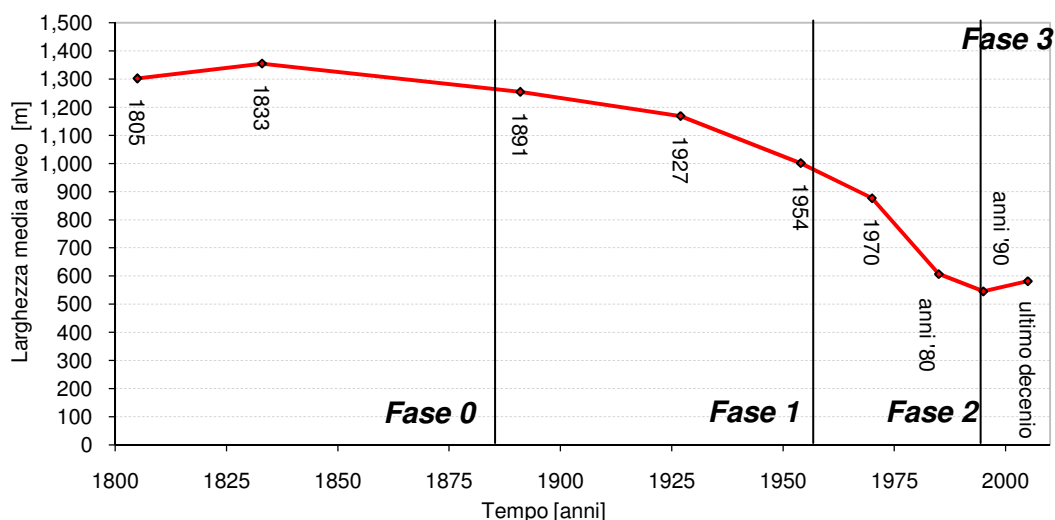


Figura 10 - Variazione nel lungo termine [1805-anni90'] della larghezza media dell'alveo attivo (valori riferiti a tutto il tratto studio). Denominazione delle fasi modificata da Surian et al. 2009d

Anno	Larghezza media [m]	Larghezza relativa rispetto a max storico [%]	Quota parte della variazione totale [%]	Variazione cumulata [%]	Tasso medio di variazione di larghezza [m/anno]
1805	1,302	96	-	-	-
1833	1,355	100	0	0	+2
1891	1,254	93	12	12	-2
1927	1,169	86	11	23	-2
1954	1,001	74	21	44	-6
1970	876	65	15	59	-8
Anni '80	607	45	33	92	-18
Anni '90	545	40	8	100	-6
Ultimi 10 anni	582	43	-	-	+4
<i>Larghezza massima [1833]: 1,355 m</i> <i>Variazione totale [1833-anni'90] : 810 m</i>					

Tabella 15 - Analisi delle variazioni nel lungo termine della larghezza media dell'alveo attivo (valori riferiti a tutto il tratto studio)

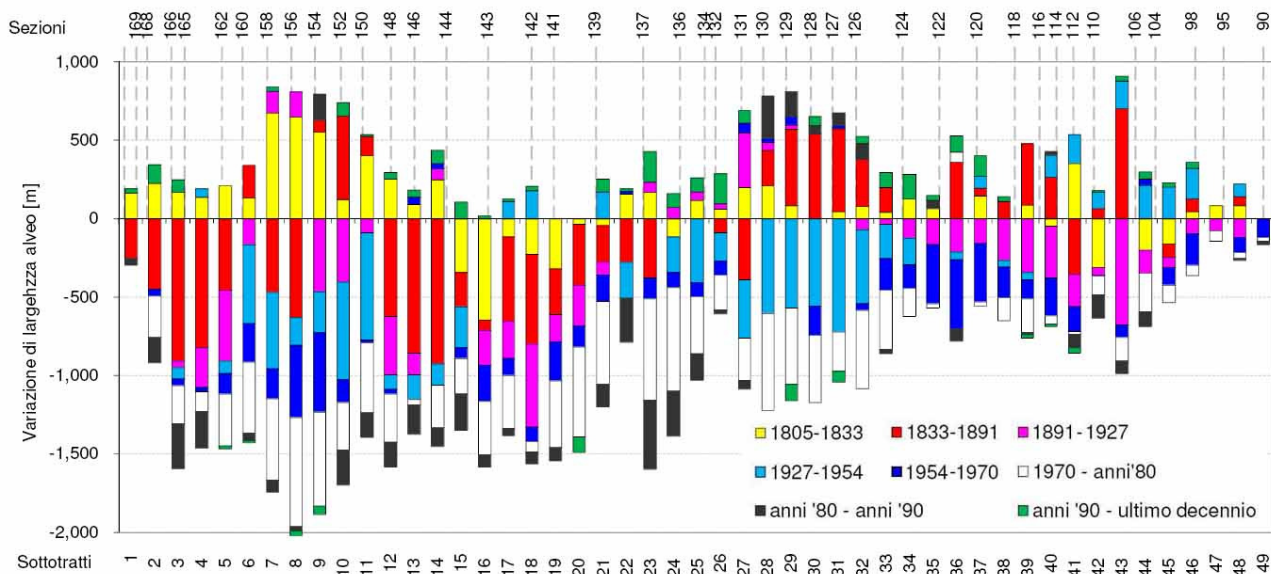


Figura 11 - Variazione nel lungo termine [1805-anni90'] della larghezza media dell'alveo attivo misurata per sottotratti chilometrici

4.1.2 Variazioni parametri morfologici

Associate alle variazioni di larghezza si sono manifestate nel lungo termine significative variazioni morfologiche di *pattern* e di indice di intrecciamento. La variazione di *pattern* ha interessato solo la parte più meridionale del tratto studio posta a valle di Carbona (sottotratti 34-49 - Figura 12). La morfologia meandriforme è migrata verso valle con una brusca restrizione nel periodo 1927-1954 passando da una percentuale media del 27 % nel periodo 1805-1927 (massimo nel 1927 di 40%) a solo il 5 % del 1954 (media del periodo 1954-2009 pari al 7%, Figura 13). Dal 1954 ad oggi la porzione a configurazione meandriforme è rimasta pressoché confinata agli ultimi due sottotratti 48-49 ormai morfologicamente poco attivi.

I tratti a *pattern* meandriforme hanno lasciato progressivamente spazio a tratti rettilinei e sinuosi. La configurazione rettilinea (indice di sinuosità inferiore a 1.1 - Surian et al, 2009b) apparsa solo dal 1993 è rimasta sempre limitata a percentuali prossime al 10%. La morfologia sinuosa alternativamente presente prima del 1954, è progressivamente cresciuta fino ad un massimo attuale di circa il 30%. Quella transizionale è stata la morfologia più stabile per estensione relativa, con massimi del 30-35 % nel 1954-1966 e minimi del 9% nell'Ottocento. La presenza di tratti *wandering* ha sempre caratterizzato la fascia di passaggio tra le morfologie a canali intrecciati e canali monocursali (Figura 12), oscillando da monte a valle assecondando l'avanzamento o l'arretramento del *pattern* a canali intrecciati.

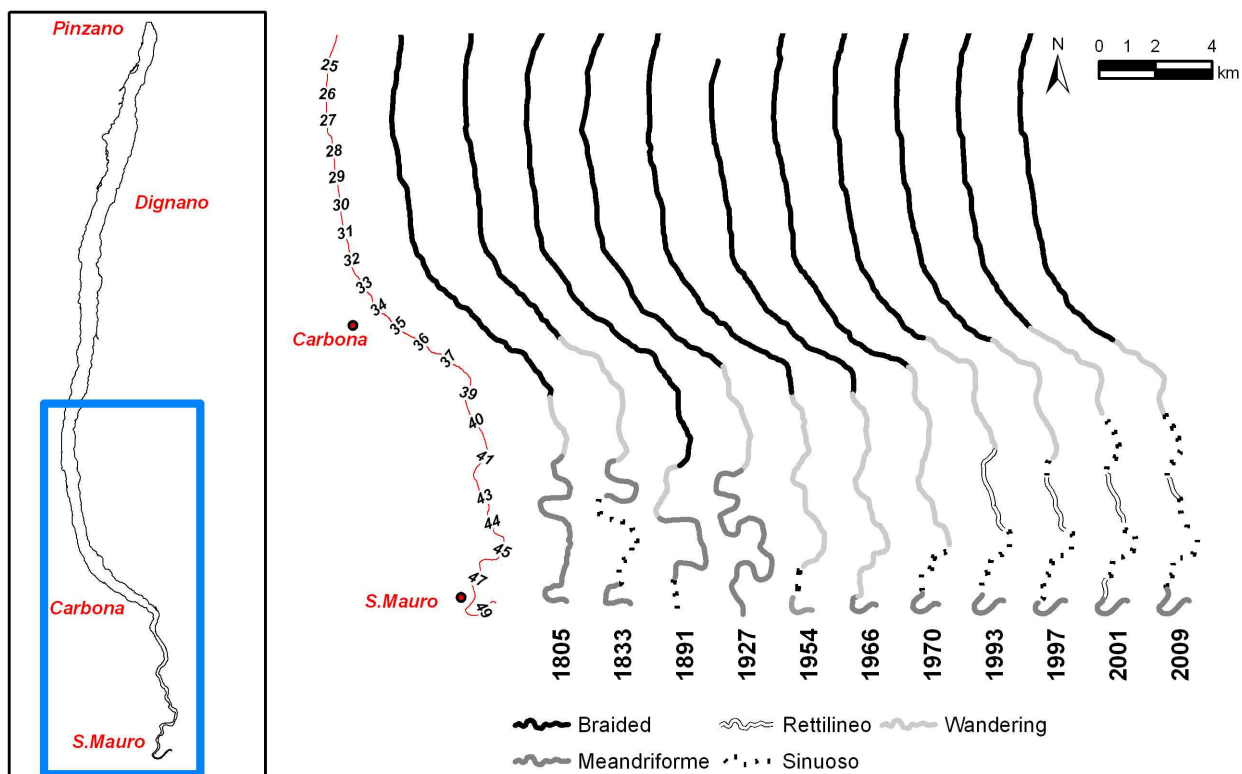


Figura 12 - Rappresentazione planimetrica della variazione nel lungo termine del *pattern* morfologico. Valori riferiti al tratto vallivo compreso tra i sottotratti 24÷49

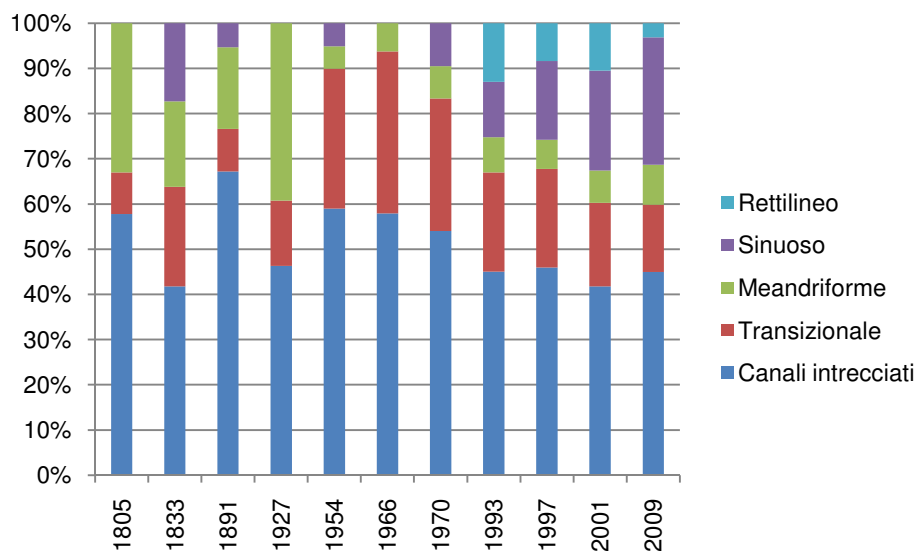


Figura 13 - Rappresentazione in percentuali della variazione nel lungo termine del *pattern* morfologico. Valori riferiti al tratto vallivo compreso tra i sottotratti 24÷49

Le oscillazioni di *pattern* mostrate in precedenza rendono percepibili le variazioni subite nel lungo termine dalla porzione più valliva del tratto studio. La stessa analisi non può allargarsi alla porzione a monte di Carbona (Figura 14 - B) che dal 1805 ad oggi ha costantemente mantenuto la morfologia a canali intrecciati. Gli impatti morfologici subiti da questa porzione più di monte possono essere analizzati osservando la variazione nel tempo dell'indice di intrecciamento. Nella

consapevolezza dei limiti di accuratezza intrinseci nel metodo di calcolo dell'indice di intrecciamento (Egozi e Ashmore, 2008) si è ritenuto di riportare comunque le risultanze ottenute in quanto le variazioni osservate sono talmente rilevanti che possono considerarsi largamente superiori all'incertezza del metodo stesso.

Come evidente in Figura 14 (B), l'intero tratto a monte di Carbona ha manifestato nel lungo termine una netta semplificazione del grado d'intrecciamento, passando da valori di indice di intrecciamento prossimi a 10 (1805) a valori prossimi a 3 (2001-2007), con un calo del 71%. La diminuzione è ancora più netta se si considera la porzione del tratto che ancora oggi manifesta in modo più stupefacente una spiccata morfologia *braided*, ovvero la porzione che ricomprende i sottotratti 3-11 a monte di Dignano (Figura 14A). Qui l'indice di intrecciamento è passato dal picco del 1805 (11) ad un minimo del 2007 (2.4) con un calo del 78%. Tralasciando per un momento il picco del 1805, la complessità morfologica è rimasta sostanzialmente costante nel periodo 1833-1927, mantenendo valori di intrecciamento prossimi a 7.5 nei sottotratti 3-11, e prossimi a 6 in tutto il tratto a monte di Carbona. Con la Fase 2 di restringimento iniziata tra gli anni '50 e '70, l'indice di intrecciamento è calato significativamente fino ai minimi attuali.

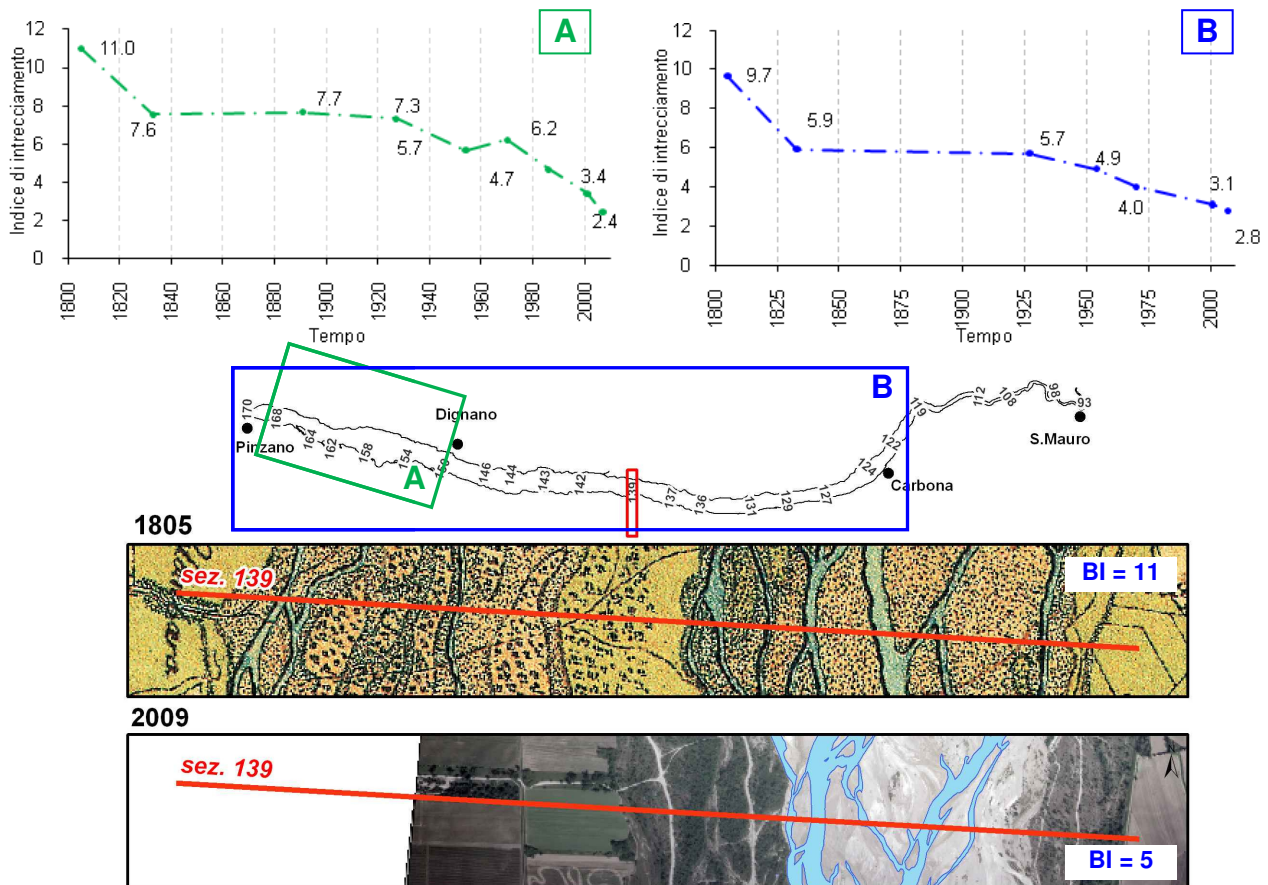


Figura 14 - Variazione nel lungo termine del valore medio dell'indice di intrecciamento (*Braided Index - BI*). [A] Valori riferiti alla porzione compresa tra i sottotratti 3÷11. [B] Valori riferiti alla porzione compresa tra i sottotratti 3÷34

4.2 Evoluzione morfologica nel medio termine (1954 – 1993)

4.2.1 Variazioni di larghezza

La finestra temporale compresa tra il 1954 e il 1993 coincide anche per il tratto di studio con la Fase 2 individuata in Surian et al, 2009d e Surian et al, 2009e, caratterizzata da un rapido ed intenso restringimento associato a incisione del fondo. In linea con il comportamento manifestato da gran parte dei corsi d'acqua italiani e in particolare veneto-friulani, il Tagliamento in circa 40 anni ha subito una forte contrazione nel valore medio di larghezza dell'alveo attivo, seguita solo negli ultimi 10-15 anni da una controtendenza di allargamento (4.3).

La fase di restringimento nel medio termine ha interessato tutto il tratto manifestando un sincronismo sorprendente all'inizio e alla fine. Come evidente in Figura 15 la maggior parte dei sottotratti ha avviato la fase di restringimento proprio negli anni '50 (circa l'80% dei sottotratti), e con lo stesso sincronismo la maggior parte dei sottotratti ha terminato il restringimento a metà degli anni '90 (circa il 77% - 21 sottotratti nel 1993 e 17 nel 1997). I massimi valori assoluti di restringimento cumulato si sono registrati ovviamente nei sottotratti più a monte con picchi di 1,000 - 1,200 m nei sottotratti 7-8 (Figura 15); i minimi assoluti invece si possono ritrovare nei sottotratti di valle 47-49 dove si raggiungono valori cumulati di circa 200 m. I picchi s'invertono da monte verso valle se si considerano i valori di variazione relativa (variazione assoluta rapportata al valore di larghezza massimo del sottotratto all'avvio del restringimento) riportati in Figura 15; in questo caso si osserva che proprio nei sottotratti di valle si toccano i picchi massimi di restringimento relativo (fino all'85%), mentre nei sottotratti di monte non si scende sotto il 30%.

La distribuzione spaziale dei valori assoluti cumulati può apprezzarsi anche in Figura 16 dove emerge chiaramente come le variazioni avvenute nel periodo 1970-anni '80 siano predominanti per quantità ed estensione. Fanno eccezione i sottotratti 35-37 che hanno esaurito la totalità del loro restringimento nel periodo precedente dal 1954 al 1970. Con una distribuzione più discontinua e con picchi inferiori si presentano invece le variazioni del periodo anni'80-anni '90. Il *trend* dominante è ancora nettamente di restringimento, ma localmente si manifestano alcune inversioni di tendenza, concentrate in modo particolare nella porzione centrale del tratto, tra i sottotratti 28-35 dove mediamente l'alveo attivo si allarga di circa 86 m.

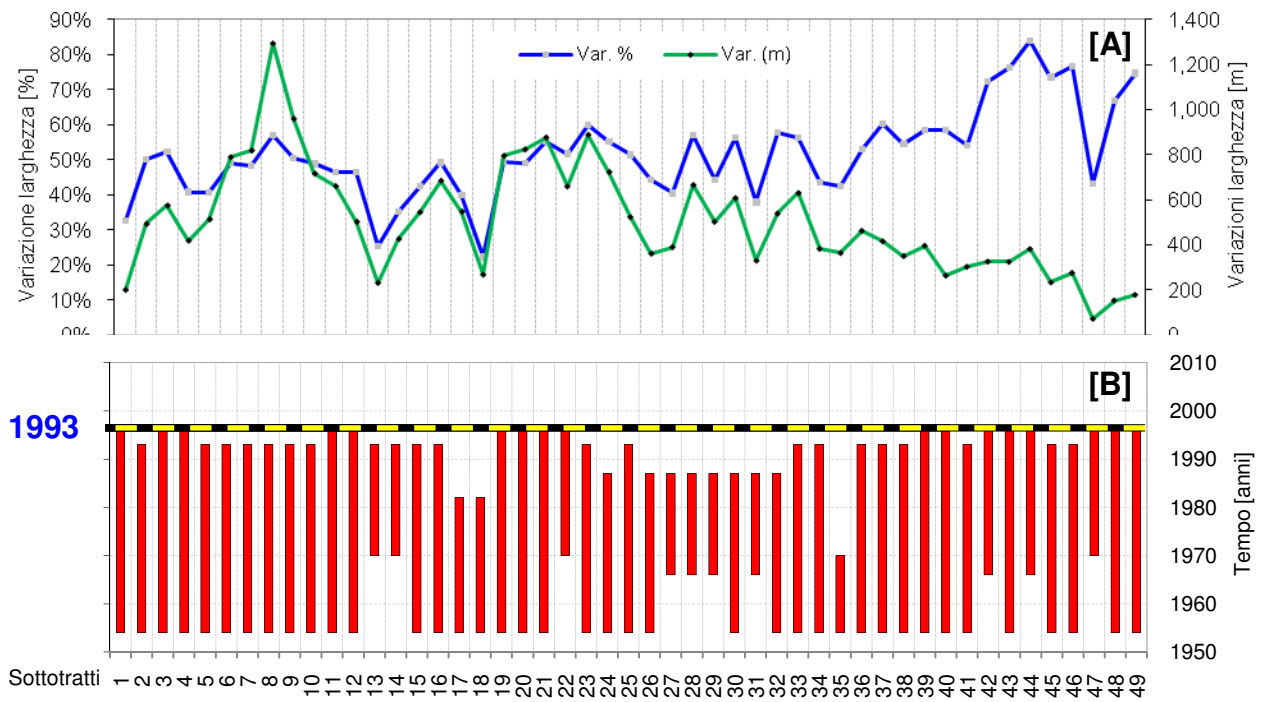


Figura 15 - [A] Variazione cumulata del valore di larghezza media dell'alveo attivo durante la Fase 2, medio termine (analisi distinta per sottotratti chilometrici). [B] Fasce di durata della fase di restringimento per ogni sottotratto

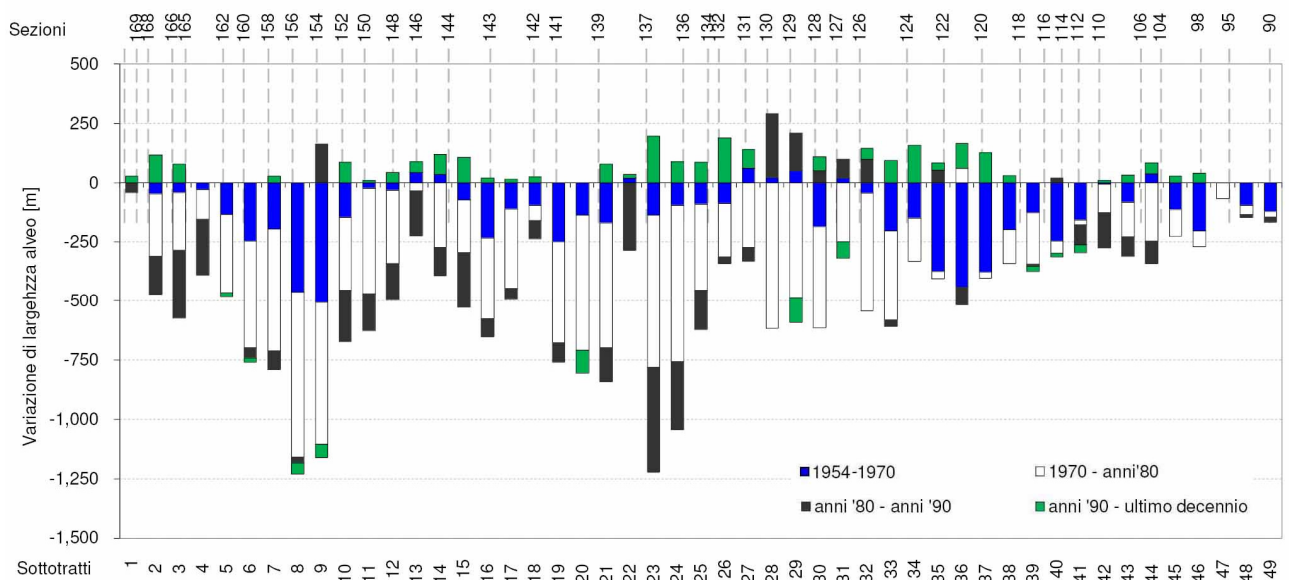


Figura 16 - Variazione nel medio termine [1954-1993] della larghezza media dell'alveo attivo misurata per sottotratti chilometrici

4.2.2 Variazioni altimetriche

In associazione al restringimento planimetrico descritto al sottocapitolo precedente, questa fase evolutiva ha visto una variazione del Tagliamento anche in termini altimetrici. Come anticipato al sottocapitolo. 3.2.1, i dati topografici raccolti sono abbastanza discontinui per distribuzione spazio-temporale, ma attraverso un attento lavoro di selezione, aggregazione e integrazione tra dati topografici e dati da rilievi geomorfologici è stato delineato un quadro soddisfacente della risposta altimetrica manifestata tra il 1954 e il 1993. Scorporando l'analisi dei dati in fasce temporali scandite dagli anni delle campagne di rilievo (Figura 17) si possono formulare alcune interessanti valutazioni sui *trend* altimetrici del passato:

- Figura 17 [A]. Dal 1970 al 1982 una fase di forte incisione ha interessato la porzione valliva del tratto studio (quella interessata dai rilievi del 1970 - sottotratti 20-49) con un valore medio di circa 1 m (incisione crescente di intensità scendendo verso valle). Su 29 coppie di rilievi confrontati in altrettante sezioni storiche, la maggior parte dei confronti (24) ha mostrato valori di approfondimento del fondo (massimo pari a 2.41 m); solo localmente alcune sezioni hanno manifestato aggradazione (sempre modesta e inferiore a 0.5 m) mentre solo due sezioni sono risultate altimetricamente immutate o hanno avuto variazioni inferiori all'incertezza di misura (è stata considerata la propagazione dell'errore come da sottocapitolo. 3.2.3).
- Figura 17 [B]. Nel periodo 1982-1988 l'incisione è proseguita nel tratto di valle (sottotratti 21-46) con un valore medio prossimo a 0.7 m, con un picco di ben 3.9 m in corrispondenza della sezione 115 e solo sporadiche sezioni in lieve aggradazione. Il fenomeno di incisione è risultato trascurabile nella parte più a monte (sottotratti 1-19), con un valore medio leggermente superiore a zero; solo due sezioni sono risultate in leggera incisione (< 0.5 m), quattro sezioni sono invece rimaste altimetricamente invariate e le rimanenti sezioni hanno mostrato aggradazioni non superiori a 0.45 m.
- Figura 17 [C]. Nel periodo 1988-2001/3 l'incisione è proseguita sostanzialmente su tutto il tratto di studio pur con locali risposte altimetriche di aggradazione. Su un totale di 39 coppie di misure, 27 hanno dato indicazione di incisione, 11 di aggradazione e solo una sezione è risultata altimetricamente invariata (o comunque al di sotto della soglia di errore). L'incisione media a scala di tratto risulta ridotta a circa 0.4 m, ma si riscontrano alcune accelerazioni locali. Da Pinzano fino alla confluenza Cosa (sottotratti 1-12) l'incisione rimane sotto al valore medio calcolato sul tratto completo e risulta pari 0.23 m, aumenta significativamente tra i sottotratti 14-37 in cui il valore medio dell'incisione risulta di 0.83 m, per tornare poi a diminuire ancora a valle fino a S.Mauro; in questa porzione nonostante l'acuto della sezione 90 (incisione intensa pari a circa 2.5 m) le rimanenti sezioni mostrano una generale tendenza all'aggradazione seppur modesta (0.24 m) con diverse discontinuità.

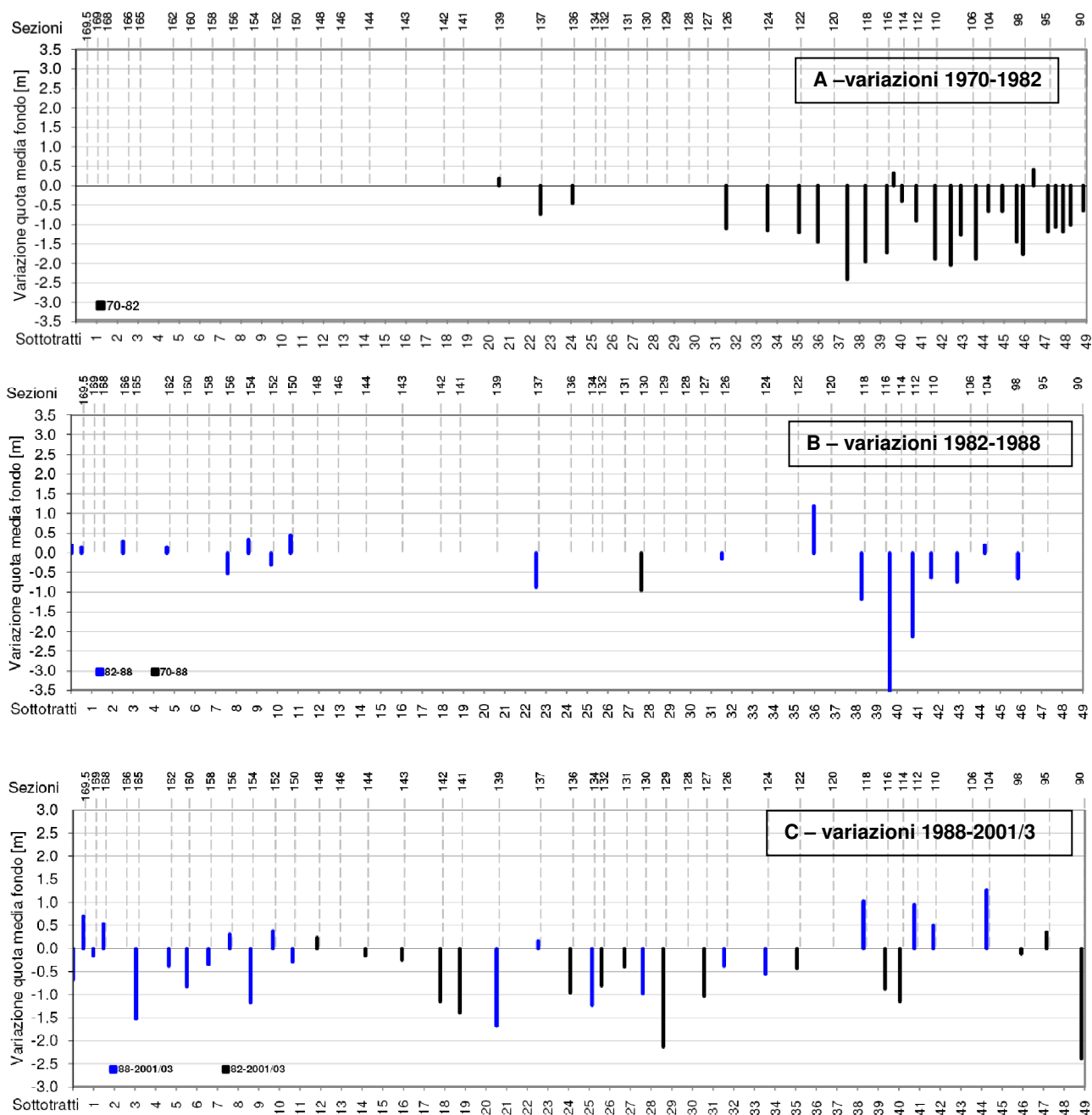


Figura 17 - Variazioni altimetriche desunte da rilievi topografici delle sezioni storiche distinte nei periodi [1970 – 1982] (A), [1982 – 1988] (B), [1988 – 2001/3] (C)

Fondendo e organizzando tutti i valori di variazione altimetrica in un unico grafico con indicazione delle variazioni cumulate come in Figura 18 emerge un quadro più chiaro della risposta altimetrica nel medio termine temporale (1970-2001/3):

- Su 36 coppie di misure topografiche la maggior parte (29) indica un processo di incisione; l'incisione media a scala di tratto si attesta intorno ad 1 m.
- Analizzando separatamente la porzione di monte compresa tra Pinzano e la confluenza Cosa (sez. 144 – sottotratto 14) si nota chiaramente un'incisione molto lieve (media di soli 0.15 m) ed un'incisione più netta a valle (1.46 m).

- Integrando i valori ottenuti da confronti topografici con quelli prodotti dai rilievi geomorfologici eseguiti in sottotratti non coperti da rilievi storici del 1970 (totale di cinque sottotratti – colonne rosse in Figura 18, si veda anche Tabella 17) i valori medi di variazione altimetrica non variano significativamente indicando una forte concordanza tra le indicazioni prodotte dalle due metodologie di valutazione.

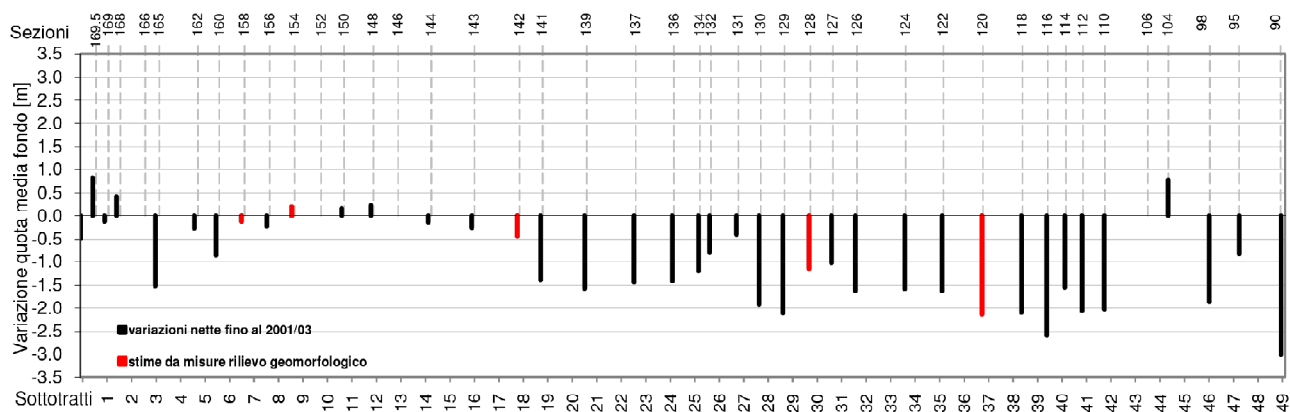


Figura 18 - Variazioni altimetriche nette nel medio termine [1970 – 2003]. Associazione delle indicazioni da rilievi topografici in sezioni storiche [colonne in nero] e geomorfologici [colonne in rosso] in sottotratti a cavallo di sezioni storiche

Pur trattando in questo sottocapitolo le variazioni plano-altimetriche relative alla finestra temporale del “medio termine”, ovvero il periodo 1954-1993, le valutazioni altimetriche appena descritte si fermano necessariamente al 1970, anno della più vecchia delle campagne topografiche effettuate sul Tagliamento. Durante i rilievi geomorfologici diverse misure sono state effettuate per verificare la sussistenza di terrazzi databili agli anni '50, e quindi per verificare sul campo l'esistenza di una fase di incisione precedente al 1970. Alcune superfici databili agli anni '50 sono state ritrovate sul campo e alcune misure (Tabella 16) hanno permesso di verificare che la variazione altimetrica tra il 1950 e il 1970 è stata molto modesta. I rilievi hanno fornito un valore medio pari a circa 20 cm, ovvero una variazione altimetrica prossima all'incertezza associabile alle misure effettuate.

Sottotratto	Sezione storica	Misura incisione 1970 – oggi [m]	Misura incisione 1954 – oggi [m]	Incisione '54 - '70 [m]
37	120	-2.1	-2.5	-0.3
21	139	-1.2	-1.6	-0.4
9	154	0.2	-0.3	-0.5
7	158	-0.1	0.3	0.4
Valore medio [m]				-0.2
valori positivi AGGRADAZIONE, valori negativi INCISIONE				

Tabella 16 - Stime desunte da rilievi geomorfologici della variazione altimetrica nel periodo 1954 - 1970

Cod. tratto	n° misure geomorfologiche [*]	media delle misure di campo [m] [**]	INDICAZIONE DA SOLO RILIEVO CAMPO	variazione altimetrica da rilievi topografici [m]	INDICAZIONE DA SOLO RILIEVO TOPOGRAFICO
158	4	-0.1	INVARIATO	-0.2	INVARIATO [***]
154	2	0.2	INVARIATO	-0.3	INVARIATO [***]
142	3	-0.4	INVARIATO	-1.1	INCISIONE MODERATA [***]
139	2	-1.2	INCISIONE MODERATA	-1.6	INCISIONE MODERATA
137	6	-1.7	INCISIONE MODERATA	-1.4	INCISIONE MODERATA
130	1	-1.4	INCISIONE MODERATA	-1.9	INCISIONE MODERATA
128	5	-1.2	INCISIONE MODERATA	<i>nd</i>	<i>nd</i>
126	2	-1.6	INCISIONE MODERATA	-1.6	INCISIONE MODERATA
124	4	-2.1	INCISIONE MODERATA	-1.6	INCISIONE MODERATA
120	4	-2.5	INCISIONE INTENSA	<i>nd</i>	<i>nd</i>
118	1	-3.6	INCISIONE INTENSA	-2.1	INCISIONE INTENSA
110	1	-2.8	INCISIONE INTENSA	-2.0	INCISIONE INTENSA
104	2	-3.0	INCISIONE INTENSA	0.8	SEDIMENTAZIONE
98	2	-2.8	INCISIONE INTENSA	-1.9	INCISIONE INTENSA
94	1	-2.4	INCISIONE INTENSA	-0.8	INCISIONE MODERATA
[*] per una definizione del concetto di "misure geomorfologiche" si veda il capitolo 3.3 [**] valori POSITIVI indicano AGGRADAZIONE, valori NEGATIVI INCISIONE [***] valutazioni riferite a rilievi del 1988					

Tabella 17 - Riepilogo delle valutazioni relative alle variazioni altimetriche nel medio termine emerse dai rilievi geomorfologici 2007-2010

4.3 Evoluzione morfologica recente (1993 – 2009)

4.3.1 Variazioni di larghezza

Le considerazioni espresse nei sottocapitoli precedenti hanno anticipato senza entrare nel dettaglio il tipo di risposta manifestata recentemente dal Tagliamento all'interno del tratto studio. Anche in questa finestra temporale breve e recente il comportamento è stato in linea con le traiettorie di recupero morfologico descritte in Surian et al, 2009d e Surian et al, 2009e per i principali fiumi italiani e veneto-friulani. Questa fase (Fase 3), seppur breve e vicina nel tempo, costituisce probabilmente uno tra i nodi più difficili da sciogliere per chiudere compiutamente il quadro di analisi delle variazioni morfologiche degli ultimi 200 anni.

I problemi di analisi del "breve termine" (ultimi 10-15 anni) sono svariati:

- le variazioni plano-altimetriche recenti sono mediamente modeste per intensità, prossime se non inferiori all'errore di misura di larghezza e di quota media del fondo;
- scarsa disponibilità di dati altimetrici recenti a copertura spaziale adeguata;
- esistenza di un netto sfasamento temporale tra il processo di allargamento dell'alveo, impulsivo e relativamente rapido, e quello di disattivazione delle parti meno attive dell'alveo, lento nel tempo e strettamente legato alla dinamica vegetazionale.

Come espresso sinteticamente in Figura 20 e Figura 19, il processo planimetrico di allargamento recente è un dato ormai accertato e chiaramente esteso a tutto il tratto studio. Tuttavia, pur essendo evidente la reazione morfologica, rimane dubbiosa ogni valutazione sulla consistenza reale dell'allargamento, ovvero rimane problematico capire solo dall'analisi svolta se il cambiamento possa ritenersi a tutti gli effetti l'inizio di una nuova traiettoria evolutiva intrapresa saldamente oppure costituisca solo la manifestazione di un equilibrio dinamico caratterizzato da una continua oscillazione attorno ad un valore medio di larghezza. L'osservazione di Figura 20 alimenta proprio questo dubbio in quanto evidenzia come dopo l'impulsiva risposta del 1997 (tasso di allargamento pari a 1m/anno) e del 2001 (tasso di allargamento pari a 7m/anno), l'alveo abbia subito manifestato un periodo di restringimento nel periodo 2001-2007 (tasso di restringimento pari a 2m/anno) seguito immediatamente fino al 2009 da un allargamento generalizzato con tassi decisamente elevati, pari a 12 m/anno.

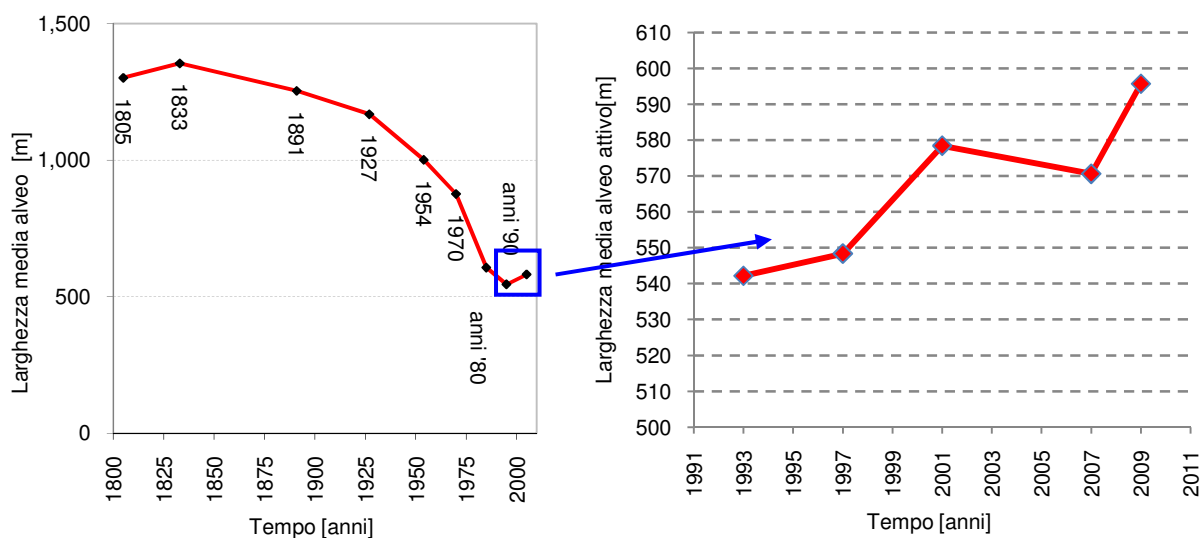


Figura 19 - Variazione nel breve termine [1993-2009] della larghezza media dell'alveo attivo (valori riferiti a tutto il tratto studio).

Scendendo nel dettaglio della distribuzione spaziale delle variazioni emerge in Figura 20 il carattere estensivo dell'allargamento degli ultimi 2 anni, l'unico che ha interessato uniformemente tutto il tratto fluviale senza anomalie locali o sottotratti in contro tendenza. Diversamente l'allargamento 1997-2001 mostra almeno due aree in controtendenza, ovvero in restringimento, poste tra i sottotratti 5-9 e 28-31. La tendenza attuale all'allargamento non ha continuità temporale rilevante: sussistono solo tre zone per altro ridotte a singoli sottotratti o comunque limitate in estensione che hanno manifestato un allargamento ininterrotto dall'inizio della Fase 3 fino ad oggi; si tratta dei sottotratti 14-15, 25-27 e 37.

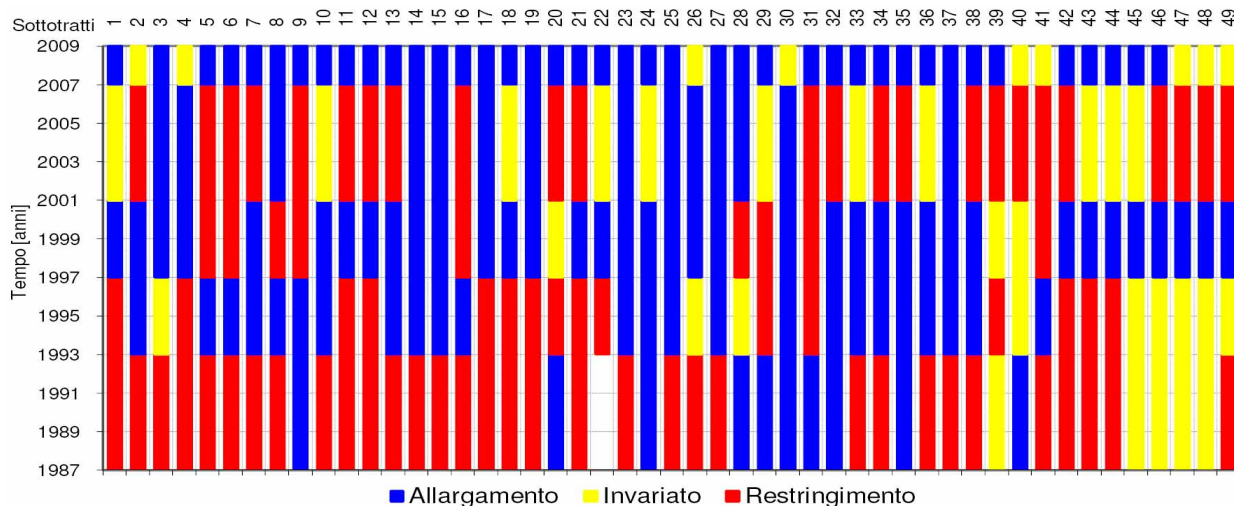


Figura 20 - Schematizzazione delle variazioni della larghezza media d'alveo attivo misurate per sottotratti kilometrici nel breve termine [1993-2009]. Fasce blu - sottotratti in allargamento planimetrico. Fasce rosse - sottotratti in restringimento. Fasce gialle - sottotratti invariati

L'osservazione congiunta di Figura 20 e Figura 21 conduce alle seguenti valutazioni:

- solo le fasi 1993-1997 di forte restringimento e 2007-2009 di forte allargamento si sono manifestate con sostanziale uniformità in tutto il tratto;
- l'entità assoluta dell'allargamento non varia significativamente in funzione della larghezza assoluta del sottotratto;
- non sussistono significativi fenomeni di propagazione verso valle dell'allargamento;
- la presenza della confluenza con il torrente Cosa non costituisce un punto di discontinuità nel comportamento morfologico recente.

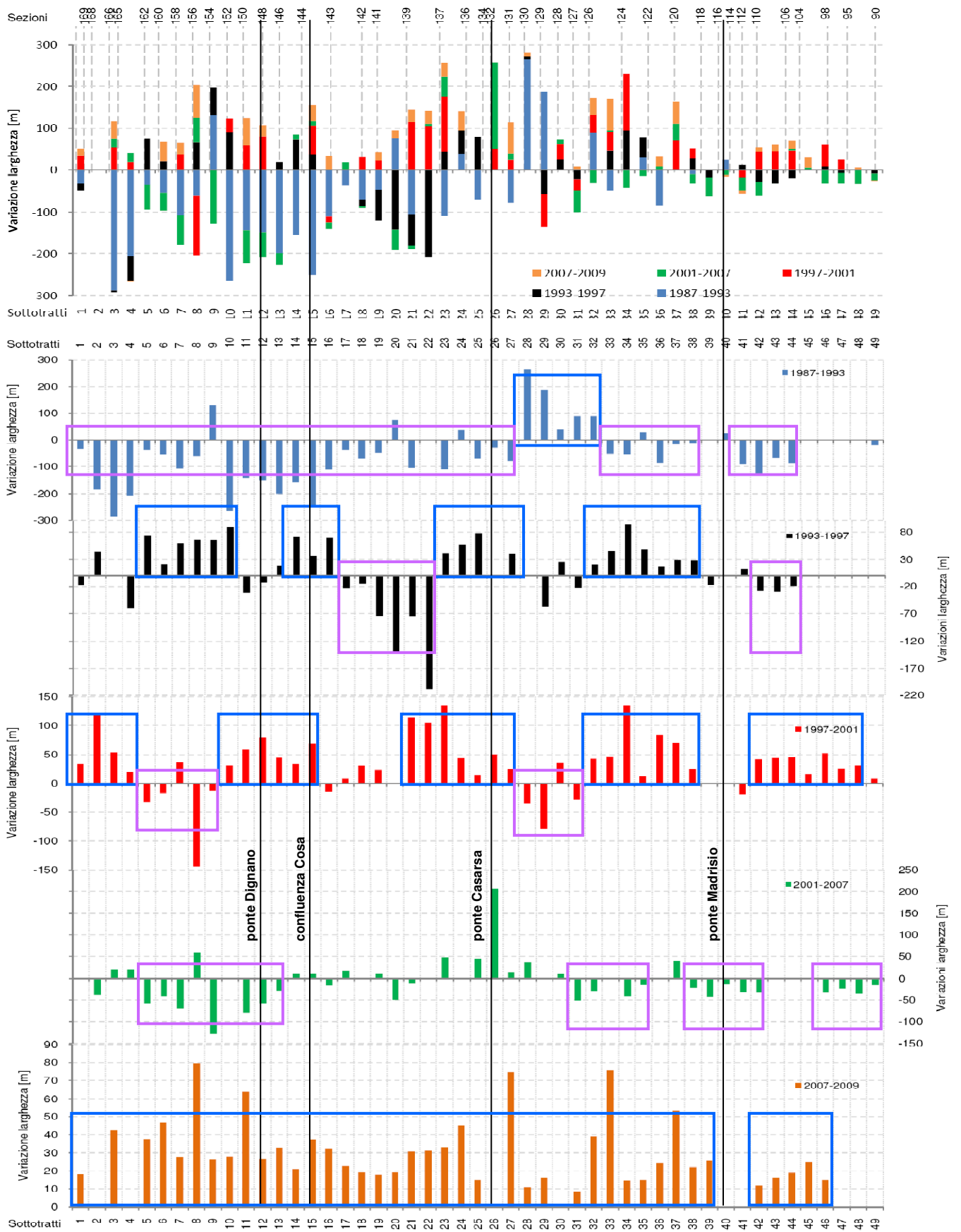


Figura 21 - Variazione nel breve termine [1993-2009] della larghezza media dell'alveo attivo misurata per sottotratti chilometrici

4.3.2 Variazioni altimetriche

Per quanto riguarda i dati altimetrici recenti l'analisi ha trovato le maggiori difficoltà proprio nel reperimento dati. Complessivamente sono state elaborate 10 coppie di rilievi topografici distribuiti tra i bienni 2001/2003 e 2006/2010 (Figura 22). Sono risultate quattro sezioni in aggradazione ed altrettante in incisione; le rimanenti due sezioni sono risultate invariate. Mediamente è risultato un valore di aggradazione pari a 0.12 m, con un innalzamento del fondo massimo pari a 1.04 m ed un picco di incisione di 0.3 m. Integrando i dati topografici con i risultati emersi dai rilievi geomorfologici (Tabella 18) la valutazione media di aggradazione si accentua lievemente spostando il valore medio di aggradazione a 0.17 m. Anche se mediamente a scala di tratto l'indicazione altimetrica appare chiara e di lieve tendenza all'aggradazione, non si può omettere l'evidenza di locali valori di incisione in controtendenza con il *trend* medio, soprattutto nella porzione compresa tra i sottotratti 28-37, ovvero nella porzione mediana del tratto che per prima a metà anni '90 ha manifestato l'allargamento della Fase 3.

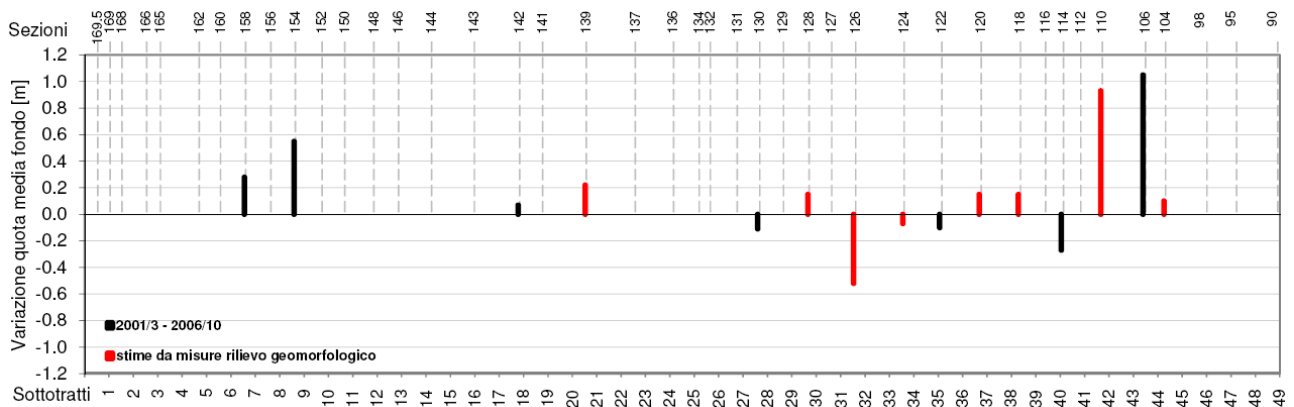


Figura 22 - Variazioni altimetriche nette nel breve termine [2001/2003 - 2006/2010]. Associazione delle indicazioni da rilievi topografici in sezioni storiche [colonne in nero] e geomorfologici [colonne in rosso] in sottotratti a cavallo di sezioni storiche

Cod. tratto	n° misure geomorfologiche [°]	media delle misure di campo [m] [°]	altre evidenze	INDICAZIONE DA SOLO RILIEVO CAMPO	variazione altimetrica da rilievi topografici [m]	INDICAZIONE DA SOLO RILIEVO TOPOGRAFICO
158	4	0.1	x	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE	0.3	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE
154	3	0.2	x	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE	0.6	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE
142	3	0.1	x	EQUILIBRIO	0.1	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE
139	4	0.2	x	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE	-1.7	INCISIONE
137	0	nd	x	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE	0.2	EQUILIBRIO
130	2	-0.4	x	EQUILIBRIO/INCISIONE	0.1	EQUILIBRIO
128	1	0.2	x	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE	nd	nd
126	2	-0.5	x	EQUILIBRIO	-0.4	EQUILIBRIO/INCISIONE
124	3	-0.1	x	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE	-0.6	EQUILIBRIO/INCISIONE
120	3	0.1	x	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE	nd	nd
118	4	0.2	x	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE	1.0	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE
110	3	0.9	x	SEDIMENTAZIONE	0.5	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE
104	4	0.1	x	EQUILIBRIO	1.3	SEDIMENTAZIONE
98	0	nd	x	nd	-0.1	EQUILIBRIO
94	0	nd	x	nd	0.4	EQUILIBRIO/SEDIMENTAZIONE

[*] per una definizione del concetto di "misure geomorfologiche" si veda il capitolo 3.3
 [°] valori POSITIVI indicano BARRE ATTIVE PIU' ALTE DELLA PIANA INONDABILE (AGGRADAZIONE)

Tabella 18 - Riepilogo delle valutazioni relative alle variazioni altimetriche nel breve termine emerse dai rilievi geomorfologici 2007-2010

4.4 Analisi degli impatti antropici

L'associazione dei dati planimetrici a quelli altimetrici svolta nei sottocapitoli precedenti permette di chiudere il quadro di indagine delle variazioni morfologiche degli ultimi 200 anni, ma lascia il passo necessariamente alla valutazione delle possibili cause che le hanno indotte.

Sono innumerevoli i lavori di ricerca che si sono focalizzati sul legame fra variazioni morfologiche fluviali e cause antropiche o naturali. In Tabella 19 è riportato un elenco non esaustivo dei lavori più rilevanti sull'argomento. Il caso studio del fiume Tagliamento s'inserisce tra questi lavori e spicca per la significativa disponibilità di dati e la completezza di copertura spazio-temporale che hanno permesso contestualmente a questo lavoro di ricerca di elaborare valutazioni quantitative per ognuna delle potenziali cause di variazione.

Riferimento bibliografico	Estrazione di sedimenti	Variazioni dell'uso del suolo a scala di bacino	Interventi di sistemazione a scala di bacino	Interventi di canalizzazione a scala di tratto	Realizzazione di invasi artificiali	Variazione regime idrico per cause antropiche o climatiche	Corsi d'acqua
Surian, 1999	x			x	x		Piave (Italia)
Surian e Rinaldi, 2003	x			x			Vari fiumi italiani
Rinaldi et al, 2005	x						Tagliamento, Brenta, Arno (Italia); Ropa, Wisloka (Polonia)
Surian et al, 2009d	x			x	x	x	Vari fiumi italiani
Surian, 2006; Surian et al, 2009e; Surian et al, 2008	x		x	x	x		Brenta, Piave, Tagliamento, Torre, Cellina (Italia)
Zanoni et al, 2008	x		x			x	Tagliamento (Italia)
Rinaldi, 2003	x	x		x	x		Vari fiumi della Toscana (Italia)
Wyzga, 1993	x			x			Raba (Polonia)
Liebault e Piegay, 2001		x					Roubion (Francia)
Kondolf et al, 2002	x	x	x				Drome (Francia), Pine Creek (USA)
Winterbottom, 2000				x		x	Tay, Tummel (Scozia)
Gurnell et al, 1994				x		x	Dee (UK)
Rinaldi e Simon, 1998	x	x	x		x		Arno (Italia)
Marston et al, 2003							Malnant (Francia)
Petit et al, 1996				x			Rhone (Francia)
Wyzga, 2001	x			x			Skawa, Wisloka (Polonia)
Uribelarrea et al, 2003	x			x	x	x	Jamara, Tagus (Spagna)
Mas-Pla et al, 1999	x						Fluvia (Spagna)
Kondolf, 1994; Kondolf, 1997	x				x		Stony Creek (USA)
Collins e Dunne, 1989	x				x		Humptulips River, Wynoochee River, Satsop River (USA)
Collins e Dunne, 1990	x				x	x	Cache Creek, Dry Creek, Tujung Wash, Humptulips, Wynoochee River, Satsop River, White River (USA), Lower Manawatu River (New Zealand)
Peiry, 1987	x			x			Arve (Francia)
Sear e Archer, 1998	x						Wooler Water (UK)
Page e Heerdegen, 1985	x						Lower Manawatu River (New Zealand)
Garcia-Ruiz et al, 1997		x					Aisa (Spagna)
	x	x	x	x	x	x	Ain (Francia)
Gregory e Park, 1974					x		River Tone (UK)
Wishart et al, 2008	x						River Wear (UK)
Martin-Vide et al, 2010	x						Gallego (Spagna)
Jiongxin, 1997					x		Hanjiang (Cina)
Jiongxin, 1996					x		Yongdinghe, Hanjiang, Giallo)Cina)
Williams e Wolman, 1984					x		Vari fiumi (USA)

Tabella 19 - Revisione bibliografica degli studi focalizzati sulla correlazione tra variazioni morfologiche fluviali e cause antropiche/naturali

4.4.1 Attività estrattiva di sedimenti in alveo

“La ditta di scavi è nata ufficialmente nel 1952, ma si andava nel Tagliamento anche prima, con il trattore e il cavallo, già nel 1948 [...] Ho iniziato a cavare ghiaia e ho costruito l'impianto nel 1957. All'inizio cavavamo la ghiaia con la pala addirittura! [...] Potevamo raccogliere quanta ghiaia volevamo, non c'era nessun vincolo. Attorno al 1965 – 1970, dopo quasi vent'anni sono venuti i vincoli. Non erano dei veri e propri ostacoli: si pagava una quota, si poteva raccogliere la ghiaia, che poi veniva pesata, [...] Avevamo circa cento operai che lavoravano per noi e prelevavamo circa duecentomila cubi all'anno [...] (Abbiamo lavorato fino a nove anni fa [...])”

Testimonianze, 2005

Quello riportato in calce costituisce parte di una testimonianza rilasciata nel 2003 dal proprietario di una delle cave attive sul Tagliamento fino a metà anni '90 nei pressi di Villanova in comune di San Daniele del Friuli (all'altezza dei sottotratti 6-7). Le indicazioni che si possono trarre da questa interessantissima testimonianza confermano pienamente il *trend* e la tempistica dei dati riportati in Figura 23 riferiti ai volumi ufficiali di sedimenti estratti dall'alveo del fiume Tagliamento (intera asta) e dai suoi principali affluenti tra il 1970 e il 1991 (concessioni rilasciate dal Genio Civile di Udine). La testimonianza avvalorava anche l'ipotesi che i volumi effettivamente cavati sono stati sensibilmente superiori a quelli concessi e altresì conferma il periodo di interruzione delle attività estrattive, ovvero il 1994, anno di entrata in vigore della Legge Nazionale sul Demanio Pubblico Idrico n.37/1994 che sancisce ufficialmente la necessità di sottoporre a verifica idraulica ogni autorizzazione all'escavazione rimandando ai piani di bacino la definizione di dettaglio dei regolamenti.

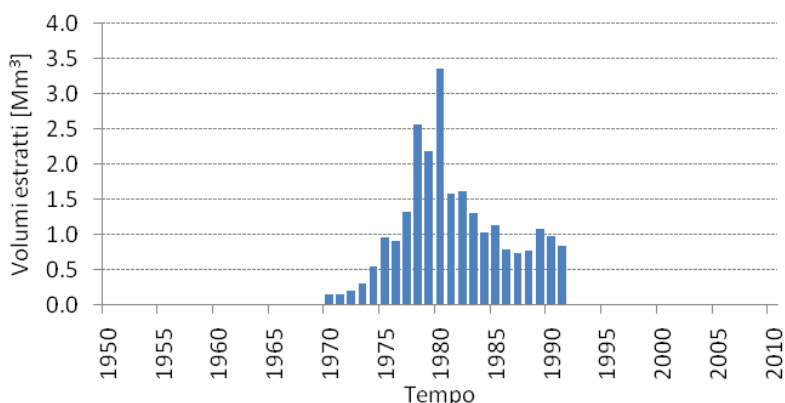


Figura 23 - Andamento dei volumi estrattivi concessi (riferiti a tutto il bacino del fiume Tagliamento, dati pubblicati in Rinaldi et al, 2005)

Dalla testimonianza riportata emerge pure che l'attività estrattiva è iniziata fin dalla seconda metà degli anni '50 quindi ben prima dell'anno di avvio delle registrazioni dei volumi. A rafforzare queste indicazioni si trovano i valori graficati in Figura 24 e Figura 25 relativi all'estensione delle aree di estrazione di ghiaie digitalizzate da foto aeree.

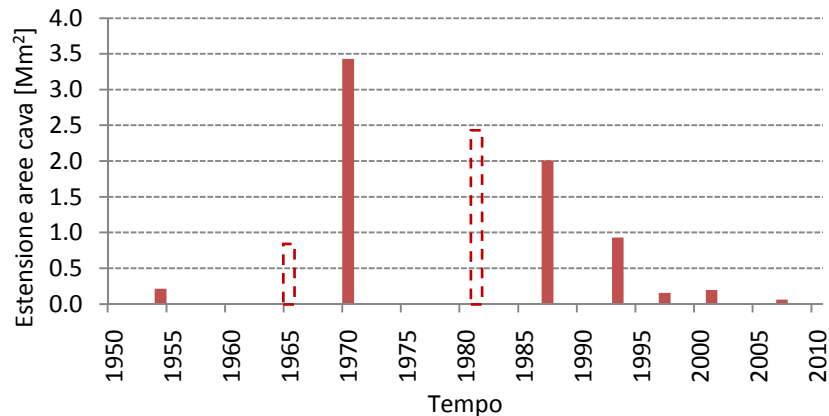


Figura 24 - Variazione temporale dell'estensione planimetrica dei siti di estrazione diretta in alveo (aree digitalizzate da foto aeree, estensioni riferite a tutto il tratto studio)

La digitalizzazione ha interessato solo le aree di evidente estrazione poste internamente all'alveo o comunque ricadenti all'interno di una fascia di inviluppo costruita utilizzando tutti gli alvei digitalizzati dal 1805 al 2007. Non essendo garantita la totale copertura del tratto per gli anni 1966 e 1982 (si veda anche la Tabella 3), all'interno di Figura 24 si sono stimati i valori associati a queste annate (colonne tratteggiate) estendendo a tutti i sottotratti lo stesso rapporto tra aree calcolato nelle zone di concomitanza con l'annata 1970. Risulta così che nel 1966 nella porzione compresa tra i sottotratti 26-49 (Figura 25) l'estensione delle aree di cava corrispondeva a circa il 25% di quelle misurate negli stessi tratti nel 1970. Allo stesso modo nel 1981-83 (indicazione "1982" in Figura 24 e Figura 25), l'estensione corrispondeva a circa il 74% di quella digitalizzata nel 1970. Il 1970 sembra quindi corrispondere proprio con l'anno di massima estensione. Analizzando la distribuzione delle aree di cava risulta evidente la loro concentrazione nella porzione mediana del tratto a cavallo dei ponti di Casarsa della Delizia dove ancora oggi permangono attivi a fini di stoccaggio alcuni dei siti interessati in passato dall'escavazione diretta. Attraverso le analisi effettuate non si è cercato di giungere a stime, anche se grossolane, dei volumi reali estratti; si ritiene tuttavia che nonostante il carico di errori e di approssimazione impliciti nei valori prodotti, gli andamenti generali possono essere considerati ragionevolmente attendibili.

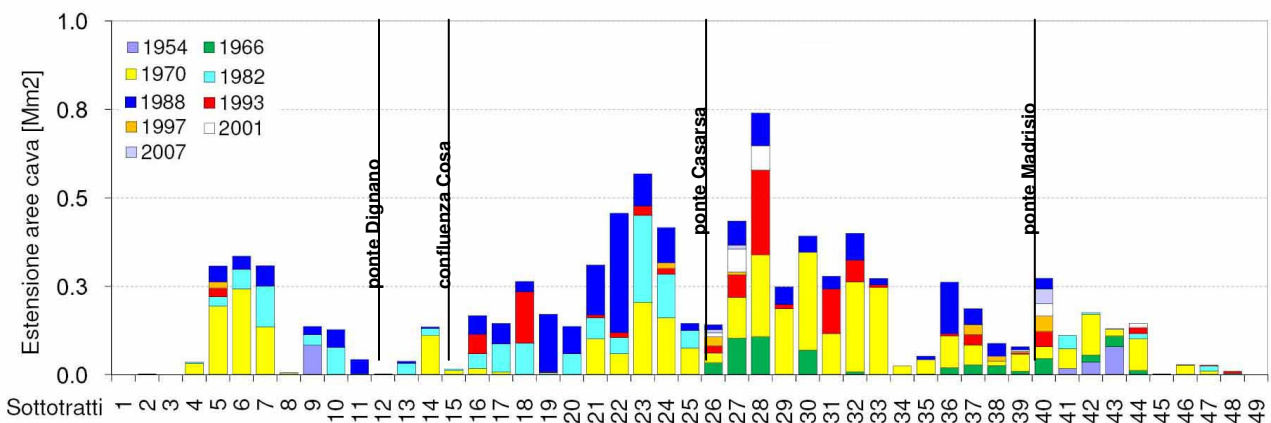


Figura 25 - Distribuzione cumulata delle aree estrattive in alveo digitalizzate da foto aeree misurate per sottotratti chilometrici

Il volume complessivo graficato in Figura 23 risulta di circa 24 Mm³ in 22 anni. Essendo questo valore riferito a tutta l'asta del Tagliamento si può ipotizzare che almeno la metà dei volumi fossero riferiti ad escavazioni dirette ricomprese nei 49 km del tratto studio. Il picco del 1980 (3.5 Mm³)

potrebbe essere quindi ridimensionato e fissato a circa 1.7 Mm³/anno. Nonostante queste assunzioni (tendenti evidentemente al ribasso) si ottengono picchi dei valori annui di estrazione davvero eccezionali se raffrontati con il trasporto medio annuo stimabile per tratti fluviali simili a quello oggetto di studio.

Rimandando al Parte III per ulteriori approfondimenti, si anticipa qui che studi finalizzati al calcolo del bilancio di sedimenti fluviale a scala di tratto in realtà fluviali assimilabili a quella del Tagliamento, hanno fornito stime di trasporto solido al fondo medio annuo intorno ai 100,000 m³, un valore inferiore al picco degli anni '80 per più di un ordine di grandezza.

4.4.2 Interventi di canalizzazione a scala di tratto

Come indicato in Tabella 3 al sottocapitolo. 3.1.1, per tutte le annate disponibili a copertura del tratto studio oltre ai margini attivi, alle isole fluviali e alle zone di cava è stata eseguita la digitalizzazione delle opere di canalizzazione presenti distinguendo tra repellenti, difese spondali e sistemi di arginature. I grafici riportati nelle seguenti Figura 26, Figura 27 e Figura 28 indicano chiaramente una diffusione notevole di tutte e tre queste forme di canalizzazione, con alcune diversificazione che meritano considerazioni specifiche.

I repellenti fluviali hanno avuto una crescita numerica ragguardevole tra il 1954 e il 1970, ma la loro estensione complessiva era molto elevata già a partire dal 1927 (circa il 72% rispetto al massimo del 1970). Risale infatti ai primi anni '20 la realizzazione dei grandi pennelli tra Dignano e Pinzano ancora oggi esistenti in destra (n. 7 pennelli, 7 km totali) e sinistra idrografica (n. 6 pennelli, 2.9 km totali). Il loro grado di attività è stato pressoché totale fino all'avvio del restringimento descritto al sottocapitolo. 4.2.1 più intenso a partire dal 1970. A seguito della fortissima disattivazione del tratto a monte di Spilimbergo (sottotratti 1-13, restringimento dell'ordine di alcune centinaia di metri) tra il 1970 e la metà degli anni '80 buona parte dei repellenti storici si è temporaneamente disattivata ed ancora oggi solo i pennelli in sinistra idrografica e di questi solo le porzioni collocate in frodo alla sponda espletano direttamente la propria funzione. Il calo numerico ed estensivo seguito al 1970 ha interessato anche buona parte dei repellenti minori realizzati a partire dal '54, calo che ha portato al minimo assoluto (numerico e di estensione) di metà anni '90. Il recente allargamento (4.3.1) non solo ha riattivato alcuni dei pennelli minori di passata realizzazione, ma ha anche indotto i Servizi Tecnici Regionali del Friuli Venezia Giulia e del Veneto, attualmente competenti della manutenzione e progettazione di nuove strutture in alveo, alla realizzazione di nuovi pennelli fluviali all'altezza di Casarsa della Delizia (sottotratto 26), Carbona (sottotratto 34), Madrisio (sottotratto 40) e Ronchis (sottotratto 45).

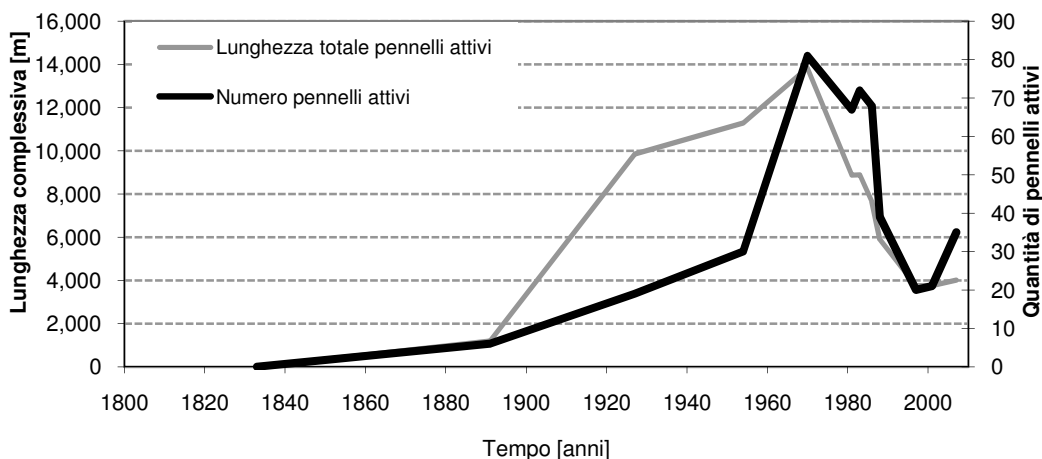


Figura 26 - Variazione negli ultimi 200 anni del numero e dello sviluppo dei repellenti fluviali attivi nel tratto studio

Diversamente dai repellenti le difese spondali mostrano una crescita costante in numero ed estensione ancora fino agli anni più recenti. Le difese sono concentrate in modo particolare in vicinanza dei ponti di Casarsa, Dignano e Madrisio, in corrispondenza dello scarico in Tagliamento dello scolmatore del torrente Corno (sottotratto 5) e nei sottotratti più vallivi dove si riducono le distanze tra sponde attive e arginature (sottotratti 34,37,38,46,47); imponenti realizzazioni in particolare negli anni '80-'90 hanno interessato in sponda sinistra i sottotratti appena a valle della confluenza Cosa, come evidente anche nell'andamento di Figura 27.

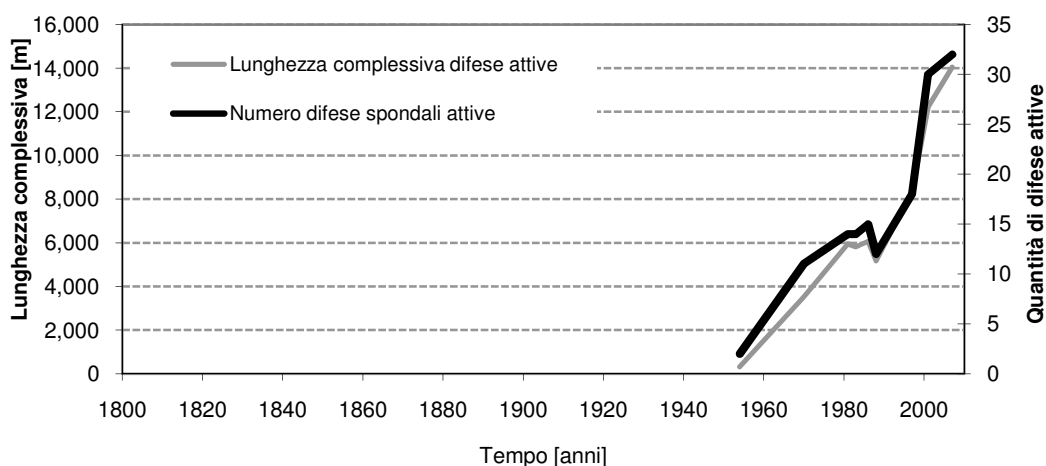


Figura 27 - Variazione negli ultimi 200 anni del numero e dello sviluppo delle difese spondali attive nel tratto studio

Gli argini sono stati la prima forma di difesa realizzata estensivamente su grande parte del tratto studio. Il sistema di arginelli già presenti nel 1833 realizzati a difesa solo di alcune località del basso corso tra le più a rischio (Musson, Canussio, Fraforeano, Ronchis), è stato sostituito nel 1891 da un imponente sistema di arginature solo in parte modificato ed ampliato nella seconda metà del secolo scorso. Attualmente le arginature iniziano in sinistra idrografica all'altezza di Turrída (sez. 142 – sottotratto 18), mentre in destra idrografica si sviluppano in continuità alle difese spondali esistenti presso la confluenza con il torrente Cosa (sez. 144 - sottotratto 15).

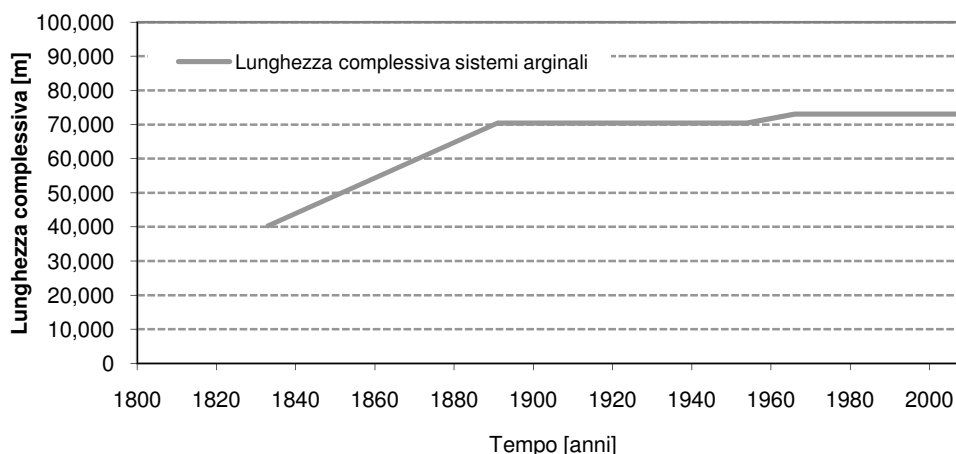


Figura 28 - Variazione negli ultimi 200 anni dello sviluppo degli argini maestri nel tratto studio

4.4.3 Variazioni dell'uso del suolo nel bacino montano

Per l'analisi dell'evoluzione dell'uso del suolo a scala di bacino sono stati reperiti ed elaborati i dati descritti sinteticamente nella seguente Tabella 20.

Anno	Fonte	Tipo	N° classi	Aggregazione	Copertura
1828	Scarpa, 1963; Lorenzini, 2006	Dati catasto francese-austriaco	7. Terreni a coltura, prato, pascolo, bosco, palude, incolto, incolto sterile	Indicazioni aggregate a scala di sottobacino di ordine 1-2	Solo bacino a monte di Tolmezzo
1927	Regio, Magistrato, Alle, Acque, 1927	Relazione conoscitiva servizio tecnico di bacino	4. Rupe, bosco, pascoli, coltivo	Indicazioni specifiche per sottobacini fino all'ordine 3	Bacino montano
1990	Agenzia per la protezione Ambientale – APAT. Progetto CLC 1990	Dati Corine Land Cover ottenuti da interpretazione dati LANDSAT	36 classi a 3 livelli di approfondimento	Dato disaggregato	Copertura completa di tutto il bacino idrografico
2006	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale	Dati Corine Land Cover ottenuti da interpretazione dati LANDSAT	36 classi a 3/4 livelli di approfondimento	Dato disaggregato	Copertura completa di tutto il bacino idrografico

Tabella 20 – Riepilogo fonti dati uso del suolo

Il collegamento tra tutte le differenti classi (Catasto 1828, Magistrato Alle Acque di Venezia 1927, Corine 1990 e 2006) è stato impostato secondo l'associazione riportata nella seguente Tabella 21.

CODICE CORINE 1990 - 2006	CLASSI_1828	CLASSI 1927	CODICE CORINE 1990 - 2006	CLASSI_1828	CLASSI 1927
111	Urbano	Urbano	244	Bosco	Bosco
112	Urbano	Urbano	311	Bosco	Bosco
121	Urbano	Urbano	312	Bosco	Bosco
122	Urbano	Urbano	313	Bosco	Bosco
123	Urbano	Urbano	321	Pascolo, Prato	Pascolo
124	Urbano	Urbano	322	Pascolo, Prato	Pascolo
131	Urbano	Urbano	324	Bosco	Bosco
132	Urbano	Urbano	331	Altro	Altro
133	Urbano	Urbano	332	Incolto	Rupe
141	Urbano	Urbano	333	Pascolo, Prato	Pascolo
142	Urbano	Urbano	335	Altro	Altro
211	Coltivo	Coltivo	411	Paludi	Altro
213	Coltivo	Coltivo	421	Paludi	Altro
221	Coltivo	Coltivo	422	Altro	Altro
222	Coltivo	Coltivo	511	Altro	Altro
231	Coltivo	Coltivo	512	Altro	Altro
242	Coltivo	Coltivo	521	Altro	Altro
243	Coltivo	Coltivo	522	Altro	Altro

Tabella 21 - Tabella di collegamento tra le classi di uso del suolo adottate internamente alle fonti utilizzate per l'analisi

Il differente grado di aggregazione e copertura dei dati 1828 e 1927 ha imposto che le valutazioni della variazione di uso del suolo tra le due annate storiche e quelle più recenti (1990,2006) fossero effettuate separatamente su areali parzialmente differenti. I dati 1828 sono stati reperiti in forma aggregata per 4 sottobacini (Degano, But, Fella e Valle del Tagliamento comprensiva dell'Alta valle, della valle del Lumiei e della conca tolmezzina) e non sono state reperite informazioni riferite alla porzione di bacino compresa tra Tolmezzo e Pinzano. Invece i dati del 1927 pur scendendo ad un dettaglio spaziale elevato (le percentuali di uso del suolo sono riferite a sottobacini montani di ordine molto alto), presentano numerose lacune che non hanno permesso di comprendere integralmente il bacino montano o quanto meno di coprire in pieno la porzione cui fanno riferimento i dati catastali del 1828. E' stato quindi necessario effettuare le valutazioni di variazione su porzioni di territorio non del tutto corrispondenti (differenza di estensione pari a circa 400 km²).

Come evidente in Figura 29 i dati 1927 sono estesi a tutto il bacino a monte di Pinzano, ma presentano evidenti lacune riferite alle porzioni di fondovalle. Per contro i dati catastali 1828 sono completi spazialmente, ma non scendono a valle della conca tolmezzina.

	Percentuali rispetto al totale [%]						Totali
	INCOLTO	BOSCO	PASCOLO + PRATO	PASCOLO	URBANO	ALTRO	
1828	32.2	21.4	35.0	11.3	nd	0.1	100.0
1990	2.9	72.1	15.8	6.5	0.8	1.9	100.0
2006	2.6	72.3	15.9	6.3	1.1	1.8	100.0

	Aree [km ²]						Totali
	INCOLTO	BOSCO	PASCOLO + PRATO	COLTIVO	URBANO	ALTRO	
1828	590.8	391.6	642.2	207.8	nd	1.1	1,833.5
1990	54.1	1,352.1	296.0	122.1	15.6	34.9	1,874.8
2006	47.9	1,355.5	297.5	118.8	20.6	33.7	1,874.1

Tabella 22 - Riepilogo variazioni d'uso del suolo nel periodo 1828-1990-2006

	Percentuali rispetto al totale [%]						Totali
	RUPE	BOSCO	COLTIVO	PASCOLO	URBANO	ALTRO	
1927	18.5	49.7	12.1	19.7	nd	nd	100.0
1990	3.3	73.6	16.9	4.9	0.7	0.6	100.0
2006	2.9	73.5	17.4	4.8	0.8	0.6	100.0

	Aree [km ²]						Totali
	RUPE	BOSCO	PASCOLO	COLTIVO	URBANO	ALTRO	
1927	259.4	697.8	170.0	276.0	nd	nd	1,403.2
1990	45.7	1,032.7	237.6	69.4	9.5	8.3	1,403.2
2006	41.0	1,030.7	243.9	67.8	11.5	8.2	1,403.2

Tabella 23 - Riepilogo variazioni d'uso del suolo nel periodo 1927-1990-2006

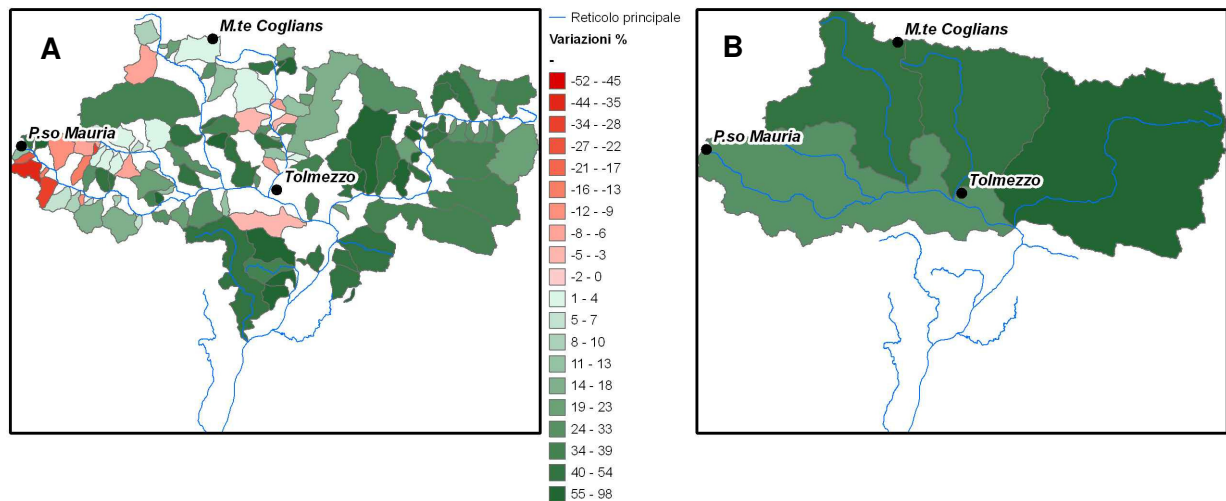


Figura 29 - Mappatura variazioni copertura boschiva nei periodi 1927-2006[A] e 1828-2006 [B]

Ritenendo comunque di non incorrere in errori grossolani, si è ritenuto di poter forzare l'accostamento dei valori di variazione percentuale riportati in Tabella 22 per il 1828 ed in Tabella 23 per il 1927, per ottenere gli andamenti di Figura 30. Qui emerge chiaramente a scala di bacino un drastico aumento dal 1828 ad oggi della copertura boschiva che raggiunge attualmente percentuali superiori al 70% a netto discapito delle aree dedicate al pascolo o lasciate incolte. Per contro si mantiene costante la quota parte di territorio dedicata alla coltivazione, comunque mediamente piuttosto limitata.

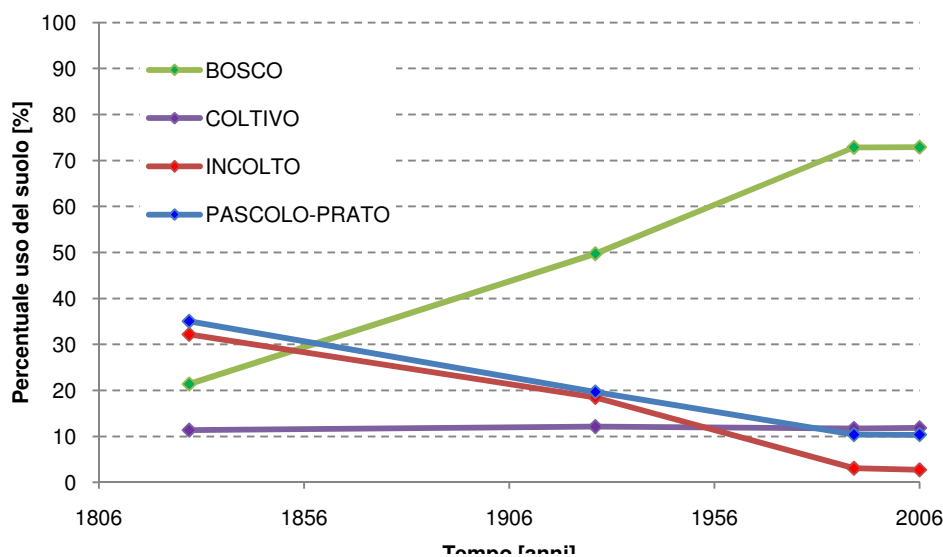


Figura 30 - Variazione negli ultimi 200 anni dell'uso del suolo nel bacino montano del fiume Tagliamento

4.4.4 Sistemazioni idraulico-forestali a scala di bacino

Per la quantificazione e la definizione dell'evoluzione negli ultimi due secoli del complesso delle opere di sistemazione montana nel bacino del Tagliamento si sono utilizzati esclusivamente i dati messi a disposizione dal Servizio Cartografico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia attraverso il servizio WebGIS regionale (<http://www.irdat.regione.fvg.it/Consultatore/GISViewer.jsp>).

Il database regionale fornisce una notevole quantità di informazioni specifiche per le principali opere di sistemazione montana:

- briglie;
- opere di canalizzazione (locali tombature dei corsi minori di competenza regionale);
- opere di difesa spondale;
- soglie di fondo;
- ponti;
- repellenti fluviali.

Ai fini di questo lavoro sono state considerate le informazioni relative all'anno di costruzione e allo stato di attività. Escludendo le opere montane attualmente non attive e rielaborando le date di realizzazione indicate per buona parte degli elementi cartografati (circa il 64%), è stato possibile ricostruire le curve cumulate di numerosità di ogni singola tipologia di struttura (Figura 31) e anche le curve di frequenza temporale di realizzazione (Figura 32).

