



REGIONE MARCHE
SERVIZIO LAVORI PUBBLICI
UFFICIO PROGETTI



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ANCONA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
ISTITUTO DI IDRAULICA

STUDI, INDAGINI, MODELLI MATEMATICI FINALIZZATI ALLA REDAZIONE DEL PIANO DI DIFESA DELLA COSTA

F

TRASPORTO SOLIDO FLUVIALE E DINAMICA DELLE FOCI

Regione Marche
Il Dirigente Servizio LL.PP.
Dott. Ing. Libero Principi

Il Coordinatore
Prof. Ing. Alessandro Mancinelli

INDICE

1)	<u>INTRODUZIONE</u>	F.1
2)	<u>ANALISI DEGLI STUDI ESISTENTI</u>	F.1
3)	<u>APPROCCIO MODELLISTICO DELLA STIMA DEL TRASPORTO SOLIDO FLUVIALE</u>	F.5
3.1)	<u>Modello matematico dell'evoluzione altimetrica dell'alveo del Po</u>	F.5
3.2)	<u>La stima del trasporto solido nel Piano per la difesa del mare e la riqualificazione ambientale del litorale della regione Emilia Romagna</u>	F.7
4)	<u>DINAMICA DELLE FOCI FLUVIALI</u>	F.9
5)	<u>CONSIDERAZIONI SULLO STATO DEI BACINI IDROGRAFICI</u>	F.12
6)	<u>LINEE DI INTERVENTO</u>	F.13

TRASPORTO SOLIDO FLUVIALE E DINAMICA DELLE FOCI

1) INTRODUZIONE

Il trasporto solido fluviale rappresenta un elemento fondamentale dell'evoluzione dei corsi d'acqua e delle aree costiere. La conoscenza di questo fenomeno è essenziale per la comprensione dei processi in corso nel territorio e per la valutazione delle problematiche legate all'interazione tra attività antropiche e dinamica fluviale e costiera.

La complessità dei fenomeni fisici che intervengono durante l'evoluzione del fenomeno, rende ardua la stima del processo di rimozione e trasporto del materiale solido senza l'introduzione di ipotesi ed approssimazioni semplificative. In particolare risulta estremamente complessa la valutazione della frazione del trasporto solido al fondo la quale, per contro, costituisce l'elemento cardine dei fenomeni di evoluzione fluviale e costiera per i fiumi ed il litorale marchigiano.

La mancanza pressoché totale di dati misurati del trasporto sul fondo fa sì che esso venga generalmente valutato indirettamente sulla base di modelli geomorfologici e/o idraulici.

2) ANALISI DEGLI STUDI ESISTENTI

Il problema della stima del trasporto solido al fondo dei corsi d'acqua marchigiani è stato già affrontato dall'Aquater nello "Studio Generale per la Difesa delle Coste" del 1982. In questo lavoro la portata solida dei fiumi delle Marche è stata valutata sulla base della capacità potenziale dei bacini idrografici di fornire materiale sciolto all'azione erosiva delle acque superficiali.

Pertanto, per prima cosa è stata redatta la carta della erodibilità dei bacini idrografici, definendo cinque classi di erodibilità, sulla base di parametri condizionanti la degradazione dei versanti quali la litologia, l'uso del suolo e l'assetto fisico del bacino e suddividendo i bacini in aree a diverso grado di erodibilità.

Successivamente ad ogni classe di erodibilità sono stati assegnati due coefficienti di ablazione specifica, uno come ipotesi minima ed uno come ipotesi massima, i quali esprimono, per ciascuna classe, l'erosione media annua per chilometro quadrato (v. Tabella 1). In questo modo per ogni singolo bacino è stato possibile calcolare l'ablazione totale potenziale minima e massima, che rappresenta il volume medio annuo di materiale solido eroso dalla superficie del bacino idrografico.

Da questo quantitativo complessivo, in mancanza di dati sperimentali circa il rapporto fra

trasporto solido in sospensione e di fondo, la frazione percentuale del trasporto solido di fondo potenziale è stata valutata caso per caso sulla base di dati generali riportati in letteratura.

I dati dell'ablazione e del trasporto potenziale per ogni bacino idrografico sono riassunti nella Tabella 2.

Per passare infine dai valori potenziali alla stima dell'apporto solido a mare effettivo si sono valutati caso per caso, gli effetti dei fattori limitanti del trasporto solido quali gli interventi di sistemazione e stabilizzazione dei bacini e dei corsi d'acqua, il prelievo di inerti in alveo e la costruzione di traverse e sbarramenti lungo le aste fluviali. Tutti questi elementi, difficilmente quantificabili singolarmente, sono stati stimati complessivamente come una percentuale riduttiva da applicare al trasporto potenziale.

I risultati finali dello Studio dell'Aquater sono riportati nella Tabella 3. Da essa risulta che, in conseguenza dell'insieme degli interventi antropici in alveo e nei bacini di alimentazione, il trasporto solido al fondo effettivo risulta praticamente il 30% di quello potenziale. E' questo un dato sicuramente preoccupante e critico la cui verifica diretta non è stata ancora possibile.

Alla base di questa valutazione complessiva si trova un'indagine specifica sul prelievo dagli alvei nel periodo 1966 – 1975, condotta dalla stessa Società Aquater. Data la rilevanza e l'unicità della ricerca si ritiene opportuno riportarne i principali risultati.

Essa si è basata sui dati relativi alle concessioni del Genio Civile opportunamente corretti mediante i consumi di energia elettrica e le caratteristiche tecniche dei macchinari. La Tabella 4 mostra il quadro completo delle stime delle estrazioni di inerti per i fiumi delle Marche nel periodo 1966 – 1975. Dai principali corsi d'acqua marchigiani risultano prelevati complessivamente quasi 13.000.000 m³ di inerti. Il fiume Metauro occupa il primo posto con 2.700.000 m³ di materiale estratto, mentre il fiume Esino ha la più alta media annuale (più di 300.000 m³ per anno).

Gli unici studi sperimentali per la misura del trasporto solido al fondo sono stati condotti alla fine degli anni '80 (v. Tazioli et al. "Analisi comparative di trasporto solido in due bacini attrezzati delle Marche: il F. Esino ed il F. Musone", in Trasporto solido ed evoluzione morfologica nei corsi d'acqua, Trento, 1988); essi hanno evidenziato un comportamento assai diverso dei corsi d'acqua presi in esame.

Ciò è dovuto indubbiamente a diversi fattori, quali la dimensione del bacino imbrifero, la pendenza dell'alveo nel tratto medio-terminale e le caratteristiche litologiche del materiale di fondo alveo, il cui peso è difficile valutare con esattezza.

Il trasporto solido al fondo, secondo gli Autori, mostra una forte variabilità sia da un evento all'altro, a condizioni idrodinamiche simili, sia nell'ambito di uno stesso evento di piena. Inoltre, in entrambi i corsi d'acqua (Musone ed Esino), è stato evidenziato un carattere nettamente

impulsivo del trasporto al fondo, con variazioni anche del 300%.

Se si fa un raffronto tra i corsi d'acqua presi in considerazione, il trasporto solido al fondo corrispondente a portate liquide di $50 \text{ m}^3/\text{s}$ è di $0,05 \text{ kg/s}$ per il fiume Musone e di 15 kg/s per il fiume Esino. Questi risultati indicano, per entrambi i fiumi, un trasporto di molti ordini di grandezza inferiore a quello che si può ricavare con formule teoriche. Le misure, protratte per un breve periodo di tempo, hanno lasciato aperti numerosi problemi circa il processo del trasporto.

Tabella 1 – Classi di erodibilità adottate per la stima dell'ablazione totale potenziale dei bacini idrografici marchigiani (Aquater, 1982)

Classe	Descrizione	Erosione media annua per km^2 (mm)	
		min	max
I	erodibilità molto bassa	0.055	0.1
II	erodibilità bassa	0.1	0.3
III	erodibilità media	0.2	0.5
IV	erodibilità elevata	0.5	0.9
V	erodibilità molto elevata	1.0	1.5

Tabella 2 - Stima dell'ablazione totale potenziale e del trasporto solido potenziale dei bacini idrografici marchigiani (Aquater, 1982)

Fiume	Superficie (km^2)	Ablazione totale potenziale (m^3/anno)		Trasporto solido di fondo potenziale (m^3/anno)	
		min	max	min	max
Foglia	701	387350	643100	42000	78000
Arzilla	104	69300	113500	12100	20400
Metauro	1405	325200	594900	89000	172000
Cesano	413	187550	324300	46300	85400
Misa	376	245950	398200	42700	74600
Esino	1203	462950	811900	87500	162000
Musone	642	392450	644800	55200	92600
Potenza	775	260600	478500	80000	151500
Chienti	1297	643050	1062700	104500	185500
Tenna	487	203800	418500	38500	71500
Ete vivo	180	151300	235000	15500	25500
Aso	278	117600	212600	41700	77400
Menocchia	94	66800	107800	8200	14000
Tesino	114	79000	126600	24400	39000
Tronto	1192	476700	864000	95000	185000

Tabella 3 - Stima del trasporto solido al fondo dei corsi d'acqua marchigiani (Aquater, 1982)

