

Morphodynamics of the Bevano Stream outlet: the role of bedload yield

Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo

**Paolo Ciavola, Paolo Billi, Clara Armaroli,
Emanuele Preciso, Enzo Salemi**

Dipartimento Scienze della Terra, Università di Ferrara
Corso Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara
Tel.: +39 0532 293720 - Fax: +39 0532 206468
E-mail: cvp@unife.it

Yann Balouin

BRGM, Service Géologique Régional
Languedoc-Roussillon (SGR/LRO)
1039 Rue de Pinville - 34000 Montpellier, France
Tel.: +33 4 67 15 79 72 - Fax: +33 4 67 64 58 51
E-mail: y.balouin@brgm.fr

ABSTRACT

The present work focusses on bedload yield estimations for the Bevano River, a small stream situated in the Emilia-Romagna Region of northern Italy. The Bevano's final stretch is inside a natural park, one of the last unspoiled zones of the Emilia-Romagna coast. This stream resulted to have very complex outlet dynamics. The mouth is moving rapidly and constantly towards the north, eroding the dunes and the pine forest behind them. The bedload transport was correlated to the long and short term migration of the river mouth. The migration was also related to rainfall data, marine forcing agents and width variations of the beach close to the river outlet.

Because of a lack in direct measurements, the bedload yield was assessed using the ENGELUND & HANSEN formula [1972] (modified in MONTEFUSCO [1984]). This formula was considered the most suitable because it predicts the volume of the sandy fraction discharged at the river mouth.

Rainfall data were collected at the Bertinoro Station (180 m above m.s.l.) and at the Idrovora Fosso Ghiaia Station (2 m above m.s.l.), obtaining an overview of the rainfall for the entire Bevano catchment.

The long term evolution of the outlet was studied using four aerial photographs captured between 1943 and 1998. Short term monitoring of the mouth was studied between April 2003 and June 2003, using a Total Station. The influence of tidal currents and waves on the outlet morphodynamics were studied using sand tracers.

Both long term and short term analysis revealed that the river is moving rapidly northwards. This trend fastened during the last years (from 1998 and 2003).

The bedload yield calculated empirically (Q_{355}) resulted to be not significant during fair weather conditions. The river transports sediments only during periods of heavy rainfalls (Q_{10}). This material is trapped on the submerged delta and moved onshore by marine currents, increasing the sediment budget of the study area. Most of the sand available for the Lido di Dante beach comes from lateral dune erosion, as it resulted from direct topographic surveys. Sand tracers revealed that the sand eroded by the dunes is transported outside the river mouth by ebb-tidal currents and then northwards by longshore currents, increasing the quantity of sediments available for the beach.

Local authorities intend to open a new river mouth, southward from the actual one, in order to avoid inland floods during periods of abundant rainfalls, and marine water ingression inside the pine forest behind the dunes during storms. As a result of this intervention the beach northward from the mouth may start to retreat because of the lack of sediment supply coming from dune erosion.

RIASSUNTO

Il presente lavoro riguarda la stima del trasporto solido di fondo del Torrente Bevano, un piccolo corso d'acqua che si trova in Emilia-Romagna, messa in relazione con le variazioni a lungo e breve termine della foce e della spiaggia adiacente alla foce stessa.

È stato scelto tale torrente in quanto è sito, nel suo tratto terminale, in una delle poche aree della costa Romagnola ancora priva di interventi antropici, poiché si trova all'interno di una riserva naturale. Inoltre presenta dinamiche estremamente interessanti alla foce, essendo in continuo e rapido movimento verso nord. Tale spostamento della foce genera l'erosione delle dune che si trovano sulla spiaggia di Lido di Dante, con conseguente pericolo di ingressione marina nella pineta retrostante.

Nello studio del Torrente Bevano è stato necessario valutare le caratteristiche dell'alveo, il tipo di sedimenti del letto, il regime delle portate. La mancanza pressoché totale di dati misurati del trasporto di fondo fa sì che esso sia stato valutato indirettamente, sulla base di modelli

geomorfologici e idraulici. La formula utilizzata per fiumi di pianura, con sedimenti del letto sabbiosi, è quella di ENGELUND & HANSEN (modificata in MONTEFUSCO [1984]). Per ottenere un'indicazione del tipo di trasporto maggiormente influente nella zona di foce, sono stati raccolti campioni sia a monte sia verso il delta, in diverse sezioni del fiume. I dati pluviometrici sono stati messi a disposizione dal Servizio Meteorologico Regionale dell'ARPA e, per il bacino del T. Bevano, si sono presi in esame i valori delle stazioni di Bertinoro (180 m sul l.m.m.), in funzione dal 1989, e Idrovora Fosso Ghiaia (2 m sul l.m.m.), in funzione dal 1970. Le due stazioni sono situate a diverse altitudini e permettono di ottenere informazioni di piovosità relative all'intero bacino del fiume. Si è studiata infine l'evoluzione del tratto terminale del torrente, sia confrontando foto aeree su un periodo di 55 anni, sia confrontando rilievi topografici a breve termine, per valutare l'influenza sulle dinamiche della bocca degli afflussi meteorici e delle condizioni marine (moto ondoso, marea, correnti lungo costa), anche in relazione con la stabilità della spiaggia adiacente alla foce. Sia dall'analisi a lungo termine sia da quella a breve termine, si è calcolata una velocità molto alta di spostamento della foce in direzione nord, con un'accelerazione negli ultimi anni (dal 1998 al 2003). Il materiale trasportato dal fiume, durante periodi di bel tempo, è risultato praticamente nullo, come si è ricavato dai calcoli empirici (Q_{355}). Il Bevano porta un certo quantitativo di materiale solo nei periodi di piena (Q_{10}). Tale sedimento si accumula nel delta sommerso per poi muoversi verso costa, incrementando il budget sedimentario della spiaggia di Lido di Dante. La maggior parte della sabbia deriva però dall'erosione laterale delle dune, come si è ricavato dai rilievi topografici effettuati dagli autori. L'analisi della dispersione di sabbie traccianti ha evidenziato come la sabbia erosa venga trasportata all'esterno dalle correnti di marea e poi verso nord dalle correnti lungo costa, incrementando il materiale a disposizione della spiaggia adiacente la foce. La Regione Emilia-Romagna intende aprire una nuova bocca a sud di quella attuale per evitare, durante periodi di piogge intense, che possano verificarsi inondazioni dei terreni a monte della foce, e che ci possa essere, in condizioni marine energetiche, ingressione di acqua salata all'interno della pineta retro-dunare. Tale intervento potrebbe, sul lungo termine, portare all'erosione della spiaggia a nord della bocca, in quanto verrà a mancare un importante input sedimentario.

1 - STUDY SITE

River mouth dynamics and their relation with meteorological and marine conditions are very complex. To study them it is necessary to have information on water discharge and sediment load, and on the effects of waves and tidal currents at the river mouth. Moreover, it is necessary to collect rainfall data within the river catchment and to know the characteristics of the areas that are close to the river mouth.

The Bevano river catchment is located south of Ravenna, in the Emilia-Romagna region. It lies between the Ronco River (NW) and the Savio River (SE) and has an extension of 92 km². A small part it is surrounded by hills (16 km²), and its head is close to the village of Bertinoro, at a level of 150-170 m above m.s.l. The remaining basin is located in the Pianura Padana plain. The final stretch of the river passes through the Classe pine forest close to the Lido di Dante village. Its main

tributary is the Fosso Ghiaia channel, that enters the river at a distance of 2 km from its mouth (Fig. 1). Fosso Ghiaia is the most important tributary both for water discharge and sediments load. Others tributaries are small drainage channels that come from agricultural and industrial areas around Ravenna. They are not significant in influencing river dynamics because of their scarce water discharge. The catchment has an elongated shape with a shape factor Re (ratio between the area of the circle with the same surface of the watershed and the maximum basin length measured along the main stream) equal to 0.6.

The river catchment covers a hilly area and is characterised by sandy and clayey terrains formed by marine sediments deposited during the Mid and Upper Pliocene. The presence of this kind of sediments contributes to maintain a gentle slope of the hills. The parts of the catchment in the plain are characterised by

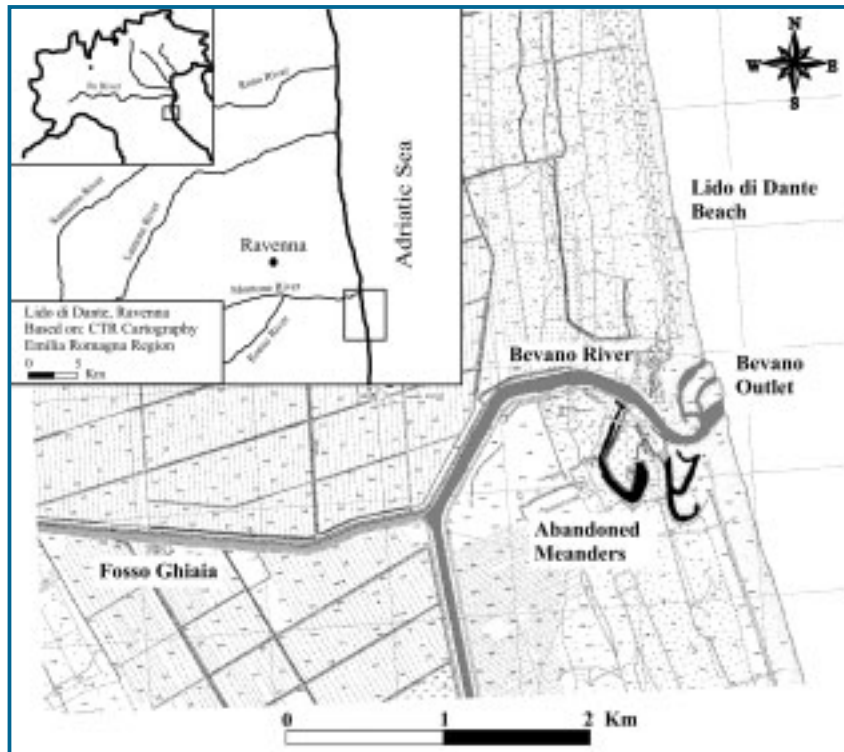


Fig. 1 - Study area. The two abandoned meanders close to the mouth are outlined (CTR 1978, 1:10000 scale).

Area di studio. Si evidenziano i meandri abbandonati in prossimità della foce (CTR 1978, scala 1:10000).

2. RIVER MOUTH EVOLUTION

The evolution of the Bevano River mouth was studied over a time-span of 55 years using aerial photos. Furthermore, direct surveys during a period of 2 months were carried out by the authors with a Total Station, covering the sub-aerial and submerged beach.

The long term variations were studied starting from 1943 till 1998. Four georeferenced aerial photographs were used:

- 1943 RAF flight;
- 1982 IDROSER flight (© CGR Parma); scale 1:10000
- 1996 AIMA flight (© CGR Parma); scale 1:40000
- 1998 IT2000 flight (© CGR Parma); scale 1:40000

The short term measurements were carried out between 14 April 2003 and 20 June 2003. A total of six surveys was undertaken.

alluvial sand, clay and gravel formed during the Holocene. Here the river course has a straight shape, while, in the final area, there are several meanders. There are also two abandoned meanders near the mouth (Fig. 1).

