

CAPITOLO 14 - CHAPTER 14

ASPETTI GEOMORFOLOGICI DI CARATTERE AMBIENTALE GEOMORPHOLOGICAL ASPECTS, WITH ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS

CARLO ELMI

con contributi di - *with contributions by* M. BONDESAN, D. CASTALDINI & M. GHIROTTI

14.1 Introduzione

Sono qui trattati alcuni argomenti di carattere applicativo, che in parte hanno già trovato posizione nei precedenti capitoli, con un taglio orientato verso i problemi ambientali. Oggetto del capitolo sono i rischi geomorfologici legati sia ai processi naturali sia alle attività umane. I primi riguardano essenzialmente la sismicità, la subsidenza, i processi fluviali e marini (esondazioni, erosione dei litorali, acque alte). I rischi indotti dall'attività antropica sono essenzialmente quelli legati all'urbanizzazione, agli interventi sui corsi d'acqua e sulle coste, alle attività estrattive, al pompaggio di acque sotterranee e alla coltivazione di giacimenti di idrocarburi.

14.2 Le deformazioni del suolo in seguito ad eventi sismici

Nello studio dell'influenza che la natura locale del terreno può avere sugli effetti degli eventi sismici, un particolare aspetto è quello delle deformazioni del suolo e più precisamente dei fenomeni di liquefazione, di fratturazione e di variazione topografica.

A tale proposito sono qui presentati i dati, relativi alla sola area di pianura, tratti dal *Catalogo nazionale degli effetti deformativi del suolo indotti da forti terremoti* (Romeo & Delfino, 1997).

Il catalogo, fruibile come *database* informatizzato, contiene informazioni sugli effetti prodotti sul terreno dai più forti terremoti avvenuti in Italia nell'ultimo millennio; sono considerati i sismi con intensità epicentrale nominale \geq VIII grado della scala MCS, soglia a partire dalla quale in molte scale macrosismiche sono descritti effetti sul terreno.

14.1 Introduction

This chapter treats some applicational subjects, partly described in preceding chapters, with particular emphasis on geomorphological hazards due to both natural processes and human activities. The former essentially regard seismicity, subsidence, and fluvial and marine processes (flooding, beach erosion, storm surges). Risks due to anthropic activities are mainly linked to urban expansion, operations on watercourses and coastlines, quarrying, pumping of groundwaters, and exploitation of hydrocarbon deposits.

14.2 Ground deformation following seismic events

When studying the local influences of seismic events, special importance must be paid to such phenomena as soil deformation and particularly liquefaction, fracturing and height variations.

Data regarding only the plain area are presented here, taken from the «Italian catalogue of soil deformation effects induced by high-energy earthquakes» (Romeo & Delfino, 1997). This catalogue, which may be used as a computerized data-base, contains information on effects produced on the ground by the strongest earthquakes occurring in Italy over the last thousand years. Earthquakes with a nominal epicentre intensity higher than grade VIII on the MCS scale are considered as a threshold starting from which surface effects are described in many macroseismic scales.

For each phenomenon, seismic parameters are supplied regarding the events, locations or sites where the effects, with associated macroseismic intensities, occurred, historical chronicles or other documentation, bibliography, lithological features of the site and the type of event. In particu-

Per ogni fenomeno sono forniti i parametri sismici dell'evento, le località o i siti ove sono avvenuti gli effetti con le intensità macrosismiche associate, le citazioni storiche integrali, la bibliografia, i caratteri litologici del sito e la tipologia del fenomeno. In particolare, gli effetti sono distinti in frane, fratturazioni, liquefazioni, variazioni topografiche del livello del suolo e faglie superficiali. Il catalogo costituisce un utile strumento per stime delle pericolosità dell'ambiente geologico riguardo alla sismicità e al rischio, inteso come ripercussioni sull'ambiente antropico.

L'operazione d'estrazione dal catalogo dei dati relativi alla Pianura Padana ha preso in considerazione gli effetti di liquefazione, variazione topografica, fratturazione. Con il termine *liquefazione* s'intendono fenomeni d'espulsione d'acqua e sabbia secondo emissioni fissurali o puntuali con formazione di caratteristici vulcanelli di sabbia; con *variazione topografica* sono indicati i cedimenti, i collassi, i basculamenti e la subsidenza. In seguito allo scuotimento sismico si producono assestamenti che, per orizzonti prossimi alla superficie ed in terreni prevalentemente incoerenti in condizioni non sature, determinano modesti cedimenti del suolo ed apertura di limitate fessure. Infine con il termine *fratture* s'intendono fessure e discontinuità del suolo, la cui lunghezza può variare da qualche decina di metri fino a qualche km, sede o meno di fuoriuscite di vapori o gas. Tale effetto si riscontra prevalentemente nei depositi incoerenti superficiali, come i depositi alluvionali. Spesso fratturazione e franosità rappresentano due aspetti dello stesso fenomeno.

Dei 108 casi storici registrati per l'area padana, il 59% è rappresentato da fenomeni di liquefazione, il 29% da fratture ed infine, il 12% da variazioni topografiche.

La distribuzione spaziale degli effetti deformativi al suolo è stata sovrapposta alla carta delle massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani (fig. 14.1): sebbene la maggior parte degli eventi ricada fuori dei limiti geografici della pianura, è in ogni caso evidente una buona correlazione con le aree a più elevata sismicità e, congiuntamente, con le strutture profonde presenti. Infine, correlando gli effetti deformativi, suddivisi nelle diverse tipologie, con l'intensità al sito, si può osservare come i fenomeni di fratturazione siano presenti già con il V° M.C.S., mentre le variazioni topografiche e le liquefazioni richiedano soglie d'innescio più elevate, superiori al VII°.

14.3 Subsidenza

14.3.1 Subsidenza naturale

La Pianura Padana, come già anticipato nel Capitolo 13, è interessata sia da una subsidenza di tipo regionale sia da movimenti localizzati di abbassamento causati dalle attività umane. Può essere interessante confrontare la velocità di subsidenza naturale con quella di origine antropica. La prima presenta andamenti variabili, via via crescenti dai margini verso la parte centrale della pianura e da Ovest verso la fascia esterna, tra Venezia, il delta del Po e Ravenna, dove raggiunge valori di poco superiori a 1,25

lar, effects are distinguished into landslides, fractures, liquefaction, height variations, and superficial fault displacements. The catalogue is a useful instrument for estimating the danger of the geological environment in terms of seismicity and hazard, understood as repercussions on the human environment.