Fiume	Superficie (km ²)	Trasporto solido di fondo potenziale (m ³ /anno)		Trasporto solido di fondo a mare prima del 1960 (m ³ /anno)			Trasporto solido di fondo a mare dopo il 1960 (m ³ /anno)		
		min	max	%	min	max	%	min	max
Foglia	701	42000	78000	60	25000	50000	40	15000	35000
Arzilla	104	12100	20400	60	7000	12000	60	7000	12000
Metauro	1405	89000	172000	40	35000	63000	10	10000 ⁽¹⁾	20000 ⁽¹⁾
Cesano	413	46300	85400	50	30000	50000	40	20000	35000
Misa	376	42700	74600	20	10000	20000	20	8000	15000
Esino	1203	87500	162000	50	40000	80000	15	18000	26000
Musone	642	55200	92600	50	25000	45000	50	25000	45000
Potenza	775	80000	151500	40	35000	60000	10	10000 ⁽²⁾	20000 ⁽²⁾
Chienti	1297	104500	185500	40	40000	70000	20	25000	40000
Tenna	487	38500	71500	60	25000	45000	40	15000	30000
Ete vivo	180	15500	25500	40	5000	10000	40	5000	10000
Aso	278	41700	77400	60	25000	55000	10	5000 ⁽²⁾	10000 ⁽²⁾
Menocchia	94	8200	14000	70	5000	10000	70	5000	10000
Tesino	114	24400	39000	70	15000	25000	-	0 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾
Tronto	1192	95000	185000	60	55000	90000	30	30000	50000

⁽¹⁾ a questi valori vanno aggiunti circa 15000 m³ relativi al tratto terminale fra Cerbara ed il mare

⁽²⁾ a questi valori vanno aggiunti circa 10000 m³ relativi al tratto terminale

⁽³⁾ il trasporto può essere stimato circa 10000 – 20000 m³

Tabella 4 – Estrazioni medie annue dagli alvei dei fiumi marchigiani nel periodo 1966-1975 (Aquater, 1982)

Fiume	Totale estratto (m ³)	Anni di estrazione	Media annuale (m ³)
Foglia	1.199.894	10	119.989
Metauro	2.704.588	10	270.459
Cesano	131.242	3	43.747
Misa	13.815	5	2.763
Esino	1.833.946	6	305.658
Musone	471.870	10	47.187
Potenza	1.380.640	7	197.234
Chienti	2.633.060	10	266.331
Tenna	818.972	7	116.996
Aso	434.958	8	53.370
Tesino	313.428	6	52.238
Tronto	778.176	7	111.168
TOTALE	12.728.404		1.272.840

3) APPROCCIO MODELLISTICO DELLA STIMA DEL TRASPORTO SOLIDO FLUVIALE

In condizioni generali la conoscenza quantitativa del trasporto solido fluviale può essere studiata mediante modellazione dei fenomeni fisici che intervengono nell'interazione tra la corrente idrica fluviale ed il materiale che costituisce l'alveo del fiume.

Lo schema fondamentale cui si fa riferimento è quello di un bilancio dei sedimenti applicato al tronco di corrente e per un assegnato intervallo di tempo. L'equazione di bilancio è scritta ovviamente ponendo la differenza fra i volumi solidi stimati entranti e quelli stimati uscenti uguale al volume che è stato depositato (od eroso) all'interno del tronco in esame nell'intervallo di tempo considerato.

A questa semplicità della schematizzazione non corrisponde un'analogia facilità di quantificare i termini dell'equazione di base.

Infatti, dato per assodato che non si disponga di una serie quasi continua di misure del trasporto solido, la stima del volume dei sedimenti che in un dato intervallo di tempo attraversa una sezione del corso d'acqua considerato può essere condotta solo disponendo sia di una formula affidabile per tale calcolo, sia della conoscenza dei valori delle grandezze che in tale formula appaiono.

Il problema si sposta quindi sulla scelta delle relazioni matematiche, sulla loro applicabilità e sulla indispensabile taratura. È evidente che, procedendo in questo modo, lo studio del trasporto solido diventi più complesso ed oneroso e, conseguentemente più approssimato.

Può essere significativo riportare, a titolo di esempio, due modi di procedere nella soluzione di questo problema in altrettanti casi pratici.

3.1) Modello matematico dell'evoluzione altimetrica dell'alveo del Po

Agli inizi degli anni '80, nell'ambito della ricerca Po - AcquAgricolturaAmbiente promossa dal Ministero dell'Agricoltura e dal Consorzio per il Canale Emiliano Romagnolo, è stato sviluppato un modello matematico di evoluzione altimetrica dell'alveo del Po dalla Becca a Pontelagoscuro (Po - AcquAgricolturaAmbiente, vol. 2 *L'alveo e il delta*, Il Mulino, Bologna, 1990).

Il modello, basato sull'ipotesi di corrente unidimensionale, valuta il trasporto solido sulla base della variazione nello spazio e nel tempo della quota del fondo dell'alveo sul livello del medio mare.

Tale spostamento, legato necessariamente alla variazione della portata liquida e della quota di superficie libera della corrente, può essere ottenuto risolvendo un sistema di tre equazioni che esprimono per ogni tronco elementare e per ogni intervallo di tempo:

- il principio del bilancio del flusso della quantità di moto applicato alla corrente liquida;
- il principio della conservazione della massa applicato ancora alla corrente liquida;
- il principio della conservazione della massa applicato ai sedimenti.

Tali equazioni si scrivono in forma differenziale nel seguente modo:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{\Omega} \right) + g\Omega \frac{\partial h}{\partial x} + g\Omega S_f = 0 \\ \frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \\ g_{as} b \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} - q_s = 0 \end{cases}$$

con x (ascissa) e t (tempo) variabili indipendenti, e con:

- Q = portata liquida convogliata all'interno dell'alveo attivo (m^3/s);
- h = quota della superficie libera sul livello del medio mare (m);
- Ω = area della sezione liquida (m^2);
- g = accelerazione di gravità (m/s^2);
- $S_f = \tau_0/\gamma R$ = pendenza d'attrito locale (τ_0 tensione media al fondo della sezione, γ peso specifico del fluido, R raggio idraulico);
- q = somma algebrica delle portate scambiate per unità di lunghezza della corrente fra l'alveo attivo ed i corpi idrici laterali (golene, affluenti, ecc.);
- γ_{as} = peso specifico apparente dei sedimenti (kg/m^3);
- b = larghezza media locale della corrente (m);
- z = quota del fondo (punto più basso della sezione) sul livello del medio mare (m);
- Q_s = portata solida totale (nell'alveo attivo), in peso secco, dei sedimenti dell'alveo (kg/s);
- q_s = portata solida, in peso secco, scambiata dall'alveo attivo con l'esterno per unità di lunghezza del tronco ($\text{kg}/\text{s m}$).

La soluzione completa del sistema è ottenibile solo per via numerica e necessita della conoscenza dei seguenti elementi:

- le caratteristiche geometriche delle sezioni trasversali del corso d'acqua e dei suoi affluenti principali, per questi ultimi limitatamente alle aste terminali;
- le caratteristiche granulometriche dei sedimenti in alveo;
- i valori della portata media giornaliera degli affluenti;

- il valore del trasporto solido alla sezione di ingresso ed alla confluenza degli affluenti (tale grandezza viene generalmente dedotta mediante relazioni matematiche sulla base della portata liquida),
- il valore del volume dei sedimenti scambiati dal corso d'acqua con l'esterno;
- la scala di deflusso alla sezione di chiusura del tratto schematizzato.

Appare del tutto evidente come la mole di dati necessari per la soluzione del problema sia attualmente proponibile solo per un corso d'acqua come il Po, il cui monitoraggio ha una tradizione ormai più che centenaria.

Questo tipo di approccio, rigoroso e classico dal punto di vista scientifico, non è quindi applicabile al contesto dei fiumi marchigiani, per i quali i poche dati disponibili non risultano né aggiornati, né omogeneamente distribuiti sul territorio.

3.2) La stima del trasporto solido nel Piano per la difesa del mare e la riqualificazione ambientale del litorale della regione Emilia Romagna

Nel recente lavoro di aggiornamento del Piano della costa, condotto dall'Idroser per conto della Regione Emilia Romagna, il problema della stima del trasporto solido fluviale è stato affrontato con l'obiettivo di valutare gli effetti del blocco quasi totale delle escavazioni di materiali inerti dagli alvei dei fiumi appenninici e della progressiva riduzione, fino all'annullamento, delle concessioni per l'escavazione di inerti sul Po. Lo Studio è stato condotto ovviamente distinguendo tra i fiumi romagnoli dal Reno al Conca da una parte ed il Po dall'altra.

Tralasciando l'analisi relativa al Po, di particolare interesse è l'approccio al problema utilizzato per i fiumi appenninici.

La metodologia utilizzata può essere distinta in due parti: la prima utilizza un metodo di "regionalizzazione" e permette di ottenere l'andamento, nel corso degli anni, del trasporto in sospensione e al fondo all'uscita dei bacini montani; la seconda, tenendo conto delle modificazioni intervenute nel tratto vallivo, serve per il trasferimento del materiale fino al mare ed utilizza un modello definito del "serbatoio di sedimenti", in grado di tenere conto delle modificazioni per attività antropiche.