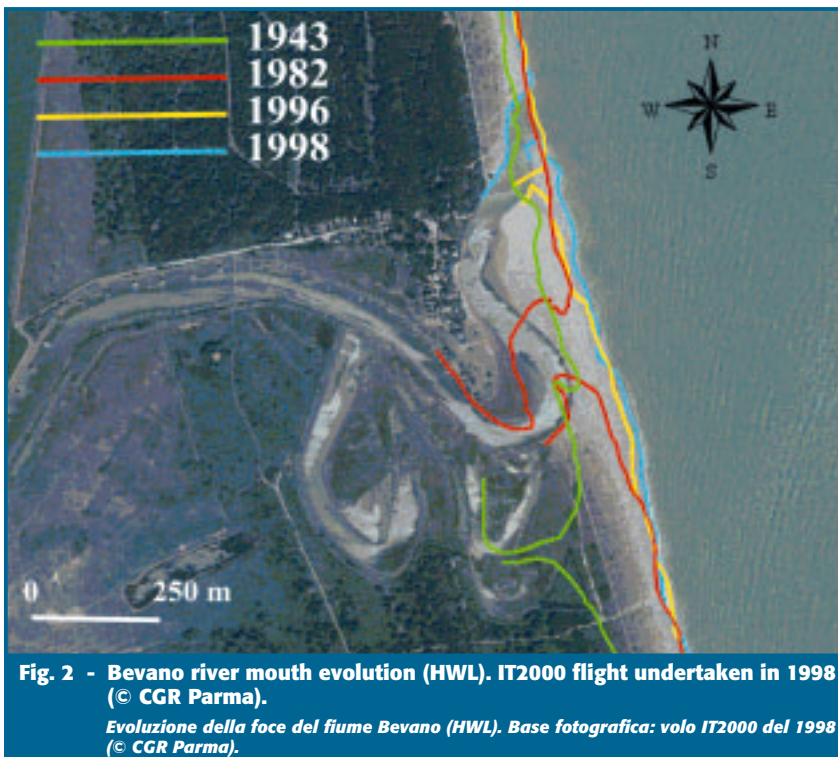
From the Bevano mouth going northwards there is the beach of Lido di Dante, a 3 km-long stretch of coast divided in two parts: the one that is in front of the village (almost 1 km) is protected by a breakwater, the other (almost 2 km) is completely natural with dunes and a pine forest behind them. The dunes have different elevations above mean sea level: 1-1.5 m immediately south from the protected area, 3 m close to the Bevano mouth.

The tidal regime in the Northern Adriatic Sea is strongly asymmetrical with both diurnal and semi-diurnal components. The maximum tidal range is about 1.2 m at spring tides. The wave climate is usually of low energy, with significant wave heights less than 0.5 m, mainly from the East (65% of occurrences) [GAMBOLATI *et al.*, 1998]. Two different storm directions prevail: the Scirocco from SE and the Bora from NE. The strongest storms come from the NE, while the most frequent events, but with lower energy, come from the SE.

Moreover, sand tracers were used to assess the relation between marine (waves and tidal currents) and river mouth dynamics, in relation to the erosion/stability of the Lido di Dante beach. The injection of the tracers was carried out on 22 April 2003 and the detection was done after 24 hours.

2.1 Long term variation

To study morphological changes of the river outlet the four aerial photos were imported into a GIS (Arcview). The criterium used to indicate the position of the mouth and of the shoreline was the position of the High Water Line (HWL, Fig. 2), mapped at 1:3000 scale. The HWL is defined here as the boundary between wet and dry sand, the intersection between the highest level reached by the sea and the beach [DOLAN *et al.*, 1983]. It is strictly influenced by meteorological conditions, daily and seasonal changes in tidal levels and waves [CIAVOLA *et al.*, 2004]. Therefore, in order to avoid errors, it is preferable to use aerial photos taken during the summer and under low energy waves. Obviously photos taken after a storm should be rejected, despite their significance for risk-assessment studies.



The evolution of the shoreline and mouth morphology over the 55 examined years is shown in Figure 3. The variations can be summarised as it follows:

- 1943: the mouth is facing south and a wide floodplain is present along the final stretch of the river. There is one abandoned meander.
- 1982: the mouth is facing north. There are two abandoned meanders. The one seaward is the old mouth of the river in 1943. There is a large submerged delta.
- 1996: the mouth is again facing north. Compared to its previous position it has moved 250 m northwards. There is a wide spit growing on the right hand side of the outlet, while the river has touched at many points the pine forest. The two abandoned meanders are still present.
- 1998: the mouth moved northwards of almost 150 m. The spit is still growing and becoming wider. The two abandoned meanders are still present.

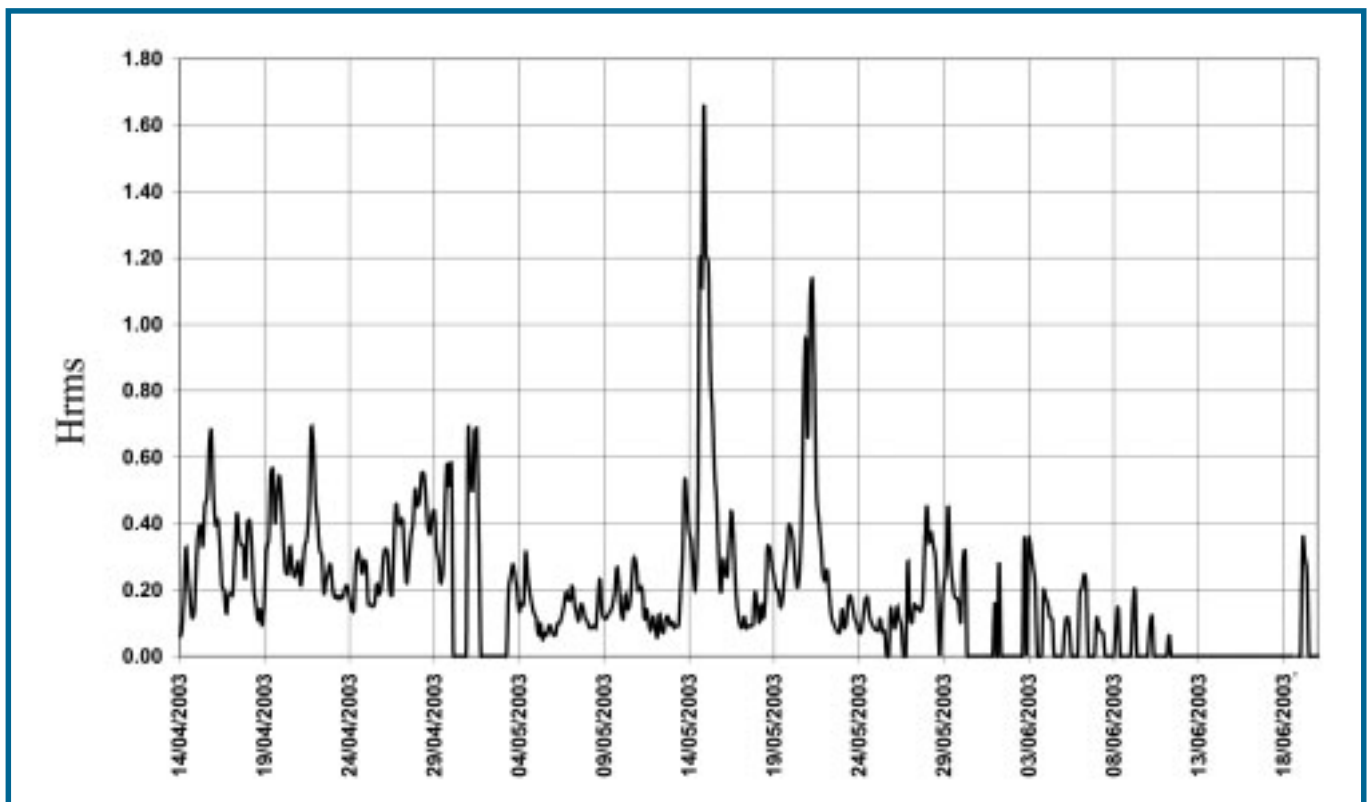
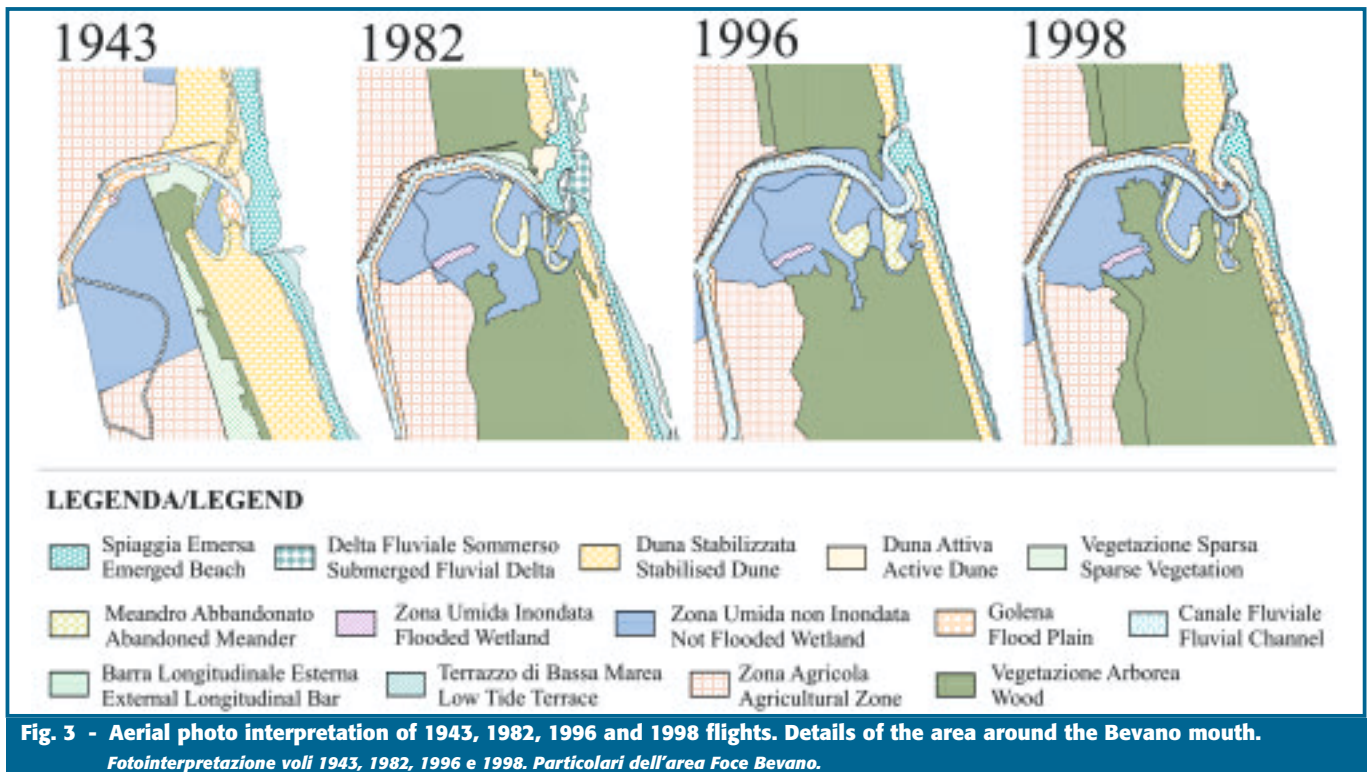
2.2 Short term variation and outlet dynamics

Between 14 April 2003 and 20 June 2003 six surveys of the Bevano river mouth were undertaken. The surveys period was characterized by fair weather conditions with scarce rainfall (87.8 mm in April, only 5.2 mm in May, 30.8 in June). The wave climate was of low energy (Fig. 4). Wave data were obtained from the

Punta della Maestra buoy, located in the North Adriatic sea, 100 Km from Ravenna (44.97167 Lat - 12.83333 Long), at a depth of 40 m below m.s.l. Wave height (Hrms) was below 1 m for almost the entire period. There were only two more energetic events; with an Hrms of 1.6 m on 14 May and slightly more than 1 m on 21 May. Wave direction was generally from NE (50° N), the two bigger events were from S-SE.

River mouth dynamics were evaluated using fluorescent sand tracers [CIAVOLA, 2004]. The injection of the tracers was done on 22 April 2003 in neap tide conditions, with strong ebb-tidal dominance: 50 Kg of red sand were injected in the river mouth, 25 Kg of green sand were injected on the coast updrift. At the same time measurements of the tidal currents were carried out using an AANDERAA currentmeter, located inside the river outlet.