While extracting data on the Po Plain from the catalogue, the authors of this chapter considered the effects of liquefaction, height changes, and fracturing. The term liquefaction is applied to phenomena of expulsion of water and sand through fissures or points, with the formation of characteristic sand volcanoes; height variations refer to settling, collapse, tilting and subsidence. Seismic shocks give rise to settling which, in shallow layers and mainly non-cohesive terrains in non-saturated conditions, causes small-scale soil settling and the opening of small cracks. Fracturing refers to cracks and discontinuities in the ground, varying in length from a few dozen metres to several kilometres, with the possible emission of vapours or gases. This effect is mainly observed in shallow granular deposits, such as alluvia. Fractures and landslides are often two aspects of the same phenomenon.

Of the 108 historical cases recorded in the Po Plain area, 59% gave rise to liquefaction phenomena, 29% to fractures, and 12% to height variations.

The maximum recorded macroseismic intensities are indicated on the map over the spatial distribution of soil deformation effects (fig. 14.1). Although most of these events occurred outside the geographic boundaries of the plain, all cases show good correlations with areas subject to higher seismicity and, jointly, with deep structures. Lastly, when deformational effects of various types are correlated with local seismic intensity, it may be observed that fracturing already occurs at grade V of the MCS, while height variations and liquefaction require a higher energy threshold, exceeding grade VII.

14.3 Subsidence

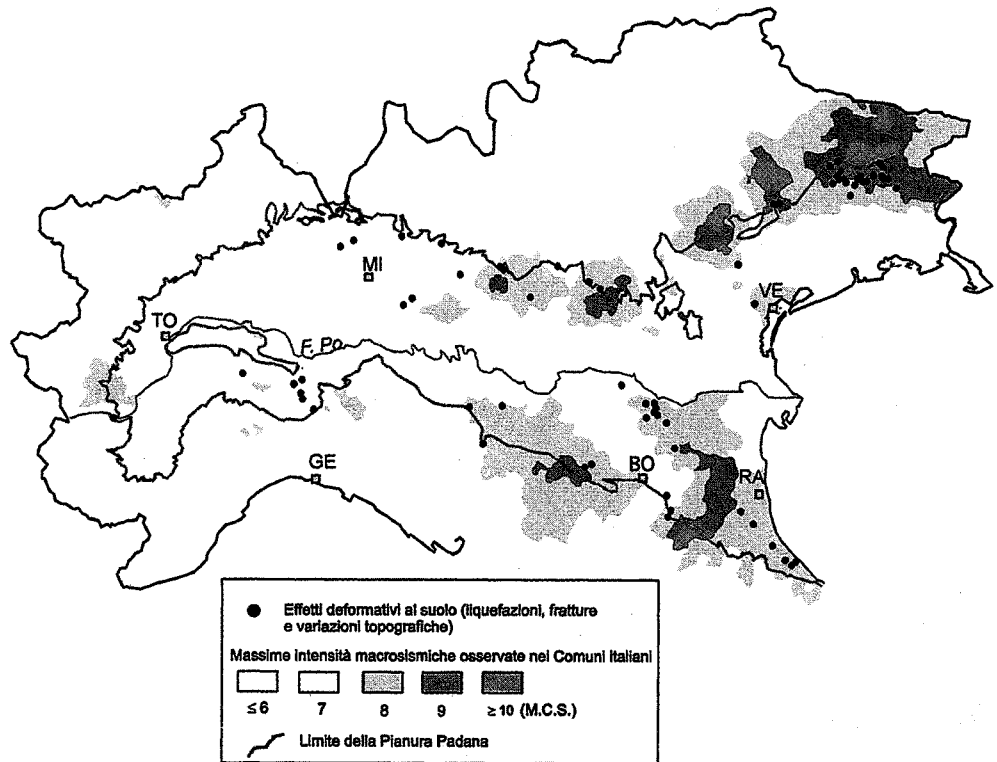
14.3.1 Natural subsidence

The Po Plain, as already noted in chapter 13, is involved in regional-scale subsidence caused by crustal movements, and in local-scale subsidence caused by human activities. It is interesting to compare natural and anthropic subsidence rates: the former vary from area to area, increasing from the border towards the centre of the plain and from the West to the external belt, between Venice, the Po Delta and Ravenna, where it peaks at slightly more than 1.25 mm/year. This rate is calculated on the basis of the thickness of Quaternary sediments: we therefore refer to a subsidence-sedimentation rate, which is a mean value of the whole Quaternary (1.8 Ma).

Other data on natural subsidence may be derived from analysis of sediments of shorter time-span. In the outer, more subsiding belt, between Cervia and Porto Corsini, subsidence and eustatic rise, following the peak of Flandrian transgression, have values ranging from 2.0 to 3.2 mm/

FIG. 14.1 - Intensità macrosismiche e deformazioni superficiali indotte dai terremoti nell'ultimo millennio nella Pianura Padana (dai dati del catalogo C.E.D.I.T. del Servizio Sismico Nazionale: Romeo & Delfino, 1997).

FIG. 14.1 - *Macroseismic intensities and shallow ground deformations caused by earthquakes in Po Plain over last 1000 years (data from C.E.D.I.T. Catalogue of Italian Seismic Service: Romeo & Delfino, 1997).*



mm/anno: questa velocità è stimata sulla base dello spessore dei sedimenti e rappresenta un valore medio sull'intera durata del Quaternario (1,8 Ma).