Dall'analisi dei grafici in Figura 31 e Figura 32 e dei valori di sintesi riportati in Tabella 24 emergono alcune considerazioni significative:

- tra le strutture dominano per numerosità le briglie (3,823 unità, 28% del totale) e le difese spondali (5,051 unità, 37% del totale), mentre ridotte risultano le realizzazioni di repellenti fluviali (464 unità, 3%) effettivamente inadatti per la difesa spondale in torrenti montani ad alta energia;

- lo sviluppo sistematico di un sistema di opere montane di protezione e di viabilità ha inizio solo verso la fine del XIX secolo;
- fino agli anni '30 il numero di opere rimane limitato nel numero ma tra il 1930 e il 1950 viene realizzato circa il 42% di tutte le strutture attualmente attive;
- tra il 1954 e metà anni '70 le realizzazioni proseguono con velocità più limitata, ma accelerano nuovamente negli anni '80 al punto che circa l'88% delle opere montane risulta realizzato prima del 1987;
- negli ultimi 10 anni sono stati eseguite quasi esclusivamente opere spondali, soglie e opere di canalizzazione con un picco relativo nel 2000 (114 opere spondali, 64 briglie, 39 opere di canalizzazione) concentrate prevalentemente nell'Alta Val Tagliamento a monte della traversa fluviale di Caprizzi.

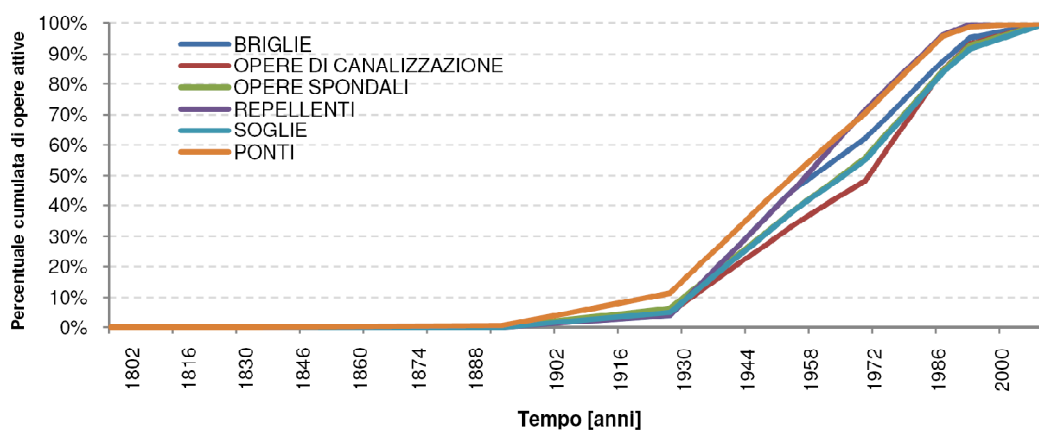


Figura 31 - Curve cumulate di crescita temporale del numero delle principali opere di sistemazione idraulico - forestale attive nel bacino montano del Tagliamento

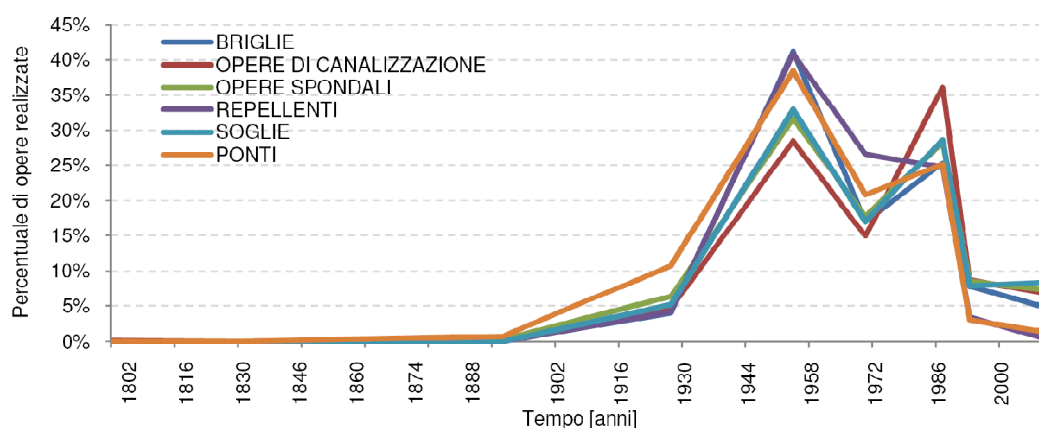


Figura 32 - Variazione temporale del numero delle realizzazioni di opere di sistemazione idraulico - forestale nel bacino montano del Tagliamento

Anno	BRIGLIE	CANALIZZAZIONI	DIFESE SPONDALI	REPELLENTI	SOGLIE DI FONDO	PONTI	
1805	0	1	0	0	0	0	
1833	0	0	0	0	0	0	
1891	2	3	8	0	0	7	
1927	90	47	211	11	35	108	
1954	934	290	1,059	109	224	388	
1970	386	152	594	71	116	210	
1987	575	368	946	66	195	254	
1993	178	89	286	9	54	30	
2010	107	69	243	1	57	13	
	2,272	1,019	3,347	267	681	1,010	Totale strutture attive con indicazione anno di costruzione
	1,551	522	1,704	197	391	533	Totale strutture attive senza indicazione anno di costruzione
	3,823	1,541	5,051	464	1,072	1,543	Totale per tipologia di struttura
						13,494	TOTALE STRUTTURE ATTIVE

Tabella 24 - Numero di strutture realizzate nel bacino a monte di Pinzano nel periodo 1805-2010
(Dati Regione Friuli Venezia Giulia – Servizio WebGIS
<http://www.irdat.regione.fvg.it/Consultatore/GISViewer.jsp>)

4.4.5 Impatti legati alla presenza di invasi artificiali

Come indicato al sottocapitolo. 2.3 solo una minima parte del bacino a monte di Pinzano è sotteso a sbarramenti artificiali di dimensioni significative (2.9%); questi invasi (Sauris e Verzeghis) sono posti su affluenti diretti del Tagliamento (torrente Lumiei e torrente Ambiesta) ed entrambi distano alcune decine di chilometri dal tratto studio. Eventuali effetti di riduzione del flusso di sedimenti al fondo dovuti alla loro presenza si possono ritenere trascurabili in considerazione dell'estensione modesta dell'area sottesa dalle dighe e dalla loro distanza dal tratto in esame.

Anche per quanto riguarda l'influenza sul regime idrico uno studio recente (Bertoldi et al, 2009a) ha mostrato come i deflussi in transito a Pinzano ricalcano fedelmente il regime pluviometrico descritto al sottocapitolo. 2.4 ovvero manifestano oscillazioni significative solo a frequenza semestrale. In questo stesso lavoro gli autori hanno sottoposto ad analisi *wavelet* la serie idrometrica di Villuzza (idrometro presso la stretta di Pinzano) dal 1981 al 2007 dimostrando l'assenza di regolarità imposte al regime delle portate che possano considerarsi significative ai fini morfologici, sia in termini di frequenza sia di entità dei picchi di piena formativi; lo studio ha dimostrato quindi come per il Tagliamento non sussistano ad oggi effetti di *hydro-peaking* significativi o di abbattimento dei massimi valori di deflusso ricollegabili alla presenza degli invasi idroelettrici esistenti (Surian et al, 2009e).

La stessa analisi ha però evidenziato l'esistenza di lievi fenomeni di *hydro-peaking* a frequenza giornaliera e settimanale sulle basse portate. Oscillazioni giornaliere sono facilmente percepibili anche solo visualizzando l'andamento dei battenti orari registrati dalla stazione idrometrica regionale esistente all'altezza di Pinzano (Figura 33).

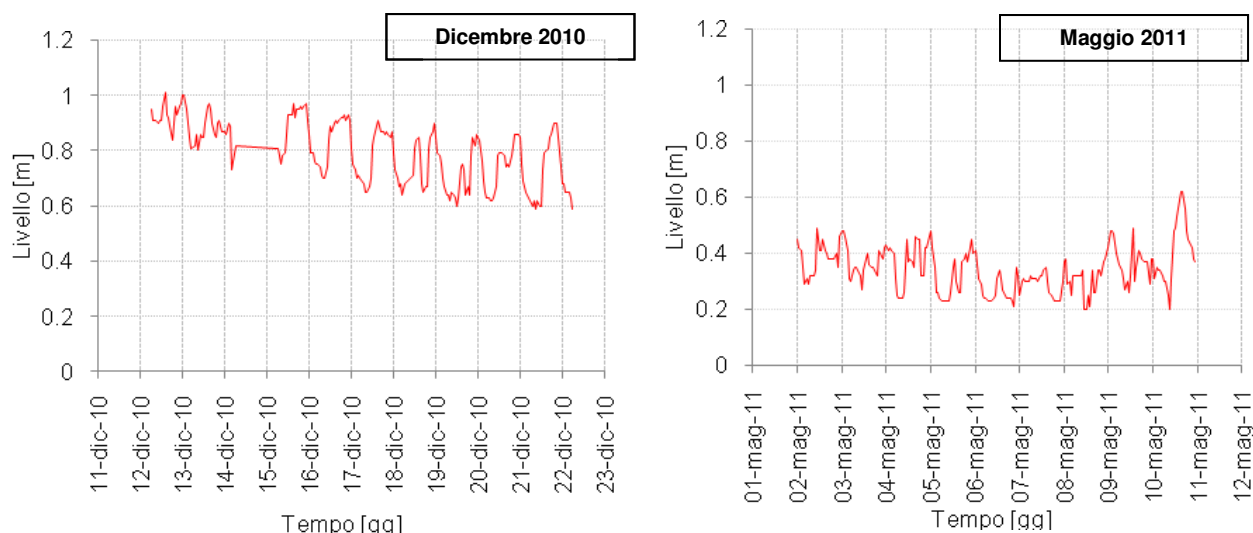


Figura 33 - Oscillazione giornaliera osservabile presso la stazione di Pinzano [Villuzza, San Pietro] – effetto di *hydropeaking* dovuto agli scarichi programmati dal lago di Cavazzo della centrale di Somplago

L'entità del fenomeno rimane trascurabile ai fini geomorfologici, ma non si possono escludere impatti sulla componente micro-biotica locale (Paetzold et al, 2008) o sul rispetto del Deflusso Minimo Vitale del tratto (DMV), già fortemente influenzato dallo sfruttamento della risorsa a fini produttivi ed idroelettrici anche nei periodi di magra (Brusarosco et al, 2009), soprattutto nel tratto ricompreso tra la traversa fluviale di Caprizzi e Tolmezzo (Paronuzzi, 2006).

4.4.6 Variazioni del regime idrologico

Le indicazioni riportate in Bertoldi et al, 2009a e riprese nel sottocapitolo precedente permettono di escludere la sussistenza di variazioni significative sul regime idrico del tratto di studio solo nel periodo 1981-2007. Per investigare finestre temporali più ampie che permettano di individuare eventuali variazioni riconducibili a fattori climatici è stato elaborato il grafico riportato in Figura 34 in cui sono riportati tutti i livelli associati all'idrometro storico installato presso Venzone circa 23 km a monte di Pinzano.

In Figura 34 sono riportati solo i livelli superiori alla soglia di 1.9 m rispetto allo zero idrometrico locale; si tratta di un livello corrispondente ad eventi con tempo di ritorno di poco inferiore ad 1 anno. Pur non disponendo di valutazioni di dettaglio sull'effettiva variazione della forma e della quota media del fondo della sezione su cui è installato l'idrometro si ritiene comunque di poter escludere l'esistenza di *trend* significativi di diminuzione del valore dei picchi o della loro frequenza.

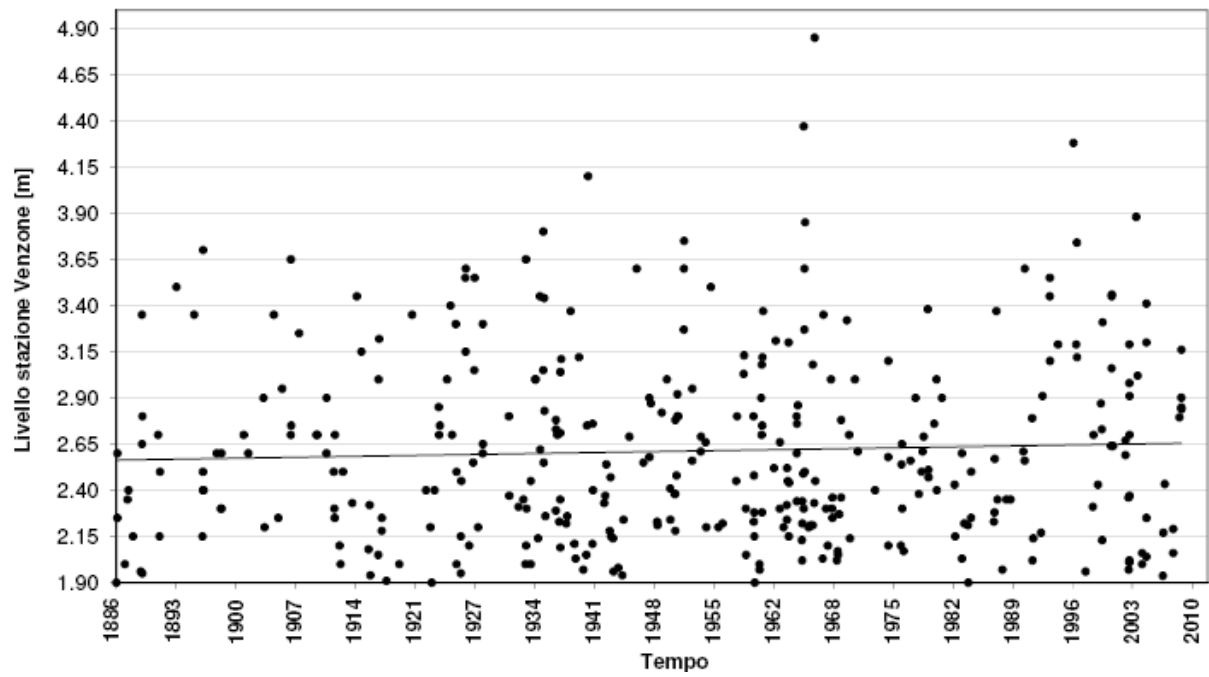


Figura 34 - Serie idrometrica 1886 – 2010 presso la stazione di Venzone (livello rispetto allo zero idrometrico locale)

5 Discussione

Le discussioni ai risultati esposti nei sottocapitoli precedenti sono stati organizzati in tre punti, in funzione degli obiettivi preposti per questa prima parte del lavoro indicati al sottocapitolo 1.2.

Gli obiettivi possono essere così sintetizzati:

1. testare l'attendibilità del metodo di rilievo geomorfologico utilizzato (Rinaldi, 2008; Surian et al, 2009b) ovvero verificare la corrispondenza tra le indicazioni da rilievo topografico e quelle da rilievo geomorfologico (obiettivo anche del progetto PRIN 2007) - sottocapitolo 5.1.
2. verificare l'applicabilità specifica al fiume Tagliamento del CEM introdotto in Surian, 2006 (definito modificando il modello concettuale presentato in Surian e Rinaldi, 2003); portare dati e considerazioni per l'implementazione dello *stage IV* del CEM Surian, 2006 relativo alla fase più recente di variazioni morfologiche (in modo del tutto analogo a quanto fatto per i corsi appennini Vara, Magra, Cecina e Panaro in Rinaldi et al, 2008b e per il fiume Brenta in Surian e Cisotto, 2007) - sottocapitolo 5.2.
3. fornire indicazioni specifiche riguardo ai legami causa-effetto alla base delle variazioni morfologiche manifestate dal Tagliamento negli ultimi 200 anni - sottocapitolo 5.3.

5.1 Test della tecnica di rilievo geomorfologico di Rinaldi (2008)

I risultati dell'applicazione delle schede di rilievo geomorfologico sono sinteticamente riportati nella seguente Tabella 25, dove per ogni sottotratto vengono riportate le valutazioni relative alle tendenze nel breve (ultimi 10-15 anni) e medio termine (all'incirca gli ultimi 50 anni) distinguendo tra

- indicazioni emerse dall'applicazione esclusiva delle misure e delle evidenze geomorfologiche;
- indicazioni desumibili dalla sola comparazione dei dati topografici;
- valutazione finale complessiva da rilievo espressa combinando dati topografici e rilievi geomorfologici;
- indicazione sintetica del livello di corrispondenza tra valori da rilievo geomorfologico e topografico.

Come evidente in Tabella 25 la valutazione delle variazioni nel lungo termine con rilievo geomorfologico risulta nella maggior parte dei casi perfettamente corrispondente con quella desumibile da solo rilievo topografico in quanto per 10 sottotratti su 13 (77%) le indicazioni sono concordi. Solo in 2 casi su 13 la discrepanza risulta lieve ed in un unico caso c'è netta discordanza.

Per contro le valutazioni da rilievo geomorfologico delle variazioni nel breve termine (tendenze attuali secondo la denominazione riportate nelle schede) risultano invece poco affini a quelle da rilievo topografico. Solo in 3 sottotratti su 13 (23%) c'è perfetta concordanza, per 5 sottotratti risulta lieve discordanza e per 2 sottotratti la discordanza risulta invece moderata. E' risultato un unico caso di netta discordanza (139 – equilibrio/sedimentazione da rilievo geomorfologico contro incisione da rilievo topografico).

Cod. tratto	TENDENZE ATTUALI [VARIAZIONI BREVE TERMINE]				VARIAZIONI MORFOLOGICHE [VARIAZIONI LUNGO TERMINE]			
	INDICAZIONE DA SOLO RILIEVO CAMPO	INDICAZIONE DA SOLO RILIEVO TOPOGRAFICO	INDICAZIONE FINALE	LIVELLO DI CORRISPONDENZA	INDICAZIONE DA SOLO RILIEVO CAMPO	INDICAZIONE DA SOLO RILIEVO TOPOGRAFICO	INDICAZIONE FINALE	LIVELLO DI CORRISPONDENZA
158	E / S	E / S	E / S		INV	INV	INV	
154	E / S	E / S	E / S		INV	INV	INV	
142	E	E / S	E / S		INV	INC MOD	INC MOD	
139	E / S	I	E		INC MOD	INC MOD	INC MOD	
137	E / S	E	E / S		INC MOD	INC MOD	INC MOD	
130	E / I	E	E		INC MOD	INC MOD	INC MOD	
128	E / S	nd	E / S		INC MOD	nd	INC INT	
126	E	E / I	E		INC MOD	INC MOD	INC MOD	
124	E / S	E / I	E		INC MOD	INC MOD	INC MOD	
120	E / S	nd	E / S		INC INT	nd	INC INT	
118	E / S	E / S	E / S		INC INT	INC INT	INC INT	
110	S	E / S	E / S		INC INT	INC INT	INC INT	
104	E	S	E / S		INC INT	S	INC INT	
98	Imp	E	E		INC INT	INC INT	INC INT	
94	imp	E / S	E / S		INC INT	INC MOD	INC MOD	
Perfetta coincidenza tra rilievo topografico – rilievo metodo Rinaldi (2008)								
Differenza lieve tra rilievo topografico – rilievo metodo Rinaldi (2008)								
Differenza moderata tra rilievo topografico – rilievo metodo Rinaldi (2008)								
Discordanza tra rilievo topografico – rilievo metodo Rinaldi (2008)								
Misura geomorfologica impossibile								Imp
Misura di confronto non disponibile								nd
Invarianza altimetrica variazione altimetrica compresa tra -0.2 ÷ 0.2 m								E
Aggradazione altimetrica superiore a +1 m								S
Incisione altimetrica superiore a -1 m								I
Equilibrio/Aggradazione variazione compresa tra 1 ÷ 0.2 m								E/S
Equilibrio/Incisione variazione compresa tra -1 ÷ -0.2 m								E/I
Invarianza altimetrica. Variazione compresa tra 0.5 ÷ -0.5 m								INV
Incisione Moderata compresa tra -0.5 ÷ -2 m								INC MOD
Incisione Intesa superiore a -2 m								INC INT
Aggradazione Moderata compresa tra 0.5 ÷ 2 m								S MOD
Aggradazione Intesa superiore a 2 m								S INT

Tabella 25 - Riepilogo dei risultati del test delle schede di rilievo geomorfologico applicato sul fiume Tagliamento

Dai risultati si possono desumere le seguenti considerazioni:

- La limitata entità delle variazioni nel breve termine rende affidabile il rilievo geomorfologico solo in un caso su quattro, mentre appare ottima la corrispondenza per l'indicazione sul lungo termine.
- L'applicazione delle misure geomorfologiche per la valutazione del breve termine risulta in taluni casi del tutto impraticabile per (i) l'assenza di superfici omologhe di misura, (ii) le dimensioni ragguardevoli del sottotratto che obbligano l'operatore ad utilizzare comunque strumentazione topografica perdendo quindi in celerità di rilievo, (iii)

l'impossibilità pratica talora di effettuare misure per la presenza eccessiva di acqua o vegetazione (tratti monocursali).

- La presenza di superfici anomale generate da escavazioni o rimaneggiamenti può fuorviare l'operatore durante il rilievo. Si ritiene indispensabile prima di effettuare ogni rilievo un'accurata analisi dei documenti storici per escludere dal rilievo aree non significative. E' consigliabile pianificare in ufficio le misure per essere più certi di ogni singola misura.
- Il metodo geomorfologico appare debole nell'indicazione sul campo di effettive condizioni di incisione nel breve termine come accaduto nel sottotratto 139, risultato in netta discrepanza.
- L'indicazione finale che combina le indicazioni da rilievo geomorfologico e topografico deve tenere conto del grado di confidenza del rilievo geomorfologico e del livello di precisione di quello topografico, della distanza temporale tra l'anno dei rilievi topografici e quello del rilievo sul campo considerando che nel caso in cui il sottotratto sia in significativa fase di aggradazione le misure effettuate nell'ambito del rilievo sottostimano l'effettivo livello di incisione passata.
- I risultati del *test* indicano che, nonostante i miglioramenti apportati nell'ultima versione delle schede proposte in Surian et al, 2009b, sono raccomandabili ulteriori affinamenti del metodo nella parte relativa alle valutazioni delle variazioni sul breve termine.

5.2 Analisi combinata plano-altimetrica

L'elaborazione di tutti i dati descritti ai sottocapitoli 4.2 e 4.3 ha permesso di costituire un campione di 30 sottotratti per i quali è stato possibile associare *trend* planimetrici e altimetrici come riportato nella seguente Figura 35. L'associazione ha riguardato ovviamente solo dati relativi alle variazioni manifestate nel medio-breve termine.

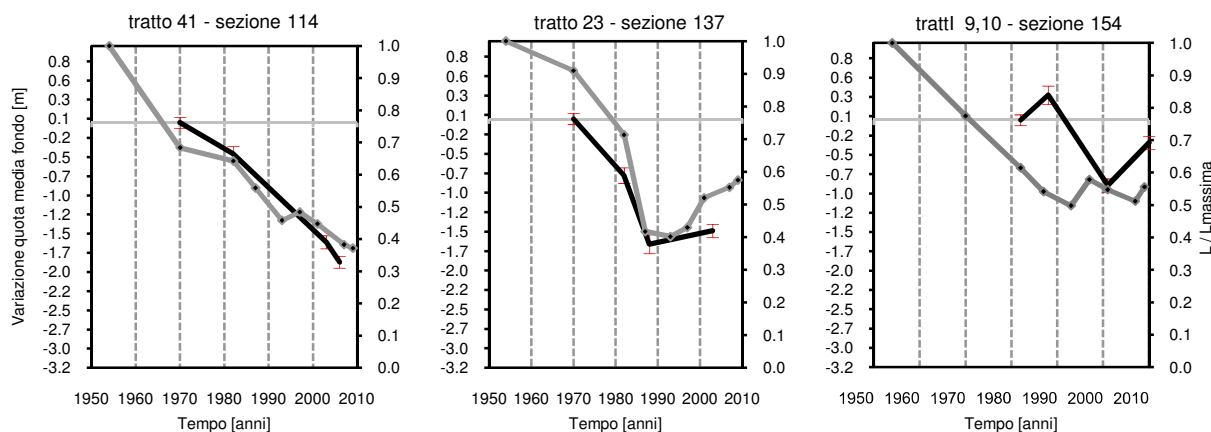


Figura 35 - Esempi di *trend* plano-altimetrici nati dall'associazione della variazione nel tempo della quota media del fondo e della larghezza media misurata a livello di sottotratto normalizzata alla massima larghezza media dal 1954

Le maggiori limitazioni alla combinazione sono state indotte dalla netta differenza tra la frequenza temporale del dato planimetrico (disponibilità media di 6 valori nel periodo 1970-2009) e quello altimetrico. Solo il sottotratto 32 associato alla sezione storica 126 disponeva di un numero di valori altimetrici quantitativamente paragonabile a quelli planimetrici (5 rilievi topografici); la maggior parte dei sottotratti (15) è coperto da 4 rilievi topografici, 7 sottotratti presentano solo 3 rilievi e i rimanenti presentano appena 2 valori di quota media del fondo.

Scorporando i *trend* plano-altimetrici più completi sono state ricavate 61 combinazioni plano-altimetriche "semplici", ovvero singole coppie di valori di variazione di larghezza e di quota media del fondo. All'interno di questo campione sono state escluse le situazioni evolutive ambigue, con andamenti lacunosi (13). E' noto infatti che la frequenza temporale dei dati nella delineazione di una traiettoria di comportamento planimetrico o altimetrico di un tratto fluviale può falsare completamente l'ipotesi di "*trend* dominante" in quanto la mancanza anche solo di singoli valori in annate intermedie può celare andamenti reali del tutto in controtendenza con l'ipotesi di comportamento (in proposito si veda anche Surian e Rinaldi, 2011).

La sistematizzazione dei dati ha contribuito a produrre le statistiche riportate in Figura 36 e Tabella 26.

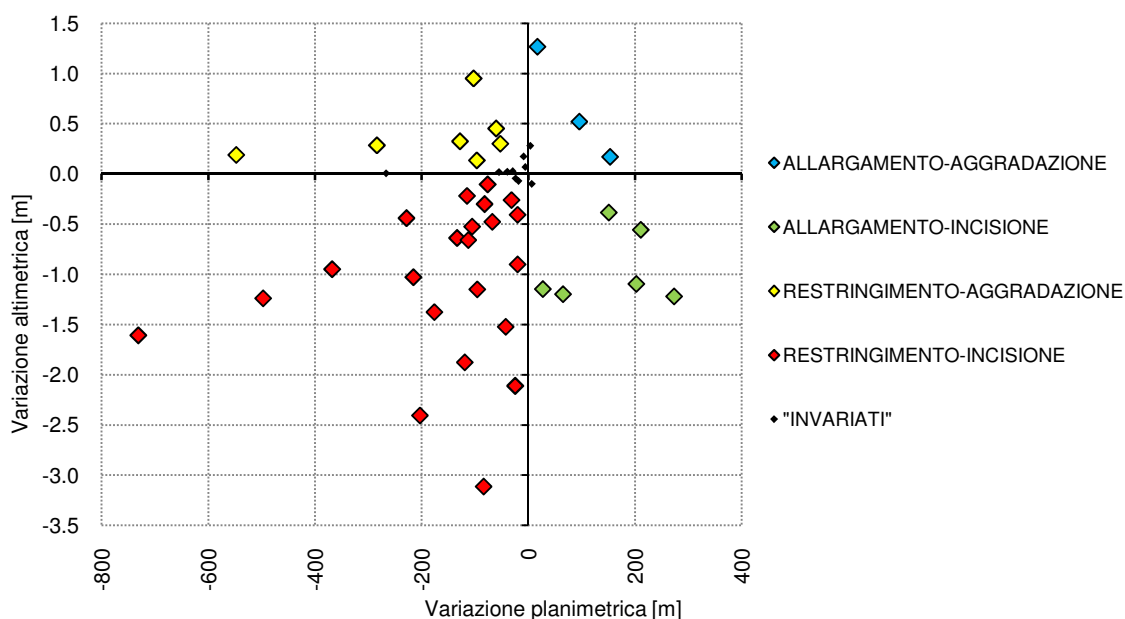


Figura 36 - Scatter plot delle combinazioni di variazione piano - altimetriche ottenute dall'elaborazione di tutti dati storici disponibili

COMBINAZIONI DI VARIAZIONE PLANO-ALTIMETRICA	BRAIDED			UNICURSALE		WANDERING		FASE 2		FASE 3	
	N° sotto tratti	N° sottotratti	%	N° sottotratti	%	N° sottotratti	%	N° sottotratti	%	N° sottotratti	%
ALLARGAMENTO-AGGRADAZIONE	3	2	7.4	1	8.3		0.0		0.0	4	23.5
ALLARGAMENTO-INCISIONE	6	3	11.1		0.0	3	33.3	2	6.3	4	23.5
RESTRINGIMENTO-AGGRADAZIONE	7	6	22.2	1	8.3		0.0	4	12.5	3	17.6
RESTRINGIMENTO-INCISIONE	22	9	33.3	9	75.0	4	44.4	22	68.8		0.0
INVARIATO [**] - INVARIATO [*]	2	1	3.7		0.0	1	11.1		0.0	2	11.8
INVARIATO [**] - AGGRADAZIONE	2	1	3.7	1	8.3		0.0		0.0	2	11.8
RESTRINGIMENTO - INVARIATO [*]	6	5	18.5		0.0	1	11.1	4	12.5	2	11.8
Sottotratti con carenza dati	13	10		2		1		5		7	
<i>Totale parziali</i>	61	37		14		10		37		24	

[*] valore di variazione altimetrica inferiore all'errore - valori e propagazioni come in 3.2.3
 [**] valore di variazione planimetrica inferiore all'errore - valori e propagazioni come in 3.1.3

Tabella 26 - Analisi delle combinazioni piano - altimetriche ottenute

Dalle analisi emergono le seguenti considerazioni:

- All'interno del campione di *trend* piano-altimetrici la morfologia *braided* (37) è dominante rispetto alle altre (*unicursale* - 14, e *wandering* - 10). La combinazione costituita da restringimento planimetrico e incisione altimetrica è nettamente preponderante rispetto a tutte le altre (22 su 61). Queste numerosità relative possono essere spiegate la prima con la dominanza a scala di tratto della morfologia a canali intrecciati, e la seconda con la maggiore disponibilità di rilievi topografici nelle annate 1970-82-88, durante la Fase 2

(secondo la denominazione proposta in Surian et al, 2009d - Figura 10) di forte restringimento subita mediamente dall'intero tratto.

- Tra le combinazioni che rientrano nelle Fase 2 precedente alla risposta morfologica recente (Fase 3, secondo la denominazione proposta in Surian et al, 2009d - Figura 10) circa il 69% dei tratti ha manifestato restringimento planimetrico e incisione altimetrica, in coerenza con lo schema del CEM proposto in Surian e Rinaldi, 2003; Surian e Rinaldi, 2004; Rinaldi et al, 2008b. Solo pochi tratti hanno associato al restringimento un'aggradazione significativa (4 sottotratti su 32, 12%) in controtendenza con il CEM di Surian e Rinaldi. Tutti i sottotratti che durante il restringimento hanno risposto altimetricamente con un'aggradazione hanno morfologia *braided*, anche se questa stessa morfologia analizzata singolarmente mostra in fase di restringimento un comportamento ancora coerente con il CEM (per i sottotratti a morfologia *braided* i casi sono di restringimento-incisione sono il 33%).
- Durante la Fase 3 è elevato il numero di sottotratti per i quali le variazioni sono di sotto alla soglia di errore (6 su 18, 34%), a conferma della difficoltà di valutazioni delle recenti variazioni. Per contro le intense variazioni della Fase 2 abbassano notevolmente le incertezze ed i tratti per i quali la valutazione è di invarianza altimetrica sono solo 4 su 32 (12%).
- Concentrando l'attenzione sulla Fase 3, ed escludendo i sottotratti con variazioni plano-altimetriche trascurabili, il campione di sottotratti che potenzialmente può essere utilizzato per implementare il CEM introdotto in Surian, 2006 (disceso a sua volta da una modifica del CEM Surian e Rinaldi, 2003) adattandolo al fiume Tagliamento e aggiungendo indicazioni sulle forme di risposta nel breve e recente periodo si riduce a soli 11 elementi. Tra questi 4 mostrano allargamento-aggradazione, altrettanti allargamento-incisione e i rimanenti 3 sottotratti risultano in restringimento-incisione. All'interno di questo campione di sottotratti si possono effettuare valutazioni distinte in funzione della morfologia del tratto (come per il CEM di Surian e Rinaldi). In questo senso risulta che tutti i tratti a morfologia transizionale (2 su 11) si sono allargati abbassando la quota media del fondo. Quelli monocursali (2 su 11) hanno manifestato un innalzamento del fondo, ma comportamenti planimetrici opposti. I sottotratti a morfologia *braided* (6 su 11) sono quelli che presentano le maggiori disomogeneità di comportamento: 2 sottotratti associano allargamento e incisione, altrettanti in modo del tutto speculare mostrano restringimento e aggradazione, infine i rimanenti 3 sottotratti si allargano e aggradano.
- L'assenza di chiari *trend* dominanti di comportamento nella Fase 3 non consente di elaborare implementazioni statisticamente attendibili ai CEM esistenti per un adattamento al Tagliamento. La disomogeneità delle combinazioni nelle risposte plano-altimetriche è indigativa di (i) un *trend* evolutivo non ancora intrapreso in modo pieno, ma solo avviato, (ii) un recupero morfologico molto influenzato dalla naturale variabilità longitudinale delle combinazioni di *pattern*, geometriche e granulometriche, (iii) una condizione di instabilità energetica che ancora non garantisce un normale rapporto di forza tra i processi di trasporto al fondo e dinamica laterale. L'intensità della risposta di restringimento ed incisione manifestata nella Fase 2 ha permesso che i primi *stage* dei CEM italiani fossero più facilmente individuati e concettualmente modellati; la relativa modesta intensità della risposta morfologica altimetrica recente del Tagliamento e la sua vicinanza nel tempo ancora non permettono l'interpretazione agevole di univoci *trend* evolutivi. Come discusso al prossimo capitolo (5.3), allo stato attuale sussiste solo una sostanziale univocità di risposta planimetrica; lo stesso non può dirsi per la combinazione plano-altimetrica alla base della schematizzazione dei CEM esistenti.

5.3 Valutazione delle cause delle variazioni morfologiche

L'analisi di tutti i fenomeni che a scala locale e di bacino, nel breve e nel lungo termine, possono aver indotto le variazioni morfologiche del tratto studio ha permesso la costruzione del grafico riportato in Figura 37 sintetico ed efficace nel rendere conto al tempo stesso della concomitanza dei fattori e della loro intensità relativa, combinati con una visualizzazione schematica delle variazioni plano-altimetriche verificatesi negli ultimi 200 anni.

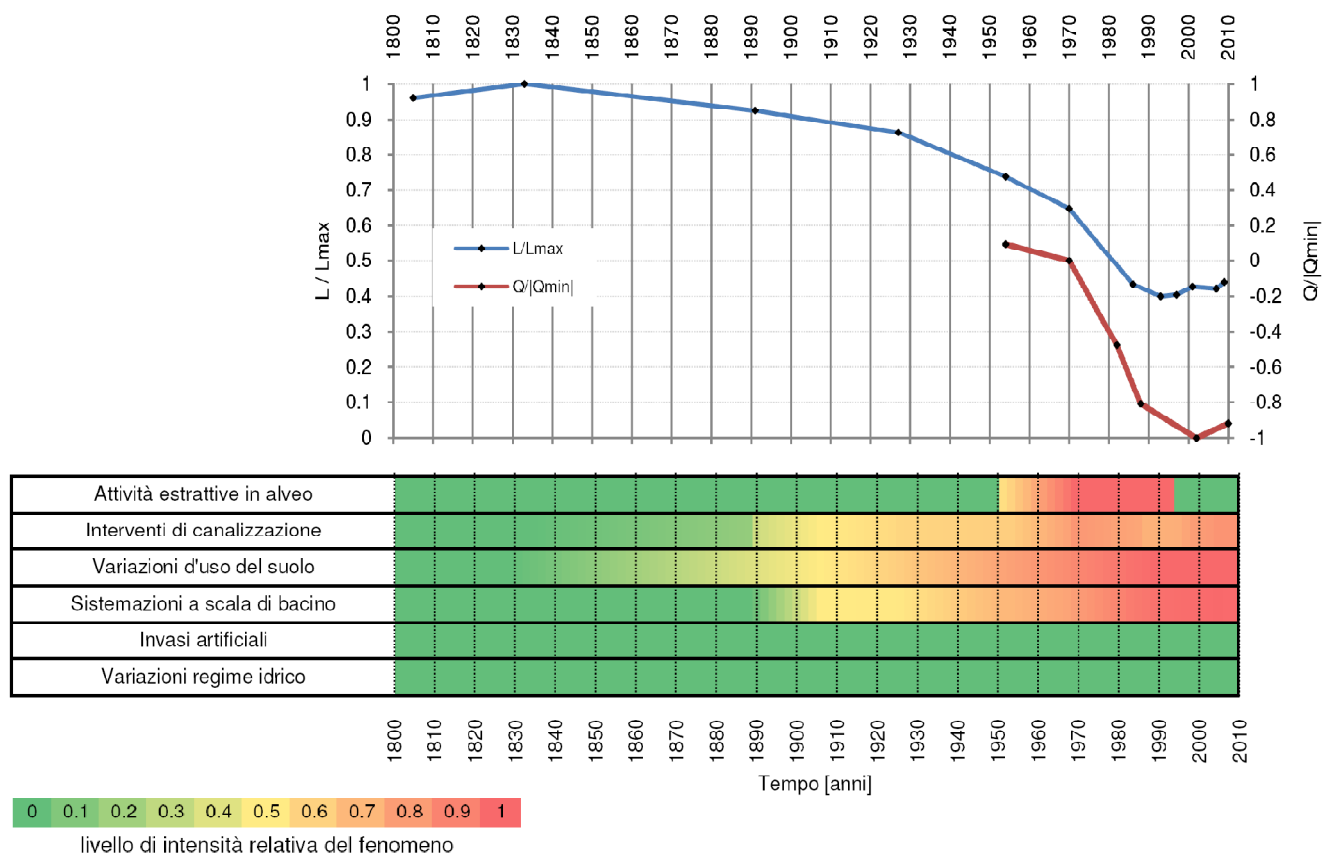


Figura 37 - Associazione temporale estesa agli ultimi 200 anni tra principali variazioni morfologiche plano-altimetriche mediate a scala di tratto e potenziali cause antropiche di modificazione

Dalla osservazione di Figura 37 emergono alcune valutazioni molto interessanti e al contempo si aprono nuovi interrogativi.

- (i) l'eccezionale coincidenza temporale tra il picco di massimo restringimento e l'interruzione dell'attività estrattiva a metà degli anni '90, (ii) la corrispondenza temporale tra l'accelerazione del restringimento nel 1954 e l'avvio seppure lento delle attività di escavazione, (iii) la brusca accelerazione del restringimento nel 1970 in corrispondenza dell'avvio del periodo di massima attività estrattiva. Tutti questi fattori dimostrano che la causa principale che ha indotto maggiormente le variazioni plano-altimetriche nel periodo 1950-1994 è stata l'attività estrattiva in alveo.

2. Si considerino per il momento solo gli ultimi 15-20 anni. Escludendo tra le forme di impatto attive in questa finestra temporale l'escavazione in alveo, la presenza delle dighe (i cui effetti sono stati valutati trascurabili al sottocapitolo 4.4.5) e l'esistenza di variazioni significative del regime idrologico (fattore escluso nei sottocapitoli 4.4.5 e 4.4.6), restano come cause potenziale solo le modifiche d'uso del suolo a scala di bacino, la realizzazione estensiva di opere idraulico-forestali sul reticolo montano e la realizzazione di opere di canalizzazione nel tratto studio. Se si analizza singolarmente ciascuno di questi fattori negli ultimi 15-20 risulta evidente che in nessun caso le rispettive evoluzioni recenti possono aver indotto un aumento nel flusso di sedimenti o di portata liquida che giustifichi la risposta morfologica recente.

Negli ultimi 15-20 la copertura boschiva si è mantenuta costantemente a livelli estremamente elevati rispetto a metà '800 e inizio '900 (4.4.3). Probabilmente la copertura boschiva attuale corrisponde alla massima degli ultimi 200 anni (risultato in linea con tutte le evidenze di altri studi recenti applicati a bacini di aree montane mediterranee - (Garcia-Ruiz et al, 1997; Rinaldi e Simon, 1998; Liebault e Piegay, 2001; Kondolf et al, 2002; Rinaldi, 2003). Quindi, se effettivamente reale, un eventuale effetto legato al cambiamento di uso del suolo a scala di bacino sarebbe di segno contrario a quello recente, ovvero di diminuzione dell'apporto solido da monte.

Allo stesso modo l'aumento lieve registrato negli ultimi 15-20 del numero delle strutture di sistemazione idraulico-forestali (4.4.4) non può essere ricollegato con il tipo di risposta morfologica recente in quanto anche questo è di segno contrario. Un aumento di strutture di contenimento e protezione sul reticolo a monte induce diminuzioni nel flusso di sedimenti quindi tendenzialmente restrizione, e non allargamento.

Infine pure le difese spondali attive all'interno del tratto studio sono cresciute in numero nel breve termine (4.4.2); anche questo costituisce un fattore di forte limitazione sia all'allargamento, sia all'attivazione di flussi laterali di sedimenti.

Evidentemente l'effetto indotto dall'escavazione in alveo ha nascosto dal 1950 fino all'interruzione dell'attività in alveo gli effetti quantitativamente minori legati ai *trend* di diminuzione di apporto da monte e laterale. I fattori attivi prima del 1950, rivelatisi di fatto ininfluenti sul tipo di risposta morfologica successiva alla chiusura dell'escavazione, sono stati invece il motivo alla base delle variazioni precedenti dal 1800 al 1950. Terminata l'escavazione questi effetti minori non sono tornati a dominare facendo proseguire come ipotizzabile il restringimento e l'incisione.

Al termine dell'escavazione ha dominato solo un fattore: la condizione di forte squilibrio energetico raggiunta dal Tagliamento. In concomitanza con l'attività estrattiva l'eccesso di competenza energetica del fiume veniva scaricato al fondo accentuando processi erosivi locali e rispondendo localmente a scompensi nel flusso di sedimenti al fondo. Al termine dell'estrazione le stesse portate hanno ripreso a mobilitare i sedimenti al fondo con continuità longitudinale, con rinnovata mobilità trasversale e crescente attività laterale. Al termine dell'escavazione solo la frequenza e l'intensità dei deflussi liquidi è tornata a dominare l'evoluzione morfologica recente.

Per avvalorare queste constatazioni sono state condotte alcune elaborazioni che hanno permesso di mettere in relazione

- il tasso di variazione della larghezza medio annuo misurato negli intervalli temporali scanditi dalle foto aeree disponibili tra il 1988 e il 2009 (1988-1993-1997-2001-2007-2009);
- il valore medio giornaliero su base annua dei livelli idrometrici misurati negli stessi intervalli di tempo presso la stazione idrometrica di Pinzano [Villuzza-San Pietro] (valore calcolato considerando solo i livelli superiori al minimo dei massimi annuali storici della stazione, 1.4 m - 2005). Questo valore può essere considerato un indicatore sintetico dell'intensità delle portate in un certo periodo in quanto tiene conto sia dei picchi di livello, sia della durata degli eventi morfologicamente più rilevanti.

Periodo	Livello giornaliero mediato sull'anno [m]	Tasso di variazione di larghezza medio annuo [m]
1986-1993	0.064	-21
1993-1997	0.052	1
1997-2001	0.094	7
2001-2007	0.051	-2
2007-2009	0.109	12

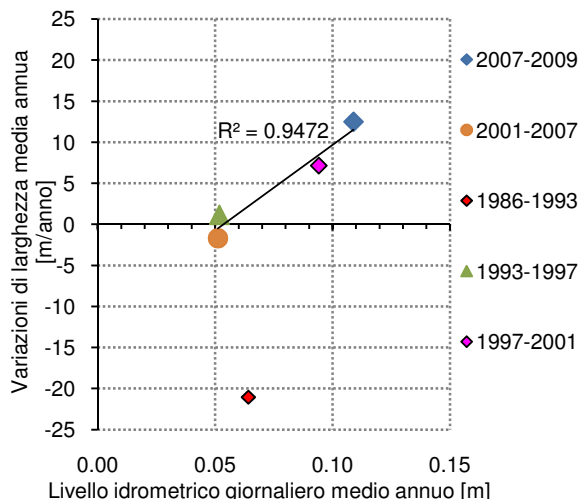


Figura 38 - Associazione tra tassi di variazione della larghezza media dell'alveo attivo e livelli medi su base annua dei livelli idrometrici presso Pinzano superiori al minimo massimo annuale (1.4 m - 2005). Linee di regressione che non considera il periodo 1986-1993

I valori riportati in Figura 38 permettono di osservare come che nel periodo '86-'93, corrispondente alla fase terminale del restringimento, nonostante si fosse verificata una serie idrometrica più gravosa di quelle che hanno interessato i periodi '93-'97 e '97-2001, il tasso di variazione è stato nettamente negativo (-21 m/anno) e inferiore rispetto ai tassi prossimi allo zero registrati nei periodi successivi. La Figura 38 fornisce una spiegazione anche all'andamento irregolare della traiettoria di larghezza media riportato in Figura 19 (sottocapitolo 4.3.1), figura in cui è evidente un netto rallentamento dell'allargamento tra il 2001-2007. Il biennio 2007-2009, cui si è associata la variazione di larghezza media più netta e significativa della Fase 3 di allargamento, è stato interessato da una successione di eventi di piena più significativa per frequenza ed intensità degli eventi di quelle che hanno prodotto i due rami di crescita della larghezza rispettivamente nei periodi 1993-1997 e 1997-2001 (Figura 21) con i rispettivi tassi. Quindi la Fase 2 (intesa come restringimento ed incisione) è imputabile esclusivamente a variazioni nel regime del trasporto solido la fondo, la Fase 3 più recente di evoluzione è controllata anche dal regime idrologico (sequenza ed intensità degli eventi di piena).

- Se i punti 1 e 2 delineano un quadro più chiaro sui fenomeni dominanti che hanno causato le variazioni morfologiche tra il 1950 e il 2009, una discussione a parte richiede invece l'analisi del periodo 1800-1950. In questo lasso di tempo esiste concomitanza di tre fattori potenzialmente influenti (Figura 37) : (i) variazione uso del suolo e (ii) opere di sistemazione idraulico-forestale nel bacino montano, (iii) opere di canalizzazione nel tratto studio. I processi a scala di bacino agiscono indirettamente sulle variazioni morfologiche fluviali; il loro effetto può essere notevole come verificato in diversi recenti lavori (Liebault e Piegay, 2001; Kondolf et al, 2002; Liebault e Piegay, 2002); i tempi di manifestazione in tratti vallivi non sono noti con esattezza, ma sicuramente si tratta di periodi nell'ordine di diverse decine di anni (Church, 2008). Un riferimento per la stima dei valori in gioco può essere desunto dai risultati di Liebault e Piegay, 2002 e Liebault et al, 2001. Per alcuni corsi d'acqua montani francesi afferenti al fiume Drome, gli autori indicano velocità di trasporto al fondo dei sedimenti pari mediamente a 500 m/anno. Questo valore riprende lo stesso ordine di grandezza di alcune stime di campo effettuate sul fiume Tagliamento tra il 2010 e il 2011 attraverso l'analisi del trasporto al fondo in corrispondenza di *sample* colorati, una tecnica del tutto analoga a quella adottata in Surian et al. 2009a.

Ad oggi non esistono riferimenti bibliografici che forniscano indicazioni in merito alla rilevanza specifica di ciascun processo sulle variazioni del recettore finale. Le uniche indicazioni utili, seppur indirette, possono venire da alcune specifiche valutazioni legate al trasporto solido fluviale. Il tratto di studio ha una configurazione tipica di molti corsi d'acqua alpini pedemontani, con il punto di sbocco in pianura coincidente con una sezione in *bedrock* a valle della quale il fiume si apre e scorre su imponenti banchi alluvionali di materiale non coesivo all'interno del quale divaga e rimaneggia i sedimenti. Studi precenti in realtà fluviali simili a quella del Tagliamento a valle di Pinzano sono stati condotti sul fiume Brenta (Surian e Cisotto, 2007) e sul Waimakariri (Griffiths, 1979; Nicholas, 2000); in entrambi i casi analisi del bilancio di sedimenti locale hanno verificato come il trasporto di sedimenti al fondo nelle sezioni di sbocco in pianura, ovvero nel punto di ingresso del sistema del volume di sedimenti prodotto direttamente dal bacino montano, sia svariate volte inferiore a quello espresso dalla sezioni immediatamente a valle. In altre parole, anche in condizioni di equilibrio i volumi prodotti dal bacino di monte in ingresso al sistema sono nettamente inferiori a quelli che il fiume riesce a reperire a valle rimaneggiando i sedimenti al fondo o erodendo le sponde. Queste indicazioni inducono a ritenere meno rilevanti ai fini delle variazioni morfologiche nel medio-breve termine proprio gli apporti solidi da monte, ovvero a considerare limitato il peso di fattori quali la variazione dell'uso del suolo e la realizzazione di opere di sistemazione idraulico forestali che proprio per questo aspetto possono manifestare influenza. Queste valutazioni necessitano tuttavia di ulteriori verifiche per le quali si rimanda alla Parte III della tesi.

Rispetto ai fattori attivi a scala di bacino, più rapido e influente può essere l'impatto legato alla realizzazione di nuove strutture in alveo di canalizzazione e protezione spondale. Si tratta sempre di forme di intervento per le quali non esistono stime dei tempi di risposta o quantificazioni effettive del grado di riduzione indotto sugli apporti laterali di sedimenti al corso d'acqua. Alcuni riferimenti utili per la comprensione dell'importanza di questa forma di impatto possono venire ancora una volta da lavori relativi al calcolo del bilancio di sedimenti. Per esempio, lavori di Carson e Griffiths, 1989 e McLean e Church, 1999 valutano il contributo laterale pari a circa il 60% del volume movimentato complessivamente verso valle a scala di tratto; in Surian e Cisotto, 2007, addirittura l'apporto laterale viene stimato in un *range* di 9-20 volte maggiore rispetto alla portata media annua di sedimenti in ingresso da monte. Si anticipa solamente che le simulazioni numeriche condotte nella Parte III della tesi hanno permesso di appurare che nel tratto studio in condizioni di normale apporto solido da monte presso la sezione di Pinzano il volume di sedimenti immessi nel sistema dalla dinamica di erosione laterale si attesta tra 72 ÷ 82 % di quello in ingresso da monte al sistema.

Le valutazioni ed i riferimenti bibliografici esposti inducono a ritenere che le variazioni verificatesi in tutto il XIX secolo (1805 - 1891) siano attribuibili sostanzialmente a dinamiche morfologiche proprie di una condizione di equilibrio dinamico (Schumm, 1977) piuttosto ad uno stato di instabilità indotto dall'attività antropica (come invece è accaduto per la Fase 3 più recente). Non si può tuttavia affermare che la dinamica evolutiva del XIX secolo sia completamente naturale in quanto non si può escludere che le variazioni dell'uso del suolo mostrate al capitolo 4.4.3 già avviate durante la prima metà dell'800 non abbiano indotto alterazioni morfologiche a fine secolo. L'entità modesta dei cambiamenti planimetrici in rapporto alle dimensioni estremamente elevate dell'alveo dell'epoca (variazioni comprese tra il 3.9 e il 7.4%) non permettono tuttavia di scindere le variazioni dinamiche da quelle indotte dall'attività antropica.

A fine '800 il numero di opere di sistemazione idraulico-forestali eseguite era ancora troppo limitato e la loro costruzione troppo ravvicinata nel tempo per pensare che gli effetti siano stati immediatamente effettivi. Il picco relativo delle realizzazioni montane tra il 1930 e il 1950 (Figura 32) con ogni probabilità ha indotto effetti apprezzabili verso valle, pur tuttavia il ritardo nella loro propagazione ha fatto sì che fossero nascosti dalle variazioni indotte dall'escavazione.

Solo a partire dalla fine dell'800 e dai primi anni del '900 la realizzazione estensiva delle prime forme di difesa idraulica a scala di tratto (arginature e difese in particolare), può aver indotto le

prime variazioni immediatamente percepibili e non trascurabili. La loro entità con ogni probabilità è stata ben superiore di quelle indotte dalla propagazione verso valle degli effetti di variazione di uso del suolo durante tutto l'Ottocento. Questa valutazione discende oltre che dalle indicazioni riportate poco sopra riguardo all'importanza locale dell'apporto solido laterale rispetto a quello da monte, anche da una constatazione riguardo all'evoluzione del Tagliamento appena a monte di Pinzano. In Zanoni et al. 2008 viene indicato che per un tratto di circa 16 km di estensione a monte del tratto studio le dimensioni dell'alveo si sono mantenute tra metà '800 e metà '900 intorno a valori costanti e molto elevati (larghezza media dell'alveo superiore a 1,000 m). In altre parole durante tutta la Fase 1 di evoluzione il tratto appena a monte di Pinzano ha rappresentato un serbatoio di sedimenti a dimensione costante e sufficiente per mantenere alimentato il tratto di valle.

In conclusione si ritiene che la realizzazione delle opere di canalizzazione sia stata la causa principale delle variazioni registrate dal 1891 fino all'avvio delle attività estrattive. Per avvalorare questa valutazione si ritiene comunque necessaria una serie di approfondimenti per i quali si rimanda alla Parte III della tesi.

Tutte le considerazioni espresse nei punti precedenti, sono state sintetizzate nella seguente Figura 39, dove sono riportate lungo una scala temporale che ripercorre gli ultimi 200 barre colorate in corrispondenza delle cause considerate dominanti; ciascuna barra è colorata in funzione del grado di rilevanza assoluta di ogni singolo fattore sulla contestuale variazione morfologica.

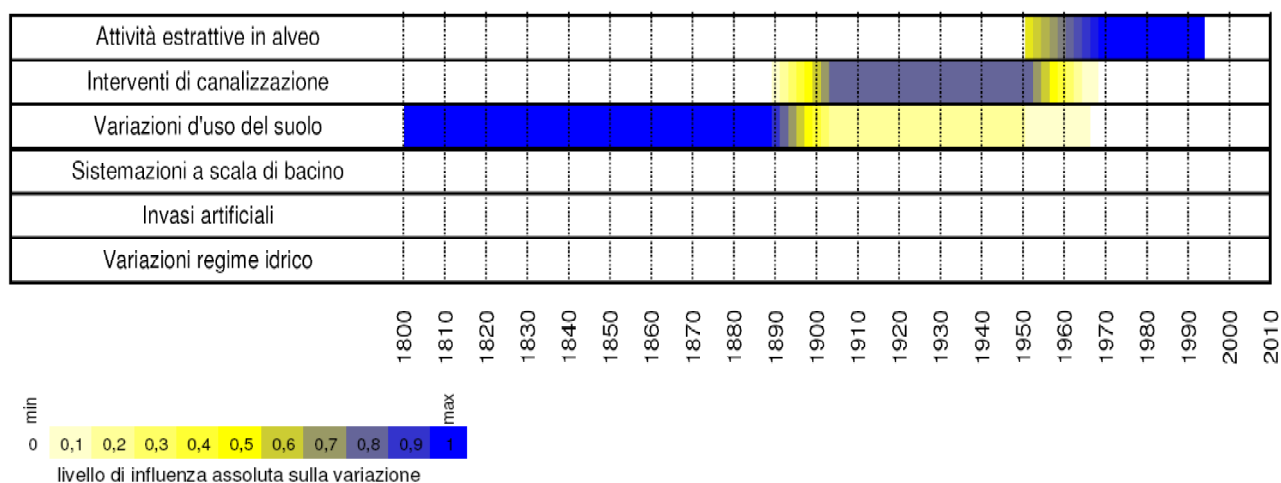


Figura 39 - Correlazione estesa agli ultimi 200 anni tra principali variazioni morfologiche plano-altimetriche mediate a scala di tratto e cause antropiche di modificazione

Parte II – Modellazione numerica dell'evoluzione morfologica dell'alveo

6 Modellazione in geomorfologia fluviale

6.1 Concetti generali

“A model, like a novel, may resonate with nature, but it is not a “real” thing. Like a novel, a model may be convincing - it may “ring true” if it is consistent with our experience of the natural world. But just as we may wonder how much the characters in a novel are drawn from real life and how much is artifice, we might ask the same of a model: How much is based on observation and measurement of accessible phenomena, how much is based on informed judgment, and how much is convenience? “

Oreskes et al, 1994

I modelli sono strumenti concettuali o matematici che riproducono aspetti della realtà fisica, pensati per descriverne o spiegarne il comportamento o per esprimerne previsioni evolutive qualitative. L'essenza dei modelli e il motivo stesso per cui sono stati e continuano ad essere ideati e sviluppati non li rende per questo necessariamente suscettibili di verità, anzi è proprio il processo continuo di applicazione e *test* dei modelli che ne palesa gli inevitabili difetti, portando utilizzatori e sviluppatori ad una piena e vera consapevolezza dei loro limiti e ad un loro continuo perfezionamento avendo come obiettivo ultimo quello di organizzare la comprensione, esprimere concetti e legami causa-effetti senza ambiguità (Wilcock e Iverson, 2003).

Del resto la fondamentale motivazione che muove verso la creazione e l'uso di modelli è proprio la non completa conoscenza e/o la mancanza di accesso diretto sia nello spazio sia nel tempo ai fenomeni di interesse, nonché l'esistenza proprio di ambiguità nelle relazioni causa-effetto che chiedono una risposta quanto più veritiera. In questo senso un *modeller* deve avere innanzitutto chiaro qual è l'obiettivo della modellazione, cosa intende modellare, quali problemi intende risolvere o quali aspetti intende chiarire. Le risposte a queste domande lo devono guidare verso la scelta del tipo di modello, in funzione fondamentalmente della scala spazio-temporale di studio e del grado di dettaglio richiesti. In altre parole ogni scelta modellistica deve essere intrapresa valutando al contempo la *“prediction ability”*, intesa come la capacità di produrre previsioni adeguate al dato di verifica disponibile, e la *“prediction utility”*, ovvero la capacità di produrre informazioni adatte al contesto applicativo e alle finalità dello studio (Lane et al, 1999).

Una definizione compiuta seppur talora non univoca dei caratteri fondamentali di un modello può basarsi sull'analisi di una serie di aspetti caratterizzanti.

- Fondamento teorico al modello. In funzione di questo i modelli possono definirsi “riduzionisti” (che spingono la modellazione al dettaglio spinto fino ai singoli processi di base) o “costruzionisti” (basati sull'osservazione del comportamento del sistema nel suo complesso o in parti di esso e sull'applicazione di relazioni di causa non necessariamente corrispondenti a leggi fisicamente basate o sperimentali associabili direttamente a singoli processi).
- Aderenza alla fisica classica. Si parla in questo senso di modelli fisicamente basati o non fisicamente basati. Tra le definizioni esistenti si ritiene più appropriata quella proposta da Wilcock e Iverson (2003) in cui si definisce fisicamente basato in senso stretto un modello che aderisce alle fondamentali leggi della fisica classica, ovvero rispetta nella misura massima possibile il principio di conservazione della massa, del momento, dell'energia e dell'entropia, ed associa eventualmente a queste altre relazioni empiriche fondate su esperimenti di verifica indipendenti.
- Linguaggio di modellazione. Si parla in senso lato di modelli concettuali puri o modelli a formulazione matematica, a seconda che i processi siano descritti in modo esclusivamente qualitativo/descrittivo o che si utilizzino forme descrittive matematiche, analitiche o statistiche.

- Scala spazio/temporale di applicazione.
- Qualitativi - quantitativi. Questo criterio risponde semplicemente al fatto che il modello fornisca esclusivamente indicazioni descrittive dei processi, oppure permetta una quantificazione degli stessi, con un'indicazione anche del grado di precisione e accuratezza della previsione stessa. I modelli contemporanei si possono distinguere dai precedenti proprio per la crescente attenzione alla quantificazione. Essi sono evoluti sensibilmente come conseguenza di due fattori: la disponibilità estesa di potenza di calcolo e la possibilità di acquisire grandi quantità di dati. La possibilità di collezionare e processare grandi quantità e effettuare complesse procedure computazionali ha certamente il potenziale di migliorare l'accuratezza e la rilevanza delle predizioni sebbene questo aumento non sia necessariamente garantito.

Seguendo una classificazione più generale, sintetica ed efficace, condivisa in letteratura (Darby e Van De Wiel, 2003; Hooke, 2003) è possibile definire cinque classi principali di modelli:

- Concettuali [6.2]
- Empirico/statistici [6.3]
- Analitici [6.4]
- Fisici [6.5]
- Numerici [6.6]

Nella seguente Tabella 27 è riportato un quadro sintetico delle loro principali caratteristiche; a seguire viene dedicato un sottocapitolo per ognuna di queste classi riservando particolare spazio alla modellazione numerica in quanto al centro del presente lavoro di ricerca.

	APPLICAZIONI	PREGI	DIFETTI	SCALA SPAZIALE APPLICAZIONE	SCALA TEMPORALE DI APPLICAZIONE
CONCETTUALI	Indagini preliminari Previsioni qualitative	Metodo di valutazione rapido, ideale a fini divulgativi e didattici Relativamente semplici	Fortemente legati all'esperienza e osservazione di campo Solo qualitativi Applicabili solo a contesti simili a quello di costituzione del <i>set</i> di dati di riferimento	Da sito all'intera asta fluviale	Singolo evento e serie storiche
EMPIRICO /STATISTICI	Progettazione di alvei fluviali Previsioni quantitative Paleoidrografia	Facili da comprendere e utilizzare Dati di <i>input</i> generalmente prontamente reperibili	Specificità di applicazione al singolo sito Non forniscono informazioni sulla quantità dei cambiamenti Richiedono una stima delle portate formative	Sezioni fluviali rappresentative di tratti fluviali	Singolo evento
ANALITICI	Progettazione di alvei fluviali Previsioni quantitative Verifica di modelli numerici	Il rafforzamento del fondamento fisico li rende spesso applicabili ad un <i>range</i> di condizioni ambientali molto ampio I dati di <i>input</i> sono spesso gestibili agevolmente Notevole rilevanza teorica	Forte semplificazione di alcuni processi Talvolta possono essere piuttosto complessi	Sezioni fluviali, tratti fluviali	Singolo evento
FISICI	Progettazione di infrastrutture fluviali Verifica di modelli numerici	Massima aderenza alla realtà idrodinamica e morfodinamica	Costi e tempi di realizzazione molto elevati Applicabili a contesti limitati nello spazio Simulazioni ad evento o per valori di portata di progetto/formativi. Difficoltà a simulare serie idrometriche naturali	Tratto fluviale	Singolo evento e serie storiche
NUMERICI	Progettazione di alvei fluviali Previsioni quantitative	<i>Range</i> di condizioni applicabilità molto ampio Forniscono previsioni anche di dettaglio	Modelli complessi che richiedono <i>training</i> specifici Dati di <i>input</i> richiesti notevoli per quantità e dettaglio	Da sito fino all'intera asta fluviale	Singolo evento e serie storiche

Tabella 27 - Riepilogo delle caratteristiche delle principali categorie di modelli esistenti in geomorfologia fluviale (modificato da Darby e Van De Wiel, 2003)

6.2 Modelli concettuali

I modelli concettuali sono una categoria di strumenti che forniscono descrizioni qualitative e previsioni sull'evoluzione morfologica di sistemi fluviali. Un'ampia gamma di modelli concettuali è stata sviluppata con applicazioni che coprono l'intero spazio geografico da un tratto fluviale specifico fino ad un intero bacino idrografico. La strutturazione dei modelli concettuali è basata fortemente sull'indagine empirica di campo e sull'elaborazione di un *set* di osservazioni. La loro applicabilità è necessariamente limitata a contesti non troppo dissimili da quelli all'interno dei quali i modelli sono stati sviluppati. Il principale vantaggio dei modelli concettuali risiede nella loro relativa semplicità e nella facilità di applicazione; al tempo stesso questa caratteristica costituisce la loro maggiore limitazione. In generale i modelli concettuali sono utilizzati come primo *step* nel processo di modellazione, permettendo al *modeller* di sviluppare un'accettabile comprensione del sistema prima di provare ad applicare approcci più complessi orientati verso previsioni quantitative (Darby e Van De Wiel, 2003).

Tra gli innumerevoli modelli concettuali esistenti in ambito geomorfologico rivestono particolare importanza per gli obiettivi di questo lavoro di ricerca alcuni modelli evolutivi (Conceptual Evolution Model - CEM) sviluppati in contesti statunitensi ed italiani per la descrizione dei *trend* evolutivi degli alvei fluviali. Antesignano dei CEM fluviali è stato il modello a sei stadi di evoluzione di Simon (1989) sviluppato a partire dallo studio della risposta morfologica manifestata da alcuni corsi d'acqua statunitensi nel West Tennessee soggetti tra il 1959 e il 1978 a dragaggio del fondo e rettificazioni (si veda Figura 40A).

La tipologia a stadi è stata ripresa anche in un CEM più recente descritto in Surian e Rinaldi, 2003 e concepito per la modellazione concettuale degli aggiustamenti subiti da gran parte dei fiumi italiani a partire dalla prima metà del secolo scorso fino a metà anni '90 (Surian e Rinaldi, 2003; Surian, 2006; Surian et al, 2009c; Surian et al, 2009d). Rispetto al CEM di Simon, in questo modello vengono tralasciati i processi spondali per concentrare l'attenzione sulle variazioni altimetriche, planimetriche e morfologiche manifestate da corsi a morfologia non solo unicursale, ma anche *wandering* e *braided*, permettendo di delineare alcune chiare traiettorie evolutive ricollegabili direttamente all'intensità dei processi subiti (si veda Figura 40B). Il CEM di Surian e Rinaldi, 2003 ha visto successivi sviluppi in seguito alla sua applicazione a specifiche realtà fluviali; si ricordano in particolare le versioni pubblicate in Rinaldi et al, 2008b relativa all'evoluzione di alcuni torrenti dell'Appennino Settentrionale (Vara, Magra, Cecina, Panaro), quella edita in Surian, 2006 relativa ai soli corsi d'acqua *braided* italiani ed infine la versione descritta in Surian e Cisotto, 2007 specifica per il fiume Brenta.

Infine il CEM più recente di interesse diretto per questo lavoro di ricerca (si veda la Parte III della tesi - capitolo 14.3) è quello descritto in Surian et al, 2009e. In questo caso il *focus* del modello viene spostato in modo particolare sull'evoluzione recente dei principali corsi d'acqua veneto-friulani e sulle loro possibili traiettorie future plano-altimetriche. Gli autori riprendo l'andamento degli ultimi 200 anni definito in lavori precedenti riguardanti i fiumi Brenta, Piave, Tagliamento, Torre e Cellina (Surian et al, 2008; Surian et al, 2009d), definiscono alcune tipologie fluviali in funzione dell'entità della risposta morfologica (A-intensa, B-moderata, C-lieve, D-no recupero) e per ciascuna di queste formulano alcune ipotesi evolutive future pesando qualitativamente gli effetti indotti da eventuali futuri interventi gestionali a scala di bacino o di tratto (si veda Figura 40C)

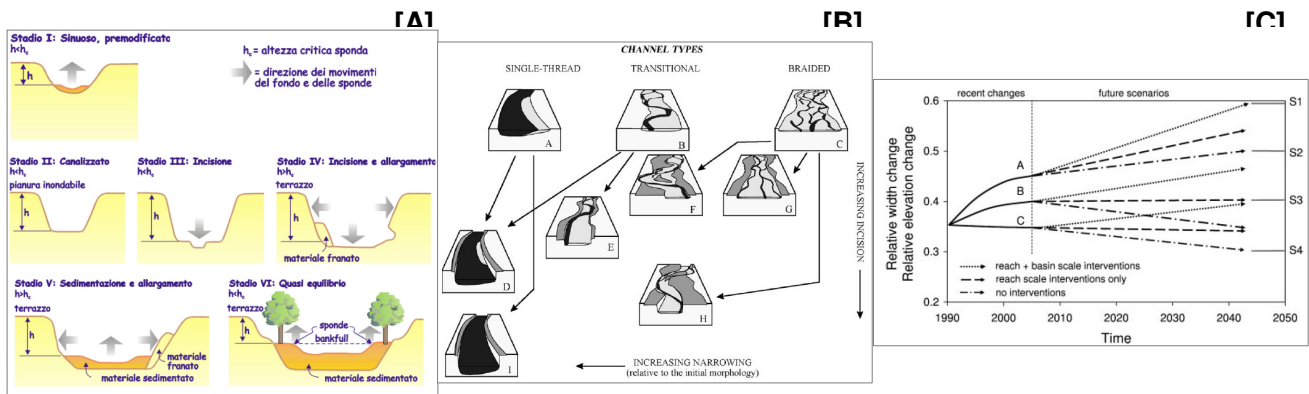


Figura 40 - Alcuni CEM di alvei fluviali. [A] modello a sei stadi di Simon (1989) da Rinaldi et al, 2011a, [B] modello di Surian e Rinaldi (2003), [C] modello di Surian et al. (2009e)

6.3 Modelli empirico/statistici

Come i modelli concettuali anche quelli cosiddetti “empirico – statistici” hanno rivestito storicamente un ruolo fondamentale nell’ambito della geomorfologia fluviale, costituendo la principale metodologia di studio di forme e processi soprattutto a partire dalla “rivoluzione” quantitativa del secondo dopoguerra (Rhoads, 1992). Una serie notevole di studi a partire dagli anni '50 (Leopold e Maddock, 1953; Lane, 1955; Schumm, 1977) ha concentrato l’attenzione in modo particolare nel reperimento di dati di campo e di laboratorio al fine di estrapolare relazioni funzionali di inferenza statistica che legassero variabili indipendenti e permettessero di elaborare strumenti di quantificazione e previsione dei processi e delle forme.

Questa classe di modelli ha attirato nel tempo diffidenza e una quantità crescente di critiche che ne hanno minato in modo sostanziale l’eshaustività e l’affidabilità. Tra i punti di debolezza hanno pesato, oltre alla frequente assenza di basi teoriche ai rapporti funzionali desunti (Strahler, 1980; Thornes e Ferguson, 1981), anche la loro intrinseca limitazione applicativa a situazioni strettamente assimilabili a quelle caratterizzanti i casi utilizzati per la definizione delle equazioni, l’indeterminatezza dei livelli di incertezza in situazioni applicativi diverse da queste (Wilcock e Iverson, 2003), nonché l’intrinseca esclusione dall’indagine del carattere dinamico e variabile dei caratteri morfologici dei tratti o delle sezioni fluviali che hanno costituito il campione di riferimento (Darby e Van De Wiel, 2003). Nonostante le critiche ed i difetti, rimane indubitabile l’utilità storica di questi modelli all’interno di un processo continuo di miglioramento della comprensione dei sistemi fluviali ancora in corso. Rimangono al tempo stesso apprezzabili le loro caratteristiche di semplicità e immediatezza concettuali che ne permettono ancora oggi l’applicazione a livello preliminare per la progettazione di tratti fluviali morfologicamente stabili (Darby e Van De Wiel, 2003).

All’interno di questo contesto modellistico meritano indubbiamente un richiamo alcuni tra i modelli empirico-statistici storici più noti e di rilevanza concettuale e didattica. Prime in ordine di tempo sono le relazioni empiriche presentate in Leopold e Maddock, 1953 (1) con le quali gli autori per primi in ambito fluviale cercarono di analizzare le variazioni longitudinali dei rapporti esistenti tra fattori geometrico-idraulici e le portate liquide

$$\begin{aligned}
 W &= a Q^b & D &= c Q^f & V &= k Q^m & (1) \\
 W: \text{larghezza alveo [m]; } Q: \text{portata liquida [m}^3/\text{s]; } D: \text{profondità media [m]; } V: \text{velocità media} & & & & & & \\
 & & & & & & \text{[m/s]; } a, b, c, f, k, m - \text{fattori adimensionali di forma}
 \end{aligned}$$

Diverso invece il *focus* della cosiddetta “bilancia di Lane”, un modello concettuale introdotto da Lane (1955) in cui l’autore concentra l’attenzione sulle cause dell’instabilità fluviale ed elabora la seguente relazione

$$QS \sim Q_s D_{50} \quad (2)$$

Q : portata liquida, *S* : pendenza locale, *Q_s* : portata solida, *D₅₀* : dimensione media dei sedimenti al fondo

L’espressione introdotta non ha valenza previsionale quantitativa ma presenta un’indubbia potenza concettuale. Tra le variabili che hanno influenza su ridotte scale temporali (periodi assimilabili allo *steady time span* secondo la definizione di Schumm, 1977), le portate solide e liquide in transito attraverso un generico tratto fluviale rivestono un ruolo dominante. La relazione (2) esprime in questo senso la tendenza di un tratto ad una condizione di equilibrio dinamico tra l’energia disponibile (competenza o pertinenza energetica) per il trasporto di sedimenti (esprimibile sinteticamente attraverso la potenza specifica disponibile come prodotto di pendenza - *S*, portata liquida - *Q*, e peso specifico dell’acqua) e i sedimenti effettivamente disponibili al trasporto (quantità espresso in termini di dimensione media dei sedimenti presenti - *D₅₀* e portata solida di sedimenti in ingresso da monte - *Q_s*). La relazione di Lane (2) formalizza proprio questo concetto consentendo di elaborare valutazioni qualitative accettabili in primissima approssimazione riguardo alle possibili alterazioni morfologiche manifestabili da sezioni o tratti fluviali in risposta a variazioni delle principali variabili guida dei processi fluviali (portate liquide e solide appunto).

Con la stessa forza concettuale si pongono le relazioni ricavate da Schumm (1977) analizzando numerosi risultati di laboratorio e casi studio reali. In questo caso le relazioni empiriche (espressioni (3) e (4)) mantengono separate portate solide e liquide, e ricomprendono l’influenza di fattori geometrici di larghezza dell’alveo, sinuosità e lunghezza d’onda dei meandri.

$$Q \sim \frac{w, d, \lambda}{S} \quad (3)$$

$$Q_s \sim \frac{w, \lambda, S}{d, P} \quad (4)$$

Q : portata liquida, *S* : pendenza locale, *Q_s* : portata solida, *d* : dimensione media dei sedimenti al fondo, *λ*:lunghezza d’onda del meandro, *P*: indice di sinuosità

6.4 Modelli analitici

Le limitazioni associate ai modelli empirico-statistici e concettuali hanno portato a ricercare strumenti che fossero basati sulla riproduzione diretta o indiretta (matematica) dei processi fisici di modificazione morfologica, sviluppando modelli potenzialmente a maggiore capacità e affidabilità predittiva (Darby e Van De Wiel, 2003). Se nel primo caso è stata intrapresa la via della modellazione fisica (sottocapitolo 6.5), nel secondo le alternative scelte sono state quelle della modellazione numerica (sottocapitolo 6.6) o analitica.

Nei modelli analitici il *modeller* formula un problema in termine di equazioni e cerca a queste una soluzione analitica. Essi sono più appropriati quando il sistema modellato e le sue condizioni al contorno sono abbastanza semplici da essere descrivibili con equazioni che possono essere risolte in forma chiusa, ovvero univoca ed analiticamente esatta (Hooke, 2003). Generalmente le situazioni naturali sono così complesse che l’applicazione di modelli analitici richiede inevitabilmente l’assunzione di una serie di assunzioni semplificative anche molto stringenti; ciò non toglie che il cuore del problema fisico venga comunque modellato adeguatamente producendo previsioni ineccepibili teoricamente, ma con imprecisioni rispetto alla realtà fisica (Hooke, 2003; Tubino et al, 2010). Nonostante queste imperfezioni le indicazioni dei modelli analitici possono

essere estremamente utili sia a livello preliminare progettuale (Hooke, 2003) sia per una migliore comprensione dei principali processi morfologici (Tubino et al, 2010). Al pari dei modelli fisici (6.5) anche i modelli analitici (o comunque soluzioni chiuse calcolate per via analitica di problemi modellistici di particolare regolarità) sono oggi largamente utilizzate per la verifica e validazione dei modelli numerici (Lesser et al, 2004), in linea quindi con la pratica della “*model intercomparison*” (Nicholas, 2005). Sempre nel rapporto con la modellistica numerica, i modelli analitici possono risultare utili anche per l’elaborazione e validazione teorica di specifiche regole modellistiche di simulazione (Bertoldi e Tubino, 2005) ovvero per l’implementazione di moduli “*rule-based*” (6.6.2.2).

Tra gli innumerevoli modelli analitici esistenti particolare rilievo rivestono una serie notevole di lavori prodotti negli ultimi 30 anni da gruppi di ricerca italiani (Seminara e Tubino, 1989; Tubino et al., 1999), che hanno concentrato le proprie ricerche sulla modellazione fisica e analitica della dinamica di evoluzione e predizione delle barre fluviali in corsi d’acqua a canale singolo o multicanale. In principio i modelli analitici hanno riguardato in modo particolare l’analisi dell’evoluzione di alvei meandrici; per primi in questo ambito di studio, Blondeaux e Seminara nel 1985 hanno cercato una unificazione tra le teorie cosiddette “*bar theory*”, concentrata sulla formazione delle *free bar* alternate in alvei rettilinei considerata come atto di formazione incipiente di un meandro, e la “*band theory*”, focalizzata invece sull’amplificazione della sinuosità in relazione alla stabilità e arretramento spondale (Ikeda et al, 1981). In un lavoro successivo Seminara e Tubino (1989) gli stessi autori appartenenti allo stesso gruppo di ricerca hanno perseguito questa linea di indagine approfondendo gli effetti di interazione non lineare tra la dinamica dei meandri e quella delle barre cosiddette *free* o *forced*, ovvero barre mobili in continua evoluzione o barre invece a collocazione stabile nel tempo.

Negli anni più recenti l’attenzione si è spostata principalmente sulla modellazione dei processi di formazione e sviluppo delle sole barre *free* in canali singoli (Tubino et al, 1999), sullo sviluppo in canali meandrici delle barre mediane considerate una forma di transizione verso morfologie *braided* (Luchi et al, 2010), e sulla “*2D morphodynamic influence*”, ovvero l’effetto di propagazione morfologica di perturbazioni planimetriche locali nella geometrie di alvei a canale singolo (Zolezzi e Seminara, 2001). Di recente il *focus* di questo ramo della modellistica fluviale ha allargato lo sguardo sulla dinamica delle barre attive in morfologie a canali intrecciati ed in particolare sul comportamento planimetrico delle biforcazioni (Bolla et al, 2003; Miori et al, 2006). Per revisioni più approfondite relative all’argomento si rimanda a Tubino e Bertoldi, 2008 e Tubino et al, 2010.

6.5 Modelli fisici

La relazione tra processi fluviali e forme è in molti casi difficile da quantificare con dettaglio e accuratezza elevati usando tecniche convenzionali di rilievo in campo o modellistiche (concettuali, empiriche, analitiche o numeriche). La modellazione fisica, ovvero la creazione di vere e proprie riproduzioni in scala della realtà fisica e lo studio dei processi alla scala ricreata, offre una tecnica che può essere usata per simulare processi molto complessi e *feedbacks* in svariati fenomeni geomorfologici (Peakall et al, 1996), come pure per verificare e validare modelli numerici esistenti (Lesser et al, 2004; Glocer, 2009).

I modelli fisici si basano sulla teoria della similarità e l’analisi dimensionale (Buckingham, 1915; Yalin, 1971), che produce una serie di parametri adimensionali che qualificano pienamente le caratteristiche del processo nella realtà fisica (*prototype*) e il cui mantenimento alla scala del modello garantisce una reciproca perfetta similitudine. Una classificazione proposta in Peakall et al, 1996, utilizza come criterio di ordinamento dei modelli fisici due fattori fondamentali, le dimensioni spazio-temporali del *prototype* e la potenziale capacità di replica della realtà stessa. L’associazione di questi fattori permette di distinguere

- modelli in scala 1:1. Si tratta di repliche della realtà adottabili solo per la simulazione di *prototype* di limitata estensione spaziale. Sono i modelli che più di tutti possono riprodurre in modo pressoché perfetto il sistema oggetto di analisi (Hooke, 2003).
- *Froude Scale Models* (FSM). Sono modelli che permettono una riproduzione anche con fattori di scala più alti grazie all'imposizione semplificativa a scala del modello di un numero di Reynolds idraulico più basso rispetto a quello che imporrebbe il mantenimento di un costante rapporto dimensionale tra i principali fattori geometrici e idraulici (densità dell'acqua, raggio idraulico e velocità media del modello).
- modelli a scala distorta. Utilizzati per lo più in studi di fattori geomorfologici su larghe finestre spazio-temporali per le quali il modello geometrico, per motivi essenzialmente di ingombro, deve essere distorto incrementando il rapporto di scala verticale o orizzontale.
- modelli "analoghi". In questo caso si esclude la possibilità di rispettare rapporti dimensionali corretti, ma si punta esclusivamente a rispettare la "similarità dei processi" ovvero ad obbedire a grossolane relazioni di scala e a riprodurre specifiche caratteristiche del *prototype*. Sono applicabili ai casi di modellazione spaziale più estesa quando anche i modelli distorti si dimostrano inefficaci.

I principali vantaggi della modellistica fisica tecnica sono due:

- i processi formativi possono essere osservati, normalmente in una finestra temporale ridotta, entro un ambiente di laboratorio gestibile e controllabile agevolmente;
- consentono di analizzare variabili i cui effetti non sono noti a priori e che possono avere marcati effetti non lineari sulle risultanti dinamiche e morfologie.

Tali vantaggi sono tuttavia controbilanciati dalle difficoltà di riduzione in scala che si ripercuotono in

- un aumento delle semplificazioni e delle astrazioni,
- un'intrinseca difficoltà alla misura di specifiche grandezze alla scala del modello con strumentazione che non arrechi disturbo alla simulazione,
- una difficoltà inevitabile a valutare effetti non lineari indotti dalla riduzione in scala.

Escludendo alcuni lavori pionieristici di fine Ottocento, la modellazione fisica può considerarsi effettivamente avviata a partire dal 1915 con lo sviluppo della teoria dimensionale di Buckingham (1915); alle prime realizzazioni di carattere esclusivamente ingegneristico, si aggiunsero nel secondo dopoguerra le applicazioni in studi geomorfologici a scala di bacino o tratto fluviale. Modelli fisici sono stati realizzati con successo per investigare morfologie fluviali presso confluenze, per lo studio del trasporto solido, dei processi di deposizione e migrazione delle barre, per lo studio dei cambiamenti di *pattern*, ecc. Di rilievo per il presente lavoro sono da considerarsi i risultati di alcune applicazioni che hanno portato a conoscenze estremamente interessanti riguardanti la dinamica delle barre e dei rami attivi in morfologie *braided* (Ashmore, 1982; Ashmore, 1991), nonché ad una migliore comprensione del processo di incipiente avvio delle biforcazioni sempre nella stessa morfologia (Bertoldi e Tubino, 2005; Bertoldi et al, 2009b).

6.6 Modelli numerici

Negli ultimi 20-30 anni la ricerca stringente di strumenti con potere predittivo ancora superiore rispetto ai modelli concettuali, empirico/statistici e analitici, associata ad una trainante filosofia riduzionista (Lane e Richards, 1997), ha spinto una parte del mondo scientifico impegnato in campo fluviale alla ricerca di strumenti computazionali in grado di accoppiare e simulare i due principali processi fluviali, l'idrodinamica e il trasporto dei sedimenti (al fondo ed in sospensione), per produrre valutazioni con gradi di accuratezza paragonabili a quelli ottenibili con la modellazione fisica, ma senza gli stringenti limiti di questa particolare forma modellistica.

I modelli numerici sviluppati differiscono dagli altri modelli "non fisici" soprattutto per la loro capacità di simulare processi con una continuità spaziale e temporale propria solo dei modelli fisici, con il vantaggio rispetto a questi ultimi di

- pervenire a risultati comparabili per accuratezza e precisione con costi ridotti;
- coprire scale spazio-temporali superiori;
- poter reiterare pressoché illimitatamente le simulazioni di progetto.

Nei modelli numerici, il dominio fisico è rappresentato da una maglia discreta di punti a distribuzione spaziale omogenea o con densità variabile a seconda del modello, rappresentati ciascuno una unità spaziale in corrispondenza della quale i processi fluviali sono esplicitamente modellati (Darby e Van De Wiel, 2003). In corrispondenza di questi punti (detti comunemente *grid*, *mesh* o celle di calcolo) sono rappresentate le grandezze fisiche descrittive del sistema (elevazione del fondo, battente idrico, velocità, granulometria del fondo, ecc.). La modellazione numerica distribuita con un gran numero di celle di calcolo poste trasversalmente o longitudinalmente ad un fiume dall'opportunità di confrontare i risultati ottenuti con misure distribuite e di usare questi tipi di modelli per simulare inosservabili situazioni o scenari del tipo "what-if".

I modelli distribuiti variano in scopo, rappresentazione dei processi, tipo di griglia e soluzioni numeriche al punto che quasi tutti i modelli sono almeno in parte diversi gli uni dagli altri (Ferguson, 2008). Tutti i modelli numerici si fondano però su due aspetti caratterizzanti principali:

- i processi da includere nel sistema di calcolo sono scelti in funzione del grado di approfondimento modellistico ricercato ed espressi in una forma matematica differenziale;
- un algoritmo numerico viene sviluppato allo scopo di risolvere in forma esatta (solo per condizioni regolari assimilabili a quelle risolvibili analiticamente in forma chiusa) o risolvere numericamente (risolvere le medesime equazioni in forma approssimata ovvero linearizzate fino ad un adeguato ordine di approssimazione) le equazioni scelte in modo discretizzato spazialmente e temporalmente con *step* di calcolo fissi o dinamici in ampiezza a seconda dell'algoritmo stesso. Numericamente il problema si riduce in un numero di equazioni linearizzate messa a sistema, risolvibile con tecniche numeriche matriciali (Hooke, 2003). I sistemi di equazioni lineari possono essere risolti simultaneamente per tutto il dominio fisico (metodi impliciti - Hunter et al, 2007) oppure lo stesso dominio può essere coperto attraverso un procedimento di avanzamento spaziale a *step*; per ogni *step* vengono risolte solo le equazioni relative a porzioni del dominio spazialmente adiacenti (metodi espliciti - Hunter et al, 2007).

L'uso dei modelli numerici ha avuto negli ultimi anni un rapido sviluppo. I primi modelli sono stati prevalentemente mono-dimensionali, ma i recenti poderosi sviluppi della capacità di calcolo di un processore di media potenza hanno permesso lo sviluppo di modelli sempre più complessi 2-3D non solo idrodinamici, ma anche morfodinamici (a fondo mobile), con specifiche regole di integrazione per la simulazione *rule-based* di speciali processi fluviali (erosione spondale, crescita della vegetazione, ecc.). Anche se la modellazione numerica rappresenta il livello più alto di sofisticazione attualmente disponibile in geomorfologia, ancora esistono limiti nella loro capacità predittiva così sintetizzabili:

- stretta correlazione con il livello di dettaglio nella discretizzazione della realtà fisica (Bates et al, 1998; Lane et al, 1999; Ercoli, 2002; Darby e Van De Wiel, 2003);
- richiesta notevole di dati con dettaglio spazio-temporale un tempo impensabile, ma comunque ancora oggi non perseguibile agevolmente se non attraverso specifiche campagne di rilievo (Nelson et al, 2003; Formann et al, 2007);
- estensione spazio-temporale delle situazioni simulabili in gran parte dei casi lontane da quelle di diretto interesse gestionale (Brasington e Richards, 2007);
- richiesta di una potenza di calcolo notevole e crescente ancora non estensivamente diffusa (Coulthard et al, 2007);
- il buon fine dell'applicazione dei modelli numerici è strettamente legato all'abilità dei *modeller* (non solo gli sviluppatori ma anche gli utilizzatori) che deve necessariamente conseguire esperienza specifica (Ferguson, 2008; Globber, 2009) e a cui sono richieste conoscenze di base multidisciplinari;
- difficoltà nella simulazione di particolari dinamiche morfodinamiche di elevata complessità (Jagers, 2003) e nella modellazione completa dei processi di erosione spondale in accoppiamento con quelli interni all'alveo (Mosselman, 1998; Jagers, 2003; Ferguson, 2008; Rinaldi et al, 2008a; Mosselman, 2010).

Questi difetti non hanno significativamente rallentato lo sviluppo recentissimo dei modelli numerici, ma in compenso hanno indotto nuove ricerche nel campo della modellistica numerica aprendo la strada alla cosiddetta modellazione a complessità ridotta ovvero ai *Reduced Complexity Model* – RCM (sottocapitolo 6.6.2). Proprio la macro-distinzione tra modelli numerici “classici” CFD e RCM, seppur molto grossolana, è stata considerata funzionale al contesto di ricerca di questo lavoro di dottorato. Nei paragrafi successivi si cercherà di scendere maggiormente nel merito dell'argomento “modellistica numerica” proprio seguendo questa classificazione efficace almeno in prima approssimazione.

6.6.1 Computational Fluid Dynamic Models (CFD)

6.6.1.1 Concetti generali

Tutti i modelli CFD sono accomunati dalla caratteristica di risolvere forme più o meno complete del sistema di equazioni di Navier-Stokes (NSE), comprendente l'equazione differenziale di continuità della massa (divergenza del vettore velocità nulla)

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

dove \vec{u} è il vettore velocità di componenti di (u, v, z) rispettivamente nello spazio cartesiano (x, y, z) , e l'equazione differenziale di equilibrio dinamico (o di conservazione della quantità di moto) espressa

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{g} + \nu \nabla^2 \vec{u} \quad (6)$$

Termine di accelerazione locale	Termini di accelerazione convettiva	Forze legate alla pressione	Forze specifiche gravitative	Termine di inerzia diffusiva – forze legate alla viscosità cinematica
---------------------------------------	---	-----------------------------------	------------------------------------	---

in cui P è la pressione, ν è la viscosità cinematica dell'acqua, \vec{g} è la forza di gravità specifica per unità di massa, ρ è la densità dell'acqua (entrambe espresse nella forma semplificata valida per fluidi newtoniani non comprimibili).