Tracers can be used employing two different methods [CIAVOLA, 2004]: the Spatial Integration Method (SIM) and the Temporal Integration Method (TIM). For the present study, the first method was used. This consists in collecting sediment samples (shallow cores) along a grid of equally-spaced nodes, starting from the injection point. The size of the grid node depends on the maximum distance of displacement of the tracer. In areas where the tidal range is negligible the assessment of surface tracer dispersal could be done underwater, using a device with a UV lamp [BALOUIN *et al.*, 2004] which is able to make fluorescent the paint used for marking. The surface covered by the sampling grid (see for example the map on the left of Fig. 7). Obviously if the tracer was buried due to beach accretion this cannot be seen from a surface assessment. For this reason, when one is choosing the grid coverage, it is good practice to slightly extend the outer grid margin beyond the last tagged grains observed at the surface. After having been dried and weighed the samples are put under a UV source in the laboratory, to compare the recovered tracer mass with the injected one. The image analysis system consists of a set of UV lamps and a video camera that grabs images of the fluorescent grains, which are then processed with a PC program that automatically counts. It is therefore fundamental to calibrate the image-analysis algorithms according to the mineralogical and dimensional



characteristics of the studied sand, which differ between test sites. Finally, once that the total weight of recovered tracer is assessed from the cores, it is possible to integrate this horizontally and vertically down to the maximum observed mixing depth [CIAVOLA *et al.*, 1998]. The method allows the definition of the dominant direction of sediment movement and the volume of sediment transported by longshore currents. To notice that the paint must have good resistance to abrasion and should not be soluble in water.

The Time Integration Method consists in collecting the cores along a line located at a certain distance from the source, orthogonal to the direction of sediment movement, at regular time intervals. This method evaluates changes in tracer concentration with time along the direction of sediment transport. Similarly to the method described above, the TIM output is the computation of volumetric sediment transport. To notice that in this case it is important to know the direction of sediment transport before starting the sampling.

During the experiment presented in this paper more than 80 cores (20 cm-long) were collected. These were then sectioned into 2-cm slices. Each sub-sample was then processed using the detector/counter described above. The sampling grid was chosen with a node size of 100-150 m longshore and 150 m cross-shore.

3. ASSESSMENT OF BEDLOAD YIELD

In this study bed load yield was not measured in the field, since it requires long term series of data that are not easy to obtain. Given the stream bed morphological and sedimentological features of the Bevano terminal reach, characterised by a very fine sand material, a very low gradient and a regular geometry of the cross-section, we found appropriate to calculate bedload yield by means of physically based equations.

Among the many bedload formulas reported in the scientific literature, the one which resulted most suitable for the morphological and sedimentological characteristics of the Bevano stream is the equation developed by ENGELUND & HANSEN [1972]. This equation has proved to predict rather well bedload rates in general [GOMEZ & CHURCH, 1989] and has produced acceptable results for river channels with morphological and sedimentological characteristics such as those of the Bevano stream.

Moreover, since the Engelund & Hansen equation predicts the transport rate of bed material, including

also that portion of fine bed sediment transported in suspension during floods. This formula was considered the most suitable as in practice predicts the volume of the sandy fraction discharged at the river mouth, that is the most relevant to the beach dynamics and sediment budget.

The Engelund & Hansen equation was derived from flume experiments and predicts bed material transport rates for rivers with a substantial suspended sediment transport for bed material with grain size ranges between 0.19 and 0.93 mm. MONTEFUSCO [1984] revised the classical version of Engelund & Hansen equation by introducing in its basic expression some transformations to calculate the annual bed material yield. Montefusco obtained this result from the derivation of a continuous representation of the flow duration curve, based on the hypothesis that the frequency distribution of discharges, elevated at the power of 1.7, can be associated to a Gauss distribution, through a Gibrat transformation whose parameters can be calculated from three characteristic values of flow discharge, i.e. the discharge with an occurrence probability of 10, 182 and 355 days a year. This integration computes the bedload data weighted according to the flow frequency distribution, obtaining an yearly value of bed material yield. The Engelund & Hansen equation, as modified by Montefusco [1984], considers also the geometry of the channel cross-section, the stream bed width, i.e. that portion of the bed that is actually subjected to bed material entrainment and transport, the flow energy gradient, and bed particle size (D_{50}). The equation takes the following form:

$$T_s = 1.47 * \frac{1}{D} * \frac{1}{B^{0.7}} * i^{1.65} * \left[Q_0 + e^{\left(\frac{1.326}{a^2} - 2.303 * \frac{b}{a} \right)} \right] \quad (1)$$

where T_s is the annual bed material yield expressed in million of tons per year, D is the median size of bed material in meters, B is the stream bed width in meters, i is the stream bed slope (assumed to be parallel to the flow energy gradient), Q_0 is a parameter expressed as a function of the three characteristic discharges Q_{10} , Q_{182} and Q_{355} (i.e. the discharge equalled or exceeded 10, 182 and 355 days a day respectively) and it is calculated using the following relation:

$$Q_0 = \frac{\left(Q_{182}^{-2} - Q_{10} * Q_{355} \right)}{\left[2(Q_{182} - Q_{10} - Q_{355}) \right]} \quad (2)$$

while a and b are dimensionless parameters, again derived in function of the three characteristic discharges by the following expressions:

$$a = -\frac{1.36}{\log\left[\frac{Q_{10} - Q_0}{Q_{182} - Q_0}\right]} \quad (3)$$

$$b = -1.36 - a * \log(Q_{10} - Q_0)$$

In the study case they are equal to -0.80 and 0.21 respectively.

3.1 Hydraulic data acquisition

Unfortunately, long time series of daily flow discharge to calculate the frequency distribution and Q_{10} , Q_{182} and Q_{355} values are not available for the Bevano stream. Hence, a very simple procedure of regional derivation of flow data was adopted, through the interpolation of long series of discharge data monitored in watersheds draining the same portion of the Apennines and with geological and morphological characteristics similar to those of the Bevano stream. The mean values of Q_{10} , Q_{182} and Q_{355} for the rivers reported in Table 1 were considered.

RIVER AND GAUGING STATION	CATCHMENT AREA (KM ²)
Reno at Casalecchio	1051
Reno at Bastia	3410
Senio at Castel Bolognese	269
Lamone at Sarna	261
Ronco at Meldola	442
Savio at S. Vittore	597
Foglia at Montecchio	603
Potenza at Cannucciaro	439
Tenna at Amandola	100

These catchment areas were plotted as the independent variable versus the characteristic flow discharges as dependent variable, to obtain linear regression models with structure $Q_n = kA + b$, (where Q_n is the characteristic flow discharge, A the catchment area and k and b constants). Their regression coefficients, R^2 , have a high significance level of 99.99%, and a range from 0.77 to 0.98. By means of these linear models it was possible to compute the values of Q_{10} , Q_{182} and Q_{355} for the Bevano stream. The expected error in calculating Q_{10} , Q_{182} and Q_{355} was considered acceptable for the objective of this study and the general lack of sediment transport data for rivers draining the

Adriatic margin of the Northern Apennines. The characteristic flow discharge obtained by this method for the Bevano stream resulted respectively: $Q_{10} = 14.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{182} = 1.411 \text{ m}^3/\text{s}$ and $Q_{355} = 0.064 \text{ m}^3/\text{s}$.

The cross-section at the Libertà e Lavoro bridge was selected as the reference reach to carry out the assessment of bed material yield. This cross-section is located 4 km upstream of the river mouth, i.e. as near as possible to the stream outlet but not so much influenced by the tidal range. Field measurements and cross-section morphology observations led to assess the width of stream bed affected by bed material entrainment and transport as 33.4 m.

The stream bed gradient was measured by a specific topographic survey carried out during low flow conditions and resulted to be 0.0002. Topographic surveys carried out by the Emilia-Romagna Region technical services for a reach 1.2 km upstream of the Bevano river mouth and hydraulic simulations conducted by specific software (HEC-RAS 3.1.1 developed by the U.S. Corps of Engineers) within a hydraulic study of the coastal belt associated with the Bevano outlet, resulted in a flow energy gradient of 0.00029 for the reach just upstream of the outlet and for a 100 years return period flood [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003]. In Montefusco's version of the Engelund & Hansen equation, that considers a mean annual distribution of floods and, therefore a return time very likely less than 100 years, the most appropriate value of the flow energy gradient was assumed to be that of 0.0002 measured in the field.

Bed samples were taken at the Libertà e Lavoro Bridge using a US BMH-60 standard sampler and grain-size analysis was carried out by wet sieving, with sieves spaced along a $1/2$ Phi scale. A D_{50} of 0.000244 m was then used in the Engelund & Hansen formula.

4. DISCUSSION

The average annual bed material yield was computed as 6242 t/yr and, assuming a mean specific weight 1600 kg/m^3 for a loose sandy sediment, this resulted equivalent to $3902 \text{ m}^3/\text{yr}$. Considering that Bevano catchment area is 92.5 km^2 , the average bed material yield for unit area equals $67.5 \text{ t km}^{-2}/\text{yr}$. However, it is worth noticing that not the whole basin area contributes to sediment production, since the sediment supply of the alluvial plain is minimal and can be neglected.

The majority of bed sediments are produced in the hilly and mountainous areas and, therefore, in order to calculate the contribution of the portion of the

catchment where erosion processes are active, the bed material yield resulting from the application of the Engelund & Hansen equation has been referred only to the catchment headwater, whose area is only 16 km², and a value of 390 t km⁻²/yr was obtained. In small basins with similar geological features, located in the hilly area of the Bologna Apennines, suspended sediment yield values of 500-600 t km⁻²/yr were recorded by other authors [PAVANELLI *et al.*, 2004].

In order to verify the data obtained by the Engelund & Hansen equation a numerical model was run (HEC-RAS 3.1.1 developed by the U.S. Corps of Engineers), to calculate the bedload transport at a given cross-section. Among the most renowned equations reported in the literature, the one that fit better than others the morphological and sedimentological characteristics of the Bevano stream is the TOFFALETI [1969] equation. Using this equation and considering Q_{10} as a reference flood discharge, we obtained a bedload yield of 7500 t/yr, that is a value very close to that predicted by the Montefusco's modified version of the Engelund & Hansen equation.

The bedload yield was empirically calculated as 3902 m³/yr (Q_{10}). On the other hand, bedload yield for periods with scarce rainfalls resulted to be not significant (Q_{355}). It is important to underline that the sediment available for bedload transport comes mainly from the tributaries. Recently the quantity of sediment transported by the Bevano has been strongly influenced by an increase in water discharge from tributaries, because they pass through urbanized/impermeable terrains [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003].

Considering the long term migration of the river, between 1943 and 1982, it migrated 300 m northwards, at a rate of almost 7.8 m/yr. During this period the beach became much wider with an accretionary trend of almost 3 m/yr. This accretion implies a big sediment input coming from the Bevano River and from the Savio River, that is located 3 Km to the south. The Savio River is an Apennines river with a wide basin, that transports a significant amount of sediments [ARPA, 2001]. The sand coming from the south creates the wide spit on the right hand side of the Bevano. During the 1980s and 1990s the beach remains stable (see the comparison 1982-1996 and 1996-1998), even if the sand input from longshore transport is expected to have decreased because of both the construction of coastal defences in the Savio area, and the decline in river sediment transport [VITTORINI, 1991]. The stability of the southern part of Lido di Dante beach is probably due to the fact that there was no human intervention (because it is inside a natural park), and to the sand input coming from the lateral dune

erosion that increases the sediment budget of the area. It is important to underline that longshore transport, even if it is less significant than in the past, still brings sand into the study area.

Another element to take into account is the subsidence. The land drop rate in the 1930s changed from an order of mm/yr to an order of cm/yr [ARPA, 2001]. At present the rate of land drop is decreasing, except along the Ravenna coast that it is still in a critical condition [BERTONI, 2003]. Between 1982 and 1996 the beach close to the northern side of the river mouth increased slightly. The mouth migrated 300 m northwards (21.4 m/yr). The rainfall data for the period between 1982 and 1996 have a mean value around 600 mm/month, except for 1984 that has a mean value of around 804 mm/month (Idrovora Fossa Ghiaia station). These figures indicate that the 14 years between the two flights were characterised by little rainfall. This long period without significant rainfall could have caused a morphodynamic disequilibrium, with a prevalence of longshore transport against river currents.