Altri dati sulla subsidenza naturale possono essere tratti dallo studio di depositi relativi a intervalli temporali più ridotti. Nella fascia esterna più subsidente, tra Cervia e Porto Corsini, la subsidenza e la risalita eustatica, successive all'acme della trasgressione flandriana, mostrano valori compresi tra 2 e 3,2 mm/anno (Bondesan & alii, 1995a). Altri valori, ricavati da datazioni di torbe della Laguna di Venezia, indicano tassi di sedimentazione di circa 3 mm/anno (Bonatti, 1968). Ricerche relative a depositi lagunari della zona di Ravenna (Valle Staudiana), datati a 900-1800 anni B.P., indicano valori di sollevamento relativo del livello del mare, e quindi subsidenza sommata alla risalita eustatica, variabili tra 1,2 e 2,3 mm/anno (Brunetti & alii, 1998). Per la zona del delta e per l'ultimo secolo, altri Autori riportano valori di subsidenza superiori a 4 mm/anno (Gambolati & Teatini, 1998), ma l'intervallo per il quale è stata calcolata la subsidenza comprende parte del periodo in cui inizia a risentirsi l'influenza dell'attività antropica.

Complessivamente quindi la subsidenza naturale olocenica e «recente» (escluso l'ultimo cinquantennio) ha valori confrontabili con quelli medi stimati sull'intero Quaternario, o comunque dello stesso ordine di grandezza; quando risultano maggiori, ciò è imputabile all'incompleto costipamento dei depositi olocenici, recenti e non sottoposti ad elevati carichi litostatici.

year (Bondesan & alii, 1995a). Other values, taken from peat dating in the Lagoon of Venice, yield rates of about 3 mm/year (Bonatti, 1968).

Researches on lagoonal deposits in Valle Staudiana, near Ravenna, dated at 900-1800 years B.P., give values of relative sea level rise (i.e., subsidence plus eustatic rise) between 1.2 and 2.3 mm/year (Brunetti & alii, 1998). For the delta area and for the last century, other authors (Gambolati & Teatini, 1998) report higher values (> 4 mm/year), but the time interval used to calculate subsidence includes part of the period affected by anthropic activities.

The Holocene and «recent» subsidence rate (excluding the last 50 years) may thus be compared with that calculated for the entire Quaternary, or it is of the same order of magnitude; when higher, it is due to incomplete compaction of Holocene sediment, young and not yet subjected to high lithostatic pressure.

14.3.2 Groundwaters and subsidence

Subsidence rates in recent decades are one or two orders of magnitude higher than those of natural subsidence, and show a wide range of local variations, as shown in the inset, scale 1:500,000 of the Map of Relief. Soil sinking is known to be linked to water withdrawal, extraction of shallow methane-bearing waters and, to a lesser extent, exploitation of hydrocarbon deposits in deep reservoirs.

Areas subject to high artificial subsidence are mainly concentrated around large towns and industrial areas.

14.3.2 Acque sotterranee e subsidenza

Le velocità di subsidenza negli ultimi decenni presentano valori di uno-due ordini di grandezza superiori a quelli della subsidenza naturale; presentano inoltre variazioni locali molto articolate, con valori variabili nel tempo, come è presentato nel riquadro a scala 1/500.000 della *Carta Altimetrica*.

Gli abbassamenti del suolo sono, come è noto, legati all'emungimento delle falde sotterranee, all'estrazione di acque metanifere superficiali e, in misura più contenuta, di idrocarburi in *reservoirs* profondi.

Le zone affette da elevata subsidenza artificiale sono per lo più concentrate attorno ai grandi insediamenti urbani e industriali. Sono colpite non solo le fasce esterne a quote più basse e le zone costiere, caratterizzate da depositi alluvionali fini a maggiore compressibilità, ma anche l'alta pianura in corrispondenza degli apparati di conoide a sedimentazione più grossolana.

È noto il caso di Venezia, dove si sono avuti effetti di consolidazione per pompaggio di acque particolarmente intensi tra l'inizio del secolo e il 1975: tra il 1955 e il 1969 sono stati registrati abbassamenti di 14 cm a Marghera e 10 cm a Venezia (Carbognin & alii, 1976). Nell'area metropolitana milanese nel periodo 1950-1972 si sono registrati abbassamenti significativi con punte superiori ai 20 cm nei pressi del Duomo di Milano. Nel Bolognese, nel periodo 1950-1990, si sono avute depressioni del livello piezometrico di oltre 80 m (Idroser, 1989) e abbassamenti del suolo, tuttora in atto, fino ad oltre 2 m. La città di Modena è soggetta a subsidenza in seguito all'abbassamento della falda, con valori massimi di quasi 1 m tra il 1950 e il 1985. Forti depressioni delle superfici piezometriche di acquiferi artesiani, legati ad emungimenti superiori alle possibilità di ricarica delle falde stesse, si sono verificati nell'entroterra veneziano, nel Ravennate, nella zona industriale di Ferrara, nei dintorni di Cento (Bondesan & alii, 1986) ecc.

Nella parte orientale della provincia di Rovigo e in quella nord-orientale di quella di Ferrara, fra il 1938 e il 1963, l'intenso emungimento di acque metanifere dai depositi deltizi superficiali ha provocato abbassamenti fino a 3 m (Puppo, 1957; Caputo & alii, 1970; Colombo, 1973; Borgia & alii, 1982; Elmi, 1984). Si consideri che l'abbassamento della superficie piezometrica di circa 1 m produce un incremento delle pressioni efficaci pari a 10 kPa; quest'incremento interessa ovviamente i terreni superficiali meno addensati e pertanto può produrre consolidazione, cioè riduzione di volume e quindi di quota, che mediamente varia dal 5 al 10% (ossia 5-10 cm di subsidenza per ogni m d'abbassamento della superficie piezometrica), ma che per terreni fini organici può giungere fino al 30%.

Nelle stesse zone, depressioni permanenti della falda idrica, dovute alla bonifica e al drenaggio forzato, hanno prodotto il costipamento dei sedimenti, sia per la riduzione delle pressioni neutre, sia per l'ossidazione delle torbe. Le nuove bonifiche per recuperare il franco di coltivazione hanno ovviamente provocato nuovi abbassamenti del suolo. Una volta esaurita questa rincorsa fra il livello del

Lower, more distant parts and coasts, characterized by fine, more compressible, alluvial deposits, are not the only areas to be affected; the high plains fans with coarser sediments are also subject to this phenomenon.