I metodi di soluzione esistenti per la risoluzione di queste equazioni sono innumerevoli, e la loro combinazione con tutte le forme con cui è possibile riscrivere le NSE porta all'esistenza di svariati possibili schemi numerici. Tra i metodi di soluzione citiamo senza pretesa di esaustività solo i più noti in letteratura:

- metodi alle differenze finite;
- metodi ai volumi finiti;
- metodi agli elementi finiti;
- metodi lagrangiani o semi-lagrangiani;
- metodi delle caratteristiche.

Uno schema numerico consiste genericamente nella combinazione di un insieme di equazioni di partenza scritte nella forma approssimata scelta e di un metodo di soluzione delle stesse. Ciascuno dei metodi sopraelencati utilizza una tecnica di discretizzazione del dominio fisico di calcolo caratterizzata da una griglia di calcolo che può essere composta da

- *mesh* strutturate, costituite da punti in uno spazio n -dimensionale posti in corrispondenza dell'intersezione di m famiglie di linee rettilinee (o curve) reciprocamente ortogonali a formare celle aventi dimensioni omogenee in tutto il dominio;
- *mesh* non strutturate consistenti in elementi di dimensioni variabili, forma quadrilatera o triangolare e densità spaziale variabile (maggiore nelle aree in corrispondenza di variazioni geometriche significative, ai confini e in aree in cui è previsto intenso dinamismo idro-morfologico – si parla comunemente anche di “*body-fitted coordinates*”).

Il metodo agli elementi finiti possiede l'indubbio pregio di essere utilizzabile con *mesh* non strutturate e quindi consente (compatibilmente con l'incremento più o meno sostenibile del tempo di calcolo) una relativa migliore descrizione del dominio di studio (Hooke, 2003); i metodi ai volumi finiti, alle differenze finite e delle caratteristiche per contro usano *mesh* regolari più limitanti per una descrizione spaziale accurata, ma più flessibili sotto altri aspetti (ad esempio nel trattamento dei termini convettivi riconoscibili nella (6) - Ercoli, 2002). Interessanti risultano a riguardo alcuni sforzi

intrapresi nel tentativo di adattare gli schemi ai volumi finiti a *mesh* non strutturate (Idelsohn e Onate, 1994), come pure il metodo delle Differenze Finite Curvilinee (adottato per esempio nei CFD commerciali più noti MIKE 21C, Danish Hydraulic Institute e Delft3D, Deltares) che utilizza una griglia curvilinea ortogonale strutturata in cui le linee direttrici sono subparallele all'asse geometrico dell'alveo ed alle sponde. Questo approccio curvilineo permette una notevole ottimizzazione delle risorse di calcolo, limita il numero di celle dell'intorno schematizzato, semplifica la forma delle equazioni differenziali risolte e permette l'uso di passi temporali più lunghi in quanto le linee della griglia seguono le linee di corrente (Ercoli, 2002; Montoya Cardona, 2008). A prescindere dalla tipologia di discretizzazione del dominio fisico di modellazione uno degli aspetti più rilevanti nella modellazione numerica ad esso collegato è il dettaglio spaziale con cui questo dominio viene descritto. Naturalmente la risoluzione dei *grid* di calcolo influenza fortemente l'accuratezza del modello (Ercoli, 2002; Montoya Cardona, 2008) al punto da potersi considerare un parametro da sottoporre a calibrazione. Il grado di risoluzione oltre che dalla tecnica di discretizzazione, dipende ancor prima dall'accuratezza del dato topografico disponibile (Frank et al., 2007), la quale influenza grandemente anche la scelta del grado di complessità del modello da adottare (Formann et al, 2007).

Insieme ai principali aspetti idrodinamici descrivibili in modo completo risolvendo numericamente le equazioni (6) (inerzie convettive, pressioni, forze gravitative ed effetti della viscosità cinematica), una completa modellazione CFD prevede necessariamente che siano affrontati e risolti anche altri problemi ricollegabili ai processi formativi principali:

- turbolenza [6.6.1.2];
- sforzo di taglio al fondo [6.6.1.3];
- trasporto di sedimento non coeso al fondo [6.6.1.4];
- correnti secondarie [6.6.1.5];
- erosione spondale [6.6.1.6];
- processi di erosione-deposizione [6.6.1.7].

Nel caso specifico di questo lavoro di tesi ci si limiterà a dare una sintetica delineazione delle principali soluzioni e problematiche per ciascuno di questi aspetti rimandando a specifici riferimenti bibliografici per approfondimenti. La trattazione si è limitata a questi aspetti in quanto considerati più rilevanti in relazione al contesto applicativo descritto nei capitoli successivi (capitoli 11 e 13.2). Sono state quindi omesse valutazioni relativamente a tutta una serie di fattori che, seppur modellati internamente a molti CFD avanzati (trasporto in sospensione, effetto della forza di Coriolis, effetto variazioni barometriche atmosferiche, effetto superficiale del vento, ecc. – Danish Hydraulic Institute, 2005; Zhang, 2006; Faeh et al, 2010; WL, 2011) possono considerarsi del tutto trascurabili in ambiti fluviali con le seguenti caratteristiche

- morfologia *braided*;
- rilevanza assoluta del ruolo morfoattivo del trasporto di sedimento al fondo;
- estensioni superiori ai 30 km ed ampiezza d'alveo media superiore ai 700 m (si vedano capitoli 11 e 13.2).

6.6.1.2 Modellazione della componente idrodinamica

La ragione primaria che rende difficoltosa la risoluzione delle NES in un contesto naturale è la turbolenza, un fenomeno fluidodinamico che produce perturbazioni puntuali nel campo di moto estremamente difficoltose da prevedere, variazioni che a loro volta si sovrappongono come "in modulazione di frequenza" ad un moto primario con caratteristiche medie. La complessità del fenomeno, associata a questa macroscopica evidenza di due componenti sovrapposte (moto medio cui si somma una fluttuazione irregolare) ha indotto ad evitare di modellare in modo diretto e dettagliato le fluttuazioni proprie della turbolenza e ad applicare il modello cosiddetto "*Reynolds-averaged*" (Nelson J. M. et al, 2003) con le rispettive seguenti equazioni di base.

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad w = \bar{w} + w' \quad (7)$$

dove u, v e w rappresentano rispettivamente le componenti lungo gli assi cartesiani x, y e z ; i fattori sovrabarrati costituiscono i valori medi e quelli con apice sono invece le fluttuazioni rispetto al valore medio.

Sostituendo le espressioni (7) nelle NSE (5) e (6), si ottengono le cosiddette equazioni RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) riportate di seguito.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{v} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g + \nu \nabla^2 \bar{w} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \quad (11)$$

L'aggiunta delle componenti di fluttuazione media delle componenti di velocità ha reso il problema non più ben posto o indeterminato (il numero delle equazioni 4 è minore di quello delle incognite – 10). Questo richiede necessariamente l'aggiunta di espressioni che diminuiscano il grado di libertà del sistema, ovvero di equazioni che definiscano vincoli reciproci tra le variabili incognite oppure specifiche relazioni empiriche associate alle stesse.

Con questo fine s'introduce il cosiddetto concetto di sforzo di Reynolds (*Reynolds stress*), assimilabile a quella componente di forze descritte dai fattori nella parte destra delle RANS (9), (10) e (11) funzione dei valori di fluttuazione delle velocità. Queste componenti del bilancio di forze (bilancio applicato all'infinitesimo volume di controllo liquido) cui fanno riferimento le RANS quantificano quella quota parte di energia che viene dissipata dai fenomeni di trasferimento di quantità di moto indotti dalla turbolenza locale.

Pare opportuno sottolineare come il termine "sforzo di Reynolds" nasce dall'analogia largamente utilizzata con lo *stress* associabile alla viscosità cinematica pur trattandosi effettivamente di fattori intrinsecamente diversi, l'uno (lo sforzo di taglio turbolento) costituisce una componente di quantità di moto trasferita per diffusione, l'altro invece costituisce una forza trasferita per contatto molecolare. L'associazione è tuttavia fuorviante in quanto in sé la viscosità turbolenta non è assimilabile ad una caratteristica fisica del fluido indipendente dallo sforzo di taglio applicato come invece la cinematica, ma ad una condizione di tipo fluidodinamico del mezzo che dipende dalla condizione di moto. L'analogia conduce tuttavia all'uso di un fattore cosiddetto di "viscosità turbolenta" formalmente simile alla viscosità cinematica. Per chiarire questa modalità di descrizione modellistica delle componenti di sforzo turbolento si possono riscrivere le RANS del moto inserendo le componenti del cosiddetto tensore di Reynolds, analogo al tensore degli sforzi che conduce alle NSE non esplicitato direttamente in (6).

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{v} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g + \nu \nabla^2 \bar{w} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (14)$$

dove i fattori del tensore di Reynolds sono esprimibili come

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= -\rho \overline{u'^2} & \tau_{xz} &= \tau_{zx} = -\rho \overline{u'w'} \\ \tau_{yy} &= -\rho \overline{v'^2} & \tau_{yx} &= \tau_{xy} = -\rho \overline{v'u'} \\ \tau_{zz} &= -\rho \overline{w'^2} & \tau_{zy} &= \tau_{yz} = -\rho \overline{w'v'} \end{aligned} \quad (15)$$

Al fine di rendere ben posto e quindi determinato il problema rimane a questo punto necessario esprimere i fattori di taglio in funzione dei valori medi delle componenti di velocità (prima ipotesi di Boussinesq) o trovare altri modi con cui le incognite aggiunte siano esprimibili con espressioni aggiuntive che non contengano altri fattori incogniti. Come anticipato, il modo più comunemente adottato nell'ambito della modellistica computazionale di sistemi naturali è quello di relazionare lo sforzo di taglio di Reynolds alle quantità medie delle componenti di velocità in analogia con le relazioni esistenti tra lo sforzo di taglio viscoso e le quantità del tensore degli sforzi, per i quali esiste proprio un legame lineare già espresso nelle espressioni (9), (10) e (11).

Esprimendo questa proporzionalità diretta ad un fattore K di viscosità turbolenta isotropica (ipotesi imposta per semplicità ma non veritiera in contesti naturali) le espressioni (15) possono essere così riscritte

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &\cong 2\rho K \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} & \tau_{xz} &= \tau_{zx} \cong \rho K \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right] \\ \tau_{zz} &\cong 2\rho K \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} & \tau_{xy} &= \tau_{yx} \cong \rho K \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right] \\ \tau_{yy} &\cong 2\rho K \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} & \tau_{yz} &= \tau_{zy} \cong \rho K \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Questa analogia porta alla definizione del cosiddetto concetto di “*eddy viscosity*” (viscosità turbolenta) che lega in modo diretto attraverso una proporzionalità lineare lo sforzo di Reynolds e le quantità di tensione. La sostituzione delle equazioni (16) in (12), (13) e (14) porta nuovamente il problema ad essere ben posto a meno di definire proprio il fattore K di viscosità turbolenta. Esistono una serie notevole di metodi descritti in letteratura ed applicati a casi reali (metodo standard k- ϵ , formulazione di Smagorinsky, *Algebraic Eddy viscosity closure Model-AEM*, modello k-L, ecc.) che permettono la modellazione della viscosità turbolenta in relazione al grado di stratificazione del fluido, al grado di dettaglio ricercato nella riproduzione del fenomeno turbolento in sé e al contesto di applicazione (ambiti fluviali, di estuario, mare aperto, ecc.). Al momento della scelta modellistica rimane fondamentale utilizzare un modello di turbolenza per il quale siano noti chiaramente i potenziali errori, quali processi fisici quel modello specifico meglio riproduce e quali peggio. Per una revisione completa dell'argomento e dello stato attuale della ricerca con specifico riferimento ai contesti fluviali si rimanda a Rodi, 1993; Nezu, 2005; Nikora e Roy, 2010.

6.6.1.3 Modellazione dello sforzo di taglio al fondo

L'attendibilità predittiva dei CFD dello sforzo di taglio trasmesso al fondo riveste estrema importanza per la sua diretta influenza sulla stima del trasporto solido al fondo (6.6.1.4), sull'erosione spondale (6.6.1.6), sui battenti idrici locali e sugli areali soggetti a inondazione.

La previsione dello *shear stress* al fondo differisce in modo non trascurabile tra modelli CFD 3D (tridimensionali) o 2D (bidimensionali). Nel primo caso il calcolo avviene utilizzando direttamente il valore di velocità calcolato nelle celle immediatamente a contatto con il fondo, con la possibilità quindi che lo sforzo di taglio previsto si avvicini più sensibilmente a quello effettivo indotto dalla turbolenza. Nel caso invece dei modelli 2D *depth-averaged* il valore di velocità utilizzato corrisponde a quello medio calcolato su tutta la colonna d'acqua, con tutti i limiti (trascurabili o meno a seconda delle finalità applicative) del caso (Lane et al, 1999).

A parte la differenza nell'attendibilità della stima del valore di velocità orizzontale al fondo, c'è sostanziale similitudine nella formula adottata per il calcolo dello sforzo di taglio. Sia i modelli 3D che quelli 2D usano forme che riprendono l'espressione cosiddetta del "*drag coefficient*"

$$\bar{\tau}_b = \frac{\rho g \bar{O} |\bar{O}|}{C_d^2} \quad (17)$$

in cui $\bar{\tau}_b$ è il valore dello sforzo di taglio al fondo applicato al fondo in corrispondenza della singola *mesh* di calcolo, \bar{O} è il valore del vettore velocità orizzontale (mediata su tutta la colonna d'acqua o ricavata nel *layer* più vicino al fondo, a seconda che il CFD sia 2D o 3D), e C_d è il coefficiente di *drag*.

Il parametro di *drag* riveste grande importanza a livello generale in quanto fornisce il legame con il parametro di scabrezza idraulica "classica", come intesa nell'idraulica monodimensionale più tradizionale ed empirica. Esistono una serie di espressioni che permettono di associare al valore di C_d quelli più noti e utilizzati (Chézy, Manning's, Nikuradse, Glauker-Strikler, Bazin, ecc.). Il legame quadratico che lega i coefficienti di scabrezza e lo sforzo di taglio palesa chiaramente la forte sensibilità di questi modelli dal valore di scabrezza idraulica. Un altro fattore che merita un accenno per la sua rilevanza sulla stima dello sforzo di taglio al fondo, soprattutto in ambiti modellistici a fondo mobile, è l'influenza delle forme di fondo sul fattore di scabrezza.

6.6.1.4 Modellazione del trasporto di sedimenti incoerenti al fondo

L'aspetto fondamentale alla base della modellazione numerica associata idrodinamica e morfodinamica coincide con una assunzione necessaria ma al tempo stesso motivo di limitazione alle potenzialità predittive dei CFD (Papanicolaou et al, 2008): anche durante le fasi di diretta mobilitazione del fondo le sue velocità di modificazione sono molto più basse di quelle medie riscontrabili nel campo di moto del fluido al punto che il calcolo idrodinamico può essere svolto considerando che in ogni singolo *step* temporale il fondo e le sponde possano essere considerati fissi (Nelson et al, 2003). Si parla in questi casi di modellazione disaccoppiata in base alla quale i CFD prima calcolano il campo di moto risolvendo le NSE (in forme più o meno complete) senza contemporaneamente modificare il fondo, quindi usano le risultanze idrauliche in termini di sforzo al fondo (6.6.1.3) per calcolare il *pattern* di trasporto; infine valutano la quantità di erosione-deposizione del fondo (6.6.1.7). Quest'associazione "in serie" dei processi è utilizzata in tutti i CFD, da quelli più semplici mono-dimensionali a quelli più complessi 3D che simulano la turbolenza.

A questa schematizzazione dei processi si affiancano altre implicite ipotesi semplificative non trascurabili adottate dalla maggior parte dei CFD attualmente esistenti (Montoya Cardona, 2008)

- la concentrazione del sedimento al fondo o in sospensione viene assunta bassa al punto da poter trascurare gli effetti di interazione tra il flusso solido e quello liquido e quindi modellare le due componenti separatamente con proprie equazioni di processo senza effetti di influenza reciproca;
- gli effetti di corazzamento e nascondimento dei sedimenti al fondo vengono modellati attraverso fattori correttivi interni alle equazioni di trasporto solido per granulometrie non uniformi;
- l'interazione tra le particelle in reciproco movimento vengono ignorate e di conseguenza il trasporto effettivo viene calcolato separatamente per ogni singola classe di diametri.

Nonostante gli sforzi intrapresi negli ultimi 10-15 anni per un'integrazione modellistica piena del trasporto di sedimenti all'interno dei CFD la complessità del problema rende questo aspetto ancora tra i più controversi e fonte di implicita incertezza previsionale. I motivi sono molteplici:

- la forte variabilità dei risultati prodotti in funzione della formula di trasporto adottata (Montoya Cardona, 2008);
- la natura prevalentemente empirica delle formule di trasporto al fondo, nella maggior parte fondate sul concetto di attivazione del trasporto per superamento di una soglia di sforzo determinato assumendo condizioni di moto uniforme, che trascurano quindi la rilevanza sul trasporto al fondo degli effetti di turbolenza (Papanicolaou et al, 2008);
- la difficoltà pratica di validare i valori di produzione di sedimenti al fondo (Hicks e Gomez, 2003);
- l'assenza ad oggi di studi specifici di approfondimento dell'effetto di alcuni specifici fattori potenzialmente rilevanti ma trascurati dai classici schemi di trasporto adottati nei modelli CFD (effetto dello riempimento da sedimento fine degli interstizi tra i granuli più grossolani incoesi, effetto sulla strutturazione del fondo dovuto a condizioni di deflusso *unsteady*, spessore dello strato attivo più superficiale e interazioni con i sedimenti mobili più profondi, influenza dell'effetto di nascondimento non solo sulla soglia di moto incipiente ma anche sullo sforzo di taglio al fondo effettivo, composizione e coesione degli strati più profondi, ecc. - Jagers, 2003; Mosselman, 2010).

Per un apprendimento relativo all'attuale stato dell'arte nella modellazione numerica del trasporto solido al fondo si rimanda a Mosselman, 2010 e Papanicolaou et al, 2008. Per alcuni lavori di revisione delle più diffuse formule di trasporto solido si rimanda invece a Gomez e Church, 1989 e Gomez, 1991.

6.6.1.5 Modellazione degli effetti legati alle correnti secondarie

Le correnti secondarie possono essere distinte secondo lo schema proposto nel 1926 da Prandtl in due grandi classi (Figura 41), la prima nota come "correnti secondarie di Prandtl del primo tipo" comprende le correnti indotte in condizioni di flusso curvilineo da forze di derivazione gravimetrica (forze centrifughe - Figura 42); la seconda classe delle cosiddette "correnti secondarie di Prandtl del secondo tipo" comprende invece correnti generate esclusivamente dall'eterogeneità del campo di velocità prodotta dalla turbolenza pura (si parla anche di "*turbulence-driven secondary current*" - Figura 42).

Le correnti del primo tipo si manifestano per tutti i tipi di flusso (laminare o puramente turbolento), mentre quelle del secondo tipo essendo legate intrinsecamente alla turbolenza non si manifestano per condizioni caratterizzate da bassi valori del numero di Reynolds (estremamente rare in contesti naturali).

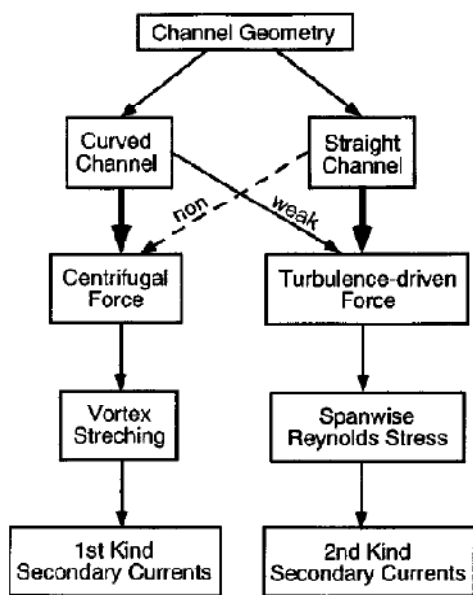


Figura 41 - Classificazione delle correnti secondarie (da Nezu, 2005)

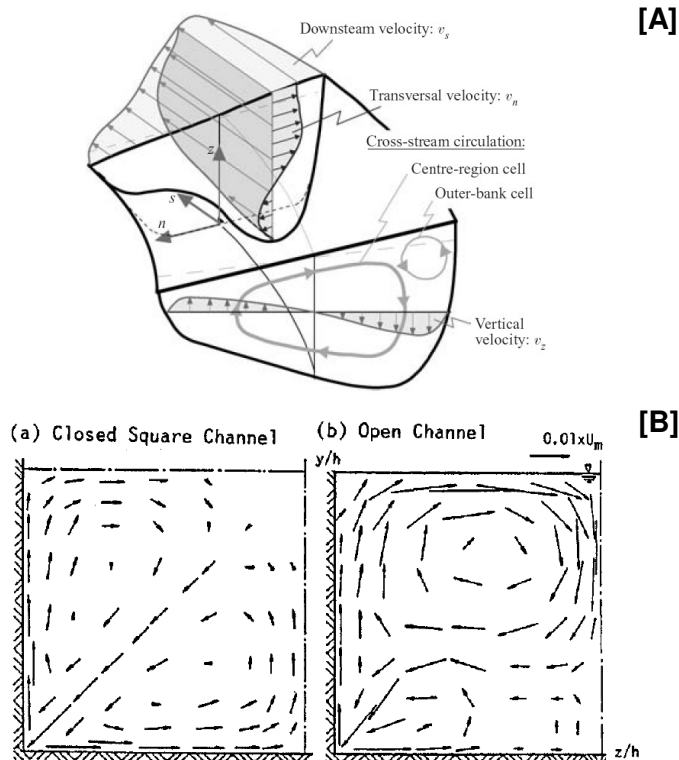


Figura 42 - Schematizzazione dei campi di moto generati da correnti secondarie del primo tipo [A] (da Blanckaert e De, 2004) e del secondo tipo [B] (da Nezu, 2005)

Tipicamente le correnti del secondo tipo producono turbolenza longitudinale molto più debole di quella prodotta dalla curvatura del flusso (Nikora e Roy, 2010), e la loro presenza in ambiti fluviali diventa potenzialmente percepibile solo in prossimità di angoli “morti” dei canali o in corrispondenza di variazioni trasversali della scabrezza al fondo.

Le correnti del primo tipo invece diventano di estrema rilevanza in *pattern* monocursali sinuosi, anche se particolari condizioni dinamiche in singoli rami presenti in alvei a canali intrecciati non consentono di escludere del tutto in ambito modellistico questo tipo di effetto fluidodinamico. Fortunatamente, essendo la forza centrifuga alla base delle correnti del primo tipo, la loro simulazione risulta computazionalmente meno onerosa rispetto alle correnti del secondo tipo (Nezu, 2005).

Le correnti secondarie del primo tipo non hanno rilevanti effetti sull’andamento generale della corrente, ma la loro influenza morfologica è notevole per la morfodinamica dei canali meandriformi o transizionali per i quali il flusso elicoidale prodotto influenza in modo diretto la distribuzione trasversale dei sedimenti, inducendo l’avanzamento verso valle del punto di massima erosione laterale esterna e quindi del meandro (Figura 41). Il fenomeno ha origine dallo squilibrio tra le forze centrifughe dominanti e il gradiente di pressione trasversale all’asse del canale. Questo squilibrio produce la formazione delle celle secondarie della cosiddetta regione centrale della corrente (Blanckaert e De, 2004).

6.6.1.6 Modellazione dell’erosione spondale

La modellazione dell’evoluzione spondale rappresenta attualmente il punto di debolezza più significativo dei modelli CFD esistenti (Mosselman, 1998; Formann et al, 2007; Ferguson, 2008; Mosselman, 2010,).

Il processo di arretramento spondale ha rappresentato il *focus* per numerosissimi studi in geomorfologia fluviale (per alcuni eccellenti lavori di revisione si rimanda a Lawler, 1993; Couper, 2004) che hanno concentrato l'attenzione in modo diffuso sui principali fattori guida dei processi erosivi (costituzione e proprietà meccaniche del materiale spondale, sforzi di taglio idraulico al piede e in parete, altezza spondale, forma della sezione trasversale, livello della falda, vegetazione spondale, effetto del ghiaccio, ecc.). Tuttavia solo di recente (Simon et al., 2003; Rinaldi et al., 2008a) il problema è stato affrontato in modo integrato, cercando di superare gli approcci riduzionisti precedenti concentrati sull'analisi disgiunta di singoli *set* di processi, ed indagando anche le reciproche interazioni e l'importanza relativa di ciascun processo.

Questo ritardo di fatto rispecchia un'intrinseca e notevole difficoltà di indagine e di modellazione dei processi spondali, soprattutto in quei contesti morfologici che hanno maggiormente attirato l'attenzione dei ricercatori ovvero ambiti fluviali caratterizzati da morfologie prevalentemente monocursali o transizionali (tradizionalmente lo studio spondale si è concentrato su *pattern* meandrici), a sponda alta e coesa.

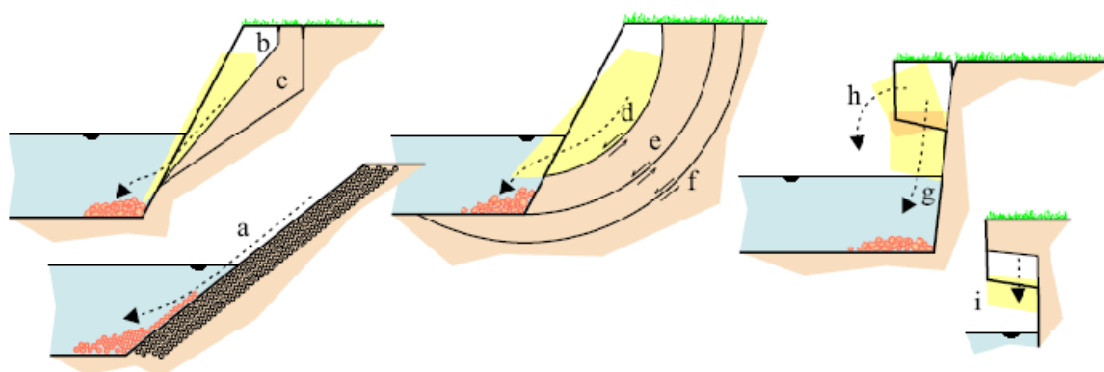


Figura 43 - Rappresentazione schematica dei principali movimenti di arretramento spondale. Cedimenti con piano di scorrimento piano: (a) *shallow slip*, (b) *plane slip*, (c) *slab*. Cedimenti con piano di scorrimento rotazionale concavo: (d) *slope*, (e) *toe*, (f) *base*. Cedimenti "cantilever" (g) *shear*, (h) *beam*, (i) *tensile* (da Jagers, 2003)

Per le sponde non coese il problema diventa almeno parzialmente più semplice e modellabile. Per contesti fluviali a morfologia *braided* a sedimenti prevalentemente sciolti come quello del tratto studio (7.6) i cedimenti spondali sono essenzialmente caratterizzati da scivolamenti a strati sottili di sedimenti sciolti disposti parallelamente alla parete di sponda (*shallow slip/plane slip* - Jagers, 2003 - Figura 46). In questi contesti quindi la simulazione dell'evoluzione spondale potrebbe ridursi ad una modellazione specifica del movimento dei sedimenti posti in celle spondali. In questi casi, a patto di trascurare gli effetti sull'erosività laterale indotti da parziale cementazione dei sedimenti e dalla presenza della vegetazione (con potenziale duplice effetto stabilizzante e destabilizzante), l'arretramento spondale può essere riprodotto modellando la correzione gravitazionale sul flusso di sedimenti presenti sulla sponda, correzione imposta considerando la pendenza trasversale dovuta all'angolo di inclinazione delle sponde stesse (Rinaldi et al, 2008a). Quando il sedimento si muove al di sopra di una porzione di letto con pendenza trasversale la direzione di spostamento dei clasti non coincide con quella del vettore di velocità al fondo (6.6.1.3), ma viene deviata nel verso della massima pendenza locale ovvero la direzione di spostamento viene principalmente influenzata dal vettore forza di gravità piuttosto che da quello di sforzo di taglio. Il grado di deviazione nella traiettoria può relazionarsi essenzialmente al rapporto tra il vettore risultante delle forze di *drag* al fondo e quello di attrazione gravitazionale, con una deviazione del percorso dei sedimenti tanto più alta quanto più basso è il valore di questo rapporto. Dato che le forze gravitazionali sono proporzionali al volume delle particelle, mentre quelle di sforzo di taglio sono proporzionali all'area esterna delle particelle, le particelle più grandi mostrano la maggiore deflessione (Nelson et al, 2003).

Nonostante queste facilitazioni strettamente legate a questo contesto morfologico, la modellazione numerica dell'arretramento spondale in alvei a canali intrecciati continua a scontrarsi con problemi ancora oggi non pienamente risolti quali:

- la simulazione del processo concettualmente opposto a quello di arretramento spondale, ovvero l'accrescimento delle sponde per accumulo al piede o deposizione al *top*;
- la riorganizzazione in tempo reale e con procedure automatiche delle *mesh* spaziali nelle aree oggetto di arretramento;
- la simulazione dell'effetto vegetazionale sulla stabilità spondale;
- la parametrizzazione distribuita delle caratteristiche meccaniche di erodibilità (Mosselman, 2010).

6.6.1.7 Modellazione dei processi di erosione – deposizione

Come accennato al sottocapitolo 6.6.1.4, in una procedura modellistica disaccoppiata, al termine della *routine* di calcolo del campo di moto fluido e della capacità di trasporto solido al fondo, viene effettuato il calcolo del bilancio di massa al fondo in corrispondenza di ogni singola cella del dominio. Applicando il bilancio di massa questo procedimento di calcolo può essere descritto in modo generale (valido per contesti di modellazione in cui si valutano sia il trasporto al fondo, che quello in sospensione) dalla seguente espressione (Nelson et al, 2003)

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{1}{c_b} \left[\nabla \cdot \vec{Q}_s + \frac{\partial}{\partial t} \int_B^E c_s dz \right] \quad (18)$$

in cui B, livello del fondo rispetto ad un *datum* locale; E, livello del pelo libero rispetto allo stesso riferimento altimetrico; c_b , concentrazione di sedimenti al fondo considerando la porosità primaria e secondaria; c_s , concentrazione del sedimento in sospensione; \vec{Q}_s , vettore locale di portata solida totale. Questa espressione rappresenta una forma semplificata della ben più nota equazione di Exner nella sua forma generalizzata espressa compiutamente in Paola e Voller, 2005.

6.6.1.8 Modellazione dell'effetto della vegetazione

L'influenza della vegetazione sulla dinamica degli alvei fluviali è un argomento indagato in numerosi lavori di ricerca in passato e oggi di crescente interesse alla luce delle recenti normative comunitarie (European Commission WFD 2000/60). Tra gli aspetti indagati ricordiamo la reazione della componente vegetale riparia agli impatti antropici (Hupp e Rinaldi, 2007), la modellazione fisica dell'effetto della vegetazione sulla configurazione planimetrica di alvei a canali intrecciati (Gran e Paola, 2001; Coulthard, 2005; Tal e Paola, 2010), la modellazione statistica della distribuzione vegetazionale in funzione del regime delle portate (Perona et al, 2009), la relazione tra la dinamica d'alveo e quella delle isole fluviali o degli LWD, *Large Woody Debris* (Gurnell et al, 2000; Gurnell e Petts, 2006; Zanoni et al, 2008; Comiti et al, 2011), gli effetti della vegetazione sulle relazioni altimetriche interne ad alvei *braided* (Bertoldi et al, 2011). Per contro, sono ben più rare le applicazioni modellistiche numeriche e in particolare quelle che hanno cercato di associare modelli dell'evoluzione vegetale all'idrodinamica e alla morfodinamica da CFD (Baptist e Mosselman, 2002, Baptist, 2005; Baptist et al, 2007; Jang e Shimuzu, 2007; Crosato e Saleh, 2011).

Nonostante i recenti sviluppi, le mutue interazioni tra i progressi biologici rendono ancora più complesso un sistema per il quale *“mathematical models are still in their infancy”* (Mosselman, 2010). In particolare rimangono ancora non risolti in modo soddisfacente alcuni aspetti quali

l'effetto delle vegetazione sull'erosione spondale, il peso della differenziazione spaziale del tipo di vegetazione e la riproduzione del processo di colonizzazione e successione vegetazionale (Mosselman, 2010).

6.6.1.9 Scelta della dimensione del modello CFD

La scelta di un certo tipo di modello CFD per risolvere problemi specifici dipende da

- scala spazio-temporale, natura e complessità dell'applicazione (Lane et al, 1999);
- obiettivi della modellazione (Lane et al, 1999);
- le capacità del modello di simulare il problema adeguatamente nel pieno dei processi che lo caratterizzano (Papanicolaou et al, 2008);
- la disponibilità di dati per la sua calibrazione e validazione, ovvero la corrispondenza tra la scala di monitoraggio fluviale per il reperimento dei dati di calibrazione/validazione e quella associata alla predittibilità del modello (Lane et al, 1999; Formann et al, 2007);
- generale disponibilità di tempo e *budget* per risolvere il problema stesso (Papanicolaou et al, 2008).

Prioritaria rispetto alla scelta deve essere la consapevolezza che, nonostante i livelli notevolissimi di sofisticazione raggiunti e alla luce delle loro limitazioni delineate nei sottocapitoli precedenti (6.6.1.2 - 6.6.1.8), la modellazione accoppiata idrodinamica e morfodinamica CFD incorpora un grado di semplificazione necessario per rendere le simulazioni computazionalmente fattibili, semplificazioni che crescono con la capacità del singolo modello di coprire contesti spazio-temporali più ampi. Come evidenzia efficacemente la Figura 44, la semplificazione crescente, pur abbassando i costi dell'applicazione, si scontra con il rischio di ottenere risultati sempre meno attendibili, mentre l'aumento della complessità anche se associata a maggiore affidabilità del risultato, richiede necessariamente maggiori dati di *input* e tempo per la loro preparazione facendo così lievitare i costi di calibrazione e validazione (Papanicolaou et al, 2008).

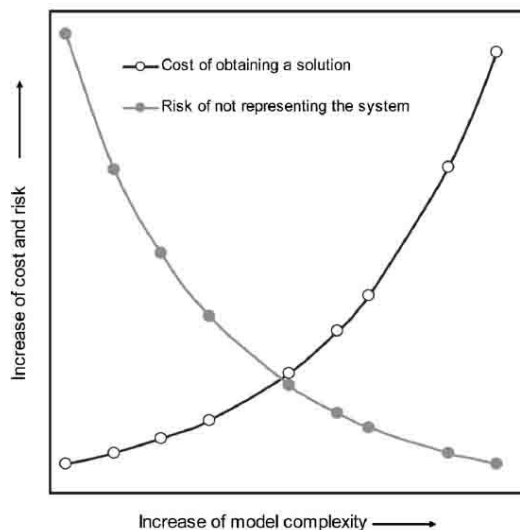


Figura 44 - Schema concettuale che mette in relazione costi di applicazione e rischio di non attendibilità dei risultati di un modello con la complessità del modello stesso (Overton e Meadows, 1976)

L'ottimizzazione nella scelta di un corretto livello di complessità ruota fondamentalmente intorno alla selezione della dimensione appropriata del modello (3D, 2D o 1D). Sebbene non esista una risposta definitiva a questo problema, il *modeller* deve trovare una "linea di condotta" che lo guidi

nella valutazione. Uno dei criteri può essere quello di imporre come prioritaria la capacità del modello di coprire (modellare) tutti gli aspetti ed i processi rilevanti per lo specifico problema. In questo senso vengono in aiuto le indicazioni proposte in Malcherek, 2001 e riprese in Formann et al, 2007 associate ad un grafico proposto inizialmente in Church, 1996, rivisto in Church, 2008. Combinando le informazioni riportate in questi studi, si ripropone di seguito il grafico da Church (2008) con alcune integrazioni che riguardano le tre macro-classi di modelli CFD morfodinamici:

- modelli 3D (DNS – *Direct Numerical Simulations*, LES – *Large Eddy Simulations*, modelli con risoluzione delle RANS non idrostatici o idrostatici – *shallow water hypotesys*);
- modelli 2D *depth-averaged*, con moduli di stima della turbolenza al fondo;
- modelli 1D.

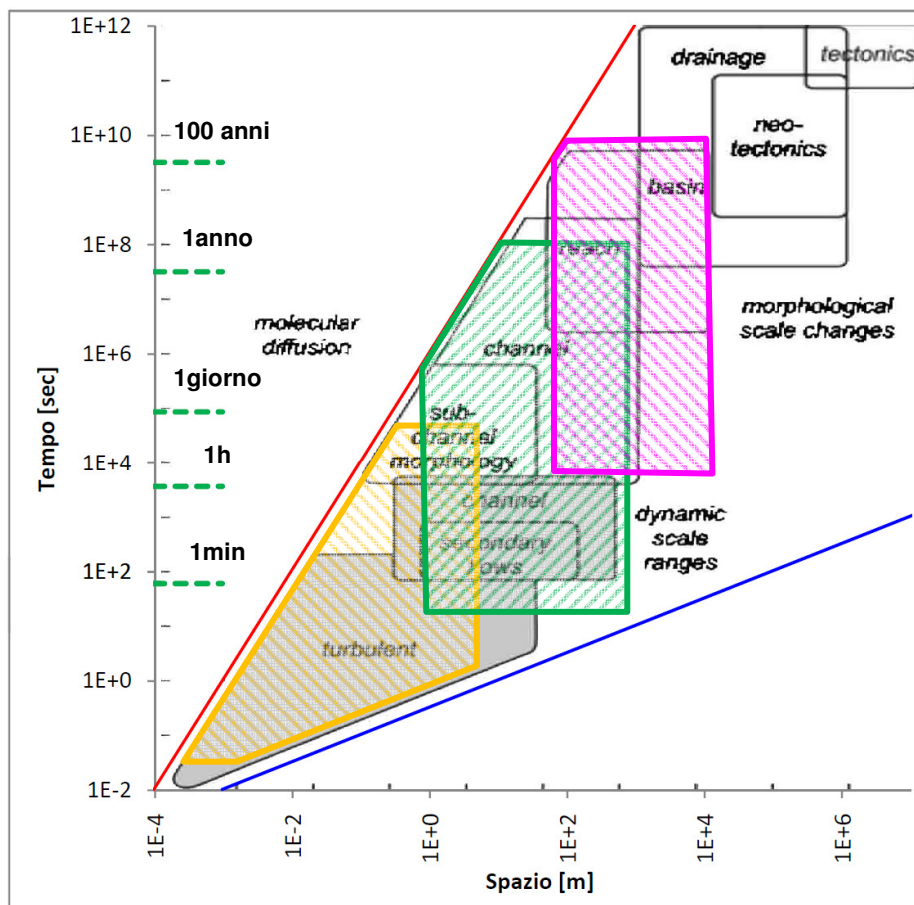


Figura 45 - Domini spazio-temporali di applicazione dei modelli CFD morfodinamici (modificato da Church, 2008). In arancione l'areale coperto dai modelli 3D, in verde 2D, in violetto 1D

Considerando la Figura 45 e focalizzando l'attenzione solo a contesti spazio-temporali propri di applicazioni modellistiche rilevanti per questo lavoro di tesi (distanze superiori a 500 m e tempi superiori all'ora), le limitazioni applicative sono evidenti, soprattutto per i modelli 3D che rimangono praticamente esclusi.

Questa esclusione riguarda tutti i tipi di modelli 3D, ovvero

- modelli DNS (*Direct Numerical Simulations*) – modelli che risolvono in forma diretta le NSE ((5), (6)) spingendo alla massima risoluzione la discretizzazione spaziale (risoluzione di 1 mm - Malcherek, 2001), descrivendo il campo di moto turbolento anche all'interno dello strato di *boundary* (all'interno del quale normalmente si assume un profilo di velocità logaritmico). Questi modelli non sono utilizzati in accoppiamento a moduli morfodinamici di trasporto solido (Nelson et al, 2003).

- modelli LES (*Large Eddy Simulations*) – modelli che calcolano in pieno il campo di moto imponendo vincoli di chiusura solo per fluttuazioni che avvengono a scale spaziali inferiori a quelle dei *grid* usati (1 cm - Malcherek, 2001).
- modelli RANS *shallow water* (assunzione delle pressioni interne con distribuzione idrostatica - valida in condizioni di trascurabili componenti di velocità verticali) e non idrostatici. Modelli 3D che risolvono in modo semplificato la turbolenza e quindi non richiedono dettaglio spaziale delle *mesh* subcentimetrica (risoluzione geometrica richiesta compresa tra 1dm ÷ 1m - Malcherek, 2001).

Le stesse valutazioni di forte limitazione applicativa di questa classe di modelli emergono chiaramente anche nella seguente Figura 46. Essa rende in modo efficace non solo l'impossibilità computazionale dell'applicazione a scale di tratto fluviale, ma anche la relativa impossibilità a condurre campagne di monitoraggio ad hoc davvero eccessive per mole e qualità dei dati di campo richiesti (topografici, idrodinamici, granulometrici).

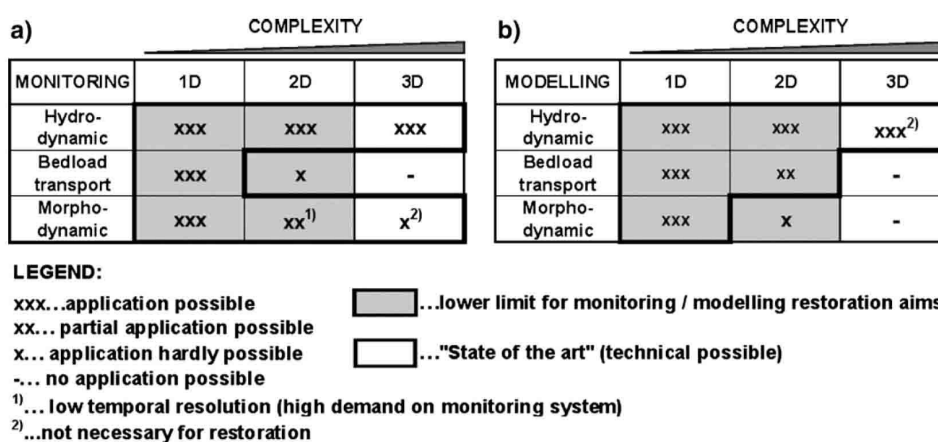


Figura 46 - Stato dell'arte della modellazione numerica e del monitoraggio a scale spaziali applicative (da Formann et al, 2007)

I modelli a maggiore copertura spazio-temporale sono ovviamente quelli mono-dimensionali, preceduti dai 2D che appaiono il compromesso migliore per applicazioni a scala di tratto (ordine di alcuni chilometri). Esistono numerosi modelli 1D e 2D che sono stati usati con successo per predire la componente di trasporto al fondo (Papanicolaou et al, 2008). L'analisi morfodinamica con modelli bidimensionali consente una modellazione distribuita delle variazioni altimetriche e delle modificazioni morfologiche interne all'alveo, a differenza invece dei modelli mono-dimensionali per i quali l'evoluzione del fondo viene distribuita in modo uniforme su parte o tutta la sezione fluviale (Figura 47).

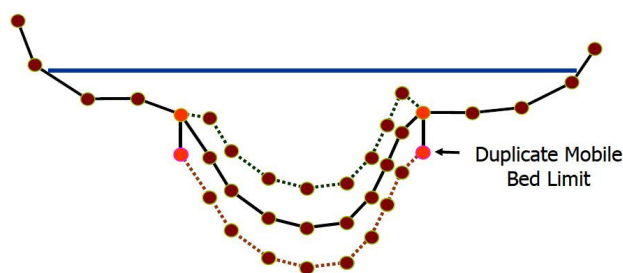


Figura 47 - Schema tipo di modificazione morfologica del fondo in corrispondenza di una sezione fluviale in un modello 1D (da US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, 2008)

I modelli 1D e 2D sono altresì limitanti nella modellazione morfodinamica in quanto, in presenza di correnti secondarie non trascurabili (6.6.1.5), non riescono a simularne l'effetto a meno di fattori correttivi *rule-based* (6.6.2.2) molto influenzati dal processo di calibrazione e fortemente legati alla specifica realtà modellata. Nel 2005, Ferguson affermava che a quell'anno erano molto rare le applicazioni modellistiche 2D di trasporto solido o morfodinamica a fiumi a fondo ghiaioso, soprattutto per le limitazioni nella modellazione dell'erosione spondale (Ferguson, 2008). La stessa indicazione critica viene espressa anche in Formann et al, 2007. Neppure un modello 3D a distribuzione idrostatica delle pressioni può predire esattamente le correnti secondarie e le conseguenti influenze sul trasporto al fondo nelle situazioni in cui sono presenti elevati gradienti di pressione verticale legata a locali bruschi cambiamenti di quota del fondo, presenza di ostacoli, ecc. La non completa attendibilità dei modelli più complessi morfodinamici anche a piccole scale applicative è legata fundamentalmente alla difficoltà modellistica dei fenomeni turbolenti, anche se la continua ricerca (riduzionista) in questa direzione e le crescenti potenzialità computazionali fanno ritenere che in prospettiva questa appare la strada di potenziale maggiore sviluppo (Papanicolaou et al, 2008).

6.6.2 Reduced Complexity Models (RCM)

Di fronte al *trade-off* tra costi/attendibilità e complessità rappresentato in Figura 44 le opzioni che possono essere intraprese sono fondamentalmente di due tipi:

- applicare CFD puntando ad una condizione che ottimizzi la combinazione di questi fattori, riducendo le scale di applicazioni a quelle indicate in Figura 45;
- intraprendere una strada alternativa a quella rappresentata dai CFD, che cambi paradigma di modellazione, abbandoni questa via riduzionista e punti a nuove combinazioni di semplicità modellistica. Questa è la via dei cosiddetti *Reduced Complexity Models* - RCM.

Alla base di questa svolta modellistica si trova non solo il fattore attendibilità, inevitabilmente non garantita nemmeno dai CFD, ma anche le loro principali lacune delineate nei sottocapitoli precedenti

- onere computazionale;
- insostenibilità della richiesta di dati ad alta risoluzione e distribuzione;
- limitazioni applicative spazio-temporali evidenziati (Figura 45).

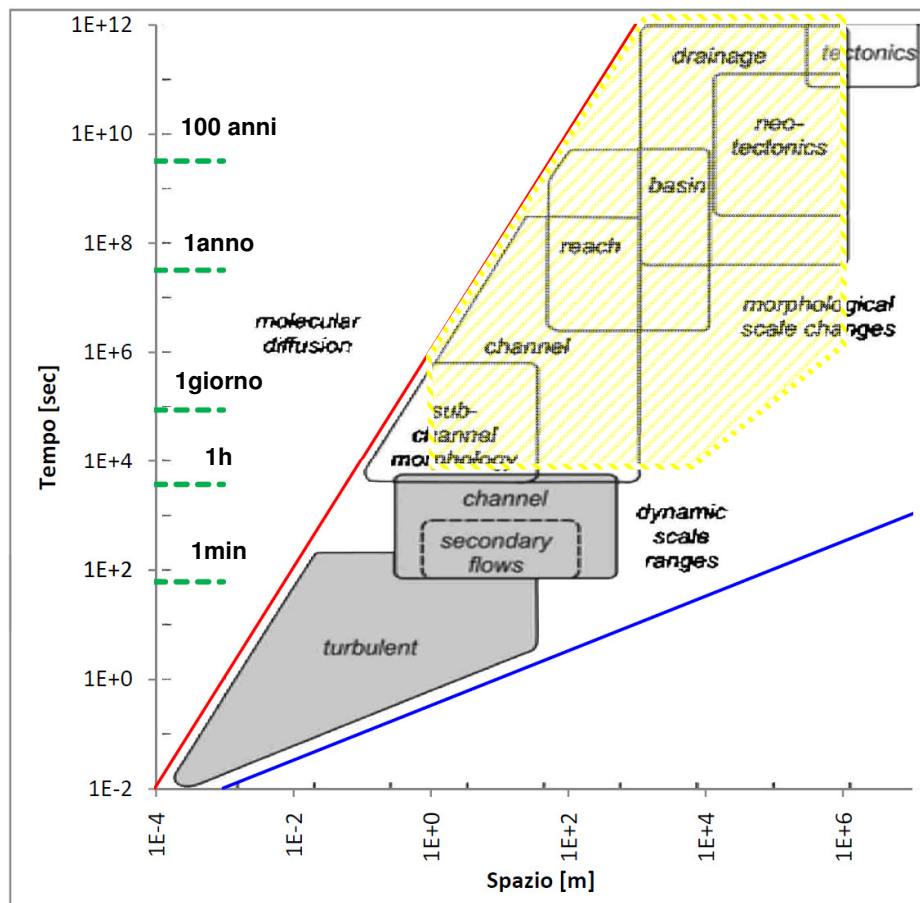


Figura 48 - Domini spazio-temporali di applicazione dei modelli RCM per applicazioni fluviali e a scala di bacino (modificato da Church, 2008). In giallo è evidenziato il contesto di applicabilità

Osservando la Figura 48 riferita agli RCM omologa della Figura 45, si nota come questa classe di modelli permetta di coprire quella scala intermedia (*mesoscale* compresa tra $10^0 \div 10^2$ km e $10^1 \div 10^3$ anni, Brasington e Richards, 2007) che caratterizza il comportamento e l'evoluzione dei corsi d'acqua e dei bacini idrografici corrispondente ad un orizzonte di estremo interesse ai fini

gestionali dei sistemi fluviali (Brasington e Richards, 2007; Coulthard et al, 2007). Gli RCM sono il frutto di semplificazioni spinte fino a livelli di complessità “sostenibili” condotte allo scopo di ridurre il sovraccarico computazionale e di parametri tipico degli CFD, permettendo così simulazioni efficienti e analisi di incertezza. Nonostante questo, l’applicazione di RCM per la modellazione dei processi alla scala intermedia richiede ancora soluzioni che rientrino quanto più possibile nell’ambito della fisica teorica classica (Brasington e Richards, 2007).

Volendo impostare una descrizione non esaustiva ma per lo meno di sintesi relativa ai principali RCM possiamo forzare una loro organizzazione in tre famiglie principali:

- *Reduced Complexity Hydraulic Models* (6.6.2.1);
- *Rules-Based Model* (6.6.2.2);
- *Cellular Automata Model* (6.6.2.3).

Nei prossimi sottocapitoli sarà dedicato breve spazio a tutte queste classi soffermandosi maggiormente sui modelli cellulari, all’interno dei quali rientra il modello RCM utilizzato in questo lavoro di ricerca.

6.6.2.1 *Reduced Complexity Hydraulic Models (RCHM)*

Pur trattandosi di RCM esclusivamente idrodinamici, un cenno a questo gruppo di modelli è doveroso in considerazione dell’interesse reale seppur indiretto che rivestono per applicazioni in ambito geomorfologico. Quella dei modelli RCHM costituisce una classe molto ampia ed eterogenea di modelli sviluppati prevalentemente per la previsione dell’estensione degli allagamenti dovuti a esondazioni fluviali.

L’interesse per questi modelli discende da alcune ragioni principali:

- pur essendo applicati a contesti antropizzati e non prettamente fluviali (aree urbane o a seminativo) i metodi di semplificazione computazionale che utilizzano sono essenzialmente gli stessi richiesti per modellare il deflusso in contesti a topografia complessa come alvei *braided* o corridoi vegetati all’interno di piane inondabili (Brasington e Richards, 2007).
- le tecniche utilizzate per calibrare e validare questi modelli sono agevolmente applicabili anche a contesti geomorfologici fluviali come evidenziato nei capitoli 10 e 11.
- alcuni dei modelli RCHM (Bates e De Roo, 2000) utilizzano algoritmi di calcolo del tutto simili a quelli propri degli schemi cellulari descritti al sottocapitolo 6.6.2.3.

Il modello RCHM probabilmente più noto in letteratura, di ampia diffusione e applicazione in ambito ingegneristico (Mazzoleni et al, 2011; Neal et al, 2011) è probabilmente LISFLOOD-FP (Bates e De Roo, 2000; Horritt e Bates, 2002; Hunter et al, 2007; Mazzoleni et al, 2011; Neal et al, 2011), un modello idrodinamico quasi-bidimensionale di allagamento (secondo la classificazione idraulica proposta in Ercoli, 2002) del tipo “*raster based model*”, pensato per sfruttare al massimo tipologie di dati topografici in formato *raster* oggi diffusamente disponibili (foto aeree, immagini satellitari, DEM, aree allagate, ecc.), e costruito sulla semplificazione delle equazioni di De Saint Venant (forma particolare delle NSE (5), (6)) velocizzando i tempi di calcolo e fornendo risultati paragonabili per attendibilità a quelli ottenibili con modelli idrodinamici 2D *depth-averaged* (Horritt e Bates, 2002).

6.6.2.2 *Rule-Based Model (RBM)*

Causa l'ampia eterogeneità applicativa dei modelli che possono ricadere in questa categoria di RCM, è difficile tracciarne con nettezza un quadro chiaro e definitivo. L'unico aspetto che accomuna questi modelli è il fatto di fondarsi esclusivamente su regole di comportamento e non su equazioni fisiche o loro forme semplificate. In questa tipologia di modelli l'interazione tra i componenti è basata esclusivamente o prevalentemente su pure regole modellistiche derivate da altri modelli concettuali (Hooke, 2003) o derivare da altre discipline (Glober, 2009). Le forme matematiche delle regole utilizzate possono derivare da

- dall'astrazione concettuale di leggi fisiche;
- dal tentativo di descrivere matematicamente dinamiche che si processano a scale inferiori o superiori a quelle proprie del modello;
- discendere dall'intuizione del *modeller* (Murray, 2003).

Questi modelli grazie alla loro natura fortemente diretta possono essere utilizzati per la modellazione di *trend* su larga scala ma anche su micro-scala per la riproduzione di singoli processi. Modelli puramente *Rule-Based* forniscono evidentemente valutazioni quantitative con gli stessi limiti dei modelli concettuali o empirico/statistici; singole applicazioni *rule-based* a livello integrativo invece costituiscono forme pratiche ed agevoli dal punto di vista computazionale di grande valenza applicativa. Specifiche applicazioni *rule-based* sono diffuse ad integrazione di tecniche modellistiche "classiche". Si pensi solamente alle componenti interne dei CFD commerciali più diffusi ovvero MIKE21C o DELFT3D in configurazioni 2D *depth-averaged* per le quali vengono esplicitate specifiche regole modellistiche che permettono a questi modelli di simulare rispettivamente i processi di erosione spondale (Danish Hydraulic Institute, 2005), oppure i processi di crescita della vegetazione (WL, 2011).

Altre "applicazioni integrative" simili si ritrovano in Baptist e Mosselman, 2002; in questo caso il modello utilizza regole di crescita della riparia vegetazione ricavate dalla letteratura per simulare lo sviluppo di successioni vegetazionali nelle aree inondate e per variare di conseguenza il valore della scabrezza idraulica. Le regole sono applicate ad ogni cella di calcolo. Esse predicono la successione ecologica sviluppata e la quantità di crescita della vegetazione basandosi sulle condizioni vegetali iniziali, sul tempo di allagamento, sull'intensità del pascolo e sul grado di modificazione morfologica locale.

6.6.2.3 Cellular Automata Models (CA)

“The development of cellular approaches to modelling river form and process represents one of the most important advances in fluvial geomorphology over the past decade.”

Nicholas, 2005

Questa introduzione ad una pubblicazione scientifica di Nicholas del 2005 rende in modo sintetico ed efficace l'importanza che hanno rivestito i modelli cellulari in ambito geomorfologico negli ultimi anni. Dai pionieristici lavori di Murray e Paola di metà anni '90 (1994, 1997) nuovi passi in avanti sono stati fatti aprendo la porta alla modellistica RCM. Il loro modello numerico (MP) seppur molto semplice e di carattere prettamente esplorativo, per primo ha palesato quanto sia in parte fuorviante seguire necessariamente un approccio classico “riduzionista” tipico della modellazione CFD che cerca di simulare ogni singolo processo fin anche al massimo dettaglio. Attraverso i loro lavori si è diffusa la convinzione che spesso un approccio RCM può fornire indicazioni altrimenti non desumibili con altre forme modellistiche.

Un modello cellulare (CA) consta genericamente in un dominio discretizzato in celle in cui lo stato di ogni cella è aggiornato durante ogni *step* temporale in accordo con un *set* di semplici deterministiche interazioni locale applicate mettendo in relazione lo stato di ogni cella con quelle ad essa adiacenti o nelle immediate vicinanze. Nonostante la semplicità di base dello schema CA ripreso da Murray e Paola, l'interazione continua tra celle dei processi fisici schematizzati e l'iterazione degli stessi nel tempo e nello spazio, produce comportamenti non lineari e assai complessi. Anche se le componenti elementari di un sistema possono seguire leggi semplici e lineari, il comportamento del sistema formato dall'associazione delle singole componenti può essere molto articolato (Wolfram, 1984). Il concetto di automatismo cellulare alla base del modello MP si caratterizza per cinque aspetti chiave (Wolfram, 1984; Coulthard, 1999):

1. il sistema è formato da un reticolo discreto di celle;
2. esse evolvono in intervalli di tempo discreti;
3. ogni cella può assumere un *set* finito di valori;
4. lo stato di tutte le celle evolve in accordo con le stesse leggi deterministiche;
5. le leggi di comportamento esprimono un legame con lo stato delle celle immediatamente vicine.

Nell'ambito applicativo prettamente fluviale, lo schema cellulare descritto da queste regole di comportamento è stato propriamente adottato solo del modello MP. I modelli a seguire hanno modificato lo schema MP ma vengono ancora comunemente denominati modelli cellulari pur non essendo tali in senso stretto. Le modifiche apportate al modello di MP da questi successivi modelli cellulari hanno rappresentato interessanti esempi di trasformazione di un modello puramente esplorativo e puramente cellulare in modelli potenzialmente predittivi (Murray, 2007). Tra le applicazioni CA in ambito fluviale si ricordano, oltre al già citato modello MP, il modello sviluppato da Nicholas e Thomas (TNQ - Thomas e Nicholas, 2002), quello sviluppato da Coulthard T.J. (CAESAR - Coulthard et al, 1999; Van De Wiel et al, 2007), e altre applicazioni molto recenti di Hodge (2010) e Baartman (2011). Nei sottocapitoli a seguire si dedicherà breve spazio solo ai modelli CA più noti in letteratura MP (6.6.2.3.1), TNQ (6.6.2.3.2) e CAESAR (6.7) dedicando più spazio a quest'ultimo. Esistono numerose altre applicazioni CA descritte in letteratura in contesti geomorfologici non puramente fluviali (Chase, 1992; Favis-Mortlock, 1996; Haff, 2001; Jiménez-Hornero et al, 2003; Luo et al, 2004) che tuttavia esulano dal *focus* di questo lavoro.

6.6.2.3.1 Modello Murray-Paola (MP)

Il modello cellulare considerato antesignano del suo genere è quello sviluppato da Murray e Paola nel 1994 (1994, 1997, 2003). Questo modello è stato sviluppato con la finalità principale di ricreare numericamente le principali caratteristiche spaziali e temporali dei corsi d'acqua *braided* e

valutare tali risultati in modo prettamente qualitativo (Murray e Paola, 1994). Si tratta di un modello prettamente esplorativo nato da un approccio *top-down / emergent-phenomena*, all'interno del quale si sostituiscono le equazioni fluidodinamiche che governano l'interazione tra i processi morfodinamici con regole non basate direttamente su analisi di processi o misurazioni in campo ma che discendono da una grossolana semplificazione delle leggi stesse dell'idraulica e del trasporto di sedimenti.

Il dominio del modello è costituito da una maglia di 22 x 200 celle a pendenza costante, con pareti laterali fisse e immutabili altimetricamente come pure le celle poste lungo ai margini superiore ed inferiore. Le condizioni del fondo iniziali sono ricreate attraverso un disturbo altimetrico *random*. Lo *input* liquido immesso in punti posti sul contorno di monte procede verso valle seguendo due regole di distribuzioni riportate di seguito (regole di distribuzione pesata in base alla pendenza) valide per distribuire da ogni cella la componente liquida solo alle 3 celle frontali poste immediatamente a valle (Figura 49).

$$Q_i = \frac{S_i^n}{\sum_j (S_j)^n} Q_o \quad (19)$$

$$Q_i = \frac{|S_i|^{-n}}{\sum_j |S_j|^{-n}} Q_o \quad (20)$$

Q_o , portata liquida presente nella cella centrale da ripartire alle 3 valle; Q_i , portata liquida ripartita dalla cella centrale alla i -sima di frontale (i, j comprese tra [1-3]), n , costante con valore compreso tra 0.5 e 1

La regola riportata nell'espressione (19) vale nel caso in cui tra le 3 celle frontali ne esista almeno una a quota inferiore a quella da cui si ripartisce il flusso posta appena a monte. L'altra regola vale invece nel caso in cui tutte le 3 celle abbiano quota uguale o maggiore della centrale (regola di *uphill*). Contestualmente al calcolo delle portate distribuite viene svolto anche quello delle portate di sedimenti, ripartiti secondo le seguenti regole sempre tra le stesse celle.

$$Q_{si} = K[Q_i]^m \quad (21)$$

$$Q_{si} = K[Q_i S_i]^m \quad (22)$$

$$Q_{si} = K[Q_i (S_i + C_s)]^m \quad (23)$$

$$Q_{si} = K[Q_i S_i + \epsilon \sum_{j=1}^3 Q_{uj} S_{uj}]^m \quad (24)$$

$$Q_{si} = K[Q_i (S_i + C_s) - Th]^m \quad (25)$$

$$Q_{si} = K[Q_i S_i + \epsilon \sum_{j=1}^3 Q_{uj} S_{uj} - Th]^m \quad (26)$$

Q_{si} , portata solida da ripartire alle 3 celle di valle; Q_{uj} , portata solida in ingresso dalle celle di monte; m , costante pari a 2.; ϵ , costante pari a 0.3; Th , portata di soglia

Le regole testate ((21)-(24) in Murray e Paola, 1994, (25) e (26) in Murray e Paola, 1997) legano semplicemente le portate solide a quelle liquide con appositi fattori correttivi

- (K, m, ϵ) per regolare nel complesso l'entità relativa delle variazioni di fondo;
- (C_s) per consentire che in presenza d'acqua avvenga trasporto anche in condizioni di contropendenza;
- (Th), per simulare ipotetiche soglie di portata minima per il trasporto.

Quando tutta la portata liquida immessa da monte raggiunge il margine di valle il modello ricalcola le quote del fondo applicando la seguente formula per ogni cella

$$\Delta Elev = Q_s^{in} - Q_s^{out} \quad (27)$$

Q_s^{in} , portata solida in ingresso alla cella. Q_s^{out} , portata solida in uscita dalla cella; $\Delta Elev$, variazione della quota del fondo della singola cella.

che rappresenta la forma più semplificata della formula di Exner riportata al sottocapitolo 6.6.1.7.

Il modello prevede anche forme di simulazione di trasporto solido laterale (solo verso le 2 celle laterali a quella centrale distributiva) secondo la seguente regola

$$Q_{sl} = K_l S_l Q_{s0} \quad (28)$$

Q_{sl} , quantità di sedimenti trasportata alle celle laterali; S_l , pendenza tra la cella di ripartizione e quelle laterali; Q_{s0} , sedimento totale distribuito alle 3 celle frontali di valle; K_l , costante di aggiustamento

Nel 2003, con un ampliamento apportato alla versione originale del modello MP del 1994, gli autori hanno implementato alcune regole aggiuntive per simulare l'effetto morfologico della vegetazione (sono stati sempre esclusi gli effetti sulla scabrezza idraulica - Murray e Paola, 2003). La modellazione della vegetazione è stata impostata ricreando uno strato superficiale protettivo ed intensificando l'attività erosiva laterale in funzione della crescita dello strato vegetazionale.

Osservando queste poche regole alla base del modello, si evince la grande importanza data dagli autori alla semplificazione del formalismo matematico alla base delle interazioni e degli effetti di feedback che causano il comportamento del sistema (Murray, 2003). Il modello MP si mostra capace di ricreare i fenomeni di divergenza e convergenza del flusso, di migrazione laterale e verso valle di barre e canali. Murray e Paola, in sostanza, hanno riprodotto le macro-condizioni che presiedono l'impostazione di una morfologia a canali intrecciati (flussi non confinati lateralmente, materiale mobile sul fondo ed erosione laterale) semplificando le leggi fisiche che stanno alla base di tale fenomeno e sostituendole con relazioni deterministiche di interazione tra acqua e sedimenti (Murray e Paola, 1997; Coulthard et al, 2007).

I test condotti da Murray e Paola hanno verificato che specialmente usando le formule di trasporto (23) e (24) il modello riproduce *pattern* qualitativamente realistici, statisticamente stabili, seppur mai in uno stato meramente statico; inoltre l'*output* di sedimenti è fortemente variabile per intensità, il processo di erosione laterale riveste un ruolo fondamentale di modellazione soprattutto su lunghe scale temporali, l'effetto di soglia sul trasporto di sedimenti non sembra influenzare il *pattern* prodotto.

Decise puntualizzazioni sulla veridicità del modello MP vengono esplicitate da Doeschi-Wilson e Ashmore (2005) in cui il modello viene sistematicamente verificato confrontandone il comportamento con quello prodotto da un modello fisico in canaletta. Le conclusioni dimostrano che il modello non riproduce *pattern* realistici quando vengono imposte condizioni iniziali del fondo assimilabili a quelle del modello fisico. Il modello è incapace di riconoscere e adottare intrinseche scale spaziali, altimetriche e temporali proprie del modello reale; esso riproduce *pattern* di inondazione non veritieri e quindi non ricrea l'evoluzione reale del sistema. Il modello si comporta meglio con risoluzione spaziale più bassa. Il modello meglio rappresenta la dinamica *braided* in condizioni di scala in cui la pendenza locale tra le celle non si discosta sostanzialmente da quella generale del tratto. In generale MP non riesce adeguatamente a riprodurre le dinamiche morfodinamiche a scala di barra e canale, né effetti di macroscale che interessano più celle. Gli autori attribuiscono sostanzialmente queste lacune modellistiche all'eccessiva semplificazione soprattutto nella componente idraulica.

6.6.2.3.2 Modello Thomas, Nicholas, Quine (TNQ)

Il carattere esplorativo del modello MP e con esso le critiche evidenziate in lavori successivi (Doeschi-Wilson e Ashmore, 2005; Doeschl et al, 2006), hanno in egual misura stimolato lo sviluppo di forme più applicative del *framework* CA costituito da Murray e Paola. I modelli cellulari proposti nel 2002 da Thomas e Nicholas (2002; Thomas et al, 2007), e nel 1999 da Coulthard (1999; Coulthard et al, 2002; Van De Wiel et al, 2007) costituiscono esempi molto interessanti di rivisitazione più previsionale del modello di MP. In entrambi i casi la componente liquida è ancora distribuita da ogni cella in quelle vicine, ma il tirante idrico viene in questi modelli stimato in modo che la pendenza della superficie del pelo libero possa essere usata come forza di moto, come in qualunque modello idraulico 2D. Nel modello di MP invece il livello idrico di cella non viene calcolato, ma per ogni elemento del *grid* si determina solo la portata espressa in unità di misura fittizie. Coulthard et al (2002) hanno sviluppato un algoritmo di calcolo che distribuisce l'acqua in tutte le direzioni attraverso procedure reiterate di *sweeping* multidirezionale (Figura 49B). Thomas e Nicholas (2002) invece hanno modificato lo schema a 3 celle frontali di MP con uno a 5 celle di distribuzione (Figura 49C).

Quest'ultimo modello non prevedeva inizialmente *rutine* di calcolo del trasporto solido e di modificazione del fondo. Solo nel 2006 e nel 2007 (Nicholas et al, 2006; Nicholas e Quine, 2007) vengono pubblicati i primi risultati legati ad una applicazione del TNQ in forma completa finalizzata a simulare la formazione e l'evoluzione di *pattern braided* durante un periodo di 200 anni (Thomas, 2003).

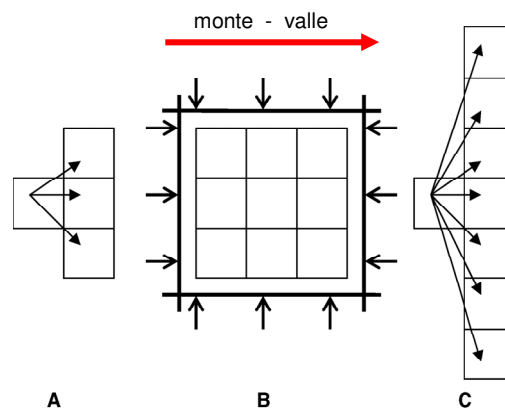


Figura 49 - Confronto tra gli schemi di calcolo dei modelli cellulari più noti in letteratura: [A] modello di Murray e Paola (1994, 1997, 2003), [B] modello CAESAR (Coulthard, 1999; Van De Wiel et al, 2007), [C] modello TNQ (Thomas e Nicholas, 2002), modificata da Cox et al, 2005 e Murray, 2007

Nel caso applicativo descritto in letteratura (tratto *braided* di circa 450 m del fiume Avoca in Nuova Zelanda), il dominio spaziale è costituito da una maglia di 85 x 450 celle quadrate di dimensioni 1 m, a pendenza iniziale costante imposta pari a 0.01 (pendenza media del tratto). Questa geometria iniziale viene sottoposta ad una prima simulazione di 75 anni alla fine della quale il DEM ottenuto viene utilizzato come base geometrica di partenza per tutte le altre simulazioni. Come per il modello MP lo *input* liquido immesso in punti posti sul margine di monte procede solo verso valle seguendo una regola di distribuzione nelle 5 celle frontali (Figura 49) secondo una regola formalmente simile a quella utilizzata da MP (19)

$$q_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^5 P_i} q_0 \quad (29)$$

q_i , portata liquida in ingresso alla i -esima cella frontale ($i=1-n$, $n=5$ =numero di celle di distribuzione); q_0 , portata liquida presente nella cella distributiva centrale di monte.

Il valore P_i viene definito "routing potential" e rappresenta il peso di distribuzione in ogni cella della portata in essa derivante dalla cella alimentante di monte. Questo peso distributivo viene calcolato in due modi diversi usando le seguenti espressioni

$$P_i = h_i^{1.67} S_i^m \quad (30)$$

$$P_i = h_i^{1.5} \quad (31)$$

La regola riportata nell'espressione (30) vale nel caso in cui tra le 5 celle frontali ne esista almeno una per la quale il tirante risulti inferiore a quello della cella alimentante. Viceversa, nel caso in cui tutte le 5 celle di valle frontali presentino tiranti maggiore o uguale a quello della cella alimentante allora il modello impone il passaggio idraulico in corrente critica e impone l'uso della formula (31). In entrambe le espressioni h_i corrisponde alla profondità idraulica associato ad ogni singola cella tra le 5 frontali, S_i è la pendenza tra la cella centrale e la i -esima cella frontale e m è un parametro calibrato da Thomas e Nicholas (2002) pari a 0.25, inferiore al valore di 0.5 deducibile dalla formula idraulica di Manning del moto uniforme per correnti gradualmente variate (Citirini e Nosedà, 1987).

Come per il modello di MP, contestualmente al calcolo delle portate distribuite viene svolto anche quello delle portate di sedimenti. In questo caso la procedura appare più articolata. Si ipotizzi di partire dal margine più a monte della *mesh* e si focalizzi l'attenzione sempre sullo schema di Figura 49. Il modello calcola per ogni combinazione "cella distributiva / 5 celle riceventi" i seguenti valori:

- T_0^{ACT} attuale capacità di trasporto associato alla celle distributiva pari alla portata solida fornita ad essa dall'esterno.
- T_i^{CAP} capacità di trasporto associata ad ogni i -esima cella frontale. Valore calcolato per unità di larghezza, proporzionale al superamento di una soglia di *stream power* (portata * pendenza) locale.
- TP_i trasporto potenziale della i -esima cella calcolato come $TP_i = T_i^{CAP} + \Omega T_0^{ACT}$ (Ω costante di inerzia del trasporto)
- $T_i^{SUP} = \frac{TP_i}{\sum_{i=1}^5 TP_i} T_0^{ACT}$ massima portata solida potenzialmente afferente da monte alla i -esima cella nel caso in cui essa non subisca erosione nella singola iterazione.

A questo punto per tutte le i -esime celle frontali il modello calcola le portate solide effettivamente ad esse convogliate (T_i^{ACT}) come

$$T_i^{ACT} = k T_i^{CAP} + (1 - k) T_i^{SUP} \quad (32)$$

dove k è una costante modellistica compresa tra 0 e 1 necessaria per fissare le proporzioni più corrette tra capacità di trasporto e apporto di monte al tratto. Come il modello MP anche questo presenta una regola per il calcolo dell'erosione laterale

$$T^{LAT} = E S_L T_i^{ACT} \quad (33)$$

dove T^{LAT} è la quantità di sedimenti in ingresso alla cella i -esima per unità di larghezza, S_L è la pendenza laterale, E è una costante che rappresenta l'erodibilità spondale. Come il modello di MP, anche questo CA simula l'effetto indotto dalla vegetazione sulle variazioni morfologiche. In questo caso la riduzione della produzione di sedimenti viene modellata modificando il valore della soglia energetica critica di inizio del trasporto al fondo. La vegetazione si sviluppa solo in contesti con un sufficiente grado di inattività definito in funzione della frequenza di allagamento (Thomas et al, 2007). Concettualmente il modello TNQ ripercorre molto da vicino quello di MP, migliorandolo decisamente dal punto di vista della riproduzione idraulica. Le principali differenze possono così riassumersi (Thomas e Nicholas, 2002):

- *routing* in 5 celle anziché 3;
- inclusione tra le regole del modello di relazioni più vicine a quelle dell'idraulica empirica (vengono incluse espressioni simili a quelle per il calcolo monodimensionale dei tiranti in condizioni critiche e sub-critiche);
- eliminazione del problema di calcolo delle portate defluenti nelle celle indipendentemente le une dalle altre (concetto alla base dello schema CA - 6.6.2.3).

6.7 CAESAR (*Cellular Automaton Evolutionary Slope And River model*)

6.7.1.1 Concetti generali

In considerazione degli obiettivi descritti nell'introduzione alla tesi, alla luce dei limiti della modellistica computazionale "classica" descritti nei sottocapitoli precedenti (6.6.1) e dell'analisi bibliografica comparata tra i modelli CA più noti in letteratura (6.7.1.1) la scelta modellistica intrapresa in questo lavoro di ricerca è stata quella di utilizzare un *Reduced Complexity Model* a schema cellulare denominato CAESAR, sviluppato a partire dal 1999 dal T. Coulthard (Università di Hull, UK).

CAESAR (*Cellular Automaton Evolutionary Slope And River model*), nato inizialmente come LEM (Coulthard, 1999; Coulthard et al, 2000; Coulthard et al, 2002) è stato successivamente implementato (Van De Wiel et al, 2007) per applicazioni sia a scala di tratto fluviale (uso in modalità *reach*), che di bacino (uso in modalità *catchment*). Negli ultimi anni CAESAR è stato applicato per tratti fluviali da 4 fino a 40 km, con dimensioni delle celle di calcolo variabili da 2 m, fino a 50 m. Impiegato in modalità *reach* il modello richiede svariati dati di *input*: il DEM di partenza, i valori di portate solide e liquide in ingresso da monte, i dati granulometrici per la caratterizzazione della tessitura del fondo e l'eventuale copertura vegetale. Ad ogni cella di calcolo il modello associa un valore di quota, la portata liquida, il battente specifico, la granulometria, la copertura vegetale e lo spessore del materasso erodibile. CAESAR implementa un processo iterativo di distribuzione (*sweeping*), ovvero di aggiornamento ripetuto per ogni ciclo di calcolo del *set* di valori associato ad ogni cella, applicando tutte le regole semplificate che governano i singoli processi. Complessivamente si possono distinguere 5 *set* principali di regole:

- *idrauliche* - governano la ripartizione della portata liquida;
- *di erosione e deposizione fluviale* - utilizzate per la modellazione del trasporto solido al fondo e in sospensione;
- *di erosione spondale* - definiscono il processo di arretramento spondale per le sole celle ai margini dell'alveo attivo;
- *idrologiche* - regolano la conversione afflussi-deflussi nel caso di applicazioni *catchment* (schema di base adottato, TOPMODEL, Beven e Kirkby, 1979);
- *per i processi di versante (movimenti di massa, creep)* - modellano la movimentazione del suolo per crollo o creep dai versanti.

CAESAR, applicato in modalità *reach*, implementa esclusivamente l'automazione cellulare delle componenti liquide, di trasporto dei sedimenti e di erosione laterale. Il modello inizialmente sviluppato in codice C senza alcuna interfaccia grafica (GUI), oggi si fonda invece sul linguaggio di programmazione Visual C# (si pronuncia "*c sharp*" - Sharp, 2008), sviluppato da Microsoft all'interno dell'iniziativa .NET. A discapito di una minore efficienza computazionale, questo codice permette di creare applicativi software più *user friendly*, con interfacce grafiche che agevolano il modeller nel setting della configurazione di simulazione (Figura 50).

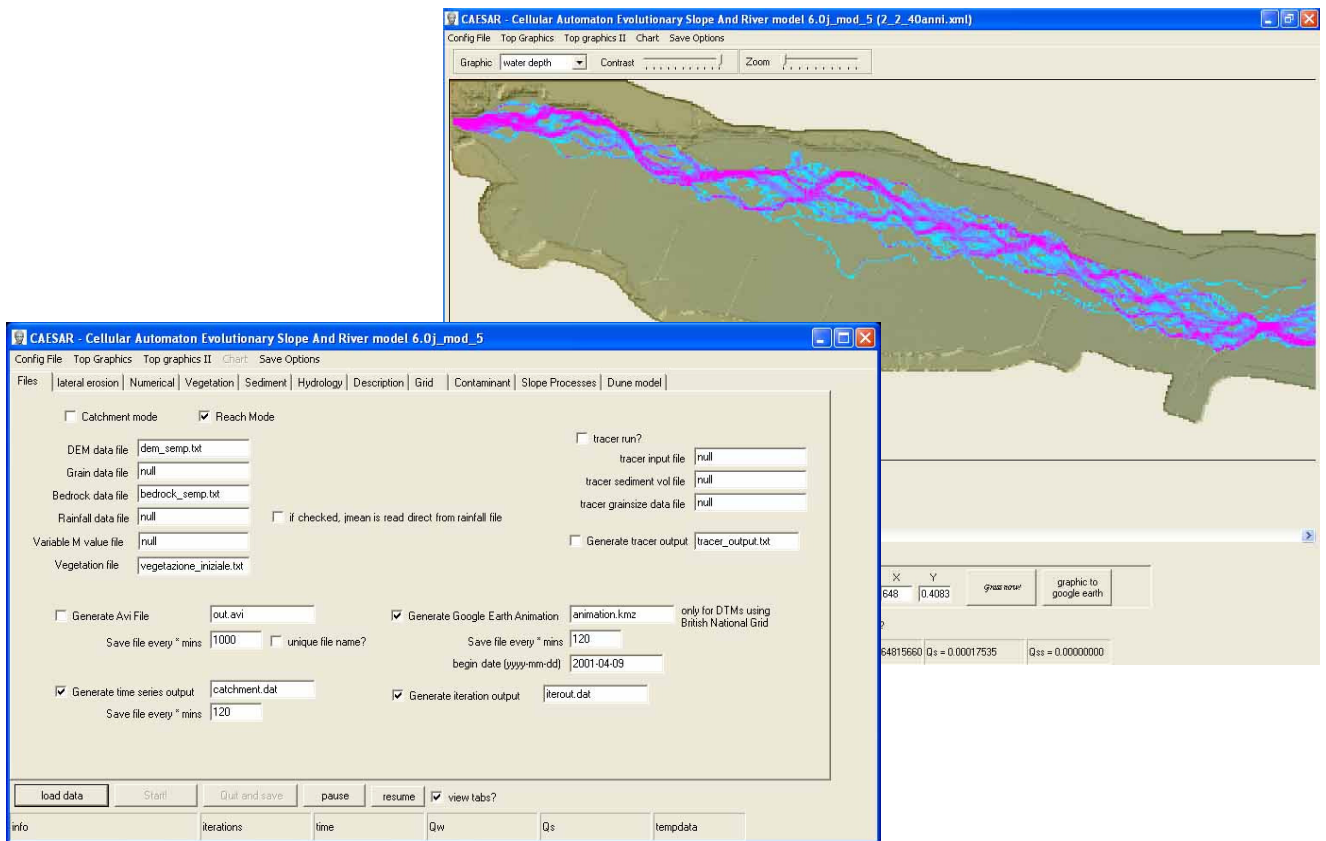


Figura 50 - GUI di CAESAR versione 6.0 mod sviluppata in linguaggio Visual C#

Insieme a numerosi altri noti linguaggi di programmazione (C++, Java, Delphi, Python, C#, Visual Basic .NET, Perl, PHP), Visual C# rientra nella famiglia dei linguaggi cosiddetti "orientati agli oggetti". La programmazione orientata agli oggetti (OOP, *Object Oriented Programming*) è un paradigma di programmazione, che prevede di raggruppare in un'unica entità (la classe) sia le strutture dati sia le procedure che operano su di esse, creando un "oggetto" software dotato di proprietà (ovvero caratteristiche) e metodi (ovvero procedure) che operano sui dati dell'oggetto stesso. Alla luce di questo, il codice sorgente di CAESAR si struttura completamente in classi che interagiscono tra di loro, elaborando le variabili globali del modello definite univocamente ed aggiornate durante tutte le iterazioni che caratterizzano ogni simulazione. Le principali classi (o *routine*) che costituiscono la struttura portante del modello sono sinteticamente descritte nella seguente Tabella 28.

Tabella 28 - Principali *routine* interne al codice di CAESAR

Nome della <i>routine</i>	Breve descrizione delle funzionalità della <i>routine</i>	Nomi delle principali classi richiamate internamente alla <i>routine</i>
main_loop	Classe primaria del modello che viene richiamata immediatamente dopo la dichiarazione di tutte le variabili globali e avvia l'applicazione e l'inizializzazione della GUI di visualizzazione (Form1)	slide_5 get_Area init_route creazione AVI creazione Google Animation erodepo - mediante game clock
erodepo	Funzione primaria che viene richiamata secondo lo schema del "game clock" nella <i>routine</i> denominata "main_loop". Richiama una serie notevole di funzione in serie temporale successiva. A fianco sono elencate in ordine di richiamo	dune Siberia Grow_grass erode fill_pits lateral2/nolateral slide_3 controlla la scelta reach-catchment mode route down/up/rl/lr calc_max_flow_direction smooth (watersmoothing) salva in serie i file di <i>output</i> (<i>output_data()</i>) salva l'iteration file
erode	Classe di rilevanza notevole per l'aspetto erosione/deposizione. Richiama le "subroutine" di erosione associate alle tre differenti leggi concettuali che definiscono le modalità di calcolo della pendenza da usare per determinare lo sforzo di taglio utilizzato a sua volta internamente alle formule di trasporto solido: 1 - "bedslope" (metodo originario che considera la pendenza media calcolata sulle celle ricettrici), 2 - "bedslope 2" metodo simile al primo ma associato alla massima pendenza locale, 3 - "tau method" che usa il calcolo della velocità nella cella per il calcolo della Tau e quindi dell'erosione.	cicli <i>for</i> adibiti al TS in sospensione erode_bedslope_tau2 erode_bedslope_tau erodew3 erode3

grow_grass	<p>Questa <i>routine</i> fa crescere in modo istantaneo la vegetazione nelle celle prive di acqua. La crescita riguarda solo la maturità o densità della vegetazione (veg[x,y,1]). Richiede la specificazione della variabile di metodo <i>amount3</i>, ovvero la quantità di crescita della vegetazione. Il valore di <i>amount</i> è compreso tra 0-1, ovvero densità min e max della vegetazione. Quando si preme il button3 "Grass now" la vegetazione viene portata istantaneamente alla massima densità. La funzione viene richiamata solo in due occasioni: quando si preme il tasto "Grass now" e durante tutti i <i>loop</i> di erodedepo in cui per ogni <i>cycle time</i> la vegetazione viene fatta crescere di una quantità proporzionale al valore della variabile "Grow_Grass_Time", ovvero il tempo di maturazione. La maturità della vegetazione influenza solo il trasporto solido. Quando la sua maturità è maggiore di 0.5 la parte delle <i>routine</i> di sedimenti tiene conto dell'interazione veg-sedimenti (<i>routine</i> erodew3, erode_bedslope_tau , erode_bedslope_ta2)</p>	
grain_tot	<p>Questa <i>routine</i> richiede due variabili (cent, frat). Una volta impostate queste variabili, essa calcola la sommatoria, per tutti diametri fissati nella scala granulometrica, dei valori nella matrice grain. La matrice grain ha dimensione: [n,s, z] dove: n = numero di celle del DEM, s = numero di frazioni granulometriche di possono considerare per ogni layer (9), z = numero di <i>layer</i></p>	
save_data	<p>Definisce le modalità di scrittura dei dati in <i>output</i> prodotti dal modello in formato ASCII</p>	
sort_active	<p>Definisce il modello concettuale di scambio reciproco tra i <i>layer</i> che compongono il materasso erodibile al di sopra del <i>bedrock</i> inerodibile. Si fonda sul concetto dell'"<i>active layer</i>"</p>	
addGS	<p>Aggiunge al file di grain la caratterizzazione granulometrica associata ad un punto dell'area di esistenza che precedentemente non era stato interessato da attività di erosione o deposizione</p>	<p>sort_active, sort_active2</p>
calc_flow_direction	<p>Calcola la portata diretta dalla cella x,y esima ad ognuna delle 8 celle adiacenti per tutte le celle del DEM bagnato. Viene richiamata dopo le serie di <i>routine</i> di <i>sweeping</i>.</p>	
route_up, route_down, route_lr, route_rl	<p>Serie di <i>routine</i> per lo <i>sweeping</i> della portata liquida. La distribuzione avviene verso un numero di celle adiacenti la cui quantità dipende dal valore della variabile globale "SW" (<i>flow distribution width</i>)</p>	

6.7.1.2 Modellazione della componente idrodinamica

Per incrementare la velocità di calcolo, a discapito del dettaglio idrodinamico, CAESAR, come il modello TNQ, risolve la componente idraulica della simulazione applicando uno schema quasi-uniforme (*quasi-steady*) per il quale il modello non fa transitare un'onda di piena attraverso il tratto modellato, ma distribuisce il volume di piena a tutto il *reach*, in modo sincrono (simultaneamente esteso a tutto il dominio di moto) e distribuito a tutte le celle.

Il meccanismo di distribuzione delle portate liquide anticipato in Figura 49 segue uno schema cosiddetto di "*flow-sweeping*" ovvero è il risultato della duplice ripetizione di una successione di quattro procedure di scansione e distribuzione tra celle adiacenti: *bottom-up*, *up-down*, *right-left* e *left-right* (si veda anche Figura 51) dove il lato destro (*right*) corrisponde sempre al margine di valle del dominio di simulazione (direzione principale di deflusso imposta da sinistra verso destra).

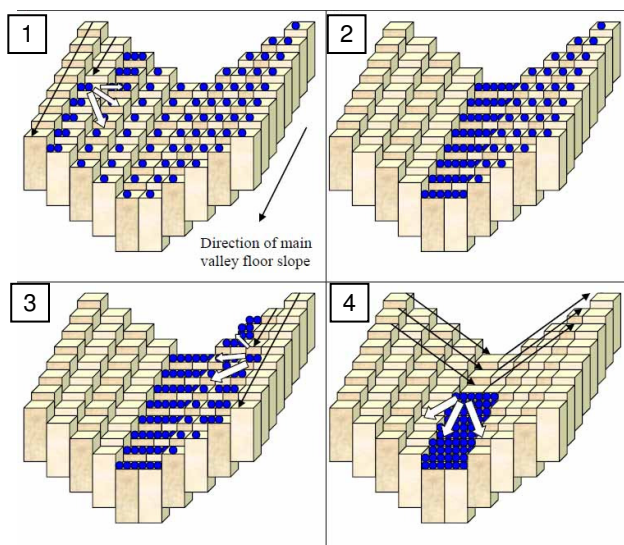


Figura 51 - Rappresentazione schematica della procedura di "*flow-sweeping*" adottata da CAESAR per il calcolo della componente idraulica (da Flood Risk Management Research Consortium, 2006).
1.scansione bottom-up,3.scansione up-down,4.scansione left-right. Manca indicazione del terzo scan right-left

All'interno di ogni procedura di scansione le portate presenti in ogni cella vengono distribuite in quelle immediatamente adiacenti su lato rivolto verso la direzione di scansione. Il numero delle celle riceventi (3 in MP, 5 in TNQ) è una variabile definibile dall'utente e compresa tra 1-23. La regola di distribuzione delle portate riprende nella forma quella di MP (19), anche se in questo caso la forza motrice discende da una differenza di quota tra il pelo libero della cella donatrice e quello del fondo della cella ricevente secondo la seguente espressione

$$Q_i = \frac{[(e_o + d_o) - e_i]^x}{\sum_{i=1}^x [(e_o + d_o) - e_i]^x} Q_o \quad (34)$$

dove e_o , elevazione del fondo nella cella donatrice; d_o , battente idrico nella cella donatrice; Q_o , portata presente nella cella donatrice; x , numero delle celle frontali ricettrici; e_i , elevazione del fondo nella i -esima cella ricettrice frontale con i compreso tra 1- x ; Q_i , portata distribuita nella i -esima cella ricevitrice.