Fig. 5 - Bevano mouth and spit evolution, from April 2002 to May 2004.

Variazione della foce del Bevano e della freccia litorale, da aprile 2002 a maggio 2004.

The presence of such a wide spit (Fig. 5) confirms that northward longshore transport still brings a certain quantity of sand into the system. Between 1996 and 1998 the migration velocity of the Bevano increased more than three times: from 21 m/yr to 70 m/yr. The rainfall data indicate that there were significant events in 1996 (September and October) and in 1997 (November), while 1998 was a dry year. Certainly the larger rainfall has influenced water discharge at the Bevano mouth, increasing the quantity of sediment available for bedload yield.

The subsidence in this period was high [BERTONI, 2003]. Comparing the trend in land drop between 1982-1998 and 1998-2002 it changes from 10 mm/yr in the area around the Fiumi Uniti River to 15 mm/yr, while it remains 7 mm/yr in the area around the Bevano [BERTONI, 2003].

This may have produced an elevation gradient between the two areas, that are distant 3 Km one from the other, generating a sort of “depocentre” in the area around the Fiumi Uniti River. The Bevano outlet is

therefore moving “downslope”. This influences the mouth movement towards the north direction.

Topographic surveys results show a rapid migration of the main channel: 40 m northwards in two months. The migration caused the erosion of the downdrift platform (30 m) and of the dunes (10 m). The river mouth movement was associated with a slight decrease in cross-section, and a progressive northward rotation of the inlet throat (Fig. 6). The main channel became cross-shore orientated, due to an accumulation of sand on the downdrift area.

Sand tracers results show that the green sand was transported northwards (Fig. 7) and then trapped on a small bar that moved onshore, participating to spit progradation. The red tracers were transported outside the river by ebb-tidal currents, and then towards the north from longshore currents: red grains were found at a distance of 150 m from the outlet (Fig. 7). Sand transport across the river section is $4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (with a recovery rate of 65% of the immersed sand tracer). This value corresponds to the volume of sand that passes

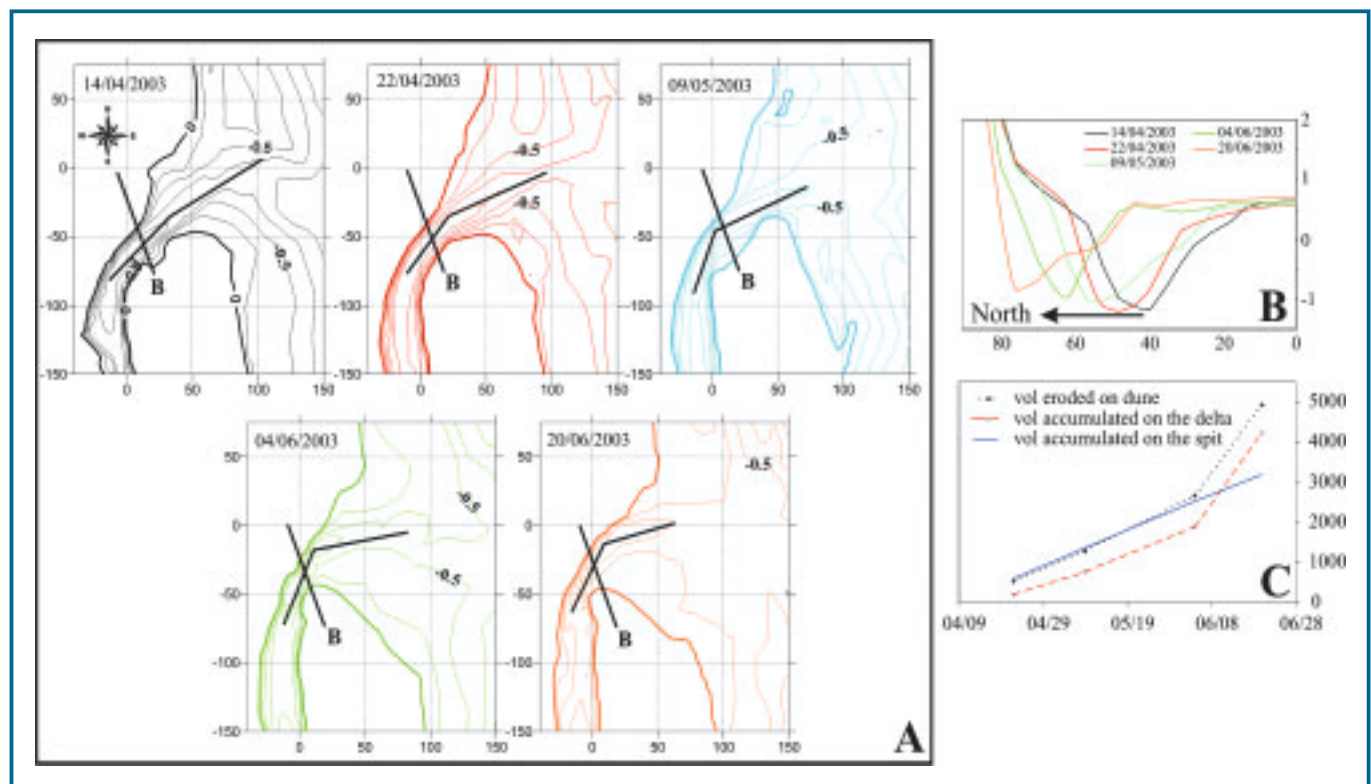


Fig. 6 - Morphological evolution of the Bevano inlet between April and May 2003. A) Topobathymetry of the Bevano entrance illustrating the progressive northward migration of the system, and rotation of the main channel; B) Lateral migration of the inlet throat (see location of the section in A); C) Cumulative volume variations (m^3) on the ebb-tidal delta, at the extremity of the updrift spit and on the downdrift dune [modified from BALOUIN *et al.*, 2004].

*Evoluzione morfologica del delta del Bevano tra i mesi di Aprile e Maggio 2003. A) Rilievo topografico e batimetria nell'area di immissione del Bevano con la rappresentazione del progressivo spostamento a Nord del sistema con rotazione del canale principale. B) Migrazione laterale della gola della sezione (localizzazione della sezione visibile in A). C) Variazioni cumulative dei volumi di materiale accumulato (m^3) nel delta e nella freccia litorale e materiale eroso nella duna [BALOUIN *et al.*, 2004, modif.].*

through a section of 25 m across the river mouth. During the experiment erosion of the downdrift flank of the channel occurred, partially covering the tracer source, inhibiting its complete removal. Sand input from dune erosion was 2200 m³/month (Fig. 7). Volumetric changes show a deposition of 1950 m³/month of sand in the ebb-tidal delta; 1250 m³/month of this sand are then accumulated on the northern bar, forming the downdrift swash platform (Fig. 7). This bar migrates onshore providing an important sand input to the Lido di Dante beach [BALOUIN *et al.*, 2004] (Fig. 7). Updrift sand transport is estimated to be around 1440 m³/month. Most of this sand is trapped in the northern edge of the spit, providing material for the progradation of the spit itself, compensating the increase in cross-section.

Finally, volume computations from field surveys identified a null input from the river into the marine sediment budget. This result may have been influenced by the fair weather conditions during the experiment, with almost no rainfalls.

5. FUTURE EVOLUTION OF THE AREA: HUMAN INTERVENTION

The mouth of the Bevano has complex dynamics, resulting from the interaction between longshore transport, tidally controlled fluxes in the channel's outlet. This interaction controls the northward migration of the outlet. The migration of the mouth produces dune erosion and damage to the pine forest closer to the river course. The Emilia-Romagna regional authorities and specifically the Servizio Tecnico Bacini Fiumi Romagnoli in Ravenna have produced an Environmental Impact Assessment to describe and evaluate possible engineering works to open a new mouth. The reasons for the intervention are two [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003]:

- *The mouth of the Bevano is currently silted up, not hydraulically efficient and the lack in water discharge at the mouth generates inland flooding.*

- *The migration process generates dune and risk from flooding to inland areas below sea-level, with possible damage to the pines growing behind the dunes.*

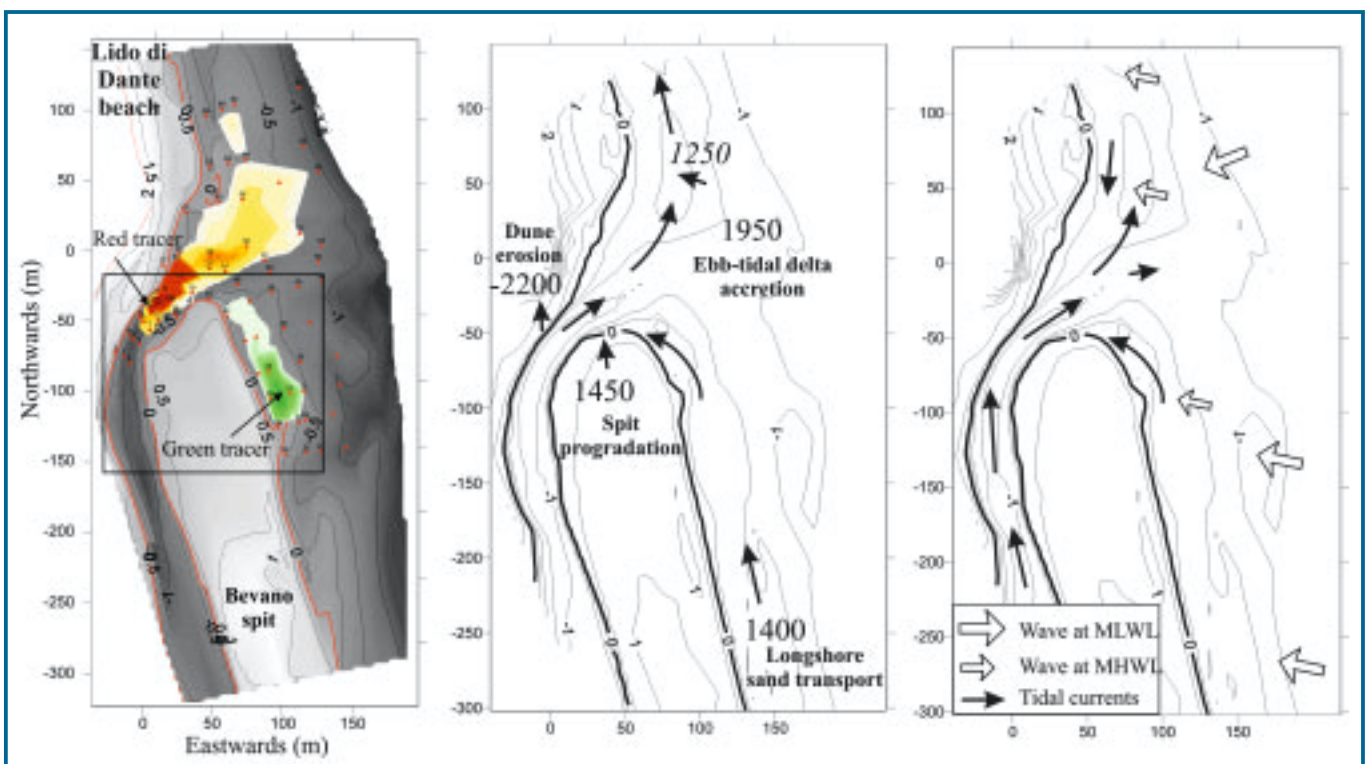


Fig. 7 - Tracer results, sediment budget and sediment transport pattern in the Bevano tidal inlet. Left: tracer advection clouds; the black frame indicates the area in figure 5; red dots indicates the position of the sampled cores. Middle: sediment budget of the Bevano entrance (all values are in cubic meters per month). Right: conceptual sediment transport pattern by waves and tidal currents. [modified from BALOUIN *et al.*, 2004].