One well-known case is that of Venice, where consolidation due to water withdrawal between the early 20th century and 1975 was particularly intense: between 1955 and 1969, sinking of 14 cm at Marghera and 10 cm in Venice was recorded (Carbognin & alii, 1976). Significant lowering occurred between 1950 and 1972 in the metropolitan area of Milan, with peaks exceeding 20 cm near the Cathedral. Near Bologna, in the period 1950-1990, hydraulic head decreases of more than 80 m were recorded, together with soil lowering, still active, of more than 2 m. The city of Modena was subject to subsidence as a consequence of water-table lowering, with a peak value of almost 1 m between 1950 and 1985. Considerable depression in the hydraulic head of artesian aquifers, due to pumping exceeding recharge capacity, occurred in the Venetian hinterland, around Ravenna, in the industrial zone of Ferrara, near Cento (Bondesan & alii, 1986), etc.

Between 1938 and 1963, the eastern part of the province of Rovigo and the north-eastern part of the province of Ferrara, intensive extraction of methane-bearing waters from shallow deltaic deposits caused lowering of up to 3 m (Puppo, 1957; Caputo & alii, 1970; Colombo, 1973; Borgia & alii, 1982; Elmi, 1984). A reduction in the hydraulic head of about 1 m produces an increase in effective pressure of 10 kPa (0.1 kg/cm²). This increase obviously involves less compacted shallow terrains and may thus lead to consolidation, i.e. a reduction in volume and therefore in altitude, varying on average between 5% and 10% (or 5-10 cm of subsidence for every metre of reduction in hydraulic head); however, for fine organic soils, the value may reach 30%.

In the same areas along the coastal and deltaic plain, permanent depressions in the water-table following reclamation and forced drainage produced sediment compaction, due both to reduced neutral pressures and oxidation of peat. New reclamation operations aimed at reducing water-table level at the proper depth for crops led to further soil lowering. Once this process was exhausted, reductions in topographic level were recorded, up to 2 m and more. Subsidence has altered the chemistry of groundwater, mainly phreatic, due to variations in the altitude of the fresh/salt water interface, often linked with forced drainage.

The withdrawal of thermal waters also caused soil lowering. In the Euganean thermal district, sinking rates of more than 20 mm/year have been recorded: subsidence occurs entirely in the shallower layers and is independent of the thickness of incoherent materials resting on solid bedrock (Brighenti, 1991).

14.3.3 Subsidence and hydrocarbon extraction

As may be deduced from the previous statements, the most important cause of artificial subsidence is water withdrawal from shallow levels, not exceeding 300-400 m in

terreno e della falda, si sono dovuti registrare riduzioni di quota topografica fino a 2 m e oltre. La subsidenza ha prodotto l'alterazione del chimismo delle acque sotterranee, prevalentemente freatiche, dovuta a variazioni di quota dell'interfaccia acque dolci-salate, spesso collegate al drenaggio forzato.

Anche l'estrazione di acque termali produce effetti di abbassamento: nel distretto termale euganeo sono segnalati abbassamenti sensibili del terreno e velocità superiori ai 20 mm/a: la subsidenza si produce interamente negli strati più superficiali e risulta indipendente dallo spessore dei materiali sciolti poggianti sul substrato indeformabile (Brighenti, 1991).

14.3.3 Subsidenza ed estrazione di idrocarburi

Come risulta dai dati e dalle considerazioni precedenti, il contributo più rilevante alla subsidenza artificiale deriva dal pompaggio di acqua dai livelli più superficiali, fino a 300-400 m di profondità, che presentano un più basso grado di consolidazione e quindi la maggiore compressibilità.

L'estrazione di fluidi (idrocarburi gassosi e liquidi) da livelli più profondi porta ad analoghe conseguenze, ovviamente in termini progressivamente più ridotti con l'aumentare della profondità, e quindi del grado di consolidazione delle rocce-serbatoio.

L'area padana interessata da giacimenti ha dimensioni notevoli (50.000 km²) e grande complessità geologica e strutturale, cui corrisponde una notevole varietà nei giacimenti. Le riserve finora scoperte, principalmente gas, ma anche olio, ne fanno una delle più importanti province petrolifere del Mediterraneo.

I giacimenti padani possono essere distinti in tre gruppi, ossia giacimenti pleistocenici, giacimenti misti in *reservoirs* terziari, cui appartiene la maggior parte dei campi scoperti dal 1940 in poi, e giacimenti posti in *reservoirs* carbonatici mesozoici.

Giacimenti pleistocenici

Sono formati in prevalenza da metano in emulsione con acque dolci e salate entro sedimenti continentali (alluvionali, palustri, lagunari e litorali) o deltizio-marini di mare basso. Sono presenti nelle zone del margine orientale della pianura a più elevato tasso di sedimentazione quaternaria.

Nel territorio compreso tra i tratti terminali del Po e dell'Adige (Polesine centro-orientale) sono stati coltivati cinque orizzonti produttivi tra 100 e 600 m di profondità. Per quest'area sono disponibili misure topografiche della subsidenza in un periodo che va dal 1884 al 1988 (tab. 14.1).

Dai dati si ricava che già per il periodo anteriore al 1950 i valori di subsidenza annua (4,6-5,1 mm/a), sono sensibilmente più elevati di quelli naturali, ricavati dai dati geologici. La differenza è probabilmente dovuta alle bonifiche e forse, in parte, all'estrazione d'acque metanifere, iniziata già prima degli anni '40.

depth, which are less consolidated and therefore more compressible.

Extraction of fluids (gas and oil) from deeper levels has similar consequences, obviously progressively less with increasing depth and thus of the degree of consolidation of the reservoir rocks.

The part of the Po Plain with hydrocarbon fields (50,000 km²) is of great geological and structural complexity, so that its oil and gas traps are correspondingly varied. Known reserves, mainly of gas but also oil, make it one of the most important oil-bearing provinces of the Mediterranean.

The Po Plain fields are distinguished into three groups: Pleistocene; mixed Tertiary, including most of the reservoirs discovered from 1940 onwards; and Mesozoic carbonatic.

Pleistocene fields

These mainly bear methane in emulsion with fresh and salt waters in continental (alluvial, marshy, lagoonal and littoral), deltaic or shallow marine sediments. They occur in the more external areas with greater Quaternary sedimentation rate.

In the area between the Adige and Po deltas (Polesine), five productive layers between 100 and 600 m in depth were exploited. Topographic measurements on subsidence between 1884 and 1988 are available (tab. 14.1).