La discretizzazione oltre che nel tempo, avviene soprattutto nello spazio, attraverso il calcolo della portata assegnata ad ogni cella: per ogni cella viene calcolata la quota parte di portata in

transito su di essa in funzione del suo grado di soggiacenza rispetto alla cella donatrice. Assegnata la portata al termine della *routine* di *flow-sweeping*, si ricavano per ogni cella tirante e velocità.

La formula utilizzata per ricavare il battente associato alla portata, ricavata dalla formula idraulica di Manning per unità di larghezza (Citrini e Nosedà, 1987) nell'ipotesi di raggio idraulico assumibile pari all'altezza idrica, è la seguente

$$d_j = \left(\frac{Q_j n}{S_j^{0.5}} \right)^{3/5} \quad (35)$$

dove d_j , tirante idrico associato alla j -esima cella ($j=1$ – numero totale di celle attive all'avvio della procedura di *sweeping*); n , valore della scabrezza del fondo secondo Manning imposto uguale per tutto il dominio e pari a 0.030; S_j , pendenza media associabile alla singola cella.

Questo valore di pendenza viene calcolato come media delle pendenze positive calcolate rispetto a tutte le celle frontali nella direzione principale di *scanning*. I principali difetti di questa forma estremamente semplificata di *routing* idraulico sono due:

- non viene rispettato il principio di conservazione della quantità di moto (per questo il modello non può definirsi compiutamente fisicamente basato);
- il modello fornisce una sovrastima delle velocità per ogni cella in quanto non distingue tra corrente principale e secondarie (come definite al sottocapitolo 6.6.1.5).

6.7.1.3 Modellazione del trasporto di sedimenti al fondo

Il trasporto solido al fondo è guidato internamente al modello da una formula empirica che l'utilizzatore può scegliere tra quella di Einstein (1950) e quella di Wilcock-Crowe (2003). Entrambe le formule permettono il calcolo della massima capacità di trasporto associata ad ogni cella bagnata (capacità valutata utilizzando i valori di tirante e velocità ricavati al termine di ogni singolo processo di *flow-sweeping* per ogni singolo intervallo temporale).

I meccanismi di deposizione o erosione sono modellati applicando uno schema a *layer* deposizionali in cui lo strato più superficiale (*active layer* secondo Parker, 1990; si veda anche 6.7.1.5), continua a scambiare sedimenti con il *set* di strati sottostanti i quali vengono così progressivamente erosi o accrescono in spessore (Hoey e Ferguson, 1994). Il modello consente di prendere in considerazione l'eterogenità della componente sedimentaria attraverso l'inserimento di 9 classi granulometriche definite dall'utente. Erosione selettiva, trasporto e deposizione di queste differenti frazioni granulometriche portano in sede di modellazione ad una variabilità planimetrica e verticale (corazzamento). L'entità del trasporto solido all'interno del modello è modulata al tempo stesso dalla capacità di trasporto esplicitata dalla formule (*capacity limited*), ma anche dalla disponibilità di sedimenti presenti nell'*active layer* per ogni classe granulometrica (*detachment-limited*). Le quantità specifiche di trasporto esplicitate per ognuna delle 9 classi granulometriche vengono convertite in volumi di sedimenti movimentati moltiplicando la portata solida specifica per l'ampiezza dell'intervallo di tempo di calcolo. Il modello utilizza intervalli di calcolo la cui lunghezza viene dinamicamente variata affinché

- l'intervallo sia più lungo possibile e quindi siano minori il numero di iterazioni e il tempo macchina di calcolo totale;
- fissato una certa ampiezza di questo intervallo, la massima quantità di sedimenti producibile da una qualunque delle celle attive dal punto di vista erosivo-deposizionale all'interno dominio di calcolo deve comunque essere sempre inferiore di una quantità fissata dall'utilizzatore (parametro "*max erode limit*"; si veda anche il sottocapitolo 8.2).

Questo accorgimento garantisce che il modello operi con alta risoluzione temporale (ordine di grandezza anche inferiore al secondo) durante fasi di intensa attività morfologica aumentando quindi il numero di iterazione per unità temporale di calcolo (tempo macchina) ma per contro permette che il modello “acceleri” durante le fasi di relativa stabilità erosivo-deposizionale ampliando l’intervallo di calcolo (ordine di grandezza orario o giornaliero) e con esso la velocità di simulazione.

I sedimenti movimentati possono essere al fondo o in sospensione a scelta dell’utente. Da una cella di calcolo i sedimenti al fondo vengono distribuiti proporzionalmente alla pendenza di fondo tra la cella distributiva e quelle riceventi secondo un’espressione formalmente simile a quelle proposte nei modelli MP e TNQ

$$V_{i,k} = \frac{S_k}{\sum_k S_k} V_i \quad (36)$$

dove i , classe granulometrica trasportata; k , direzione di trasporto verso la k -esima cella frontale; S , pendenza del fondo; V , volume relativo di sedimenti in movimento (Figura 52).

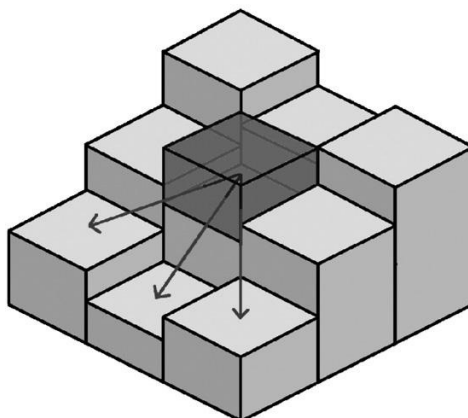


Figura 52 - Schema della distribuzione del sedimento solido al fondo durante una singola iterazione (modificato da Van De Wiel et al, 2007)

6.7.1.4 Modellazione dell’erosione spondale

Tutti i CM hanno mostrato potenzialità sorprendenti per la simulazione dei corsi d’acqua ad alvei intrecciati (Murray e Paola, 1994; Thomas e Nicholas, 2002) e dell’evoluzione dei versanti (Coulthard et al, 2000; Coulthard et al, 2002; Coulthard et al, 2005), ma nessun CA ad oggi ha dimostrato completamente la capacità di riprodurre adeguatamente processi di erosione spondale. Questo principalmente per due motivi:

- forte semplificazione idrodinamica del *flow-routing*, per la quale vengono del tutto tralasciati i termini cinetici di turbolenza (6.6.1.2) e correnti secondarie (6.6.1.5);
- l’automatismo cellulare non prevede nessuna forma di “*regional rules*”, ovvero lo sviluppo di tutte le *routine* avviene in considerazione esclusiva di relazioni reciproche tra celle adiacenti senza considerare processi che si sviluppano a scale spaziali più ampie.

Coulthard e Van De Wiel (2006) hanno sviluppato internamente a CAESAR un algoritmo che riprende i modelli IPS (Ikeda-Parker-Sawai - Ikeda et al, 1981) e riproduce l’arretramento spondale come un processo multi-variabile, guidato essenzialmente dalla curvatura locale della corrente, ma anche dalla velocità e dal tirante in prossimità della sponda esterna. L’algoritmo che permette la simulazione dell’arretramento spondale descritto in Coulthard e Van De Wiel, 2006 è definito internamente alla *routine* denominata “*lateral2*” (Tabella 28). La *routine* viene applicata per ogni ciclo iterativo dopo l’applicazione della *routine* di erosione-deposizione denominata “*erode*”

(Tabella 28 - 6.7.1.5) ma prima del *flow-sweeping* (*routine* denominate “*route down/up/rl/lr*” - Tabella 28). Essa si applica ad un dominio spaziale in cui per ogni cella è già definito il tirante idrico ottenuto dal *ciclo* precedente di distribuzione delle portata liquida e in base al cui valore (superamento o meno di una soglia di minima portata definita in funzione di un parametro denominato “*minQ*” - 8.2) la cella viene definita asciutta (celle bianche o arancioni in Figura 53) o bagnata (celle azzurre in Figura 53). A questo punto vengono avviati quattro principali *step* di calcolo dell’arretramento spondale:

1. definizione delle celle poste al margine dell’areale bagnato. Sono definite di margine quelle celle asciutte che hanno almeno una tra le celle immediatamente adiacenti poste a nord, sud, est o ovest bagnata;
2. tutto il dominio spaziale viene sottoposto ad uno *screening* attraverso il passaggio di una finestra di filtraggio 3x3 (Figura 53 A,B,C). Quando la finestra di filtraggio si trova in un punto in cui la cella che ricade al suo centro è stata definita “di margine” grazie allo *step* precedente, viene effettuato il conteggio delle celle bagnate e di quelle asciutte ricomprese nella finestra stessa, con l’esclusione dal conteggio delle celle di margine eventualmente presenti all’interno della finestra.
3. il numero delle celle bagnate è sottratto a quello delle celle asciutte e questo valore è assegnato alla cella di margine posta al centro della finestra di filtro. Questo valore rappresenta un’espressione locale del raggio di curvatura mentre il suo segno identifica se si tratta di una cella posta su una sponda interna (valore negativo) o esterna (valore positivo). Si tratta comunque di un valore molto grezzo del raggio di curvatura in quanto, a causa delle possibili dimensioni delle celle del *grid* un’ansa di erosione generata da un canale secondario o un meandro di modeste dimensioni in rapporto a quella delle celle può contenere sia elementi classificati di sponda interna che di sponda esterna.
4. per ridurre questo problema legato all’approssimazione del valore del raggio di curvatura, un filtro di *smoothing* viene fatto passare ripetutamente su tutto il *grid* caratterizzato dai valore grezzi del raggio di curvatura. Questo filtro media il valore con quello delle celle adiacenti interne alla finestra e il valore così “smussato” viene assegnato a ciascuna delle celle di margine.

Solo a questo punto viene calcolata per ognuna delle celle di margine il valore dell’arretramento spondale secondo una regola del tutto simile a quella utilizzata dai modelli IPS presentati in Ikeda et al, 1981 con questa forma

$$\zeta = E u h R \quad (37)$$

dove E , costante di erosione laterale definita dal utilizzatore; u , velocità associata alla cella di margine; R , valore del raggio di curvatura calcolato per la singola cella di margine secondo gli *step* descritti in precedenza; h , tirante idrico in corrispondenza della medesima cella di margine per cui si calcola l’erosione spondale. All’interno dei classici modelli IPS questo valore di erosione laterale veniva semplicemente usato per traslare il margine della quantità ζ . In questo caso invece viene associata alla stessa quantità un volume finito di sedimenti che viene rimossa dalle celle di margine esterno. Al fine di rispettare il principio di conservazione della massa questo volume viene ridepositato all’interno del canale nelle celle immediatamente adiacenti la sponda più esterna. Nel tempo teoricamente l’elevazione della sponda diminuisce fino a diventare abbastanza bassa da essere inondata e rendere quindi le celle ancora più esterne nuovi margini. Questo processo simula l’arretramento spondale, ma pone due problemi per modelli cellulari come CAESAR. Innanzitutto l’arretramento porta ad un accumulo di sedimenti al piede delle sponde che deve essere ridistribuito; inoltre se il processo di arretramento continua l’alveo prosegue indefinitamente ad allargarsi. Come accennato nel sottocapitolo 6.6.1.5 l’evoluzione dei meandri e più in generale l’arretramento spondale è influenzata in modo determinante dalle correnti secondarie e dall’effetto che queste inducono nel trasporto trasversale di sedimenti che accentua un processo di allontanamento di questi dal piede di sponda e un’aggradazione all’interno del

meandro sulla *point bar*. In un modello cellulare tuttavia questo processo di allontanamento e opposto accrescimento non può generarsi rispettando le sole regole di distribuzione dei sedimenti descritte in precedenza (6.7.1.3) in quanto guidate sostanzialmente dalla pendenza locale (si vedano anche i difetti della *flow-routine* indicati in 6.7.1.2).

Per sopperire in parte a questa limitazione CAESAR utilizza una regola specifica che, utilizzando i valori del raggio di curvatura determinati con l'algoritmo descritto in precedenza, calcola per le sole celle bagnate un gradiente di curvatura trasversale. Questo valore viene a sua volta sottoposto a *smoothing* usando ancora una finestra di filtro a tutte le celle bagnate. Solo a questo punto, per tutte le celle bagnate il gradiente di curvatura viene usato per calcolare un flusso di sedimenti laterali dalla sponda esterna a quella interna ovvero da celle con valore del raggio di curvatura smussato maggiore a celle adiacenti con valori minori per questa stessa variabile.

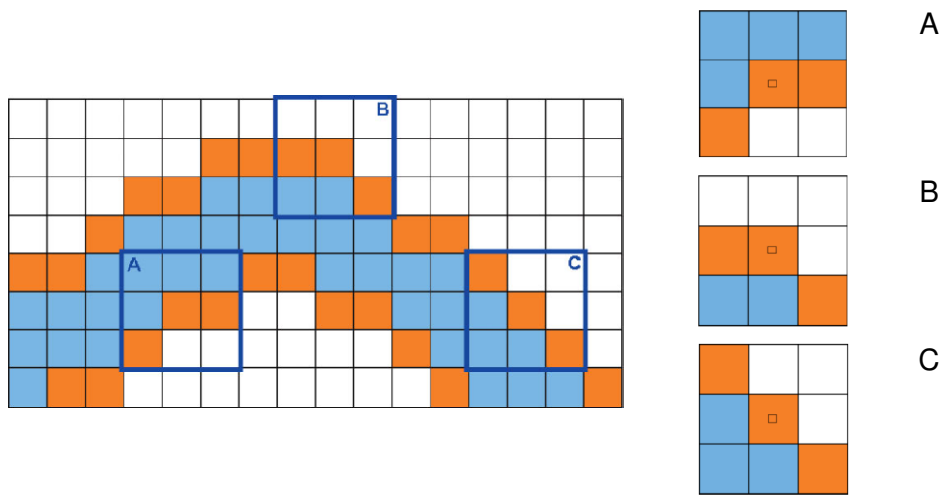


Figura 53 - Schema esplicativo dell'algoritmo di erosione laterale (modificato da Coulthard e Van De Wiel, 2006)

6.7.1.5 Modellazione dei processi di erosione-deposizione

Come negli altri modelli CA, la differenza tra le portate solide in ingresso da monte e la capacità stessa di trasporto determina il bilancio di sedimenti relativo alla singola cella e quindi sancisce l'eventuale innalzamento o abbassamento locale del fondo (fermo restando un limite di massima erodibilità pari allo spessore di sedimenti erodibile). Il processo di alterazione della quota altimetrica del fondo si associa ad una procedura particolare di riorganizzazione dei sedimenti movimentati. CAESAR utilizza infatti un approccio multi-strato caratterizzato, non solo dalla presenza dell'*active layer* accennato in precedenza, ma anche da una serie di strati (fino ad un massimo di 20 strati) che lo separano da una base "alimentante" (un unico strato denominato *base layer* o *buried regolith*) e da uno strato inerodibile denominato "*bedrock*".

Gli strati attivi sottostanti all'*active layer* hanno uno spessore fisso pari alla variabile di modellazione definita dall'utente denominata "*active layer thickness*" (L_h). L'*active layer* invece costituendo di fatto la porzione esposta della regolite ha uno spessore che può variare tra 0.25 e 1.5 volte L_h . Durante un ciclo l'asportazione di sedimenti inducono un'assottigliamento dell'*active layer*; quando il suo spessore scende al di sotto di $0.25 L_h$ lo strato sepolto posto appena sotto all'*active layer* viene ad esso inglobato formando un nuovo strato attivo più spesso (Figura 54). Al contrario, in caso di deposizione il materiale sedimentato va ad aumentare lo spessore dell'*active layer*; quando questo spessore diventa più grande di $1.5L_h$ esso viene spezzato a formare un nuovo strato sepolto e quello attivo superficiale di spessore pari a L_h . Se durante la deposizione il

numero di strati sepolti attivi supera il numero di 20, allora quello a diretto contatto con il *base layer* viene fuso con questo.

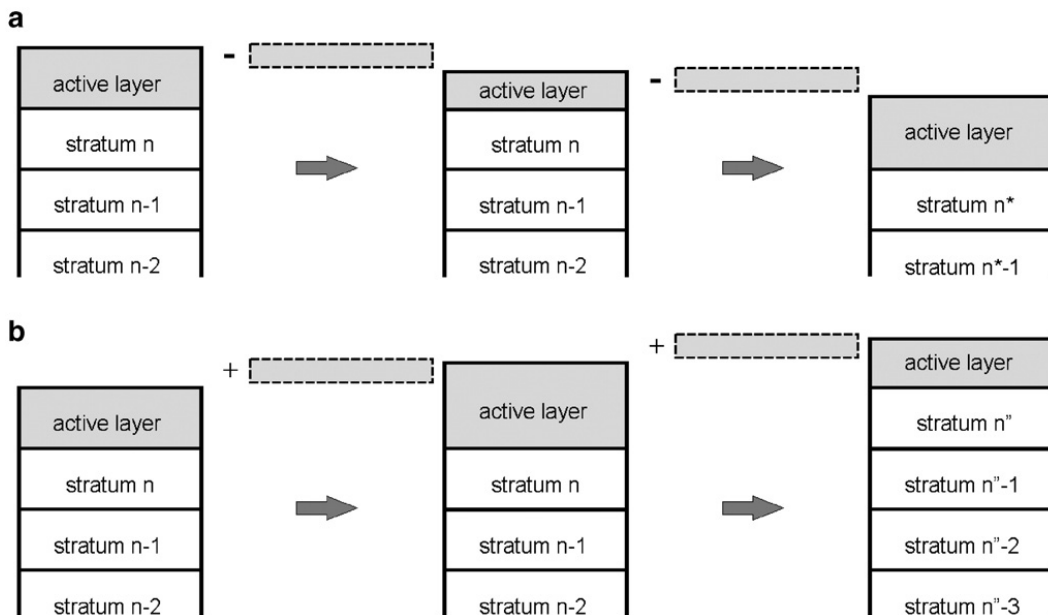


Figura 54 - Rappresentazione schematica del sistema multi-layer dinamico utilizzato da CAESAR (da Van De Wiel et al, 2007)

L'efficacia modellistica di questa organizzazione a multi-layer dinamici è stata recentemente verificata in un'applicazione di CAESAR di diretto interesse per questo lavoro di ricerca. In Coulthard et al, 2008 viene descritta, seppur qualitativamente, la risposta morfologica in corrispondenza di alcuni repellenti fluviali. I risultati appaiono confortanti e congruenti con le attese sia in termini di processi erosivo-deposizionali, che di battente idrico e variazione della distribuzione della granulometria in prossimità delle strutture in alveo.

6.7.1.6 Modellazione degli effetti della vegetazione

Al pari degli altri modelli CA descritti nei sottocapitoli precedenti anche CAESAR presenta una forma interna di simulazione dell'influenza della vegetazione sulla dinamica morfologica. Anche in questo caso il modello si limita a riprodurre gli effetti diretti solo sul trasporto solido al fondo, e non sulla scabrezza idraulica che in CAESAR viene mantenuta costante per tutto il dominio.

La vegetazione viene numericamente descritta da una matrice "veg" di dimensioni $[x,y,v]$ dove x e y corrispondono rispettivamente al numero di riga e di colonna del *grid* a copertura del dominio spaziale, v invece corrispondende ad un vettore di dimensione quattro, in cui $v(0)$ è un valore compreso tra $[0-1]$ che esprime numericamente il livello di maturità (o densità) della vegetazione, mentre $v(1)$ contiene l'informazione di altezza della vegetazione. L'effetto di diminuzione sulla dinamica di trasporto al fondo della vegetazione si manifesta solo in quelle celle che presentano vegetazione matura ovvero $veg[x,y,0]>0.5$. La maturità della vegetazione cresce nel tempo in funzione di una variabile di modellazione fissata dall'utilizzatore, "Grass maturity", che indica il numero di anni che la vegetazione impiega per diventare completamente matura. Un'altra variabile che l'utente deve fissare e che guida lo sviluppo della vegetazione è la cosiddetta "vegetation critic shear", ovvero il valore di sforzo di taglio soglia sopra al quale la vegetazione viene parzialmente rimossa. In caso di deposizione di sedimenti in corrispondenza di celle con vegetazione, la crescita continua fin che lo strato sovrastante non raggiunge spessori eccessivi. In questo caso la crescita

riparte da zero in superficie. Infine in caso di copertura delle celle con vegetazione questa inizia a ridursi in densità fino eventualmente a scomparire con una velocità doppia rispetto a quella di crescita.

Due interessanti applicazioni di CAESAR focalizzate in modo specifico sulla simulazione della componente vegetazionale sono presentate in Coulthard et al, 2007 e Batz, 2010. Nel primo caso il modello è stato utilizzato sul fiume Waitaki, in Nuova Zelanda per valutare l'efficacia di alcune politiche gestionali delle dighe presente nel bacino montano regolate al fine di limitare la crescita anomala di specie arboree alloctone in alveo. Nel secondo caso invece l'applicazione ha riguardato proprio un tratto del fiume Tagliamento a monte di Pinzano, al fine di verificare le capacità del modello di prevedere l'evoluzione spaziale della vegetazione e dei fattori che favoriscono la formazione di habitat.

6.7.1.1 Confronto tra i principali modelli cellulari

Elaborando tutte le valutazioni espresse nei sottocapitoli precedenti è stato impostato un confronto tra i principali modelli cellulari più noti in letteratura, sintetizzato nella seguente tabella.

	MP	TNQ	CAESAR
Numero di celle riceventi all'interno dello schema cellulare di calcolo	3	5	1 – 23
Formule di trasporto solido al fondo	n. 6 diverse regole in funzione di pendenza, threshold di portata	equazione di trasporto in funzione dell'energia utile al trasporto	n.2 equazioni a scelta dell'utente (Einstein, 1950; Wilcock e Crowe, 2003)
Sedimento in sospensione	no	si	si
Corazzamento del fondo	no	no	si
Erosione laterale interna all'alveo	si	si	si
Erosione spondale	no	si	si
Correnti secondarie	no	no	si
Componente vegetazionale	si	si	si

Tabella 29 - Confronto tra le caratteristiche dei principali modelli cellulari

7 Dati utilizzati nella modellazione

7.1 Tratto studio

La modellazione numerica ha interessato una porzione rilevante del tratto studio già oggetto della Parte I della tesi (si veda Figura 55 a seguire). Il tratto ha complessivamente una lunghezza prossima a 33 km, *pattern* esclusivamente *braided* e larghezza media di circa 760 m (dato 2009). La scelta del tratto è strettamente riconducibile ad alcuni fattori

- morfologia unica a canali intrecciati;
- sezione di monte monitorata dal punto di vista idrometrico, con morfologia unicursale relativamente stabile per forma e altimetria, in altre parole ideale per essere imposta come condizione al contorno di monte ad un modello numerico RCM;
- estensione del tratto studio prossime a quelle del macro-tratto comunemente denominato “Medio Tagliamento” (2.1), secondo una suddivisione già applicata a livello gestionale dall’Autorità di Bacino competente (2.1).

7.2 Serie idrometriche

Preliminarmente alla modellazione è stato necessario preconstituire un *database* idrologico che permettesse di individuare le stazioni più adeguate tra quelle collocate all’interno o poco a monte del tratto studio. Le stazioni analizzate sono descritte sinteticamente in Tabella 30 e ricollocabili geograficamente in Figura 55 a seguire.

Nome	Tipo di misura	Inizio periodo misure	Frequenza di misura
Latisana [Latisana 1]	H	2000	Oraria
Latisana [Latisana 2]	H	2003	Oraria
Latisana [Volta di Latisana]	H	Massimi annuali 1886. Misure in continuo 2003	Giornaliera fino al 2003. Attualmente Oraria
Madrisio	H	2001	Oraria
Casarsa della Delizia	H	2000	Oraria
Pinzano [Villuzza-San Pietro]	H	1980	Giornaliera fino al 2007. Oraria dal 2001
Pioverno	Q	1929	nd
Venzone [Venzone 1]	H	Massimi annuali 1886. Misure in continuo 2000	Giornaliera fino al 2000. Oraria dal 2000
Venzone [Venzone 2]	H	2000	Oraria

H: stazione idrometrica. Q: stazione di misura della portata

Tabella 30 - Elenco delle stazioni idrometriche esistenti sull’asta del fiume Tagliamento analizzate

Considerando collocazione, completezza e attendibilità delle serie storiche misurate dalle stazioni, si è scelto di considerare come unica stazione di riferimento per la misura delle portate in ingresso al tratto studio quella di Pinzano [Villuzza-San Pietro] (si veda anche sottocapitolo 7.3), mentre per la valutazione dei tempi di ritorno associati agli eventi è stata la scelta la stazione di Venzone1 (si veda anche sottocapitolo 7.3).

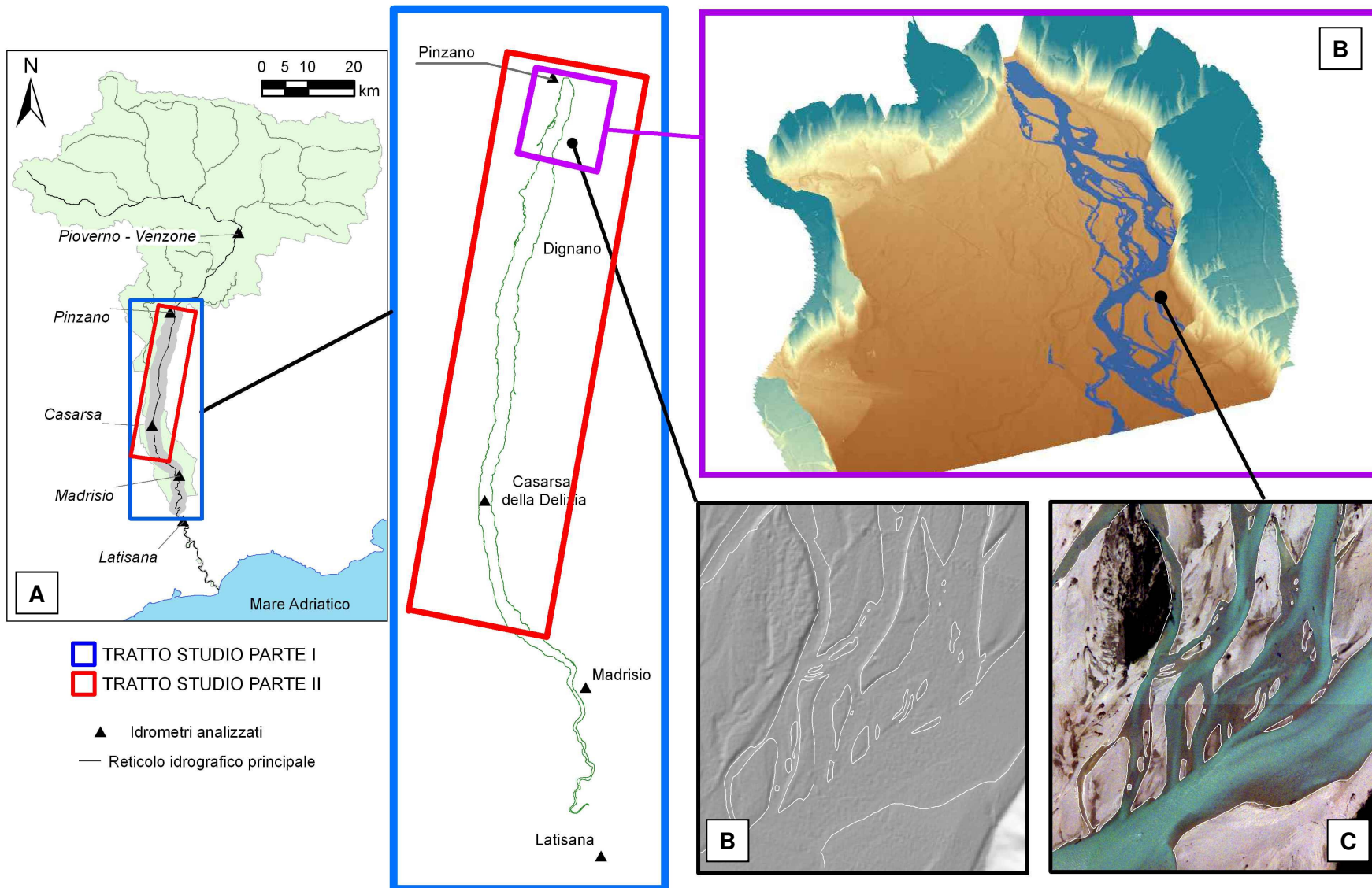


Figura 55 - Inquadramento geografico del tratto oggetto della modellazione nella Parte II della tesi. [A] Collocazione degli idrometri analizzati; [B] *Sketch* del DEM LIDAR 2001 utilizzato come condizione di fondo al contorno; [C] *Sketch* delle Ortofoto 2001

7.3 Scala di deflusso

Tutte le simulazioni effettuate hanno utilizzato dati di portata in ingresso estratti dalla scala di deflusso associata alla stazione idrometrica di Pinzano [Villuzza-San Pietro], riportata in Figura 56 e costruita secondo la seguente espressione di potenza

$$h_{Pinzano} = 0.167 Q_{Pinzano}^{0.3831} \quad (38)$$

La scala di deflusso è stata fornita dal Gruppo di Idraulica Ambientale e Morfodinamica Trento (GIAMT) della Facoltà di Ingegneria presso l'Università di Trento. Essa è stata elaborata associando una serie di misure effettuate presso la stazione di misura di Pioverno (Tabella 30) dall'Ufficio Idrografico Regionale di Udine e dai ricercatori del GIAMT (Figura 56). Le portate misurate presso Pioverno sono state quindi incrementate di un fattore 1.15 per tenere conto dell'effetto di incremento tra Pioverno e Pinzano legato fondamentalmente all'immissione del torrente Arzino (Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 1998; per la collocazione della confluenza Arzino si veda anche Figura 4, capitolo 2.1).

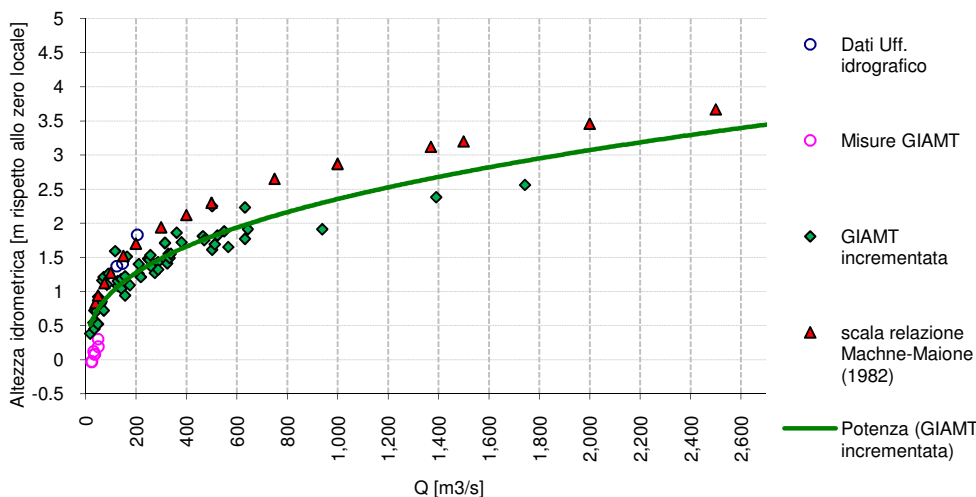


Figura 56 - Scale di deflusso utilizzata (dati GIAMT)

Per la valutazione dei tempi di ritorno delle portate defluenti presso Pinzano sono invece state utilizzate i valori prodotti sempre dal gruppo di ricerca GIAMT di Trento relativamente alla stazione di Venzone [Venzone1]. L'analisi condotta dal GIAMT sui massimi livelli annuali presso Venzone è stata caratterizzata da una serie articolata di elaborazioni idrologico - idrauliche:

- studio dell'evoluzione del fondo presso la stazione di Venzone e Pinzano;
- comparazione tra le scale di deflusso presso Venzone prodotte nel tempo da più studi commissionanti dagli enti che si sono susseguiti nella gestione del bacino (Piano Stralcio Autorità di Bacino dei Fiumi dell'Alto Adriatico, Dipartimento di Ingegneria Civile Università di Trieste, GIAMT, Studio Machne-Maione);
- applicazione del metodo dei momenti con associata legge di distribuzione di probabilità di Gumbel per la stima dei valori del tempo di ritorno corrispondenti ai livelli.

I risultati prodotti dal GIAMT, non definitivi ma comunque decisamente attendibili, sono stati sintetizzati nella seguente Tabella 31.

TR [anni]	LIVELLI [m]	PORTATE [m ³ /s]				
		TRIESTE	PIANO STRALCIO	GIAMT		MACHINE- MAIONE
1.1	2.18	1,224	644	837	1,002	
1.2	2.32	1,326	738	942	1,119	
1.3	2.41	1,397	808	1,017	1,203	
1.4	2.49	1,454	864	1,079	1,271	
1.5	2.55	1,501	914	1,131	1,329	
1.6	2.60	1,543	957	1,177	1,380	
1.7	2.65	1,580	997	1,219	1,425	
1.8	2.69	1,613	1,033	1,257	1,467	
1.9	2.73	1,643	1,066	1,292	1,505	
2	2.77	1,671	1,098	1,324	1,541	1,100
2.1	2.80	1,697	1,127	1,354	1,574	
2.2	2.83	1,722	1,155	1,383	1,605	
2.3	2.86	1,744	1,181	1,410	1,635	
2.4	2.88	1,766	1,206	1,436	1,663	
2.5	2.91	1,786	1,230	1,460	1,689	
2.6	2.93	1,806	1,253	1,483	1,715	
2.7	2.96	1,824	1,275	1,506	1,739	
2.8	2.98	1,841	1,296	1,527	1,762	
2.9	3.00	1,858	1,317	1,548	1,784	
3	3.02	1,874	1,336	1,567	1,806	
3.5	3.10	1,946	1,425	1,657	1,902	
4	3.18	2,007	1,502	1,733	1,985	
5	3.30	2,107	1,633	1,862	2,123	1,600
10	3.65	2,408	2,053	2,266	2,554	2,150
30	4.18	2,881	2,790	2,949	3,272	
50	4.43	3,104	3,169	3,290	3,626	2,917
100	4.75	3,410	3,723	3,778	4,129	3,750

Tabella 31 - Stima dei tempi di ritorno associati ai livelli e alle portate presso la stazione di Venzone 1

7.4 Dati topografici e LIDAR

Il tratto studio è coperto da una serie di campagne di rilievi topografici che rientrano nel complesso delle misure delle sezioni storiche descritti al capitolo 3.2. In considerazione degli obiettivi della modellazione definiti nell'introduzione alla tesi (1.2), questa parte del lavoro si è focalizzata solo sui rilievi topografici successivi al 2001. Complessivamente si tratta di 35 sezioni, a copertura non soddisfacente per estensione ed omogeneità spazio-temporale. Dalla Figura 57 emerge chiaramente la complementarità spaziale tra i rilievi 2001 e 2003, e la modesta numerosità delle sezioni 2006.

A copertura completa del tratto è invece stato utilizzato un DEM ricavato da dati LIDAR fornito dall'Autorità di Bacino dei Fiumi dell'Alto Adriatico effettuato nel 2001 (date e orari del rilievo LIDAR sono coincidenti con quelle delle ortofoto 2001, Tabella 33). Il DEM 2001 ha celle di dimensione 2x2 m, sistema di riferimento UTM 32 Datum ED1950, quote del terreno ortometriche. Preventivamente all'avvio di tutte le analisi è stata effettuata una conversione del sistema di riferimento in Gauss-Boaga Est Datum Roma 1940. La conversione è stata effettuata utilizzando il *software* Traspunto (versione 2.52), programma per la trasformazione di coordinate nei tre sistemi di riferimento utilizzati in Italia, creato dal Ministero dell'Ambiente. Il volo di acquisizione del dato LIDAR è stato effettuato in un contesto idrometrico non ideale caratterizzato da portata in transito stimata di circa 140 m³/s, corrispondente ad un'areale bagnato di estensione pari a circa il 35% di quello totale dell'alveo attivo. Questo difetto intrinseco ha necessariamente comportato l'uso di un dato non perfetto a fini modellistici, ma comunque accettabile in contesti applicativi come questo in

cui si combinano modelli RCM e applicazioni a grandi scale spazio-temporali. Alcune viste di particolari del DEM-LIDAR 2001 sono state riportate in precedenza nella Figura 55.

	2001	2003	2006
Numero di sezioni	13	17	5
Periodo rilievo	-	8/30 maggio	-
Stima incertezza del valore medio di quota del fondo [cm]	± 3	± 5	± 3
Totale sezioni	35		

Tabella 32 - Riepilogo delle sezioni topografiche disponibili sul tratto oggetto di modellazione

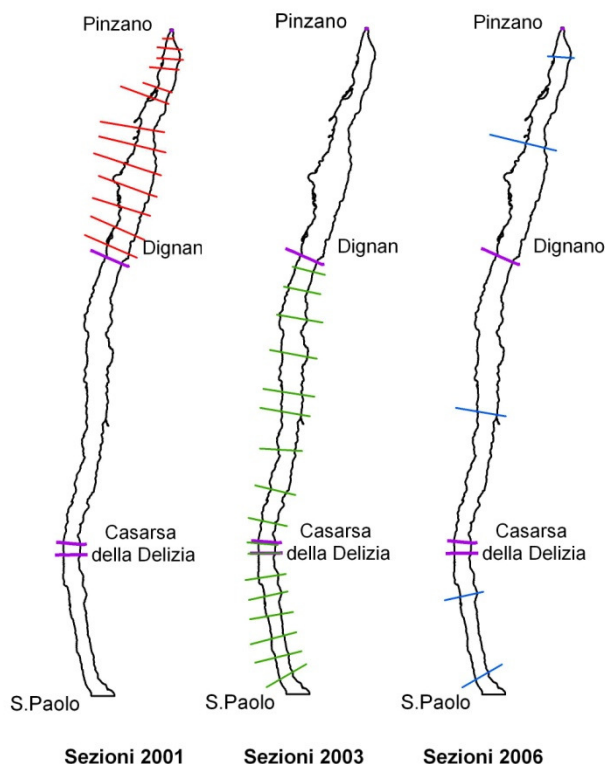


Figura 57 - Collocazione geografica delle sezioni topografiche a copertura del tratto oggetto di modellazione

7.5 Foto aeree

Le foto aeree utilizzate sono state solo una parte di quelle descritte al sottocapitolo 3.1.1. Gli obiettivi della modellazione hanno indotto a prendere in considerazione solo foto acquisite nei voli 2001-2002-2009. La vista di un particolare delle foto 2001 è visibile in Figura 55. Le caratteristiche generali delle foto aeree utilizzate sono riepilogate nella seguente Tabella 33 (per dettagli relativi a risoluzione a terra, tipo di foto, scala si rimanda alla Tabella 3, capitolo 3.1.1).

	2001	2002	2009
Data	9-13 aprile	30 novembre	14 maggio
Stima della portata in transito presso Pinzano al momento del volo di presa [m ³ /s]	140	420	134
Numero fotogrammi a copertura del tratto	43	7	13

Tabella 33 - Riepilogo delle foto disponibili a copertura del tratto oggetto di modellazione

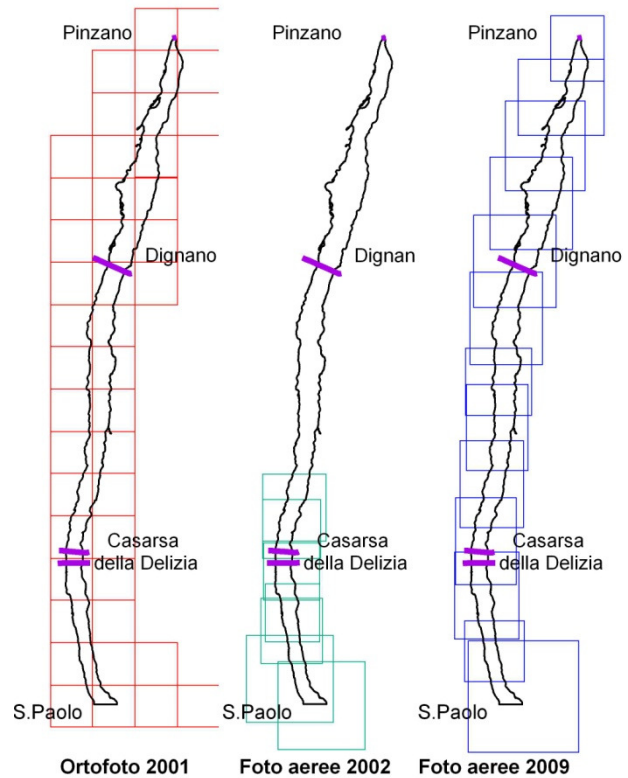


Figura 58 - Collocazione geografica delle foto a copertura del tratto oggetto di modellazione

7.6 Granulometrie

I dati granulometrici sono stati ricavati dallo studio tessiturale dei sedimenti condotto nel 2006-2007 dal Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine dell'Università di Trieste (Catani et al, 2007) su incarico dell'Autorità di Bacino dei Fiumi dell'Alto Adriatico. I dati utilizzati fanno riferimento alle 8 sezioni che ricadono nel tratto studio (Figura 59). Complessivamente sono stati utilizzati 38 campionamenti distribuiti variamente sulle diverse unità morfologica (barre attive, barre alte, isole). Si sono considerati solo i campionamenti superficiali effettuati con metodo fotografico (Catani et al, 2007).

I diametri associati a percentile di interesse applicativo (0, 5, 10, 16, 25, 40, 50, 60, 75, 84, 90, 95, 100) per ognuno dei 38 campionamenti sono stati elaborati con l'obiettivo di ricavare una curva granulometrica unica rappresentativa della composizione granulometrica di tutto il tratto studio (7.1); curva che fosse utilizzabile come unico parametro di modellazione del trasporto al fondo (si veda in proposito 6.7.1.3). L'elaborazione ha permesso di estrarre i valori medi globali dei diametri associati ai percentili. Questi valori sono stati quindi inseriti in una scala costruita infittendo con passo 0.5 ϕ la scala di Wentwoth. La scala ottenuta e utilizzata è riportata nelle seguenti Tabella 34 e Figura 60.

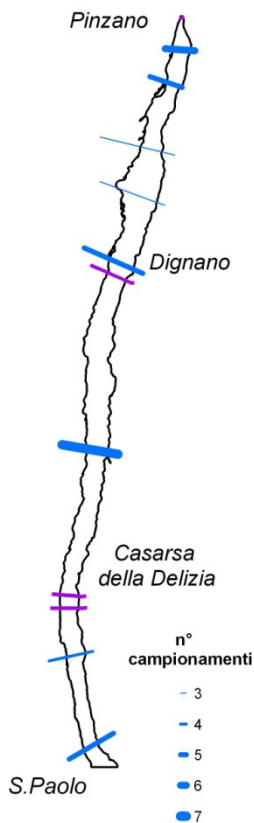


Figura 59 - Sezioni in cui sono stati effettuati i campionamenti granulometrici utilizzati

diametro intermedio classe [m]	cumulata [%]	frequenza [%]
0.002	0.0%	0.0%
0.005	0.3%	0.3%
0.007	1.7%	1.4%
0.010	3.7%	2.0%
0.014	8.8%	5.1%
0.019	21.9%	13.1%
0.027	43.9%	22.0%
0.039	72.7%	28.8%
0.055	95.4%	22.7%
0.077	100.0%	4.6%
0.109	100.0%	0.0%
0.155	100.0%	0.0%
0.219	100.0%	0.0%

Tabella 34 - Scala granulometrica adottata in CAESAR

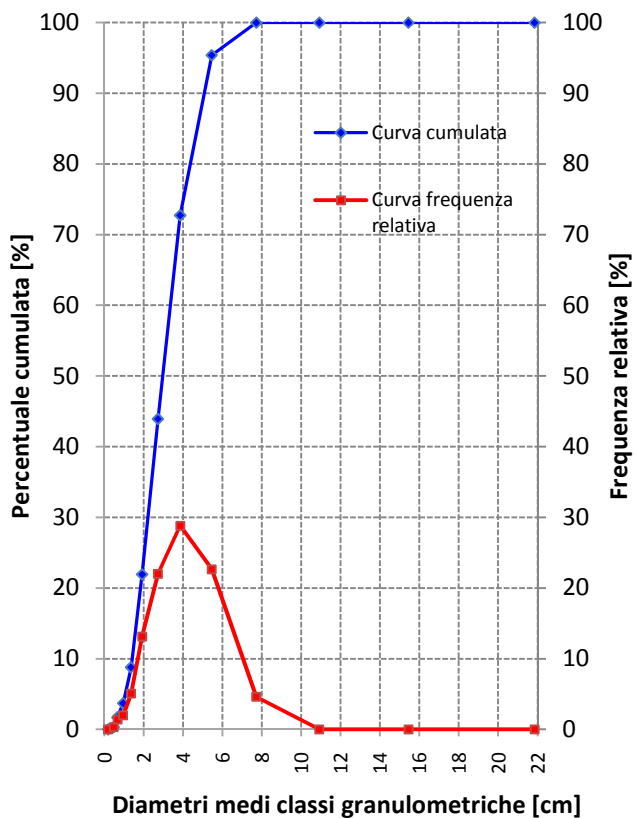


Figura 60 - Curve granulometriche cumulata e di frequenza corrispondenti alla scala adottata

8 Descrizione Fasi di lavoro

Questo capitolo è stato impostato con la finalità di fornire un quadro preliminare che sintetizzi e anticipi i passi che hanno caratterizzato tutta la Parte II della tesi dedicata alla modellazione numerica. Come illustrato nel *flow-chart* riportato nella seguente Figura 61, i passaggi principali sono principalmente tre:

1. applicazione esplorativa (cap. 9);
2. analisi di sensitività (cap. 10);
3. calibrazione e validazione (cap. 11).

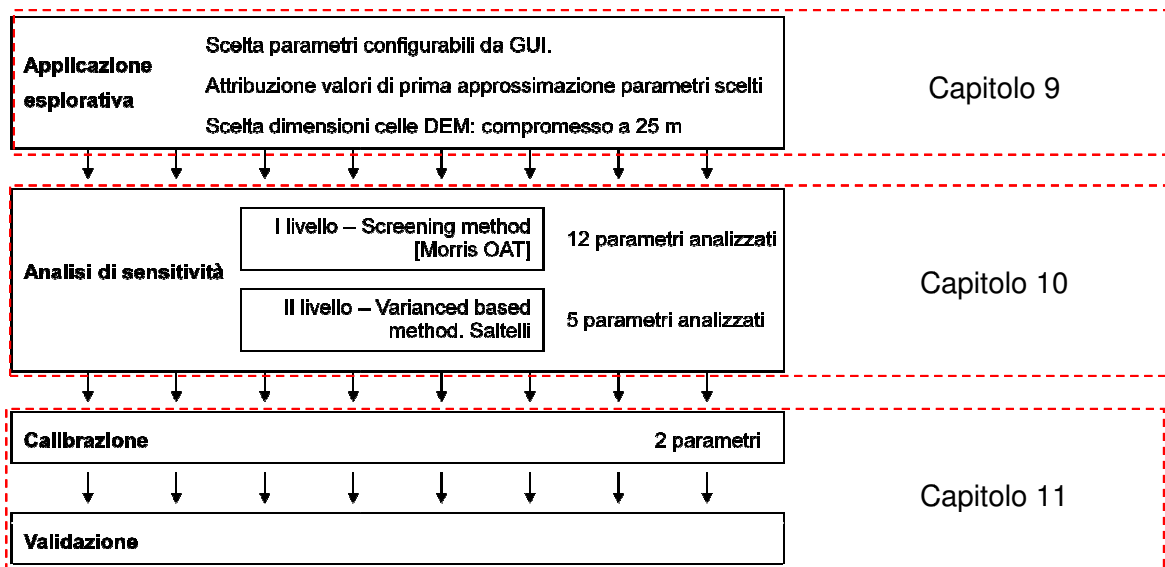


Figura 61 - Flow-chart delle principali fasi del lavoro di modellazione con indicazione dei riferimenti ai capitoli del documento

La successione delle fasi di lavoro adottata costituisce una procedura di applicazione che in letteratura non presenta equivalenti per RCM morfodinamici come CAESAR. Essa rappresenta un tentativo di utilizzare il rigore applicativo sostenuto da Brasington e Richards (2007) anche per contesti modellistici a complessità ridotta (capitolo 1.1).

Tratti fluviali e serie idrometriche utilizzate nelle suddette fasi sono sintetizzate nella seguente Figura 62. Applicazione esplorativa, Analisi di sensitività (entrambi gli *step*, SA1 e SA2) e Calibrazione sono state applicate ad un tratto limitato per lunghezza (7.5 km) e per una serie idrometrica biennale compresa tra il 9/4/2001 e il 30/11/2002 (Figura 62). Solo la validazione è stata allargata a tutto il tratto studio descritto al sottocapitolo. 7.1, estendendo la serie temporale ad un periodo di circa 8 anni compreso tra il 9/4/2001 e il 14/5/2009 (Figura 62).

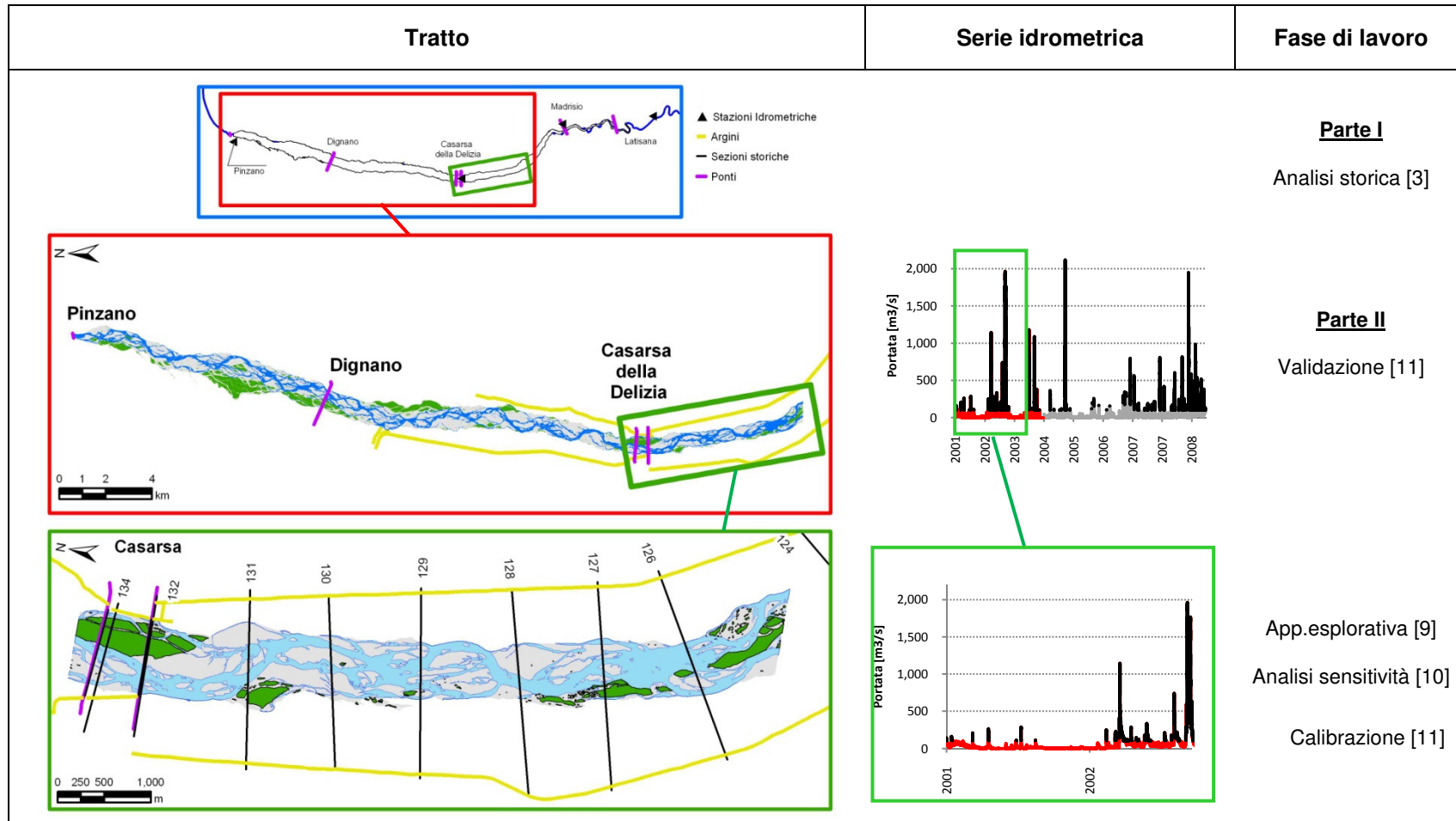


Figura 62 - Quadro di sintesi relativo ai tratti e alle serie idrometriche utilizzate nelle principali fasi del lavoro

8.1 Applicazione esplorativa

Si tratta di una fase preliminare durante la quale sono state intraprese una serie di simulazioni di prova che hanno permesso di prendere confidenza con alcuni aspetti pratici legati all'impostazione stessa delle simulazioni:

- opzioni di modellazione offerte dal modello;
- preparazione dei dati di *input* (si veda Appendice A.1) nei rispettivi formati richiesti;
- trattamento / conversione / elaborazioni dei dati in *output* (si veda Appendice A.2).

Questa prima fase ha interessato un tratto di lunghezza pari a circa 7.5 km, larghezza media di 620 m, pendenza media 2.9% e morfologia *braided*, collocato appena a valle dei ponti ferroviario e stradale di Casarsa della Delizia (si veda Figura 62). La scelta del tratto è stata effettuata nel rispetto di alcuni semplici criteri:

- il tratto ha subito modificazioni morfologiche significative contestualmente al periodo di simulazione;
- il tratto ha mostrato una stabilità della configurazione morfologica della sezione di monte tale da consentire un inserimento degli *input* solidi e liquidi in punti fissi nel tempo;
- la sezione di immissione si configura con pochi canali attivi ovvero punti di immissione della portata liquida.

Due fattori hanno garantito la sostanziale stabilità in prossimità della porzione di monte del tratto:

- la vicinanza con gli impalcati dei ponti, protetti localmente da strutture di difesa spondale;
- la presenza di una *complex island* (Gurnell e Petts, 2006) stabile isola posta in sinistra idrografica a cavallo degli impalcati. Questa isola è stata oggetto di rimozione in seguito agli eventi dell'autunno 2002. L'intervento di "regimazione idraulica" ha interessato solo la porzione interposta tra i ponti.

Il tratto è stato scelto anche in considerazione dell'abbondante documentazione disponibile (dati GIS, rilievi topografici, rilievi geomorfologici) e della profonda conoscenza acquisita sul campo della sua risposta morfologica passata e recente (si rimanda in proposito al capitolo 3).

8.2 Analisi di sensitività

L'analisi di sensitività (*Sensitivity Analysis*, SA) ha rappresentato la fase più impegnativa tra quelle che hanno scandito la seconda parte del lavoro di tesi. L'analisi è stata intrapresa con l'obiettivo di individuare le variabili di modellazione con la maggiore influenza sugli *output* delle simulazioni e scegliere di conseguenza quali tra queste variabili sottoporre a calibrazione. La SA intrapresa si è strutturata in due analisi in serie differenti per

- numerosità e *range* dei fattori analizzati;
- impegno computazionale richiesto (numero di simulazioni effettuate).

L'analisi di primo livello del tipo OAT di Morris, è stata applicata per analizzare in modo economico ad un livello puramente di *screening* un totale di 12 parametri di modellazione scelti tra quelli configurabili direttamente dall'attuale GUI di CAESAR (Figura 50) senza necessariamente accedere al codice sorgente. L'analisi di secondo livello è stata invece applicata ai 5 fattori principali emersi dalla prima analisi di *screening*. Entrambi questi *step* di analisi sono stati condotti sul medesimo tratto usato per l'analisi esplorativa, riproducendo la medesima serie idrometrica di eventi (Figura 62). La scelta preventiva di concentrarsi solo su fattori configurabili da utente attraverso la GUI ha giocoforza limitato in partenza il numero di parametri potenzialmente analizzabili. Tale scelta è stata motivata dalle seguenti considerazioni:

- nel caso in cui la numerosità dei parametri di un modello sottoponibili a SA sia potenzialmente estremamente elevata (come in questo caso), risulta comunque necessario porsi un limite ragionevole ed indagare solo alcuni aspetti del modello stesso.
- non è pensabile pretendere che un utilizzatore medio posseda le conoscenze di base per accedere direttamente al codice sorgente e modificare in modo specifico singoli parametri per i quali non c'è accesso diretto dalla GUI.
- nella GUI sviluppata per la versione scelta per questa applicazione (6.0j) sono di per sé già molto numerosi i fattori configurabili da utente.

Si ritiene opportuno sottolineare che sono stati volutamente esclusi dall'indagine le incertezze associate alle seguenti variabili:

- variabili guida indipendenti che costituiscono le condizioni al contorno delle simulazioni (portate, curva granulometrica di partenza).
- dettaglio topografico del DEM di partenza (qualità ed accuratezza del DEM – dimensione delle celle di calcolo).

Le motivazioni che hanno indotte questa scelta sono fondamentalmente due:

- affrontare anche l'analisi di questi fattori avrebbe esteso eccessivamente il contesto di indagine senza permettere di approfondire la *tuning importance* dei 12 fattori scelti che devono comunque essere considerati ai fini della modellazione.
- l'analisi dei fattori scelti ha carattere di generalità in quanto la loro importanza relativa è indipendente dal contesto di applicazione; per contro l'entità dell'incertezze associata al dato di contorno come appunto il dettaglio topografico, quello granulometrico, l'incertezza della misura delle variabili guida, ecc., sono fattori che nella maggior parte dei casi sono imposti dal contesto applicativo, sono vincoli di disponibilità sui quali spesso il *modeller* non ha margine di libertà. La scelta del relativo dettaglio diventa quindi un fattore fisso e imposto a priori, piuttosto che un fattore sul quale lavorare per rendere più efficace ed efficiente la simulazione. Analizzare con tecniche di SA questi fattori quindi, pur restando di indubbio interesse e oggetto di possibili ulteriori approfondimenti (la letteratura a riguardo è davvero notevole), avrebbe fornito informazioni di importanza relativa rispetto a fattori per i quali in concreto non c'è un margine di scelta modellistica.

8.3 Calibrazione e Validazione

L'individuazione delle variabili principali conseguita con l'analisi di sensitività ha permesso di procedere agevolmente verso la calibrazione del modello lavorando solo sue due variabili (comprese tra le 12 di partenza). Una volta calibrato il modello, nella piena consapevolezza dei limiti propri della calibrazione condotta, si è proceduto alla validazione del modello applicandolo a tutto il tratto studio per il periodo 9/4/2001 – 14/5/2009. Queste fasi hanno permesso di evidenziare compiutamente i limiti e le potenzialità principali di CAESAR applicato a contesti spaziali e morfologici simili a quello oggetto di studio.

9 Applicazione esplorativa

9.1 Materiali

Come anticipato al capitolo 8, l'applicazione esplorativa di CAESAR ha riguardato un tratto di circa 7.5 km a valle dei ponti di Casarsa della Delizia a morfologia *braided* e pendenza media pari a 2.9%. La serie idrometrica oraria utilizzata copre il periodo 9/4/2001 – 30/11/2002 come riportato nella seguente Figura 63. Per velocizzare tutte le simulazioni sono stati esclusi i valori di portata inferiori ad una soglia considerata formativa e fissata a 100 m³/s; questo valore è stato scelto facendo riferimento ai risultati di studi precedenti (Surian et al, 2009a) che hanno indicato per questo stesso tratto un valore di 90 m³/s come soglia di mobilitazione delle sole barre più basse e attive.

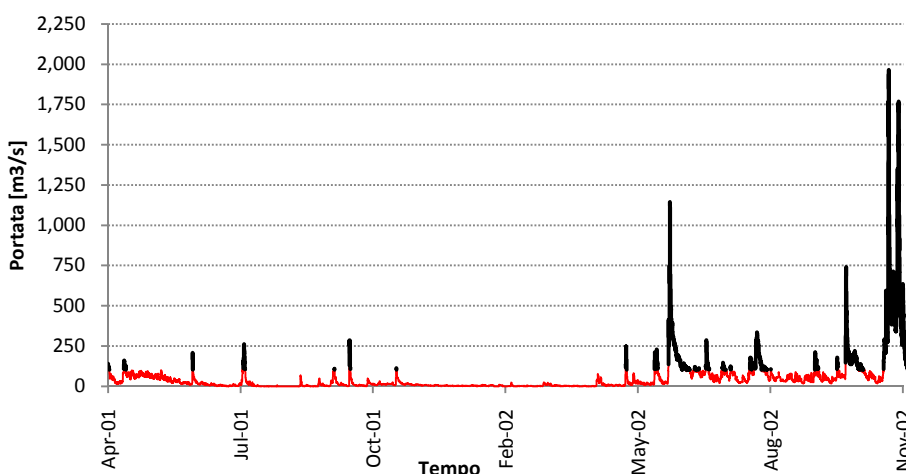


Figura 63 - Serie idrometrica oraria utilizzata per la fase esplorativa, l'analisi di sensitività (cap. 10) e la calibrazione (sottocapitolo 11.2). In rosso le basse portate escluse dalle simulazioni.

Per il tratto si sono utilizzati i materiali e i dati riportati nella seguente Tabella 35.

Materiali	Tipologie di Informazioni ricavate e utilizzate durante la fase di lavoro
Ortofoto 2001	Margini alveo attivo e isole Presenza di argini, difese laterali e repellenti da inserire nel DEM iniziale e nel BEDROCK (A.1)
Foto aeree 2002	Margini alveo attivo e isole Margini dell'area bagnata a fine periodo (portata associata pari a circa 420 m ³ /s) Presenza di argini, difese laterali e repellenti da inserire nel DEM iniziale e nel BEDROCK (A.1)
Sezioni 2003	Profilo trasversale associato alle sezioni presenti nel tratto (8 in totale, 134, 132, 131, 130, 128, 127, 126 - Tabella 8) e a altre due sezioni poste appena a monte del tratto (sez. 136, 137)
DEM LIDAR 2001	DEM di partenza per le simulazioni con celle 2x2

Tabella 35 - Descrizione dei dati di controllo disponibili ed utilizzati per la fase di applicazione esplorativa

La discrepanza temporale tra l'acquisizione del dato planimetrico da foto aeree (30 novembre 2002) e quella altimetrico da sezioni topografiche (8-30 maggio 2003) non ha creato problemi a causa dell'assenza sostanziale di eventi di piena formativi tra le due date di acquisizione. Questo è evidente nell'idrogramma riportato nella seguente Figura 64.

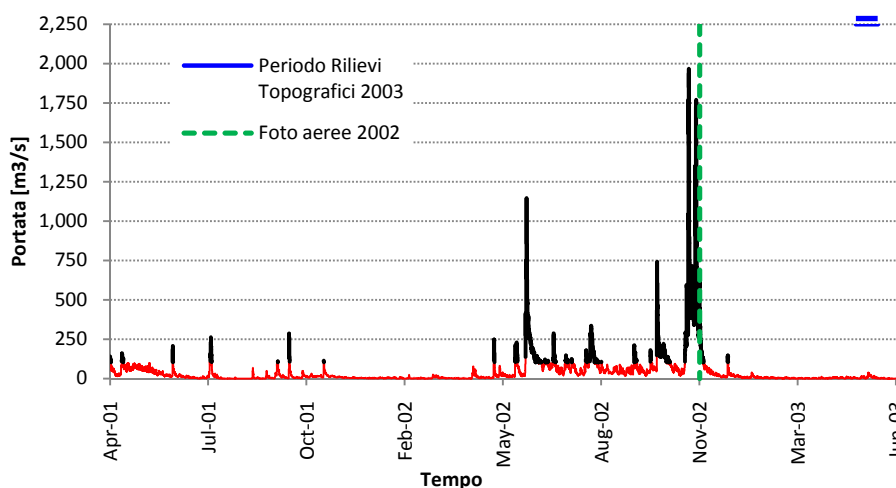


Figura 64 - Evidenziazione dei deflussi nel periodo intercorso tra le foto aeree 2002 e i rilievi topografici 2003 utilizzati

Preliminarmente all'avvio delle simulazioni è stata effettuata una valutazione idraulica monodimensionale per determinare collocazione e numerosità dei punti di ripartizione dell'*input* liquido da monte.

Utilizzando il *software* monodimensionale HEC-RAS (versione 4.0 - US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, 2008) e le geometrie di 7 sezioni topografiche del 2003 (sezioni storiche 128-139, 5 sezioni ricomprese nel tratto e due poste poche più a monte) si è creato un modello monodimensionale associato alla porzione del tratto a cavallo dei ponti di Casarsa (estensione di circa 9 km). Tramite l'uso delle ortofoto 2001 si sono impostati valori di scabrezza trasversalmente variabili in funzione della copertura vegetale fotointerpretata. I valori di scabrezza sono stati distinti per unità morfologica (canali principali, isole, barre alte, terrazzo fluviale), definendo per ciascuna unità un settore. Si sono quindi impostate una serie di simulazioni in moto permanente con portate incrementate ad intervalli di 25 m³/s, al fine di estrapolare una scala di deflusso per la sezione posta sul lato di monte al tratto. Elaborando i valori di velocità medi per ogni settore (Figura 65A) si sono ricavate le portate defluenti in ciascuno di essi. In totale si sono distinti 8 settori planimetrici, ciascuno individuabile con un punto medio in corrispondenza del quale si sono fissati i punti di immissione delle portate liquide in CAESAR (Figura 65B). Pur trattandosi di una metodologia piuttosto imprecisa dal punto di vista idraulico, si è ritenuto che quello adottato fosse il metodo che permettesse il miglior compromesso tra accuratezza del risultato e rapidità di elaborazione.

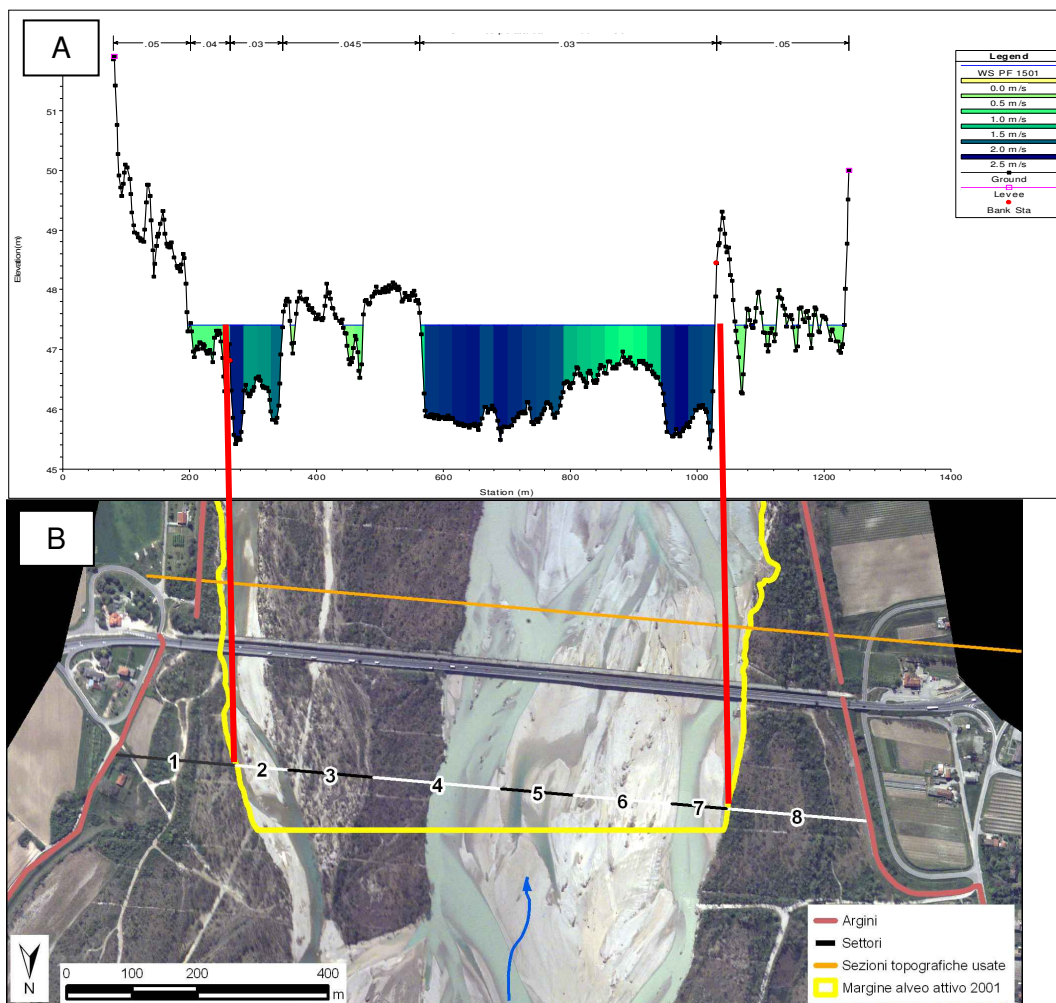


Figura 65 - Sezione di immissione della portata liquida nella sezione di monte al tratto oggetto delle simulazioni. [A] distribuzione trasversale delle velocità prodotte da HEC-RAS. [B] individuazione planimetrica degli 8 settori corrispondenti ad altrettanti punti di immissione delle portate in CAESAR

9.2 Risultati

Partendo dalla configurazione di *default* al modello, si è proceduto per tentativi, di simulazione in simulazione, modificando solo alcuni fattori ritenuti influenti secondo una sommaria e soggettiva “scala di rilevanza”. Sono state effettuate complessivamente 74 simulazioni per un totale di circa 85 gg di tempo macchina di calcolo. Per tutte le simulazioni è stata valutata la velocità computazionale, mentre solo per le simulazioni che hanno fornito tempi di calcolo accettabili è stata calcolata la *performance* di area bagnata confrontando l’*output* con l’areale bagnato del 2002 estratto da foto aerea.

Il calcolo della performance di area bagnata (F_w) è stato effettuato seguendo i passaggi descritti in appendice (A.3.2). Il calcolo della velocità computazionale invece è stato effettuato calcolando il valore del seguente rapporto

$$R_{ve} = \frac{T_{SE}}{T_C} \quad (39)$$

dove T_{SE} corrisponde al numero di ore effettivamente simulate (ore con portata in ingresso superiore alla soglia formativa di $100 \text{ m}^3/\text{s}$), mentre T_C corrisponde al tempo macchina di calcolo espresso sempre in ore. Un valore ritenuto accettabile di velocità computazionale è stato posto a

730, corrispondente alla simulazione di 2 anni in 24 h. Considerando il biennio 2001-2002 e includendo nella valutazione anche gli eventi al di sotto della soglia formativa, risulta che un valore di R_{ve} pari a 730 corrisponde ad una simulazione di circa 40 anni in 5 giorni. In questo senso può risultare indicativo anche il valore del seguente rapporto

$$R_{vr} = \frac{T_{SR}}{T_C} \quad (40)$$

dove T_{SR} corrisponde al numero di ore reali totali associate al periodo simulato, indipendentemente dai defussi caratterizzanti il periodo. Durante questa fase di lavoro, la migliore simulazione ottenuta ha fornito valori di *performance* F_w inferiori al 70% (Figura 66) e un valore di R_{ve} pari a circa 780.

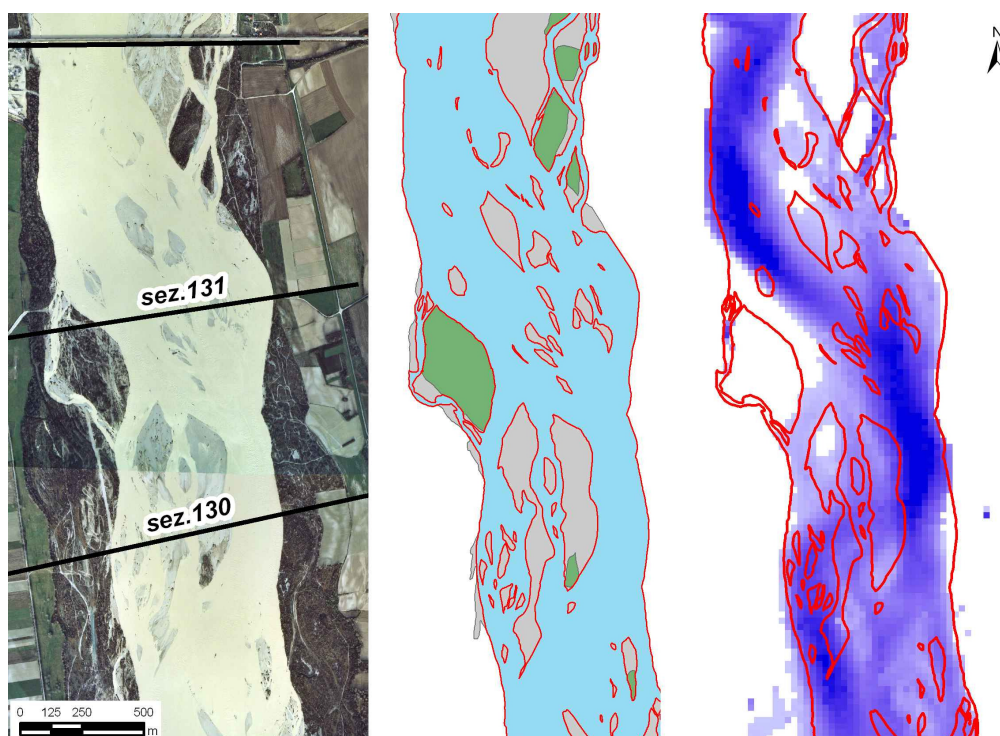


Figura 66 - Confronto tra area bagnata nel 2002 e *output* del modello per la migliore delle simulazioni ottenute nella fase esplorativa

Allontanandosi da questa configurazione che è risultata essere in primissima approssimazione quella ottimale, i tempi di calcolo si alzano significativamente. Solo il 12% delle simulazioni effettuate ha manifestato valori del rapporto R_{ve} superiori o prossimi a quello preso come riferimento (730), come evidente anche nella seguente Figura 67.

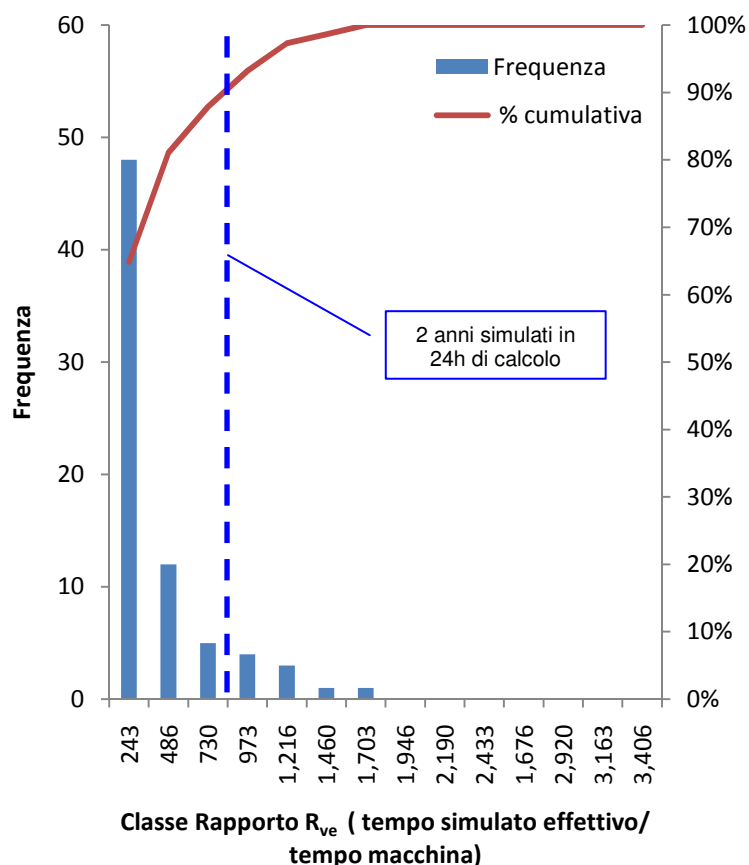


Figura 67 - Analisi di frequenza del rapporto tempo reale simulato / tempo macchina di calcolo per le simulazioni effettuate in questa fase. Campione di 74 simulazioni

Durante questa fase sono state applicate allo stesso tratto versioni differenti del modello CAESAR. La *release* 5.9c, adottata in un primo momento, è stata successivamente affiancata da nuove versioni (5.9v, 6.0, 6.0j, 6.1a, 6.1b e 6.1f, si veda Tabella 36). Non trascurabili miglioramenti prestazionali si sono registrati con l'adozione della versione 6.0j nel luglio 2009, adottata come versione definitiva per tutto il lavoro di tesi.

Codice della versione	DATA UP-LOAD
5.9c	11/06/2007
5.9v	14/01/2009
6.0	01/07/2009
6.0j	20/07/2009
6.1a	06/10/2009
6.1b	08/10/2009
6.1f	10/11/2009

Tabella 36 - Versioni del modello CAESAR testate durante la fase esplorativa

Un altro risultato significativo emerso da questa fase è la dimensione minima della cella del DEM iniziale, scelta pari a 25x25 m. DEM più grezzi (50x50 m) abbattano sensibilmente i tempi ma non permettono analisi di dettaglio (conteggio dei canali attivi, valutazione dell'arretramento spondale anche di eventi di entità moderata). DEM più accurati (5x5 – 10x10) innalzano eccessivamente i tempi di calcolo.

10 Analisi di sensitività

10.1 Inquadramento teorico

10.1.1 Concetti chiave

La SA rappresenta lo studio di come variazioni nell'*output* di un modello (numerico e non solo) possono essere distribuite, qualitativamente e quantitativamente, tra svariate fonti di variazione, e come la risposta del modello stesso dipende dall'informazione di *input*. Alla luce di questo è largamente riconosciuto in letteratura che la SA costituisce un prerequisito fondamentale nella costruzione e impostazione di ogni modello, in ogni campo di applicazione. Una buona pratica della modellazione prevede che il *modeller* proceda con una valutazione della confidenza del modello, possibilmente valutando l'incertezza associata ai processi modellati, ai dati in *input* al modello e ai dati di *output* dello stesso.

Originariamente la SA fu ideata semplicemente per trattare l'incertezza associata alle variabili di *input* ai modelli e ai parametri impostati in associazione agli algoritmi di modellazione dei vari processi. Nel tempo questa idea è stata estesa per incorporare l'incertezza associata a certe scelte concettuali compiute internamente ai modelli, nonché a specifiche assunzioni o semplificazioni di modellazione. Nel complesso la SA viene oggi utilizzata per aumentare la confidenza con il modello e con le sue forme di previsione, fornendo una via preferenziale di comprensione di come le sue risposte variano in funzione delle variazioni dell'*input* o dei parametri del modello (variabili indipendenti), fornendo quindi dati essenziali per la calibrazione. La SA si giustifica quindi quale esercizio preliminare alla calibrazione svolto al fine di investigare la "*tuning importance*" di ogni parametro, ovvero per identificare un *set* di parametri da considerarsi più importanti ai fini della calibrazione, data la grande difficoltà di calibrare un modello che cresce proporzionalmente alla numerosità e complessità dei processi modellati e quindi al numero dei parametri che devono essere stimati.

In letteratura esiste una varietà notevole di tecniche di analisi di sensitività. La scelta del metodo da adottare per ogni particolare contesto di modellazione risulta difficoltosa dato che ogni tecnica manifesta aspetti di forza e di debolezza. Tale scelta dipende dal problema che il modellatore intende risolvere, dalle caratteristiche del modello e dai costi computazionali che possono essere affrontati. Le tecniche di SA possono essere variamente classificate. Una forma generale di classificazione in funzione del *setting* dell'analisi prevede tre classi principali:

- metodi di screening (*Factor Screening Method*)

sono metodi la cui applicazione ha lo scopo di isolare fra tanti fattori quelli che maggiormente influenzano una particolare risposta di un modello numerico o di più genericamente di un esperimento fisico. L'applicazione di questa categoria di analisi permette di individuare pochi fattori influenti sui quali concentrare l'attenzione in un successivo procedimento di calibrazione o di ulteriore SA di dettaglio. La scelta del relativo progetto di simulazione (*Design Of Experiments – DOE*) è particolarmente importante se si considera che questi metodi vengono applicati prevalentemente a modelli con numerosi fattori e quindi dimensioni ragguardevoli dello spazio di esistenza degli *input*. Per questa stessa ragione i metodi di *screening* nascono con la caratteristica principale di essere "economici" (per costo di un DOE si intende il numero di *run* richiesti nel contesto specifico di analisi), ovvero portare ad un risultato soddisfacente con il minor tempo di calcolo possibile.

- metodi basati sull'analisi differenziale (*Methods Based on Differential Analysis*)

questi metodi si caratterizzano di quattro fasi principali: (i) selezione dei valori base e dei range associati ai fattori (ii) sviluppo di Taylor di approssimazione della funzione di *output* nell'intorno del punto dello spazio di esistenza considerato come centro dell'analisi (iii)

stima della varianza associata al valore di *output* e confronto con le stime di varianza ottenute attraverso le formule di propagazione della stessa (iv) uso delle serie di Taylor approssimate al grado ritenuto idoneo per la stima dell'importanza di singoli fattori.

Questa tipologia di analisi può essere applicata solo se il *modeller* è disposto ad assumere che la risposta del modello sia un hyperpiano o che la sua analisi si limiti all'analisi locale di un hyperpiano tangente alla superficie di *output* nel punto considerato di scenario nominale (dato uno spazio di dimensione n si definisce hyperpiano il sottospazio di dimensioni $n-1$ che separa lo spazio in due semispazi; per $n=1$ [spazio monodimensionale - retta] un hyperpiano degenera in un punto che separa la retta in due semirette, per $n=2$ [piano bidimensionale - piano cartesiano] in una retta che separa il piano cartesiano in due semipiani, per $n=3$ [spazio tridimensionale euclideo] in una superficie che separa lo spazio in due semispazi, e così via).

- metodi basati sul campionamento (*Sampling-Based Method*)

in questi casi la costruzione del DOE avviene campionando il dominio di esistenza dei principali fattori che influenzano il modello adottando tecniche scelte in funzione del tipo di modello e delle conoscenze statistiche disponibili in associazione ai fattori di *input* da analizzare. Esempi: *Monte Carlo analysis*, *Response Surface methodology*, *Measure of Importance Technique (Fourier amplitude sensitivity test –FAST, Sobol)*, *GLUE (Bayesian Generalized Likelihood Estimation)*.

In funzione invece dell'ampiezza relativa del dominio indagato per i singoli fattori le tecniche di SA possono altresì dividersi in:

- SA globali

una SA è generalmente considerata globale quando tutti i parametri indagati sono simultaneamente cambiati e la sensibilità è misurata per tutto il *range* di esistenza dei parametri stessi. I range sono valutabili dal *modeller*, dato che rispecchiano il relativo grado di conoscenza o non conoscenza del parametro. Più specificatamente si potrebbero definire globali quei metodi che manifestano le seguenti proprietà:

- inclusione dell'influenza della scala e della forma – la stima della sensibilità dei singoli fattori riflette anche il *range* di esistenza e la forma della funzione di densità di probabilità associati.
- mediazione multidimensionale – la stima della sensibilità dei singoli fattori è valutata variando anche tutti gli altri fattori.

Per queste ragioni, quando esiste incertezza significativa riguardo ai valori assegnabili nel modello e la complessità del modello è tale da assicurarne un comportamento non lineare, un metodo di analisi globale è preferibile ad uno locale.

- SA locali

analisi di sensibilità locali sono applicate generalmente per calcolare le derivate parziali di una funzione di *output* rispetto ad alcune variabili di *input*. Allo scopo di calcolare numericamente i valori delle derivate, le variabili di *input* sono variate ed indagate solo in un intervallo limitato attorno ad un valore nominale; le singole variabili indagate sono variate singolarmente mantenendo costante degli altri fattori e pari al loro valore nominale. L'intervallo indagato per ogni fattore è generalmente lo stesso, e non è correlato al grado di conoscenza di variazione del fattore stesso. Analisi di questo tipo sono praticabili quando la variazione nell'intorno del valore nominale è piccola. In generale la relazione tra i fattori e di valori di *output* è assunta lineare.

10.1.2 Metodi di *screening*

La classe dei metodi di *screening* più semplice è quella dei cosiddetti “*One – At – a – Time experiments*” (OAT). In questi piani di simulazione l’effetto indotto dalla variazione del valore di ogni singolo fattore è valutato singolarmente. Si possono classificare cinque categorie di OAT:

1. *standard OAT* – utilizza un fattore nominale (di controllo) per ogni singolo fattore (spesso preso dalla letteratura) e due valori estremi che delimitano il *range* di esistenza (normalmente il valore standard cade nella mediana). Si varia ogni fattore dalla condizione standard e si compara la differenza rispetto al valore nominale con quelle esplicitate agli estremi.
2. *strict OAT* – tra un esperimento ed il successivo si varia volta per volta un solo fattore.
3. *paired OAT* – produce due osservazioni e quindi una comparazione per volta.
4. *free OAT* – si effettua ogni nuovo *run* sotto nuove condizioni.
5. *curved OAT* – si produce un sottoinsieme di risultati variando solo un fattore per il quale la variazione è più agevole.

Gli svantaggi di questa tipologia di analisi discendono necessariamente dai pregi che la caratterizzano (economicità e semplicità concettuale):

- gli OAT tendono a fornire solo misure qualitative della sensitività, cioè essi permettono di classificare per importanza i fattori di *input*, ma non indicano quanto un dato fattore è più importante di altri. Questo si rende possibile con tecniche di analisi di livello superiore, locali o globali.
- non permettono la stima delle interazioni tra i fattori analizzati.

10.1.2.1 Metodo *One-at-a-time* (OAT) di Morris

Il metodo OAT più noto ed applicato è quello proposto da Morris (1991), del tipo globale e *strict*. L’appellativo globale discende dal fatto che il relativo DOE può coprire tutto lo spazio di esistenza dei singoli parametri. Si consideri un modello qualunque (numerico, fisico, ecc.), per il quale un generico *output* y sia funzione di k fattori $x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{k-1}, x_k$, costituenti complessivamente un vettore \mathbf{x} generico che identifica un punto esatto nell’iperspazio di esistenza k -dimensionale dei fattori (dominio), a cui corrisponde un valore esatto di y (tra x e y sussiste un legame deterministico, senza errori, per il quale due valutazioni di y in corrispondenza dello stesso vettore \mathbf{x} sono identiche). Si definisca per ogni i -esimo fattore ($i=1\dots k$) un valore Δ_i quale passo di discretizzazione del rispettivo range di esistenza del singolo fattore oggetto di analisi. Assunte queste notazioni di forma, la strategia alla base del metodo di Morris può essere così sinteticamente esplicitata:

1. viene scelto casualmente nel dominio oggetto di analisi un vettore base di partenza, \mathbf{x}_j ;
2. uno alla volta ogni i -esimo fattore ($i = 1\dots k$) viene aumentato di una grandezza pari al corrispondente Δ_i e viene calcolato per ogni nuova combinazione il rispettivo valore di *output* y_{ji} ;
3. si ottiene quindi un vettore \mathbf{y}_j formato da $k+1$ “*evaluation*” ovvero valori di *output* associati alle $k+1$ combinazioni ricavate partendo dal vettore di partenza \mathbf{x}_j ;
4. dal suddetto vettore si ricava un altro vettore associato formato da k valori denominati “effetti elementari” calcolati come rapporti incrementali del valore di *output*:

$$d_{ij} = \frac{y(x_1 x_2 \dots x_i + \Delta_i, \dots, x_k) - y(x_1 x_2 \dots x_{i+1} + \Delta_{i+1}, \dots, x_k)}{\Delta_i} \quad (41)$$

5. si ripetono gli *step* 1-4, per $j=1 \dots r$ volte, dove r è il valore di ripetizioni specifico per l'analisi in corso che indica la numerosità delle valutazioni degli effetti elementari che si intende calcolare per ogni singolo fattore;
6. per ogni i -esimo fattore ($i = 1 \dots k$), si utilizza il vettore associato d_i formato da r valori di effetto elementare, per calcolare un valore di deviazione standard (σ_i) e di media (μ_i) campionari associati al fattore stesso.

A questo punto il metodo prevede la valutazione qualitativa dell'importanza di ogni fattore poggiando su due valutazioni principali:

- un elevato valore medio μ_i è indice che l' i -esimo fattore induce mediamente un effetto elementare elevato sull'*output*, ovvero ha un'influenza generale significativa sul modello;
- un elevato valore di deviazione standard σ_i è indice che il modello manifesta una risposta che varia sensibilmente in funzione del valore dell' i -esimo fattore, ovvero esiste un legame di non-linearità tra l'*output* del modello e il fattore stesso.

Il principale vantaggio del metodo di Morris è evidentemente oltre alla semplicità concettuale, il basso costo computazionale: a fronte di $r(k+1)$ *runs* si ottengono rk *evaluation*, con un valore di economicità molto prossimo all'unità valutabile come

$$e = \frac{rk}{r(k+1)} = \frac{k}{k+1} \quad (42)$$

Tra gli svantaggi rientrano naturalmente quelli propri di questa tipologia di analisi, ovvero

- impossibilità di quantificare la sensitività dei singoli fattori nei relativi ordini (primario, secondario, totale);
- copertura del dominio dei fattori parziale a causa non solo della scarsa numerosità delle combinazioni, ma anche nel metodo random di selezione dei vettori di partenza.