*Risultato della stima della dinamica sedimentaria alla foce del torrente Bevano con il metodo dei traccianti. A sinistra: nuvola di dispersione dei traccianti; il riquadro nero indica la zona fotografata in figura 5; i puntini indicano la posizione delle carote prelevate. Centro: budget sedimentario (valori numerici espressi in m³/mese) ottenuto dai rilievi topografici. A destra: andamento teorico del trasporto dei sedimenti dovuto al moto ondoso ed alla corrente litoranea. [BALOUIN *et al.*, 2004 modif.]*

Seven options have been considered to guarantee a solution to the problems indicated above. The final choice was to close the present mouth, open a new one southwards and a third one that would only work during floods [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003]. The new mouth will be located between the last meander and the current mouth. The third mouth that will work during floods will be located next to the last meander (Fig. 8).

This will be created by dredging the river down to the elevation of mean sea level. The dredged material will be used to build artificial dunes that will be molded to extend the dune ridge already in place, recreating those eroded by the migration of the inlet. This will allow protection from flooding of the back-shore and pine forest under storm conditions.

Likewise it emerged from sand tracing studies, most of the sand feeding the beach is produced by lateral dune erosion. The closure of the present mouth and the opening of the two new ones may generate, under storm conditions, deposition at the river's outlet.

The depletion of longshore transport due to the disappearance of the input from dune erosion may cause shoreline recession along the beach north of the current inlet position. It is therefore recommended that a monitoring programme should be undertaken on the area of intervention and the surrounding beaches.

6. CONCLUSIONS

Starting from the 1980s the river mouths of the Emilia-Romagna coast became oriented northwards. The Bevano follows the same behavior of other rivers in the region.

Till 1982 the river mouth remained almost in the same position as it was in 1943, changing only its orientation and becoming northward oriented. Starting from 1982 the outlet started to migrate northwards, with a rate of 21 m/yr.

Rainfall during the 1980s was scarce (mean value around 600 mm/yr) probably causing a morphodynamic disequilibrium between longshore transport and river currents, increasing the net effect of marine dynamics on the outlet. The migration rate increased more than three times between 1996 and 1998 (70 m/yr).

The migration rate measured with direct surveys carried out by the authors, between April and June 2003, was around 20 m/month during a period of fair weather conditions with no rainfall.

The outlet is strongly influenced by ebb-tidal currents and waves. Ebb-tidal currents are able to resuspend sediment coming from lateral dune erosion, caused by the northward migration of the river, and bring it outside the mouth.

Moreover, tidal currents are also able to increase the northward migration rate of the outlet itself

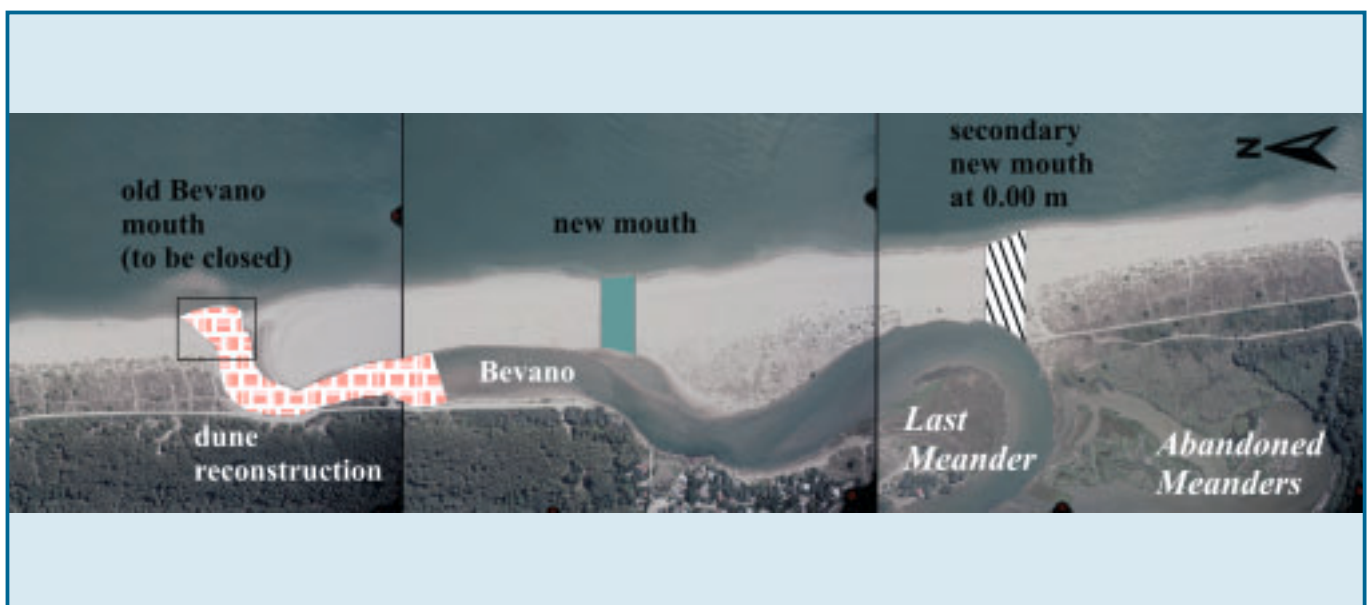


Fig. 8 - Detailed view of the area around the Bevano mouth, flight performed in 2002 (© Geosystem, Parma). The engineering works that will be done on the inlet are outlined - not scaled [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003].

Particolare dell'aera in corrispondenza della bocca del Torrente Bevano, volo del 2002 (© Geosystem, Parma). Si indicano gli interventi che verranno attuati nella zona di foce - non in scala [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003].

undercutting the dunes. The sand coming from lateral dune erosion feeds the sediment budget of the beach close to the mouth, while northerly longshore transport creates a spit. Another important element to take into account for the area is subsidence. The difference in drop level, between the areas around the Bevano River and the areas that are 3 km to the north, generates a sort of “depo-centre”. The Bevano is probably moving “downslope”.

Bedload yield was estimated as 3950 m³/yr. The river transports sediments mainly during flooding periods. The sand is injected on the submerged delta and then moved onshore, increasing the beach width.

It would be interesting to evaluate, with direct surveys, the quantity of sediment that the river transports during floods, to know if the sand is still coming mainly from lateral dune erosion or if the bedload yield is an important component in increasing the sediment budget of the study area. Moreover it would be interesting to assess, during a period of floods, if the outlet migration rate increases or decreases.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper is a contribution to the Coastview Project (contract EVK3-CT-2001-00054), while aerial photography was supplied by the Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli of the Regione Emilia-Romagna. Yann Balouin also acknowledges the financial support of the Commission of the European Communities through a Marie Curie Fellowship (contract EVK3-CT-2002-50014). We also thanks Agnese Benati, Dario Capatti, Dario Gessi, Umberto Tessari, Corinne Corbau, Fabio Corbani and Giorgio Anfuso for help during the fieldwork at Lido di Dante.

REFERENCES

- BALOUIN Y., CIAVOLA P., MICHEL D. (2004): *Support of subtidal tracer studies to quantify the complex morphodynamics of a river outlet: the Bevano, NE Italy*. Journal of Coastal Research, SI 39, ICS 2004, in stampa, 6 pp.
- BERTONI W. (2003): *La subsidenza di Ravenna: lo stato attuale in relazione alla coltivazione dei giacimenti a gas*. Servizio Geologico, Comune di Ravenna.
- CIAVOLA P. (2004): *Tracers*. Encyclopedia of Coastal Sciences, M. Schwartz (ed.), Kluwer Academic, Dordrecht, Paesi Bassi, pp. 1253-1258.
- CIAVOLA P., GATTI M., ARMAROLI C., BALOUIN Y. (2004): *Valutazione della variazione della linea di riva nell'area di Lido di Dante (RA) tramite GIS e monitoraggio con GPS cinematico*. Atti di: XXI Giornata dell'Ambiente, Aree Costiere, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma.
- CIAVOLA, P., DIAS, N., FERREIRA, O., TABORDA, R., DIAS, J.M.A. (1998): *Fluorescent sands for measurements of longshore transport rates: a case study from Praia de Faro in southern Portugal*. Geo-Marine Letters, 18, pp. 49-57.
- DOLAN R., HAIDEN B. (1983): *Patterns and prediction of shoreline change*. In: CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion, Komar P. D. (ed.), CRC Press, Boca Raton, USA, pp. 123-149.
- ENGELUND F., HANSEN E. (1972): *A monograph on sediment transport in alluvial stream*. Teknisk Forlag, Copenhagen, pp. 62.
- GAMBOLATI G., GIUNTA G., PUTTI M., TEATINI P., TOMASI L., BETTI I., MORELLI M., BERLAMONT J., DE BACKER K., DECOUTTERE C., MONBALIU J., YU C.S., BROEKER I., KRISTENSER E.D., ELFRINK B., DANTE A., GONELLA M. (1998): *Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise, and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*. In: CENAS, Kluwer Academic (ed.), Dordrecht, Paesi Bassi, pp. 1-34.
- GOMEZ B., CHURCH M. (1989): *An assessment of bedload sediment transport formulae for gravel bed rivers*. Water Resources Research, 25, n. 6, pp. 1161-1186
- IDROSER (1996): *Progetto di Piano per la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna, Bologna, pp. 100-122
- MONTEFUSCO L. (1984): *Un criterio semplificato per il calcolo del trasporto solido medio di un fiume*. Atti di: Seminario su Idraulica del Territorio Montano, Istituto di Idraulica G. Poleni, Università degli Studi di Padova, Bressanone, pp. 431.
- PAVANELLI D., PAGLIARANI A., BIGI A., (2004): *Rilevamento idrologico e dei solidi sospesi nelle stazioni sperimentali dei torrenti Sillaro, Lavino, Savena, e foce Reno*. 2^a Giornata di Studio “Il monitoraggio idrotorbidimetrico dei corsi d'acqua per la stima dei processi erosivi e il bilancio dei solidi sospesi”, Autorità di Bacino del F. Reno - Università di Bologna, Bologna 8 Ottobre 2004. Abstract.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA (1979): *Variazioni della spiaggia lungo il litorale emiliano-romagnolo - Litorale ravennate*. Pitagora (ed.) Bologna.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA - SERVIZIO TECNICO DI BACINO FIUMI ROMAGNOLI, sede di Ravenna (2003): *Studio di Impatto Ambientale. Riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di foce Bevano*. Ravenna, 239 pp.
- TOFFALETI F.B. (1969): *Definite computation of sand discharge in rivers*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 95, n. HY1, pp. 225-246.

Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo

1. AREA DI STUDIO

Le dinamiche fluviali alla foce e il loro rapporto con le condizioni meteo-marine sono estremamente complesse e comportano una conoscenza delle portate solide e liquide del fiume, degli effetti sulla foce delle correnti di marea e del moto ondoso. Per avere un quadro completo bisogna inoltre raccogliere informazioni sui regimi pluviometrici che interessano il bacino del corso d'acqua in esame e dati sulle caratteristiche delle aree adiacenti la foce.

Il bacino del Torrente Bevano è sito nella pianura padano-romagnola a sud di Ravenna, tra il fiume Ronco a NO ed il fiume Savio a SE (Fig. 1). Il bacino idrografico ha un'estensione di circa 92 km² e si sviluppa per una piccola parte in area collinare (per circa 16 km²), dove la sua testata lambisce l'abitato di Bertinoro a quote tra 150 e 170 m s.l.m. La parte rimanente è invece compresa nella pianura costiera adriatica, dove il torrente sfocia in mare presso l'abitato di Lido di Dante dopo aver attraversato la Pineta di Classe. Nella parte di pianura, a circa 2 km dalla foce, riceve le acque del Torrente Fosso Ghiaia (Fig. 1), che è l'affluente più importante per estensione. Gli altri affluenti sono costituiti da piccoli scoli consorziali delle aree agricolo-industriali del Ravennate che, data la limitata portata liquida e l'assenza di alimentazione di sedimenti, influenzano poco la dinamica evolutiva dell'alveo e della sua foce. Il bacino si presenta con una forma allungata lungo la direzione dell'asta principale, con rapporto di allungamento Re (rapporto tra il diametro di un cerchio di area uguale a quella del bacino e la lunghezza massima del bacino misurata lungo l'asta principale) pari a 0,6.