The above data show that, already before 1950, the annual subsidence rate (4.6-5.1 mm/year) was much higher than the natural rate, given by geological data. The difference is probably due to reclamation works and perhaps also partly to gas extraction which had already begun before the 1940s.

TABELLA 14.1 - Subsidenza totale e annuale nel delta del Po. Periodo 1956-60: estrazione d'acque metanifere prima della parziale sospensione (1960). 1956/1961, periodo d'estrazione sino alla sospensione totale. 1961/63: dopo la totale sospensione degli emungimenti.

TABLE 14.1 - Total and annual subsidence in Po Delta, 1956-60: extraction of methane-bearing waters before partial suspension (1960). 1956-61: period of extraction until total suspension. 1961-63 after total suspension.

Anni	Adria		Ariano Polesine	
	subsidenza mm	Velocità mm/a	subsidenza mm	velocità mm/a
1884/1950 ⁽¹⁾	330	5,1	300	4,6
1956/1960 ⁽²⁾	450	159,1	440	155
1956/1961 ⁽²⁾	640	145,0	605	136
1956/1963 ⁽²⁾	698	116,0	689	102
1961/1963 ⁽²⁾	115	47	95	39
1956/1970 ⁽³⁾	840	60	1008	72
1970/1988 ⁽¹⁾	108	6	216	12

⁽¹⁾ Borgia & alii (1982).

⁽²⁾ Dati inediti Genio Civile, in Elmi (1984).

⁽³⁾ da MURST, Carta altimetrica e dei movimenti verticali del suolo della Pianura Padana, 1997.

⁽¹⁾ Borgia & alii (1982).

⁽²⁾ Unpublished data from Genio Civile, in Elmi (1984).

⁽³⁾ From MURST, Map of relief and vertical movements of Po Plain, 1997.

La più alta velocità d'affondamento, fino a 75 volte più elevata dei valori naturali, coincide con il periodo di massimo sfruttamento delle acque metanifere (1956-1960), durante il quale si è avuto un abbassamento della superficie piezometrica di oltre 40 m (Colombo, 1973). Gli effetti di rapida subsidenza, che s'erano immediatamente manifestati, avevano imposto nel 1960 una sospensione parziale delle estrazioni; già dopo un solo anno, la velocità si era ridotta del 10-12%. Dopo la sospensione totale del pompaggio delle acque metanifere ('61-63), la subsidenza era calata a valori prossimi a quelli anteriori al 1950.

Sulla base dei dati precedenti si è tentato di stimare e confrontare il contributo relativo delle diverse cause della subsidenza (ossia geologica, bonifiche e consolidazione da emungimento di fluidi) sommato a quella parte dell'innalzamento relativo del livello del mare che dipende dall'eustatismo, qui immaginato costante nell'ultimo millennio. I risultati sono riportati nella fig. 14.2.

Giacimenti terziari

I giacimenti terziari, a gas e subordinatamente a olio, sono contenuti per la maggior parte entro anticlinali delle pieghe pedeappenniniche e, nella fascia pedalpina, in trappole di tipo stratigrafico, entro ghiaie e sabbie «basali».

Il primo giacimento identificato nella Pianura Padana è il campo di Caviaga, 40 km a SE di Milano. È formato da un gruppo di 46 pozzi produttivi; il reservoir è a profondità di 1.300 m circa e ha uno spessore massimo di 300 m. La trappola fa parte di un allineamento E-W di anticlinali, tra cui quella di Soresina) (v. sezione B-B' della Carta Geomorfologica, foglio 2).

The higher subsidence rate, up to 75 times the natural one, coincides with the maximum exploitation of methane (1956-60), during which the piezometric level sank by more than 40 m (Colombo, 1973). The effects of rapid subsidence, immediately apparent, had led to partial suspension of pumping in 1960, and already only one year later the rate was 10-12% less. After extraction of gas-bearing waters was totally stopped (1961-63), subsidence fell to values similar to those before 1950.

On the basis of these data, an attempt was made to estimate and compare the relative contributions of the several causes of subsidence (i.e. geology, reclamation works, and consolidation due to fluid extraction), added to the eustatic sea level rise, presumed here to be constant over the last thousand years. The results are shown in fig. 14.2.

Tertiary fields

Tertiary deposits, with gas and to a lesser extent oil, are mainly contained within anticlinals of the pede-Appennine folds and, in the pede-Alpine belt, in stratigraphic traps in basal conglomerate and sand.

The first field identified by a seismic reflection survey (1944) was at Caviaga, 40 km South-East of Milano, composed of 46 productive wells. The reservoir rock lies at a depth of about 1,300 m and is at most 300 m thick. This trap forms part of an East-West alignment which includes the anticline of Soresina (see Geomorphological Map, sheet 2, section B-B').

The Ravenna field, discovered in 1952, with more than 30 productive wells, includes seven pools at depths between about 1,250 and 1,960 m, in an anticlinal trap belonging to the arc of the Ferrara and Adriatic folds. These structures

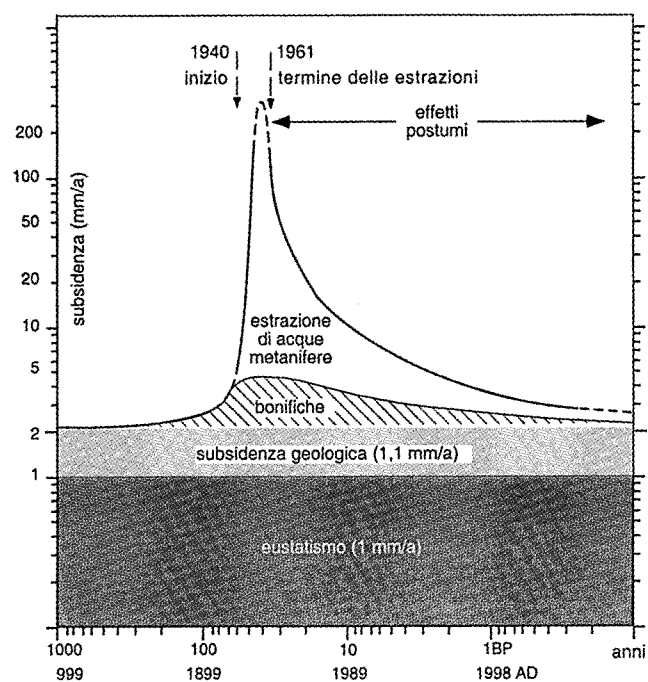


FIG. 14.2 - Subsidenza nella zona del Delta del Po dal 1884 al 1988 (per rappresentare efficacemente valori così diversi, velocità e tempi sono espressi in scala logaritmica) (da Elmi, 1984, ridis.).