10.1.3 Metodi basati sulla regressione

Questa tipologia prevede la ripetizione di *run* ottenuti campionando con particolari procedure di *sampling* lo spazio di esistenza degli *input* allo scopo di determinare il valore dei parametri della relazione lineare che si assume possa esistere tra l'*output* del modello e i fattori oggetto di analisi. Questi metodi si fondano sulla valutazione di un numero considerevole di combinazioni che, ricavate casualmente a partire dalle funzioni di distribuzione di probabilità stimate per ogni singolo fattore, generano *output* multipli ugualmente numerosi. Il complesso delle simulazioni che caratterizzano queste analisi può essere visto come un processo attraverso il quale scenari multipli generano altrettanti *output*. Sebbene ogni esecuzione del modello è deterministica, il *set* di valori di *output* può essere considerata una distribuzione cumulata di n campioni descrivibile attraverso classiche misure statistiche. Generalmente questo tipo di analisi prevede cinque fasi principali:

1. definizione delle funzioni di densità di probabilità associate ai fattori da analizzare (nel caso di assenza di informazioni statistiche o di letteratura le distribuzioni possono essere prese uniformi).
2. campionamento interno alle distribuzioni suddette attraverso idonee procedure di *sampling*; in letteratura sono proposte svariate tecniche di campionamento; la scelta dipende dalla numerosità di simulazioni che il *modeller* è disposto ad intraprendere. Tra le principali tecniche di campionamento si ritiene opportuno ricordare:
 - *Random Sampling*;
 - *Importance Sampling*;

- *Latin Hypercube Sampling* (LHS).
3. valutazione del modello; una volta generato il DOE il modello deve essere valutato ovvero devono essere avviati, conclusi ed analizzati i *run* previsti nel piano di simulazione. L'analisi deve concentrarsi sul valore di *output* che caratterizzerà l'analisi successiva di incertezza e sensitività.
 4. analisi di incertezza associata all'*output* del modello; prevede la descrizione statistica del campione di valori di *output* prodotti dal modello.
 5. analisi di sensitività attraverso tecniche basate sulla regressione lineare. Quest'ultima fase permette di calcolare un "indice di sensitività" associato ad ogni singolo fattore e quindi associare a ciascuno il relativo *rank* (livello di importanza di modellazione).

10.1.4 Metodi basati sulla varianza

McKay, 1997 mostra chiaramente come le tecniche basate sulla regressione lineare illustrate al sottocapitolo precedente costituiscano un caso particolare di una classe più ampia di metodi cosiddetti basati sulla varianza (*variance-based*, VB). L'idea di utilizzare la varianza dell'*output* condizionata al valore assunto dai fattori in *input* quale indicatore dell'importanza dei fattori stessi, resta alla base anche dei metodi basati sulla regressione; in questi ultimi tuttavia il livello di semplificazione e perdita di informazioni è superiore e legato strettamente all'ipotesi di linearità della relazione *output-input*. Nel caso dei *VB method* il valore atteso della varianza è scritto in termini di varianza condizionata, senza alcuna assunzione semplificativa riguardo alla relazione esistente tra il valore stesso dell'*output* e i fattori analizzati.

Si possono distinguere due classi principali di metodi VB, quelli che assumono una relazione prossima alla linearità (cosiddetti "*correlation analysis method*": SRC – *Standardized Regression Coefficient*, Pearson *Correlation Coefficient*, PCC – *Partial Correlation Coefficient*), e quelli completi (*SOBOL method*, FAST – *Fourier Amplitude Sensitivity Test*, *Correlation Ratio*).

Per comprendere meglio questa classe di metodi è utile pensare anzitutto al principio di base decisamente intuitivo sul quale poggiano questi metodi, ovvero ogni fattore oggetto di analisi può dirsi importante se fissando il suo valore si riduce sostanzialmente la varianza condizionata associata all'*output* analizzato.

10.1.4.1 Metodo di Sobol

Si supponga di aver applicato una tecnica di *sampling* scelta tra quelle proprie delle analisi Monte Carlo per generare un campione composto da m combinazioni casuali dei k fattori oggetto di analisi, x_1, \dots, x_k ; si supponga di aver effettuato altrettante realizzazioni del modello identificato dalla generica funzione g che lega il valore di *output* y ai suddetti fattori ovvero si pensi ad un'espressione del tipo

$$y = g(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (43)$$

Il metodo di Sobol si fonda sulla scomposizione della funzione g in sommatorie dimensionalmente crescenti

$$g(x_1, x_2, \dots, x_k) = g_0 + \sum_{i=1}^k g_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq k} g_{ji}(x_i, x_j) + \dots + g_{1,2,\dots,k}(x_1, \dots, x_k) \quad (44)$$

che può essere valutata dai seguenti integrali multidimensionali

$$g_0 = \int_0^1 \dots \int_0^1 g(x) dx \quad (45)$$

$$g_i(x_i) = -g_0 + \int_0^1 \dots \int_0^1 g(x) dx_{\neq i} \quad (46)$$

$$g_{ij}(x_{ij}) = -g_0 - g_i(x_i) - g_j(x_j) + \int_0^1 \dots \int_0^1 g(x) dx_{\neq (ij)} \quad (47)$$

dove $dx_{\neq i}$ e $dx_{\neq ij}$ indicano integrazione usando tutti i fattori eccezion fatta rispettivamente per x_i ed $x_i + x_j$. Formule analoghe si possono esprimere anche per determinare interazioni di ordine superiore. La varianza totale normalizzata V associato all'*output* del modello, é esprimibile per definizione come

$$V = \int_0^1 \dots \int_0^1 g(x)^2 dx - g_0^2 \quad (48)$$

mentre le varianze parziali

$$V_{i_1, \dots, i_s} = \int_0^1 \dots \int_0^1 g_{i_1, \dots, i_s}^2(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dx_{i_1}, \dots, x_{i_s} \quad (49)$$

Si definiscono quindi indici di sensitività i rapporti S_{i_1, \dots, i_s} calcolati come

$$S_{i_1, \dots, i_s} = \frac{V_{i_1, \dots, i_s}}{V} \quad (50)$$

tra questi valori:

- S_i (con $i=1 \dots k$) sono i cosiddetti "indici di sensitività di primo ordine" i quali quantificano l'effetto principale indotto dal fattore x_i sull'*output* (il contributo parziale alla varianza di $g(x)$). Dalle formula precedente ne discende la definizione

$$S_i = V_i/V \quad (51)$$

- S_{ij} (con $i, j=1 \dots k$ e $i \neq j$) sono invece definiti gli "indici di sensitività di secondo ordine" i quali quantificano l'effetto di interazione tra i fattori $i-j$ (ovvero la parte delle variazioni manifestate da $g(x)$ che non possono essere spiegate dalla somma degli effetti individuali).

Il cosiddetto indice di sensitività S_i associato all' i -esimo fattore con $i = 1 \dots k$ rappresenta il contributo dovuto ad x_i sul valore di varianza dell'*output* y . Al fine di calcolarne il valore, la varianza totale del valore di *output* è stata ripartita da Sobol (1990) tra tutti i contributi dovuti ai singoli x_i ovvero

$$V = \sum_i V_i + \sum_{i<j} V_{ij} + \sum_{i<j<l} V_{ijl} + \dots V_{12\dots k} \quad (52)$$

in cui

$$V_i = V[E(y|x_i = x_i^*)] \quad (53)$$

$$V_{ij} = V[E(y|x_i = x_i^*, x_j = x_j^*)] - V_i - V_j \quad (54)$$

dove $V[E(y|x_i = x_i^*)]$ rappresenta la varianza del valore atteso di y condizionato a quello di x_i calcolato per tutti i valori particolari x_i^* . Questa è una misura intuitiva della sensitività di y al fattore x_i , dato che quantifica in quale misura il valore atteso di y condizionato, $E(y|x_i = x_i^*)$, varia con il valore di x_i^* , mentre tutti gli effetti dei fattori x_j con $j \neq i$ sono mediati sul campione di *evaluation* disponibile. Esistono teoricamente $(2^k - 1)$ forme di possibile interazione tra i k fattori in analisi; risulta quindi usualmente impraticabile quantificarle e calcolare gli indici di grado superiore al secondo. Un approccio molto più pratico è quello proposto da Homma e Saltelli (1995) di calcolare il valore del cosiddetto indice di sensitività totale S_{Ti} per ogni fattore come

$$S_{Ti} = 1 - \frac{V[E(y|x_{\neq i} = x_{\neq i}^*)]}{V(y)} \quad (55)$$

dove $x_{\neq i}$ denota tutti i fattori diversi da x_i . Fattori con bassi valori dell'indice di sensitività del primo ordine ma alto indice totale influenzano l'*output* y principalmente attraverso la loro interazione con gli altri fattori. La presenza di questi fattori è indicativo di ridondanza nella parametrizzazione del modello, ovvero della funzione g .

Il metodo di Sobol è indipendente dal modello a cui viene applicato, e diversamente dai metodi basati sulla regressione lineare o sulla quasi linearità della relazione tra *input* e *output*, può essere applicato anche a modelli non lineari e non additivi.

10.1.4.2 Metodo di Saltelli

In questo lavoro di ricerca si è applicato un metodo basato sulla varianza recentemente elaborato da Saltelli (2002) simile a quello proposto da Sobol (1990) ma più economico dal punto di vista computazionale. Riprendendo le espressioni (51) e (54) si ottiene la seguente espressione degli indici di primo ordine

$$S_i = \frac{V[E(y|x_i = x_i^*)]}{V(y)} \quad (56)$$

Partendo dalle definizioni stesse di valore atteso E e di varianza V si può riscrivere l'espressione come

$$S_i = \frac{(\int E^2(y|x_i = x_i^*)p_i(x_i^*)dx_i^*) - E^2(y)}{V(y)} = \frac{U_i - E^2(y)}{V(y)} \quad (57)$$

Passando ad uno schema Monte Carlo per la stima dei fattori che compaiono in (57) è necessario considerare due matrici di campionamento nel dominio definito dai fattori x_1, \dots, x_k , ciascuna di dimensione $n \times k$, con n = dimensione del sample MC, k = numero dei fattori in analisi

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}, \mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \dots & x'_{1k} \\ x'_{21} & x'_{22} & \dots & x'_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x'_{n1} & x'_{n2} & \dots & x'_{nk} \end{pmatrix} \quad (58)$$

Una stima $\hat{E}(y)$ del valore atteso $E(y)$ può ottenersi dal campione di valori di y ottenuti dalle $2n$ combinazioni che costituiscono le matrici M_1 e M_2 . La stima di U_i invece può essere ottenuta dalle matrici M_1 e N_i , quest'ultima definita come

$$\mathbf{N}_i = \begin{pmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \dots & x_{1i} & \dots & x'_{1k} \\ x'_{21} & x'_{22} & \dots & x_{2i} & \dots & x'_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x'_{n1} & x'_{n2} & \dots & x_{ni} & \dots & x'_{nk} \end{pmatrix} \quad (59)$$

cioè \hat{U}_i può scriversi anche come

$$\hat{U}_i = \frac{1}{n-1} \sum_{r=1}^n f(x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rk}) f(x'_{r1}, x'_{r1}, \dots, x'_{r(i-1)}, x_{ri}, x'_{r(i+1)}, \dots, x'_{rk}) \quad (60)$$

Se si pensa alla matrice M_1 come alla matrice dei *sample*, e alla M_2 come a quella dei *resample*, \hat{U}_i è ottenuto dal prodotto tra valori di g ottenuti dai *run* delle combinazioni della matrice di *sample* con quelli ottenuti per le combinazioni di N_i , cioè una matrice dove tutti i fattori ad eccezione di x_i sono stati ricampionati. In questo senso, il costo computazionale associato al calcolo di una stima completa dei soli indici di primo ordine M_2 vale $n(k+2)$. Un *set* di $2n$ *evaluation* della funzione g è richiesto per la stima di $E(y)$, ed k *set* di n *evaluation* è necessario per il secondo termine nell'espressione (60).

Analogamente a quanto ottenuto per gli indici di primo ordine, partendo dalle espressioni (44) e (52) e facendo riferimento a quanto mostrato da Homma e Saltelli (1995), è possibile riscrivere gli indici di sensitività totale in una forma simile a quella dell'espressione (57) ovvero

$$S_i^T = 1 - \frac{\hat{U}_{-i} - \hat{E}^2(y)}{V(y)} \quad (61)$$

in cui, per analogia a (60), il fattore \hat{U}_{-i} può essere espresso come

$$\hat{U}_{-i} = \frac{1}{n-1} \sum_{r=1}^n (f(x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rk}) f(x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{r(i-1)}, x'_{ri}, x_{r(i+1)}, \dots, x_{rk})) \quad (62)$$

In definitiva quindi, per la stima completa degli indici di primo ordine e totali, la strategia standard secondo Sobol, richiede $n(2k+2)$ *run*. La strategia di stima proposta da Saltelli (2002) permette di ottenere stime degli indici di primo ordine e di quelli totali al costo di $n(k+2)$

applicazioni, con un risparmio evidentissimo di circa il 50%. Per la dimostrazione del rispettivo teorema e per i relativi *test* di applicazione del metodo si rimanda a Saltelli, 2002.

10.2 Materiali

Come per la fase esplorativa descritta al capitolo 9, anche la SA è stata applicata al tratto di 7.5 km posto a valle dei ponti di Casarsa della Delizia tra le sezioni storiche 134 e 124 (Figura 62). Anche la serie idrometrica orario utilizzata è stata la medesima (9/4/2001 - 30/11/2002, Figura 63). Per il tratto si sono utilizzati i materiali e i dati indicati nella seguente Tabella 35.

Materiale	Tipologie di Informazioni ricavate e utilizzate durante la fase di lavoro
Ortofoto 2001	Margini alveo attivo e isole Presenza di argini, difese laterali e repellenti da inserire nel DEM iniziale e nel BEDROCK (A.1)
Foto aeree 2002	Margini alveo attivo e isole Margini dell'area bagnata a fine periodo (portata associata pari a circa 420 m ³ /s) Presenza di argini, difese laterali e repellenti da inserire nel DEM iniziale e nel BEDROCK (A.1)
DEM LIDAR 2001	DEM di partenza per le simulazioni con celle 2x2 ricampionato con celle di dimensioni 25 x 25

Tabella 37 - Descrizione dei dati di controllo disponibili ed utilizzati durante l'analisi di sensitività

10.3 Risultati

Come anticipato al capitolo 8, il numero estremamente elevato di variabili scelte per essere sottoposte ad analisi (in totale 12) ha richiesto che l'analisi fosse affrontata in due *step* successivi, come suggerito anche in Saltelli et al, 2000:

- *step 1* (metodo OAT di Morris) – analisi allargata a tutte le 12 variabili scelte. Analisi condotta applicando un metodo adatto per analisi preliminari di *screening* che ha permesso di individuare le variabili macroscopicamente più influenti da sottoporre al secondo *step*.
- *step 2* (metodo di Saltelli) – analisi di dettaglio applicata solo alle variabili evidenziate come principali nello *step 1*.

La descrizione di tutti i risultati riportata a seguire mantiene questa distinzione tra primo (10.3.1) e secondo *step* (10.3.2), separando risultati ed analisi.

10.3.1 SA1 – Analisi con il metodo OAT Morris

10.3.1.1 Creazione del DOE

Il primo *step* di SA è stato applicato ai parametri di modellazione di seguito brevemente descritti.

1. *lateral erosion rate* – rappresenta una costante moltiplicativa che influenza direttamente l'intensità dell'erosione laterale (si veda anche 6.7.1.4).

2. *number of passes for edge smoothing filter* – questo valore indica il numero di passaggi di *smoothing* con il quale la *routine* di erosione laterale determina il valore distribuito lungo i margini bagnati del gradiente laterale di erosione e del raggio di curvatura (si veda anche 6.7.1.4).
3. *lateral law* – il valore di questo fattore rappresenta la scelta tra due possibili leggi alla base del processo di erosione laterale. Le due relazioni sono del tutto simili, fatta eccezione per una costante moltiplicativa che soppesa la curvatura locale. Entrambe le leggi sfruttano il valore del gradiente laterale puntuale (“*edge value*”) che nel primo caso (*lateral law* = 0) viene usato direttamente quale indicatore della curvatura locale; nel secondo caso invece (*lateral law* = 1) viene usato indirettamente per ricavare il raggio di curvatura locale e da questo ancora la curvatura.
4. *max erode limit* – questa variabile specifica la massima quantità di sedimenti al fondo (espressa in spessore [m]) che può essere erosa o depositata in corrispondenza di una singola cella per ogni singola iterazione (si veda anche 6.7.1.3). Questo parametro previene instabilità causate da un’eventuale eccessiva quantità di materiale mobilitata fra celle adiacenti. Esso controlla anche il tempo di calcolo; per ogni iterazione infatti all’interno della *routine* “*erode*” richiamata direttamente nella *main* “*erodedepo*” viene verificato che la quantità movimentata sia minore della massima consentita; se questo non avviene si dimezza il tempo di calcolo finché il tempo di calcolo è maggiore del minimo imposto dalla variabile “*min time step*”.
5. *min time step* – tra le potenzialità di CAESAR particolare rilevanza riveste proprio la variabilità del tempo di calcolo (*time step*). Questo viene dinamicamente variato durante le elaborazioni per ottimizzare il calcolo e ottenere massimo dettaglio durante le fasi di forte attività morfologica e velocizzazione nelle eventuali fasi di scarso dinamismo. In questo processo dinamico riveste particolare importanza questo parametro che fissa proprio il valore minimo di calcolo.
6. *slope used to calc Tau (for erosion)* – anche questo parametro è associato alla scelta tra diverse leggi di processo, in questo caso relative al processo di erosione al fondo. I tre possibili valori corrispondono ai seguenti metodi:
 - *0 = Bedslope (original method)*: la quantità di sedimento da movimentare per ogni iterazione in ogni singola direzione è calcolata proporzionalmente al valore di pendenza del fondo nella medesima direzione.
 - *1 = Bedslope method 2*: il trasporto al fondo complessivo viene prima calcolato usando la massima pendenza esistente tra tutte le possibili direzioni, quindi viene ripartito in tutte le direzioni proporzionalmente al valore locale di pendenza .
 - *2 = Tau based on velocity*: calcola la quantità di trasporto in funzione del valore locale di sforzo di taglio, quindi ripartisce il sedimento in tutte le direzioni proporzionalmente alla portata liquida associata ad ogni direzione.
7. *min Q for depth calculation* – questo valore rappresenta una di soglia al di sopra della quale CAESAR calcola il tirante liquido associato alla singola cella. Se questo valore non viene adeguatamente fissato si rischia di perdere tempo nel calcolo di tiranti senza significato pratico (anche di frazioni di millimetro) che non causano nessuna forma di erosione o deposizione.

8. *water depth above which erosion can happen* – anche questo valore rappresenta una soglia, associata in questo caso al processo di erosione. Le celle che all'avvio della *routine* di erosione presentano tiranti inferiori a questo valore non vengono processate.
9. *flow distribution width* – questo parametro è legato al numero di celle interessate dallo schema cellulare ("*flow-sweeping*") di distribuzione delle portate liquide (si veda anche 6.7.1.2). Una sintetica spiegazione è riportata nella seguente Tabella 38.

Schema associato (singoli sweep di 4)					
<i>Flow distribution width</i>	0	1	2	3

Tabella 38 - Valori del parametro "*Flow distribution width*" e relativo schema di distribuzione all'interno di un singolo processo di *sweep* in una unica direzione

10. *trasporto in sospensione* – con questo parametro l'utente sceglie se includere tra i processi di trasporto simulati anche quello in sospensione. La scelta affermativa implica anche l'indicazione per ogni classe granulometrica definita come trasportabile in sospensione, l'associazione di un valore di velocità di sedimentazione. Nel caso in esame, la morfologia e la pezzatura media dei sedimenti sono tali da vincolare la scelta solo ad una classe granulometrica, la più piccola (Tabella 34), imponendo velocità di sedimentazione come da letteratura.
11. *formula di trasporto solido* – anche in questo caso la scelta ricade tra due leggi di processo; nello specifico si tratta delle leggi di trasporto al fondo di Einstein (1950) e Wilcock-Crowe (2003).
12. *vegetation critic shear* – si tratta del valore di resistenza al taglio opposto dalla vegetazione alla corrente. Se localmente lo sforzo di taglio è maggiore di questa soglia la vegetazione viene parzialmente scalzata, ovvero viene ridotto il fattore densità della matrice $veg[x,y,1]$ (si veda anche 6.7.1.6).

Per ogni parametro la scelta del *range* di esistenza e dei passi elementari è stata condotta facendo riferimento sia alle indicazioni fornite dal prof. Coulthard nel materiale disponibile sul proprio sito (<http://www.coulthard.org.uk/>), sia alle risultanze delle fase esplorativa (9). Nella seguente Tabella 39 è riportato un riepilogo delle caratteristiche dei 12 parametri.

Ordine di inserimento	Tipo di parametro	Nome parametro	Folder	Corrispondenti valori non numerici	Set di riferimento - Fase1.3	Range		n° livelli	Passo
						Min	Max		
1	di modellazione	<i>lateral erosion rate</i>	<i>Lateral erosion</i>		<i>0.01</i>	0.001	0.1	5	0.02475
2	di modellazione	<i>number of passes for edge smoothing filter</i>	<i>Lateral erosion</i>		<i>100</i>	0	200	5	50
3	concettuale	<i>lateral law</i>	<i>Lateral erosion</i>	0 = [erosion rate = 'edge value' * Tau * timestep * lateral erosion rate] 1 = [erosion rate = 1/radius of curvature * Tau * time step * lateral erosion rate]	<i>b</i>	0	1	2	1
4	di modellazione	<i>max erode limit</i>	<i>Numerical</i>		<i>0.05</i>	0.01	0.1	5	0.0225
5	di modellazione	<i>min time step [sec]</i>	<i>Numerical</i>		<i>0</i>	0	30	3	15
6	concettuale	<i>slope used to calculate Tau</i>	<i>Numerical</i>	0 = [Bedslope (original method)] 1 = [Bedslope method 2] 2 = [Tau based on velocity]	<i>2</i>	0	2	3	1
7	di modellazione	<i>min Q for depth calculation</i>	<i>Numerical</i>		<i>0.1</i>	0.05	0.15	5	0.025
8	di modellazione	<i>water depth above which erosion can happen</i>	<i>Numerical</i>		<i>0.01</i>	0.01	0.1	3	0.045
9	di modellazione	<i>flow distribution width</i>	<i>Numerical</i>		<i>5</i>	3	7	5	1
10	concettuale	<i>trasporto in sospensione</i>	<i>Sediment</i>	si - no	<i>si</i>	0	1	2	1
11	concettuale	<i>formula di TS</i>	<i>Sediment</i>	0 = formula di Wilcock and Crowe 1 = formula diEinstein	<i>0</i>	0	1	2	1
12	di modellazione	<i>vegetation critic shear</i>	<i>Vegetation</i>		<i>180</i>	0	300	5	75

Tabella 39 - Elenco dei 12 parametri analizzati durante il primo step sella SA effettuato adottando il metodo OAT di Morris

Per la creazione del DOE si è utilizzato il *package* “*sensitivity*” (Pujol, 2009) facente parte dell’ambiente di sviluppo **R** (<http://www.r-project.org/>), un linguaggio di programmazione nato per applicazioni statistiche e grafiche distribuito con licenza GNU-*software* libero (Venables et al, 2009). Il DOE è stato costruito impostando un valore di ripetizioni (10.1.2.1) r pari a 10 usando i *range* di esistenza e i passi di discretizzazione riportati in Tabella 39. L’applicativo *software* ha prodotto un campione di 130 combinazioni [= $r (k + 1) = 10 * (12 + 1)$ dove k = numero di fattori indagati = 12].

10.3.1.2 Risultati

Complessivamente le 130 simulazioni effettuate hanno impiegato un tempo macchina pari a 190 giorni, 9 ore e 50 minuti, un tempo davvero significativo che rivela immediatamente la grande variabilità e non linearità del modello in termini di velocità computazionale.

Per tutte le simulazioni effettuate sono stati valutati i seguenti indici di *performance*:

- F_w – *performance* area bagnata [A.3.2];
- F_e – *performance* associato al *pattern* erosivo-deposizionale [A.3.3];
- F_{vel} – *performance* computazionale del modello [A.3.7].

Performance area bagnata (F_w)

Questo indice di *performance* fornisce un’indicazione immediata del livello di corrispondenza tra l’estensione dell’area bagnata reale alla fine del periodo riprodotto e quella simulata dal modello, in un confronto *pixel-to-pixel* tra *output* del modello e stato della realtà. In linea con la definizione di indice di *performance* F_w descritta nel dettaglio in appendice (A.3), in questo caso specifico di analisi si è utilizzato come *raster* a descrizione dello “stato del reale” l’area bagnata digitalizzata dalla foto aerea del 30 novembre 2002 e convertita in *raster* (celle di dimensioni 25x25 m). Questo dato è stato confrontato in un processo *pixel-to-pixel* con l’*output* liquido del modello (file in formato ASCII “waterdepth.txt” – si veda Appendice A.2) corrispondente all’areale bagnato prodotto dal modello al termine di ogni simulazione. Nella seguente Figura 68 si riportano a scopo esemplificativo i risultati ottenuti per due simulazioni con valori di *performance* F_w molto differenti, rispettivamente del 74% (c-d) e del 17% (e-f).

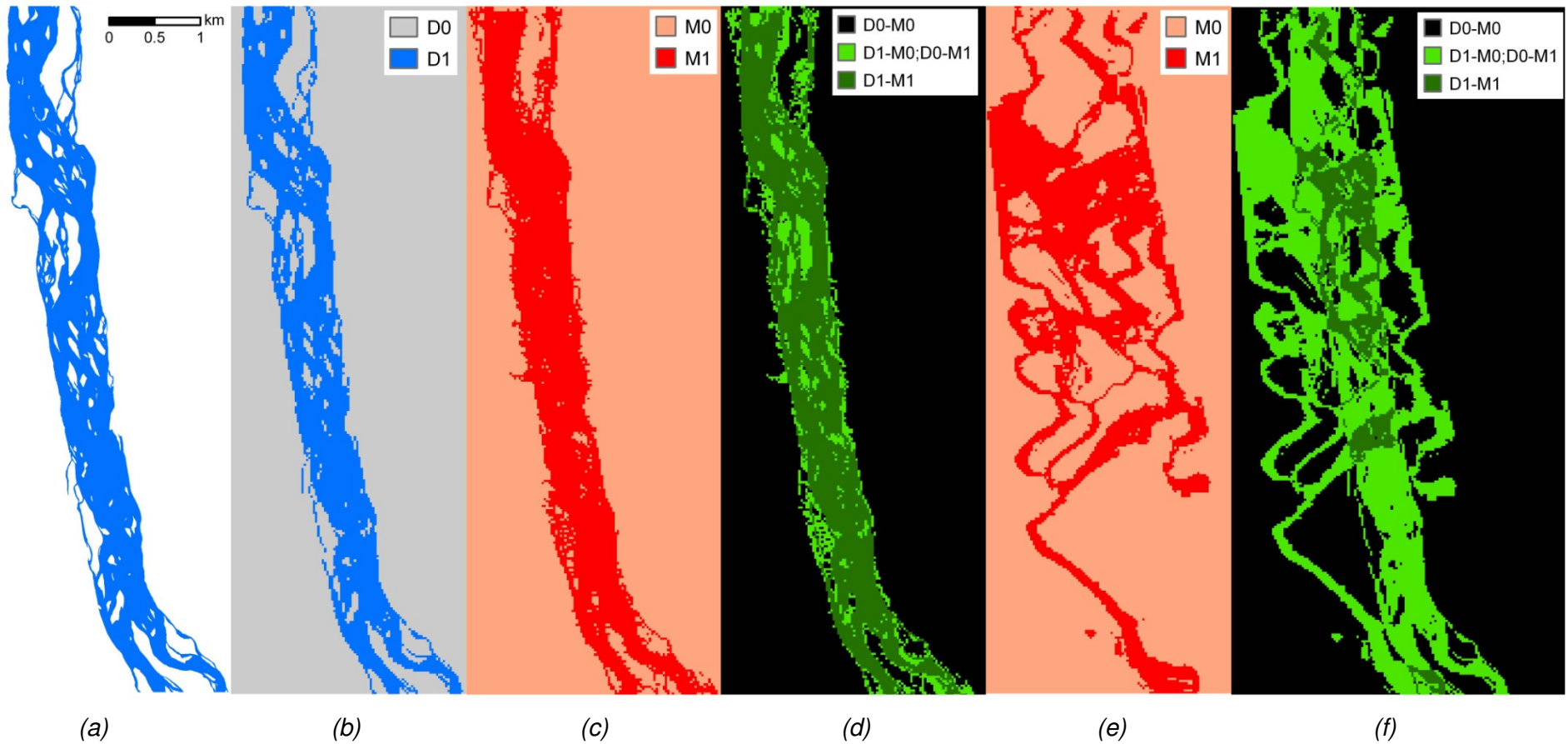


Figura 68 - Alcuni risultati di *performance* F_w della SA1 - metodo OAT di Morris: a) dato vettoriale (digitalizzazione foto 2002); b) rasterizzazione del vettoriale (a) in celle 25x25; c) *output* associato alla simulazione n.102 relativo all'area bagnata a fine simulazione; d) elaborazione di *overlay* tra (b) e (c) con *performance* associata pari al 75%; e) *output* associato alla simulazione n.91 relativo all'area bagnata a fine simulazione; d) elaborazione di *overlay* tra (b) e (e) con *performance* associata pari al 17%;

Performance erosivo-deposizionale (F_e)

La *performance* F_e permette di quantificare la corrispondenza *pixel-to-pixel* tra il *pattern* erosivo-deposizionale prodotto dal modello (*raster* “elev_diff.txt” prodotto in *output* da CAESAR, si veda anche l’Appendice A.2) e quello reale. Nella migliore delle ipotesi il “dato reale” corrisponde al risultato di una sottrazione tra un DEM a descrizione dello stato del fondo all’inizio del periodo simulato e l’equivalente rilevato a fine periodo (si parla in questi casi di DOD – *Difference of Dem*, Brasington 2000, Wheaton 2010). Nei casi in cui non si disponga di dati di questa qualità (come è in questo caso studio), la scelta può ripiegare su due alternative:

1. confronto altimetrico limitato a singole sezioni trasversali rilevate topograficamente;
2. confronto con *pattern* erosivo-deposizionali prodotti da altri modelli o simulazioni.

In questo caso specifico si è scelta l’opzione 2, ovvero il calcolo della *performance* F_e è stato effettuato utilizzando come dato di calibrazione “reale” il *pattern* erosivo-deposizionale associato ad un’altra simulazione. In particolare è stata scelta la simulazione che, tra quelle effettuate durante la fase di applicazione esplorativa (9), ha fornito le migliori prestazioni in termini di F_w . La scelta di considerare un dato di confronto non effettivamente reale ma solo “qualitativamente verosimile”, si giustifica proprio per il tipo di analisi di *screening* effettuata. L’OAT di Morris non punta a trovare la combinazione di parametri migliore (non è una calibrazione!), bensì costituisce una procedura che indaga la risposta relativa del modello ad incrementi elementari di specifiche variabili. Le SA di *screening* non cercano la combinazione che più di altre produce la massima e assoluta corrispondenza modello-realtà, bensì cercano di valutare qualitativamente le variazioni che il modello produce in risposta a specifici incrementi delle singole variabili considerate una alla volta. Le variazioni in quanto tali sono quindi relative, e la loro entità è messa a confronto con dati verosimilmente prossimi alla realtà di campo. La procedura di preparazione dei dati per il calcolo dei valori di *performance* F_e ha richiesto che le medesime elaborazioni fossero effettuate prima sul *raster* di riferimento e quindi sugli *output* di tutte simulazioni (“elev_diff.txt”). Per ogni cella di questi *raster* il valore di ΔZ è espresso in formato *float*, con 11 cifre decimali. Per fare il confronto tutti i *raster* sono stati riclassificati secondo le tabelle di conversione riportate nella seguente Tabella 40, mentre il file associato alla simulazione di riferimento è stato riclassificato secondo le classi riportate nella Tabella 41.

<i>Range</i> [m]	Valore di <i>reclass</i>	Descrizione
≤ -5	-1.000.000	Null
$-5 < x < -0.1$	-1	Deposizione
$-0.1 < x < 0.1$	0	Invariato
$0.1 < x < 5$	1	Erosione
$x > 5$	1.000.000	Null

Tabella 40 - Valori adottati per la riclassificazione dei *raster* “elev_diff.txt” associati a tutti i *run* eseguiti per la SA di Morris

<i>Range</i> [m]	Valore di <i>reclass</i>	Descrizione
$x < -0.1$	-100	Deposizione
$-0.1 < x < 0.1$	0	Invariato
$0.1 < x$	100	Erosione

Tabella 41 - Valori adottati per la riclassificazione del *raster* “elev_diff.txt” associato al *pattern* erosivo-deposizionale della simulazione di riferimento

La scelta dei valori di riclassificazione è stata condotta in modo che tutte le possibili combinazioni fossero univocamente identificate da un solo possibile valore. L’obiettivo principale della riclassificazione e della successiva somma algebrica *pixel-to-pixel* tra i *raster* rielaborati è

stato quello di distinguere per ogni simulazione le zone in concordanza di comportamento (erosione-erosione, deposizione-deposizione, equilibrio-equilibrio), da quelle in discordanza e applicare la formula (64) per il calcolo dell'indice di *performance* F_e (in questo caso *performance* relativa e non assoluta). La matrice delle possibili combinazioni risultanti è riportata in Tabella 42, con evidenziate in rosso le combinazioni di discordanza e in verde quelle di concordanza.

Descrizione	Valore di reclass	Deposizione	Invariato	Erosione
		-100	0	100
Null	-1.000.000	-1.000.100	-1.000.000	-999.900
Deposizione	-1	-101	-1	99
Invariato	0	-100	0	100
Erosione	1	-99	1	101
Null	1.000.000	-999.900	1.000.000	1.000.100

Tabella 42 - Possibili combinazioni dei valori associati al *raster* di somma algebrica (in rosso le combinazioni in discordanza, in verde quelle in concordanza di comportamento)

Associando ad ognuna delle 130 simulazioni effettuate in questo contesto di analisi un valore di *performance* F_e , si è costituito un campione di valori che è stato analizzato secondo le tecniche proprie del metodo di Morris descritte nel sottocapitolo successivo (10.3.1.3). Nella seguente Figura 109 sono riportati a scopo esemplificativo i risultati ottenuti per due simulazioni con valori di *performance* F_e molto differenti, rispettivamente del 45% (c-d) e del 2% (e-f).

Performance computazionale (F_{vel})

L'ultimo indice di *performance* calcolato per le 130 simulazioni effettuate nell'ambito di questo primo *step* dell'analisi di sensitività è quello della velocità computazionale delle simulazioni. Nella formula utilizzata per il calcolo dell'indice (equazione (67), appendice A.3.7) è stato utilizzato il numero minimo di iterazioni riscontrato per la simulazione n. 128 pari a 12,223.

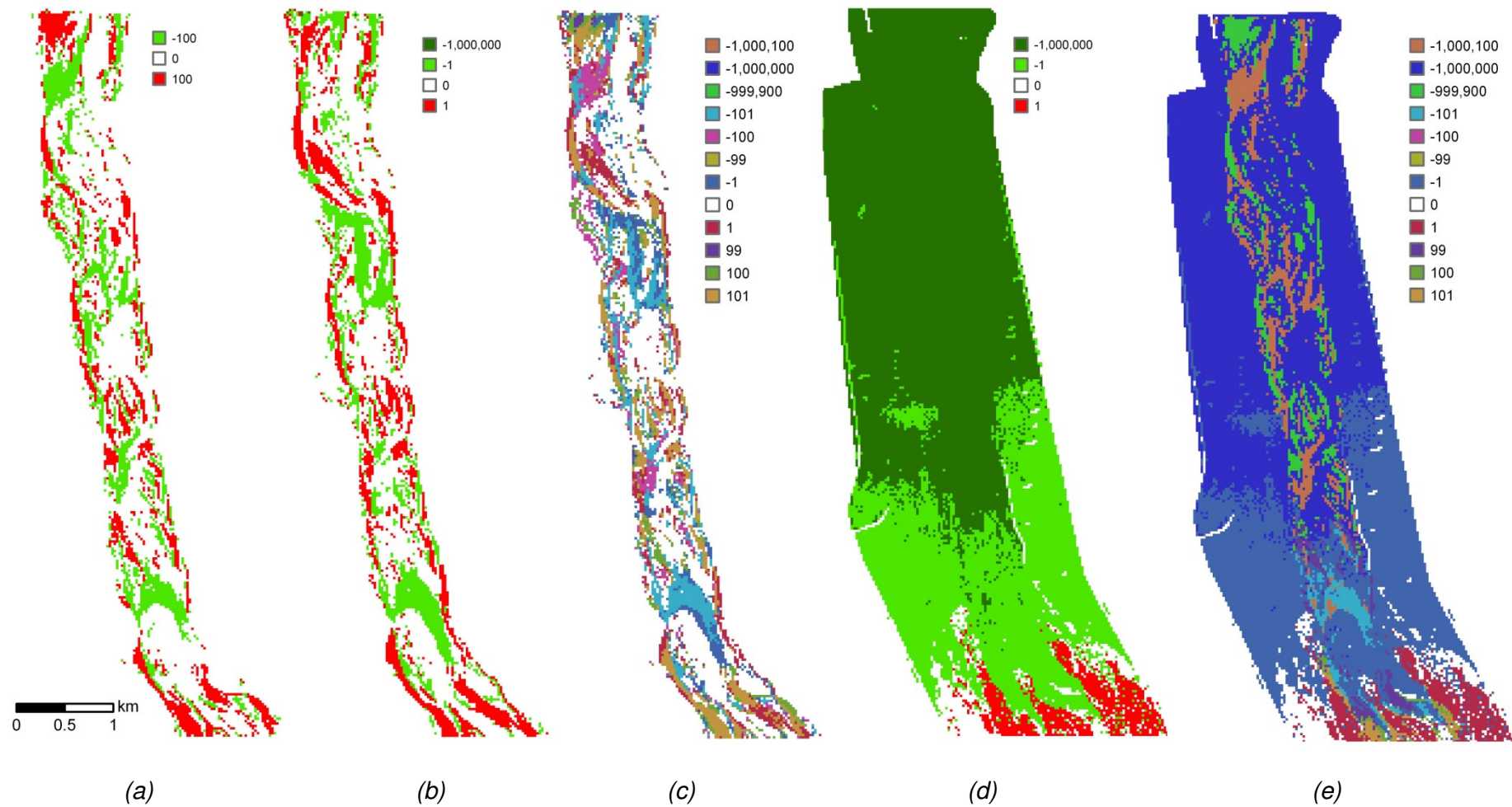


Figura 69 - Alcuni risultati di *performance* F_e della SA1 - metodo OAT di Morris: a) *raster* con celle 25x25 ottenuto dal file “elev_diff.txt” caratterizzante il *pattern* erosivo-deposizionale della simulazione di riferimento; b) *raster* di *output* relativo alla simulazione n.52; c) elaborazione di *overlay* tra (a) e (b) con *performance* associata pari al 45%; d) *raster* di *output* relativo alla simulazione n.69; e) elaborazione di *overlay* tra (a) e (d) con *performance* associata pari al 2%;

10.3.1.3 Analisi

L'analisi dei i valori degli indici di *performance* (F_w , F_e , F_{vel}) associati a tutte le 130 simulazioni ha permesso di costituire un campione formato da 120 elementi cosiddetti "effetti elementari" (38). Per ognuna delle 12 variabili indagate si è costituito così un campione di numerosità pari a r (= numero di ripetizioni = 10). L'analisi statistica descrittiva di questi campioni fornisce per ogni variabile e per ogni indice di *performance* un valore medio e uno di deviazione standard. Un quadro di sintesi di questi risultati è riportato nella seguente Tabella 43.

Parametri analizzati	F_w Performance area bagnata		F_e Performance erosione-deposizione		F_{vel} Performance velocità computazionale	
	media	dev.stand	media	dev.stand	media	dev.stand
1 - laterale.erosion.rate	0.0303	0.1030	0.0269	0.0338	0.0209	0.2277
2 - pass.lat.smooth	0.2020	0.3453	0.0706	0.1523	0.1387	0.3845
3 - lateral.law	0.0844	0.1531	0.0612	0.0858	0.0346	0.0723
4 - max.ero.de.limit	0.2989	0.5421	0.0538	0.1651	0.9978	1.2225
5 - min.time.step	0.0038	0.0559	0.0066	0.0346	0.0257	0.0859
6 - slope.rule.Tau	0.2034	0.3641	0.1107	0.1355	0.0741	0.2704
7 - min.Q	0.0165	0.1316	0.0009	0.0407	0.0600	0.2815
8 - water.for.erosion	0.0399	0.0929	0.0152	0.0843	0.0302	0.1522
9 - cell.flow.distr	0.2127	0.5510	0.0090	0.1898	0.0144	0.4333
10 - TSS	0.0030	0.1131	0.0109	0.0694	0.0327	0.1823
11 - formulaTS	0.0723	0.2226	0.0164	0.0939	0.4713	0.3626
12 - veg.crt.shear	0.0860	0.0971	0.0359	0.0308	0.3331	0.5471

Tabella 43 - Statistiche descrittive dei valori di effetto elementare per ognuno dei parametri oggetto dell'analisi SA1 condotta applicando il metodo OAT di Morris

Una metodo grafico più sintetico per rappresentare le risultanze della SA di Morris è costituito dai cosiddetti "scatter plot", riportati nella seguente in Figura 70 e dai "box plot" riportati di seguito per ciascuno dei 12 fattori analizzati.

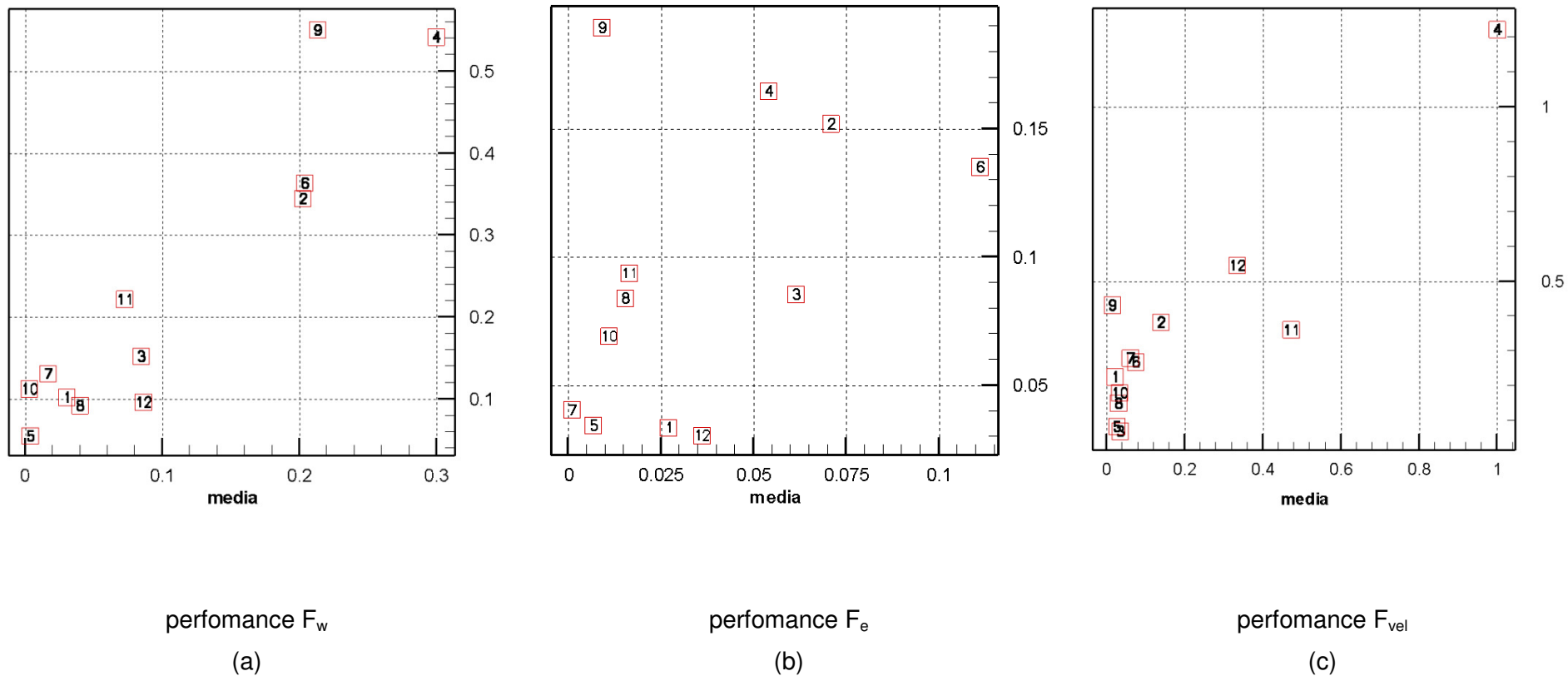
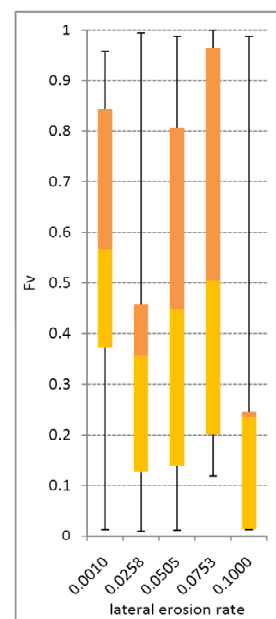
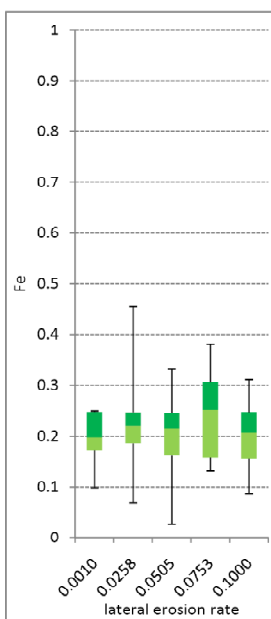
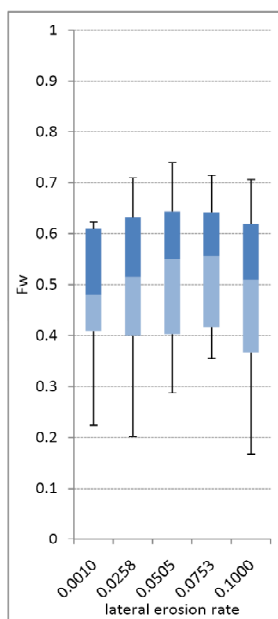


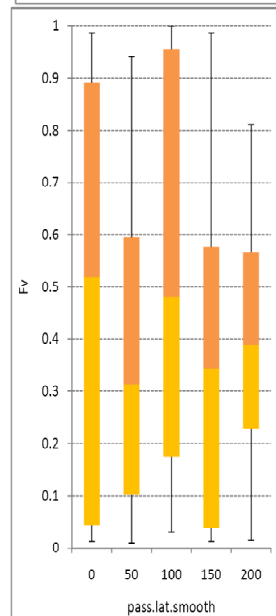
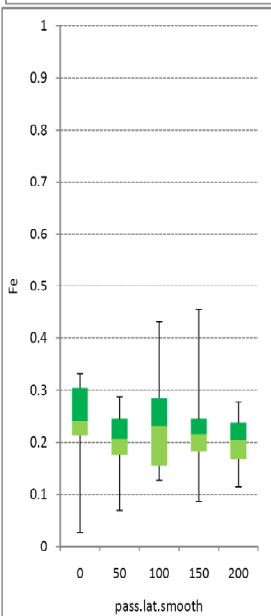
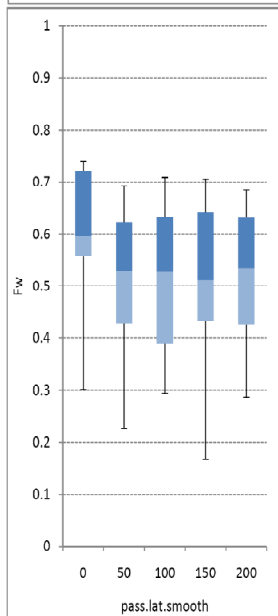
Figura 70 - Scatter plot costruiti a partire dai valori di varianza e media associati agli effetti elementari risultanti per gli indici di performance F_w (a), F_e (b) e F_{vel} (c) analizzati nell'ambito del primo step dell'analisi di sensitività SA1 condotta adottando il metodo OAT di Morris

Tabella 44 - Descrizione statistica tramite *box-plot* dei risultati ottenuti con il metodo di Morris per tutti i 12 fattori analizzati

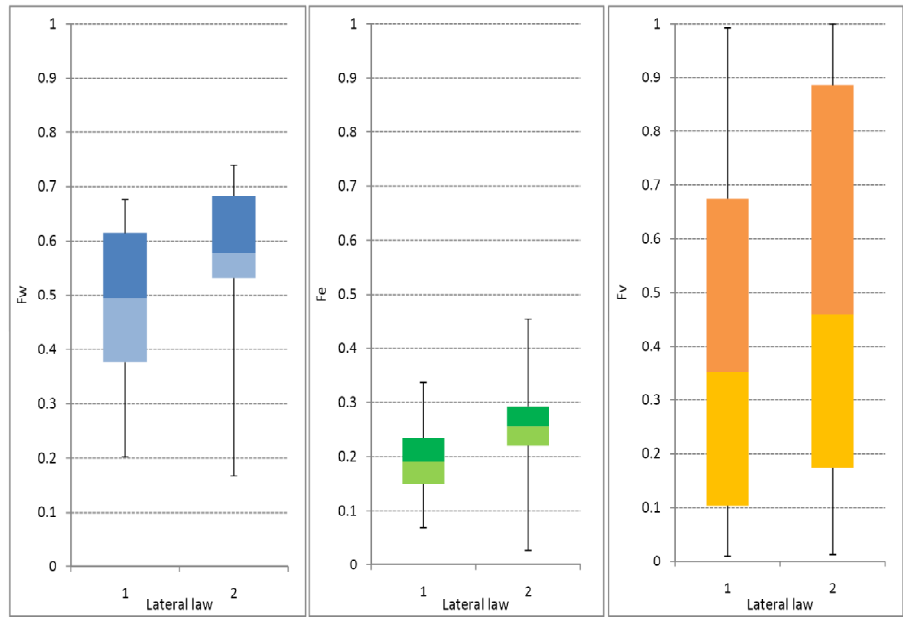
1-lateral.erosion.rate



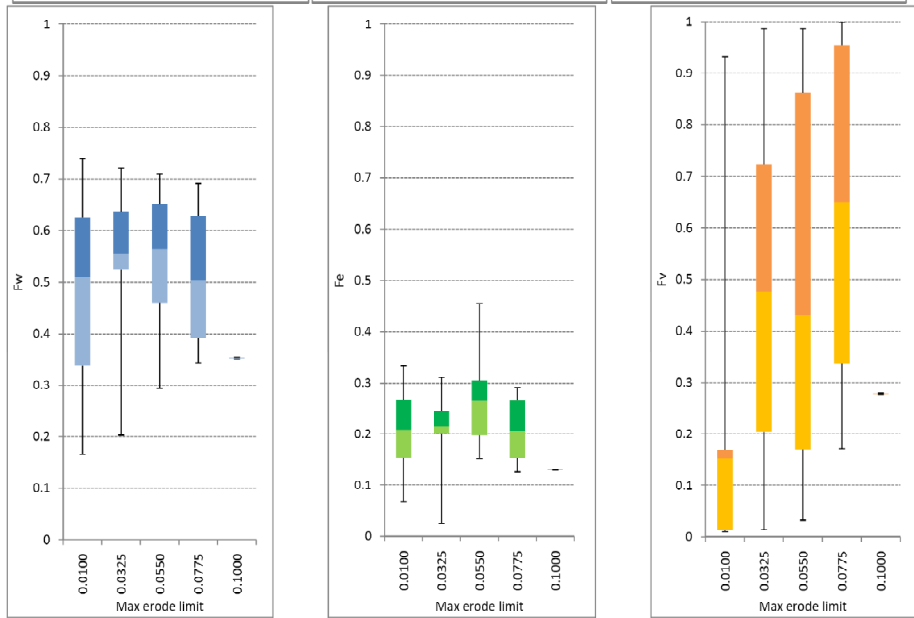
2-pass.lat.smooth



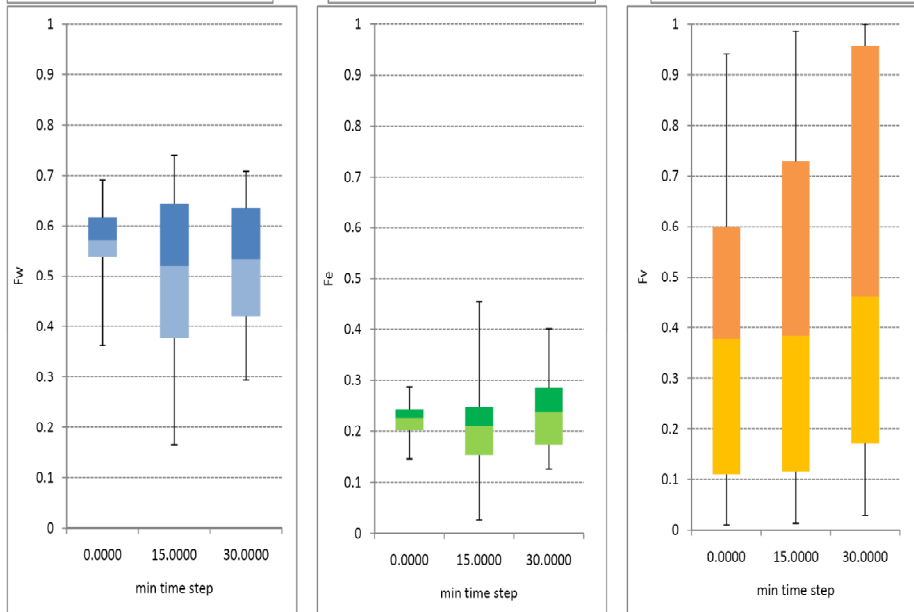
3 - lateral.law



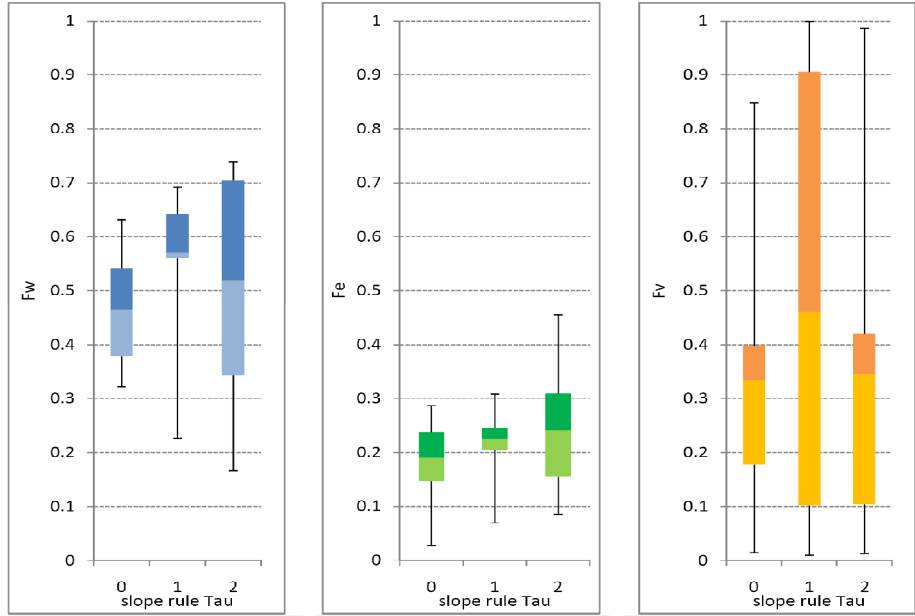
4 - max erode limit



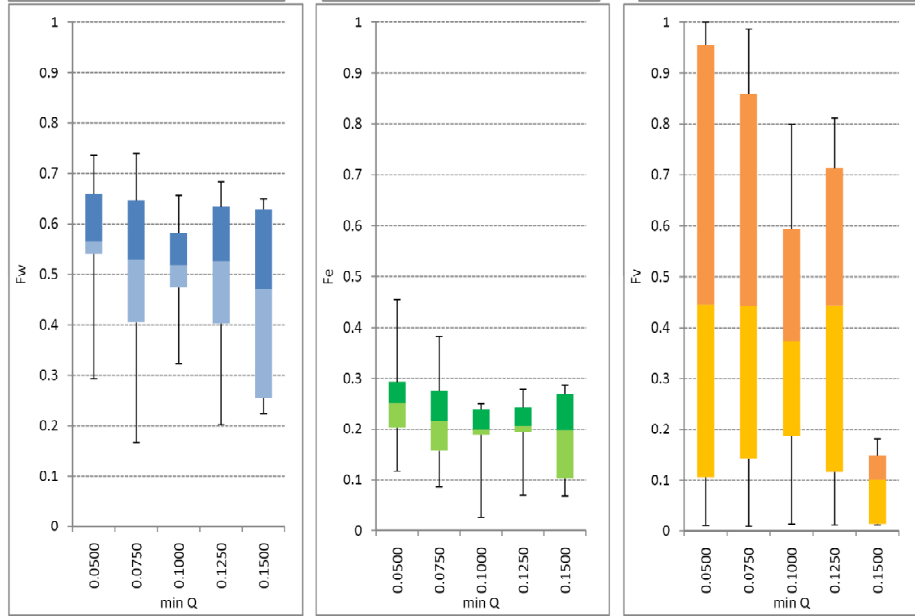
5 - min time step



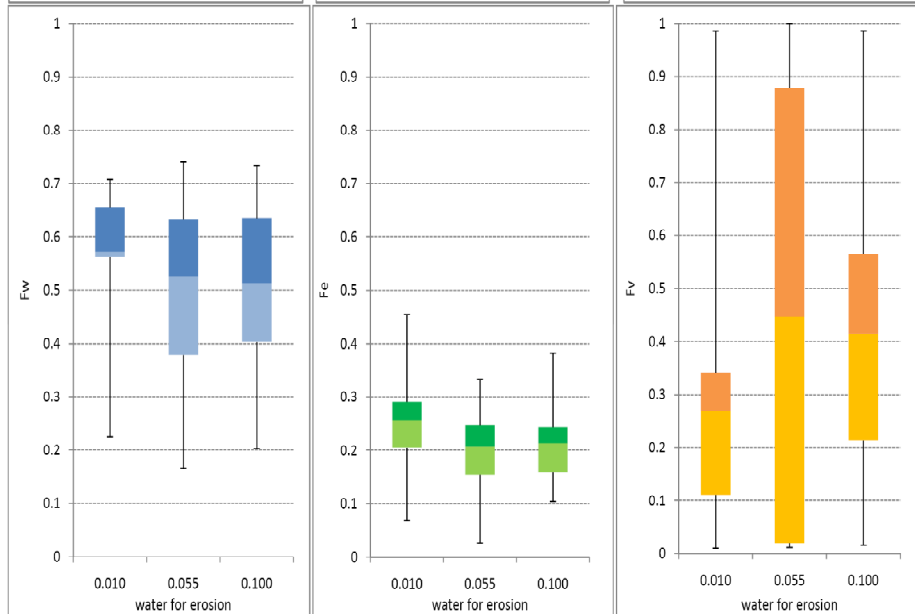
6 – slope rule Tau



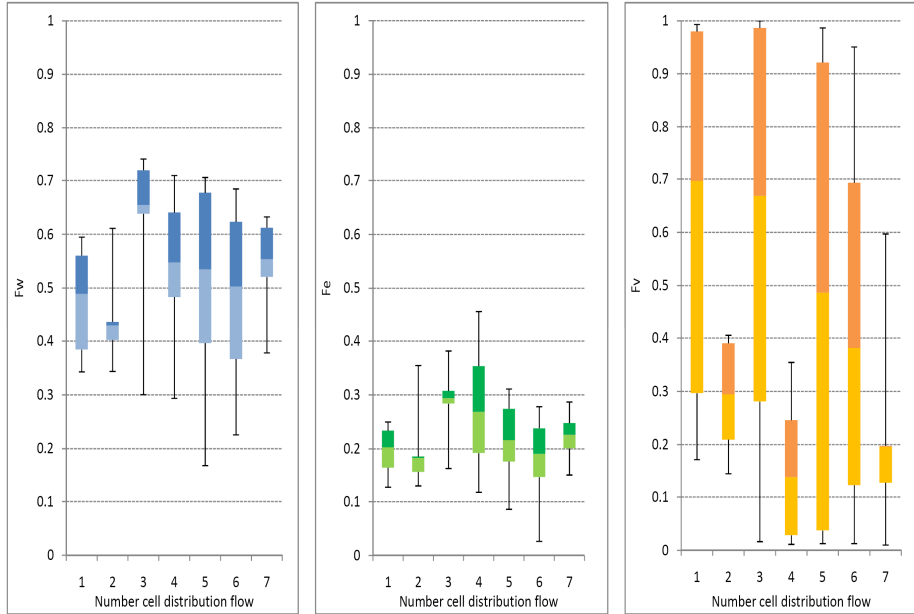
7 – min Q



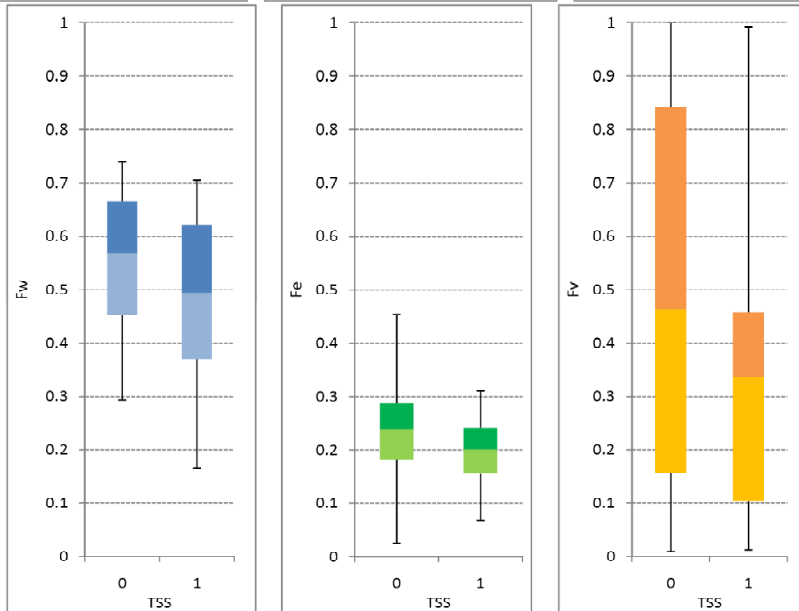
8 – water for erosion



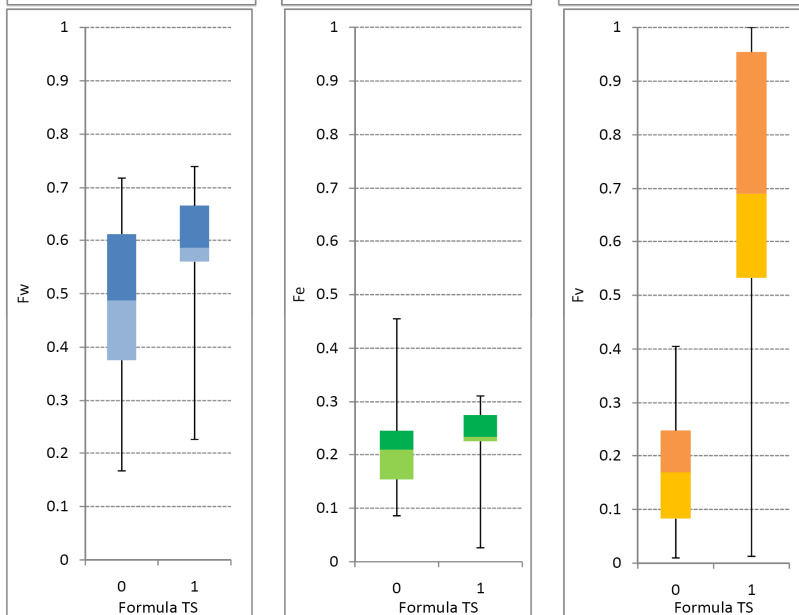
9 – number cell flow distribution



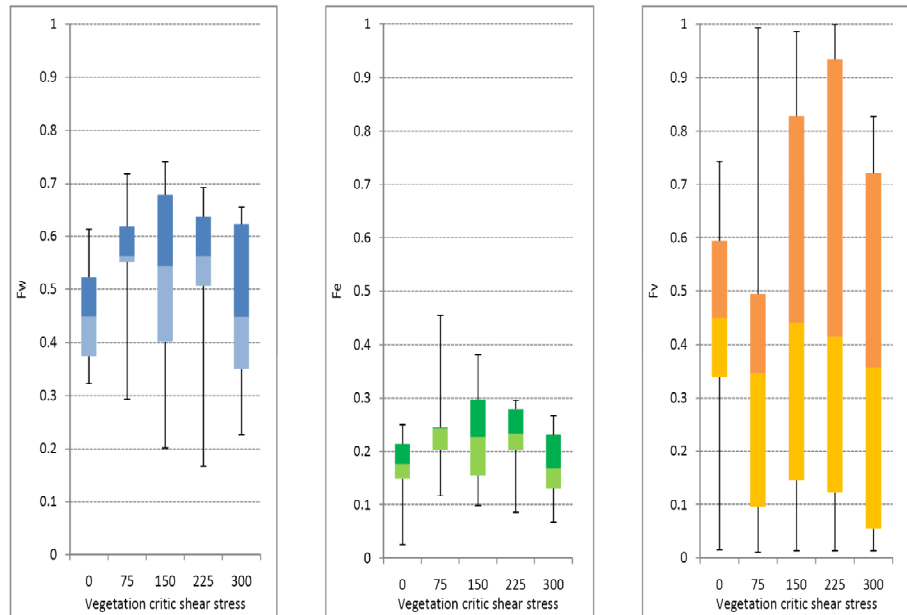
10 – TSS (trasporto solido in sospensione)



11 – Formula di trasporto solido al fondo



12 – Vegetation critic shear stress



Come anticipato al sottocapitolo 10.1.2.1 l'analisi qualitativa di *screening* si fonda su due considerazioni principali:

- (i) un valore elevato di media campionaria associato all'effetto elementare dell'*i*-esimo fattori tra i *k* fattori analizzati indica che quel fattore ha un'influenza significativa sull'*output* del modello;
- (ii) un valore elevato di deviazione standard associato all'effetto elementare dell'*i*-esimo fattore tra i *k* fattori analizzati è indice che il modello manifesta una risposta che varia sensibilmente in funzione del valore assunto dall'*i*-esimo fattore, ovvero esiste un legame di non-linearità tra l'*output* del modello e il fattore stesso.

Ne discende che in questa fase di valutazione di *screening* l'osservazione del solo valore medio può ritenersi significativa per ricavare indicazioni generali di significatività, mentre il solo valore di deviazione standard può essere utilizzato come fattore discriminante per la scelta della tipologia di SA di secondo livello. In questo senso valori elevati di deviazione standard devono indurre a scegliere metodi di analisi di secondo livello adatti anche per modelli non lineari e non additivi.

Dall'osservazione separata degli *scatter plot* per ogni fattore di *performance* in Figura 70 si sono tratte le seguenti valutazioni:

F _{vel}	<p>Fatta eccezione per i fattori 2, 4, 11 e 12, la velocità di calcolo risulta generalmente poco influenzata dalle variabili considerate. Questa scarsa significatività ha comunque un carattere mediamente di forte non linearità.</p> <p>Si distinguono nettamente per importanza i fattori 2, 12, 11, 4, tutti al tempo stesso fortemente non lineari nel manifestare la loro influenza</p>
F _e	<p>Si possono distinguere due macrogruppi ed un'eccezione. I fattori 2,3,4,6 sono raggruppabili in quanto unici ad influenzare in modo apprezzabile questo tipo di <i>performance</i>, per di più senza carattere di linearità. Tutti gli altri hanno medie troppo basse per poter essere considerati significativi. Tra tutti questi fattori a "basso impatto" il 9 costituisce un'eccezione, in quanto manifesta effetti elementari mediamente trascurabili ma fortemente variabili.</p>
F _w	<p>I fattori appaiono distribuiti lungo la retta bisettrice del primo quarto, ovvero mediamente i fattori manifestano un effetto sull'<i>output</i> F_w che è al tempo stesso tanto maggiore quanto variabile e quindi non lineare.</p> <p>Fra i fattori particolarmente importanti spiccano il 2, 4, 6 e 9.</p>

Tabella 45 - Sintesi della valutazioni discendenti dall'osservazione dei risultati dell'analisi di Morris

Volendo costruire classifiche di importanza per i fattori indagati, tralasciandone temporaneamente la variabilità (di interesse in seconda battuta per la scelta della tecnica di SA di secondo livello), si possono ottenere i valori di *rank* (importanza) riportati nella seguente

Tabella 46 Tabella 46 e graficati in Figura 71.

1			2			3			4		
fattore	formula di calcolo del punteggio: Fw+Fe+Fv	rank (1)	fattore	formula di calcolo del punteggio: Fw+Fe	rank (2)	fattore	formula di calcolo del punteggio: Fw+Fv	rank (3)	fattore	formula di calcolo del punteggio: 0.5Fw+0.25Fe+0.25Fv	rank (4)
4	9.7669	1	6	5.1238	1	4	8.2233	1	4	5.0887	1
6	5.5221	2	4	4.4063	2	11	3.2248	2	6	3.3410	2
2	4.7054	3	2	3.9603	3	2	2.6792	3	2	3.1270	3
11	3.6945	4	3	2.5644	4	12	2.6129	4	9	2.6204	4
12	3.6436	5	9	2.2944	5	6	2.3456	5	12	2.0284	5
3	2.7502	6	12	1.8540	6	9	2.1139	6	11	1.9431	6
9	2.3717	7	11	1.1624	7	3	0.9942	7	3	1.7939	7
1	1.1750	8	1	1.0627	8	8	0.5439	8	8	1.0315	8
8	0.9811	9	8	0.8189	9	7	0.4809	9	1	1.0116	9
10	0.5178	10	10	0.3418	10	1	0.4028	10	7	0.7455	10
7	0.5069	11	5	0.2265	11	10	0.2042	11	10	0.6507	11
5	0.3647	12	7	0.1845	12	5	0.1742	12	5	0.6182	12

fattore	Sommatoria dei rank	importanza
4	5	1
6	10	2
2	12	3
11	19	4
12	20	5
9	22	6
3	24	7
8	34	8
1	35	9
10	42	10
7	42	11
5	47	12

Tabella 46 - Classifica di significatività dei fattori ottenute analizzando i risultati emerse dal metodo di Morris

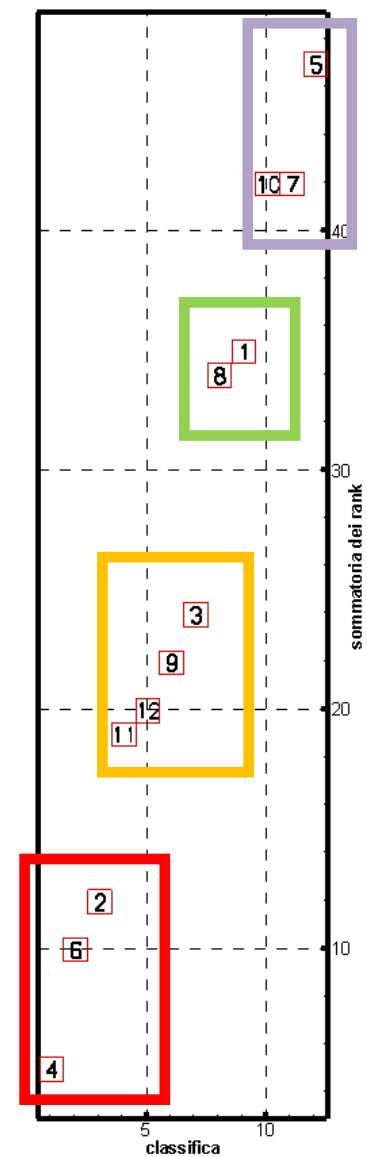


Figura 71 - Rank e raggruppamenti dei fattori analizzati con il metodo di Morris

Si possono distinguere quattro gruppi di rank importanza riportati nella seguente Tabella 47, Alta-Media-Bassa-Trascurabile. I fattori che sono risultati più rilevanti per la rispettiva influenza sull'*output* sono i fattori 4 (max erode limit), 6 (slope rule Tau) e 2 (pass.lat.smooth).

Rank	fattore	Nome del fattore
Alta	4	<i>max erode limit</i>
	6	<i>slope rule Tau</i>
	2	<i>pass.lat.smooth</i>
Media	11	formula di trasporto solido al fondo vegetation
	12	<i>critic shear stress</i>
	9	<i>number cell flow distribution</i>
	3	<i>lateral.law</i>
Bassa	1	<i>lateral.erosion.rate</i>
	8	<i>water for erosion</i>
Trascurabile	10	TSS (trasporto solido in sospensione)
	7	<i>min Q</i>
	5	<i>min time step</i>

Tabella 47 - Risultati del primo step dell'analisi di sensitività condotta applicando il metodo OAT di Morris

La classifica finale (si veda la colonna "importanza" in Tabella 46) è stata elaborata sommando i fattori di *rank* relativi a 4 differenti forme di significatività che hanno preso in considerazione in vario modo gli indici di *performance* ottenuti. In particolare il *rank 1* discende da un'equiparazione di importanza dei valori di *performance* ($rank\ 1 = F_w + F_e + F_v$); gli altri valori (*rank 2-4*) cercano invece di valutare la significatività generale spostando l'attenzione in modo particolare sul fattore ritenuto più rappresentativo per questo contesto applicativo di *screening*, ovvero la *performance* F_w (*performance* area bagnata). Questo spiega perché i *rank 2* e *3* prendono in considerazione sempre il valore di F_w e alternativamente quelli di F_v e F_e ; lo stesso criterio giustifica i diversi pesi attribuiti ai valori di *performance* per il calcolo del *rank 4* (0.25 per F_e e F_v , 0.5 per F_w).

10.3.2 SA2 – Analisi con il metodo di Saltelli

10.3.2.1 Creazione del DOE

La scelta di adottare un metodo di analisi completo come quello di Saltelli (2002) e non un metodo basato sulla regressione lineare è discesa proprio dalle risultanze della precedente analisi di Morris. Gli *scatter plot* in Figura 70 mostrano chiaramente che per tutti gli indici di *performance* considerati sono numerosi i fattori con valori di deviazione standard degli effetti elementari non trascurabili; inoltre i valori più significativi di deviazione standard campionaria si registrano proprio per i fattori di maggiore significatività (Tabella 46). Tra i metodi completi la scelta è ricaduta su quello di Saltelli sia per la relativa semplicità concettuale di base, sia per la disponibilità di pacchetti *software* messi a disposizione sia dagli sviluppatori del software **R**, sia da un gruppo di ricercatori del JRC – IPSC (Joint Research Centre - Institute for the Protection and the Security of the Citizen) di Ispra (Varese) attraverso il sito <http://sensitivity-analysis.jrc.ec.europa.eu>. Le risultanze dell'analisi di screening di cui al sottocapitolo precedente hanno permesso di compiere determinate scelte all'avvio della SA di secondo livello. Innanzitutto sono state scartate le variabili che la SA di Morris ha mostrato essere palesemente poco significative sull'*output* di CAESAR (fattori 5, 7 e 10). Per queste variabili sono stati fissati valori ricavati dai *box plot* riportati in Tabella 44, ovvero si sono scelti i valori che hanno dato le migliori prestazioni in termini soprattutto di velocità di calcolo e di *performance* sul fattore F_w . Un altro criterio adottato per la scelta delle variabili è stato più semplicemente quello di non proseguire l'analisi dei fattori con un dominio di esistenza formato da valori discreti e poco numerosi. Questi due criteri hanno necessariamente ristretto il campo per una possibile indagine di dettaglio di secondo livello come evidenziato nella seguente Tabella 48.

Rank	fattore	Nome del fattore
Alta	4	max erode limit
	6	slope-rule-Tau
	2	pass.lat.smooth
Media	11	formula di trasporto solido al fondo
	12	vegetation critic shear stress
	9	number-cell-flow-distribution
	3	lateral.law
Bassa	1	lateral.erosion.rate
	8	water for erosion
Trascurabile	10	TSS (trasporto solido in sospensione)
	7	min cl
	5	min time step

Tabella 48 - Fattori analizzabili con dettaglio nella SA di secondo livello

La scelta, sulla base dei criteri sopra esposti, è stata quindi indirizzata verso i 5 fattori evidenziati in giallo in Tabella 48, per i quali si è proceduto nella creazione del DOE. Contestualmente all'analisi di Morris tutte le combinazioni sono state create prima di avviare l'analisi vera e propria avendo scelto a priori il numero di ripetizioni ($k = 10$); di conseguenza la dimensione del DOE è stata fissata all'avvio dell'analisi. Diversamente, nel caso dell'analisi di Saltelli il DOE è stato creato contestualmente all'avanzamento dell'analisi in funzione del grado di convergenza del metodo a stime accettabili degli indici principali ricercati. Complessivamente sono state effettuate 246 simulazioni organizzate in tre differenti stadi di avanzamento descritti nella seguente Tabella 49.

Stadio	Cumulata delle simulazioni	Numero di simulazioni effettuate per ogni singolo stadio	Durata complessiva dei run	
1	71	71	11g 9h 54 min	
2	148	77	33gg 4h 18min	
3	246	98	18gg 5h 49min	
			62gg 20h 1min	TOTALE

Tabella 49 - Caratteristiche del DOE creato per la SA2 condotta adottando il metodo di Saltelli

10.3.2.2 Risultati

Gli indici di *performance* utilizzati per l'analisi di Satelliti sono stati solo in parte i medesimi dell'OAT di Morris. La *performance* computazione (F_{vel}) e quella associata all'area bagnata (F_w) sono state mantenute; la *performance* erosivo-deposizionale è stata invece sostituita da un indice (F_{sez}) simile per concezione (si veda l'appendice A.3.5) ma associato a dati di erosione-deposizione reali ricavati dal confronto tra DEM-LIDAR 2001 e sezioni topografiche 2003. E' stato aggiunto infine un altro indice di *performance* associato alla valutazione della copertura vegetazionale (F_{veg} - si veda l'appendice A.3.4). Gli indici F_{sez} e F_{veg} sono stati aggiunti in considerazione il primo del livello di maggior approfondimento dell'analisi in questo secondo *step* (non più solo *screening*) che non ammette più valutazioni relative (10.1.4), mentre il secondo in previsione dell'applicazione di questo stesso indice anche per le fasi successive di calibrazione e validazione (11).

In definitiva gli indici considerati per questa seconda analisi di sensitività sono stati i seguenti:

- F_{vel} - *performance* di velocità computazionale [A.3.7].
- F_w - *performance* associata all'area bagnata [A.3.2];
- F_{veg} - *performance* associata alla copertura vegetazionale [A.3.4];
- F_{sez} - *performance* altimetrica [A.3.5].

Performance vegetazionale F_{veg}

Per il calcolo di questo indice di *performance* si è utilizzato come dato di riferimento la copertura vegetale digitalizzata su foto aeree del 30 novembre 2002 (Tabella 33). Sono state classificate come "vegetate" tutte le aree interessate da copertura arboreo-arbustiva, escludendo quindi le aree più attive con tracce di vegetazione poco sviluppata o poco densa in linea con le assunzioni espresse al sottocapitolo 3.1.2. La classificazione è stata facilitata oltreché dalla conoscenza approfondita del tratto, anche dalle condizioni di copertura vegetale al momento del volo aereo (stagione autunnale). Anche in questo caso il dato vettoriale prodotto dalla digitalizzazione è stato rasterizzato a celle 25x25 m e confrontato per ogni simulazione con l'*output* di CAESAR rappresentativo della copertura vegetale modellata ("vegetation.txt" – si veda Appendice A.2) elaborato secondo gli schemi illustrati in appendice (A.3.4).

Per il calcolo di questo indice si sono apportate alcune modifiche al codice sorgente di CAESAR; queste modifiche hanno consentito di

- fornire in *input* il dato di copertura vegetale ad inizio simulazione (dato 2001 ricavato da ortofoto 2001 - Tabella 33);

- fornire in *output* la stessa tipologia di dato al termine della simulazione in formato *raster* (“vegetation.txt” - Appendice A.2).

Nella seguente Figura 72 si riportano a scopo esemplificativo i risultati ottenuti per due simulazioni con differenti valori di *performance*, rispettivamente del 75% (c-d) e del 90% (e-f).

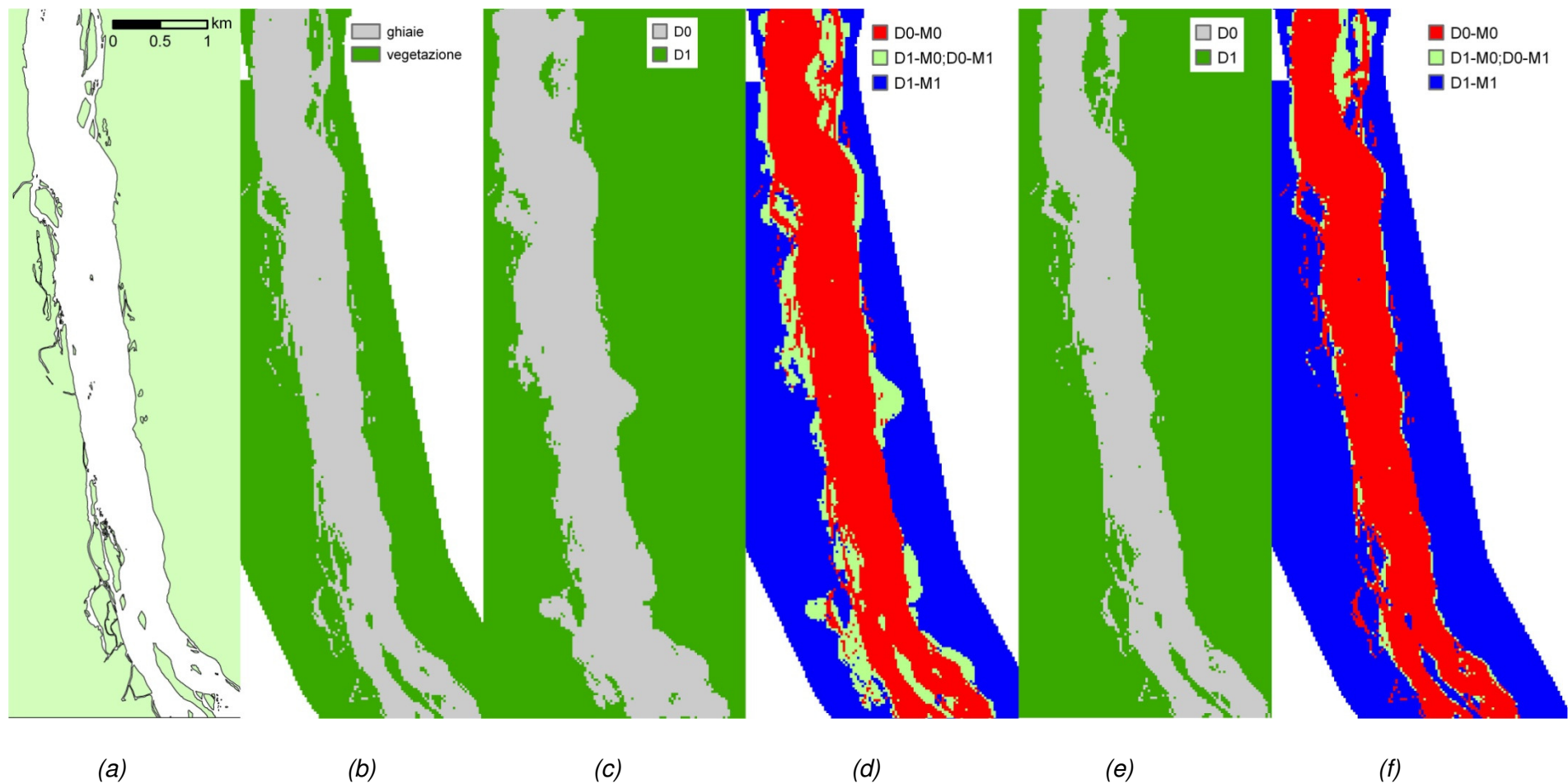


Figura 72 - Alcuni risultati di $performance F_{veg}$ della SA2 - metodo di Saltelli: a) dato vettoriale di copertura vegetale (digitalizzazione foto 2002); b) rasterizzazione del vettoriale (a) in celle 25x25; c) *output* associato alla simulazione n.88 relativo all'area occupata da vegetazione a fine simulazione; d) elaborazione di *overlay* tra (b) e (c) con *performance* associata pari al 75%; e) *output* associato alla simulazione n.91 relativo all'area occupata da vegetazione a fine simulazione; d) elaborazione di *overlay* tra (b) e (e) con *performance* associata pari al 90%;

Performance altimetrica F_{sez}

Al pari dell'indice di *performance* erosivo-deposizionale (F_e), anche l'indice F_{sez} è stato pensato per valutare la risposta di CAESAR in termini altimetrici. In questo caso però il dato di confronto per valutare la bontà delle risultanze del modello è stato creato utilizzando misure reali di variazione del fondo elaborato confrontando DEM 2001 e rilievi 2003. Questo dato reale di riferimento è stato costruito attraverso una serie di passaggi ed elaborazione così descritti:

- nel tratto in oggetto sono disponibili n. 8 sezioni topografiche rilevate nel maggio del 2003 (si veda sottocapitolo 7.4). Per tutti i punti del rilievo 2003 è stato estratto dal DEM LIDAR dell'aprile 2001 (DEM non ancora sottoposto a *resample* quindi ancora con massimo dettaglio - dimensione delle celle 2x2 m) il valore di quota di fondo relativo al momento di avvio della simulazione (Z_{2001}).
- per ogni punto è stata calcolata la differenza di quota (ΔZ_{reale}) calcolata sottraendo la quota del rilievo topografico 2003 (Z_{2003}) a quella dal DEM 2001 (Z_{2001}).
- si sono quindi scartati i punti battuti nel 2003 ma ricadenti nel 2001 in aree bagnate (il DEM 2001 è prodotto da rilievo LIDAR quindi il fondo in aree bagnate è palesemente errato – per la distinzione dei punti in area bagnata si sono utilizzate le ortofoto 2001 effettuate in concomitanza con il rilievo LIDAR).
- il dato vettoriale puntuale con i valori associati ΔZ_{reale} è stato convertito in formato *raster* (celle 25x25 m) e quindi sottoposto a *reclass* secondo i *range* riportati nella seguente Tabella 50.

Range [m]	Valore di reclass	Descrizione
$\Delta Z_{reale} < -0.1$	1	Erosione
$-0.1 < \Delta Z_{reale} < 0.1$	0	Invariato
$\Delta Z_{reale} > 0.1$	-1	Deposizione

Tabella 50 - Valori adottati per la riclassificazione raster $\Delta Z_{2001-2003}$ utilizzato per la SA2 condotta applicando il metodo di Saltelli

Una volta elaborato il dato di riferimento per tutte le simulazioni si è effettuata la stessa procedura descritta per l'indice di *performance* F_e elaborato durante l'analisi di Morris (si veda sottocapitolo 10.3.1.2). I file in formato ASCII prodotti da CAESAR per ogni simulazione ("elev_diff.txt") contenenti per ogni cella il valore di $\Delta Z_{simulazione}$, sono stati riclassificati secondo la seguente tabella di conversione.

Range [m]	Valore di reclass	Descrizione
$\Delta Z_{simulazione} \leq -5$	-1.000.000	Null
$-5 < \Delta Z_{simulazione} < -0.1$	-1	Deposizione
$-0.1 < \Delta Z_{simulazione} < 0.1$	0	Invariato
$0.1 < \Delta Z_{simulazione} < 5$	1	Erosione
$\Delta Z_{simulazione} > 5$	1.000.000	Null

Tabella 51 - Valori adottati per la riclassificazione dei file "elev_diff.txt" associati ai run eseguiti per la SA2 condotta applicando il metodo di Saltelli

La somma algebrica effettuata per ogni simulazione tra il *raster* di riferimento riclassificato secondo la Tabella 50 e quelli di *output* alle simulazioni riclassificati secondo la Tabella 51 ha prodotto a sua volta un *raster* con una serie di combinazioni che hanno permesso di distinguere le celle con comportamento in concordanza e quelle in discordanza. La matrice delle possibili combinazioni derivate dalla somma algebrica è la stessa riportata in Tabella 42 e utilizzata per l'analisi di Morris a cui si rimanda; del tutto analoga è pure la formula utilizzata per il calcolo dell'indice di *performance* F_{sez} (66).