Nella parte collinare del bacino imbrifero affiorano terreni di tipo sabbioso ed argilloso appartenenti ai depositi marini del Pliocene Medio e Superiore, che conferiscono al paesaggio una morfologia poco acclive, mentre nella parte di pianura il corso d'acqua scorre in ghiaie, sabbie ed argille alluvionali dell'Olocene. Il canale ha una morfologia rettilinea per gran parte del suo tracciato, e diviene meandri-forme nel tratto terminale pre-foce, dove si evidenzia la presenza di due meandri abbandonati (Fig. 1).

A nord della foce si estende, per 3 km sino alla foce dei Fiumi Uniti, la spiaggia di Lido di Dante. L'area è caratterizzata dalla presenza, nella parte nord, di una barriera soffolta (di 800 m di lunghezza) di fronte all'abitato di Lido di Dante. I rimanenti 2 km di costa sono completamente naturali e presentano un cordone dunare di altezza variabile rispetto al livello medio del mare: 1-1,5 m nella zona a sud delle barriera soffolta; 3,5 m nella zona adiacente alla foce del Bevano.

Il regime tidale è qui, e in tutto in nord Adriatico, fortemente asimmetrico con componenti sia diurne sia semi-diurne. La massima escursione di marea è di 1,2 m in sizigie [GAMBOLATI *et al.*, 1998]. Il regime di moto ondoso è generalmente a bassa energia, con altezza d'onda significativa al largo inferiore a 0,5 m, principalmente da Est (più del 65% degli eventi registrati) [GAMBOLATI *et al.*, 1998]. Le mareggiate principali sono generate dai venti di Bora (N-E) e di Scirocco (S-E). Il mare regnante proviene da E, S-E; il mare dominante proviene da N-E [IDROSER, 1996].

2. EVOLUZIONE DELLA FOCE

Le variazioni della foce del Torrente Bevano sono state studiate sia a lungo termine, su un periodo di 55 anni, sia a corto termine, su un periodo di 2 mesi.

Per lo studio a lungo termine, a partire dal 1943 fino al 1998, si sono utilizzate quattro foto aeree e, in particolare:

- Volo RAF del 1943;
- Volo IDROSER del 1982 (© CGR Parma); scala 1:10000;
- Volo AIMA del 1996 (© CGR Parma); scala 1:40000;
- Volo IT2000 del 1998 (© CGR Parma); scala 1:40000.

Per lo studio a breve termine, tra il 14 Aprile e il 20 Giugno 2003, si sono utilizzati 6 rilievi topografici (effettuati dagli autori con Stazione Totale).

Inoltre, al fine di valutare le dinamiche di foce, si sono utilizzate delle sabbie traccianti. Tale pratica ha messo in evidenza il rapporto tra la foce e il mare aperto, con particolare riferimento all'influenza delle correnti di marea e del moto ondoso sulla ridistribuzione del materiale sia portato dal fiume sia eroso dalle dune, a causa della spostamento a nord della foce.

2.1 Variazioni a lungo termine

Lo spostamento della foce nei 55 anni presi in esame è stato valutato attraverso l'analisi della High Water Line (HWL, Fig. 2) eseguita con un programma di GIS (Arcview) mappata a scala 1:3000. La HWL viene definita come l'intersezione tra la spiaggia e il livello più alto raggiunto dall'acqua nelle ore antecedenti il volo [DOLAN *et al.*, 1983]. La variazione della HWL, che corrisponde al limite tra sabbia asciutta e bagnata, dipende dalle condizioni meteomarine al momento del volo e dalle variazioni giornaliere e stagionali del ciclo tidale [CIAVOLA *et al.*, 2004]. Pertanto, per evitare errori di interpretazione, devono essere utilizzate foto scattate nel periodo estivo, che è generalmente caratterizzato da regime di moto ondoso a bassa energia. Naturalmente sono da scartare le immagini acquisite dopo una mareggiata, che sono utili invece per valutare il rischio di inondazione.

In figura 3 si indicano la posizione e la forma della foce del Bevano e delle aree circostanti nei 55 anni presi in esame. Ciò che si evidenzia può essere riassunto nei seguenti punti:

– 1943: la foce è rivolta verso sud e il corso del fiume è circondato da una zona golenale molto ampia. È presente un solo meandro abbandonato.

– 1982: la foce è rivolta verso nord. Ci sono due meandri abbandonati dei quali, quello più verso mare, è il vecchio corso del fiume nel 1943. È presente un delta sommerso relativamente esteso.

– 1996: la bocca del Bevano è rivolta verso nord ed è spostata in direzione nord di 250 m. È presente un'ampia freccia litorale o spit nel lato sud della foce che è stata osservata anche durante i rilievi topografici svolti dagli autori (Fig. 5). Il corso del fiume è, per un lungo tratto, parallelo alla costa e tocca la pineta nel segmento terminale. Sono ancora presenti due meandri abbandonati.

– 1998: la foce è spostata ulteriormente a nord di circa 150 m. La freccia litorale a sud della bocca continua a prolungarsi verso nord e aumenta la sua ampiezza. I due meandri abbandonati sono ancora chiaramente identificabili.

2.2 Variazioni a breve termine e dinamiche di foce

Sono state effettuate 6 campagne di misura che hanno evidenziato un continuo e rapido movimento verso nord della foce. I risultati ottenuti si riferiscono ad una variazione morfologica a corto termine e durante un periodo di bel tempo, in cui gli afflussi meteorici nel bacino fluviale sono stati scarsi: in Aprile, 87,8 mm, ed in Maggio appena 5,2 mm. I valori di altezza d'onda, registrati dalla boa situata di fronte a Punta della Maestra (Fig. 4), nord Adriatico (circa 100 Km a nord di Ravenna, 44.97167 Lat - 12.83333 Long), sono stati, per l'intero periodo, inferiori a 1 m. Si evidenziano solo due eventi di maggiore entità con onde di altezza pari a poco più di 1,60 m il 14 Maggio, e di poco più di 1,00 m il 21 Maggio. Le direzioni delle onde sono principalmente da NE (50° nord); i due eventi di maggiore entità provengono invece da S-SE.

Il 22 Aprile 2003, si sono eseguite valutazioni del trasporto sedimentario alla foce con l'utilizzo del metodo dei traccianti [CIAVOLA, 2004]. La sabbia è stata colorata con vernice acrilico-fluorescente: una parte in rosso, una parte in verde: 50 kg di traccianti rossi sono stati posizionati alla bocca della foce, 25 kg di traccianti verdi sono stati iniettati sottocosta. Contemporaneamente si sono effettuate misure di corrente in prossimità della bocca nell'area di immissione dei traccianti di colore rosso. Si è utilizzato un correntometro AANDERAA, che ha permesso di avere informazioni dei flussi entranti e uscenti in base al ciclo tidale. Le maree, al momento dell'iniezione, erano in quadratura con prevalenza della componente di riflusso.

Il metodo dei traccianti può essere applicato seguendo due metodologie diverse [CIAVOLA, 2004]: Integrazione Spaziale, Integrazione Temporale. Per il presente studio si è utilizzato il primo metodo. Questo consiste nel raccogliere dei campioni (carote) lungo una griglia di punti equi spaziali e posti nell'intorno della sorgente (punto nel quale si è iniettata la sabbia colorata). La dimensione della griglia dipende dalla distanza percorsa dalla sabbia colorata nel tempo che intercorre tra l'iniezione e il campionamento stesso. Nel caso di zone nelle quali l'escursione di marea è piccola, il controllo della presenza dei traccianti avviene sott'acqua, visivamente, utilizzando uno strumento dotato di lampade UV, che sono in grado di rendere luminescente il colorante [BALOUIN *et al.*, 2004]. La griglia sarà tanto più larga quanto più lontano saranno stati trasportati i granelli colorati (Fig. 7, a sinistra). Naturalmente, se il tracciante è coperto dalla sabbia, non viene individuato ad una prima stima visiva della distanza da esso percorsa. Per questo, nel scegliere la dimensione della griglia, è necessario includere un margine che si estenda al di fuori dell'ultimo punto nel quale si è trovata sabbia colorata. I campioni prelevati vengono posti sotto la lampada ad ultravioletti dopo essere stati essiccati e pesati (per poter confrontare la massa di tracciante recuperato con la massa totale di sabbia iniettata, pesata a secco prima di essere utilizzata). Grazie al medesimo strumento che è dotato, oltre che di lampade UV, anche di un sistema video in grado di raccogliere immagini del campione luminescente e di inviarle ad un computer per le successive analisi, è possibile contare i granuli di tracciante presente nel campione in modo automatico (usando uno specifico software) [BALOUIN *et al.*, 2004]. È inoltre fondamentale calibrare il software di conteggio dei granuli per le diverse condizioni di lavoro, ed è altresì importante definire l'accuratezza della tecnica in condizioni variabili di composizione e dimensione della sabbia studiata, elementi che cambiano a seconda delle aree prese in esame. Infine, conoscendo il peso della sabbia colorata trovata nelle diverse carote, si può integrare nello spazio, sia sull'area campionata, sia in verticale, fino alla profondità di miscelazione [CIAVOLA *et al.*, 1998]. In questo modo si definisce la direzione principale di spostamento della sabbia e il volume che è stato messo in movimento dalle correnti lungo costa. I coloranti che vengono utilizzati sono resistenti all'abrasione e non solubili in acqua.

Il metodo di Integrazione Temporale consiste invece nel raccogliere dei campioni (carote) lungo una linea posta ad una certa distanza dalla sorgente, perpendicolare alla direzione di spostamento della sabbia, ad intervalli regolari di tempo. Tale metodo serve per conoscere la variazione della concentrazione del tracciante nel tempo, lungo la direzione principale di spostamento dello stesso. Anche l'integrazione nel tempo serve per calcolare il trasporto lungo costa in termini di volume di materiale. Naturalmente è necessario conoscere qual è la direzione prevalente della corrente prima di iniziare il campionamento.

Nell'esperimento qui presentato, sono state raccolte più di 80 carote di 20 cm di lunghezza. Queste sono state successivamente suddivise in 10 parti (2 cm di lunghezza ciascuna). Ogni parte è stata infine analizzata in laboratorio grazie al detettore/contatore sopra descritto. La griglia di campionamento è stata scelta con dimensioni di 100-150 m sia a nord, sia sud della sorgente, e di 150 m nella direzione est-ovest (Fig. 7, a sinistra).

3. STIMA DEL TRASPORTO SOLIDO FLUVIALE

Nel caso di studio considerato, la stima del trasporto solido di fondo non è stata effettuata attraverso misure dirette della portata solida che, sebbene siano da preferirsi per pervenire ad un dato affidabile, necessita di periodi lunghi di osservazioni e onerose misure di campo. Date le caratteristiche morfologiche e sedimentologiche del letto del T. Bevano nel suo tratto terminale, caratterizzato da sedimenti sabbioso-limosi, pendenza molto bassa e geometria della sezione regolare, si è ritenuto che le condizioni fossero ideali per adottare una metodologia indiretta, basata sull'impiego di formule fisicamente basate reperibili in letteratura, che consentisse di stimare la quantità di materiale sabbioso trasportato a mare. Le condizioni morfologiche e sedimentologiche del tratto terminale del T. Bevano, hanno suggerito di riferirsi alla formula fisicamente basata di ENGELUND & HANSEN [1972], che meglio di altre è parsa garantire risultati affidabili in senso generale in relazione al contesto considerato e sulla base di esperienze effettuate anche su altri corsi di dimensioni maggiori (per esempio il F. Po; MONTEFUSCO, 1984) ma con caratteristiche morfologiche e sedimentologiche simili [GOMEZ & CHURCH, 1989; MONTEFUSCO, 1984]. Inoltre, poiché la formula di Hengelund & Hansen stima la portata solida del materiale di fondo considerando anche quella porzione di sedimento sabbioso trasportata in sospensione durante le piene, e dato che la frazione sabbiosa è quella di maggiore rilevanza per le problematiche connesse con la dinamica della spiaggia prospicienti, questa equazione è stata ritenuta la più opportuna a descrivere in termini quantitativi gli apporti di sabbia alla foce.