FIG. 14.2 - Subsidence in Po Delta area, 1884-1988 (rates and times expressed in logarithmic scale) (from Elmi, 1984, redrawn).

Il campo di Ravenna, con oltre 30 pozzi produttivi, comprende sette *pools* a profondità tra 1.250 e 1.960 m circa, in una trappola ad anticlinale appartenente all'arco delle pieghe ferraresi e adriatiche. In queste strutture è posto anche il campo di Selva e Minerbio, che contiene gas metano con tracce di idrocarburi superiori.

Il campo di Sergnano, presso Crema, ha 11 pozzi produttivi, in ghiaie e sabbie continentali coperte da argille e marne del Pliocene inferiore. La tavola d'acqua è posta a profondità di oltre 1.300 m.

Il campo di Settala, a E di Milano, è contenuto entro sabbie del Pliocene medio-superiore, coperte da argille della stessa età. La trappola, di tipo stratigrafico, è legata alla terminazione dei livelli sabbiosi della successione pliocenica trasgressiva sulla superficie morfologica pre-pliocenica.

Lo sfruttamento di questi giacimenti, posti in terreni sciolti e a profondità non elevate, ha certamente avuto effetti sulla subsidenza. Gli effetti hanno assunto una certa gravità solo nel caso di Ravenna dove si sono sommati gli abbassamenti causati dall'estrazione del metano a quelli, più cospicui, causati dal pompaggio di acque per uso agricolo, industriale e idropotabile; qui i rischi ambientali sono esasperati dalla bassa elevazione del terreno e dalla vicinanza al mare. Nel campo di Ravenna, la produzione di idrocarburi, iniziata nel 1955 e praticamente ultimata nel 1980, ha portato ad una riduzione della pressione di giacimento di circa 10 MPa, e la subsidenza indotta è stata valutata in circa 6 cm pari all'8% della subsidenza artificiale totale (Brighenti & alii, 1995).

Giacimenti mesozoici

La ricerca d'idrocarburi in *reservoirs* delle successioni sedimentarie carbonatiche mesozoiche del sottosuolo della Pianura Padana si è sviluppata in sostanza a partire dagli anni '70, per il perfezionamento sia delle metodologie e delle attrezzature per la prospezione sismica, sia dello studio dei modelli geologici, sia infine dell'evoluzione delle tecnologie di perforazione.

Nella zona lombarda hanno caratteristiche di rocce madri la formazione dei Calcari di Meride (Ladinico) e quella delle Argilliti di Riva di Solto (Retico). Da queste rocce madri, nell'ambito del Sudalpino esterno e dell'avampaese presenti nel sottosuolo padano, hanno origine l'olio, il gas e i condensati dei *reservoir* dolomitici del Triassico medio (Gaggiano, Villafortuna) e superiore (Malossa, Trecate).

I *reservoirs* sono in genere a profondità elevate.

Il giacimento di Cavone (Modena) è a circa 3.000 m di profondità entro calcari d'età dal Lias al Cretaceo inferiore (v. sezione D-D' della *Carta Geomorfologica*). Il *reservoir* di Malossa, presso Treviglio (Bergamo), è dato da dolomie triassico-liassiche: la tavola d'acqua è a oltre 5.800 m di profondità. La pressione di giacimento è il doppio di quella idrostatica (giacimento geopressurizzato).

I giacimenti di Gaggiano, Villafortuna, Trecate, tra Milano e Novara, scoperti rispettivamente nel 1982, 1984, 1987, sono a profondità comprese tra 4.600 e 6.200 m.

also contain the Selva and Minerbio pool, holding methane gas with traces of light hydrocarbons.

The Sergnano field, near Crema, discovered in 1954, has 11 productive wells, in continental gravels and sands covered by Lower Pliocene clays and marls. The water-table is at a depth of more than 1,300 m.

The Settala field, east of Milan, discovered in 1977, lies between Middle-Upper Pliocene sand covered by clay of the same age. The trap, of stratigraphic type, is linked to the termination of the sandy layers of the Pliocene succession which is transgressive on the pre-Pliocene morphological surface.

Exploitation of these deposits, lying in relatively shallow incoherent sediments, certainly affected subsidence rates. The effects were serious only in the case of Ravenna, where lowering caused by methane extraction was added to the more conspicuous effects of water pumping for agricultural, industrial and domestic purposes: here, the environmental hazard was worsened by the low altitude of the terrain and by the vicinity of the sea. In the Ravenna field, the production of hydrocarbons, begun in 1955 and practically terminated in 1980, led to a reduction in reservoir pressure of about 10 MPa, and the resulting subsidence was estimated to be about 6 cm, or 8% of total artificial subsidence (Brighenti & alii, 1995).

Mesozoic fields

The search for hydrocarbons in reservoirs of Mesozoic carbonatic sediments in the Po Plain mainly developed from the 1970s onwards, due to improved methods and equipment for seismic prospecting, study of geological models, and the development of drilling technologies.

In Lombardy, source rocks are the formations of Meride Limestones (Ladinian) and Riva di Solto Argillite (Rhaetic). Within the outer Sudalpino and the foreland, these rocks give rise to the oil, gas and condensates of the dolomitic reservoirs of the Middle (Gaggiano, Villafortuna) and Upper Triassic (Malossa, Trecate).

The traps are generally very deep.

The Cavone (Modena) deposit lies at a depth of about 3,000 m in Liassic to Lower Cretaceous limestone (see Geomorphological Map, section D-D'). The Malossa reservoir, near Treviglio (Bergamo) derives from Triassic-Liassic dolomite; the water-table is more than 5,800 m deep. The fluid pressure is twice the hydrostatic pressure (geopressurized deposit). Gaggiano, Villafortuna and Trecate (between Milan and Novara), discovered respectively in 1982, 1984 and 1987, lie at depths between 4,600 and 6,200 m. In all these Mesozoic fields, contained within very hard fractured rocks, extraction has had practically no effects on subsidence.