Lo sviluppo analitico della prima parte dello Studio si basa sull'elaborazione di dati rilevati in venti stazioni sia idrometriche che torbiometriche del Servizio Idrografico ubicate nei bacini dal Trebbio al Savio, caratterizzate da condizioni idrografiche e geomorfologiche non troppo difformi rispetto a quelle in studio e da serie storiche di sufficiente lunghezza.

Il risultato di questa prima parte dello Studio è la stima del deflusso solido medio totale ed al fondo alla chiusura dei bacini montani, su un arco temporale dal 1950 al 2015.

Questo dato rappresenta l'elemento di input per l'equazione di bilancio che viene applicata nel tratto di valle, e che si scrive nel seguente modo:

$$\begin{cases} Q_m(T) = Q_{m \max} \cdot \left[a + (1-a) \left(1 - \frac{1}{e^{2kV(T)}} \right) \right] & \text{per } V(T) \geq 0 \\ Q_m(T) = Q_{m \max} \cdot \frac{a}{e^{k|V(T)|}} & \text{per } V(T) < 0 \end{cases}$$

dove:

Q_m = apporto solido a mare;

$Q_{m \max}$ = massimo apporto solido a mare;

a = rapporto $Q_{m \text{ equil}}/Q_{m \max}$, dove $Q_{m \text{ equil}}$ è la portata solida che eguaglia ingresso e uscita;

V = volume del serbatoio di sedimenti;

k = coefficiente diverso per le due frazioni, in sospensione ed al fondo, funzione delle caratteristiche del corso d'acqua considerato;

ed in cui la funzione $V(T)$ è data da :

$$V(T) = V(T-1) + Q_s(T) - Q_m(T-1) - Q_e(T)$$

dove

T = anno

Q_s = apporto solido di monte;

Q_m = portata solida che defluisce a mare calcolata nella base del volume relativo all'anno precedente;

Q_e = prelievo per escavazione;

Il modello del "serbatoio dei sedimenti", applicato nella seconda parte dello Studio, valuta il trasferimento a mare del materiale solido giunto nella zona di pianura, tenendo conto delle caratteristiche fisiche del corso d'acqua, dei quantitativi in arrivo da monte, dei volumi estratti per escavazioni e della presenza di infrastrutture trasversali e longitudinali che condizionano pesantemente la naturale evoluzione del letto dell'alveo.

La mancanza di alcuni dati, quali la quantità di materiale intercettata dalle opere fluviali, ha richiesto che questi venissero stimati mediante considerazioni qualitative, pena la non applicabilità del modello.

Sulla base di queste considerazioni lo Studio fornisce, per ogni corso d'acqua, una stima dell'apporto di fondo utile a mare in migliaia di metri cubi annui nell'arco temporale 1980-2000.

Volendo valutare l'applicabilità di questo Studio ai fiumi marchigiani, per prima cosa si

sono ricercate le stazioni idrometriche e torbiometriche che hanno funzionato nelle Marche. Da questa analisi è emerso quanto segue:

- nel complesso hanno operato 4 stazioni torbiometriche: Foglia a Montecchio, Metauro a Barco di Bellaguardia, Chienti a Belforte e Tronto a Tolignano di Marino;
- le stazioni sul Metauro e sul Chienti sono del tutto inutilizzabili perché hanno funzionato rispettivamente due e tre anni nel periodo 1947-1949;
- le altre due stazioni hanno un periodo di attività più lungo (8 anni per il Foglia e 17 per il Tronto) che comunque termina prima del periodo critico di alterazione del trasporto solido (1965-1975) per effetto delle attività antropiche.

Queste considerazioni fanno sì che il modello di regionalizzazione del trasporto solido alla chiusura dei bacini montani non sia applicabile ai fiumi marchigiani per la mancanza totale dei dati.

La strada da seguire è quella di riattivare le stazioni idrometriche e torbiometriche che hanno funzionato nel passato ed individuare alcuni bacini campione in grado di fornire risultati attendibili.

4) DINAMICA DELLE FOCI FLUVIALI

L'analisi del processo di trasporto solido, effettuata nei capitoli precedenti, evidenzia l'indeterminatezza in cui ci si muove nell'esaminare questo fenomeno e la difficoltà di affrontare con un approccio rigoroso lo studio di questo problema.

E' evidente tuttavia che un riscontro, seppure indiretto, dello stato del trasporto solido fluviale può essere fornito dall'esame dell'evoluzione degli apparati di foce.

Quando un corso d'acqua sfocia nel mare, il materiale solido che viene trasportato dalla corrente liquida tende a depositarsi formando un delta o più semplicemente una barra solida nella zona della foce fluviale.

Il getto della corrente fluviale che si immette nel corpo idrico ricevente si diffonde subendo un processo di rallentamento in cui le velocità medie decrescono verso il largo e diminuiscono dall'asse verso i bordi del getto con legge gaussiana.

L'evoluzione del processo di deposizione dei sedimenti trasportati dalla corrente dipende dall'interazione tra il processo di efflusso della portata e l'azione modellatrice del mare.

In realtà molti sono i fattori che intervengono nella formazione di una barra di foce quali i processi di diffusione per turbolenza, per attrito sul fondo e per galleggiamento, da una parte; l'azione del moto ondoso, delle correnti di marea e dell'innalzamento del livello medio del mare

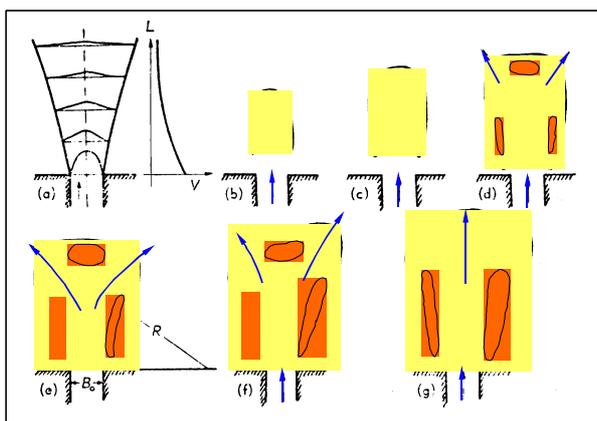


Figura 1 – Evoluzione di una barra di foce in assenza di onde (Mikhailov, 1966)

Le forme assunte dagli apparati di foce dipendono dalla assenza o dalla presenza o dalla prevalenza di uno dei tre fattori sopra riportati.

Nel caso delle foci marchigiane la marea e le correnti di marea possono ritenersi trascurabili per cui il processo deposizionale è dominato dalla corrente fluviale, dalle onde o da entrambi.

Il primo caso è ben rappresentato da *Mikhailov* (Hydrology and formation of river-mouth bars. in *Proc. Humid tropic research, Unesco*, pp. 59-64, 1966) che ha mostrato qualitativamente qual è lo sviluppo di una barra di foce nel caso in cui il processo di efflusso della corrente fluviale sia il principale fattore in gioco. quando il getto liquido entra nel corpo recettore, esso subisce un allargamento e conseguentemente la velocità della corrente diminuisce sia longitudinalmente che trasversalmente al flusso. Il materiale solido trasportato si deposita coerentemente con la distribuzione delle velocità creando una barra davanti alla foce (v. Fig. 1) e delle secche trasversali al getto. Il fenomeno si incrementa finché la parte centrale della barra emerge, formando un'isola, e la corrente si divide in due rami. La velocità di crescita della barra è direttamente proporzionale alla portata solida ed inversamente proporzionale alla pendenza del fondale.

Tuttavia, se non intervengono fattori esterni che provocano il consolidamento della barra-isola, il processo non cresce all'infinito. Infatti la biforcazione della corrente è motivo di restringimento del getto, il quale aumenta così la sua capacità erosiva dei depositi sul fondo. A ciò segue la progressiva rettificazione della corrente e lo smantellamento dell'isola, ripristinando le condizioni per un processo periodico di formazione della barra di foce.

Nel secondo caso le foci fluviali subiscono l'effetto diretto del moto ondoso, che gioca un ruolo fondamentale sia sul comportamento dell'effluente che sul materiale depositato dalla corrente fluviale. Una articolata indagine sperimentale condotta da *Wright* (Morphodynamics of a wave-dominated river mouth, in *Proc. 15th Coast. Eng. Conf.*, pp. 1721-1737, 1976) sullo Shoalhaven

dall'altra. Se la capacità di trasporto del mare supera il volume solido trasportato dal fiume, la barra viene smantellata, altrimenti questa cresce velocemente in rapporto alla disponibilità di materiali solidi nel bacino di drenaggio.

Numerosi autori hanno descritto qualitativamente il processo di costruzione di un delta fluviale; le osservazioni in natura hanno confermato l'esistenza di tre fattori dominanti: portate fluviali solide e liquide, moto ondoso e

River (N.S.W. – Australia) ha evidenziato il comportamento di una foce dominata dall'azione del mare sia con deflussi di piena che con portate di magra (v. Fig.2).