Tale funzione, ricavata da studi in canaletta, permette di stimare il trasporto solido totale, e fornisce risultati generalmente corretti per fiumi sabbiosi con sostanziale trasporto in sospensione, per sedimenti di fondo con dimensioni medie comprese tra 0,19 e 0,93 mm. Una revisione della formulazione classica di Engelund & Hansen è stata operata da MONTEFUSCO [1984], il quale ha introdotto nell'espressione alcune trasformazioni che consentono di quantificare il valore totale annuale del trasporto del materiale di fondo. Montefusco è pervenuto a ciò attraverso una rappresentazione continua della curva di durata ipotizzando che la distribuzione della frequenza delle portate, elevate ad 1.7, sia riconducibile ad una gaussiana mediante una trasformazione di Gibart, i cui parametri possono essere stimati facendo riferimento a tre valori caratteristici di portata, rispettivamente la portata superata 10, 182 e 355 giorni l'anno. Questa integrazione permette di ponderare il dato di trasporto solido sulla distribuzione di frequenza delle portate liquide per ottenere un dato cumulativo annuale. La formula di Engelund & Hansen modificata da

Montefusco (1984) considera anche la geometria della sezione, la larghezza dell'alveo, intesa come quella porzione di letto che effettivamente partecipa al trasporto solido di fondo, il gradiente d'energia ed il diametro medio dei sedimenti del letto e , pertanto, assume la seguente forma:

$$T_s = 1.47 * \frac{1}{D} * \frac{1}{B^{0.7}} * i^{1.65} * \left[Q_0 + e^{\left(\frac{1.326}{a^2} - 2.303 * \frac{b}{a} \right)} \right] \quad (1)$$

dove T_s è il trasporto solido medio espresso in milioni di tonnellate/anno, D_{50} è il diametro medio del materiale del letto in metri, B la larghezza dell'alveo attivo in metri, i è la pendenza del letto assunto parallelo al gradiente d'energia. Q_0 è un valore funzione di tre portate caratteristiche, Q_{10} , Q_{182} e Q_{355} , cioè le portate superate rispettivamente 10, 182 e 355 giorni all'anno, ed è calcolato con l'applicazione della seguente formula

$$Q_0 = \frac{(Q_{182}^{-2} - Q_{10} * Q_{355})}{[2(Q_{182} - Q_{10} - Q_{355})]} \quad (2)$$

mentre a e b sono parametri funzione anch'essi dei valori caratteristici di portata, calcolati rispettivamente con le formule

$$a = - \frac{1.36}{\log \left[\frac{Q_{10} - Q_0}{Q_{182} - Q_0} \right]} \quad (3)$$

$$b = -1.36 - a * \log(Q_{10} - Q_0)$$

e che nel caso specifico assumono rispettivamente valori pari a 0.80 e 0.21.

3.1 Acquisizione dei dati idraulici

Per quanto riguarda le portate liquide del T. Bevano, purtroppo non sono disponibili serie lunghe di dati giornalieri che permettano di calcolare la distribuzione di frequenza, e quindi ricavare le Q_{10} , Q_{182} e Q_{355} . Per ovviare a questo inconveniente è stata adottata una semplice procedura di regionalizzazione delle portate, utilizzando i dati idrometrici di bacini limitrofi con caratteristiche morfologiche simili per i quali esistono serie temporali sufficientemente lunghe. Si sono pertanto considerati i valori medi relativi all'intervallo di tempo più lungo possibile di osservazioni della Q_{10} , Q_{182} e Q_{355} per i bacini riportati in Tabella 1.

Questi dati sono stati quindi impiegati per costruire dei diagrammi cartesiani in cui l'area del bacino è la variabile indipendente e le portate caratteristiche sono invece quella dipendente. Dalla successiva interpolazione dei valori si sono ricavate delle rette di regressione (aventi struttura del tipo $Q_n = kA + b$, dove Q_n è la portata caratteristica considerata, A è l'area del bacino, k e b sono costanti) ed i cui coefficienti di correlazione (R^2) risultano elevati con significatività del 99,9% e variano tra 0,77 e 0,98. Attraverso questi semplici modelli lineari sono stati quindi derivati per il T. Bevano i valori di Q_{10} , Q_{182} e Q_{355} , il cui margine di errore è ritenuto contenuto e compatibile con gli obiettivi della ricerca e data anche la mancanza di dati affidabili di trasporto solido di fondo per i corsi d'acqua del margine adriatico dell'Appennino settentrionale. I valori delle portate caratteristiche

sono quindi risultati: $Q_{10} = 14,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $Q_{182} = 1,411 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $Q_{355} = 0,064 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

La sezione di riferimento per la stima del trasporto solido è stata individuata presso il Ponte Libertà e Lavoro, posto a circa 4 km dalla foce, ovvero in una posizione quanto più possibile in prossimità dello sbocco a mare, ma tale da non risentire dell'effetto dell'escursione delle maree. Osservazioni dirette hanno consentito di stimare in 33,4 m la larghezza dell'alveo utile ai fini della stima del trasporto dei sedimenti sul fondo.

La pendenza del tratto considerato è stata ottenuta attraverso rilievi topografici e batimetrici diretti eseguiti in condizioni di portata di morbida ed è risultata di 0,0002 per un tratto di lunghezza pari a circa 10 volte la larghezza media del corso d'acqua, in accordo con criteri internazionali consolidati. Rilievi topografici eseguiti dalla Regione Emilia-Romagna in un tratto compreso tra la Statale Adriatica ed il ponte Libertà e Lavoro posto a circa 1,2 km a monte della foce, nell'ambito di uno studio idraulico sulla fascia costiera prospiciente la foce del T. Bevano, ed una simulazione idraulica condotta sul tratto prefociale fino a 1,2 km a monte della foce con uno specifico software commerciale (HEC-RAS 3.1.2 sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers), hanno consentito di calcolare in 0,00029 il gradiente di energia per questo tratto prefociale per un evento di piena con tempo di ritorno massimo di 100 anni [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003]. Nella formula di Engelund & Hansen, che considera una distribuzione media annuale degli eventi di piena e quindi con tempi di ritorno sicuramente inferiori ai 100 anni, si è ritenuto opportuno introdurre il valore di pendenza di 0,0002 misurato direttamente in campo. La pendenza della linea dell'energia ed il gradiente del fondo sono grandezze idraulicamente e fisicamente diverse, ma variando di poco (in condizione di moto uniforme) nei calcoli per la stima del trasporto solido possono essere considerati coincidenti.

I sedimenti di fondo sono stati campionati presso il Ponte Libertà e Lavoro con il campionatore di materiale di fondo standard US BMH-60, specificatamente disegnato per questo scopo.

Attraverso l'analisi granulometrica del sedimento prelevato (setacciatura a umido con setacci arrangiati secondo una scala di $1/2 \phi$) si è così ottenuto il diametro medio ($D_{50} = 0,000244 \text{ m}$), ultimo parametro necessario per l'applicazione della formula di Engelund & Hansen.

4. DISCUSSIONE

La stima del trasporto solido del materiale di fondo medio annuo, espresso in peso secco, è risultata pari a 6242 t/anno, che in m^3 si traduce (assumendo un valore medio di peso di volume della sabbia pari a 1600 kg/m^3) in 3902 m^3 /anno. Il valore, espresso in t/anno, può essere ponderato sull'area dell'intero bacino, che è di 92,5 km^2 , ottenendo in questo modo un valore di trasporto solido unitario pari a 67,5 t km^{-2} /anno. Deve essere tuttavia tenuto in considerazione che, nella realtà, non è tutto il bacino a contribuire alla produzione di sedimento, poiché la porzione di pianura contribuisce in maniera minima e può quindi essere trascurata.

La parte più rilevante di sedimento è prodotta nelle aree collinari e montane, e quindi per stimare correttamente la componente dell'ablazione, nella porzione attiva del bacino corrispondente all'apporto specifico di materiale trasportato al fondo, il valore ricavato con la formula di Engelund & Hansen, modificata da Montefusco [1984], è stato ponderato sull'area della sola parte montana di bacino, che è di circa 16 km^2 , ottenendo così un valore pari a 390 t km^{-2} /anno. In bacini collinari con caratteristiche geologiche simili nel versante bolognese dell'Appennino è stata misurata una produzione di sedimenti in sospensione intorno alle 500-600 t km^{-2} /anno [PAVANELLI *et al.*, 2004].

Ulteriore verifica della stima eseguita con la formula modificata

da Montefusco, è stata fatta utilizzando un software commerciale di simulazione idraulica (HEC-RAS 3.1.1 sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers) che è in grado di calcolare il trasporto solido al fondo presso una determinata sezione utilizzando alcune fra le più consolidate formule sviluppate in letteratura. Tra queste, oltre ovviamente a quella di Engelund & Hansen, quella che meglio delle altre si adatta alle caratteristiche idrauliche, morfologiche e sedimentologiche del T. Bevano è l'equazione di TOFFALETI [1969] con la quale, prendendo come riferimento la Q_{10} , si ottiene un valore di apporto di sabbia di circa 7500 t/anno, ovvero molto vicino a quello ottenuto con la formula di Engelund & Hansen modificata da Montefusco.

Per confrontare tale valore con quelli ottenuti attraverso le misure dirette di campagna, è necessario considerare una densità di volume della sabbia che includa gli spazi vuoti, e cioè pari a 2650 kg/m³. Quest'ultimo è infatti il valore utilizzato nelle formule per il calcolo dei volumi di materiale eroso e messo in movimento dalle correnti, attraverso l'indagine diretta. In tal caso il trasporto fluviale, ricavato empiricamente, risulterebbe pari a 2356 m³/anno. Il valore di portata solida, per periodi con scarse precipitazioni, è risultato invece praticamente nullo (Q_{355}). È da sottolineare inoltre che la quantità di sabbia trasportata dipende essenzialmente dall'aumento recente delle portate liquide in arrivo dai canali affluenti, e quindi dall'immissione di acque drenate in terreni fortemente urbanizzati/impermeabilizzati [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003].

L'analisi della migrazione della foce del Bevano ha messo in evidenza che tra il 1943 e il 1982 essa ha subito uno spostamento di circa 300 m verso nord (7,8 m/anno). Inoltre si è avuto un forte accrescimento della spiaggia (circa 3 m/anno), fatto che denota un apporto sedimentario non trascurabile da parte del T. Bevano e del Fiume Savio, nei 29 anni in esame. Quindi, il contributo di materiale dato dal trasporto lungo costa in direzione nord è stato in grado di alimentare la zona di studio: in particolare le sabbie portate a mare dal Fiume Savio, che si trova 3 km più a sud. Quest'ultimo, infatti, è un corso d'acqua appenninico, con un bacino molto ampio, che trasporta un certo quantitativo di materiale. Tale sedimento ha alimentato, e tutt'ora alimenta, la freccia litorale a sud della foce. Negli anni successivi a quelli qui in esame, sia a causa della costruzione di opere di difesa della costa nell'area di Savio (pennelli, dighe e barriere longitudinali), sia a causa della forte diminuzione del trasporto torbido da parte dei fiumi [VITTORINI, 1991], tale riserva di materiale è diminuita, e la costa si è mantenuta pressoché uguale (si veda confronto 1982-1996 e 1996-1998). Probabilmente la stabilità della spiaggia a nord del Bevano è dovuta in parte all'assenza di interventi antropici, in parte all'erosione laterale delle dune che immette sabbia nel bilancio sedimentario dell'area. Inoltre è necessario sottolineare che, anche se in misura minore rispetto al passato, il trasporto lungo costa contribuisce anch'esso al bilancio sedimentario della spiaggia di Lido di Dante. Un altro elemento da tenere in considerazione è la subsidenza. Lo spostamento della bocca e la forma del torrente nel tratto terminale sono sicuramente influenzate da tale fenomeno che, negli anni '30, è passata, in tutta la costa romagnola, da valori dell'ordine di mm/anno a valori dell'ordine di cm/anno [ARPA, 2001]. Attualmente i tassi di abbassamento del terreno sono diminuiti in gran parte della costa, tranne l'area di Ravenna che rimane critica [BERTONI, 2003].