14.3.4 The environmental impact of subsidence

In the Po Plain, subsidence movements have exerted and continue to exert a considerable environmental impact.

Man's attempts at combating floods, by preventing further sedimentation outside riverbeds, have meant that compensation by natural subsidence has been hindered. But it is

Per tutti questi giacimenti mesozoici, contenuti entro rocce fratturate a elevata rigidità, la coltivazione ha effetti praticamente nulli sulla subsidenza.

14.3.4 L'impatto ambientale della subsidenza

Nella Pianura Padana i movimenti di subsidenza hanno esercitato e continuano ad esercitare un impatto ambientale notevole.

L'attività dell'uomo volta a contrastare le esondazioni fluviali, escludendo ulteriori sedimentazioni esterne agli alvei, ha impedito la compensazione della subsidenza naturale, ma soprattutto alla subsidenza artificiale va imputato l'attuale assetto altimetrico della fascia orientale della Pianura Padana, ove un'area di ben 2.400 km² è al di sotto del livello medio del mare; a questo stesso fenomeno si debbono inoltre le quote particolarmente basse che attualmente caratterizzano la parte centrale del Delta del Po, il cui punto più basso raggiunge la quota di -5 m.

La subsidenza inoltre ha prodotto e produce notevoli danni, soprattutto perché ostacola il deflusso delle acque superficiali, modificando il profilo longitudinale degli alvei, alterando le pendenze nei canali di scolo e modificando i dislivelli che gli impianti idrovori debbono vincere per avviare verso mare le acque di scolo; ostacola inoltre la distribuzione delle acque di irrigazione e determina un innalzamento relativo della falda freatica.

Nella parte orientale della pianura questi problemi sono evidentemente aggravati dal fenomeno, esteso a tutto il pianeta, dell'innalzamento del livello del mare (Pirazzoli, 1994), nonché dalla crisi del trasporto solido fluviale intervenuto negli ultimi 40 anni, che comporta una minore alimentazione delle spiagge e una maggiore attività erosiva nei fiumi, con un generale aumento della profondità degli alvei. Il sommarsi di questi fenomeni sta producendo una maggior risalita del «cuneo salino» nei fiumi e l'infiltrazione di acque marine nelle falde acquifere.

La subsidenza, oltre a produrre modificazioni della rete idrografica, ha effetti sulla linea di riva (Carbognin & alii, 1984) con aumento della pericolosità delle mareggiate (Ersa, 1978; Montori, 1983; Bondesan & alii, 1995a) ed erosione generalizzata delle spiagge, anche se questa è molto più sensibile alle variazioni degli apporti fluviali (v. par. 14.4).

Nelle aree costruite, la subsidenza e le sue variazioni locali legate all'eterogeneità dei depositi hanno effetti sugli edifici e sulle infrastrutture (reti idriche sotterranee e superficiali, opere di bonifica nella bassa pianura). Lesioni, distorsioni e rotazioni sono rilevabili su edifici, pavimentazioni e manufatti, in particolare su quelli di più antica costruzione. L'abbassamento infine può portare la falda freatica, generalmente non sfruttata, a interessare i piani interrati degli edifici, come nel caso della cripta della basilica di S. Francesco a Ravenna.

Si esamina ora un caso specifico, per descrivere l'evoluzione dei fenomeni. Nella zona attorno a Bologna, il prelievo idrico ha interessato e interessa un acquifero multistrato, formato da livelli grossolani ghiaioso-sabbiosi di conoide, separati da aquitardi limo-argillosi, di spessore cre-

mainly artificial subsidence which has given rise to the present-day altimetric situation of the eastern belt of the Po Plain, where an area covering as much as 2,400 km² lies under mean sea level. The same phenomenon causes the particularly depressed altitudes now characterizing the central area of the Po Delta, the lowest point of which reaches -5 m.

Subsidence has also produced and still produces considerable damage, mainly because it hinders surface run-off, changing the longitudinal profile of riverbeds, altering gradients even in drainage channels, and modifying those changes in level which pumping equipment is obliged to overcome in order to send drainage waters towards the sea. In addition, subsidence hinders the distribution of irrigation water and causes a relative rise in the watertable.

In the eastern part of the plain, these problems are clearly aggravated by the phenomenon, now affecting the entire planet, of sea level rise (Pirazzoli, 1994), in addition to the crisis in sediment load which has taken place over the last 40 years, involving beach impoverishment and greater erosion in rivers, with a general increase in riverbed depths. All these phenomena, together, are now producing an increase in the saltwater «wedge» in rivers and saltwater encroachment in fresh groundwaters.

As well as causing changes in the water network, subsidence has effects on the position of the coastline (Carbognin & alii, 1984), with more dangerous high tides (Ersa, 1978; Montori, 1983; Bondesan & alii, 1995a) and generalized beach erosion, although the latter is much more sensitive to variations in river supplies (see section 4). In built-up areas, subsidence and local variations due to the heterogeneity of the deposits have effects on buildings and infrastructures (underground and surface water networks, reclamation works in low-lying parts of the plain). Cracking, distorsion and rotation may be observed in buildings, road surfaces and other artifacts, particularly if old. Lastly, subsidence may cause the water-table, generally not exploited, to invade parts of buildings lying under ground level, as in the case of the crypt in the Basilica of St Francis at Ravenna.

A specific case is now examined, in order to describe how these phenomena develop. Around Bologna, water has been and still is extracted from a multilevel aquifer composed of coarse gravelly-sandy fan layers separated by silt-clayey aquitards, the thickness of which increases with distance from the fan apexes. The areas of greatest subsidence do not correspond to the points of maximum water extraction but to the inter-fan belts or outer fan margins, where more compressible fine soils prevail. The lowering measured between 1943 and 1990 reached almost 3 m, with rates of 160 mm/year (see diagram in Map of relief and vertical movements, sheet 2, Linea 6).