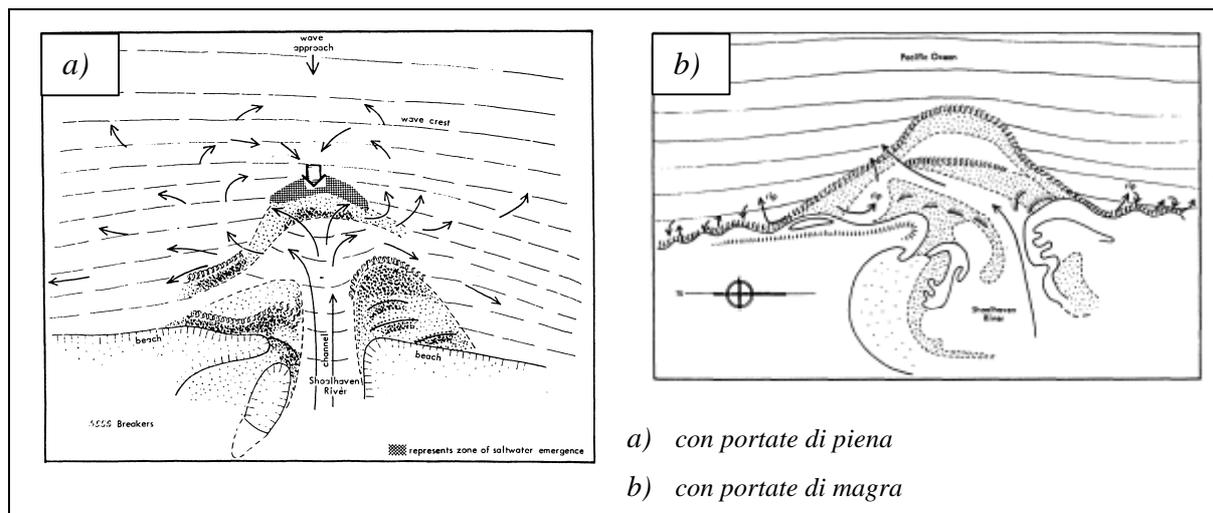


Figura 2 – Evoluzione di una foce dominata dall'azione del mare (Wright, 1976)

Il fenomeno descritto da *Wright*, secondo il quale, in condizioni di portata media o di magra, il canale d'efflusso del fiume risulta parzialmente o completamente ostruito dal materiale accumulato dal moto ondoso, è un dato comune a tutti i fiumi marchigiani, per i quali la barra di foce viene parzialmente smantellata dalla corrente fluviale solo durante le maggiori portate di piena.

Komar (Computer models of delta growth due to sediment input from rivers and longshore transport, in *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 84, pp. 2217-2226, 1973) attraverso un semplice modello "one line", ha studiato la forma assunta da un delta in condizione di portata solida fluviale costante. La linea di costa sui due lati del delta raggiunge una posizione di equilibrio in un tempo che dipende dalla portata solida fluviale e dalla pendenza dei fondali.

Una volta raggiunta questa configurazione, l'energia delle onde frangenti è esattamente sufficiente per distribuire lungo costa il materiale solido trasportato dalla corrente. Se la portata solida del fiume diminuisce la cuspidè fluviale progressivamente si riduce.

I processi sopra descritti possono essere utilizzati per interpretare l'evoluzione delle foci nel lungo periodo.

Esaminando alcuni documenti storici, si è visto che la linea di costa è stata in costante avanzamento nell'intero litorale sottile, dal Medioevo fino al XIX secolo.

All'avanzamento progressivo segue, all'inizio del '900 un'inversione di tendenza con un arretramento di gran parte del litorale marchigiano.

Utilizzando infatti gli oggetti del sistema informativo geografico predisposto per la costa delle Marche, è stato possibile effettuare una ricostruzione storica dell'evoluzione delle foci fluviali a partire dal 1894, data della prima cartografia ufficiale dell'IGM (v. Figure dalla 3 alla 13).

Il dato più evidente che si può notare dall'esame delle suddette figure, è il completo azzeramento delle cuspidi fluviali avvenuto durante questo secolo, in modo generalizzato lungo tutto il litorale marchigiano. Si tratta di arretramenti sempre notevoli, il cui ordine di grandezza non è mai inferiore ai 100 metri, raggiungendo, nel caso più eclatante del fiume Tronto, valori superiori ai 300 metri. In particolare, dall'elaborazione effettuata sulla cartografia disponibile, si evidenzia come il progressivo arretramento della costa abbia subito una brusca accelerazione a partire dagli anni '50.

In accordo con quanto già evidenziato dallo Studio dell'Aquater, la causa di tale comportamento va ricercata sicuramente nella drastica riduzione del trasporto solido, avvenuta negli anni '60-'80. Il prelievo degli inerti in alveo, la costruzione delle opere di regolazione e di sistemazione dei corsi d'acqua, la trasformazione delle attività agricole hanno fortemente diminuito la quantità di materiale grossolano trasportabile a mare dalle portate di piena.

In questo modo, nel lungo periodo, l'azione erosiva del mare è risultata preponderante sulla capacità di trasporto, alterando la situazione di equilibrio in cui si trovavano le foci fluviali.

5) CONSIDERAZIONI SULLO STATO DEI BACINI IDROGRAFICI

Lo stato generale dei bacini idrografici e dei corsi d'acqua delle Marche è sicuramente mutato in questi ultimi venti anni, rispetto a quanto descritto dall'Aquater nel suo Studio.

Il primo elemento nuovo di rilievo è il blocco delle escavazioni in alveo per prelievo degli inerti, in atto ormai da più di venti anni, per effetto della legislazione regionale. Questo fatto dovrebbe significare una ripresa del trasporto solido in alveo sia nel tratto collinare che in quello di valle del fiume, in accordo anche con quanto evidenziato per i fiumi romagnoli dal recente aggiornamento del Piano della Costa dell'Emilia Romagna.

Tuttavia gli effetti di questa ripresa non sembrano avere raggiunto la foce fluviale, in termini di avanzamento. Infatti la ricostruzione dell'evoluzione storica delle foci dei principali fiumi marchigiani (v. Figure da 3 a 13) mostra, per il 1999, una situazione pressoché identica a quella del 1985. Solo la foce del fiume Cesano sembra in leggero avanzamento, rispetto a quanto rilevato dall'Aquater nel 1985.

Pertanto i benefici del blocco del prelievo di inerti in alveo sembrano essere minimizzati da altri fattori condizionanti il trasporto solido, quali la trasformazione dell'uso del suolo e la presenza di opere trasversali in alveo.

A questi elementi, esistenti già da tempo, si deve aggiungere la presenza di una fitta vegetazione in alveo come ulteriore causa di blocco del trasporto solido di fondo.

La mancata rimozione della vegetazione all'interno dei corsi d'acqua, insieme alla ridotta pendenza delle aste fluviali (per effetto delle opere di regolazione), hanno provocato una forte sedimentazione di materiali sabbiosi e limosi sulle golene e nel letto di magra, i quali, favorendo l'ulteriore crescita di piante ed arbusti, hanno praticamente intrappolato il materiale solido più grossolano.

Ciò ha prodotto un quasi generale sovralluvionamento degli alvei cui si associa una diminuzione delle capacità di deflusso delle sezioni fluviali con conseguente aumento del rischio di esondazione durante gli eventi di piena.

Sembra quindi di poter delineare una situazione abbastanza paradossale in cui il materiale solido c'è ma non può essere trasportato a mare dalle portate di piena perché bloccato o a monte degli sbarramenti o dalla vegetazione in alveo.

6) LINEE DI INTERVENTO

L'analisi del trasporto solido dei fiumi marchigiani effettuata in questo Studio evidenzia i seguenti elementi fondamentali:

- il fenomeno fisico del trasporto è governato da moltissimi fattori il cui peso è ancora difficile da stimare;
- esistono pochissimi dati utili per quantificare l'entità di questo processo fondamentale;
- attualmente non esistono le condizioni per applicare un qualsiasi modello matematico del trasporto solido;
- la stima dell'Aquater di un trasporto solido al fondo ridotto del 70%, a causa degli interventi antropici negli anni '60-'80, è stata confermata indirettamente dal massiccio arretramento delle foci verificatosi in quello stesso periodo;
- il blocco delle escavazioni in alveo per prelievo di inerti ha sicuramente bloccato l'arretramento delle foci fluviali, ma non sembra aver favorito la ripresa del trasporto solido fluviale al mare.

A distanza quindi di circa venti anni dallo Studio dell'Aquater il quadro descritto sembra riprodurre ancora lo stesso scenario, dominato da grandi incertezze e dalla constatazione che il trasporto solido al fondo non riesce ad arrivare al mare.

Per ovviare a questa situazione si ritiene opportuno indicare due linee prioritarie di intervento.

La prima riguarda la necessità di acquisire dati e informazioni oggettive in grado di descrivere ed analizzare in modo rigoroso lo stato dei corsi d'acqua marchigiani. Senza rilievi topografici, analisi granulometriche, misure di portata liquida e solida, ecc., è difficile o impossibile fornire indicazioni precise e applicare modelli matematici dettagliati.