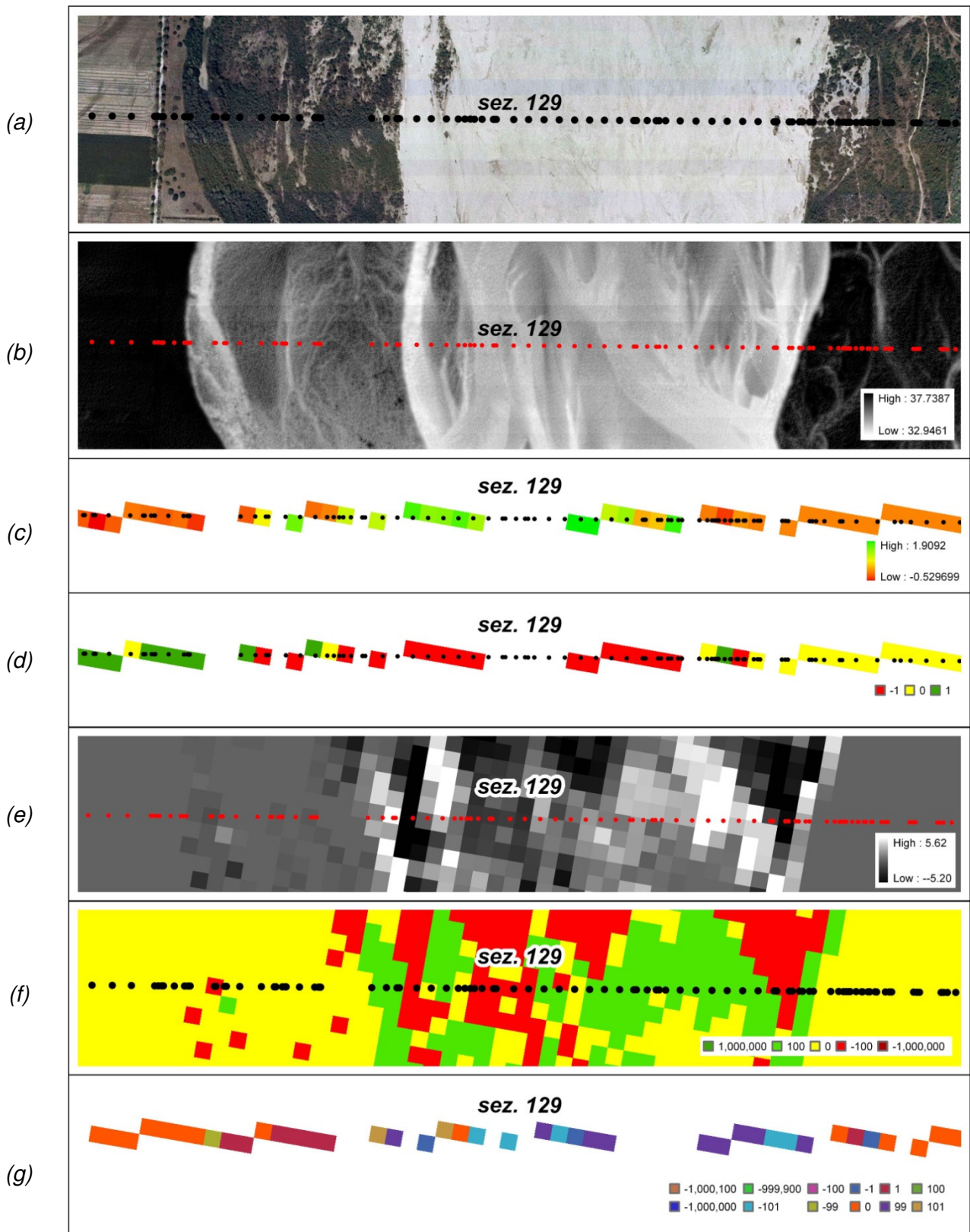


Figura 73 - Alcuni risultati di $performance F_{sez}$ della SA2 - metodo di Saltelli: - a) sezioni 129 rilievo 2003 [dato vettoriale]; b) corrispondente DEM 2001 [dato raster]; c) estrazione Z_{2001} e conversione del ΔZ_{reale} puntuale in formato raster; d) reclass del dato raster ΔZ_{reale} ; e) dato raster $\Delta Z_{simulazione}$ associato alla simulazione n. 215 f) dato raster $\Delta Z_{simulazione}$ riclassificato g) operazione di somma algebrica tra (d) ed (f) (valore di $performance$ associato pari a 74%).

10.3.2.3 Analisi

L'analisi statistica descrittiva dei valori di *performance* per tutte le 246 simulazioni è sinteticamente riportata nella seguente Figura 74. Invece i risultati relativi ai valori degli indici di sensitività totali e del primo ordine sono riportati in Tabella 52 e Tabella 53.

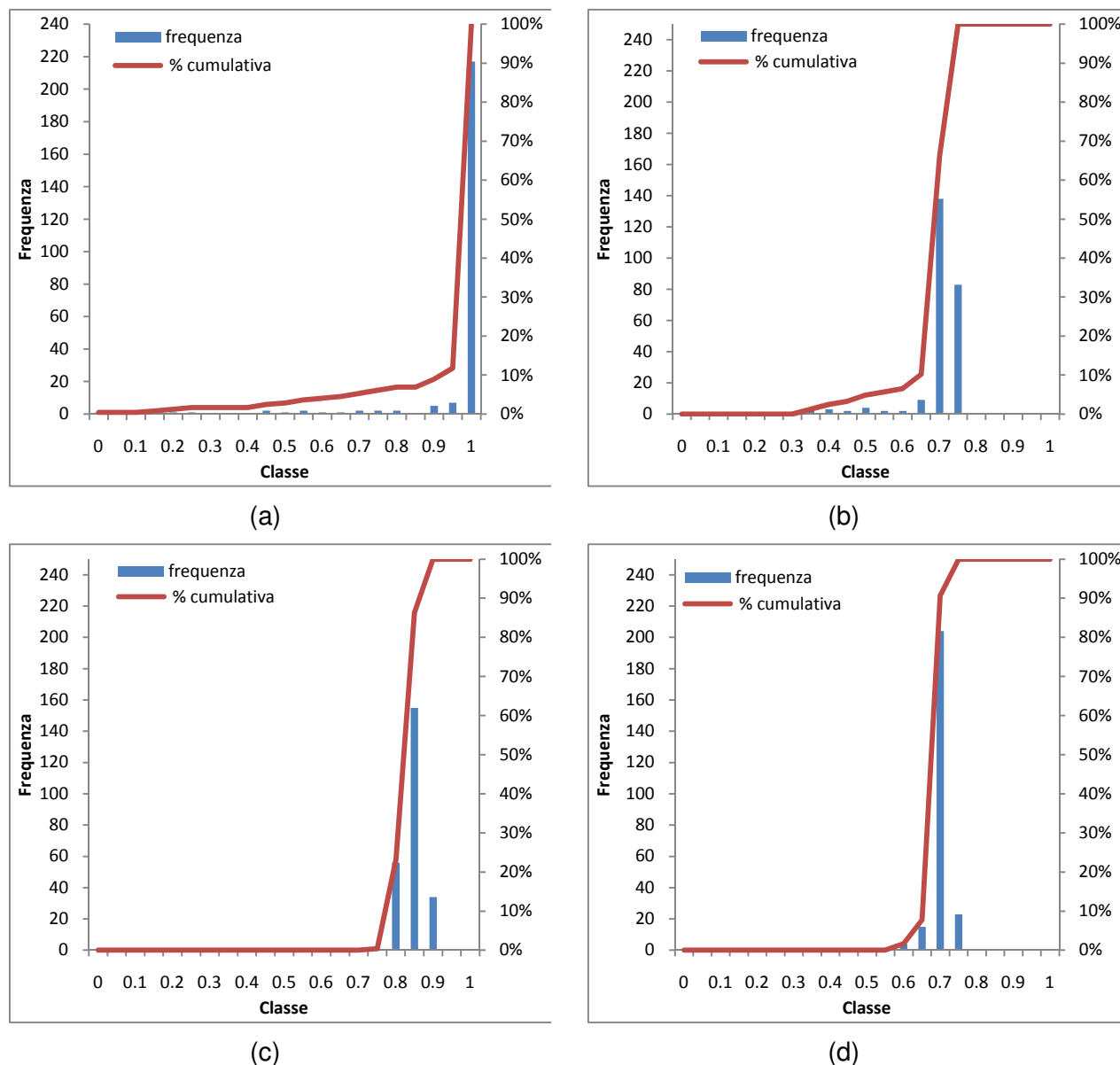


Figura 74 - a) distribuzione dei valori di *performance* di velocità computazionale F_{vel} associati alle 246 simulazioni della SA di Saltelli; b) distribuzione dei valori di *performance* di area bagnata F_w ; c) distribuzione dei valori di *performance* di copertura vegetazionale F_{veg} ; d) distribuzione dei valori di *performance* altimetrica F_{sez}

STADIO	VARIABILE	OUTPUT 1: Performance velocità F_{vel}			OUTPUT 2: Performance area bagnata F_w			OUTPUT 3: Performance vegetazionale F_{veg}			OUTPUT 4: Performance altimetrica F_{sez}			
		lower bound	stima	higher bound	lower bound	stima	higher bound	lower bound	stima	higher bound	lower bound	stima	higher bound	
1	laterale.erosion.rate	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-107.7	-54.74	2.42
	pass.lat.smooth	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-23.65	-4.70	12.65
	max.ero.de.limit	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-20.73	-1.22	21.77
	water.for.erosion	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-119.4	-61.77	-11.50
	veg.crt.shear	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-16.55	-1.68	14.40
2	laterale.erosion.rate	1	-	-	-	-	-	-16.05	-2.43	9.70	-	-	-	
	pass.lat.smooth	2	-	-	-	-	-	-11.22	-5.48	-1.79	-	-	-	
	max.ero.de.limit	4	-	-	-	-	-	-4.15	1.41	7.28	-	-	-	
	water.for.erosion	8	-	-	-	-	-	-16.01	-6.28	3.09	-	-	-	
	veg.crt.shear	12	-	-	-	-	-	-0.80	0.60	1.78	-	-	-	
3	laterale.erosion.rate	1	-1.94	-1.01	-0.24	-2.39	-0.67	1.04	-17.78	5.69	6.76	-19.57	8.86	2.12
	pass.lat.smooth	2	-1.87	-0.89	-0.03	-3.04	-0.97	0.97	-6.88	-3.41	-0.45	-6.20	-1.23	3.08
	max.ero.de.limit	4	-0.11	2.88	6.56	0.21	4.05	8.73	-2.72	2.25	7.47	-5.23	1.57	9.88
	water.for.erosion	8	-2.16	-0.24	2.12	-6.50	-1.84	2.58	-16.13	-7.90	0.01	-15.19	7.85	0.09
	veg.crt.shear	12	-0.09	0.06	0.27	-1.65	-0.71	0.17	-0.27	0.39	1.22	-2.62	-0.14	2.23

Tabella 52 - Stime dei valori degli indici di sensitività del primo ordine ottenuti per ogni stadio della SA2 condotta con il metodo di Saltelli

STADIO	VARIABILE	OUTPUT 1: Performance velocità F_{vel}			OUTPUT 2: Performance area bagnata F_w			OUTPUT 3: Performance vegetazionale F_{veg}			OUTPUT 4: Performance altimetrica F_{sez}			
		lower bound	stima	higher bound	lower bound	stima	higher bound	lower bound	stima	higher bound	lower bound	stima	higher bound	
1	laterale.erosion.rate	1	0.00	1.64	3.28	0.31	0.65	1.12	0.27	1.21	2.41	0.22	2.25	4.58
	pass.lat.smooth	2	0.00	0.04	0.10	0.43	0.90	1.57	0.01	0.05	0.09	0.12	0.29	0.48
	max.ero.de.limit	4	0.00	0.34	0.69	0.12	0.42	0.70	0.01	0.05	0.09	0.05	0.28	0.55
	water.for.erosion	8	0.00	0.30	0.57	0.36	0.92	1.47	0.30	0.77	1.14	0.47	2.32	4.60
	veg.crt.shear	12	0.00	0.02	0.05	0.28	0.47	0.66	0.00	0.02	0.04	0.01	0.18	0.35
2	laterale.erosion.rate	1	0.00	0.05	0.11	0.04	0.09	0.14	0.38	0.77	1.10	0.36	0.97	1.57
	pass.lat.smooth	2	0.00	0.05	0.10	0.04	0.08	0.11	0.02	0.11	0.21	0.03	0.10	0.19
	max.ero.de.limit	4	0.02	1.05	2.08	0.04	0.87	1.69	0.06	0.17	0.33	0.09	0.61	1.15
	water.for.erosion	8	0.00	0.31	0.61	0.10	0.62	1.17	0.28	0.40	0.52	0.31	0.61	0.99
	veg.crt.shear	12	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05	0.10	0.00	0.01	0.01	0.02	0.06	0.10
3	laterale.erosion.rate	1	0.01	0.07	0.14	0.06	0.13	0.22	0.52	0.88	1.29	0.52	1.01	1.55
	pass.lat.smooth	2	0.00	0.08	0.15	0.04	0.19	0.44	0.02	0.08	0.17	0.07	0.17	0.31
	max.ero.de.limit	4	0.06	1.04	2.51	0.16	0.88	1.81	0.09	0.18	0.29	0.12	0.47	1.00
	water.for.erosion	8	0.06	0.41	0.89	0.17	0.99	2.00	0.24	0.46	0.74	0.29	0.56	0.86
	veg.crt.shear	12	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.08	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.07

Tabella 53 – Stime dei valori degli indici di sensitività totali ottenuti per ogni stadio della SA2 condotta con il metodo di Saltelli

Analisi degli indici di primo ordine (Tabella 52)

- i valori ottenuti non sono assolutamente soddisfacenti nei primi due stadi dell'analisi (rispettivamente dopo 71 e 148 run), in quanto per nessuno degli output gli indici di primo ordine assumono valori prossimi all'unità e gli intervalli di stima (*higher bound* – *lower bound*)

sono ancora troppo ampi. A scopo esemplificativo in Tabella 52 sono stati riportati i valori ottenuti solo per gli *output* 4 e 3 rispettivamente per il primo e il secondo stadio di analisi.

- anche al termine del terzo stadio, dopo aver esaurito ed esaminato tutte le 246 simulazioni, i valori degli indici di primo ordine non convergono a stime corrette; tuttavia i valori riferiti al fattore n. 4 (*max erode limit*) mostrano chiaramente una coerenza di comportamento (valori sempre positivi e relativamente poco scostati dall'unità). Per questo fattore quindi, anche se non si riesce a quantificare con esattezza il grado di sensitività, si può affermare che la sua rilevanza in termini di sensitività sia notevole e chiara su tutti gli *output* e che tale fattore meriti più degli altri un'esatta calibrazione.

Analisi degli indici totali (vedi Tabella 53)

- diversamente da quanto ottenuto per i valori degli indici di primo ordine, per quelli totali la convergenza completa è avvenuta e le rispettive stime sono risultate attendibili ed indicative fin dal secondo stadio di analisi.
- dall'analisi di tutti gli stadi emerge chiaramente che i fattori 2 (*pass.lat.smooth*) e 12 (*veg.critic.shear*) non hanno nessuna influenza sul modello che nasca da una loro interazione con gli altri fattori (si ricorda che l'indice di sensitività totale quantifica il grado di influenza sul modello prodotto dall'interazione di ogni parametro con gli altri analizzati - 10.1.4.2).
- per quanto riguarda la *performance* di velocità risulta dominante l'influenza del fattore 4 (*max.erode.limit*), che evidentemente influenza fortemente il modello anche interagendo con gli altri parametri e non solo in modo diretto come emerso dall'analisi degli indici di primo ordine (Tabella 52).
- al fattore 4 si affiancano per rilevanza i fattori 1 (*lateral.erosion.rate*) e 8 (*water.for.erosion*). In particolare il fattore 1 risulta chiaramente dominante in termini di influenza sia per quanto riguarda la *performance* vegetazionale (*output* 3 - F_{veg}) e sia per quella altimetrica (*output* 4 - F_{sez}).

Alla luce delle considerazioni sopra esposte si è deciso di sottoporre a successiva calibrazione solo due fattori:

- n. 1 - *lateral erosion rate*;
- n. 4 - *max erode limit*.

11 Calibrazione e Validazione

11.1 Inquadramento teorico

I concetti di calibrazione e validazione sono stati totalmente sconfessati in una pubblicazione molto celebre del Oreskes et al. del 1994. In questo lavoro gli autori esprimono alcuni concetti chiave strettamente connessi con questa parte della tesi, concetti che meritano di essere ripresi e commentati per motivare la scelta comunque intrapresa di sottoporre CAESAR proprio a calibrazione e validazione. Le critiche all'accezione comunemente diffusa dei termini "calibrazione" e "validazione" è pienamente condivisa. Gli autori definiscono la calibrazione come un processo reiterato di regolazione (*tuning*) di alcuni parametri di un modello condotto al fine di ottenere la migliore corrispondenza possibile tra dato osservato e dato riprodotto. Si condivide anche il giudizio espresso riguardo all'essenza stessa della pratica della calibrazione, sostanzialmente riducibile ad un adeguamento empirico di un modello ad una realtà descritta solo parzialmente dai dati disponibili (definizione ripresa da un precedente lavoro di Van Fraassen del 1980). Questo limite è innegabile ed intrinseco, ma non giustifica nessun metodo di studio che a priori rinunci del tutto a calibrare un modello. Ovviamente ogni approccio che considera un modello ben calibrato come uno strumento pienamente affidabile a fini previsionali è senza dubbio criticabile; ugualmente sbagliato per contro deve essere considerato un atteggiamento arrendevole che non investe sulla modellazione e che non sfrutta in modo pieno e razionale i dati a disposizione. Anche la validazione nell'accezione del termine data dagli autori appare eccessivamente criticata. E' doveroso giudicare negativamente (come fanno gli autori) coloro i quali fanno leva sul senso letterale del termine validazione per associare a questo procedimento una valenza di veridicità totale. Si condivide pure l'affermazione introduttiva del lavoro che afferma come la validazione in sé sia impossibile. Chiaramente è contro ragione pretendere che un modello contenga la verità e che sia "valido" sempre e comunque. Ciò non toglie correttezza e ragionevolezza ad ogni tentativo, come quello intrapreso in questo contesto di ricerca, di testare (validare) un modello e valutare quanto esso sia in grado di riprodurre ad una condizione modellistica diversa da quella di calibrazione. In questo senso si conviene con Wilcock e Iverson, 2003 che, restando in linea con Oreskes et al, 1994, affermano semplicemente che per i modelli numerici l'obiettivo più raggiungibile rimane quello della conferma (*confirmation*) della realtà, ovvero della sua consistenza con i dati di campo. In altre parole si sostiene con forza la validità di quelle che Mosselman (2010) chiama "*verification and validation in a pragmatic sense*".

11.2 Calibrazione

11.2.1 Materiale

Il tratto di applicazione e la serie idrometrica utilizzati per la calibrazione sono stati gli stessi del secondo *step* dell'analisi di sensitività. Il materiale quindi è stato il medesimo descritto sinteticamente in Tabella 37, anche se diversi sono stati i metodi di analisi dei risultati descritti nel sottocapitolo a seguire.

11.2.2 Risultati

La SA a due *step* descritta al capitolo 10 ha permesso di individuare i parametri più influenti tra quelli analizzati (12) e quindi di limitare la calibrazione a soli 2 fattori: *max erode limit* e *lateral erosion rate*. Il set di simulazioni completo costituitosi con la SA è formato da 376 elementi (130 SA1 metodo di Morris + 246 SA2 metodo di Saltelli). Analizzando i valori di *performance* ottenuti per questo campione di elementi si è individuato un intervallo di calibrazione più ristretto di quelli di esistenza dei due parametri. Si tratta di intervalli all'interno dei quali le 376 simulazioni già effettuate hanno manifestato mediamente una migliore *performance*. La calibrazione si è quindi concentrata solo su questi intervalli, senza esplorare completamente il campo di esistenza dei fattori oggetto di calibrazione. In particolare per il parametro *max erode limit* si è scelto l'intervallo [0.03 – 0.1] (più limitato del corrispondente intervallo di esistenza analizzato nella SA [0.001 – 0.1]), mentre per il parametro *lateral erosion rate* l'intervallo di calibrazione è stato ridotto al range [0.001 – 0.045] (intervallo di esistenza analizzato nella SA corrispondente a [0.001 – 0.1]).

Prima di avviare la calibrazione si è proceduto a definirne il DOE. La dimensione due del dominio di calibrazione e l'estensione ridotta degli intervalli ha permesso di procedere con una strategia di simulazione che non badasse all'economicità del numero di simulazioni (prerogativa delle tecniche di analisi di sensitività di *screening* - 10.1) senza necessariamente procedere nell'estrazione *random* o *quasi-random* di combinazioni di esistenza (tecniche adottate nei metodi *variance based* con *sampling* casuale del dominio - 10.1), ma che una copertura totale e densa dello spazio stesso. Con questo obiettivo si è costruita quindi una maglia quadrata di combinazioni a copertura totale del dominio individuato dai due fattori da calibrare. E' stato fissato un passo di analisi per ogni parametro ed è stato definito il grigliato di calibrazione visibile in Figura 75. Il passo scelto per il *max erode limit* è stato fissato pari a 0.007, mentre quello per il *lateral erosion rate* è stato fissato pari a 0.005. Sono state effettuate in totale 99 simulazioni. Il tempo macchina complessivamente richiesto per terminare le 99 simulazioni del DOE è stato di 8 giorni, 14 ore e 15 minuti.

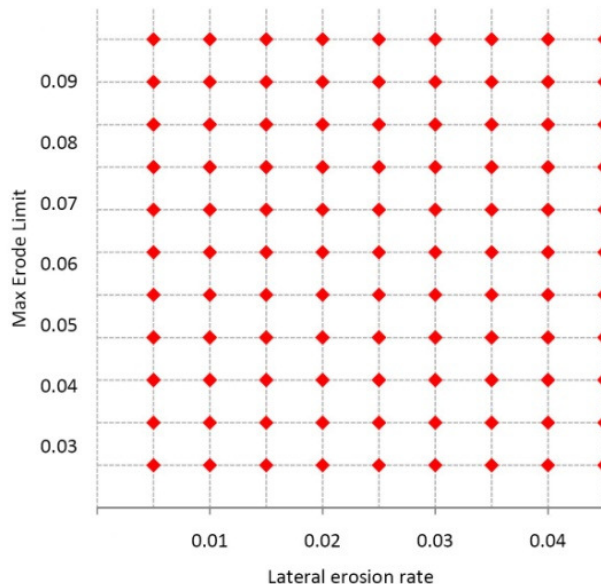


Figura 75 - Griglia a descrizione del DOE di calibrazione. Ogni punto rappresenta una combinazione dei valori oggetto di calibrazione.

I valori di *performance* calcolati per tutte le simulazioni sono stati i seguenti:

- F_w - *performance* associata all'area bagnata [A.3.2];
- F_{veg} - *performance* associata alla copertura vegetazionale [A.3.4];
- F_{sez} - *performance* altimetrica [A.3.5].

Utilizzando i valori di *performance* ottenuti nei 99 punti del dominio si sono ricostruite per ogni indice una superficie interpolante adottando la tecnica geostatistiche del *kriging* (semivariogramma esponenziale) al fine di individuare graficamente il punto di massima *performance* globale. Nella seguente Figura 76 sono riportati i risultati di suddette analisi.

Il punto di massime *performance* (si veda cerchio di evidenziazione in Figura 76) è stato individuato visivamente per la seguente combinazione di valori:

- *max erode limit* 0.075
- *lateral erosion rate* 0.002.

Questa coppia di valori è stata mantenuta per la simulazione di validazione descritta al capitolo successivo (11.3).

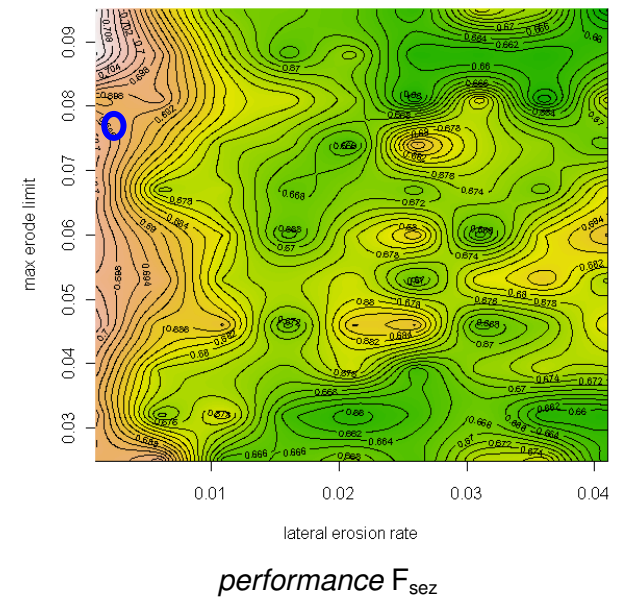
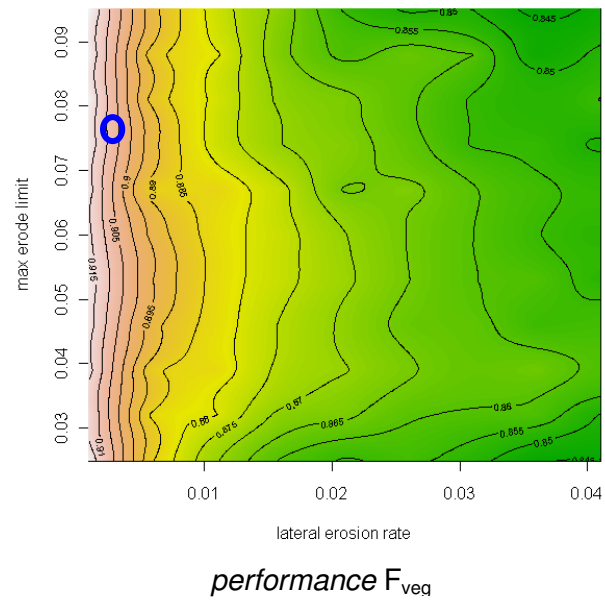
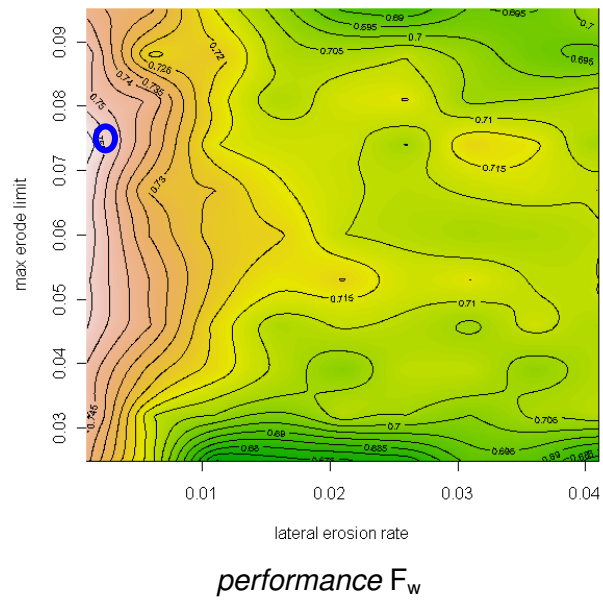


Figura 76 - Risultati delle analisi *kriging* dei valori degli indici di *performance* calcolati per le simulazioni di calibrazione. Cerchiato il punto di massima *performance* individuato graficamente

11.3 Validazione

11.3.1 Materiale

La validazione è stata effettuata su tutto il tratto del fiume Tagliamento impostato tra la stretta di Pinzano e le località S.Paolo-Carbona descritto al sottocapitolo 7.1 (sviluppo di circa 33 km, pendenza media pari a 3.3‰, morfologia unica a canali intrecciati - Figura 62). La serie idrometrica utilizzata invece è stata allargata ad un periodo di circa 8 anni, dal 9 aprile 2001 al 14 maggio 2009 (Figura 77). Anche in questo caso sono stati esclusi dalla simulazione valori di portata inferiori alla soglia formativa di 100 m³/s.

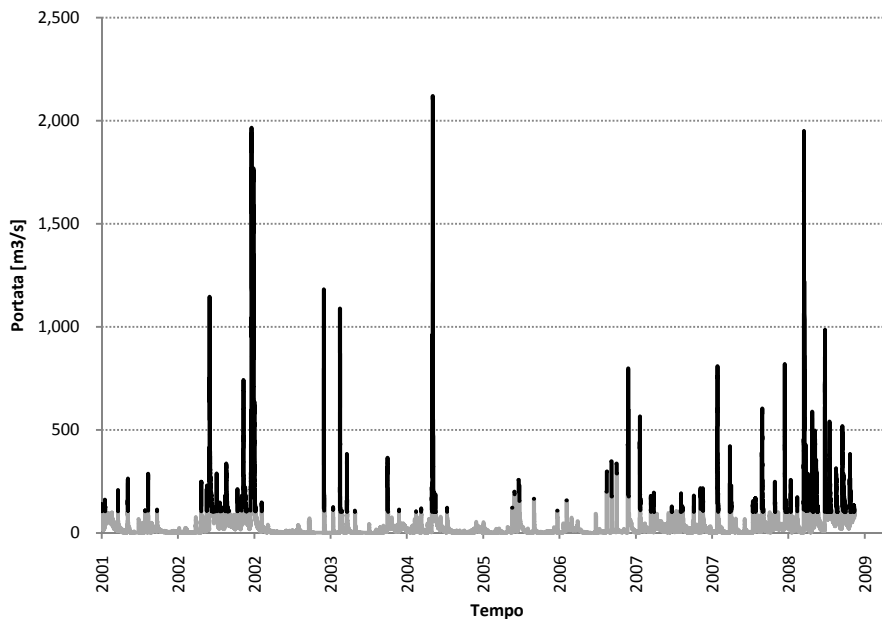


Figura 77 - Idrogramma registrato presso la stazione di Pinzano [Villuzza-San Pietro] utilizzato per la validazione

Per la validazione si sono utilizzati i materiali e i dati riportati nella seguente Tabella 54.

Materiale	Tipologie di Informazioni ricavate e utilizzate durante la fase di lavoro
Ortofoto 2001	Margini alveo attivo e isole Presenza di argini, difese laterali e repellenti da inserire nel DEM iniziale e nel BEDROCK (A.1)
Foto aeree 2009	Margini alveo attivo e isole Margini dell'area bagnata a fine periodo (portata associata pari a circa 134 m ³ /s) Presenza di argini, difese laterali e repellenti da inserire nel DEM iniziale e nel BEDROCK (A.1)
DEM LIDAR 2001	DEM di partenza per le simulazioni con celle 2x2 ricampionato con celle di dimensioni 25 x 25

Tabella 54 - Descrizione dei dati di controllo disponibili ed utilizzati durante la validazione

La fase di validazione ha richiesto che fosse riconsiderato con più attenzione un fattore di modellazione denominato “*sediment proportion re-circulated*” (*spr*). Si tratta di un fattore configurabile direttamente dalla GUI principale attraverso cui l'utente stabilisce quale deve essere la percentuale delle portate solide in uscita dal limite di valle del tratto che deve essere fatta ricircolare ovvero reintrodotta a monte negli stessi punti di immissione delle portate liquide. Come indicato nell'appendice A.1, CAESAR richiede che le condizioni al contorno di portata siano specificate in file di *input* dedicati, all'interno dei quali devono essere specificati con un passo

temporale scelto dell'utente i valori di portata liquida da immettere nel sistema; associate alle portate liquida possono essere immesse anche portate solide specifiche per ciascuna classe granulometrica. L'inserimento delle portate solide è opzionale. In alternativa a questa forma diretta di inserimento, il modello dispone della suddetta opzione di "ricircolo dei sedimenti". In questo caso è il modello stesso a ricreare valori di *input* solido a partire dal corrispondente *output* prodotto per ogni ciclo di *sweeping*. Il legame proporzionale tra *output* e *input* solidi è espresso proprio attraverso il fattore "spr".

Per tutte le simulazioni effettuate nelle fasi precedenti (applicazione esplorativa – [9], analisi di sensitività [10] e calibrazione [11.2]) si è utilizzata questa opzione di ricircolo ponendo il fattore spr pari ad 1, al fine di simulare verosimili valori di portata solida in ingresso da monte al tratto studio. Imporre un ricircolo unitario può essere considerato assimilabile ad un'assunzione di equilibrio altimetrico a scala di tratto. Ipotesi semplificative simili vengono frequentemente adottate nell'impostazione di modelli fisici dedicata alla simulazione di processi di trasporto al fondo (Parker e Wilcock, 1993). Nell'ambito delle precedenti fasi di lavoro la scelta modellistica di porre ricircolo unitario è stata giustificata dalle seguenti motivazioni:

- il tratto di applicazione a valle dei ponti di Casarsa presenta uno sviluppo relativamente modesto (circa 7.5 km) e una configurazione spazialmente costante per larghezza (circa 600 m), pendenza (2.9‰) e morfologia (*braided*).
- l'analisi storica delineata nella parte prima della tesi (capitolo 4) associata ad un'approfondita conoscenza del tratto acquisita nel tempo direttamente sul campo indicano che localmente il Tagliamento ha manifestato tra il 2001 e il 2009 un *trend* altimetrico di sostanziale equilibrio o lieve incisione.
- adottare soluzioni alternative per simulare la condizione al contorno di portata solida (per esempio attraverso la costituzione di una scala delle portate solide alla sezione di monte ricavata da modelli monodimensionali) avrebbe costituito ulteriore fonte di incertezza.

La fase di validazione ha però messo in discussione almeno in parte queste ipotesi semplificative adottate nelle fasi precedenti di lavoro in quanto:

- il tratto di applicazione della validazione (tratto completo tra Pinzano e San Paolo-Carbona - Figura 62) pur presentando costantemente morfologia *braided*, varia considerevolmente oscillando tra una larghezza minima di circa 140 m alla stretta di Pinzano fino ad un massimo di circa 1,800 m all'altezza di Spilimbergo.
- larghezza d'alveo e pendenze locali del fondo sono significativamente diverse tra le sezioni di monte (Pinzano) e quella di chiusura del tratto a valle (S.Paolo-Carbona). A valle la pendenza si attesta attorno a 2.3‰ per una larghezza media di circa 600 m (morfologia a canali intrecciati tendente a transizionale), mentre a Pinzano il tratto manifesta morfologia monocursale (alveo confinato dai terrazzi pleistocenici), larghezza prossima a 140 m e pendenza locale prossima al 5 ‰. A queste caratteristiche corrispondono capacità di trasporto al fondo che possono essere significativamente diverse.
- le analisi storiche condotte sul breve termine (2001 – 2009) delineate nella prima parte della tesi (4.3) hanno evidenziato che complessivamente il tratto può considerarsi in aggradazione seppur lieve (4.3.2).

Alla luce di queste considerazioni si è optato per effettuare due simulazioni di validazione associate a valori diversi del parametro spr, entrambi comunque lievemente maggiori di 1 (1.5 e 2), per rendere conto nella modellazione del comportamento generale del tratto di lieve aggradazione. Le risultanze ottenute e descritte di seguito hanno permesso di verificare la scarsa influenza di questo fattore sulla capacità del modello di riprodurre le caratteristiche planimetriche del tratto. Si è ritenuto di dedicare ulteriore spazio a questo aspetto della modellazione attraverso l'analisi del bilancio di sedimenti a scala di tratto impostata nella Parte III del lavoro, a cui si rimanda (sottocapitolo 13.1).

11.3.2 Risultati

I valori di *performance* calcolati per le simulazioni di validazione sono stati i seguenti:

- F_w - *performance* associata all'area bagnata [A.3.2];
- F_{veg} - *performance* associata alla copertura vegetazionale [A.3.4];
- F_{ac} - *performance* alveo attivo [A.3.6].

Diversamente dalle analisi svolte le fasi di SA2 (10.3.2) e calibrazione (11.2), per la validazione si è rinunciato a valutare l'attendibilità del modello dal punto di vista altimetrico a causa dell'assenza di sezioni topografiche recenti. Le sezioni 2006 disponibili hanno una distribuzione spaziale insufficiente e temporalmente sono troppo distanti dal periodo di chiusura della simulazione di validazione – maggio 2009 (si veda anche capitolo 7.4). Agli indici di *performance* "classici" si è affiancata la valutazione di altri fattori morfometrici macroscopici considerati sintetici indicatori della bontà dei risultati:

- variazione della larghezza media dell'alveo attivo a scala di tratto (ΔL_{ac});
- larghezza media dell'areale bagnato (L_w);
- valore medio dell'indice di intrecciamento (BI – *Braided Index*).

I risultati sono sinteticamente riportati nella seguente Tabella 55.

	Dato reale		Risultati del modello		
	Foto aerea 2009 [dato vettoriale]	Alveo attivo 2009 [dato raster 25x25 m]	srp = 1.5	srp = 2.0	range
Performance alveo attivo F_{ac} [%]	-	-	84.9%	84.9%	84.9%
Performance vegetazionale F_{veg} [%]	-	-	91.8%	91.8%	91.8%
Performance area bagnata, F_w [%]	-	-	23.59%	23.28%	23.59 - 23.28 %
Larghezza media alveo attivo, L_{ca} [m]	756	756	782	786	782 - 786
Variazione larghezza media alveo attivo, ΔL_{ac} [m] 2001-2009	24	24	50	54	50-54
Larghezza media area bagnata, L_w [m]	236	230	604	616	604-616
indice di intrecciamento medio, BI [n° canali]	6.12	4.80	2.83	2.63	2.63 - 2.83

Tabella 55 - Riepilogo dei risultati delle simulazioni di validazione e confronto con i dati reali 2009

Per completare l'analisi dei risultati sono state effettuate alcune elaborazioni per calcolare il *sediment yield* medio annuo (produzione media annuo di sedimenti) prodotto dal modello. Non avendo termini di confronto o misure di campo relative al tratto studio, è stato affrontato un lavoro di revisione bibliografica che permettesse di costruire un *set* di valori di riferimento che potessero permettere in prima approssimazione di valutare l'attendibilità dell'ordine di grandezza del risultato prodotto da CAESAR. La sintesi dei valori di letteratura reperiti e il confronto con quelli prodotti dalla modellazione sono riportati nella seguente Tabella 56.

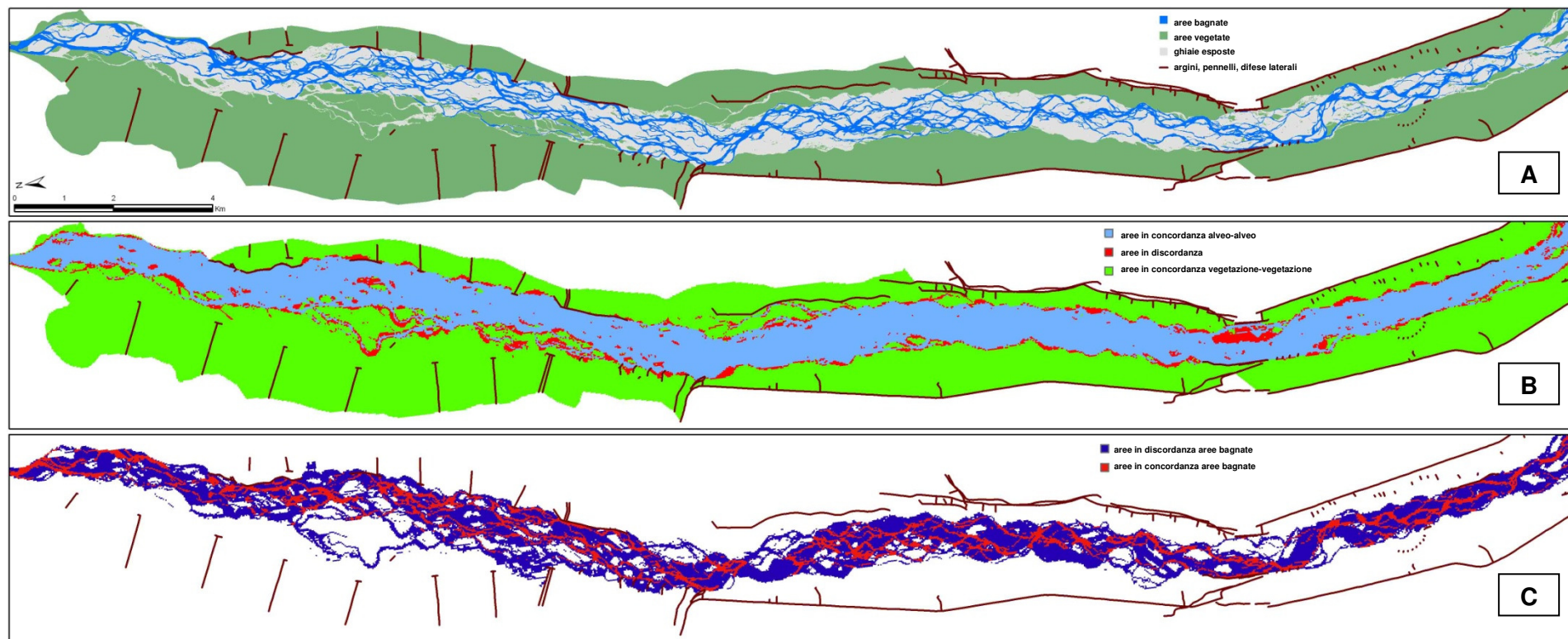


Figura 78 - Confronto planimetrico tra *output* modello (simulazione di validazione con $spr = 1.5$) e dato reale 2009.

[A] dato vettoriale 2009 reale in formato vettoriale.

[B] *overlay* tra alveo attivo modellato e alveo attivo reale riclassificato per il calcolo dell'indice di *performance* F_{ac} (valore pari a circa il 94%).

[C] *overlay* tra area bagnata modellata e reale riclassificata per il calcolo dell'indice di *performance* F_w (valore pari a circa il 23.5%).

	Riferimenti bibliografici										Risultati del modello	
	Surian et al, 2009e	Surian e Cisotto, 2007	Griffiths, 1979		Carson e Griffiths, 1989	Martin e Church, 1995	McLean e Church, 1999	Ham e Church, 2000	Nicholas, 2000	Liebault et al, 2008	srp 1.5	srp 2.0
Nome Fiume	Tagliamento	Brenta	Waimakariri (NZ)		Waimakariri (NZ)	Vedder (Canada)	Fraiser (Canada)	Chilliwack (Canada)	Waimakariri (NZ)	[a] Eygues, [b] Lower Drome	Tagliamento	
Pendenza media	-	0.0040	0.0048	0.0048	0.0048	0.0035-0.0046	0.00047	0.0062	[a] 0.0031, [b] 0.0048	-	0.003	
Larghezza media alveo attivo [m]	-	250	88	840	-	98-245 [50 at Vedder Crossing Bridge]	500	98-245 [50 at Vedder Crossing Bridge]	-	-	555	
D50 [mm]	-	-	D85 circa 150	D85 circa 100	28.0	circa 30	42.0	32	32-37	-	32.2	
Area bacino afferente [km2]	2,580	1,567	2,460		2,460	1,230	250,000	1,230	2,460	[a] 1100 [b] 1640	2,580.0	
Portata media annua [m3/s]	90	67	120		120	-	3410	60	120	-	90	
Piena con TR 1 [m3/s]	1,000	-	1,725		1,725	-	9,790	-	1,725	-	1,000	
Morfologia tratto	-	<i>Wandering</i>	Canale singolo	<i>Braided</i>	<i>Braided</i>	<i>Braided</i>	<i>Wandering</i>	<i>Braided</i>	<i>Braided</i>	-	<i>Braided</i>	
Metodi di stima del sediment budget	% total load	metodo morfologico e stima come % del total load (riferimento bibliografico utilizzato Griffiths, 1979)	metodo morfologico applicato avendo disponibile dati da 5 campagne di rilievo topografico tra '54-'73 (rilievi non completi)	metodo morfologico con 5 campagne di rilievo complete	metodo morfologico applicato a diversi periodi e tratti [a] tratto a valle del CROSSBANK(km18), [b] tratto a valle del km 22	metodo morfologico con 5 campagne di rilievo complete	comparazione di diversi metodi: Sediment Budget [DoD], Neill's method, morphological method, bed load measure, bed load formule	metodo morfologico come definito da McLean-Church da comparazione alternanza delle forme planimetriche estratte da GIS	modellazione numerica monodimensionale estesa a tutto il tratto foce-Lower Gorge. Periodo 1961 - 1997. Tratti [a] tratto vallivo km 10.1-13.3 [b] tratto comprendente il CROSSBANK km 16.7-21.1	[a] morphological estimate, [b] sediment trap	CAESAR	
Volume di sediment medio annuo prodotto [10 ³ *m ³ *year ⁻¹] **	154.8	70.0	55.5	285.8	[a] 1955-1983: 275, [a] 1967-1973: 187, [a] 1973-1978: 283, [a] 1978-1983: 269, [a] 1967-1983: 246, [b] 1986-1987: 154	36.6 ± 5.6 [27.5 - 157.0]	68.7 ÷ 140.6	1952-1966: 4.9 ± 5 1966-1973: 7.5 ± 3 1973-1983: 22 ± 10 1983-1991: 55 ± 10	[a] 60 [b] 310	[a] 66, [b] 35	62.0	60.4
Notes		Valori riferiti al tratto compreso tra le sezioni 4-5	Stima alla Lower Gorge (sez di monte del tratto braided vallivo)	Sezione del CROSSBANK		10 sottotratti analizzati L= 800m. Note condizione al contorno di trasporto a valle	I valori di stima qui riportati sono riferiti ai valori max e min per i 4 sub-reach analizzati con tutti i metodi	15 tratti montani e semiconfinati. Condizione di trasporto nota a monte = deflusso da lago montano	Confronto bedload flux modellato - reale giudicato soddisfacente dall'autore			

Tabella 56 - Revisione bibliografica relativa alla stima del sediment yield medio annuo e confronto con i risultati ottenuti in sede di validazione

Un'analisi d'insieme dei risultati emersi dalla validazione ha condotto alla seguenti considerazioni:

- i valori di *performance* relativi all'alveo attivo e alla vegetazione sono molto soddisfacenti ($F_{ac} \approx 85\%$, $F_{veg} \approx 92\%$ - Tabella 55). La bontà del risultato appare evidente in modo qualitativo anche solo osservando la Figura 78.
- coerentemente con la buona performance nella riproduzione della configurazione d'alveo il valore di larghezza medio da modello e reale si discostano di circa 30 m su 780 m di larghezza media (3.8 %). Anche la differenza ΔL_{ac_reale} e $\Delta L_{ac_modello}$ si attesta attorno ai 25-30 m. In entrambi i casi le discrepanze sono dello stesso ordine di grandezza della risoluzione del *grid* utilizzato dal modello (25 x 25 m).
- il modello non riproduce in modo soddisfacente la disposizione dei canali bagnati principali (aree bagnate) e con essi la complessità morfologica tipica della morfologia *braided* propria del tratto. A conferma di questo si osservano
 - (i) i valori molto bassi dell'indice di *performance* F_w ($\approx 23.5\%$ - Tabella 55);
 - (ii) la differenza notevole tra il valore di larghezza media dell'areale bagnato modellato e quella reale ottenuta quest'ultima utilizzando il dato in formato *raster* ricavato da foto aerea 2009 ($L_{w_reale} \approx 230$ m contro $L_{w_modello} \approx [604 \div 616]$ m);
 - (iii) i valori dell'indice di intrecciamento da modello sono decisamente inferiori rispetto a quello reale ottenuto elaborando il dato *raster* a celle 25x25 m ($BI_{reale} \approx 4.8$ contro $BI_{modello} \approx [2.63 \div 2.83]$).

Le nette discrepanze tra modello e realtà risultano qualitativamente evidenti anche dall'osservazione della Figura 78.

- i risultati ottenuti in termini di *sediment yield* medio annuo sono soddisfacenti. Osservando la Tabella 56 risulta evidente come il valore ottenuto per il Tagliamento (60-62 milioni di m³ annui) risulti dello stesso ordine di grandezza di altri valori ritrovati in letteratura per contesti fluviali assimilabili. In particolare risultano interessanti le ottime corrispondenze con i risultati illustrati in Nicholas, 2000 e Griffiths, 1979 relativi al fiume *braided* neozelandese Waimakariri, quelli ottenuti da Surian e Cissotto (Surian e Cissotto, 2007) sul Brenta e quelli pubblicati in Liebault et al, 2008 associati al fiume francese prealpino Eygue. Buona anche la corrispondenza con i valori riportati in Ham e Church, 2000 relativamente al fiume Chilliwack e quelli ottenuti da Martin e Church (Martin e Church, 1995) sul Vedder in Canada.
- non si notano significative differenze tra le simulazioni condotte con spr 1.5 e 2.0. Questo risultato può essere indicativo di una scarsa rilevanza a livello globale dell'effetto dell'incremento di apporto solido da monte al tratto presso Pinzano. Per ulteriori valutazioni si rimanda alla Parte III della tesi.

12 Discussione

La discussione ai risultati ottenuti in questa Parte II dedicata alla modellazione numerica è stata organizzata in due punti, in funzione degli obiettivi indicati al capitolo 1.2. Gli obiettivi possono essere così sintetizzati:

- sperimentare una procedura metodologica con valenza generale che permetta di applicare in modo sistematico un modello RCM morfodinamico;
- verificare l'attendibilità di CAESAR per applicazioni a scale spazio-temporali di interesse gestionale.

12.1 Ricerca di una procedura di applicazione di un RCM

La scelta di sottoporre CAESAR ad una procedura di applicazione sistematica e standardizzata è stata soddisfacente. E' stato così rispettato il principio del "rigore applicativo" sostenuto da Brasington e Richards (2007) e anticipato nell'introduzione alla tesi (capitolo 1.1). La procedura intrapresa non trova equivalenti nella letteratura specifica per modelli morfodinamici RCM. Essa ha permesso di analizzare nel complesso 12 variabili di modellazione, per giungere ad una calibrazione manuale delle sole due variabili più significative per la loro rispettiva sensitività sulla *performance* di CAESAR.

Nel complesso il numero delle simulazioni intraprese è stato minore o comunque paragonabile a quello indicato in altri lavori del settore (Saltelli et al, 2000; Aronica et al, 2002; Hall et al, 2005). Si ritiene che l'aspetto di maggiore novità di questa parte del lavoro sia stato quello di aver intrapreso un'analisi di sensitività a due *step* (Saltelli et al, 2000) utilizzando tecniche complementari con diverso dettaglio e modalità di *sampling*, entrambe applicate con finalità puramente esplorativa senza appoggiarsi a pregresse informazioni statistiche a guida del *sampling* stesso.

Causa l'aggiornamento continuo del modello anche durante il periodo di tesi (9.2 - Tabella 36) e l'assenza di pubblicazioni ufficiali che divulgassero i risultati di *test* condotti sul modello per guidarne e facilitarne sue applicazioni, la prima parte del lavoro (fase esplorativa - capitolo 9) è stata condotta procedendo senza un piano sistematico di *sampling*. I tempi fin da subito elevati e l'inefficacia del procedimento hanno palesato la stringente necessità di proseguire nell'applicazione di CAESAR solo seguendo strategie che fossero al tempo stesso

- economiche (fornire il maggior numero di *evaluation* con il minore numero possibile di *run*);
- efficaci (indagare lo spazio di esistenza in modo più possibile estensivo).

In questo senso la scelta dei metodi di Morris (10.3.1) e di Saltelli (10.3.2) è stata risolutrice aprendo la strada ad una calibrazione estremamente rapida e semplificata (11.2). Conferma la validità della scelta il confronto riportato nella seguente Tabella 57 tra i tempi macchina richiesti per la fase esplorativa e di calibrazione: a parità di scale spazio-temporali, le 99 simulazioni di calibrazione sono state effettuate in soli 8 giorni di calcolo, mentre le prime 72 simulazioni condotte durante la fase esplorativa hanno richiesto un tempo dieci volte superiore.

		N° Totale run	Tempo macchina impiegato per il calcolo			N° fattori indagati
Applicazione esplorativa		72	85 gg	4 h	7 min	-
Analisi di Sensitività	SA1- Metodo OAT di Morris	120	190 gg	9 h	50 min	12
	SA2- Metodo di Saltelli	246	62 gg	20 h	1 min	5
Calibrazione		99	8 gg	14 h	15 min	2
Totale		537	circa 347 gg			

Tabella 57 - Riepilogo dei tempi macchina impiegati per ogni fase del lavoro condotta prima di passare alla validazione

Complessivamente si può affermare che il tempo macchina impiegato per completare tutte le simulazioni sia considerevole (347 giorni di calcolo), ma se messo in relazione al contesto della ricerca appare un ottimo risultato. Basti pensare al numero davvero rilevante dei fattori analizzati nei primi *step* (12), scesi in seconda battuta a 5 fino ad arrivare ai due parametri sottoposti a calibrazione. Un tempo di calcolo totale così importante è ancora più giustificato se si considera la potenza generalmente modesta delle macchine utilizzate per effettuare le simulazioni (Tabella 58).

	Tipo di processore	Dimensione RAM
1	Intel Core 2 Quad Q6600 1.6 GHz	4 Gbyte
2	Intel Core 2 Duo E6300 1.6 GHz	2 Gbyte
3	Intel Pentium IV 1.7 GHz	2 Gbyte
4	ADM Athlon XP 1.5 GHz	512 Mbyte
5	Intel Pentium IV 2.8 GHz	512 Mbyte

Tabella 58 - Riepilogo delle principali caratteristiche di potenza di calcolo degli elaboratori utilizzati per effettuare tutte le simulazioni

12.2 Applicazione di CAESAR a scale spazio-temporali di interesse gestionale

I risultati della validazione descritti al capitolo 11.3.2 sono incoraggianti e permettono di delineare con buona confidenza i principali limiti e le potenzialità manifestate da CAESAR per contesti applicativi simili a quello oggetto della ricerca.

LIMITI

1. Nonostante le forti semplificazioni concettuali e modellistiche proprie del modello descritte nel dettaglio al capitolo 6.7, l'attendibilità della risposta morfologica di CAESAR manifesta ancora una forte dipendenza dalla dimensione della cella di calcolo, a confermare le conclusioni pubblicate in diversi recenti lavori di revisione critica dei modelli cellulari (Doeschi-Wilson e Ashmore, 2005; Doeschl et al, 2006; Nicholas e Quine, 2007). Pare opportuno comunque rilevare che la dipendenza dalla dimensione delle celle di calcolo è un limite che l'RCM scelto per questa applicazione condivide con i più sofisticati e fisicamente basati CFD come discusso al capitolo 6.6.1.9. Le *performance* più basse di CAESAR si sono evidenziate in associazione agli indici che quantificano la capacità del modello di riprodurre la complessità morfologica propria degli alvei *braided* (*performance* dell'area bagnata $[F_w]$ e indice di intrecciamento $[BI]$).

Si ritiene che l'incapacità di mantenere e riprodurre dinamicamente un *pattern* a canali intrecciati sia per grande parte riconducibile alla dimensione eccessiva della cella di calcolo adottata (25 m). Sempre le eccessive dimensioni delle celle inducono un generale smorzamento dei dislivelli interni all'alveo che pure contribuiscono alla banalizzazione morfologica quantificata dai bassi valori di BI e F_w .

Pare opportuno rilevare che allo stato attuale non è possibile valutare l'influenza sulla scarsa *performance* misurata indotta dalla difetto intrinseco nel DEM LIDAR del 2001, acquisito in condizioni idrometriche sfavorevoli (per dettagli si veda il capitolo 7.4).

2. Nonostante la rapidità di calcolo che CAESAR ha manifestato in modo evidente, la quantità di celle che caratterizzano il dominio spaziale e con essa la velocità computazionale complessiva (direttamente correlata) ancora non consentono l'applicazione a scale come quella analizzata (33 km di alveo con larghezza media di circa 760 m) con risoluzioni inferiori a quella adottata (25 m). Il numero massimo di celle attive supportabile dal modello (circa 300,000) costituisce un limite applicativo non trascurabile.
3. Come prevedibile in fase di calibrazione è emersa all'interno del dominio di esistenza dei parametri di modellazione analizzati una seppure lieve equifinalità (Beven, 1993; Thomas, 2003). La scelta di analizzare più fattori di *performance* (come consigliato da Wilcock e Iverson, 2003) ha facilitato l'individuazione grafica della combinazione di migliore calibrazione anche se non si può escludere che valori assimilabili di efficacia complessiva del modello possano essere ottenuti anche per combinazioni dei valori calibrati prossimi a quella scelta.

POTENZIALITA'

1. Le lacune nel mantenimento e nella riproduzione della complessità morfologica sono almeno in parte controbilanciate dalla buona risposta del modello nella riproduzione delle macrocaratteristiche planimetriche dell'alveo. Come evidenziato dai risultati della validazione (11.3.2 - Tabella 55), CAESAR ha manifestato ottime *performance* nella riproduzione planimetrica complessiva dell'alveo attivo ($F_{ac} \approx 85\%$) e in quella di della copertura vegetazionale ($F_{veg} \approx 94\%$). La variazione di larghezza media reale a scala di tratto (ΔL_{ac_reale}) risulta nell'ordine dei 25 m, ovvero pari alla risoluzione della cella adottata nella modellazione. La variazione di larghezza modellata ($\Delta L_{ac_modello}$) è risultata pari invece a 50 m, con una differenza tra i due Δ pari anche questa alla dimensione della cella. Questi valori da un lato indicano la difficoltà intrinseca nel caso applicativo che l'entità relativamente modesta delle variazioni medie reali siano effettivamente riproducibili da un modello che utilizza un *grid* con una risoluzione prossima al valore della variazione stessa. Dall'altro si osserva che la differenza $\Delta L_{ac_reale} - \Delta L_{ac_modello}$ torna a coincidere proprio con la dimensione del *grid* del modello. Ovvero la sovrastima della variazione vale quanto la risoluzione del *grid*. Questo indica che il modello si è mediamente comportato bene producendo scarti dal valore reale accettabili e prossimi alla minima risoluzione geometrica.
2. Il lavoro di ricerca bibliografica relativo all'argomento "*sediment yield*" sintetizzato nella Tabella 56 induce a ritenere che CAESAR possa fornire indicazioni estremamente interessanti in un contesto di stima del bilancio di sedimenti a scala di tratto. Si rimanda alla Parte III della tesi per un approfondimento in merito.

3. Le simulazioni di validazione hanno manifestato tempi macchina di calcolo intorno alle 36 h, ovvero il rapporto R_{vr} pari a 2,090 (8 anni di simulazione in 1.4 gg di tempo macchina di calcolo) molto vicino al valore soglia riportato al capitolo 9.2 di 2,900, corrispondente a circa 40 anni in 5 giorni. In definitiva il modello ha manifestato buone *performance* computazionali prossime alle aspettative. *Performance* che tuttavia crollano rapidamente diminuendo la dimensione della cella come anticipato in precedenza.
4. Come mostrato nelle Appendici A.1 e A.2 CAESAR permette di manipolare molto agevolmente i dati prodotti in *output* (i *raster* in formato ASCII sono agevolmente convertibili con qualunque applicativo GIS). Altrettanto facile risulta la preparazione dei dati di *input* per le simulazioni, non solo per il formato dei dati, ma anche per la GUI estremamente *user friendly*, modificabile da un utente con medie capacità di programmazione.
5. Il modello manifesta un'ottima stabilità computazionale. L'unica causa di instabilità deriva dall'eventuale insufficienza di memoria fisica nell'aggiornamento del file "grain.txt" (si vedano Appendici A.1 e A.2) di descrizione della componente granulometrica di fondo.
6. I limiti del modello possono essere considerati accettabili in considerazione della sua stessa "natura RCM". Anche per questo aspetto CAESAR appare ideale per l'impostazione di strategie "*what-if scenario*" su lunghe scale spazio-temporali assimilabile a quelle considerate in questo contesto di ricerca. Questa considerazione motiva in partenza l'impostazione della Parte III della tesi riportata nei capitoli a seguire.

Parte III – Tendenze evolutive future

13 La previsione in geomorfologia fluviale

I problemi modellistici a fini previsionali sono fondamentalmente di due tipi:

- incertezza ed equifinalità;
- non linearità del sistema.

L'equifinalità è quella caratteristica di un modello per la quale lo stesso risultato può essere ottenuto adottando diversi *set* di valori per le stesse variabili di modellazione. Svariati lavori in letteratura (Beven, 1996; Wilcock e Iverson, 2003) suggeriscono che l'equifinalità può essere considerata assiomatica per la modellazione geomorfologica e più in generale per tutti quei modelli fortemente parametrizzati che richiedono ampia calibrazione, ma per i quali sono disponibili solo dati di scarse qualità e copertura spazio-temporale (si pensi solo alla modellistica di *forecasting* climatico e ai modelli idrologici completi). Essa non costituisce un'intrinseca caratteristica del sistema indagato (fiume, clima, bacino, ecc.), ma piuttosto una proprietà propria del metodo di studio, in modo particolare quello numerico. L'equifinalità costituisce una conseguenza primaria dell'incertezza di ogni metodo di indagine applicato a contesti geomorfologici; questo è ancor più vero per i modelli numerici a causa della loro stessa complessità, delle loro ampie scale spazio-temporali di indagine e del fatto che gli errori da essi prodotti si sommano a quelli già intrinseci ai dati che essi stessi utilizzano. Il problema posto dall'equifinalità può essere affrontato semplicemente convivendo con l'incertezza, quantificandola e rinunciando talora a produrre risultati che siano vanificati dalle soglie di errore, oppure può essere affrontato adottando complessi approcci probabilistici che giudicano i modelli numerici solo in funzione della relativa probabilità che essi siano accettabili simulatori del sistema modellato (Beven, 1996). Si ritorna così all'idea di dover accettare l'incertezza associata ai modelli e vedere ogni loro seppur compiuta applicazione come un mero adattamento empirico a dati reali (Van Fraassen, 1980; Oreskes et al, 1994). Tuttavia spesso anche questo adattamento risulta improbabile proprio per la mancanza del dato reale di aggancio del modello. A seconda del caso possono mancare definizioni complete delle condizioni iniziali, si possono avere poche informazioni sui cambiamenti nel tempo delle forze esterne di condizionamento, scarse possono essere anche le conoscenze dell'interazione con la componente biotica del sistema, come pure lacunose le forme di descrizione numerica dei processi (Thomas, 2003). Nel complesso la "non conoscenza" può raggiungere livelli tali da rendere molti modelli deboli e facilmente attaccabili.

Al problema dell'incertezza si affianca un altro fattore che può influenzare pesantemente la potenziale capacità previsionale di un modello: il carattere di non-linearità del comportamento di un sistema fluviale. Numerosi studi soprattutto negli anni '90 (Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou, 1996a) hanno concentrato la loro attenzione sul comportamento apparentemente caotico dei sistemi fluviali, in modo particolare sul carattere non lineare della dinamica morfologica planimetrica dei fiumi *braided* (Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou, 1996a; Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou, 1997; Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou, 1998a; Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou, 1998b; Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou, 1999; Fofoula-Georgiou e Sapozhnikov, 2001). Nel 1996 Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou per primi hanno mostrato che gli alvei *braided* manifestano una "*anisotropic spatial scaling*" (cosiddetta "*self-affinity*"), ovvero all'interno di alvei a canali intrecciati le caratteristiche statistico-geometriche proprie di questo *pattern* si ripetono a diverse scale spaziali seguendo una trasformazione di forma che interessa solo il rapporto tra le scale considerate (Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou, 1996b). Dall'indagine delle sole caratteristiche morfometriche rilevate in condizioni statiche, gli stessi autori hanno allargato il

campo di indagine alle dinamiche morfologiche dei *braided*, verificando l'esistenza anche durante fasi evolutive di fattori cosiddetti di "*dynamic-scaling*", hanno cioè verificato che porzioni più limitate di alvei a canali intrecciati evolvono nelle proprie caratteristiche statistico-geometriche in modo identico a porzioni più ampie dello stesso alveo, a meno di normalizzare il tempo di evoluzione con un fattore dipendente solo dal rapporto di scala tra le parti (Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou, 1997). Gli stessi autori concludono quindi che la morfologia *braided* manifesta comportamenti evolutivi spazio-temporali cosiddetti "*self-organized criticality*" (SOC) in quanto

- (i) i *braided* si comportano come sistemi non-lineari;
- (ii) hanno un elevato numero di gradi di libertà;
- (iii) manifestano comportamenti planimetrici di instabilità che richiamano il comportamento di un sistema posto in condizioni critiche ovvero, all'interno di alvei *braided* posti in apparenti condizioni di equilibrio dinamico (concidente con un stato critico), una piccola e locale perturbazione può indurre cambiamenti significativi nella configurazione dell'intero sistema (Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou, 1996a);
- (iv) esibiscono *spatial-scaling* statico (Sapozhnikov e Fofoula-Georgiou, 1996b);
- (v) esibiscono *dynamic-scaling* durante fasi evolutive;
- (vi) lo *scaling* dinamico si presenta solo avvicinandosi allo stato critico (Fofoula-Georgiou e Sapozhnikov, 2001).

La caratteristica essenziale della proprietà SOC è quella per cui un sistema può evolvere in stadi completamente diversi tra loro pur partendo dalle medesime condizioni iniziali, in altre parole il suo comportamento è completamente imprevedibile.

Lo stesso approccio focalizzato sulla non-linearità del sistema fluviale e la sua imprevedibilità viene sostenuto molto recentemente in Coulthard e Van De Wiel, 2010 e Van De Wiel e Coulthard, 2010. Gli autori in questo caso hanno analizzato la risposta di un bacino fluviale semplificato in termini di produzione al fondo di sedimenti. Essi sostengono che esistono fondamentali limitazioni al tentativo di modellare l'evoluzione morfologica di un sistema naturale (nel caso specifico un bacino idrografico) che non sono governati dalla tecnologia di indagine, dalla complessità dei modelli o dalla risoluzione di monitoraggio, ma che sono intrinseche nella dinamica di evoluzione del sistema ovvero nella sua non-linearità prodotta dalla combinazione di effetti di soglia all'avvio del trasporto di sedimenti, interazioni ed effetti di *feedback* tra i processi, ritardi nelle risposte delle varie parti del sistema. Anche in questo caso gli autori affermano che esistono le condizioni necessarie per affermare che un bacino idrografico, come un alveo *braided*, si comporta secondo uno schema SOC.

L'aspetto più interessante di questi lavori di ricerca ricade proprio nelle loro conclusioni: nessuno tra gli autori dichiara di essere di fronte a sistemi intrinsecamente con *self-organized criticality*, ma tutti affermano che il comportamento di questi sistemi appare come tale. Ad oggi in effetti non si è ancora dimostrato che un fiume sia effettivamente un sistema puramente caotico e quindi completamente imprevedibile. La prudenza degli autori appare evidente nei termini utilizzati per esprimere l'evidenza stessa del carattere SOC.

*"[...] If river systems are non-linear, chaotic, and **possibly** exhibiting self-organized critical behaviour, then the capability **to predict may not be** governed by technology [...]"*

Coulthard e Van De Wiel, 2010

*"[...] Our results show that the **necessary** (ma non sufficient – n.d.a.) conditions for self-organized critical bedload yield dynamics can occur in very simple landscapes. [...]"*

Van De Wiel e Coulthard, 2010

*“[...] This statistical scale invariance within parts of the same river and the similarity of the scaling exponents from one river to another **was interpreted as indicating** the presence of universal features in the underlying mechanisms responsible for the formation of braided rivers. [...]*”

Foufoula-Georgiou e Sapozhnikov, 2001

Come mostrato indirettamente dal modello di Murray e Paola fondato sull'associazione di semplicissime regole di *routing* (6.6.2.3.1 – modello in grado di riprodurre lo schema SOC, Sapozhnikov e Foufoula-Georgiou, 1998a), e come affermato da Phillips (1992), la teoria “*Nonlinear dynamical systems*” (NDS – comprendente tra l'altro la teoria dei frattali e del caos) prova che complessità comportamentali estreme possono emergere anche dalla interazione non lineare di sistemi deterministici relativamente semplici guidati da banali relazioni connettive (si parla di “*deterministic complexity*”). In altre parole ad oggi non si può escludere che la dinamica fluviale sia caratterizzata fundamentalmente dalla cosiddetta “complessità deterministica” e che quindi l'evoluzione morfologica di un alveo fluviale non sia intrinsecamente prevedibile e riproducibile. I fattori che rendono in definitiva imprevedibile questi sistemi sono fattori puramente stocastici ed imprevedibili quali il regime idrologico e la dinamica vegetazionale. I fattori di limitazione al potere previsionale rimangono quindi consistenti:

- l'imprevedibilità delle variabili guida principali quali le portate liquide e la dinamica vegetazionale;
- l'impossibilità di eliminare completamente l'incertezza nella conoscenza dei processi (soprattutto degli effetti di secondo livello di reciproca interazione);
- l'intrinseca difficoltà fisica alla caratterizzazione completa ed esatta dello stato iniziale di un sistema naturale (Turowski - Coulthard e Van De Wiel, 2010).

Bras et al, 2003 esprimono in modo molto sintetico lo condizione attuale della modellistica geomorfologica previsionale:

“[...] it is almost impossible to exactly reproduce a feature of nature that is the outcome of a highly non-linear system having poorly known initial and boundary conditions [...]”.

Alla luce di queste considerazioni discende necessariamente una domanda: perché dunque cercare di modellare e cercare di prevedere?

La risposta non è univoca. Innanzitutto è indubitabile che l'applicazione di un modello numerico con finalità di previsione è al tempo stesso un'attività utile per testare la validità e l'ampiezza delle nostre conoscenze (Kirkby, 1996). E' indubitabile inoltre che, nonostante i limiti propri di tutti i modelli, senza di essi (modelli inteso in senso lato), la previsione rimane senza fondamento e correttezza. Infine, sebbene alcuni problemi di valutazione a carattere gestionale possono richiedere risposte che vanno oltre le attuali conoscenze scientifiche, è dovere del mondo scientifico insistere per cercare di applicare modelli al fine di focalizzare e applicare realmente le migliori conoscenze scientifiche disponibili a supporto delle esigenze della società (Wilcock e Iverson, 2003).

Partendo da queste convinzioni di fondo si è affrontata questa Parte III del lavoro di tesi con l'intenzione di perseguire tre obiettivi principali anticipati nell'introduzione, ovvero:

1. valutare il *sediment budget* a scala di tratto;
2. valutare le possibili evoluzioni future del tratto studio nel contesto di alcuni ipotetici futuri scenari gestionali dei sedimenti fluviali;
3. confrontare i risultati del modello numerico testato nella Parte II della tesi con quelli indicati dal modello concettuale proposto in Surian et al, 2009e.

13.1 Calcolo del *sediment budget*

Con il termine “*sediment budget*” (bilancio di sedimenti) si intende lo studio del bilancio dei sedimenti applicato ad un generico volume di controllo. Il sistema oggetto di analisi può coincidere con tutto o una parte di un qualunque sistema geomorfologico, da una regione climatica, ad un singolo bacino, da un tratto fluviale fino alla singola unità morfologica. Il calcolo di un bilancio di sedimenti può essere impostato al fine di descrivere l'intensità di singoli processi o risposte del sistema oggetto di studio, la loro localizzazione, la loro successione e frequenza temporale oppure la loro rilevanza sulle variazioni morfologiche del contesto. Ogni bilancio di sedimenti si fonda concettualmente sull'equazione di continuità di massa applicata ai sedimenti, equazione che può essere espressa nella forma più generale riportata di seguito

$$\text{input di sedimenti al sistema} = \text{output di sedimenti prodotti dal sistema} + \text{variazione nel volume dei sedimenti all'interno del sistema} \quad (63)$$

dove tutte le grandezze sono espresse in termini di quantità per unità di tempo. L'equazione di bilancio può essere riscritta in un numero indefinito di forme a seconda del contesto, della disponibilità di dati, del grado di accuratezza dell'analisi e degli obiettivi del bilancio stesso (la stessa equazione di *Exner* citata al capitolo 6.6.1.7 ne rappresenta una possibile forma). Per una revisione di ampio raggio dell'argomento si rimanda a Reid e Dunne, 2003. Ogni bilancio può essere definito in base ad alcuni aspetti caratterizzanti:

- (i) componenti da analizzare,
- (ii) scala spaziale di analisi,
- (iii) finestra temporale,
- (iv) precisione richiesta,
- (v) selezione del metodo di analisi.

In questo lavoro di ricerca si è focalizzata l'attenzione solo sulla componente di sedimenti che contribuisce al trasporto solido al fondo, applicando l'analisi all'intero tratto del fiume Tagliamento posto tra Pinzano e S.Paolo-Carbona oggetto della Parte II della tesi (capitolo 7.1), limitando il bilancio all'idrogramma di validazione (capitolo 11.3), ovvero al periodo 9/4/2001 – 14/5/2009. Gli obiettivi principali del calcolo del bilancio di sedimenti sono stati i seguenti:

- ricavare indicazioni sul valore più corretto da adottare nella modellazione degli scenari futuri (capitolo successivo 13.2) per il fattore di ricircolo dei sedimenti (spr – per una definizione si veda capitolo 11.3);
- valutare il peso reciproco sulle variazioni morfologiche del tratto tra i processi di erosione laterale e al fondo.

L'analisi è stata condotta seguendo alcuni passaggi che vengono descritti di seguito nel dettaglio.

Step 1

Si è suddiviso tutto il *grid* associato al tratto studio in 32 settori di larghezza 1 km misurata in senso nord-sud come illustrato nella seguente Figura 79.

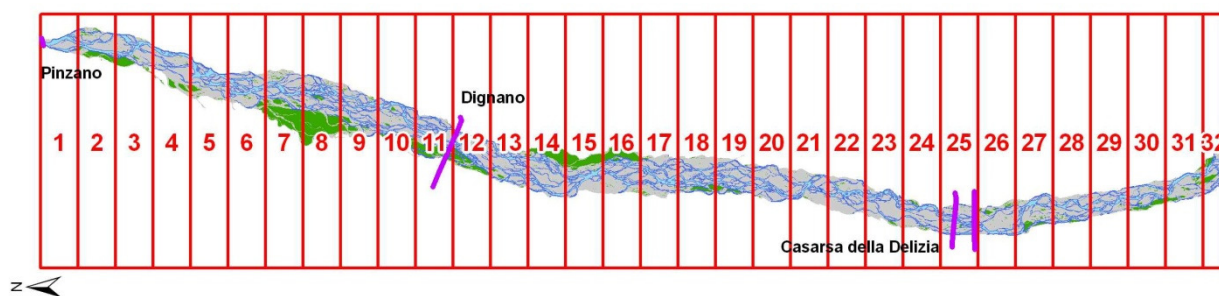


Figura 79 - Suddivisione nei 32 settori utilizzati per il calcolo del bilancio di sedimenti

La suddivisione in sottotratti non perpendicolari all'asse geometrico dell'alveo è stata indotta dall'impostazione richiesta da CAESAR di predisporre i DEM a descrizione delle condizioni al contorno di fondo immessi in *input* alle simulazioni con disposizione della direzione principale di scorrimento monte-valle in senso sinistra-destra (si veda anche la descrizione del *flow-sweeping* al capitolo 6.7.1.2). Per evitare di sottoporre a *resampling* il DEM originario si è eseguita per tutti i DEM iniziali una rotazione di 90° in senso antiorario per adattare alle richieste modellistiche la direzione principale dell'asse del tratto disposta proprio in direzione nord-sud.

Step 2

Si sono eseguite una serie di simulazioni riutilizzando la configurazione di parametri adattata in sede di validazione (11.3) variando però il valore del fattore di ricircolo *spr* (sottocapitolo 11.3.1) secondo i seguenti valori: 0.5, 0.75, 1, 1.5 e 2. Per ogni simulazione sono stati valutati i seguenti aspetti (Tabella 59):

- *performance* area bagnata (F_w - A.3.2);
- *performance* alveo attivo (F_{ac} - A.3.6);
- numero di celle attivate durante la simulazione;
- variazione altimetrica globale mediata sulle celle attivate [cm];
- variazione volumetrica complessiva a scala di tratto [m^3];
- grado di attività morfologica al fondo (variazione altimetrica media calcolata solo per le celle attive sul fondo, volume totale variato al fondo);
- grado di attività laterale (variazione altimetrica media calcolata solo per le celle laterali rispetto alla configurazione d'alveo di avvio del 2001, volume totale variato nelle celle laterali);
- portate solide medie annue prodotte dai singoli processi.

E' stato inoltre affrontato un confronto tra le risposte altimetriche prodotte al variare del parametro *spr*. Questo confronto è stato condotto in modo qualitativo osservando i *pattern* di erosione e deposizione (Figura 80), ma anche per via quantitativa confrontando l'andamento longitudinale dell'intensità dei processi erosivi laterali e al fondo (Figura 81).

spr	VALUTAZIONE PLANIMETRICA			VALUTAZIONE COMPLESSIVA			TRASPORTO SOLIDO AL FONDO			ATTIVITA' EROSIONE LATERALE			PORTATE MEDIE ANNUE DI SEDIMENTI DISTINTE PER SORGENTE			
	F _w	F _{ac}	ΔL _{ac} 2001-2009	Num. totale celle attive	ΔZ media [cm]	Volume variazione complessiva [m3]	ΔZ media [cm]	Num. celle erosione fondo	Variazione volumetrica a al fondo [m3]	ΔZ media [cm]	Num. celle erosione laterale	Variazione volumetrica a laterale [m3]	Qs media annua in output al tratto [Mm3 / anno]	Qs media annua in input al tratto [*] [Mm3 / anno]	Qs media annua da dinamica laterale [**] [Mm3 / anno]	Qs media annua da dinamica al fondo [**] [Mm3 / anno]
0.5	23.5%	84.7%	51	51,999	0.57	186,880	-1.52	38,178	-362,827	6.36	13,821	549,707	60,363	30,182	68,713	- 45,353
0.75	23.6%	84.9%	50	52,128	0.29	93,977	-1.77	38,192	-423,713	5.94	13,936	517,690	59,798	44,849	64,711	-52,964
1	23.7%	84.7%	52	52,375	0.15	50,990	-1.99	38,165	-476,001	5.93	14,210	526,992	60,356	60,356	65,874	-59,500
1.5	23.6%	84.9%	50	52,184	-0.07	-23,731	-2.37	38,172	-565,810	6.19	14,012	542,079	62,047	93,071	67,760	-70,726
2	23.3%	84.9%	54	54,780	-0.20	-69,890	-2.31	38,198	-552,094	4.65	16,582	482,204	66,303	132,606	60,276	-69,012

[*] valutata moltiplicando la portata media in output per il fattore spr; [**] valutata dividendo per 8 anni il volume corrispondente totale
Valori di variazione altimetrica o volumetrica positivi indicano incisione, valori negativi indicano invece aggradazione

Tabella 59 - Riepilogo dei risultati delle simulazioni effettuate nell'ambito dello step 2 del calcolo del bilancio di sedimenti

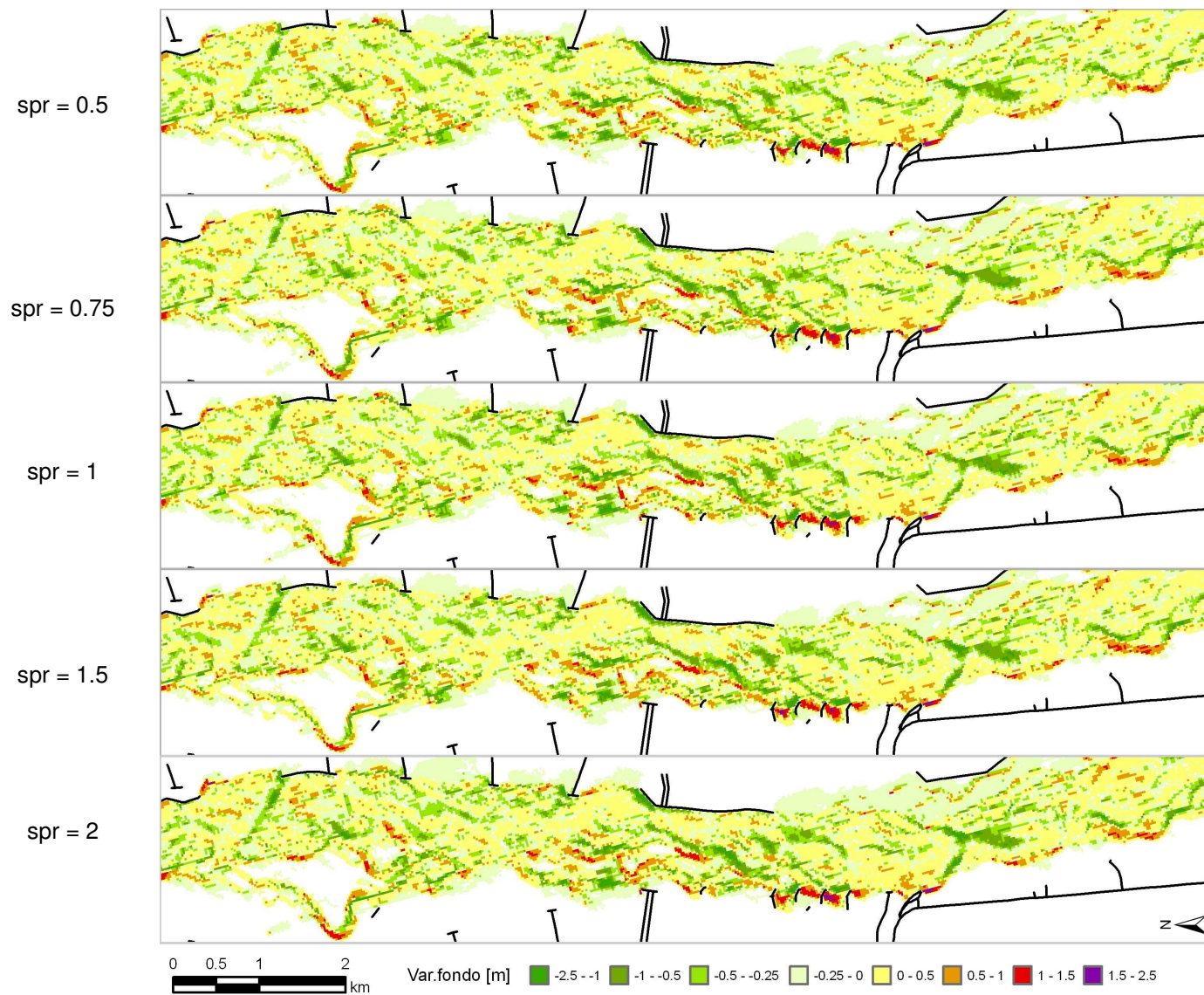


Figura 80 - Confronto visivo tra i *pattern* erosivo-deposizionali al variare del fattore spr

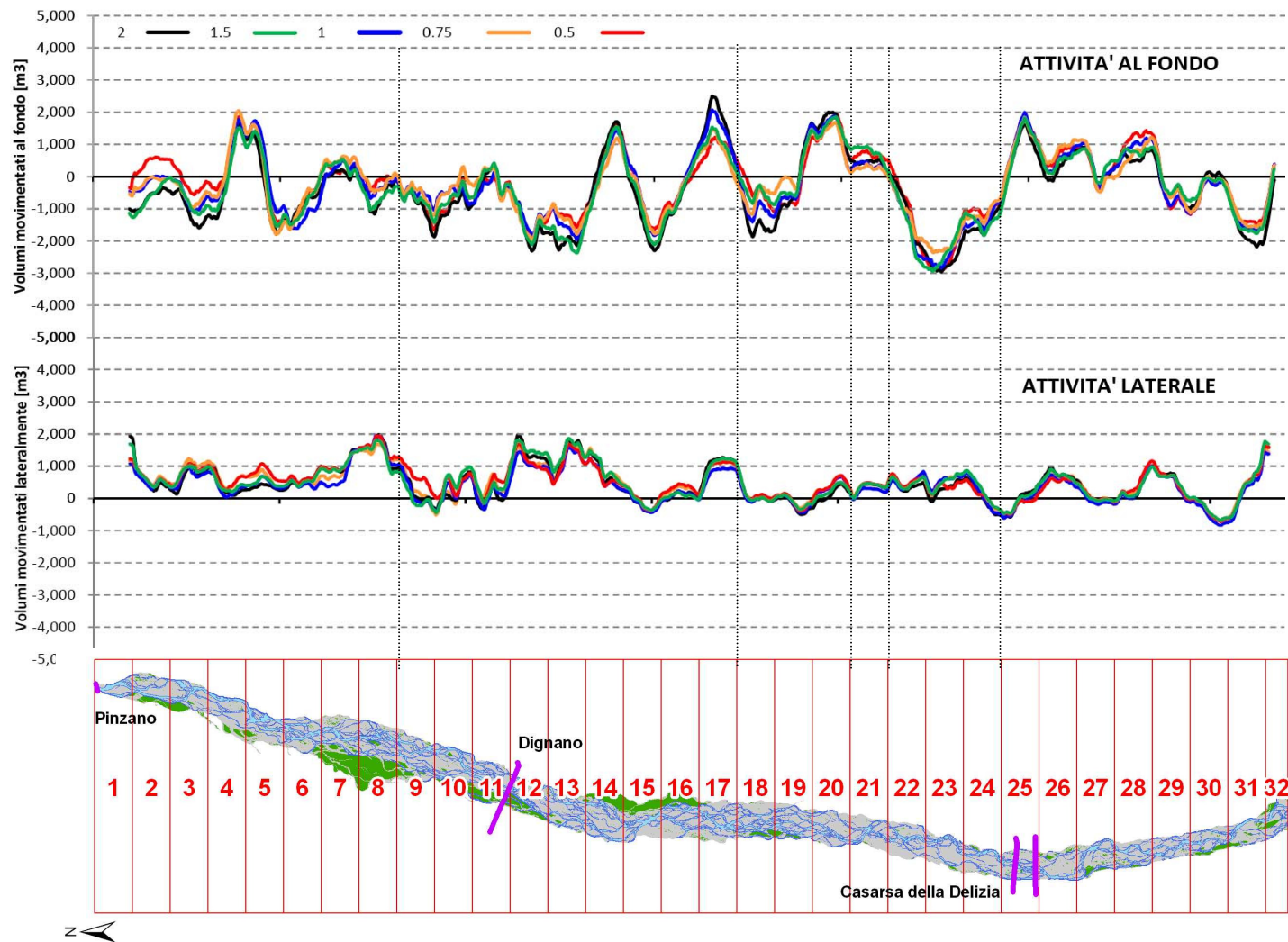


Figura 81 - Variazione longitudinale dei volumi di sedimenti movimentati da attività LATERALE e AL FONDO (grafici riprodotti al variare del fattore spr). Gli andamenti longitudinali sono stati ricostruiti attraverso un processo di media mobile a passo di 40 celle di 25 m

La distinzione dei processi erosivi al fondo e laterali è stata effettuata considerando “laterali” le celle collocate esternamente all’alveo all’avvio della simulazione (2001) che, tra il 2001 e il 2009, hanno manifestato variazioni altimetriche. Viceversa solo le celle che nel 2001 ricadevano all’interno dell’alveo attivo sono state considerate per valutare le dinamiche di fondo alveo. Questa semplificazione non tiene conto del fatto che, in caso di forte arretramento spondale le celle in precedenza esterne all’alveo e ricomprese al suo interno dopo l’allargamento, di fatto, in caso di nuovi eventi di piena dovrebbero essere considerate come appartenenti al fondo e quindi essere ricomprese nelle elaborazioni relative alle dinamiche di fondo piuttosto che a quelle associate al processo di erosione laterale. Il contrario vale per celle presenti in porzioni attive all’avvio delle simulazioni che nel tempo hanno invece manifestato disattivazione e successiva erosione laterale.

Dalla rielaborazione dei valori riportati in precedenza emergono i rapporti nella seguente Tabella 60.

spr	F _w	F _{ac}	ΔZ media [cm]	Qs laterale / Qs monte	Qs fondo / Qs monte	Qs laterale / Qs fondo	Variazione percentuale Qs <i>output</i> al variare del fattore spr
0.5	23.5%	84.7%	0.57	227.7%	-150.3%	-151.5%	-0.01%
0.75	23.6%	84.9%	0.29	144.3%	-118.1%	-122.2%	-0.95%
1	23.7%	84.7%	0.15	109.1%	-98.6%	-110.7%	-
1.5	23.6%	84.9%	-0.07	72.8%	-76.0%	-95.8%	2.88%
2	23.3%	84.9%	-0.20	45.5%	-52.0%	-87.3%	9.99%

Tabella 60 - Riepilogo dei rapporti tra i processi di movimentazione di sedimenti al fondo e lateralmente al variare del fattore di ricircolo spr

L’osservazione dei risultati sintetizzati Tabella 60 e nelle figure riportate in precedenza (Figura 80, Figura 81) conduce alle seguenti valutazioni:

- Per una serie temporale di circa 8 anni come quella simulata, il fattore di amplificazione del ricircolo di sedimenti (spr) non produce variazioni significative sulla *performance* planimetrica del modello, ma altera la risposta altimetrica al punto da invertire il *trend* altimetrico globale (lieve incisione per spr minore o uguale ad 1, lieve aggradazione per spr maggiore di 1) e invertire l’importanza relativa tra i processi laterali e al fondo rispetto al bilancio di sedimenti complessivo.
- La variazione del fattore spr (e con esso della portata solida in *input* al tratto) non altera sensibilmente la portata solida in *output* dal tratto, ovvero in 8 anni l’effetto legato all’incremento di portata solida non si risente in modo significativo in tutto il tratto. Rispetto alla simulazione con perfetto ricircolo (spr = 1) per valori di spr inferiori ad 1 si nota solo una diminuzione lieve della produzione di sedimenti nella sezione di chiusura; per contro raddoppiando la portata solida immessa da monte nella sezione di valle si nota un aumento della portata solida corrispondente di solo il 10%.
- Non si hanno variazioni relative significative del *pattern* erosivo-deposizionale al variare del valore del fattore spr. Questo aspetto è evidente qualitativamente in Figura 81 e quantitativamente in Figura 80 dove la forte corrispondenza tra i grafici riportati in funzione del variare del fattore spr indica una sostanziale invarianza dell’*output* erosivo-deposizione in funzione della quantità di *input* solido da monte. Le maggiori discrepanze tra i grafici si osservano nelle porzioni più a monte in cui al diminuire dell’apporto solido immesso si osserva una locale crescente incisione.