Dal confronto del volo 1982 con il volo 1996 la spiaggia risulta, nel tratto verso la bocca del Bevano, in leggero accrescimento. La foce del fiume si è spostata a nord di 300 m in 14 anni (21,4 m l'anno).

La presenza di una freccia litorale così estesa (Fig. 5) conferma una prevalenza di trasporto di sedimenti lungo costa in direzione nord. Prendendo in considerazione i valori pluviometrici medi annui tra il 1982 e l'estate 1996 (periodo dell'anno in cui è stata scattata la foto aerea), essi risultano pari a circa 600 mm/anno, tranne il 1984 che ha un valore medio annuo, nella stazione di Idrovora Fosso

Ghiaia, pari a 804 mm. Tale lungo periodo caratterizzato da precipitazioni relativamente poco abbondanti può aver causato uno squilibrio morfodinamico e quindi aver generato una prevalenza del trasporto litoraneo rispetto alle correnti fluviali nella zona di foce.

Lo spostamento a nord della bocca del fiume continua anche nel confronto fra gli anni 1996 e 1998, con un avanzamento di 140 m in due anni (70 m/anno). Rispetto al tasso misurato tra il 1982 e 1996, tale valore risulta triplicato, con conseguente aumento del trend erosivo delle dune. I valori pluviometrici registrati nei due anni in esame dalla stazione di Bertinoro evidenziano piogge molto abbondanti nel 1996 (Settembre e Ottobre), così come nel 1997 (Novembre), mentre gli eventi piovosi nel 1998 non sono stati tali da aumentare eccezionalmente le portate. Tali precipitazioni copiose hanno sicuramente influenzato, aumentandolo, il trasporto solido da parte del fiume. Il tasso di subsidenza in quest'area, negli anni in esame, è molto elevato [BERTONI, 2003]. Confrontando i valori di abbassamento del terreno, tra gli anni 1982-1998 e 1998-2002, si nota come, in 10 anni, ci sia stato un notevole incremento del gradiente di quota rispetto al l.m.m. tra le due zone. In prossimità dei Fiumi Uniti si è passati da un tasso di 10 mm/anno ad un tasso di 15 mm/anno; in prossimità del Bevano i valori sono rimasti invariati e pari a 7 mm/anno [BERTONI, 2003]. Tale andamento porta alla formazione di un depocentro in corrispondenza dell'abitato di Lido di Dante. Si può affermare quindi che il T. Bevano si stia muovendo lungo un "piano inclinato". Tale fenomeno può influenzare pertanto lo spostamento a nord della bocca.

I rilievi topografici hanno evidenziato che, dal 14 Aprile al 20 Giugno, lo spostamento della bocca è stato di 40 m [BALQUIN *et al.*, 2004]. La migrazione della foce ha generato l'erosione della piattaforma di swash sottocorrente (30 m) e della duna (10 m). Essa è inoltre associata ad una leggera diminuzione dell'area della sezione trasversale dell'alveo (Fig. 6), ed ad una progressiva rotazione verso nord della bocca. Il canale è risultato infine ortogonale alla spiaggia grazie all'accumulo a nord di materiale proveniente dalla foce.

L'analisi dei risultati ottenuti con i traccianti ha evidenziato quanto segue: la sabbia verde è stata trasportata a nord; questa è stata poi intrappolata in una piccola barra all'estremità della freccia litorale. Tale barra è stata successivamente trasportata a riva da correnti, contribuendo all'accrescimento della freccia litorale stessa. Alla foce, la sabbia rossa è stata sospinta al largo dalla corrente di riflusso di marea e successivamente verso nord dalle correnti lungo costa; granuli colorati sono stati trovati nelle carote ad una distanza di 150 m dalla sorgente (Fig. 7). Nel tratto terminale del corso d'acqua, durante l'esperimento, la corrente ha eroso sabbia dal piede della duna. Tale materiale ha coperto in parte la sorgente dei traccianti, probabilmente causando una rimozione solo parziale della massa iniettata.

Dal confronto volumetrico dei rilievi topografici la sabbia asportata dalla duna è risultata, nel periodo di osservazione, pari a 2200 m³/mese (Fig. 7). Nel delta si è stimato un accumulo di sabbia pari a 1950 m³/mese. Di questi, 1250 m³/mese si sono accumulati nella barra di swash più a nord (Fig. 7), che è progressivamente migrata verso riva apportando materiale alla spiaggia di Lido di Dante [BALQUIN *et al.*, 2004]. Il trasporto sopra corrente, dovuto alla deriva litorale, è risultato pari a 1440 m³/mese (Fig. 7). La maggior parte di questo materiale si è accumulato sul margine della freccia litorale incrementandone il volume e l'ampiezza. Tale fenomeno compensa quindi l'aumento della sezione trasversale del canale fluviale alla bocca, dovuto all'asporto di parte della duna.

Le misure topografiche hanno evidenziato quindi che il materiale che partecipa al bilancio sedimentario nell'area di foce proviene esclusivamente dall'erosione della duna e dal trasporto lungo costa. Il contributo da parte del trasporto di fondo è invece praticamente nullo. Tale dato è certamente influenzato dalle condizioni meteorologiche durante la campagna che sono state di bel tempo, con scarse precipitazioni.

5. FUTURA EVOLUZIONE DELL'AREA: INTERVENTI ANTROPICI

L'area alla foce del torrente Bevano presenta dinamiche complesse, in quanto, come detto sopra, interagisce attivamente con il mare, il quale, grazie alle correnti di trasporto litorale lungo costa ed ai flussi entranti ed uscenti di marea, contribuisce a spostare la foce in direzione nord. Tale movimento laterale della bocca genera erosione delle dune e il crollo di parte della pineta, nella zona più prossima al corso d'acqua. La Regione Emilia-Romagna, ed, in particolare, il Servizio Tecnico Bacini Fiumi Romagnoli, sede di Ravenna, ha elaborato un SIA (Studio di Impatto Ambientale) per descrivere e valutare le opere da effettuare per aprire una nuova bocca alla foce del Bevano. Le principali problematiche che hanno spinto la Regione Emilia-Romagna a decidere di intervenire nell'area sono due, ed, in particolare [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003]:

- Foce Bevano di fatto "chiusa a mare", con conseguente rigurgito idraulico e messa in crisi del retrostante bacino e sistema di bonifica.
- Erosione della duna litoranea verso nord e rischio di ingressione marina nel territorio retrostante (posto sotto al livello del medio mare), con danneggiamento anche della pineta retrodunale.

Sono state elaborate sette differenti soluzioni che potessero garantire la risoluzione dei problemi sopra elencati. La scelta finale è ricaduta su: chiusura vecchia foce, apertura di foce intermedia e ulteriore uscita parziale [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003]. L'intervento prevede di aprire una nuova bocca in un punto intermedio tra l'ultimo meandro e la foce attuale, e di creare un'uscita facilitata, in caso di piena, in corrispondenza dell'ultimo meandro (Fig. 8). Tale pratica consiste nel rimuovere la sabbia dalla freccia litorale in corrispondenza dell'ultimo meandro, per portare il livello della stessa alla quota del medio mare. Il materiale asportato, per generare la nuova foce e l'uscita facilitata, verrà utilizzato per raccordare le dune, attualmente presenti a nord della bocca, con la pineta retrostante, che è stata erosa dall'azione del fiume, man mano che questo si spostava verso nord. Si potranno così proteggere da eventi di mareggiata sia la zona retrodunale, sia la pineta.

Come evidenziato dagli studi condotti nell'area tramite traccianti, la maggior parte del materiale che alimenta la spiaggia a nord della foce deriva dall'erosione laterale delle dune. La chiusura della bocca attuale e l'apertura di due uscite intermedie potrà generare, come conseguenza di eventi di mareggiata, un deposito di materiale in prossimità del corso d'acqua. Il trasporto lungo costa potrà subire una riduzione volumetrica in seguito alla scomparsa dell'input dovuto all'erosione delle dune. Quindi si potrà verificare un arretramento della linea di riva a nord della bocca attuale. Sarà quindi necessario monitorare l'intervento per poter definire sia la sua efficacia, sia gli effetti che provocherà sulle aree circostanti.

6. CONCLUSIONI

Dalla fine degli anni '60 molte delle foci dei fiumi che sboccano in Adriatico si sono orientate verso nord [REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 1979]. Dal confronto delle foto aeree a disposizione si sono misurati gli spostamenti della foce del Bevano dal 1943 fino al 1998, che segue questa tendenza con tasso di migrazione in progressivo aumento. Fino all'82 la foce resta in prossimità dell'ultimo meandro. Dall'82 in poi inizia lo spostamento con un tasso di circa 21 m l'anno; gli anni '80 sono un periodo di piogge medie annuali pari a circa 600 mm/anno, quindi relativamente poco abbondanti rispetto agli altri decenni. Questo può aver causato uno squilibrio morfodinamico con una prevalenza del trasporto lungo costa e dell'influenza delle correnti tidali e del moto ondoso nella zona di foce. Il tasso di movi-

mento in direzione nord, nell'intervallo '96-'98, risulta più che triplicato: 70 m l'anno. Lo spostamento rilevato in campagna, durante due mesi di bel tempo è di 20 m/mese. Tale area è fortemente influenzata dagli agenti meteomari, in particolare dalle maree in condizioni sizigiali, come dimostrano gli studi a breve termine, qui effettuati in un periodo senza precipitazioni. Si può affermare quindi che le correnti di marea siano in grado di spingere la bocca verso nord, e di trasportare all'esterno il materiale eroso nella parte interna della foce che incrementa infine il budget sedimentario della spiaggia a nord. Inoltre è da tenere in considerazione l'effetto della subsidenza, che genera una differenza di quota tra la foce e le aree a nord della stessa (in particolare dei Fiumi Uniti, 3 km a nord). Il trasporto lungo costa, che si muove sempre in direzione nord, influisce sulla formazione della freccia litorale.

Si è stimato l'apporto fluviale di sabbia come dato medio annuo che risulta pari a 3902 m³/anno. Il trasporto fluviale viene accumulato per la maggior parte nei periodi di piena quando il carico di fondo viene iniettato nel delta. Quindi il trasporto si esplica in brevi periodi di portate elevate del fiume.

Nella campagna di rilievi diretti (Aprile-Giugno 2003) si sono valutate le variazioni volumetriche nell'area di foce in condizioni di bel tempo. Il sedimento che viene reso disponibile dallo spostamento a nord della foce è risultato pari a 2200 m³/mese; in parte derivante dall'erosione dell'area sottocorrente, in parte derivante dall'asportazione di materiale dalle dune.

Sarebbe necessario valutare il trasporto di fondo direttamente, su un periodo di tempo lungo, e con condizioni meteorologiche peggiori; quindi verificare se, in mesi particolarmente piovosi, l'apporto principale di materiale all'esterno della foce risulti provenire ancora dall'erosione della duna, come da quanto ottenuto sopra, o da sedimento proveniente dal fiume stesso. Inoltre sarebbe necessario verificare se il tasso di spostamento verso nord della bocca del fiume, in condizioni di piena, vari rispetto al tasso che si è calcolato sperimentalmente in condizioni di bel tempo.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato finanziato dal Progetto Europeo CoastView (contratto n. EVK3-CT-2001-00054). Le foto aeree sono state fornite dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Yann Balouin ringrazia inoltre la Comunità Europea che ha contribuito attraverso il Progetto Marie Curie (contratto n. EVK3-CT-2002-50014). Si ringrazia inoltre il Dr. Mauro Ceroni per aver messo a disposizione degli autori informazioni e dati relativi all'area oggetto del presente lavoro, ed, in particolare, lo Studio di Impatto Ambientale. Si ringraziano infine Agnese Benati, Dario Cappati, Dario Gessi, Umberto Tessari, Corinne Corbau, Fabio Corbani, Giorgio Anfuso per l'aiuto durante le campagne di misura a Lido di Dante.