Importante, a questo proposito, è l'iniziativa della Regione Marche che recentemente ha provveduto ad autorizzare l'appalto del rilievo piano – altimetrico dei corsi d'acqua più importanti della regione e dei loro affluenti.

La seconda è relativa alla rimozione di tutti gli ostacoli che ancora impediscono la ripresa del movimento del materiale solido sul fondo dei corsi d'acqua. Si tratta di alcuni interventi quali l'eliminazione della vegetazione nelle zone di sovralluvionamento, lo scarico a valle del materiale di risulta accumulato a monte degli sbarramenti e delle traverse, la rimozione delle opere trasversali non più funzionanti, la movimentazione del materiale accumulato nelle barre di foce e nei retrostanti sovralluvionamenti, che favorirebbero la ripresa del trasporto e permetterebbero di godere dei benefici del blocco del prelievo degli inerti in alveo.

Data la mancanza di dati specifici, queste linee operative potrebbero essere sperimentate inizialmente in un bacino campione, opportunamente scelto.

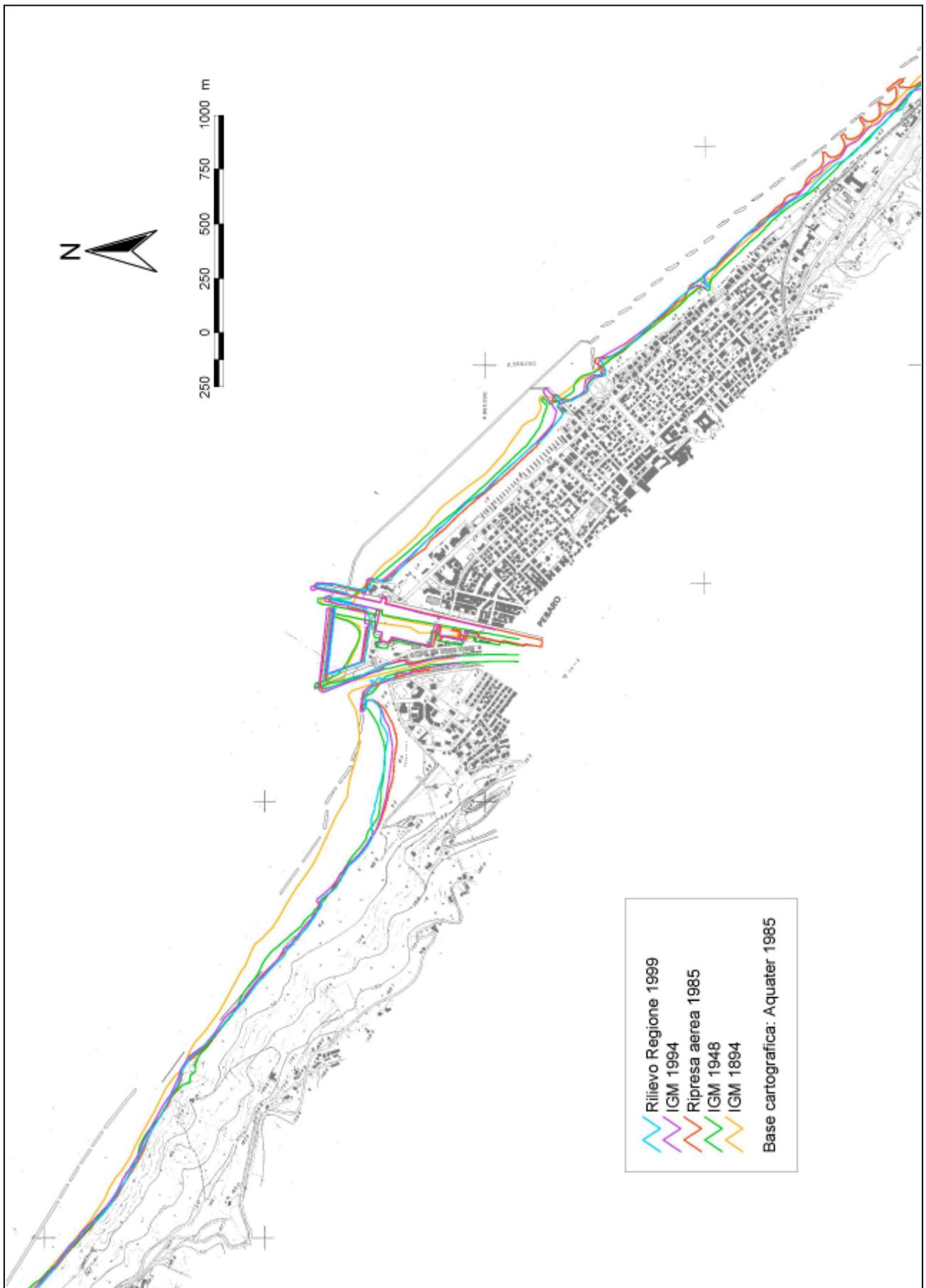


Figura 3 – Evoluzione storica della foce del fiume Foglia

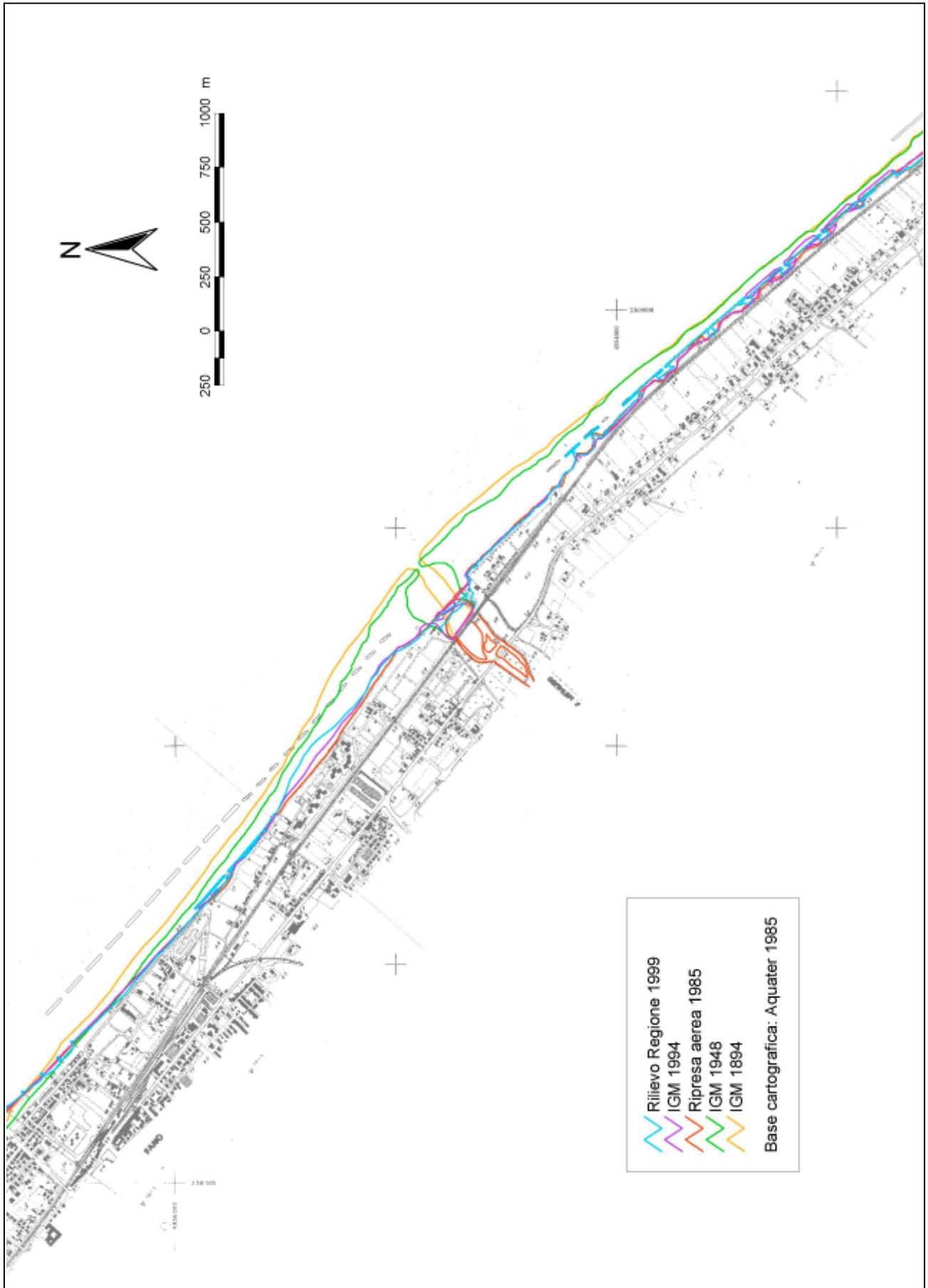


Figura 4 – Evoluzione storica della foce del fiume Metauro

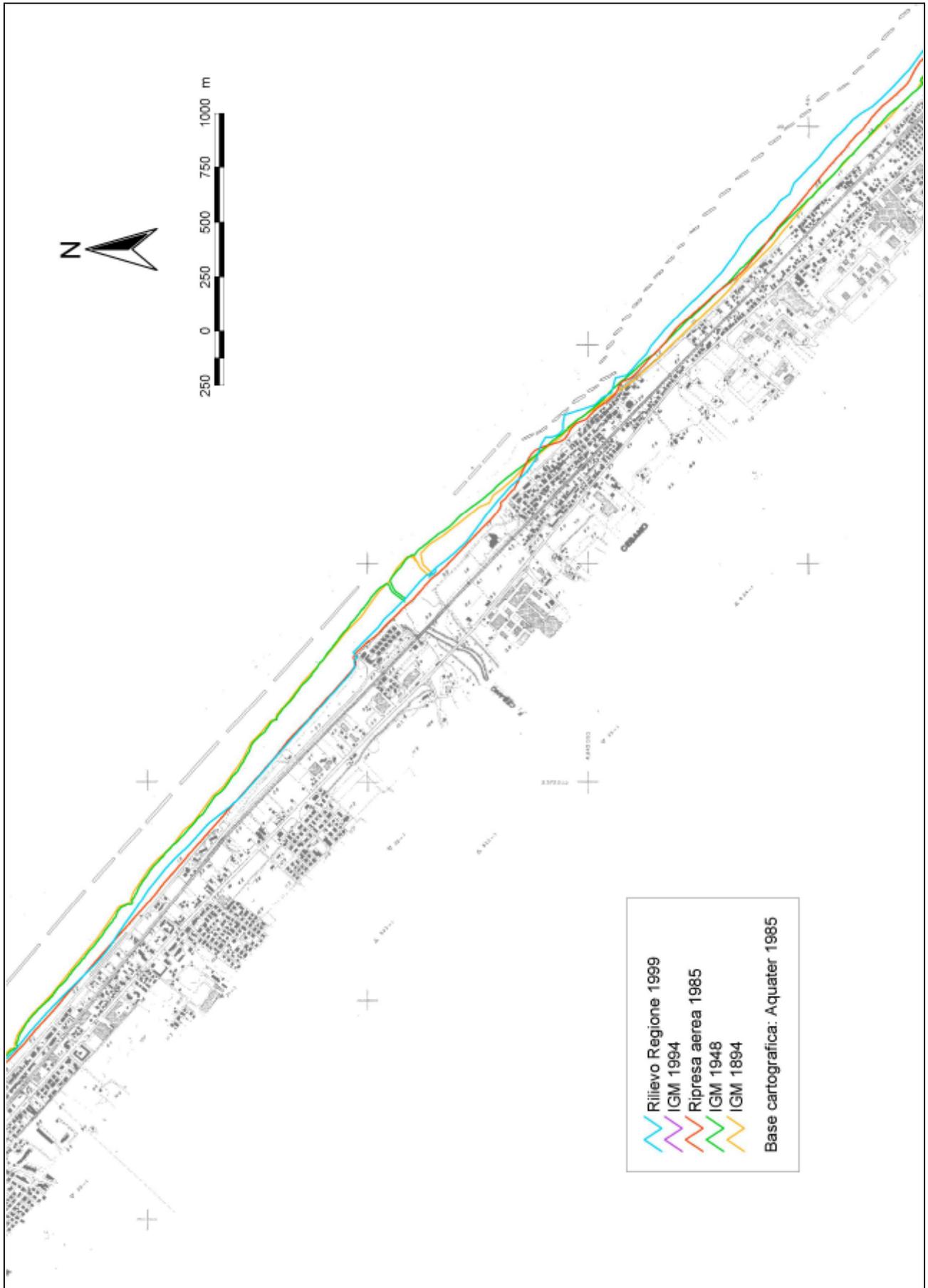


Figura 5 – Evoluzione storica della foce del fiume Cesano

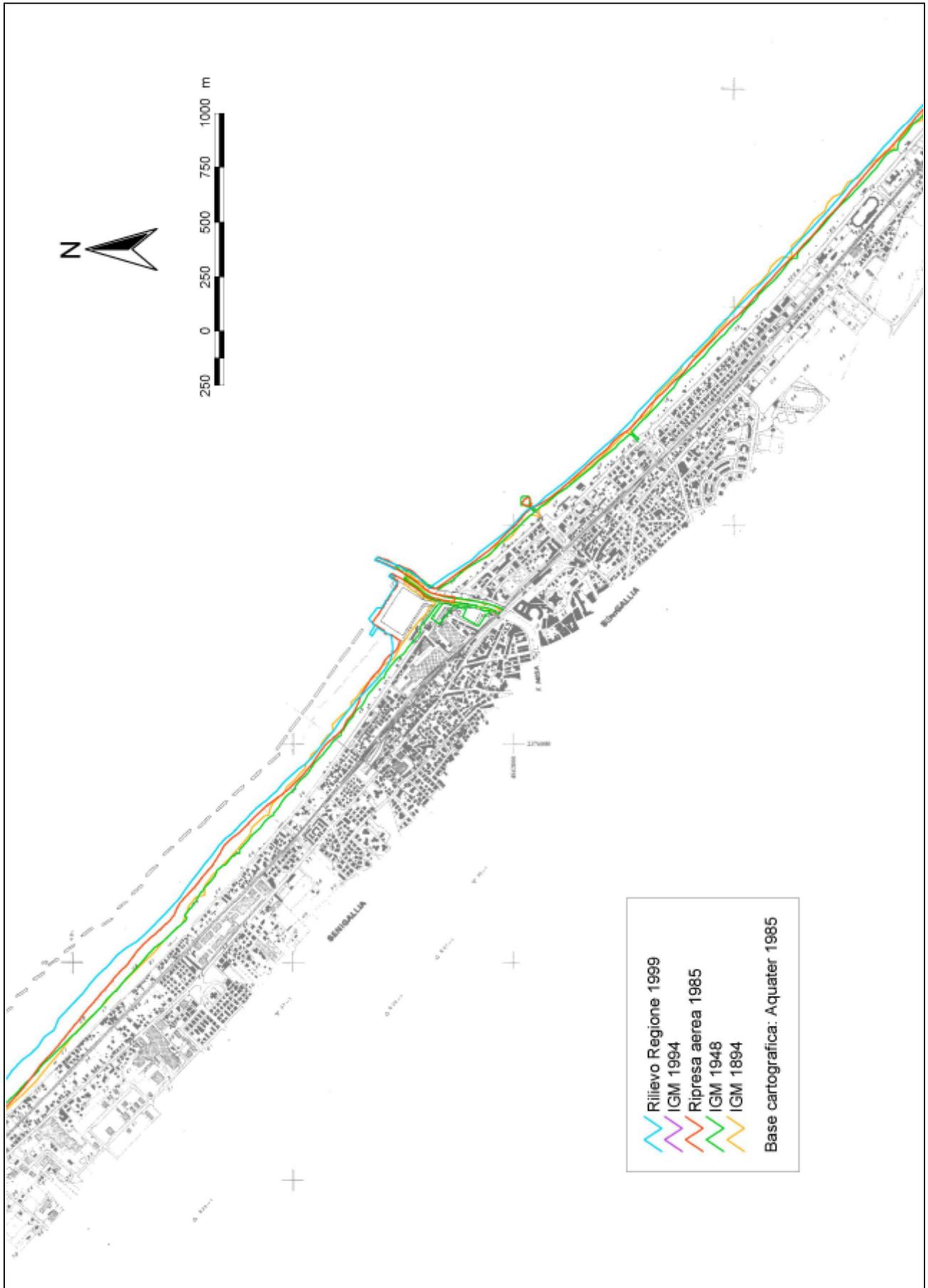


Figura 6 – Evoluzione storica della foce del fiume Misa

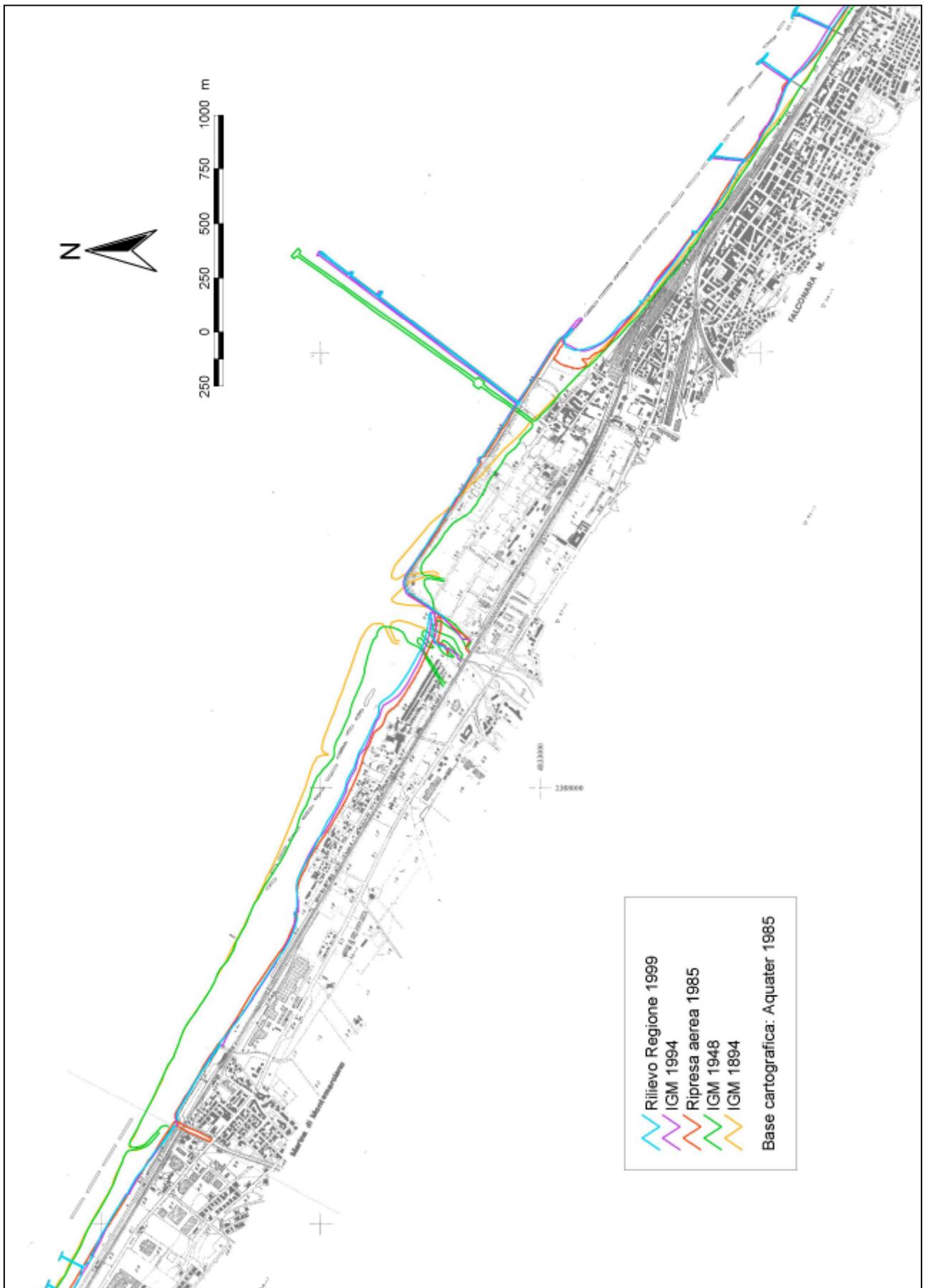
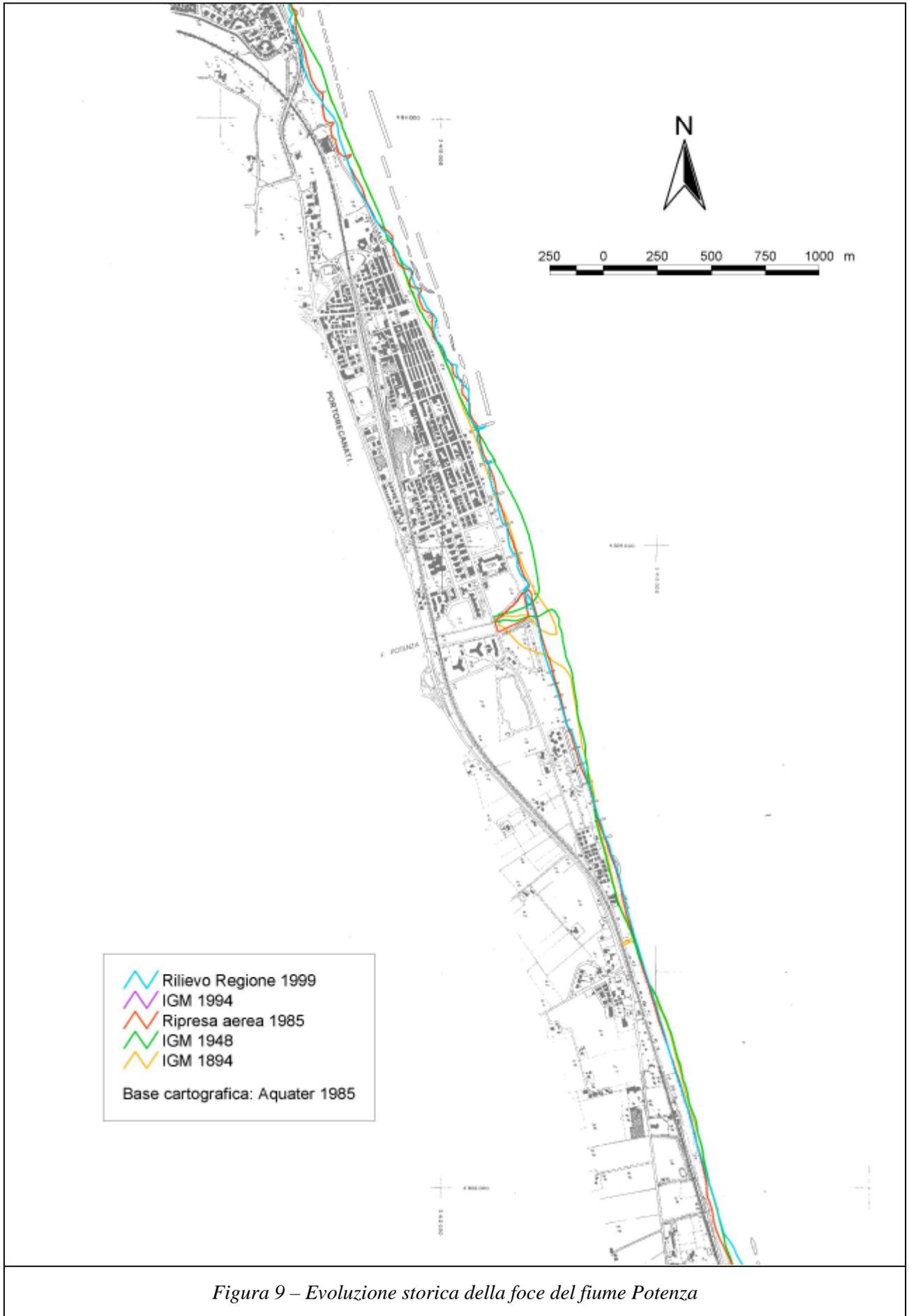