- Come anticipato al capitolo 11.3.1 al momento della scelta del valore per il parametro spr da adottare in sede di validazione, solo per fattori di spr superiori ad 1 si manifesta una variazione del fondo di aggradazione complessiva, seppur molto lieve.

Alla luce di tutte queste valutazioni si è scelto di procedere nella valutazione del bilancio di sedimenti longitudinale fissando spr pari a 1.5.

Step 3

In seguito alle valutazioni emerse dallo *step* di analisi precedente si è proceduto nel calcolo della variazione longitudinale del trasporto medio annuo effettivo. A questo fine si è proceduto effettuando un totale di 32 simulazioni, ciascuna impostata su un tratto con apice a Pinzano e sezione di chiusura coincidente con il limite di valle di ciascuno dei settori visibili in Figura 79. Per ogni simulazione si è proceduto immettendo a monte la serie delle portate liquide associata alla simulazione di validazione (capitolo 11.3.1, Figura 77) ed in associazione a queste portate liquide si è inserita la serie delle portate di sedimenti prodotti nella sezione di chiusura del tratto intero (32 km) amplificata del fattore spr scelto in seguito allo *step 2* descritto in precedenza (spr = 1.5). Per ogni simulazione così effettuata si è calcolata la portata solida media, minima e massima annua fatta registrare nel periodo 9/4/2001 – 19/5/2009 in uscita dal limite di valle di ogni singolo settore. Questa portata solida è stata assunta come rappresentativa dell'effettivo trasporto al fondo associato al settore corrispondente.

I 32 valori ottenuti sono stati graficati nella seguente Figura 82, in cui i valori di trasporto medio annuo minimo è associato all'anno 2005, e il massimo al 2002. Il valore medio annuo tiene conto di tutti gli anni accorpando il 2001 e 2009, solo parzialmente coperti dall'idrogramma simulato. Pare opportuno osservare che il valore medio appare lievemente sottostimato a causa delle eccezionale scarsità dei deflussi durante l'anno 2005, l'anno che storicamente ha fatto registrare il minimo storico associato al massimo di portata annuale (come già anticipato al sottocapitolo 5.3). Per una discussione dell'andamento dei valori medi di trasporto effettivo al fondo si rimanda alle successive discussioni (sottocapitolo 14.1).

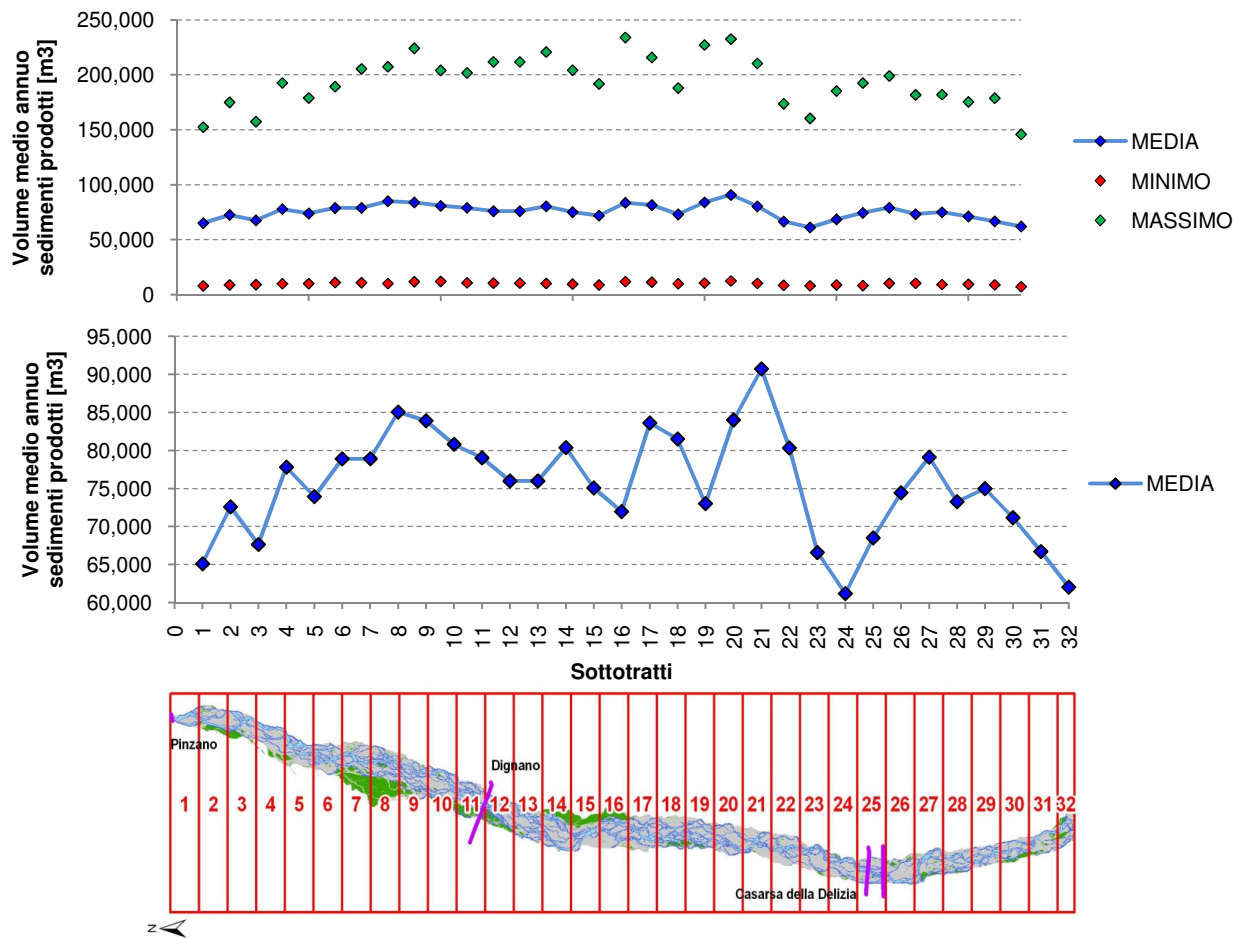


Figura 82 - Variazione longitudinale del trasporto solido al fondo medio annuo prodotto. Valori massimi-minimi-medi calcolati sul periodo 2001-2009

13.2 Scenari futuri

Alla luce dei risultati ottenuti nella Parte II della tesi (analisi di sensitività – calibrazione - validazione) ed in considerazioni delle convinzioni espresse nell'introduzione a questa Parte III, si è ritenuto che applicare CAESAR a fini previsionali sia comunque appropriato, resta solo da scegliere come farlo.

In questo contesto la scelta è ricaduta sull'applicazione di una tipica strategia cosiddetta “*what-if scenario*” (Oreskes et al, 1994; Nicholas, 2005), ovvero si sono impostati ipotetici e verosimili scenari futuri che cercano di valutare i possibili effetti indotti a scala di tratto da possibili scelte gestionali dei sedimenti a scala locale o di bacino. Tutti gli scenari sono stati impostati sullo stesso tratto oggetto di validazione (11.3), impostato tra la stretta di Pinzano e le località S.Paolo-Carbona di sviluppo pari a circa 33 km pendenza media pari a 3.3%, morfologia unica a canali intrecciati (Figura 62). Tutti gli scenari sono stati impostati a copertura di un periodo di circa 80 anni dal 2001 al 2090 (gli anni reali toccati sono 90, ma si indica 80 in quanto il 2010 è stato solo parzialmente coperto) utilizzando la serie idrometrica reale misurata presso l'idrometro di Pinzano [Villuzza-San Pietro] dal 01/01/2000 al 28/02/2010 visibile nella seguente Figura 83.

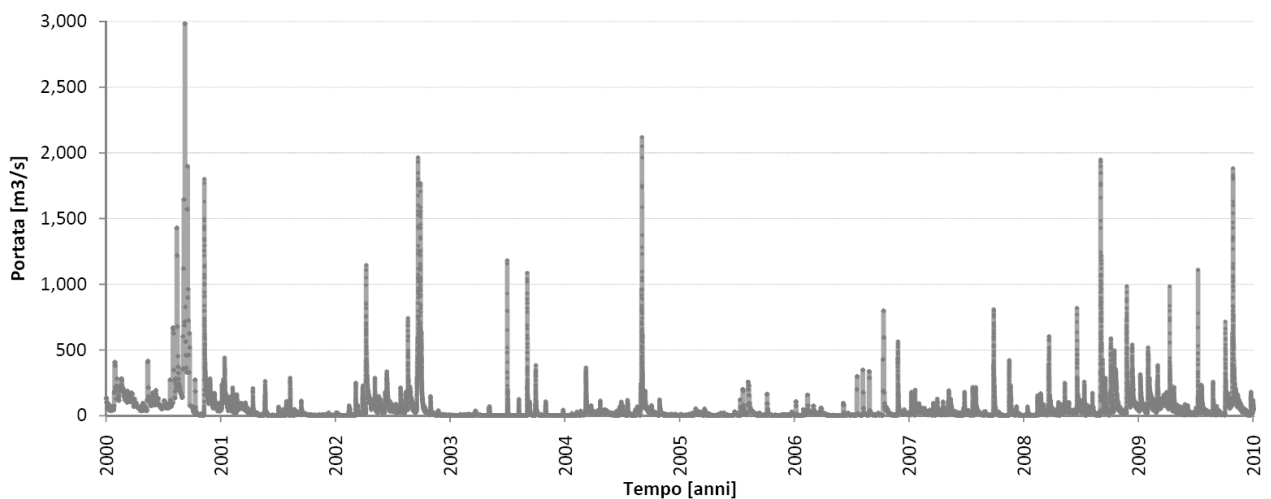


Figura 83 - Serie idrometrica storica misurata presso la stazione di Pinzano [Villuzza-San Pietro] dal 1/1/2000 al 28/2/2010

La serie decennale riportata in Figura 83 costituisce una ottima serie idrologica dal punto di vista statistico in quanto presenta una successione di eventi davvero significativi (Tr 5-12 anni nel 2000, 2002 e 2004) associati anche a periodi di forte riduzione dei deflussi (l'anno 2005 è stato quello che ha fatto registrare il minimo storico relativo al massimo livello di piena annuale). Le sue caratteristiche statistiche hanno indotto ad utilizzarla per creare una successione idrometrica di 80 anni da riprodurre nell'ambito di tutti gli scenari futuri, una serie che fosse ragionevolmente media e verosimile per entità dei picchi e frequenza degli eventi formativi. Questa serie di 80 anni è stata costituita semplicemente affiancando per otto volte la serie storica riportata in Figura 83 fino a costituire l'idrogramma riportato nella seguente Figura 84. La conversione dei livelli in portate è stata effettuata utilizzando la scala di deflusso riportata al capitolo 7.3. Anche in questo caso sono state omesse dalla serie i livelli associati a portate inferiori al valore di 100 m³/s, portata molto prossima a quella formativa delle barre più basse (Surian et al, 2009a). A differenza delle portate inserite in tutte le simulazioni della Parte II e per il *sediment budget*, per gli scenari futuri le portate sono state inserite con passo giornaliero, considerando sempre il picco giornaliero ricavato dalla serie oraria reale.

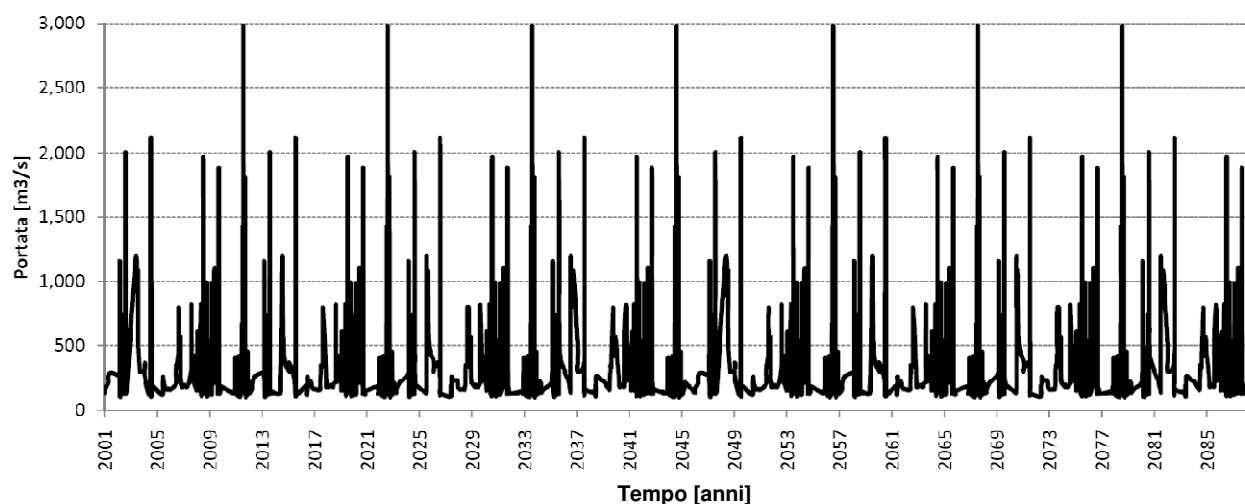


Figura 84 - Serie idrometrica di 80 anni utilizzata per tutti gli scenari futuri

Per ogni scenario sono stati valutati i seguenti aspetti:

- larghezza media finale dell'alveo attivo [m];
- variazione altimetrica globale mediata sulle celle attivate [cm];
- portate solide medie annue prodotte nella sezione di chiusura [m³/anno];
- grado di attività morfologica al fondo (variazione altimetrica media calcolata solo per le celle attive sul fondo, volume totale variato al fondo, andamenti longitudinali dei volumi movimentati al fondo);
- grado di attività morfologica laterale (variazione altimetrica media calcolata solo per le celle laterali rispetto alla configurazione d'alveo di avvio del 2001, volume totale variato nelle celle laterali, andamenti longitudinali dei volumi movimentati lateralmente);
- volume medio annuo di sedimenti prodotto dai singoli processi.

Complessivamente sono stati impostati e portati a termine quattro scenari brevemente descritti nella seguente tabella.

N° scenario	Intervento gestionale	Scala spaziale di intervento	Breve descrizione
1	Non intervento	-	Ricircolo (spr) 1.5, strutture antropiche non modificate
2	Interventi che aumentano l'apporto di sedimenti al sistema	A scala di tratto	Ricircolo 1.5, rimozione totale dei repellenti fluviali e delle difese laterali
3		A scala di bacino	Ricircolo 2.0, strutture antropiche non modificate
4	Interventi che provocano diminuzione di apporto di sedimenti al sistema	A scala di bacino	Ricircolo 0.5, strutture antropiche non modificate

Tabella 61 - Riepilogo descrittivo degli scenari futuri affrontati

13.2.1 Scenario 1 - “non intervento”

Questo scenario è stato impostato con l'intenzione di valutare l'evoluzione morfologica nei prossimi 80 anni nell'ipotesi che future politiche gestionali del Tagliamento non prevedano alcuna forma di intervento sull'attuale dinamica dei sedimenti, ovvero ipotizzando che siano mantenuti l'attuale configurazione di difese spondali, arginature e repellenti attivi, e che rimanga invariata l'attuale costante disponibilità di sedimento in ingresso a Pinzano.

Il rapporto di ricircolo spr è stato impostato pari a 1.5. La serie idrometrica di *input* a monte è quella riportata in Figura 84. La serie idrometrica introdotto ha generato una corrispondente serie di valori di portata solida in *output* come riportata nella seguente Figura 85, a cui si associa un valore di portata media annua di sedimenti prodotti in uscita al tratto pari a circa 77,900 m³/anno.

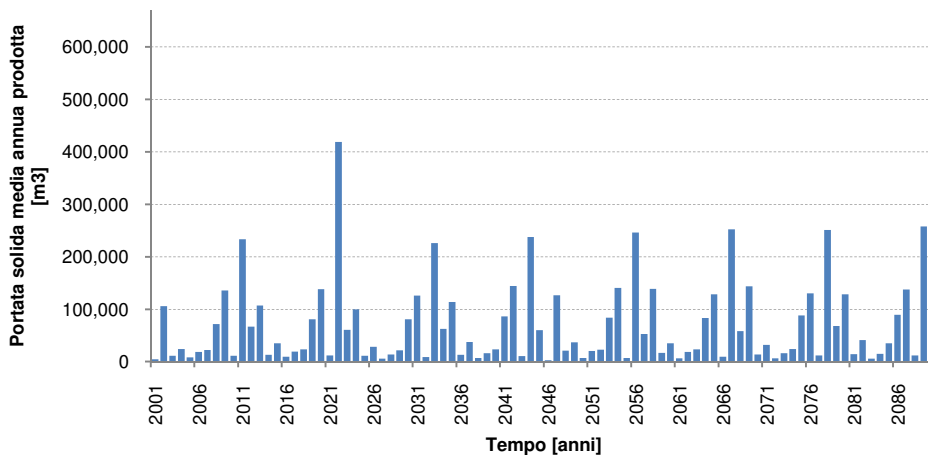


Figura 85 - Scenario 1: Serie delle portate solide medie annue in *output* al tratto ricircolate secondo il fattore spr 1.5

La larghezza media dell'alveo ha seguito la traiettoria riportata nella seguente Figura 86, in cui al valore di larghezza è associato anche il *trend* altimetrico globale mediato solo sulle celle attivate.

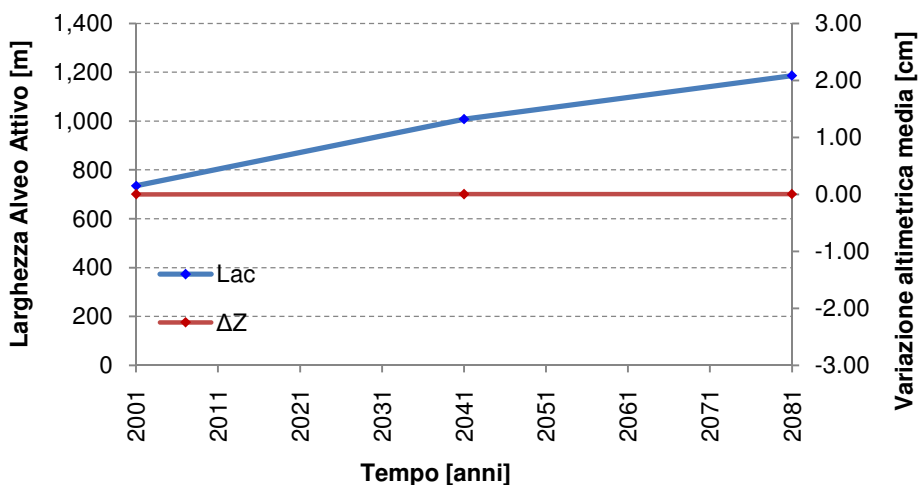


Figura 86 - Scenario 1: Variazione della larghezza media dell'alveo attivo e variazione altimetrica media globale associata

Le elaborazioni condotte sui volumi di sedimenti movimentati al fondo o lateralmente hanno permesso di produrre i grafici riportati nelle seguenti Figura 87 e Figura 88. Il primo rappresenta l'andamento longitudinale dei volumi movimentati (valori positivi indicano volumi erosi, negativi depositati) distinti tra i processi laterali e al fondo. Il secondo grafico costituisce una rivisitazione degli stessi valori in chiave cumulata in senso longitudinale. In entrambi i casi i valori sono stati ottenuti elaborando il file di *output* "elev_diff.txt" (si veda Appendice A.2) al termine degli 80 anni di simulazione. I valori sono prodotti con passo 25 m, ovvero per ogni colonna del *raster* (di larghezza 25 m) sono stati sommati tutti i valori di variazione altimetrica misurati per ogni cella della singola colonna. La somma dei valori è stata moltiplicata per l'area di una cella (25x25 m) ottenendo i volumi graficati.

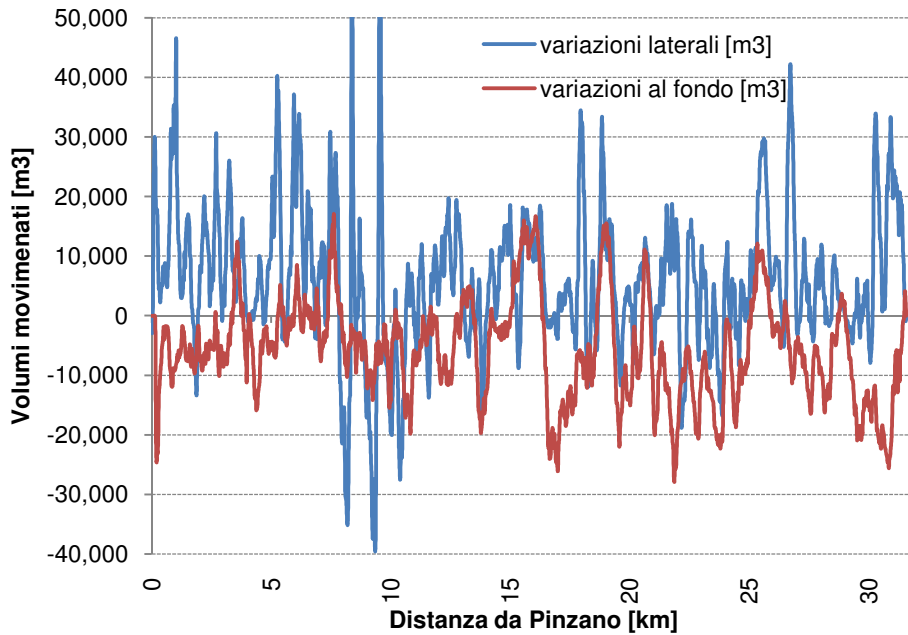


Figura 87 – Scenario 1: Variazione longitudinale dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione

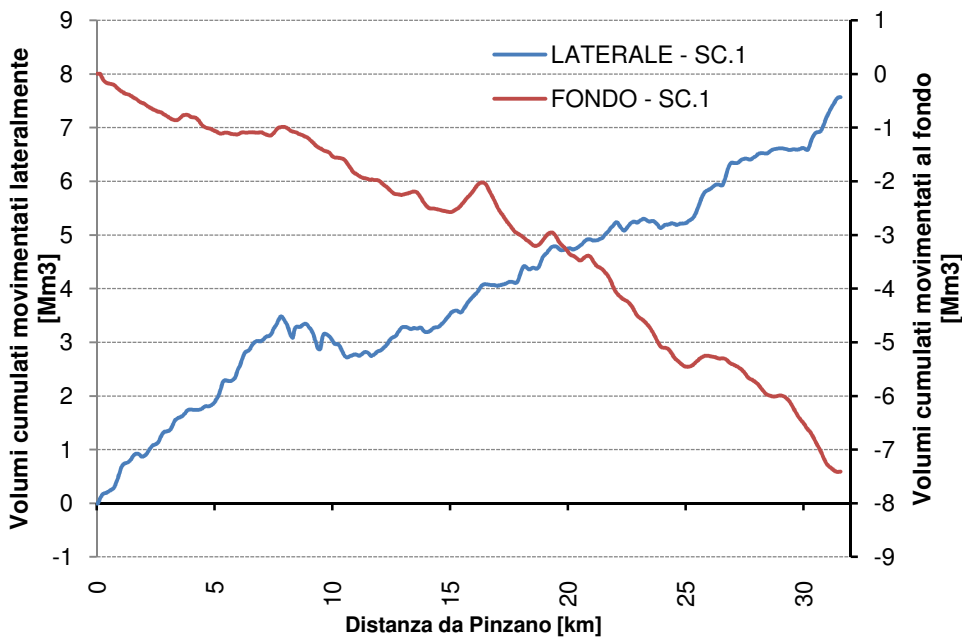


Figura 88 - Scenario 1: Variazione longitudinale cumulata dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione

L'osservazione della Figura 87 mostra una sostanziale invarianza altimetrica del fondo, associata ad un allargamento planimetrico costante e considerevole; la larghezza dell'alveo attivo passa dai 735 m del 2001 fino ai 1,186 m del 2080, con un incremento del 60%. I grafici in Figura 87 e Figura 88 evidenziano una generale aggradazione del fondo ed una contraria attività erosiva in corrispondenza delle fasce laterali all'alveo attivo. Interessanti sono la maggiore intensità del processo erosivo laterale a monte della grande varice di Spilimbergo seguita a valle da una zona di locale aggradazione laterale (kilometriche 7-10).

13.2.2 Scenario 2 - rimozione totale di repellenti fluviali e difese spondali

Questo secondo scenario è stato configurato con l'intenzione di valutare l'effetto a scala di tratto indotto dalla rimozione totale dei repellenti fluviali e delle difese spondali presenti (Figura 89). Si tratta chiaramente di uno scenario non del tutto realistico e altamente improbabile; la sua impostazione tuttavia consente di valutare macroscopicamente l'impatto delle strutture laterali sulla configurazione planimetrica dell'alveo e sulla dinamica di produzione laterale dei sedimenti. Come evidente anche nella seguente Figura 89, parte delle opere di canalizzazione esistenti non erano attive all'avvio delle simulazioni (2001); la rimozione è stata comunque completa, indipendentemente dal grado di attività delle singole opere in considerazione di una possibile riattivazione nel tempo anche delle strutture inattive.

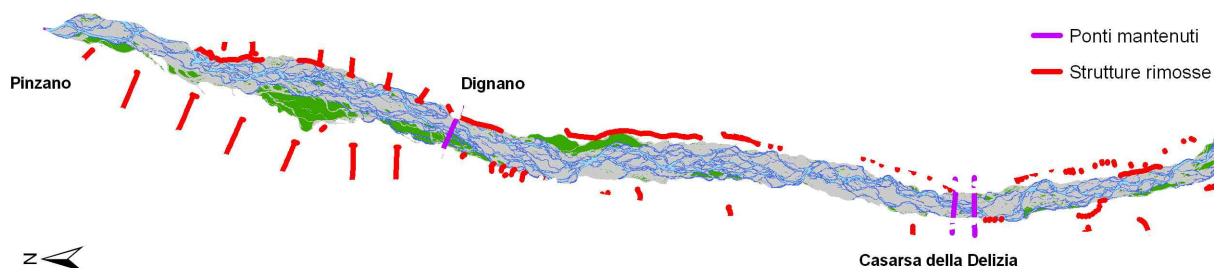


Figura 89 - Scenario 2: collocazione delle strutture di canalizzazione presenti al 2001 e rimosse all'interno dello Scenario 2

Anche durante questo scenario il rapporto di ricircolo spr è stato mantenuto pari a 1.5. La serie idrometrica di *input* a monte è stata quella riportata in Figura 84. La simulazione ha generato la serie di valori di portata solida in *output* riportata nella seguente Figura 90, a cui si associa un valore di portata media annua di sedimenti prodotti in uscita al tratto pari a circa 76,800 m³/anno.

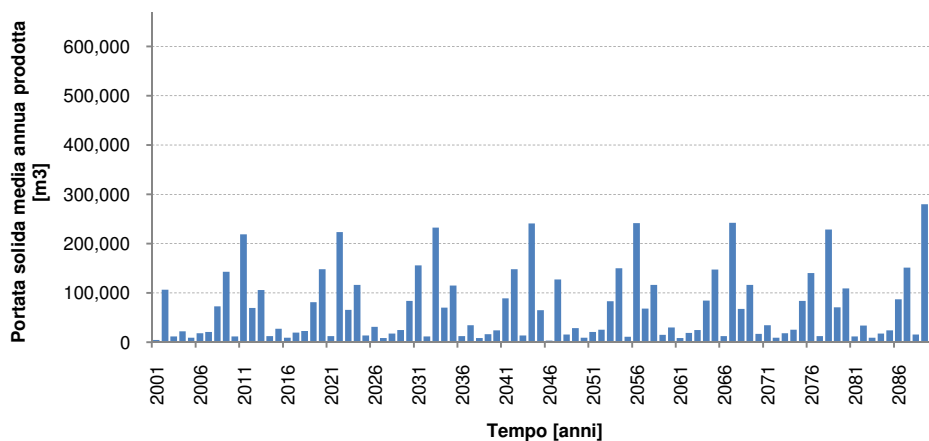


Figura 90 - Scenario 2: Serie delle portate solide medie annue in *output* al tratto ricircolate secondo il fattore spr 1.5

La larghezza media dell'alveo ha seguito la traiettoria riportata nella seguente Figura 91, in cui al valore di larghezza è associato anche il *trend* altimetrico globale mediato solo sulle celle attivate.

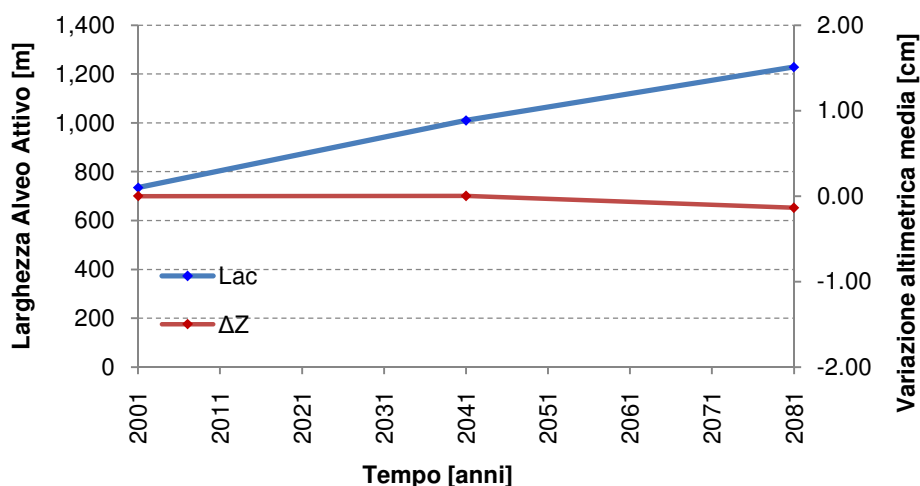


Figura 91 - Scenario 2: Variazione della larghezza media dell'alveo attivo e variazione altimetrica media globale associata

Le elaborazioni condotte sui volumi di sedimenti movimentati sul fondo e lateralmente hanno prodotto i grafici riportati nelle seguenti Figura 92 e Figura 93 (per una breve spiegazione dell'impostazione delle figure si rimanda allo Scenario 1).

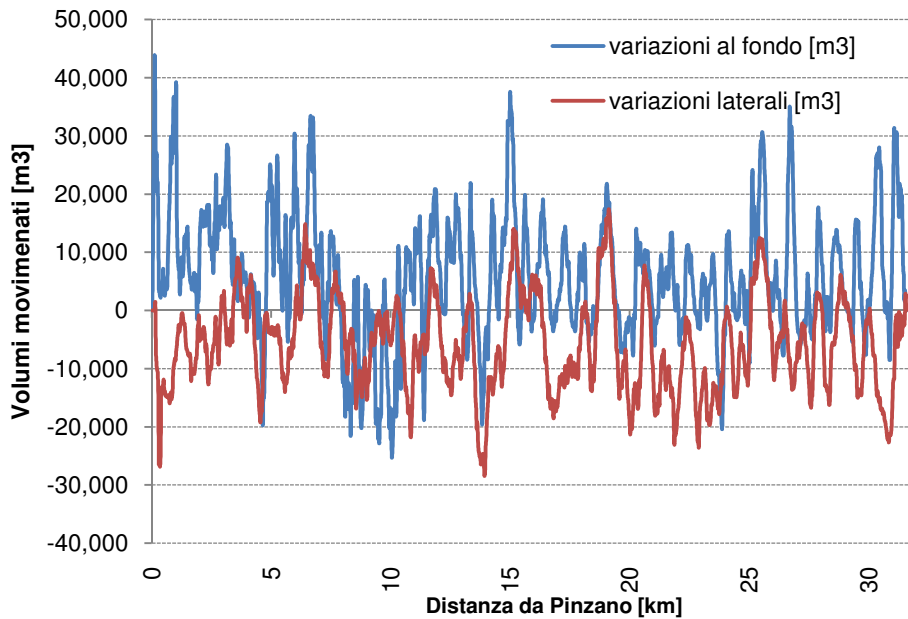


Figura 92 – Scenario 2: Variazione longitudinale dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione

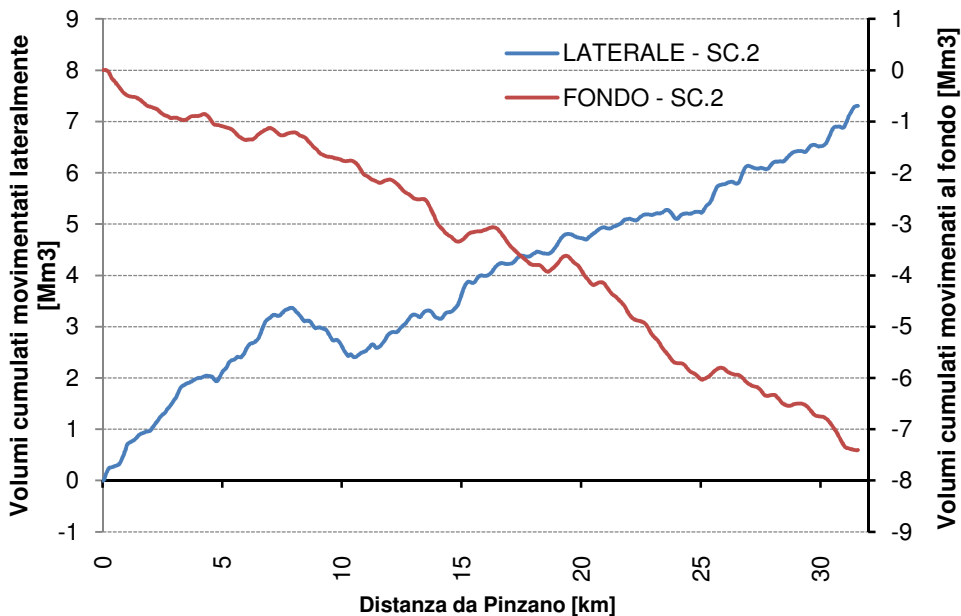


Figura 93 - Scenario 2: Variazione longitudinale cumulata dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione

L'osservazione della Figura 91 mostra anche per questo scenario una sostanziale invarianza altimetrica del fondo, associata proprio ad un allargamento planimetrico più intenso rispetto al precedente; la larghezza dell'alveo attivo passa dai 735 m del 2001 fino ai 1,230 m del 2080, con un incremento del 67%. I grafici in Figura 92 e Figura 93 evidenziano una generale aggradazione del fondo in ed una contraria attività erosiva in corrispondenza delle fasce laterali all'alveo attivo. Anche in questo scenario si nota una maggiore intensità del processo erosivo laterale a monte della grande varice di Spilimbergo (evidente osservando la maggiore pendenza della linea azzurra

passando da monte a valle della suddetta località) seguita a valle da una zona di locale aggradazione laterale (kilometriche 7-10).

13.2.3 Scenario 3 - aumento apporto solido da monte (ricircolo x 2)

Lo scenario n. 3 è stato impostato con l'intenzione di simulare gli effetti indotti da un incremento della disponibilità di sedimenti al fondo a scala di bacino o nel tratto appena a monte di Pinzano (le portate liquide associate non sono state modificate). Si tratta di uno scenario in prospettiva con buona probabilità di accadimento in considerazione della recente fase di recupero morfologico che sta interessando il tratto a monte di Pinzano (Zanoni et al. 2008). Il rapporto di ricircolo spr è stato incrementato da 1.5 a 2. Come anticipato al capitolo 13.1, questa stessa simulazione riferita al periodo 2001-2009 ha prodotto trascurabili variazioni planimetriche di *pattern* ma significative variazioni sulle reciproche dinamiche dei processi di trasporto al fondo e di erosione laterale.

La serie idrometrica introdotto ha generato una corrispondente serie di valori di portata solida in *output* come riportata nella seguente Figura 94, a cui si associa un valore di portata media annua di sedimenti prodotti in uscita al tratto pari a circa 101,600 m³/anno.

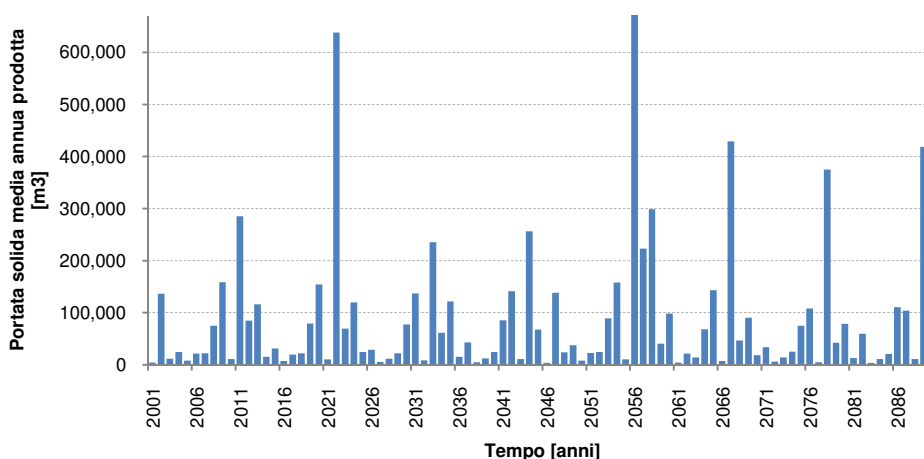


Figura 94 - Scenario 3: Serie delle portate solide medie annue in *output* al tratto ricircolate secondo il fattore spr 2

La larghezza media dell'alveo ha seguito la traiettoria riportata nella seguente Figura 95, in cui al valore di larghezza è associato anche il *trend* altimetrico globale mediato solo sulle celle attivate.

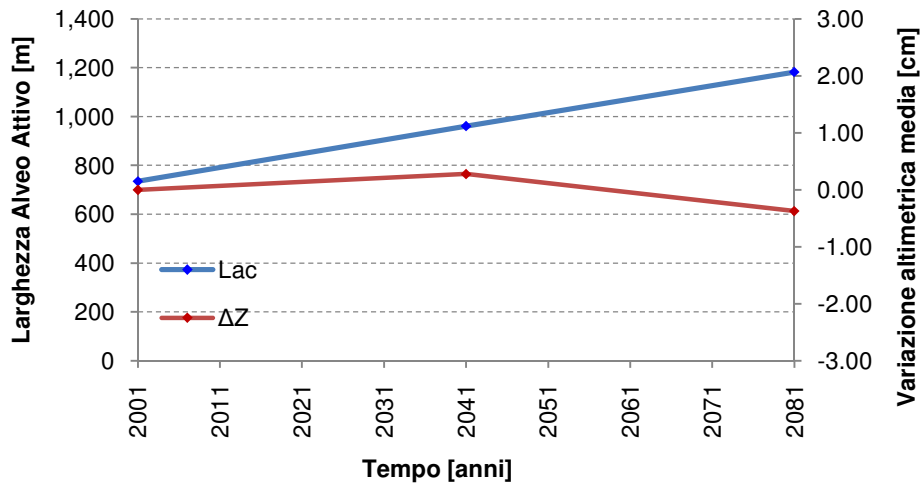


Figura 95 - Scenario 3: Variazione della larghezza media dell'alveo attivo e variazione altimetrica media globale associata

Le elaborazioni condotte sui volumi di sedimenti movimentati al fondo o lateralmente hanno prodotto i seguenti grafici (per una breve spiegazione dell'impostazione delle figure si rimanda allo Scenario 1).

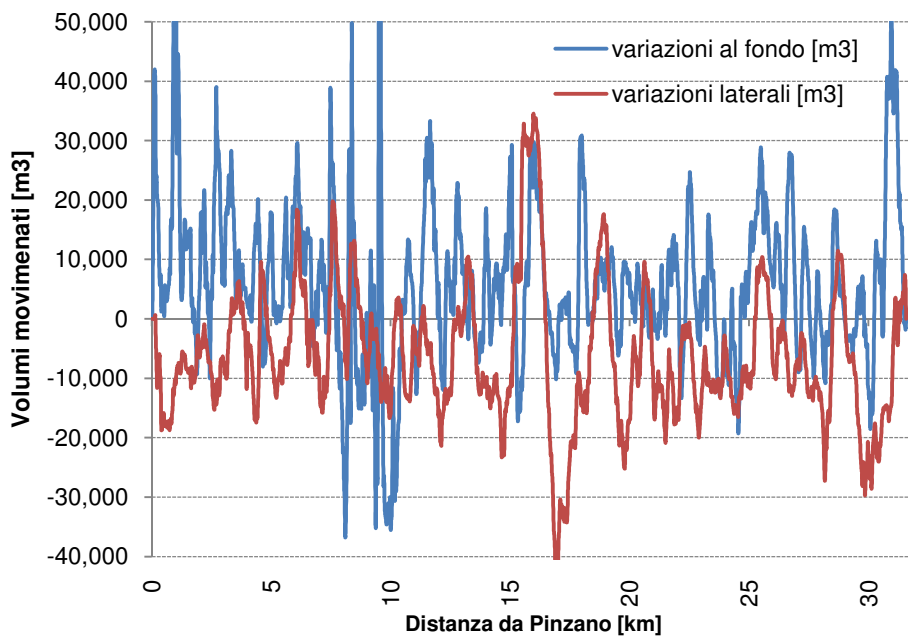


Figura 96 – Scenario 3: Variazione longitudinale dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione

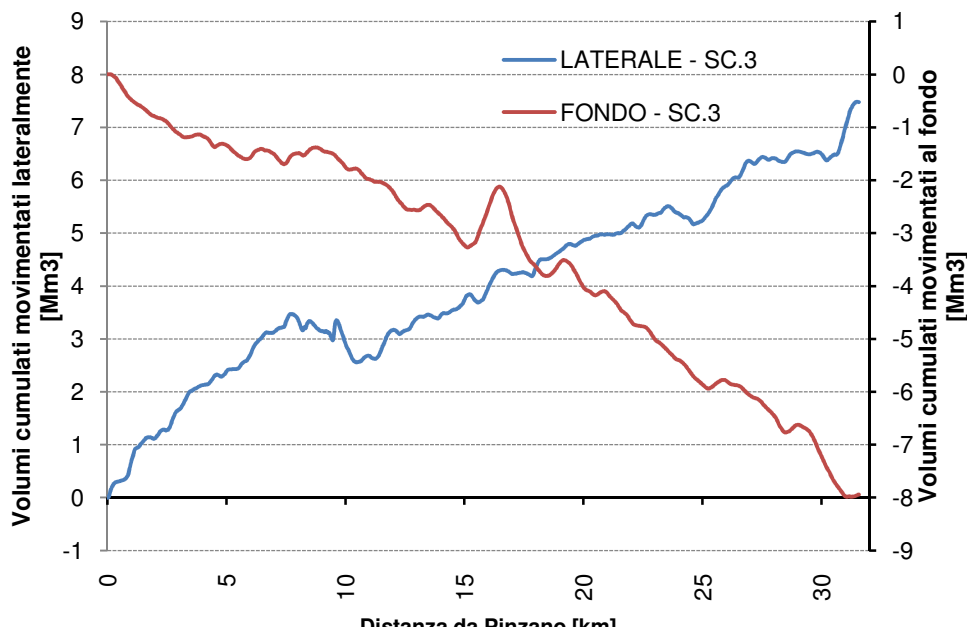


Figura 97 - Scenario 3: Variazione longitudinale cumulata dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione

L'osservazione della Figura 95 mostra per questo scenario una sostanziale invarianza altimetrica del fondo per i primi 40 anni di simulazione, seguita da una non trascurabile aggradazione negli ultimi 40 anni; la suddetta variazione altimetrica si associa ad un allargamento planimetrico del tutto simile a quello manifestato dallo scenario 1; la larghezza dell'alveo attivo passa dai 735 m del 2001 fino ai 1,182 m del 2080, con un incremento di circa il 60%. I grafici in Figura 96 e Figura 97 evidenziano ancora una generale aggradazione del fondo ed una contraria attività erosiva in corrispondenza delle fasce laterali all'alveo attivo. Le variazioni longitudinali dei volumi di sedimenti movimentati al fondo e lateralmente sono del tutto simili a quelli ottenuti per lo scenario 1 eccezion fatta per il valore del volume complessivamente movimentato al fondo che in questo scenario risulta superiore di circa 500,000 m³.

13.2.4 Scenario 4 - riduzione dell'apporto solido da monte (ricircolo x 0.5)

L'ultimo scenario è stato impostato al fine di valutare i possibili effetti indotti da una diminuzione dell'apporto solido da monte. Questo scenario riflette eventuali effetti indotti da interventi nei tratti più a monte di Pinzano quali la ripresa di attività di estrazione di sedimenti in alveo o la realizzazione di nuove opere di canalizzazione, oppure interventi eseguiti a scala di bacino come la realizzazione di ulteriori opere di sistemazione idraulico-forestale (si ritiene poco probabile un ulteriore incremento della copertura boschiva a scala di bacino che attualmente manifesta percentuali di copertura già molto elevate, superiori al 73 % - capitolo 4.4.3).

La serie idrometrica introdotta ha generato una corrispondente serie di valori di portata solida in *output* come riportata nella seguente Figura 98, a cui si associa un valore di portata media annua di sedimenti prodotti in uscita al tratto pari a circa 64,700 m³/anno.

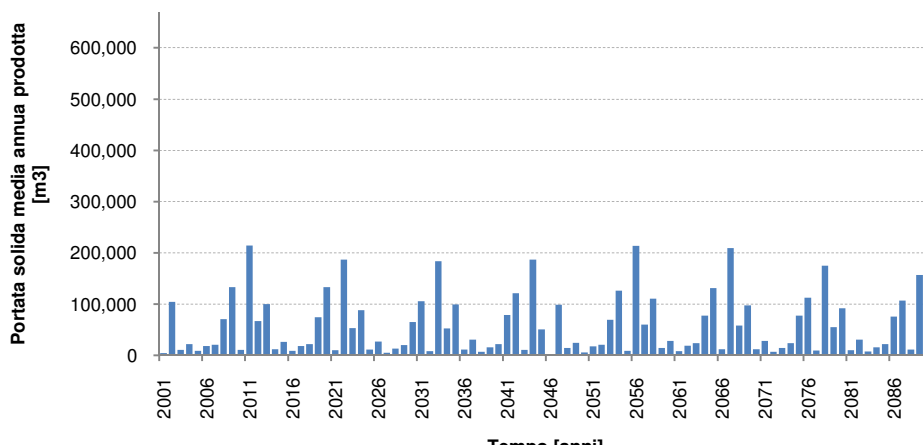


Figura 98 - Scenario 4: Serie delle portate solide medie annue in *output* al tratto ricircolate secondo il fattore spr 0.5

La larghezza media dell'alveo ha seguito la traiettoria riportata nella seguente Figura 99, in cui al valore di larghezza è associato anche il *trend* altimetrico globale mediato solo sulle celle attivate.

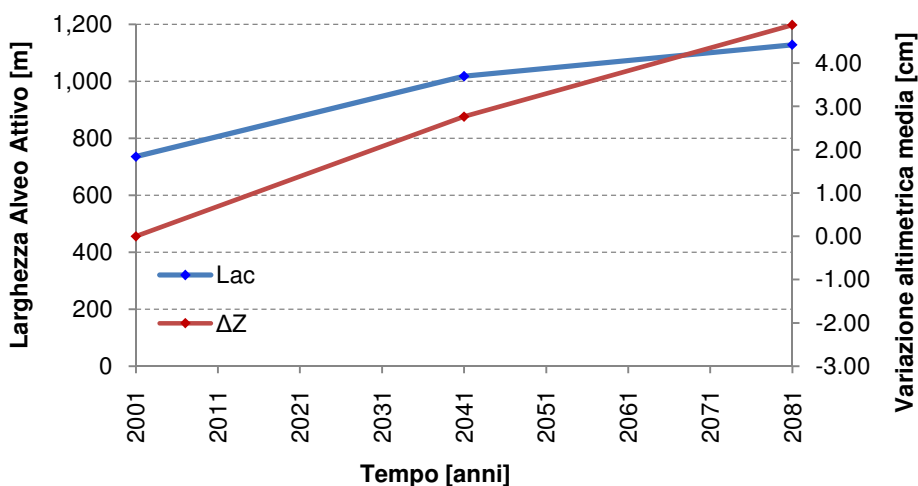


Figura 99 - Scenario 4: Variazione della larghezza media dell'alveo attivo e variazione altimetrica media globale associata

Le elaborazioni condotte sui volumi di sedimenti movimentati sul fondo o lateralmente hanno prodotto i seguenti grafici (per una breve spiegazione dell'impostazione delle figure si rimanda nuovamente allo Scenario 1).

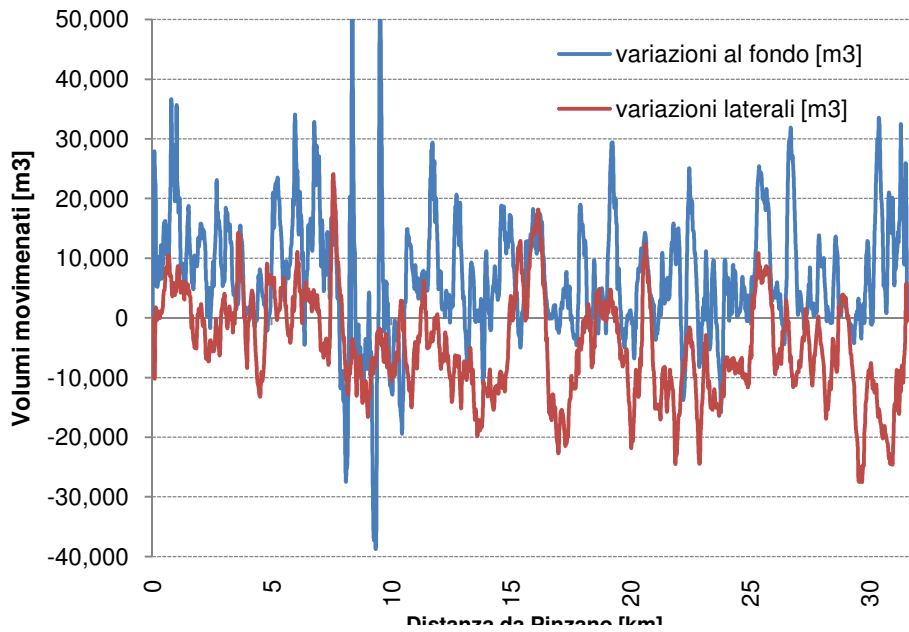


Figura 100 – Scenario 4: Variazione longitudinale dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione

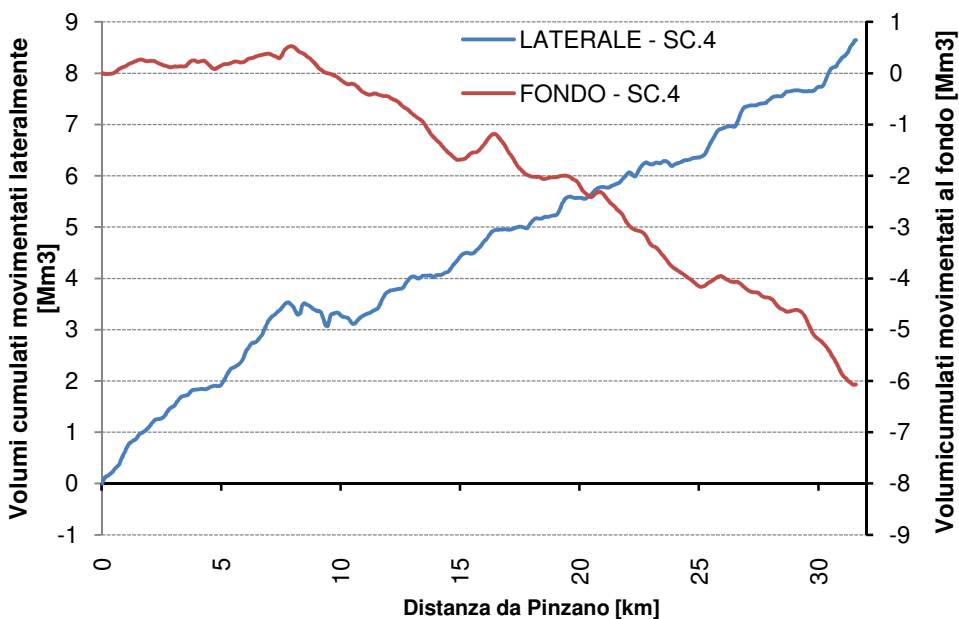


Figura 101 - Scenario 4: Variazione longitudinale cumulata dei volumi movimentati lateralmente e al fondo. Valori positivi – incisione. Valori negativi - aggradazione

L'osservazione della Figura 99 mostra una sostanziale incisione del fondo che arriva a volumi prossimi ai 2.5 Mm³ (circa 5 cm mediati a livello di singole celle attive); questa variazione altimetrica si associa ad un allargamento planimetrico più limitato rispetto a quelli di tutti gli altri scenari: la larghezza dell'alveo attivo passa dai 735 m del 2001 fino ai 1,128 m del 2080, con un incremento di circa il 53%. I grafici in Figura 100 e Figura 101 evidenziano ancora una complessiva aggradazione del fondo; in questo caso però lo scenario si distingue rispetto agli altri per il comportamento del fondo in corrispondenza dei primi 10 km posti a valle di Pinzano, dove risulta preponderante l'erosione del fondo. Nel complesso della simulazione l'attività di

movimentazione laterale di sedimenti domina su quella di aggradazione del fondo raggiungendo valori cumulati di volumi erosi prossimi ai 8.6 Mm^3 , un valore totale superiore rispetto a tutti gli altri scenari simulati.

14 Discussione

Le discussioni ai risultati ottenuti nella Parte III del lavoro sono ancora una volta organizzate per chiarezza espositiva in funzione degli obiettivi preposti per questa parte e anticipati nel capitolo 1.2. Tali obiettivi possono essere così sintetizzati:

1. quantificare il bilancio di sedimenti a scala di tratto relativo alla componente di sedimenti associata al trasporto solido al fondo;
2. impostare alcuni scenari futuri per la valutazione dei possibili effetti indotti sull'evoluzione planimetrica e sulla dinamica dei sedimenti indotti da ipotetiche politiche gestionali dei sedimenti a scala di tratto o di bacino;
3. confrontare i risultati da modellazione con le indicazioni fornite dal modello concettuale definito in Surian et al, 2009e per gli alvei fluviali veneto-friulani tra cui il Tagliamento.

14.1 Sediment budget

L'analisi del *sediment budget* a scala di tratto ha permesso di verificare l'esistenza di una non trascurabile variabilità longitudinale dell'effettiva capacità di trasporto solido al fondo del Medio Tagliamento. Come evidente in Figura 82, a partire dalla stretta morfologica di Pinzano si assiste ad un crescita costante del valore medio annuo del volume di sedimenti trasportati al fondo (si tratta di trasporto effettivo e non di capacità al trasporto), crescita che raggiunge un massimo locale in corrispondenza dei settori 8-9 (circa $85,000 \text{ m}^3/\text{anno}$), ovvero nel tratto in corrispondenza dell'abitato di Spilimbergo, il maggiore per larghezza complessiva dell'alveo attivo di tutto il Tagliamento (si veda Parte I).

A questa crescita segue una lenta diminuzione proseguendo verso valle fino a ritrovare nuovamente alcuni settori 17 e 20-21 che tornano a manifestare valori medi annui simili al settore 8-9, se non addirittura maggiori (17 - circa $83,000 \text{ m}^3/\text{anno}$, 20 - circa $84,000 \text{ m}^3/\text{anno}$, 21 - circa $90,700 \text{ m}^3/\text{anno}$). Questi picchi locali si spiegano in parte osservando la Figura 81 (linea di tendenza verde riferita a spr 1.5) e combinando i valori di movimentazione dei sedimenti al fondo e laterali. In particolare il picco associato al settore 17 si giustifica in parte come il risultato di una concomitanza locale di intensità erosiva sia laterale che al fondo; la stessa concomitanza si verifica anche in corrispondenza del settore 20. Con ogni probabilità il picco del settore 21 è riconducibile al trasferimento degli ingenti volumi erosi dal settore immediatamente a monte, il numero 20, che si sommano all'attività erosiva locale comunque non trascurabile. Queste indicazioni non possono considerarsi definitive in quanto fanno riferimento a grafici (quelli proposti in Figura 81) all'interno dei quali sono riportati solo valori riferiti alle variazioni nette a fine simulazione e non permettono di quantificare il flusso che ha attraversato il settore (in particolare la sezione posta sul limite di valle), e non permettono di comprendere la diretta provenienza dei sedimenti in transito nel settore 21 che producono il picco associato di trasporto medio annuo. Proseguendo nelle valutazioni, appare interessante osservare il minimo associato ai settori 23 e 24

in corrispondenza dei quali è intensa l'aggradazione del fondo e minima l'attività erosiva laterale a causa della presenza delle opere laterali a difesa degli impalcati dei ponti di Casarsa.

I risultati prodotti complessivamente dal bilancio di sedimenti sono incoraggianti per coerenza interna e ordine di grandezza dei volumi stessi. Riprendendo ancora i dati relativi al lavoro di ricerca bibliografica sintetizzati nella Tabella 56 riportata al capitolo di validazione 11.3.2, si confermano gli ordini di grandezza indicati in letteratura per contesti simili al Tagliamento anche per i massimi valori medi annuali, superiori ai 200,000 m³/anno.

Risultano interessanti anche i risultati prodotti allo *step 2*, relativamente agli effetti indotti su finestre temporali di circa 8 anni dal fattore di ricircolo dei sedimenti, ovvero dall'aumento o dalla diminuzione dell'apporto solido da monte. Osservando i dati riportati in Tabella 60 appare evidente l'assenza di influenza del fattore di ricircolo sulla *performance* planimetrica del modello. Questo aspetto era già stato valutato in sede di validazione, ma è stato ripreso in questa Parte III per poterne approfondire altri aspetti. In proposito l'attenzione qui si è concentrata sull'analisi dei rapporti tra i processi di trasporto al fondo e laterale. Le valutazioni emerse sono svariate:

- dalla Tabella 59 si evince che il fattore spr e quindi la variazione dell'apporto solido da monte non influenza in modo davvero rilevante la variazione della quota di fondo globale a scala di tratto. La variazione altimetrica media globale oscilla tra valori comunque modesti, con un massimo di 0.57 cm (valore di variazione altimetrica per singola cella) di incisione per spr pari a 0.5, ovvero scarsa disponibilità di sedimenti da monte, e minimo di 0.2 cm medi globali di aggradazione per valori di spr pari a 2. Parlando in termini di volumi la variazione netta oscilla tra circa 187,000 e 70,000 m³, che confrontati con la soglia di errore rappresentata dalla variazione di volume fatta comunque registrare nel caso di spr =1 e ricircolo perfetto (50,000 m³) rende più evidente la modestia dell'entità globale delle variazioni indotte. Queste evidenze sono però riferite ad un arco temporale di soli 8 anni. Si rimanda alle valutazioni sugli scenari futuri (capitolo 14.2) per approfondire i risultati ottenuti per tempi di calcolo più lunghi.
- all'interno della finestra temporale di 8 anni simulata appare modesta in termini assoluti e relativi l'influenza del fattore spr sulla produzione media annua di sedimenti in chiusura al tratto (si veda l'ultima colonna della Tabella 60). Il raddoppio dell'apporto solido da monte produce un aumento della produzione media annua in chiusura al tratto di solo il 10% (da circa 60,000 per spr = 1 a circa 66,000 per spr = 2). Per contro la diminuzione di spr da 1 a 0.5 non induce variazione nella produzione media annua nella sezione di chiusura del tratto. Questi risultati coerenti con le attese teoriche, indicano chiaramente che i tempi di risposta di tutto il tratto in termini di flusso di sedimenti vanno decisamente oltre la finestra temporale di 8 anni. Si rimanda ancora agli scenari futuri (capitolo 14.2) per riscontrare se questo effetto si amplifica per finestre temporali lunghe fino ad 80 anni.
- a prescindere dall'entità assoluta delle variazioni altimetriche nette descritte ai punti precedenti appare comunque interessante far rilevare la risposta coerente manifestata dal modello al variare di spr in relazione al rapporto tra i gradi di intensità dei processi di dinamica dei sedimenti al fondo e laterali. Dalla Tabella 60 si evince come all'aumentare dell'apporto di sedimenti da monte i processi di movimentazione al fondo e laterale si invertono per importanza relativa. Ovvero per bassi valori di spr (0.5) l'attività erosiva laterale è dominante rispetto a quella al fondo (rapporto pari a 1.5 volte), viceversa in condizioni di sovralimentazione da monte (spr = 2) i volumi complessivamente aggradati al fondo sono dominanti rispetto ai volumi erosi lateralmente. Il tratto risponde infatti globalmente aggradando (seppur in modo modesto). Dalla Tabella 59 emerge inoltre chiaramente come la dinamica dei sedimenti al fondo (ovvero a centro canale) sia globalmente sempre tendente alla sedimentazione (la variazione netta dei volumi aggradati sul fondo oscilla tra 360,000 e 560,000 m³) mentre per contro lateralmente l'attività è prevalentemente di tipo erosivo (la variazione netta dei volumi incisi nelle celle laterali oscilla tra 550,000 e 480,000 m³).
- L'analisi del bilancio di sedimenti permette infine di comprendere i rapporti di importanza relativa dei singoli processi in atto nel complesso del bilancio di sistema. In condizioni di forte deficit di apporto solido da monte il processo erosivo laterale domina su tutti

mostrando valori di portata solida media annua superiori rispetto a quelli in uscita al sistema (114%) e ai volumi ceduti o erosi al fondo (151%). In condizioni di normale disponibilità di apporto da monte i contributi solidi laterali rimangono ancora leggermente superiori a quelli in uscita dal sistema (109%), ma scendono a valori prossimi o inferiori alla quota parte di sedimenti che invece aggrada o viene eroso al fondo (95 – 110 %). Infine in caso di sovrabbondanza di sedimenti il peso delle portate solide laterali cala ulteriormente scendendo al di sotto sia delle portate solide in uscita al sistema (90%) sia di quelle al fondo (87%). E' indubbio comunque che a prescindere dalla condizione di alimentazione da monte il peso della dinamica laterale all'interno di un bilancio di sedimenti a scala di tratto per morfologie *braided* è estremamente rilevante.

14.2 Commenti ai risultati prodotti dalle simulazioni di scenario

La riorganizzazione dei principali risultati illustrati al capitolo 13.2 nelle seguenti Tabella 62 e Figura 102 - Figura 105 permette di esprimere le seguenti valutazioni d'insieme riguardo agli scenari futuri simulati.

- Indipendentemente dal fatto che degli interventi gestionali vengano realizzati (scenari 2, 3, 4) o meno (scenario 1 – “non intervento”) il modello indica che, per i prossimi 70 anni (2010 - 2080), l'alveo del tratto studio proseguirà l'allargamento avviato nel 1993 (4.3.1).
- Per tutti gli scenari si evidenzia un allargamento generalizzato dell'alveo (Figura 102): al termine degli 80 anni di simulazione la larghezza media risulta oscillare tra 1,229 m (SC2) e 1,128 m (SC4) con una variazione di larghezza rispetto al 2001 che potrà oscillare tra il 67% e il 53%. Non si osservano macrodifferenze di comportamento planimetrico tra i singoli scenari. La massima larghezza prevista per lo scenario 2 (1,229 m) è superiore rispetto a quella minima prevista per lo scenario 4 (1,128 m) di solo circa il 10%.
- In coerenza con le attese, la variazione di larghezza d'alveo attivo è più consistente nello scenario 2 per il quale è prevista la rimozione di tutte le strutture antropiche di difesa laterale (repellenti e difese lineare) con l'eccezione dei manufatti a difesa diretta dei ponti (Figura 89). Coerente è anche la risposta planimetrica dello scenario 4 che a fronte di una netta diminuzione dell'apporto da monte indica un allargamento inferiore rispetto a quelli ottenuti negli altri scenari. Le risposte planimetriche prodotte dagli scenari 1 e 3 sono praticamente identiche in termini di larghezza d'alveo (Figura 102). Questa macro-invarianza planimetrica conferma le indicazioni emerse allo *step 2* del *sediment budget* (13.1), ovvero anche per tempi di simulazione più lunghi rispetto a quelli di validazione (80 anni contro 8 anni) l'aumento di apporto solido da monte (come da simulazione scenario 3) non influenza in modo significativo le dimensioni medie dell'alveo.
- Dal punto di vista altimetrico tutti gli scenari producono variazioni altimetriche globali medie (variazione mediata per singola cella attiva) modeste se non del tutto trascurabili (Figura 103). Fissando come soglia di errore il valore medio di variazione indicato in Tabella 60 (capitolo 13.1), si osserva che solo gli scenari 4 e 3 producono variazioni significative. Gli andamenti cumulati delle variazioni riportati in Figura 103 mostrano come solo lo scenario 4 produca un generale *trend* di incisione; gli scenari 1 e 2 non mostrano alterazioni del fondo, mentre lo scenario 3 mostra un aggradazione complessiva solo dopo una prima fase di leggera incisione. Si conferma quindi una indicazione di scarsa variazione altimetrica globale già emersa per tempi di simulazione più brevi nell'ambito delle simulazioni effettuate per il calcolo del *sediment budget* (*step 2*, capitolo 13.1).
- A differenza di quanto osservato per le simulazioni di 8 anni descritte al capitolo 13.1 in cui raddoppiando l'apporto da monte non si percepiva una significativa variazione della

produzione media annua di sedimenti in chiusura al tratto, in questo contesto di simulazione temporalmente più ampio la risposta sembra essere più proporzionata. Confrontando gli scenari 1 (spr 1.5) e 3 (spr 2), si nota che un incremento del 33% dell'apporto solido al sistema produce un aumento della portata solida prodotta nella sezione di chiusura di circa il 23% (valore medio SC1 77,900 m³/anno, SC3 101,634 m³/anno). Se ne può dedurre che un periodo di 80 anni è quasi sufficiente a trasferire completamente l'impulso di sedimenti a tutto il tratto studio di circa 33 km (valore medio di trasferimento verso valle dell'effetto circa 400 m/anno).

Spostando l'attenzione sui rapporti tra i principali processi di mobilitazione a fondo alveo ed erosione laterale, emergono interessanti valutazioni. Come anticipato al capitolo 13.1 la distinzione tra celle oggetto di sola attività erosiva laterale o solo movimentazione di sedimenti al fondo si è basata grossolanamente sull'appartenenza delle singole celle all'alveo di avvio alle simulazioni di scenario (alveo 2001). Maneggiando il *raster* di descrizione spaziale delle variazioni altimetriche prodotto in *output* da CAESAR ("elev_diff.txt – Appendice A.2) e classificando al suo interno le celle considerate laterali o interne, si è diviso il *raster* di partenza in due *raster* distinti, il primo contenente le sole celle laterali e quindi utile per la stima dei volumi netti erosi lateralmente, il secondo viceversa contenente solo le celle "di fondo alveo" con i relativi valori di variazione altimetrica. Attraverso un procedimento di somma cumulativa delle variazioni per tutte le celle di ogni colonna dei singoli *grid* sono stati elaborati i grafici riportati nelle seguenti Figura 104 e Figura 105, capaci di rendere in modo immediato alcune particolarità nel confronto tra gli scenari.

Attività erosiva laterale

In coerenza con quanto osservato al capitolo 13.1 per simulazioni di durata 8 anni, anche per scenari a maggiore copertura temporale la diminuzione dell'apporto da monte riprodotta dallo scenario 4 produce, rispetto alle altre situazioni di normale (SC1, SC3) o aumentato (SC2) apporto solido da monte, un incremento dell'attività erosiva laterale. Come evidente in Figura 104, la linea riferita allo scenario 4 a valle del settore dei pressi di Spilimbergo (kilometrica 8-9) rimane costantemente in una posizione superiore rispetto alle altre a testimoniare un volume cumulato di erosione laterale maggiore. Il fatto che il distacco si avvi proprio dalle kilometriche 8-9 e aumenti leggermente procedendo verso valle sembra indicare che la condizione di *deficit* di sedimenti al fondo riprodotta dallo scenario induca una locale forte attività erosiva laterale a valle della grande varice di Spilimbergo, proprio in corrispondenza del restringimento forzato indotto dalla presenza del ponte di Dignano e dalle rispettive difese spondali mantenute in simulazione. Non è un caso che nella Figura 81 la linea di tendenza corrispondente alla simulazione di 8 anni con spr 0.5 si distacchi maggiormente dalle altre linee proprio nello spazio compreso tra i settori 11 e 14 a cavallo del ponte stesso.

Osservando il valore massimo cumulato riferito ai volumi erosi lateralmente durante lo scenario 4 (valore ricavabile in modo immediato osservando l'intercetta della linea di tendenza con l'asse verticale posto più in destra al grafico) si valuta una differenza di circa 1 Mm³ rispetto a tutti gli altri scenari le cui linee terminano ad un livello pressoché coincidente intorno ai 7.5 Mm³. Confermano queste evidenze grafiche i valori di portata solida media annua afferente al sistema da dinamica laterale indicata in Tabella 62. Lo scenario 4 manifesta valori superiori rispetto agli altri scenari, seguito dallo scenario 2 che nonostante la rimozione dei repellenti fornisce risposte inferiori in termini di volumi di sedimenti che derivano dall'erosione laterale.

Attività erosiva al fondo

L'analisi separata della dinamica dei sedimenti al fondo prende spunto dai grafici cumulati riportati nella seguente Figura 105. Anche in questo caso lo scenario che si distingue maggiormente rispetto agli altri è il numero 4 caratterizzato da un valore di ricircolo pari a 0.5. Si conferma il comportamento già fatto osservare nell'ambito delle discussioni alle elaborazioni del

sediment budget al capitolo precedente (14.1), ovvero a simulazioni con bassi valori di ricircolo, anche per periodi di simulazione più lunghi si associa, ad un'intensa attività di erosione laterale descritta nel sottocapitolo precedente, un'intensificazione locale dell'erosione al fondo seguita da aggradazione più lieve. Come evidente in Figura 105 lo scenario 4 è l'unico che risponde almeno in parte (tratto impostato tra Pinzano e le kilometriche 8-9) con una lieve incisione del fondo come mostra la collocazione della sua traiettoria al di sopra dell'asse orizzontale del grafico (si ribadisce che in tutti i grafici e le tabelle valori negativi di variazione altimetrica indicano aggradazione, viceversa valori positivi indicano incisione – questa convenzione discende dal metodo di calcolo delle variazioni altimetriche del file "elev_diff.txt" descritto in Appendice A.2). A valle delle kilometriche 8-9 riprende a dominare in termini cumulati un processo di aggradazione del fondo che rimane tuttavia inferiore per volumi complessivi rispetto a quelli mostrati dagli altri scenari. Appare interessante rilevare l'anomalia locale di forte incisione del fondo mostrata da tutti gli scenari in corrispondenza della kilometrica 17, ovvero in corrispondenza del settore 17 che nel calcolo del *sediment budget* ha mostrato tra i maggiori picchi di produzione media annua di sedimenti (Figura 82).

anno	SCENARIO 1 – NON INTERVENTO						SCENARIO 2 – RIMOZIONE STRUTTURE						SCENARIO 3 – INCREMENTO APPORTO DA MONTE						SCENARIO 4 – RIDUZIONE APPORTO DA MONTE					
	Larghezza alveo attivo [m]	variazione altimetrica globale [m ³]	variazione altimetrica globale [cm]	Volume di sedimenti medio annuo in transito alla sezione di chiusura del tratto [m ³ /anno]	Volume di sedimenti medio annuo movimentato lateralmente [m ³ /anno]	Volume di sedimenti medio annuo movimentato al fondo [m ³ /anno]	Larghezza alveo attivo [m]	variazione altimetrica globale [m ³]	variazione altimetrica globale [cm]	Volume di sedimenti medio annuo in transito alla sezione di chiusura del tratto [m ³ /anno]	Volume di sedimenti medio annuo movimentato lateralmente [m ³ /anno]	Volume di sedimenti medio annuo movimentato al fondo [m ³ /anno]	Larghezza alveo attivo [m]	variazione altimetrica globale [m ³]	variazione altimetrica globale [cm]	Volume di sedimenti medio annuo in transito alla sezione di chiusura del tratto [m ³ /anno]	Volume di sedimenti medio annuo movimentato lateralmente [m ³ /anno]	Volume di sedimenti medio annuo movimentato al fondo [m ³ /anno]	Larghezza alveo attivo [m]	variazione altimetrica globale [m ³]	variazione altimetrica globale [cm]	Volume di sedimenti medio annuo in transito alla sezione di chiusura del tratto [m ³ /anno]	Volume di sedimenti medio annuo movimentato lateralmente [m ³ /anno]	Volume di sedimenti medio annuo movimentato al fondo [m ³ /anno]
2001	735	0	0	-	-	-	735	0	0		-	-	735	0	0		-	-	735	0	0		-	-
2040	1008	163,797	0.002	77,374	105,131	-101,036	1010	122,816	0.002	74,946	107,783	-104,712	961	141,975	0.277	89,066	94,294	-90,744	1,017	1,301,877	2.765	64,730	118,917	-86,370
2080	1186	105,848	0.000	78,461	84,924	-82,277	1229	-96,018	-0.139	78,769	75,514	-77,914	1,182	-445,722	-0.649	114,202	95,540	-106,683	1,128	1,286,969	2.121	64,769	97,318	-65,144

Tabella 62 - Confronto temporale tra le principali risposte prodotte dagli scenari futuri in termini di configurazione planimetrica e dinamica dei sedimenti

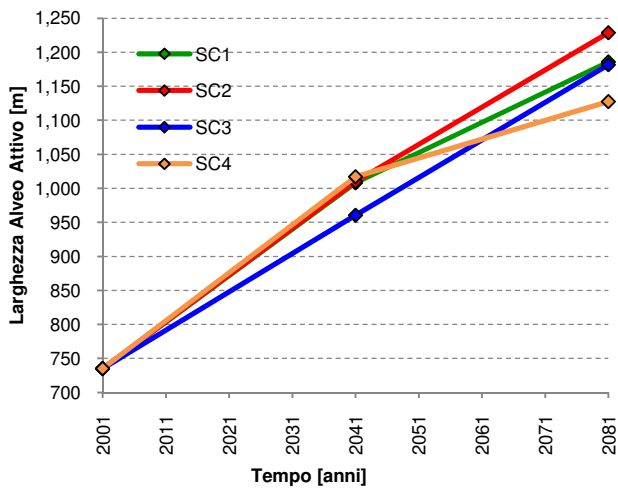


Figura 102 - Confronto tra gli scenari in termini di variazione della larghezza media d'alveo attivo dal 2001 al 2080

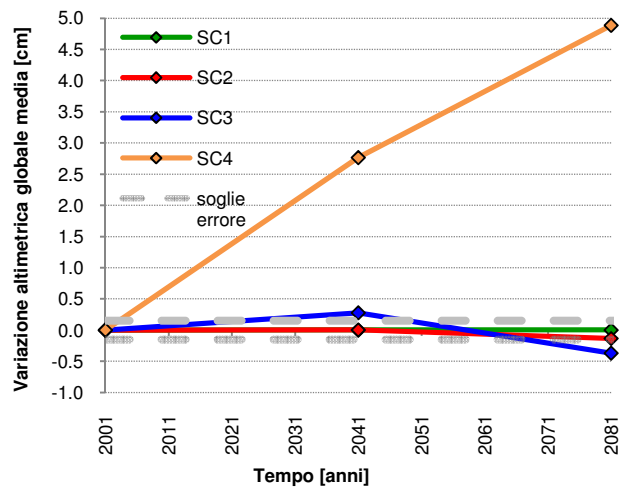


Figura 103 - Confronto tra gli scenari in termini di variazione altimetrica media globale tra il 2001 e il 2080

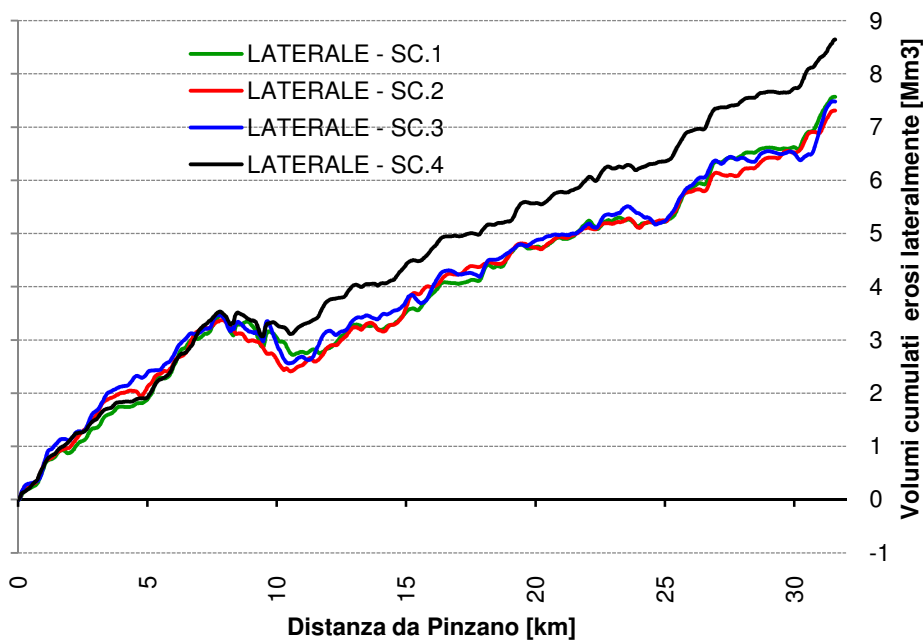


Figura 104 - Confronto tra le curve cumulate associate ai volumi di sedimenti movimentati dai processi di erosione/deposizione laterale

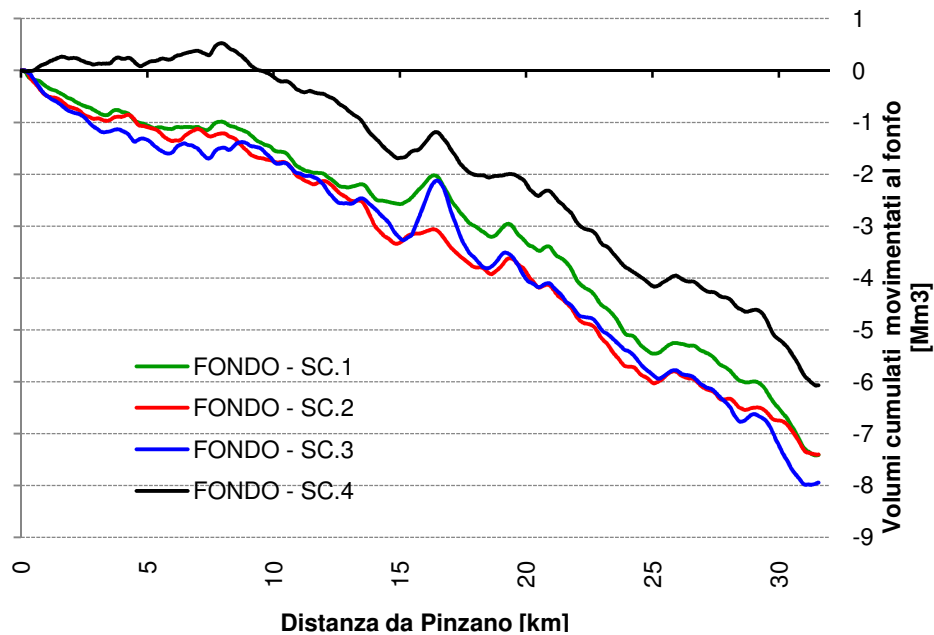


Figura 105 - Confronto tra le curve cumulate associate ai volumi di sedimenti movimentati dai processi di erosione/deposizione al fondo

14.3 Confronto tra indicazioni numeriche e modelli concettuali

Il confronto tra i risultati prodotti da CAESAR e quelli proposti da modelli concettuali esistenti costituisce uno dei principali obiettivi del lavoro di tesi. In modo particolare il modello concettuale analizzato è quello introdotto in Surian et al, 2009e già presentato al capitolo 6.2. Il modello, sviluppato in modo specifico per i principali fiumi veneto-friulani, tra cui il Tagliamento, riprende il concetto di traiettoria evolutiva introdotto in Brierley e Fryirs, 2005 per ricostruire l'andamento manifestato negli ultimi 200 anni dai corsi d'acqua analizzati e da questo fornire alcune indicazioni qualitative riguardo alle possibili future traiettorie evolutive. Il modello definisce alcune classi fluviali in funzione dell'entità della risposta morfologica recente (A-intensa, B-moderata, C-lieve, D-no recupero) e per ciascuna di queste formula alcune ipotesi evolutive future distinguendo scenari in relazione all'applicazione o meno di politiche gestionali dei sedimenti che incentivino o meno la dinamica e l'apporto di sedimenti e quindi il recupero morfologico (politiche distinte in termini di scala di applicazione, di bacino o tratto). Da questa combinazione vengono indicate per ogni classe fluviale tre possibili traiettorie con una proiezione futura che copre una finestra temporale di circa 30 anni dal 2010 al 2040. Nel complesso le classi fluviale e le relative risposte possono condurre a 5 stadi di riferimento (S1 – S5) crescenti in termini di allargamento e innalzamento del fondo (Figura 106).

A partire dai dati planimetrici riportati nella Parte I della tesi è stato possibile ricostruire con grande dettaglio temporale il *trend* evolutivo negli ultimi 200 anni manifestato dal fiume Tagliamento con riferimento specifico al tratto oggetto dell'applicazione modellistica. Inserendo i valori nella Figura 5 riportata in Surian et al, 2009e si desume che il tratto studio può essere classificato di tipo B, ovvero tipologia che ha manifestato nella fase più recente di cambiamento un "rimbalzo morfologico" di modesta entità (si veda Figura 106).

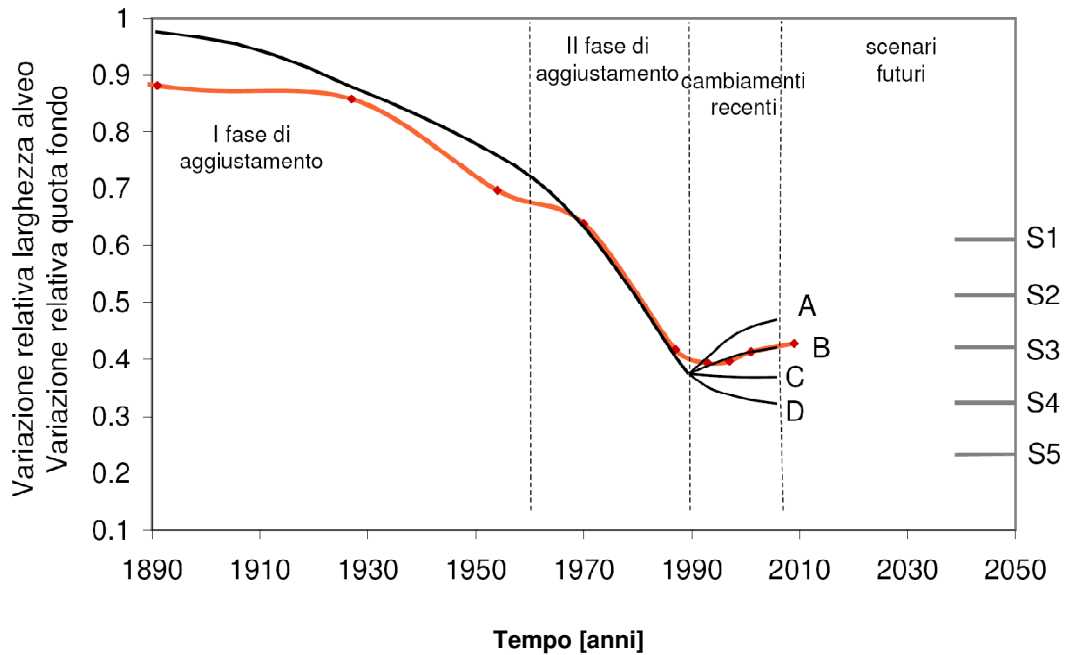


Figura 106 - Andamento del rapporto Larghezza alveo / Massima Larghezza Alveo del Tagliamento per il periodo 1805-2009 (linea rossa) inserito nel grafico delle traiettorie passate (modificato da Surian et al, 2009e)

Inserendo nel grafico di Figura 5 riportata in Surian et al, 2009e anche i valori di larghezza planimetrica prodotti dagli scenari 1- 4 (larghezze normalizzate al massimo valore registrato per il tratto studio nel 1833 – si veda Tabella 63) si ricava il grafico riportato in Figura 107.

	DATI REALI										DATI DA MODELLAZIONE NUMERICA			
	1805	1833	1891	1927	1954	1970	1987	1993	1997	2001	SCENARIO	2009	2040	2080
Larghezza assoluta alveo attivo [m]	1,661	1,776	1,566	1,522	1,238	1,133	742	699	705	735	1	783	1,008	1,186
										735	2	-	1,010	1,229
										735	3	786	961	1,182
										735	4	783	1,017	1,128
Larghezza relativa alveo attivo [L/L_{max} 1833]	0.94	1.00	0.88	0.86	0.70	0.64	0.42	0.39	0.40	0.41	1	0.44	0.57	0.67
										0.41	2	0.44	0.57	0.69
										0.41	3	0.44	0.54	0.67
										0.41	4	0.44	0.57	0.63

Tabella 63 - Dati relativi all'evoluzione planimetrica del tratto studio utilizzati per il confronto tra i risultati modellistici numerici e concettuali

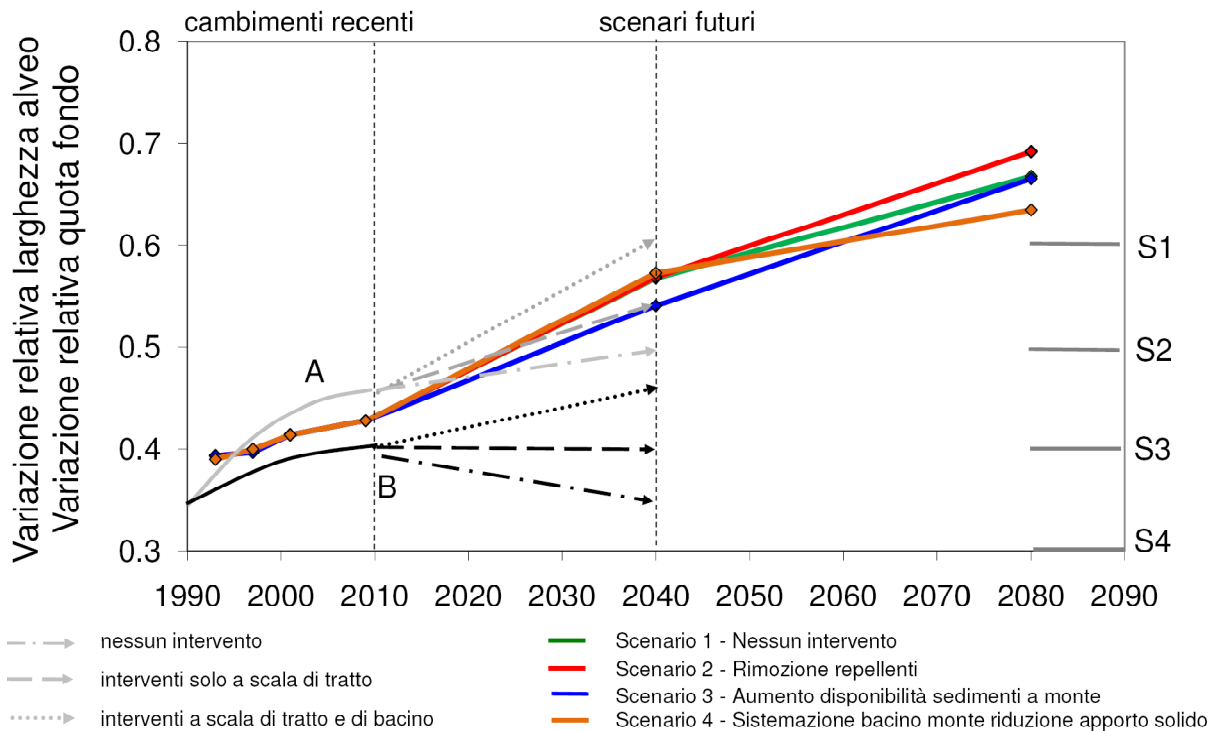


Figura 107 - Associazione delle traiettorie da modello concettuale e modellazione numerica (modificato da Surian et al, 2009e)

L'analisi comparata dei risultati prodotta dai due modelli conduce alle seguenti valutazioni:

- i modelli concordano nell'indicare che il Tagliamento proseguirà il recupero morfologico intrapreso a metà anni '90 seguendo una traiettoria di allargamento almeno per i prossimi 30 anni (il confronto non può proseguire oltre il 2040 per la diversa ampiezza delle finestre temporali coperte dai modelli);
- l'entità della ripresa morfologica espressa dal modello numerico appare sensibilmente più intensa di quelle proposte dal modello concettuale in associazione alla classe fluviale B. I livelli di recupero espressi dal modello numerico conducono nel 2040 a stadi di recupero molto elevati compresi tra S1 e S2, mentre il modello concettuale per la classe B prevede, nella condizione gestionale di massima incentivazione dell'apporto di sedimenti al tratto (freccia con tratteggio puntinato), un stadio leggermente inferiore al S2.
- Il modello concettuale prevede una differenziazione più netta della traiettorie in funzione della tipologia di intervento gestionale. Limitatamente al periplo 2010 – 2040 CAESAR fornisce invece traiettorie meno distinte; il divario tra le risposte planimetriche si amplifica leggermente proseguendo negli scenari fino al 2080.
- la modellazione numerica prevede che tra il 2040 e il 2080 le dimensioni dell'alveo del fiume Tagliamento possano raggiungere e superare lievemente le dimensioni del 1970 (larghezza media 1,133 m) solo nel caso in cui non avvengano forti riduzioni dell'apporto solido da monte (scenario 4 – larghezza media finale 1,128 m). Nel caso in cui dovessero essere effettuati ingenti lavori di rimozione delle principali opere di difesa locale (scenario 2), sempre tra il 2040 e il 2080 le dimensioni locali del fiume potrebbero superare quelle del 1970, senza tuttavia mai raggiungere quelle del 1954 (1,238 m).