Figura 7 – Evoluzione storica della foce del fiume Esino



Figura 8 – Evoluzione storica della foce del fiume Musone



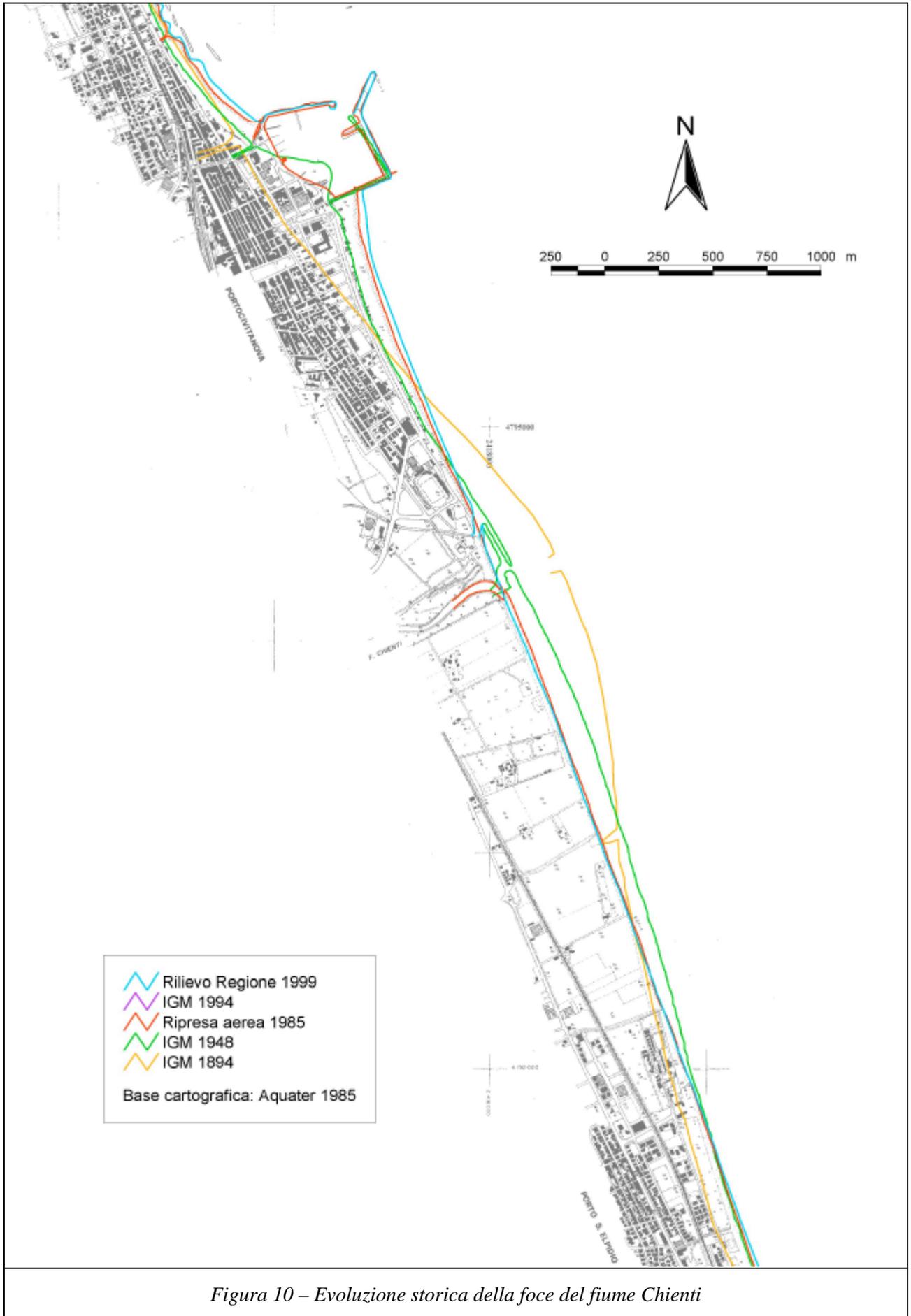


Figura 10 – Evoluzione storica della foce del fiume Chienti

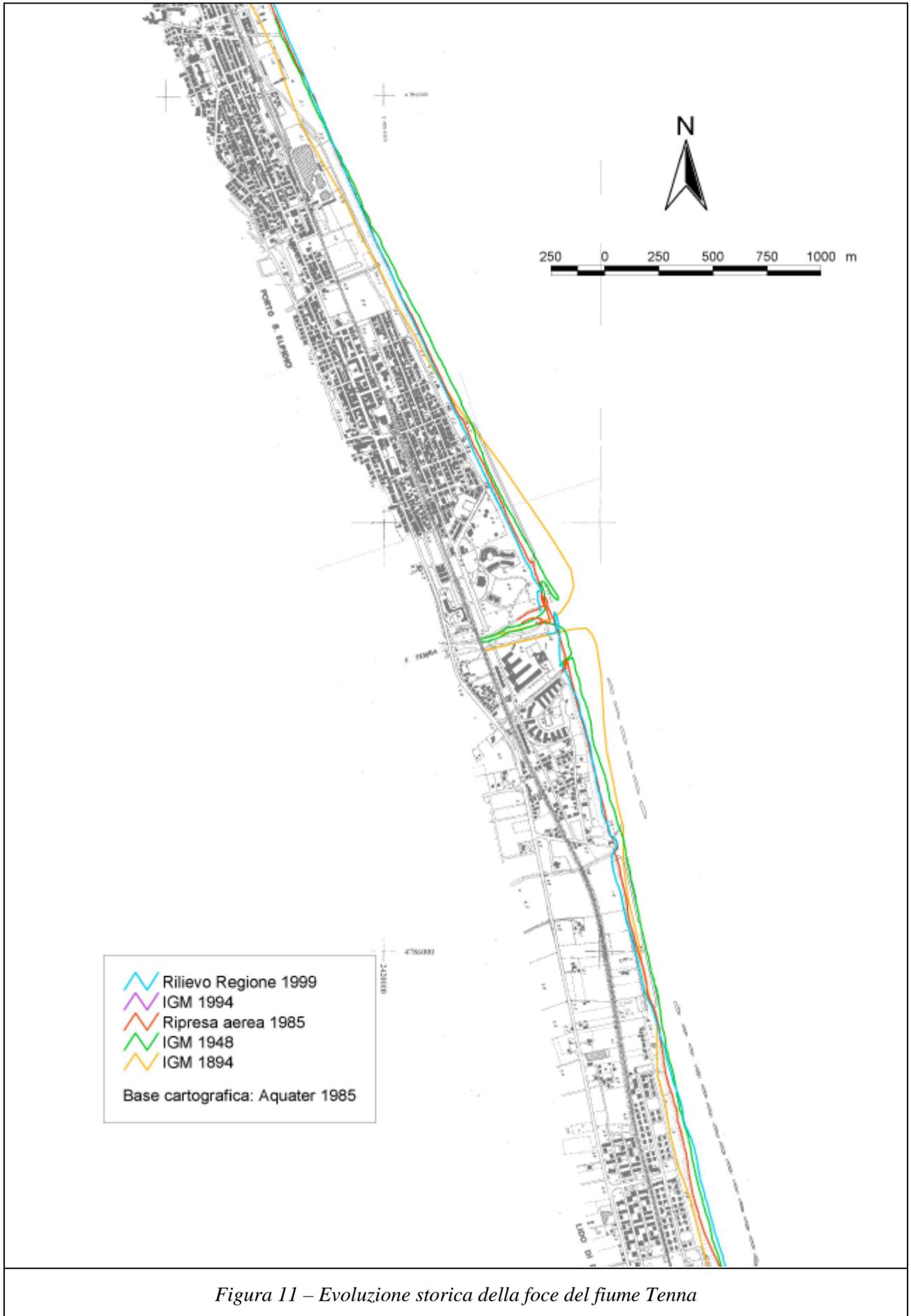


Figura 11 – Evoluzione storica della foce del fiume Tenna

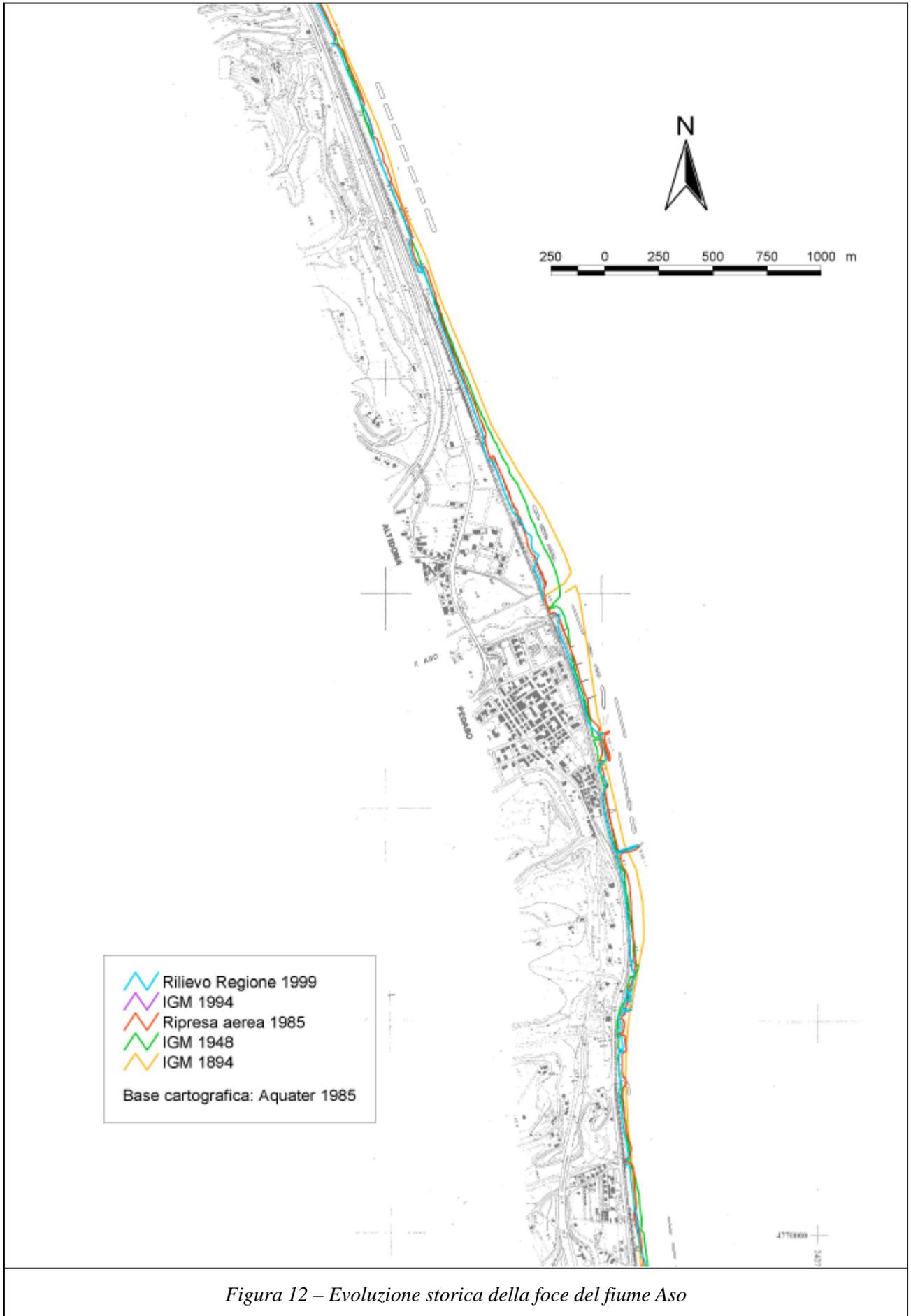


Figura 12 – Evoluzione storica della foce del fiume Aso