Conclusioni

L'analisi delle variazioni morfologiche del Medio Tagliamento ha rivelato *trend* storici di evoluzione plano-altimetrica del tutto simili a quelli seguiti dalla maggior parte dei principali corsi d'acqua italiani negli ultimi 200 anni. Il tratto studio ha manifestato per tutto il XIX secolo una sostanziale invarianza planimetrica (Fase 0 - Figura 10), seguita da una fase di lieve restringimento durante la prima metà del XX secolo (Fase 1, secondo la denominazione prosposta in Surian et al., 2009d - Figura 10) e quindi da una fase di forte restringimento e moderata incisione avviata nei primi anni '50 (Fase 2). A partire dalla prima metà degli anni '90 il tratto ha intrapreso una fase di recupero morfologico (Fase 3), attualmente ancora in atto.

Il *trend* plano-altimetrico attuale, seppur guidato esclusivamente dalla recente sequenza di eventi di piena, è conseguenza diretta di una condizione di forte squilibrio indotta da 40 anni di intensa attività estrattiva di sedimenti in alveo, attività iniziata nella seconda metà degli anni '50 ed interrotta nel 1994 (capitolo 4.4). I volumi annui prelevati in alveo hanno raggiunto negli anni '80 valori superiori per più di un ordine di grandezza rispetto alla effettiva capacità di trasporto al fondo del tratto. Il calcolo del bilancio di sedimenti (capitolo 13.1) ha permesso di verificare che, a fronte di una effettiva capacità di trasporto media annua variabile longitudinalmente tra 60,000 e 90,000 m³/anno ed una massima capacità di trasporto media annua compresa tra 145,000 e 234,000 m³/anno (valori medi calcolati sul periodo 2001-2009), l'attività di estrazione di sedimenti nel tratto ha toccato punte di circa 1.7 Mm³/anno (valori comunque sottostimati rispetto a quelli reali). Il legame causa-effetto tra le variazioni manifestate dal 1954 ad oggi e l'imponente attività estrattiva è quindi diretto ed univoco (capitolo 5.3). La Fase 2 di forte restringimento e incisione è imputabile esclusivamente alle variazioni indotte sul regime del trasporto solido causato dall'attività estrattiva, mentre la Fase 3 di recente allargamento e lieve aggradazione è stata indotta esclusivamente dal regime idrologico, che pur essendo statisticamente medio e nella norma, si è manifestato su un tratto fluviale intrinsecamente in forte squilibrio.

Per quanto riguarda invece le variazioni planimetriche manifestate nella prima metà del Novecento (Fase 1), si ritiene che la principale causa di impatto sia stata la realizzazione delle grandi strutture di canalizzazione (soprattutto repellenti fluviali e argini). A giustificare questa conclusione si portano una serie di valutazioni emerse sia dall'analisi storica sia dalle elaborazioni modellistiche.

- la realizzazione degli interventi di sistemazione idraulico-forestali nella parte montana del bacino ha avuto il primo picco significativo tra il 1930 e il 1950 (4.4.4), quindi è impensabile, considerando le modeste distanze che caratterizzano il trasferimento del materiale grossalano nel sistema fluviale (Liebault et al., 2001; Church, 2008, e stime riportate al capitolo 14.2), che queste realizzazioni abbiano fatto risentire il loro effetto nel tratto analizzato nell'arco di soli 2-3 decenni; la quantità complessiva di opere realizzate prima della fine dell'800 appare al tempo stesso ancora troppo modesta per ritenere effettivo un impatto sul recettore finale.
- la variazione della copertura boschiva a scala di bacino si è manifestata con una tempistica sufficiente per potersi risentire (almeno in parte) fino a Pinzano (4.4.3). Si esclude tuttavia che ci siano stati effetti significativi indotti sul dinamica dei sedimenti fino a questa località in considerazione soprattutto delle dimensioni molto rilevanti mantenute dal Tagliamento tra metà '800 e i primi decenni del '900 a monte della stretta morfologica di Pinzano (larghezza media dell'alveo superiore a 1,000 m, valore calcolato per una estensione verso monte di 16 km, Zanoni et al. 2008) in cui si chiude un tratto che per dimensioni e morfologia ha costituito indubbiamente un serbatoio di sedimenti sufficiente per mantenere costantemente alimentato il tratto di valle.
- secondo le indicazioni emerse dalle simulazioni numeriche (capitolo 13) gli effetti sulle dimensioni planimetriche medie del tratto a valle di Pinzano indotti da diminuzioni anche molto intense dell'apporto solido da monte non sono relativamente significative, né su brevi periodi (8 anni - 13.1), né su ampie finestre temporali (80 anni - 13.2.4). Quindi la

diminuzione di apporto da monte presso Pinzano legata alla variazione d'uso del suolo nel bacino montano, se anche si fosse effettivamente verificata, non avrebbe potuto produrre le variazioni planimetriche emerse dall'analisi storica tra il 1891 e il 1954 (circa 250 m).

Spostando infine l'attenzione sulle modifiche planimetriche del XIX secolo (1805 – 1891), si ritiene che si tratti di variazioni modeste in rapporto alle dimensioni estremamente elevate dell'alveo dell'epoca (variazioni comprese tra il 3.9 e il 7.4%), prodotte sostanzialmente da dinamiche morfologiche attribuibili ad una condizione di equilibrio dinamico (Schumm, 1977) piuttosto che da uno stato di instabilità. Lo stadio di equilibrio dell'800 non esclude la presenza seppur trascurabile di forme di impatto antropico, in questo periodo riconducibili esclusivamente alla variazione dell'uso del suolo a scala di bacino.

Le considerazioni appena espresse manifestano la forte integrazione raggiunta tra le valutazioni prodotte in sede di analisi storica e quelle emerse dalle elaborazioni modellistiche. La medesima propensione alla integrazione tra i due approcci ha indotto a confrontare i risultati emersi dall'applicazione di CAESAR (modello morfodinamico a schema cellulare) e quelli indicati dal modello concettuale proposto in Surian et al, 2009e elaborato per i principali fiumi veneto-friulani tra cui il Tagliamento. Il confronto delle indicazioni evolutive future a medio-breve termine fornite dai due modelli indica una significativa concordanza. Pur discendendo da approcci molto differenti, entrambi i modelli indicano che il tratto oggetto di studio proseguirà il *trend* evolutivo intrapreso a metà anni '90 seguendo una traiettoria di allargamento almeno per i prossimi 30 anni. Le indicazioni numeriche inducono a ritenere che, a meno di significative variazioni sul regime idrologico locale (fattori esclusi dalle valutazioni di scenario) e solo se nei prossimi 70 anni non saranno adottate politiche gestionali a riduzione dell'apporto di sedimenti alla stretta di Pinzano (scenario n. 4 - 13.2.4), tra il 2040 e il 2080 le dimensioni dell'alveo del fiume Tagliamento potranno raggiungere valori superiori, seppur di poco, a quelli registrati nel 1970 (larghezza media 1,133 m). Invece, nel caso in cui dovessero essere applicate politiche locali di incentivazione dell'apporto laterale di sedimenti attraverso la rimozione completa delle opere di difesa attualmente esistenti all'interno della fascia di pertinenza definita a monte dai terrazzi pleistocenici e a valle dai sistemi arginali, il superamento del valore '1970' sarebbe più netto, ma le dimensioni medie non raggiungeranno mai quelle del 1954 (1,234 m).

Oltre a specifiche indicazioni riguardo alle traiettorie di evoluzione passata e futura del Tagliamento questo lavoro di tesi ha prodotto numerose indicazioni relativamente ai limiti e alle potenzialità applicative di CAESAR, il modello RCM scelto per questa applicazione. La definizione delle ampiezze dei periodi di indagine e l'estensione del tratto sono state fortemente influenzate dall'obiettivo di integrazione tra l'approccio classico di analisi storica e quello numerico. A sua volta il contesto spazio-temporale ha costituito una prerogativa fortemente vincolante dal punto di vista modellistico imponendo indirettamente la scelta del tipo di modello numerico da adottare. L'applicazione piena di CAESAR è stata possibile grazie alla scelta di una articolata procedura che ha permesso di giungere ad una calibrazione e ad una validazione del modello quanto più possibile rigorose e sistematiche. Di fronte ad una evidente sovrabbondanza di parametri senza un reale fondamento fisico e senza riferimenti bibliografici che guidassero l'assegnazione di valori adatti al contesto, è stato necessario sottoporre il modello ad un'analisi di sensitività (capitolo 10) che permettesse di individuare solo pochi e fondamentali parametri per i quali procedere effettivamente a calibrazione e validazione (11). La scelta di una procedura di SA a due *step* (condotta adottando in serie due metodi molto differenti per le rispettive tecniche di *sampling* e di valutazione della sensitività dei singoli fattori analizzati) è stata molto soddisfacente (12.1). Considerando l'economicità e l'efficacia dimostrate dall'analisi nel suo complesso si ritiene che lo schema sperimentato possa essere adottato nell'ambito di ogni applicazione esplorativa di un modello RCM quale CAESAR.

La calibrazione e la validazione di CAESAR (nel senso pragmatico dei termini espresso da Mosselman, 2010) hanno messo in luce i suoi principali pregi e difetti. Il modello ha risposto in modo molto soddisfacente per diversi aspetti: velocità e stabilità computazionale, *performance* nella riproduzione della dimensione media e nella posizione delle aree attive appartenenti all'alveo o alle aree vegetate, coerenza nei valori di *sediment yield* medio annuo e nei rapporti dinamici tra i processi di trasporto al fondo ed erosione laterale, facilità nella preparazione e manipolazione dei dati di *input-output*, attitudine per l'impostazioni di strategie esplorative e di scenario. Per contro il modello ha manifestato modesti valori di *performance* nel mantenimento e nella riproduzione della complessità morfologica tipica della morfologia *braided*. Le simulazioni di validazione (capitoli 11.3 e 13.1) hanno evidenziato scarsa corrispondenza tra le aree bagnate reali e quelle modellate, un abbattimento dell'indice di intrecciamento calcolato sul dato modellato rispetto a quello reale, un'amplificazione di forme improprie per la morfologia *braided*, in generale quindi una non trascurabile banalizzazione morfologica. I limiti più macroscopici di attendibilità nella risposta morfologica del modello si manifestano soprattutto in coda alle simulazioni con i tempi di simulazione più lunghi (fino ad 80 anni). Il *pattern* liquido appare estremamente semplificato e talora irrealistico, prodotto dell'accentuazione di processi presenti anche nella morfologia *braided*, ma in forme meno accentuate. E' il caso dell'erosione laterale che localmente il modello riproduce in modo adeguato con puntuali "unghie" erosive (arretramenti spondali localizzati innescati da singoli canali); forme che però nel tempo si amplificano e tendono a non disattivarsi deformando talora in modo irreversibile il margine dell'alveo.

Pur esprimendo un giudizio complessivo soddisfacente del comportamento del modello alla luce degli obiettivi prefissati, si ritiene che esistano ancora ampi margini di miglioramento. Si ritiene che l'incapacità di mantenere e riprodurre dinamicamente un *pattern* a canali intrecciati sia per grande parte riconducibile alla dimensione eccessiva della cella di calcolo adottata (25 m). Questo tuttavia rappresenta un limite alla risoluzione indotto dal numero massimo di celle attive attualmente supportabile (circa 300,000). Il modello nasce per applicazioni "*meso-scale*", ovvero per scale spaziali che vanno oltre la dimensione di "sito" ma restano al di sotto dei contesti spaziali tipici dei *Landscape Evolution Models* (LEM). Si ritiene quindi che passi in avanti possano essere fatti per aumentare la potenza di calcolo rivedendo il codice sorgente per un processamento in parallelo e per un miglioramento ulteriore della sua efficienza.

Il lavoro di ricerca ha evidenziato l'opportunità di affiancare approcci differenti ma di fatto con una forte interdipendenza (lavoro di campo, modellazione concettuale e numerica). I limiti delle tecniche classiche di indagine storica e di campo possono essere supportati agevolmente dalla modellazione numerica; al tempo stesso l'indagine numerica a fini previsionali non può prescindere dalla pre-costituzione di un'ampia base dati che delinea l'evoluzione a lungo-breve termine subita dal corso d'acqua e che fonda ogni applicazione modellistica su una solida e concreta conoscenza della realtà modellata. Nessun approccio previsionale, concettuale o numerico, applicato alla geomorfologia fluviale ha la pretesa di anticipare con esattezza l'evoluzione di un corso d'acqua. I fattori di limitazione al potere previsionale rimangono davvero significativi ma non giustificano nessuna preconstituita rinuncia allo studio dell'evoluzione dei sistemi fluviali. Strategie modellistiche "*what-if scenarios*" permettono di testare la validità e l'ampiezza delle nostre conoscenze, oltre a rappresentare spesso le uniche concrete alternative esistenti per poter esprimere valutazioni utili a guidare interventi gestionali e progettuali applicati ai sistemi fluviali.

Appendici

A.1 Dati in *input* al modello

Di seguito si forniscono alcune brevi indicazioni relativamente al tipo e al formato dei dati richiesti da CAESAR per una tipica applicazione a scala di tratto (*reach mode* - 6.7.1.1). Si sono volutamente tralasciati i dati opzionali richiesti dal modello per applicazioni differenti da quelle impostate in questo contesto di lavoro.

- DEM INIZIALE FONDO ALVEO. File in formato ASCII contenente indicazione del numero di righe (1 in Figura 108) e di colonne (2 in Figura 108) del *grid* spaziale, dimensione della cella (3 in Figura 108), coordinate cartografiche per la georeferenziazione del *raster* (4 in Figura 108). I valori inseriti sono riferiti alle quote del fondo assegnate ad ogni cella, con uno spazio separatore tra i valori.

```
dem_iniziale.txt - Blocco note
File Modifica Formato Visualizza ?
ncols 302
rows 149
x11corner 2349951.2043334
y11corner 5083847.8798498
cellsize 25
NODATA_value -9999
-9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000
9.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000
00 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000
-9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000
-9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000 -9999.0000
```

Figura 108 - Formato dei file ASCII a definizione di tutti i *raster* in *input* e *output* al modello

- DEM *BEDROCK*. Espresso nello stesso formato del DEM di fondo alveo (Figura 108). E' utilizzato per porre un limite inferiore di incisione del fondo o laterale di divagazione. Viene utilizzato per modellare la presenza di strutture in alveo (repellenti fluviali, difese spondali, argini, ecc.) assimilabili a opere inderodibili. La differenza altimetrica tra DEM FONDO e DEM *BEDROCK* costituisce il letto alluvionale su cui agisce la dinamica morfologica. All'interno di questo spessore il modello crea i *layer* descritti in 6.7.1.3.
- COPERTURA VEGETALE. Espressa come un *raster* nello stesso formato dei DEM (Figura 108). Il valore all'interno del *raster* è riferito alla maturità della vegetazione, valore compreso tra [0-1] (6.7.1.6). L'opzione di immissione della copertura vegetale iniziale è stata aggiunta attraverso una personalizzazione del codice sorgente (Figura 109).

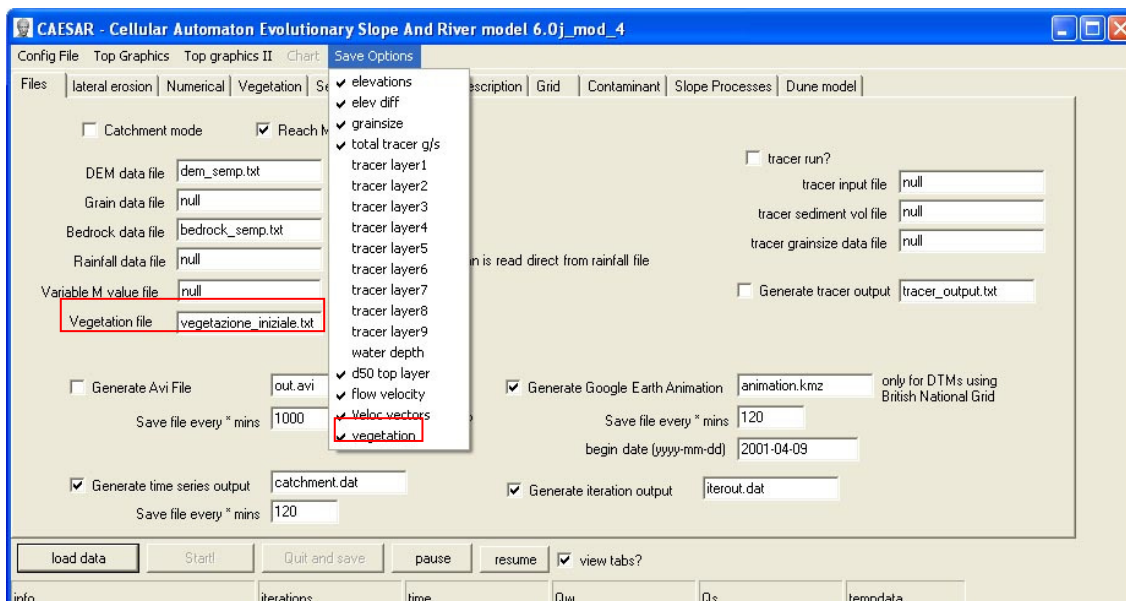


Figura 109 - Modifiche apportate alla GUI principale per l'immissione del file di vegetazione iniziale

- **COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA DEL FONDO.** Contiene indicazione della composizione granulometrica di ogni *layer* di sedimenti esistenti in corrispondenza delle sole le celle attive. Per queste celle viene indicata la posizione (riga,colonna – 1,2 in Figura 110) e in successione tutti volumi associati alle singole classi granulometriche (9) per tutti i singoli *layer* esistenti (9) (Figura 110).

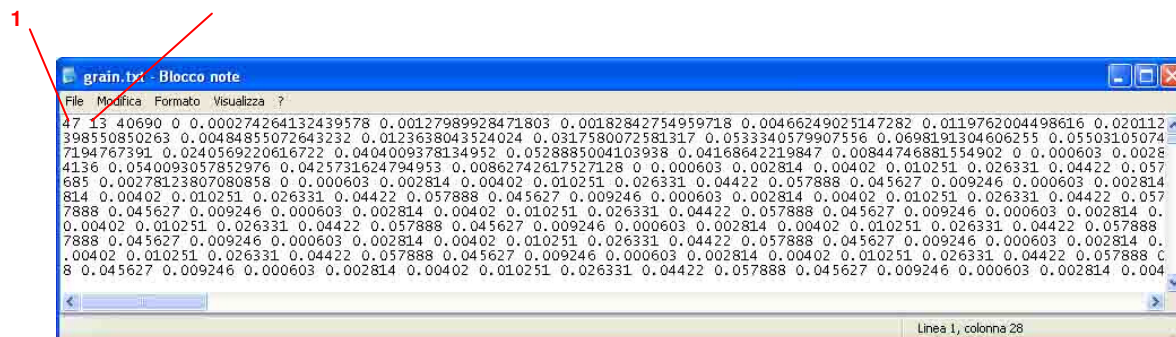


Figura 110 – Formato file di definizione della composizione granulometrica del fondo

- **CURVA GRANULOMETRICA.** Per la descrizione della composizione granulometrica dell'*active layer* iniziale, il modello richiede l'indicazioni dei diametri per un massimo di 9 classi granulometriche con relative percentuali. L'inserimento avviene direttamente nella GUI principale all'interno della quale l'utente seleziona anche la formula di trasporto solido utilizzata (6.7.1.3) e altri eventuali dati necessari per la simulazione del trasporto in sospensione (Figura 111).

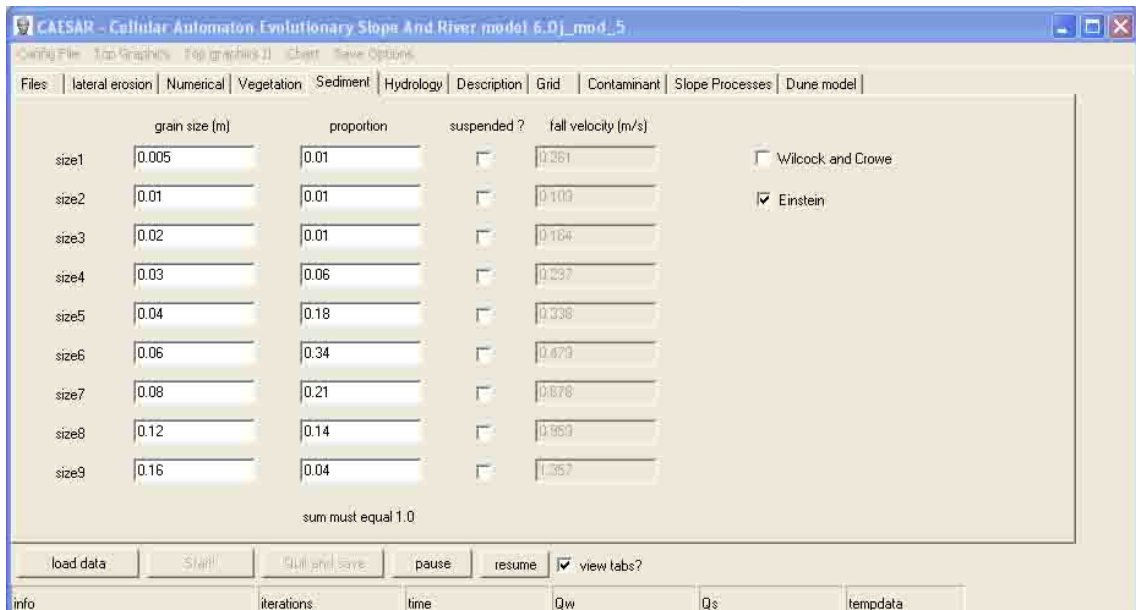


Figura 111 - GUI di inserimento dati granulometrici

- SERIE TEMPORALE DELLE PORTATE SOLIDE E LIQUIDE IN *INPUT*. Questo file in formato ASCII è costituito da tante righe quanti sono gli *step* temporali di immissione delle portate liquide (funzione della durata totale della simulazione e della frequenza con cui il dato è disponibile – oraria, giornaliera, ecc.). Il file viene formato associando per ogni riga un contatore di intervallo (1 in Figura 112), il valore della portata liquida (2 in Figura 112) e un valore di portata solida per ogni classe granulometrica (3 in Figura 112).

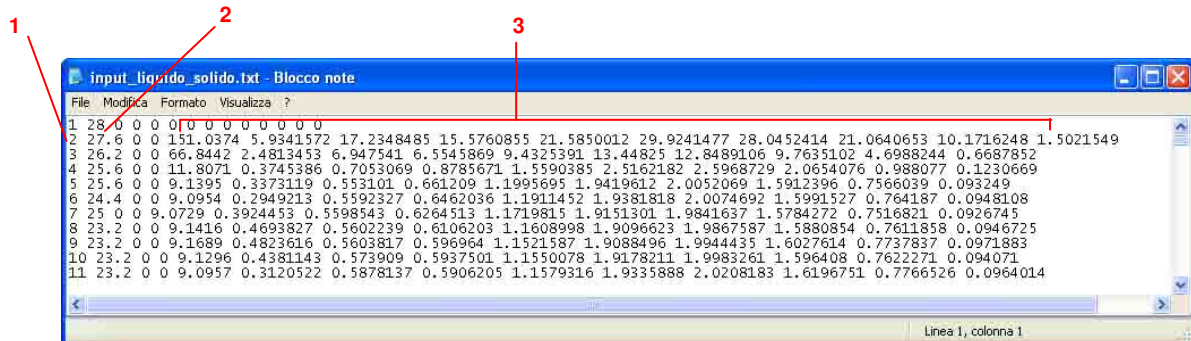


Figura 112 – Formato della serie di portate liquide e solide richieste in *input* al modello

I valori di portata liquida e solida definiti all'interno di questo file verranno immessi in corrispondenza di uno o più punti (fino ad un massimo di 8) del *grid* come specificato dall'utente attraverso la GUI principale visibile nella seguente Figura 113. Per ogni punto di immissione è richiesto di specificare le coordinate riga-colonna dei punti (1-2 in Figura 113) e il nome del file delle portate liquide e solide (3 in Figura 113).

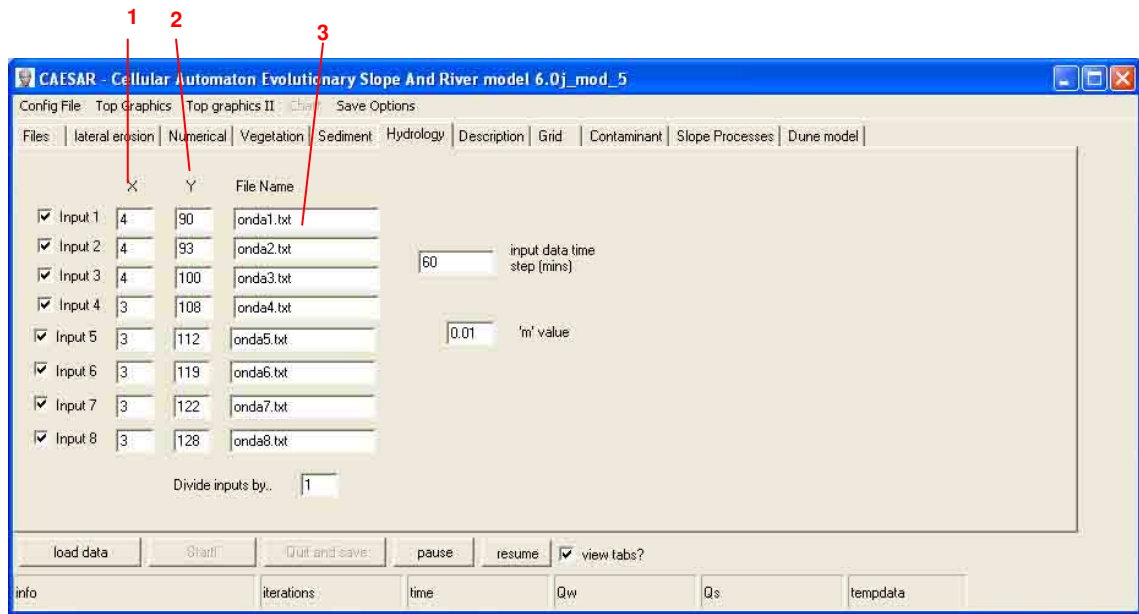


Figura 113 - Finestra grafica per la configurazione dei punti di immissione delle portate liquide e solide costitutive delle condizioni al contorno del modello

A.2 Dati in *output* prodotti dal modello

Di seguito si forniscono alcune brevi indicazioni relativamente al tipo e al formato dei dati prodotti da CAESAR durante una tipica applicazione a scala di tratto (*reach mode* - 6.7.1.1). Si sono volutamente tralasciati gli *output* non utilizzati in questo contesto di lavoro.

- DEM DI FONDO ALVEO (“*elev.txt*”), COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA DEL FONDO (“*grain.txt*”), COPERTURA VEGETALE (“*vegetation.txt*” – opzione aggiunta attraverso una personalizzazione del codice sorgente), DISTRIBUZIONE DEI TIRANTI IDRICI PER OGNI CELLA (“*waterdepth.txt*”). Si tratta di file in formato ASCII con organizzazioni interne dei dati del tutto simili a quelle dei file immessi in *input* (si veda A.1).
- DISTRIBUZIONE SPAZIALI DELLE VARIAZIONI ALTIMETRICHE (“*elev_diff.txt*”). File in formato ASCII che contiene i valori distribuiti per ogni cella delle variazioni altimetriche tra il dem di fondo in *input* al modello (A.1) e quello finale in *output* (si veda sopra). L’organizzazione interne dei dati è del tutto simili a quelle dei file immessi in *input* (si veda A.1). Essendo la differenza tra i DEM calcolata come (DEM_iniziale – DEM_finale), valori negativi associati alle celle del *raster elev_diff* indicano celle in aggradazione, viceversa valori positivi indicano celle in incisione.
- DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITA’ MEDIE – VETTORE VELOCITA’. Si tratta di due file disgiunti, di cui il primo contiene la distribuzione spaziale dei valori medi di velocità per ogni cella (stesso formato degli altri file di *output* descritti sopra), mentre il secondo aggiunge all’informazione di velocità media quella di direzione del vettore velocità. Il file è composto dalla concatenazione (separatore virgola) per ogni cella delle coordinate cartesiane (1-2 in Figura 114), dell’angolo del vettore velocità espresso in gradi (3 in Figura 114), del modulo del vettore velocità media (4 in Figura 114).

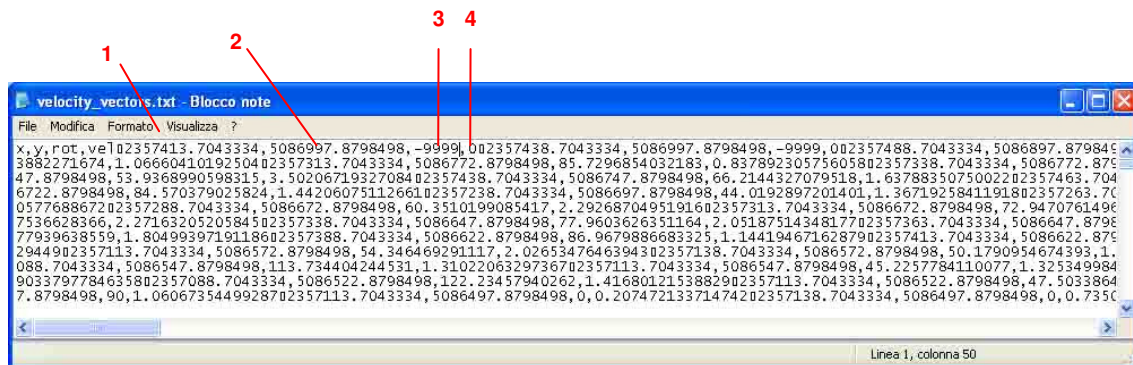


Figura 114 - Organizzazione del file di *output* “*velocity_vectors.txt*”

- FILE DI CONTEGGIO DELLE ITERAZIONI (“*iterout.txt*”). Rappresenta un file di *report* dello stato di avanzamento delle iterazioni. Ogni iterazione (ciclo) forma una riga costituita da un contatore di iterazioni (1 in Figura 115), un numero che indica il tempo della simulazione espresso in giorni (2 in Figura 115), il valore di portata liquida in uscita dal tratto al termine della singola iterazione (3 in Figura 115), la portata solida prodotta in *output* nello stesso ciclo iterativo (4 in Figura 115).

1	2	3	4		
13693	238.016969	956.042742	3.257108	0.000000	
13694	238.016970	971.098763	4.838888	0.000000	
13695	238.016970	937.672045	6.081521	0.000000	
13696	238.016970	900.484401	7.354743	0.000000	
13697	238.016971	931.156726	9.226012	0.000000	
13698	238.016972	902.201209	11.883220	0.000000	
13699	238.016974	948.505080	14.577438	0.000000	
13700	238.016976	959.001042	18.996456	0.000000	
13701	238.016980	977.103039	29.392507	0.000000	
13702	238.016986	960.670278	32.052855	0.000000	
13703	238.016994	977.323984	37.559177	0.000000	

Figura 115 - Organizzazione del file di *output* “iterout.txt”

- FILE DI REGISTRAZIONE DEI VOLUMI SOLIDI E LIQUIDI IN *OUTPUT* (“catchment.txt”). File simile ad iterout.txt, prodotto con frequenza indicata dall’utente, e con l’aggiunta dell’indicazione dei volumi prodotti per ogni classe granulometrica.
- FILE “ANIMATION”. Con una frequenza definita dall’utente nella GUI principale vengono prodotte singole file immagine (formato .npg) che immortalano il *pattern* grafico che evolve durante il *run*. Si tratta di piccoli file immagine utili per rivedere e ricostruire l’evoluzione morfologica susseguitasi durante la simulazione.

A.3 Descrizione degli indici di *performance* utilizzati

A.3.1 Riferimento bibliografico

Come introdotto al capitolo 10.1, un modello può essere considerato assimilabile ad una generica funzione f che lega i fattori di *input* a quelli di *output*; i valori di *output* da considerare devono avere alcune caratteristiche:

- sono facilmente desumibili dal modello (es. livello idrico in una determinata sezione, portata solida in uscita, ecc.);
- sono esaustivi nel descrivere la capacità del modello a riprodurre specifici aspetti di interesse;
- sono confrontabili con dati reali di calibrazione.

Una volta scelti gli *output*, ogni specifica funzione f associata ad ogni valore sarà una funzione non necessariamente analiticamente definita ma con caratteristiche tali da essere approssimata con tecniche statistiche. In questo lavoro di ricerca per la scelta degli *output* di analisi si è fatto riferimento ad una tecnica proposta in Aronica et al, 2002 (che riprende e adatta indici proposti in Bates e De Roo, 2000 e Horritt e Bates, 2001) la quale permette di determinare un valore cosiddetto di *performance* del modello in relazione alla produzione di *output* in formato *raster* (es. area inondata, area coperta da vegetazione, ecc.). La *performance* viene calcolata confrontando il *raster* in *output* con dati di controllo considerati di riferimento e convertiti proprio per condurre il calcolo della *performance* nel medesimo formato di discretizzazione spaziale (*raster* con la stessa risoluzione). Il valore generico di *performance* (F) può essere espresso come:

$$F = \frac{\text{num}(S_{\text{modello}} \cap S_{\text{dato reale}})}{\text{num}(S_{\text{modello}} \cup S_{\text{dato reale}})} \quad (64)$$

ovvero il rapporto tra la somma delle superfici in cui il dato di *output* dal modello (S_{modello}) e quello reale di calibrazione ($S_{\text{dato reale}}$) sono coincidenti, e la somma delle aree in cui invece è presente alternativamente il dato reale o quello da modello. Lo stesso rapporto espresso in un formato più adatto alla discretizzazione in *pixel* propria dei dati *raster*, risulta come segue

$$F = \frac{\sum_i P_i^{D_1 M_1}}{\sum_i P_i^{D_1 M_1} + \sum_i P_i^{D_1 M_0} + \sum_i P_i^{D_0 M_1}} \quad (65)$$

in cui le sommatorie dei *pixel* sono relative alle possibili combinazioni espresse nelle seguente tabella:

	Assenza nel dato di <i>output</i> da modello [M ₀]	Presenza nel dato di <i>output</i> da modello [M ₁]
Assenza nel dato di calibrazione [D ₀]	D ₀ , M ₀	D ₀ , M ₁
Presenza nel dato di calibrazione [D ₁]	D ₁ , M ₀	D ₁ , M ₁

Tabella 64 - Matrice delle possibili combinazioni a scala di *pixel* tra dato_reale / *output*_modello

Partendo da questo schema concettuale di calcolo di generici indici di *performance*, nel contesto di questo lavoro di ricerca si sono definiti ed adottati i seguenti indici di *performance*:

- *performance* area bagnata (F_w) [A.3.2];
- *performance* erosive-deposizionale (F_e) [A.3.3].
- *performance* vegetazionale (F_{veg}) [A.3.4];
- *performance* altimetrica (F_{sez}) [A.3.5];
- *performance* alveo attivo (F_{ac}) [A.3.6];

Si discosta dallo schema di Aronica et al, 2002 un indice specifico utilizzato per la valutazione della velocità computazione delle simulazioni adattato solo nell'analisi di sensitività (F_{vel}) e descritto nel sottocapitolo di appendice A.3.7. Nella seguente tabella si riporta un riepilogo dell'utilizzo di questi indici nella fasi del lavoro che hanno scandito la seconda parte della tesi.

Fase	Capitolo	Indici di performance - schema Aronica et al, 2002					Altri indici di performance
		F_w	F_e	F_{veg}	F_{sez}	F_{ac}	
Applicazione esplorativa	9	x					R_{ve} (39)
Analisi Sensitività: SA1-OAT Morris	10.3.1	x	x				F_{vel}
Analisi Sensitività: SA2-Saltelli	10.3.2	x		x	x		F_{vel}
Calibrazione	11.2	x		x	x		
Validazione	11.3	x		x		x	

Tabella 65 - Riepilogo dell'uso di indici di *performance* nella fasi di lavoro della Parte II della tesi

A.3.2 Performance area bagnata (F_w)

Questo indice permette di quantificare in modo sintetico la corrispondenza spaziale tra

- area bagnata prodotta dal modello (ricavata da "waterdepth.txt" – si veda anche Appendice A.2);
- area bagnata reale, intesa come area digitalizzata da foto aerea corrispondente ai canali con acqua identificati da fotointerpretazione. In questo caso il dato vettoriale digitalizzato deve preventivamente essere convertito in formato *raster* con la stessa dimensione della cella del dato *raster* prodotto dal modello.

Riprendendo e adattando Tabella 64 al caso specifico di questo valore di *performance* si ottengono le seguenti possibili combinazioni:

	<i>Pixel</i> asciutto nell' <i>output</i> da modello ("waterdepth.txt") [M ₀]	<i>Pixel</i> bagnato nell' <i>output</i> da modello ("waterdepth.txt") [M ₁]
<i>Pixel</i> asciutto nella realtà [D ₀]	D ₀ , M ₀	D ₀ , M ₁
<i>Pixel</i> bagnato nella realtà [D ₁]	D ₁ , M ₀	D ₁ , M ₁

Tabella 66 - Matrice delle combinazioni dato_reale / output_modello per l'indice di performance F_w

A.3.3 Performance erosione-deposizione (F_e)

Il calcolo di questo indice di *performance* deve essere effettuato tra due *raster* così definiti

- distribuzione spaziale delle variazioni altimetriche del fondo nel periodo di simulazione ottenute da modellazione (ricavata da "elev_diff.txt" – si veda anche Appendice A.2);
- distribuzione spaziale delle variazioni altimetriche del fondo nello stesso periodo ricavata da rilievi sul campo.

Si tratta in altre parole di portare al confronto *pixel-to-pixel* due *raster* rappresentativi di *pattern* erosivo-deposizionali. Riprendendo e adattando Tabella 64 si ottengono le seguenti possibili combinazioni:

	<i>Pixel</i> in erosione nell' <i>output</i> da modello ("elev_diff.txt") [M ₀]	<i>Pixel</i> altimetricamente invariato nell' <i>output</i> da modello ("elev_diff.txt") [M ₁]	<i>Pixel</i> in deposizione nell' <i>output</i> da modello ("elev_diff.txt") [M ₂]
<i>Pixel</i> in erosione nella realtà [D ₀]	D ₀ , M ₀	D ₀ , M ₁	D ₀ , M ₂
<i>Pixel</i> invariato altimetricamente nella realtà [D ₁]	D ₁ , M ₀	D ₁ , M ₁	D ₁ , M ₂
<i>Pixel</i> in deposizione nella realtà [D ₂]	D ₂ , M ₀	D ₂ , M ₁	D ₂ , M ₂

Tabella 67 - Matrice delle combinazioni dato_reale / output_modello per l'indice di performance F_e

Rivedendo e semplificando la Tabella 67 sopra riportata si possono raggruppare le 9 combinazioni esistenti in sole 2 combinazioni rappresentative di comportamenti erosivo-deposizionali concordanti o discordanti (si veda la colorazione dello sfondo alla tabella stessa: sfondo rosso – DISCORDANZA, sfondo verde - CONCORDANZA). Questo permette di riadattare l'espressione (65) come segue

$$F = \frac{\sum_i P_i^{(D_1 M_1, D_0 M_0, D_2 M_2)}}{\sum_i P_i^{(D_1 M_1, D_0 M_0, D_2 M_2)} + \sum_i P_i^{(D_1 M_0, D_1 M_2, D_0 M_1, D_0 M_2, D_2 M_0, D_2 M_1)}} = \frac{\sum_i P_i^{\text{concordanza}}}{\sum_i P_i^{\text{concordanza}} + \sum_i P_i^{\text{discordanza}}} \quad (66)$$

A.3.4 Performance vegetazionale (F_{veg})

Questo indice permette di quantificare in modo sintetico la corrispondenza spaziale tra

- area occupata da vegetazione prodotta dal modello (ricavata da “vegetation.txt” – si veda anche Appendice A.2);
- area occupata da vegetazione nella realtà, intesa come area digitalizzata da foto aerea corrispondente alle isole, alle piane inondabili e ai terrazzi fluviali con copertura vegetale fotointerpretata (vegetazione arboreo-arbustiva). Anche in questo caso il dato vettoriale digitalizzato deve preventivamente essere convertito in formato *raster* con la stessa dimensione della cella del dato *raster* prodotto dal modello.

La presenza di vegetazione nel dato prodotto dall'*output* è stata assegnata a quelle celle che presentano una maturità (valore della matrice $veg[x,y,0]$) superiore a 0.1, ovvero solo per quelle celle che non hanno ancora subito una rimozione totale della componente vegetazionale. Riprendendo e adattando Tabella 64 a questo valore di *performance* si ottengono le combinazioni riportate nella seguente tabella.

	<i>Pixel con copertura vegetale nell'output da modello ("vegetation.txt")</i> [M ₀]	<i>Pixel bagnato nell'output da modello ("vegetation.txt")</i> [M ₁]
<i>Pixel occupato da vegetazione arboreo-arbustiva nella realtà</i> [D ₀]	D ₀ , M ₀	D ₀ , M ₁
<i>Pixel occupato da vegetazione arboreo-arbustiva nella realtà</i> [D ₁]	D ₁ , M ₀	D ₁ , M ₁

Tabella 68 - Matrice delle combinazioni dato_reale / output_modello per l'indice di performance F_{veg}

A.3.5 Performance altimetrica (F_{sez})

Questo indice è concettualmente del tutto simile all'indice F_e descritto in appendice al capitolo A.3.3. L'unica differenza consiste nel tipo di dato *raster* corrispondente al dato reale a terra, ottenuto in questo caso sviluppando un confronto tra il DEM LIDAR 2001 e le quote rilevate topograficamente nel 2003 nelle sezioni presenti nel tratto. Per approfondimenti si rimanda al sottocapitolo 10.3.2.2.

A.3.6 Performance alveo attivo (F_{ac})

Questo indice permette di quantificare in modo sintetico la corrispondenza spaziale tra

- area dell'alveo attivo non occupata da vegetazione ricavabile da “vegetation.txt” in modo speculare a quanto fatto per l'indice F_{veg} ;

- area reale interna all'alveo attivo non occupata da vegetazione arboreo-arbustiva (assimilabile a tutte le aree con barre esposte) Anche in questo caso il dato vettoriale digitalizzato deve preventivamente essere convertito in formato *raster* con la stessa dimensione della cella del dato *raster* prodotto dal modello.

Riprendendo e adattando Tabella 64 si ottengono le seguenti possibili combinazioni.

	<i>Pixel</i> interno all'alveo senza copertura vegetale nell' <i>output</i> da modello "vegetation.txt" [M ₀]	<i>Pixel</i> occupato da isole nell' <i>output</i> da modello "vegetation.txt" [M ₁]
<i>Pixel</i> occupato da alveo attivo nella realtà [D ₀]	D ₀ , M ₀	D ₀ , M ₁
<i>Pixel</i> occupato da isole nella realtà [D ₁]	D ₁ , M ₀	D ₁ , M ₁

Tabella 69 - Matrice delle combinazioni dato_reale / output_modello per l'indice di performance F_{ac}

A.3.7 Performance velocità computazionale (F_{vel})

La *performance* nella velocità di calcolo si differenzia completamente dagli altri indici analizzati in Appendice. Il calcolo di questo indice assimilabile ad un "output di modellazione" è stato impostato utilizzando un parametro che è direttamente correlato alla velocità computazionale si ogni *run*, ovvero il numero di iterazioni totali effettuate durante ogni simulazione (valore desumibile dal file "iterout.txt" – si veda Appendice A.2).

Questo valore è preferibile alla velocità vera e propria di calcolo valutata in modo speditivo al capitolo 9 attraverso il rapporto R_{ve} (39). Se confrontato con un valore di riferimento (per esempio $R_{ve} = 730$ corrispondente a 2 anni di simulazione in 24 ore di tempo macchina si simulazione), questo rapporto ha il vantaggio di indicare in modo intuitivo e immediato la rapidità di ogni simulazione. Per contro il suo valore dipende eccessivamente dalla potenza di calcolo della macchina stessa utilizzata per le simulazioni.

L'esigenza di svincolare la *performance* computazionale dal calcolare utilizzato non è emersa nella fase di applicazione esplorativa (9) in quanto tutti i *run* sono stati elaborati sullo stesso elaboratore. Durante l'analisi di sensitività (10) invece l'uso di calcolatori anche molto diversi per potenza delle rispettive CPU ha obbligato ad utilizzare una via alternativa. La soluzione più lineare è stata appunto quella di utilizzare il numero di iterazioni totali compiute nel contesto di ogni simulazione e calcolare una *performance* computazionale secondo il seguente rapporto

$$F_{vel} = \frac{\text{min_iter}}{\text{iter}} \quad (67)$$

in cui sono riportati a numeratore il numero più basso di iterazioni tra quelli di tutte le simulazioni dell'analisi, ed a denominatore il numero di iterazioni della singola simulazione. Nell'ambito di un'analisi della *performance* allargata ad un determinato numero di simulazioni, il valore di F_{vel} risulta quindi ricompreso tra 0-1, e cresce con la velocità di calcolo associata alla singola simulazione.

Bibliografia

- Agència Catalana de l'Aigua (2006) HIDRI - Protocolo para la valoración de la calidad hidromorfológica de los ríos. 59.
- Aronica G., Bates P. D., Horritt M. S. (2002) Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. *Hydrological Processes*, 16 2001-2016.
- Ashmore P. E. (1991a) How do gravel-bed rivers braid? *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28 326-341.
- Ashmore P. E. (1991b) Channel morphology and bed load pulses in braided gravel-bed streams. *Geografiska Annaler*, 73A 37-52.
- Ashmore P. E. (1982) Laboratory modelling of gravel braided stream morphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7 201-225.
- Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione (1998) Piano di Bacino del Fiume Tagliamento: Piano stralcio per la sicurezza idraulica del medio e basso corso.
- Baartman, J., Van, G.,W., Temme, A. J. A. M., Schoorl, J. M. (2011) Modelling sediment dynamics due to hillslope-river interactions: incorporating fluvial behaviour in landscape evolution model LAPSUS. EGU 2011 - European Geosciences Union General Assembly 2011. 4-8 Aprile.Vienna.
- Baptist M. J., Babovic V., Uthurburu J. R., Keijzer M., Uittenbogaard R. E., Mynett A., Verwey A. (2007) On inducing equations for vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Research*, 45 4 435-450.
- Baptist M. J. (2005) Modelling floodplain biogeomorphology. PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, Netherlands, 195.
- Baptist, M. J., Mosselman, E. (2002) Biogeomorphological modelling of secondary channels in the Waal River. Louvain-la-Neuve, Belgium.
- Bates P. D., De Roo A. P. J. (2000) A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236 54-77.
- Bates P. D., Anderson M. G., Horritt M. S. (1998) Terrain information in geomorphological models: stability, resolution and sensitivity. in: Lane SN, Richards KS, Chandler JH (Eds.), *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*, Wiley ed., Chichester, pp. 279-309.
- Batz N. (2010) Predicting Ecological Diversity of Floodplains Using a Hydromorphic Model (CAESAR). A Reduced Complexity Approach on Reach Scale for the Tagliamento Rive.
- Bertoldi W., Gurnell A., Drake N. A. (2011) The topographic signature of vegetation development along a braided river: Results of a combined analysis of airborne lidar, color air photographs, and ground measurements. *Water Resources Research*, 47 W06525.
- Bertoldi W., Gurnell A., Surian N., Tockner K., Zanoni L., Ziliani L., Zolezzi G. (2009a) Understanding reference processes: Linkages between river flows, sediment dynamics and vegetated landforms along the Tagliamento River, Italy. *River Research and Applications*, 25 501-516. DOI 10.1002/rra.1233.
- Bertoldi W., Zanoni L., Tubino M. (2009b) Planform dynamics of braided streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34 547-557.
- Bertoldi W., Tubino M. (2005) Bed and bank evolution of bifurcating channels. *Water Resources Research*, 41 7.

- Beven K. (1996) Equifinality and Uncertainty in Geomorphological Modelling, in: Rhoads BL, Thorne CR (Eds.), *The Scientific Nature of Geomorphology. Proceedings of the 27th Binghamton Symposium in Geomorphology*, pp. 289-313.
- Beven K. (1989) Changing ideas in hydrology: the case of physically-based model. *Journal of Hydrology*, 105 157-172.
- Beven K., Kirkby M. J. (1979) A physically based variable contributing-area model of catchment hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, 24 1 43-69.
- Blanckaert K., De V., H.J. (2004) Secondary flow in sharp open-channel bends. *Journal of Fluid Mechanics*, 498 353-380.
- Blondeaux P., Seminara G. (1985) A unified bar-bend theory of river meanders. *Journal of Fluid Mechanics*, 157 449-470.
- Bolla P.M., Repetto R., Tubino M. (2003) Channel bifurcation in braided rivers: Equilibrium configurations and stability. *Water Resources Research*, 39 3.
- Bras R. L., Tucker G. E., Teles V. (2003) Six Myths About Mathematical Modeling in Geomorphology, in: Wilcock PR, Iverson RM (Eds.), *Prediction in geomorphology, Geophysical monograph 135 ed.*, American Geophysical Union, pp. 63-81.
- Brasington J., Richards K. S. (2007) Reduced-complexity, physically-based geomorphological modelling for catchment and river management. *Geomorphology*, 171-177. DOI DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.10.028.
- Brasington J., Langham J., Rumsby B. (2003) Methodological sensitivity of morpholetric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53 299-316.
- Brasington J., Rumsby B. T., Mcvey R. A. (2000) Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25 973-990.
- Bridge J. S. (1993) The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers, in: Best JL, Bristow CS (Eds.), *Braided Rivers*, The Geological Society, Londra, pp. 13-72.
- Brierley G. J., Fryirs K. A. (2005) *Geomorphology and River Management. Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing, Oxford. 398 pp.
- Brusarosco A., Rossato S., Ziliani L. (2009) Conflitti d'acqua e di uomini nel bacino del Tagliamento: l'utilità di un approccio integrato tra geografia umana e fisica. *Quaderni del Dottorato*, 4 193-212.
- Buckingham E. (1915) Model experiments and the forms of empirical equations. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 37 263-292.
- Buffagni A., Erba S., Ciampittiello 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*, 32-43.
- Carson M. A., Griffiths G. A. (1989) Gravel transport in the braided Waimakariri River: mechanisms, measurements and predictions. *Journal of Hydrology*, 109 201-220.
- Casas A., Benito G., Thorndycraft V. R., Rico M. (2006) The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 444-456.
- Catani G., Tunis G., Pisani G., Zacchigna R., Cogliervina A., Tassan S., Tentor A. (2007) Studio tessiturale dei sedimenti in alveo del fiume Tagliamento tra Pioverno e Ronchis.

- Chandesris A., Mengin N., Malavoi J. R., Souchon Y., Pella H., Wasson J. G. (2009) Systeme Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau. Atlas a large echelle, v2.0. 58.
- Chandesris A., Mengin N., Malavoi J. R., Souchon Y., Pella H., Wasson J. G. (2008) Systeme Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau. Principes et methodes, v3.1. 81.
- Chandesris, A., Malavoi, J. R., Mengin, N., Wasson, J. G., Souchon, Y. (2009) Hydromorphology auditing: a generalized framework at a nation scale to view streams and rivers in their landscape context. Chile.
- Chase C. G. (1992) Fluvial landsculpting and the fractal dimension of topography. *Geomorphology*, 5 39-57.
- Cheng F., Granata T. (2007) Sediment transport and channel adjustments associated with dam removal: Field observations. *Water Resources Research*, 43 W03444.
- Church M. (2008) Multiple scales in rivers, in: Habersack HM, Piegay H, Rinaldi M (Eds.), *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration*, pp. 3-32.
- Church M. (1996) Space, time and the mountain, in: Rhoads BL, Thorne CR (Eds.), *The Scientific Nature of Geomorphology. Proceedings of the 27th Binghampton Symposium in Geomorphology*, pp. 147-170.
- Church M. (1983) Pattern of instability in a wandering gravel bed channel, in: Collins JD, Lewin J (Eds.), *Modern and Ancient Fluvial Systems*, IAS Special Publication ed., pp. 169-180.
- CIRF (2006) La riqualificazione fluviale in Italia. Linee guida, strumenti ed esperienze per gestire i corsi d'acqua e il territorio, in: Nardini A, Sansoni G (Eds.), *Mazzanti Editori, Venezia*, pp. 832.
- Citrini D., Nosedà G. (1987) *Idraulica, Seconda Edizione ed.*
- Collins B., Dunne T. (1990) *Fluvial Geomorphology and River Gravel Mining: A Guide for Planners*. 98.
- Collins B., Dunne T. (1989) Gravel transport, gravel harvesting, and channel-bed degradation in rivers draining the southern Olympic Mountains, Washington, USA. *Environmental Geology and Water Science*, 13 3 213-224.
- Comiti F., Da Canal M., Surian N., Mao L., Picco L., Lenzi M. A. (2011) Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200 years. *Geomorphology*, 125 147-159.
- Coulthard, T. J., Van De Wiel, M. J. (2010) Can we link cause and effect in landscape evolution?. *Gravel-Bed River Conference*. Tadoussac, Canada.
- Coulthard T. J., De Rosa P., Marchesini I. (2008) CAESAR: un modello per la simulazione delle dinamiche d'alveo. *Il Quaternario*, 21 B 207-214.
- Coulthard T. J., Hicks D. M., Van De Wiel M. J. (2007) Cellular modelling of river catchments and reaches: advantages, limitations and prospects. *Geomorphology*, 90 192-207.
- Coulthard T. J., Van De Wiel M. J. (2006) A cellular model of river meandering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 123-132.
- Coulthard T. J. (2005) Effects of vegetation on braided stream pattern and dynamics. *Water Resources Research*, 41 DOI 10.1029/2004WR003201.
- Coulthard T. J., Kirkby M. J., Macklin M. G. (2005) Modelling differential catchment response to environmental change. *Geomorphology*, 69 222-241.
- Coulthard T. J., Macklin M. G., Kirkby M. J. (2002) A cellular model of the holocene upland river basin and alluvial fan evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 269-288.
- Coulthard T. J., Lewin J., Macklin M. G. (2000) Modelling geomorphic response to environmental change in an upland catchment. *Hydrological Processes*, 14 2031-2045.

- Coulthard T. J. (1999) Modelling Upland Catchment Response to Holocene Environmental Change. PhD Thesis, School of Geography, University of Leeds, UK.
- Coulthard T. J., Kirkby M. J., Macklin M. G. (1999) Modelling the impacts of Holocene environmental change in an upland river catchment, using a cellular automaton approach, pp. 31-46.
- Couper P. R. (2004) Space and time in river bank erosion research: a review. *Area*, 36 4 387-403.
- Cox, C., Brasington, J., Richards, K. S. (2005) Predicting reach-scale flow patterns using reduced complexity cellular schemes. *Geophysical Research Abstracts*.
- Crosato A., Saleh M. S. (2011) Numerical study on the effects of floodplain vegetation on river planform style. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36 711-720.
- Danish Hydraulic Institute. (2005) MIKE 21C, Scientific documentation.
- Darby S. E., Van De Wiel M. J. (2003) Models in Fluvial Geomorphology, in: Kondolf G.M., Piegay H (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, pp. 503-537.
- Doeschi-Wilson A. B., Ashmore P. E. (2005) Assessing a numerical cellular braided-stream model with a physical model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30 519-540.
- Doeschl A. B., Ashmore P. E., Davison M. (2006) Methods for assessing exploratory computational models of braided rivers, in: Sambrook S.G.H., Best J.L., Petts G.E. (Eds.), *Braided Rivers*, pp. 177-197.
- Downward, S.R., Gurnell, A., Brookes, A. (1994) A methodology for quantifying river channel planform change using GIS. *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport: International Association of Hydrological Sciences Publication*. Canberra, Australia.
- Egozi R., Ashmore P. E. (2008) Defining and measuring braiding intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33 2121-2138.
- Einstein H. A. (1950) The bed-load function for sediment transport on open channel flows. vol. 1026 .
- Ercoli P. (2002) Modelli per la simulazione di inondazioni fluviali: tecniche di calibrazione ed effetti del livello di definizione dell'informazione idrologica e topografica. Tesi di Dottorato, Università di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Italia, 174.
- 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. 2000/60 .
- Faeh R., Mueller R., Rousselot P., Vetsch D., Volz C., Vonwiller L., Veprek R., Farshi D. (2010) *System Manual of BASEMENT, Version 2.1*. Laboratory of Hydraulic, Glaciology and Hydrology (VAW).
- Favis-Mortlock, D. T. (1996) An evolutionary approach to the simulation of rill initiation and development.
- Ferguson R. I. (2008) Gravel-bed rivers at reach scale, in: Habersack H.M., Piegay H, Rinaldi M (Eds.), *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration*, pp. 33-60.
- Fleischhacker T., Kern K. (2002) *Ecomorphological Survey of Large Rivers*.
- Flood Risk Management Research Consortium (2006) *ACCOUNTING FOR SEDIMENT IN RIVERS. A tool box of sediment transport and transfer analysis methods and models to support hydromorphologically-sustainable flood risk management in the UK*.
- Fontana A., Mozzi P., Bondesan A. (2008) Alluvial megafans in the Venetian–Friulian Plain (north-eastern Italy): Evidence of sedimentary and erosive phases during Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary International*, 189 71-90.

- Formann E., Habersack H. M., Schober S. (2007) Morphodynamic river processes and techniques for assesment of channel evolution in Alpine gravel bed-river. *Geomorphology*, 90 340-355.
- Foufoula-Georgiou E., Sapozhnikov V. B. (2001) Scale Invariances in the Morphology and Evolution of Braided Rivers. *Mathematical Geology*, 33 3 273-291.
- Frank, E., Montoya Cardona, M. M., Fattorelli, S. (2007) Effects of topographic data resolution and spatial model resolution on a bi-dimensional hydro-morphological model. Proceedings of the IV International Conference "River basin Management IV", 23-25 May. Kos (Greece).
- Garcia-Ruiz, J. M., White, S. M., Lasanta, T., Marti, C., Gonzalez, C., Valero, M. P., et al. (1997) Assessing the effects of land-use changes on sediment yield and channel dynamics in the central Spanish Pyrenees.
- Gilvear D., Bryant R. (2003) Analysis if Aerial Photography and Other Remotely Sensed Data, in: Kondolf G.M., Piegay H (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, pp. 135-170.
- Glober J. M. A. (2009) Trans-scale modelling of river morphodynamics. PhD Thesis, University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering, Johannesburg, 228.
- Gomarasca M. A. (2004) *Basics of Geomatics*, Springer.
- Gomez B. (1991) Bedload transport. *Earth-Science Reviews*, 31 89-132.
- Gomez B., Church M. (1989) An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 25 6 1161-1186.
- Gran K., Paola C. (2001) Riparian vegetation controls on braided stream dynamics. *Water Resources Research*, 37 12 3275-3283.
- Gregory K. J., Park C. (1974) Adjustment of river channel capacity downstream from a reservoir. *Water Resources Research*, 10 4 870-873.
- Griffiths G. A. (1979) Recent sedimentation history of the Waimakariri River, New Zealand. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 18 6-28.
- Guochang X. (2003-2007) *GPS Theory, Algorithms and Applications*.
- Gurnell A., Petts G. E. (2006) Trees as riparian engineers: The Tagliamento River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 1558-1574.
- Gurnell A., Peiry J., Petts G. E. (2003) Using Historical Data in Fluvial Geomorphology, in: Kondolf G.M., Piegay H (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, pp. 77-101.
- Gurnell A., Petts G. E., Harris N., Ward J. V., Tockner K., Edwards P.,J., Kollmann J. (2000) Large wood retention in river channels: the case of the Fume Tgliamento, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25 255-275.
- Gurnell A. (1997) Channel change on the River Dee meanders, 1946-1992, from the analysis of air photographs. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13 13-26.
- Gurnell A., Downward S.,R., Jones R. (1994) Channel planform change on the River Dee meanders, 1876-1992. *Regulated Rivers: Research & Management*, 9 187-204.
- Haff P. K. (2001) Waterbots, in: Harmon RS, Doe WW (Eds.), *Landscape Erosion and Evolution Modeling*, Kluwer Academic/Plenum Publishers ed., New York, pp. 239-275.
- Hall J. W., Tarantola S., Bates P. D., Horritt M. S. (2005) Distributed Sensitivity Analysis of Flood Inundation Model Calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 2 117-126.

- Ham D. G., Church M. (2000) Bed-material transport estimated from channel morphodynamics: Chilliwack River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25 1123-1142.
- Hicks D. M., Gomez B. (2003) Sediment transport, in: Kondolf G.M., Piegay H (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, pp. 425-461.
- Hodge, R., Hoey, T., Sklar, L. (2010). Measuring and modelling grain dynamics in bedrock rivers. *Gravel-Bed River Conference*. Tadoussac, Canada.
- Hoey T., Ferguson R. I. (1994) Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers: model development and illustration. *Water Resources Research*, 30 7 2251-2260.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H, Collins J. (1992-2001) *GPS - theory and practice*, Springer ed., Wien New York.
- Homma T., Saltelli A. (1995) Use of Sobol's Quasirandom Sequence Generator for Integration of Modified Uncertainty Importance Measure. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 32 11 1164-1173.
- Hooke R. L. (2003) Predictive Modeling in Geomorphology: An Oxymoron? in: Wilcock PR, Iverson RM (Eds.), *Prediction in geomorphology*, Geophysical monograph 135 ed., American Geophysical Union, pp. 51-62.
- Horritt M. S., Bates P. D. (2002) Evaluation of 1D and 2D numerical model for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268 87-99.
- Horritt M. S., Bates P. D. (2001) Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes*, 15 825-842.
- Hughes M.,L., McDowell P.,F., Marcus A.,W. (2006) Accuracy assessment of georectified aerial photographs: implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74 1-16.
- Hunter N. M., Bates P. D., Horritt M. S., Wilson M. D. (2007) Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. *Geomorphology*, 90 208-225.
- Hupp C. R., Rinaldi M. (2007) Riparian Vegetation Patterns in Relation to Fluvial Landforms and Channel Evolution Along Selected Rivers of Tuscany (Central Italy). *Annals of the Association of American Geographers*, 1 12-30.
- Idelsohn S. R., Onate E. (1994) Finite Volumes and Finite Elements: two good friends. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37 3323-3341.
- Ikeda S., Parker G., Sawai K. (1981) Bend theory of rivers meanders. Part 1.Linear development. *Journal of Fluid Mechanics*, 112 363-377.
- Jagers H. (2003) Modelling planform changes of braided rivers. PhD Thesis, Universiteit Twente, Netherlands, 313.
- Jang C. L., Shimuzu Y. (2007) Vegetation effects on the morphological behavior of alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research*, 45 6 763-772.
- Jiménez-Hornero F. J., Giraldez J. V., Laguna A. (2003) A description of water and sediment flow in the presence of obstacles with a two-dimensional, lattice BGK-cellular automata model. *Water Resources Research*, 39 12.
- Jiongxin X. (1997) Evolution of mid-channel bars in a braided river and complex response to reservoir construction: an example from the middle Hanjiang river, China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22 953-965.

- Jiongxin X. (1996) Channel pattern change downstream from a reservoir: an example of wandering braided rivers. *Geomorphology*, 15 147-158.
- Kirkby M. J. (1996) A Role for Theoretical Models in Geomorphology? in: Rhoads BL, Thorne CR (Eds.), *The Scientific Nature of Geomorphology. Proceedings of the 27th Binghampton Symposium in Geomorphology*, pp. 257-272.
- Kondolf G.,M., Piegay H., Landon N. (2002) Channel response to increased and decreased bedload supply from land use change: contrasts between two catchments. *Geomorphology*, 45 35-51.
- Kondolf G.,M. (1997) Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21 4 533-551.
- Kondolf G.,M. (1994) Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*, 28 225-243.
- Lane E. W. (1955) Design of stable channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineering*, 120 1234-1260.
- Lane S. N., Westaway R., Hicks D. M. (2003) Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 249-271.
- Lane S. N., Bradbrook K. F., Richards K. S., Biron P. A., Roy A. G. (1999) The application of computational fluid dynamics to natural river channels: three-dimensional versus two-dimensional approaches. *Geomorphology*, 29 1-20.
- Lane S. N., Richards K. S. (1997) Linking river channel form and process: time, space and causality revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22 249-260.
- LAWA (2000) *Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland. Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer – Empfehlung*. Berlin (Kulturbuch-Verlag).
- Lawler D. M. (1993) The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18 777-821.
- Lenzi M. A., D'Agostino V, Sonda D. (2000) *Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti*, Bios, Cosenza.
- Leopold L. B., Maddock T. (1953) *The Hydraulic Geometry of Stream Channel and Some Physiographic Implications*. US Geological Survey Professional Paper, 252 .
- Lesser G. R., Roelvink J. A., Van K.,J.A.T.M., Stelling G. S. (2004) Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51 883-915.
- Liebault F., Piegay H., Frey P., Landon N. (2008) Tributaries and the management of main-stem geomorphology, in: Rice SP, Roy AG, Rhoads BL (Eds.), *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*, Wiley,.
- Liebault F., Piegay H. (2002) Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 425-444.
- Liebault F., Clement P., Piegay H. (2001) *Analyse géographique de la recharge sédimentaire des bassins versants de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion*. UMR5600-CNRS .
- Liebault F., Piegay H. (2001) Assessment of channel changes due to long-term bedload supply decrease, Roubion River, France. *Geomorphology*, 36 167-186.
- Lorenzini C. (2006) Risorse forestali, comunità di villaggio e mercanti nella montagna friulana, in: Bianco F, Bondesan A, Paronuzzi P, Zanetti M, Zanferrari A (Eds.), *Il Tagliamento*, CIERRE ed.,.

- Luchi R., Zolezzi G., Tubino M. (2010) Modelling mid-channel bars in meandering channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 902-917.
- Luo W., Duffin K. L., Peronia E., Stravers J. A., Henry G. M. (2004) A web-based interactive landform simulation model (WILSIM). *Computer & Geosciences*, 30 215-220.
- Luppi L., Rinaldi M., Teruggi L. B., Darby S. E., Nardi L. (2009) Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (central Italy). *Earth Surface Processes and Landforms*, 34 530-546.
- Maione U., Machne G. (1982) Studio sulla formazione e sulla propagazione delle piene del fiume Tagliamento. *Relazione Tecnica. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia*.
- Malcherek A. (2001) Hydromechanik der Fließgewässer. Bericht // Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, XI 382.
- Marston R.,A., Bravard J., Green T. (2003) Impacts of reforestation and gravel mining on the Malnant River, Haute-Savoie, French Alps. *Geomorphology*, 55 65-74.
- Marston R.,A., Girel J., Pautou G., Piegay H., Bravard J., Arneson C. (1995) Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology*, 13 121-131.
- Martin Y., Church M. (1995) Bed-material transport estimated from channel surveys: Vedder River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20 347-361.
- Martin-Vide J. P., Ferrer-Boix C., Ollero A. (2010) Incision due to gravel mining: Modeling a case study from the Gállego River, Spain. *Geomorphology*, 117 261-271.
- Mas-Pla J., Montaner J., Sola J. (1999) Groundwater resources and quality variations caused by gravel mining in coastal streams. *Journal of Hydrology*, 216 197-213.
- Mazzoleni, M., Bacchi, B., Barontini, S., Di, B.,G., Ranzi, R. (2011) Uncertainty in flood hazard mapping for piping-induced levee breaches in the Po river. EGU 2011 - European Geosciences Union General Assembly 2011. 4-8 Aprile. Vienna.
- McKay M. D. (1997) Nonparametric variance-based methods of assessing uncertainty importance. *Reliability Engineering and System Safety*, 57 267-279.
- McLean D. G., Church M. (1999) Sediment transport along lower Fraser River 2. Estimates based on the long-term gravel budget. *Water Resources Research*, 35 8 2549-2559.
- Miori S., Repetto R., Tubino M. (2006) A one-dimensional model of bifurcations in gravel bed channels with erodible banks. *Water Resources Research*, 42 11.
- Monegato G., Stefani C. (2010) Stratigraphy and evolution of a long-lived fluvial system in the southeastern Alps (NE Italy): the Tagliamento conglomerate. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 103/2 33-49.
- Monegato G., Ravazzi C., Donegana M., Pini R., Calderoni G., Wick L. (2007) Evidence of a two-fold glacial advance during the last glacial maximum in the Tagliamento end moraine system (eastern Alps). *Quaternary Research*, 68 284-302.
- Monegato G. (2006) Le forme del bacino montano - L'anfiteatro morenico tilaventino, in: Bianco F, Bondesan A, Paronuzzi P, Zanetti M, Zanferrari A (Eds.), *Il Tagliamento*, Cierre ed., pp. 82-86.
- Montoya Cardona M. M. (2008) Analisi dinamica-morfologica dei corsi d'acqua pseudo-meandriiformi mediante modelli a fondo mobile. Tesi di Dottorato, Università di Padova, Dipartimento TESAF, Italia, 197.

- Morris M. D. (1991) Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33 2 161-174.
- Mosselman, E. (2010) Modelling sediment transport and morphodynamics of gravel-bed rivers. Gravel-Bed River Conference. Tadoussac, Canada.
- Mosselman E. (1998) Morphological modelling of rivers with erodible banks. *Hydrological Processes*, 12 1357-1370.
- Mount N.,J., Louis J. (2005) Estimation and propagation of error in measurements of river channel movement from aerial imagery. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30 635-643.
- Mount N.,J., Louis J., Teeuw, R.,M., Zukowskyj P.,M., Stott T. (2003) Estimation of error in bankfull width comparisons from temporally sequenced raw and corrected aerial photographs. *Geomorphology*, 56 65-77.
- Murray A. B. (2007) Reducing model complexity for explanation and prediction. *Geomorphology*, 90 178-191.
- Murray A. B. (2003) Contrasting the Goals, Strategies, and Predictions Associated With Simplified Numerical Models and Detailed Simulations, *Prediction in Geomorphology*, AGU Geophysical Monograph ed., Wilcock, P.; Iverson, D., Washington, pp. 151-165.
- Murray A. B., Paola C. (2003) Modelling the effect of vegetation on channel pattern in bedload rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 131-143.
- Murray A. B., Paola C. (1997) Properties of a cellular braided stream model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22 1001-1025.
- Murray A. B., Paola C. (1994) A cellular model of braided rivers. *Nature*, 371 54-57.
- Neal, J., Bates, P. D., Villanueva, I., Wright, N. (2011) Benchmarking three two-dimensional hydraulic models within a single code. EGU 2011 - European Geosciences Union General Assembly 2011. 4-8 Aprile. Vienna.
- Nelson J. M., Bennett J. P., Wiele S. M. (2003) Flow and Sediment-transport Modeling, in: Kondolf G.M., Piegay H (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, pp. 539-576.
- NERI (National Environmental Research Institute) (1999) National Physical Habitat Index.
- Nezu I. (2005) Open-Channel Flow Turbulence and Its Research Prospect in the 21st Century. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 4 229-246.
- Nicholas A. P., Quine T. A. (2007) Crossing the divide: Representation of channels and processes in reduced-complexity river models at reach and landscape scales. *Geomorphology*, 90 318-339.
- Nicholas A. P., Thomas R., Quine T. A. (2006) Cellular modelling of braided river form and process, *Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management*, Sambrook Smith,G.H., Best, J.L., Bristow, C., Petts, G.E.,.
- Nicholas A. P. (2005) Cellular modelling in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30 645-649.
- Nicholas A. P. (2000) Modelling bedload yield in braided gravel bed rivers. *Geomorphology*, 36 89-106.
- Nikora, V., Roy, A. G. (2010) Secondary flows in rivers: Theoretical framework, recent advances, and current challenges. Gravel-Bed River Conference. Tadoussac, Canada.
- Ollero O. A., Ballarin F.,D., Dlaz B.,E., Mora M.,D., Sanchez F.,M., Acin N.,V., Echeverria A.,M.T., Granado G.,D., Ibisate,Gonzales,De,Matauco,A., Sanchez G.,L., Sanchez G.,N. (2007) Un indice

hydrogeomorfologico (IHG) para la evaluacion del estado ecologico de sistemas fluviales. *Geographicalia*, 52 113-141.

- Oreskes N., Shrader-Frechette K., Belitz K. (1994) Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263 641-646.
- Overton D. C., Meadows ME. (1976) *Storm water modeling*, Academic Press ed., New York.
- Paetzold A., Yoshimura C., Tockner K. (2008) Riparian arthropod responses to flow regulation and river channelization. *Journal of applied ecology*, 45 894-903.
- Page K. J., Heerdegen F. G. (1985) Channel Change on the Lower Manawatu River. *New Zealand Geographer*, 41 1 35-38.
- Paola C., Voller V. R. (2005) A generalized Exner equation for sediment mass balance. *Journal of Geophysical Research*, 110 F04014.
- Papanicolaou A. N., Elhakeem M., Krallis G., Prakash S., Edinger J. (2008) Sediment Transport Modeling Review - Current and Future Developments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 1 DOI 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1.
- Parker G., Wilcock P. R. (1993) Sediment Feed and Recirculating Flumes: Fundamental Difference . *Journal of Hydraulic Engineering*, 119 11 1192-1204.
- Parker G. (1990) Surface based bedload transport relation for gravel rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 4 417-436.
- Paronuzzi P. (2006) Le acque, in: Bianco F, Bondesan A, Paronuzzi P, Zanetti M, Zanferrari A (Eds.), *Il Tagliamento*, Cierre ed., pp. 165-208.
- Parsons M., Thoms M., Norris R. (2002) *Australian River Assessment System: AusRivAS Physical Assessment Protocol*. Monitoring River Health Initiative Technical Report no 22 .
- Peakall J., Ashworth P., Best J. L. (1996) Physical Modelling in Fluvial Geomorphology: Principles, Applications and Unresolved Issue, in: Rhoads BL, Thorne CR (Eds.), *The Scientific Nature of Geomorphology*. Proceedings of the 27th Binghampton Symposium in Geomorphology, pp. 221-253.
- Pedersen M. L., Baattrup-Pedersen A. (2003) *National monitoring programme 2003-2009. Assessment methods manual*. Technical Report no. 21 .
- Peiry J. (1987) Channel degradation in the middle Arve river, France. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1 183-188.
- Pellegrini L., Maraga, F., Turitto, O., Audisio, C., Duci, G. (2008), Evoluzione morfologica di alvei fluviali mobili nel settore occidentale del bacino padano. *Il Quaternario*, 21 1B 251-266.
- Pellegrini L., Simeoni P. (2005) Il Saletto e l'occupazione golenale a Vidulis, in: Pellegrini L (Ed.), *Tagliamento due sponde sul fiume*. Guida storica e tecnica di un tratto del medio corso, Comitato Studi Tagliamento ed., pp. 85-93.
- Penck A., Brückner E. (1909) *Die Alpen im Eiszeitalter*, Tauchnitz, Leipzig.
- Perona P., Molnar P., Savina M., Burlando P. (2009) An observation-based stochastic model for sediment and vegetation dynamics in the floodplain of an Alpine braided river. *Water Resources Research*, 45 W09418.
- Petit F., Poinart D., Bravard J. (1996) Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhone river upstream of Lyon, France ("canal de Miribel"). *Catena*, 26 209-226.

- Phillips J. D. (1992) Non-linear dynamical systems in geomorphology: revolution or evolution. *Geomorphology*, 5 219-229.
- Pujol G. (2009) 'R' Package 'sensitivity'. Version 1.4-0.
- 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 n.2 .
- Regio Magistrato Alle Acque (1927) Breve monografia sul Fiume Tagliamento - Allegato 3: Affluenti (superfici - portate - pendenze - colture - caratteri morfologici e geologici).
- Reid L. M., Dunne T. (2003) Sediment Budgets as an Organizing Framework in Fluvial Geomorphology, in: Kondolf G.M., Piegay H (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, pp. 463-500.
- Rhoads B. L. (1992) Statistical models of fluvial systems. *Geomorphology*, 5 433-455.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini F. (2011a) Manuale tecnico – operativo per la valutazione ed il monitoraggio dello stato morfologico dei corsi d'acqua - Versione 1.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini F. (2011b) Guida illustrata alle risposte - Appendice al Manuale tecnico – operativo per la valutazione ed il monitoraggio dello stato morfologico dei corsi d'acqua.
- Rinaldi M. (2008) Schede di rilevamento geomorfologico di alvei fluviali. *Il Quaternario*, 21 1B 353-366.
- Rinaldi M., Mengoni B., Luppi L., Darby S. E., Mosselman E. (2008a) Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend. *Water Resources Research*, 44 W09428 DOI 10.1029/2008WR007008.
- Rinaldi M., Teruggi L., Simoncini C., Nardi L. (2008b) Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali: alcuni casi di studio dell'Appennino Settentrionale. *Il Quaternario*, 21 1B 291-302.
- Rinaldi, M. (2007) Geomorphological field survey for interpretation and classification of river channels adjustments. *Epitome n.2 Geoitalia 2007*. Rimini.
- Rinaldi M., Wyzga B., Surian N. (2005) Sediment mining in alluvial channel: physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, 21 805-828.
- Rinaldi M. (2003) Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 587-608.
- Rinaldi M., Casagli N. (1999) Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: the Sieve River (Italy). *Geomorphology*, 26 253-277.
- Rinaldi M., Simon A. (1998) Bed-level adjustments in the Arno River, central Italy. *Geomorphology*, 22 57-71.
- Rodi W. (1993) *Turbulence Models and their Application in Hydraulics*, International Association for Hydraulic Research Monograph Series, Rotterdam.
- Rosgen D. L. (1994) A classification of natural rivers. *Catena*, 22 169-199.
- Saltelli A. (2002) Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer Physics Communications*, 145 280-297.
- Saltelli A., Chan K., Scott E.M. (2000) *Sensitivity Analysis*, pp 475.
- Sapozhnikov V. B., Fofoula-Georgiou E. (1999) Horizontal and vertical self-organization of braided rivers toward a critical state. *Water Resources Research*, 35 3 843-851.

- Sapozhnikov V. B., Foufoula-Georgiou E. (1998a) Validation of braided-stream models: Spatial state-space plots, self-affine scaling, and island shapes. *Water Resources Research*, 34 9 2353-2364.
- Sapozhnikov V. B., Foufoula-Georgiou E. (1998b) Anisotropic scaling in braided rivers: An integrated theoretical framework and result from application to an experimental river. *Water Resources Research*, 34 4 863-867.
- Sapozhnikov V. B., Foufoula-Georgiou E. (1997) Experimental evidence of dynamic scaling and indications of self-organized criticality in braided rivers. *Water Resources Research*, 33 8 1983-1991.
- Sapozhnikov V. B., Foufoula-Georgiou E. (1996a) Do the current landscape evolution models show self-organized criticality? *Water Resources Research*, 32 4 1109-1112.
- Sapozhnikov V. B., Foufoula-Georgiou E. (1996b) Self-affinity in braided rivers. *Water Resources Research*, 32 5 1429-1439.
- Scarpa G. (1963) *L'agricoltura del Veneto nella prima metà del XIX secolo. L'utilizzazione del suolo*, Industria libraria tipografica, Torino.
- Schumm S. A. (1977) *The Fluvial System*, Wiley, New York.
- Sear D. A., Newson M. D., Thorne C. R. (2003) *Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology*. R&D Technical Report FD1914 233.
- Sear D. A., Archer D. (1998) Effects of gravel extraction on stability of gravel-bed rivers: the Wooler Water, Northumberland, UK, in: Klingeman PC, Beschta RL, Komar PD, Bradley JB (Eds.), *Gravel-Bed Rivers in the Environment*, Water Resources Publications ed., Highlands Ranch, CO, USA, pp. 415-432.
- Seminara G., Tubino M. (1989) Alternate bars and meandering: Free, forced and mixed interactions, in: Ikeda S, Parker G (Eds.), *River Meandering*, pp. 264-320.
- Sharp J. (2008) *Visual C# Passo per Passo*, Mondadori Informatica ed.
- Siligardi E. A. (2007) IFF2007, *Indice di Funzionalità Fluviale*. Nuova versione del metodo revisionata e aggiornata. Manuale APAT 321.
- Simon A., Castro J. (2003) Measurement and analysis of alluvial channel form, in: Kondolf G.M., Piegay H (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, pp. 291-322.
- Simon A., Downs P. W. (1995) An interdisciplinary approach to evaluation of potential instability in alluvial channels. *Geomorphology*, 12 215-232.
- Simon A. (1989) A model of channel response in disturbed alluvial channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14 11-26.
- Simon, A., Langendoen, E. J., Collison, A., Layzell, A. (2003). Incorporating bank-toe erosion by hydraulic shear into a bank-stability model: Missouri River, Eastern Montana. *Proceedings EWRL-ASCE, World Water and Environmental Resources Congress*.
- Sobol I. M. (1990) Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Matematicheskoe Modelirovanie*, 2 1 112-118.
- Strahler A. N. (1980) Systems theory in physical geography. *Physical Geography*, 1 1-27.
- Surian, N., Rinaldi, M. (2011) Reconstruction and use of evolutionary trajectories of channel morphology. *Advances in River Science 2011*, 18-21 Aprile, Swansea.
- Surian N., Mao L., Giacomini M., Ziliani L. (2009a) Morphological effects of different channel-forming discharges in a gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34 1093-1107.

- Surian N., Rinaldi M., Pellegrini L. (2009b) Linee guida per l'analisi geomorfologica degli alvei fluviali e delle loro tendenze evolutive. 78.
- Surian, N., Rinaldi, M., Pellegrini, L., Audisio, C., Duci, G., Maraga, F., et al.,. (2009c) Towards a channel evolution model for alluvial rivers in Italy. 7th International Conference on Geomorphology. 6-11 Luglio, Melbourne (Australia).
- Surian N., Rinaldi M., Pellegrini L., Audisio C., Maraga F., Teruggi L., Turitto O., Ziliani L. (2009d) Channel adjustments in northern and central Italy over the last 200 years. Geological Society of America Special Paper, 451 83-95. DOI 10.1130/2009.2451(05).
- Surian N., Ziliani L., Comiti F., Lenzi M. A., Mao L. (2009e) Channel adjustments and alteration of sediment fluxes in gravel-bed rivers of north-eastern Italy: potentials and limitations for channel recovery. River Research and Applications, 25 551-567. DOI 10.1002/rra.1231.
- 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, 21 1B 279-290.
- Surian N., Cisotto A. (2007) Channel adjustments, bedload transport and sediment sources in a gravel-bed river, Brenta River, Italy. Earth Surface Processes and Landforms, 32 1641-1656.
- Surian N. (2006) Effects of human impact on braided river morphology: examples from northern Italy, in: Sambrook S,G.H., Best JL, Petts GE (Eds.), Braided Rivers, pp. 327-338.
- Surian, N., Rinaldi, M.(2004) Channel adjustments in response to human alteration of sediment fluxes: examples from Italian rivers. Sediment Transfer through the Fluvial System. IAHS Publ. 288. Mosca.
- Surian N., Rinaldi M. (2003) Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. Geomorphology, 50 307-326.
- Surian N. (1999) Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. Earth Surface Processes and Landforms, 24 1135-1151.
- Tal M., Paola C. (2010) Effects of vegetation on channel morphodynamics: results and insights from laboratory experiments. Earth Surface Processes and Landforms, 35 1014-1028.
- Testimonianze (2005) Le risorse e lo sfruttamento, in: Pellegrini L (Ed.), Tagliamento due sponde sul fiume. Guida storica e tecnica di un tratto del medio corso, Comitato Studi Tagliamento, pp. 210-221.
- Thomas R., Nicholas A. P., Quine T. A. (2007) Cellular modelling as a tool for interpreting historic braided river evolution. Geomorphology, 90 302-317.
- Thomas R. (2003) Development and evaluation of a cellular model to simulate braided river dynamics.
- Thomas R., Nicholas A. P. (2002) Simulation of braided river flow using a new cellular routing scheme. Geomorphology, 43 179-195.
- Thorne C. R. (1997) Channel types and morphological classification, in: Thorne CR, Hey RD, Newson MD (Eds.), Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management, John Wiley & Sons Ltd, pp. 175-222.
- Thorne C. R. (1998) Stream Reconnaissance Handbook. Geomorphological investigation and analysis of river channels, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.
- Thorne C. R., Russell A. P. G., Alam M. K. (1993) Planform pattern and channel evolution of the Brahmaputra River, Bangladesh, in: Best JL, Bristow CS (Eds.), Braided Rivers, Special Publication n° 75 ed., Geological Society, pp. 257-276.

- Thornes J. B., Ferguson R. I. (1981) *Geomorphology, Quantitative Geography: A British View*, Routledge and Kegan Paul ed., Wrigley, N.; Bennett, R. J., Londra, pp. 284-293.
- Trimble S. W. (1998) Dating fluvial processes from historical data and artifacts. *Catena*, 31 283-304.
- Tubino, M., Bertoldi, W., Zolezzi, G. (2010). Morphodynamics of bars in gravel bed rivers: bridging analytical models and field observations. *Gravel-Bed River Conference*. Tadoussac, Canada.
- Tubino M., Bertoldi W. (2008) Bifurcations in gravel-bed rivers, in: Habersack HM, Piegay H, Rinaldi M (Eds.), *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration*, pp. 133-160.
- Tubino M., Repetto R., Zolezzi G. (1999) Free bars in rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 37 6 759-775.
- Uribelarrea D., Perez-Gonzales A., Benito G. (2003) Channel changes in the Jarama and Tagus rivers (central Spain) over the past 500 years. *Quaternary Science Reviews*, 22 2309-2321.
- US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. (2008) *HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 4.0.*
- Van De Wiel M. J., Coulthard T. J. (2010) Self-organized criticality in river basins: Challenging sedimentary records of environmental change. *Geology*, 38 87-90.
- Van De Wiel M. J., Coulthard T. J., Macklin M. G., Lewin J. (2007) Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model. *Geomorphology*, 90 283-301.
- Van Fraassen B. C. (1980) *The Scientific Image*, Oxford.
- Van Sickle J. (1996) *GPS for Land Surveyors*, Ann Arbor Press ed., Chelsea, Michigan.
- Venables W. N., Smith D. M., R Development Core Team. (2009) *An Introduction to R. Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics. Version 2.10.1.*
- Wasklewicz T., Anderson S., Liu P. (2004) Geomorphic context of channel locational probabilities along the Lower Mississippi River, USA. *Geomorphology*, 63 145-158.
- Wheaton J. M., Brasington J., Darby S. E., Sear D. A. (2010) Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 136-156.
- Wheaton J. M. (2008) *Uncertainty in Morphological Sediment Budgeting of Rivers*. PhD Thesis, School of Geography, University of Southampton, 412.
- Wilcock P. R., Crowe J. C. (2003) Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 2 120-128.
- Wilcock P. R., Iverson R. M. (2003) Prediction in geomorphology, in: Wilcock PR, Iverson RM (Eds.), *Prediction in geomorphology, Geophysical monograph 135 ed.*, American Geophysical Union, pp. 3-14.
- Williams G. P., Wolman M. G. (1984) Downstream effects of dams on alluvial rivers. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1286*.
- Winterbottom S. (2000) Medium and short-term channel planform changes on the Rivers Tay and Tummel, Scotland. *Geomorphology*, 34 195-208.
- Winterbottom S., Gilvear D. (2000) A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated river Tummel, Scotland. *Regulated Rivers: Research & Management*, 16 127-140.
- Wishart D., Warburton J., Bracken L. (2008) Gravel extraction and planform change in a wandering gravel-bed river: The River Wear, Northern England. *Geomorphology*, 94 131-152.

- WL D. Hydraulics (2011) Delft3D-Flow - Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Ver. 3.15.
- Wolfram S. (1984) Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311 419-424.
- Wyzga B. (2001) Impact of the channelization-induced incision of the Skawa and Wisloka Rivers, Southern Poland, on the conditions of overbank deposition. *Regulated Rivers: Research & Management*, 17 85-100.
- Wyzga B. (1993) River response to channel regulation: case study of the Raba River, Carpathians, Poland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18 541-556.
- Yalin M. S. (1971) *Theory of Hydraulic Models*, Londra.
- Zanferrari A. (2006) Dagli antichi oceani alle montagne d'oggi, in: Bianco F, Bondesan A, Paronuzzi P, Zanetti M, Zanferrari A (Eds.), *Il Tagliamento*, Cierre ed.
- Zanoni L., Gurnell A., Drake N., Surian N. (2008) Island dynamics in a braided river from analysis of historical maps and air photographs. *River Research and Applications*, 24 1141-1159.
- Zhang Y. (2006) CCHE-GUI – Graphical Users Interface for NCCHE Model User's Manual – Version 3.0.
- Ziliani, L., Surian, N. (2007) Channel adjustments in the Tagliamento River (north eastern Italy) during the last 200 years. *Epitome n.2 Geoitalia 2007*. Rimini.
- Zolezzi G., Seminara G. (2001) Downstream and upstream influence in river meandering. Part 1. General theory and application to overdeepening. *Journal of Fluid Mechanics*, 438 183-211.