The response of the soil to variations in extraction is shown in fig. 14.3. The most significant elements are, on one hand, the immediate and proportional response between water-table depression and subsidence and, on the other, the fact that such subsidence does not cease if pumping is interrupted and the piezometric level is restored; on the contrary, effects may be prolonged. Moreover, the resulting lowering must be considered irreversible.

scente con la distanza dagli apici conoidali. Le zone a maggior subsidenza non corrispondono ai punti di massimo emungimento ma alle fasce interconoidali o ai margini esterni dei conoidi, dove prevalgono i terreni fini a più elevata compressibilità. Gli abbassamenti misurati nel periodo 1943-1990 raggiungono la punta massima di quasi 3 m e velocità di 160 mm/a (v. diagramma nella *Carta altimetrica e dei movimenti verticali del suolo*, foglio 2, Linea 6).

La risposta del terreno alle variazioni dei prelievi in questa zona è riassunta nella fig. 14.3. Gli elementi più indicativi che si ricavano dal grafico sono, da un lato, la risposta immediata e proporzionale tra depressione delle falde e subsidenza, e dall'altro il fatto che interrompendo il pompaggio e ripristinando il livello piezometrico, la subsidenza non cessa ma si hanno effetti postumi anche prolungati. Inoltre l'abbassamento è da considerare irreversibile.

14.4 Modificazioni della costa

Le modificazioni recenti della linea di riva ed in particolare gli arretramenti registrati in lunghi tratti di litorale padano (C.N.R., 1985) sono, come è noto, effetto diretto e indiretto di diversi e concomitanti processi, ossia delle variazioni del trasporto solido dei fiumi (Dal Cin, 1983), della subsidenza naturale e artificiale e dell'innalzamento generale del livello marino, nonché degli interventi diretti sul sistema litorale (urbanizzazione, distruzione delle dune, opere di difesa a mare, opere portuali).

Sul trasporto solido dei corsi d'acqua, le variazioni dei fattori climatico-meteorologici nel recente cinquantennio

14.4 Coastline modifications

Recent changes in the coastline, particularly the retreat recorded over long stretches of beach in the Po Plain (C.N.R., 1985), are the well-known direct and indirect effects of several concomitant processes, i.e., variations in sediment load carried by rivers (Dal Cin, 1983), natural and artificial subsidence, and the general rise of the sea level, as well as direct operations on the littoral system (urban expansion, destruction of dunes, beach defences, port and dock works).

Changes in climatic and meteorological factors in the last 50 years have not had significant effects on solid transport by watercourses; the reduced quantity of sediments is mainly caused by anthropic activities: quarrying of sand and gravel from river beds, variations in river regime and discharge, hydraulic constructions (dams, controlled flood washland), reclamation works, and changed land use.

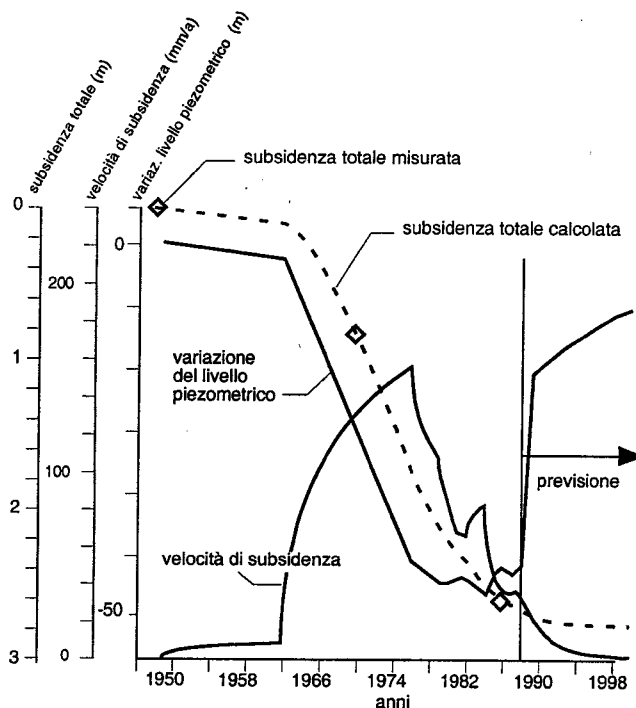
River-bed quarrying has long been indicated as one, if not the main, cause of the recent lowering of river-bed levels and consequently of littoral sediment deficiency. Some of the most obvious changes have occurred along the Apennine watercourses, due to the fact that, in this area, from near Pavia to Emilia-Romagna, sources of coarse material such as gravel and sand are very limited in extent and volume compared with those of the pede-Alpine areas, where quarrying is mainly carried out on large fans.

The following considerations (tab. 14.2) were made in order to make a correlation in quantitative terms between quarrying and beach budget balance.

In Italy, until 1950, the consumption of aggregate (gravel and sand from alluvial deposits, in or outside river-

FIG. 14.3 - Zona di Bologna Nord (tra i conoidi del F. Reno e del T. Savena): andamenti misurati, calcolati e previsti della subsidenza totale e della sua velocità, a confronto con la variazione del livello piezometrico (da Idroser, 1989, ridisegnato)

FIG. 14.3 - Area North of Bologna (between fans of rivers Reno and Savena): measured, calculated and predicted trends of total subsidence and rate, compared with variation in piezometric level (from Idroser, 1989, redrawn).



non hanno influenze significative; la riduzione dei sedimenti ha cause in gran parte d'origine antropica: l'estrazione d'inerti dagli alvei, la variazione dei regimi e delle portate, le costruzioni idrauliche (sbarramenti, casse d'espansione, bonifiche per colmata), le bonifiche montane, il mutamento nell'uso agricolo dei terreni.

Le cave in alveo sono da tempo indicate come una delle cause, se non la principale, dei recenti approfondimenti degli alvei e di conseguenza del deficit sedimentario litorale.

Lungo i corsi d'acqua appenninici si sono verificate alcune tra le maggiori modificazioni: ciò è dovuto al fatto che qui, dal Pavese alla Romagna, le risorse d'inerti grossolani come ghiaie e sabbie sono assai limitate, per estensione e volumi, rispetto alle aree pedemontane, dove le estrazioni attingono essenzialmente dai grandi conoidi.

Per tentare una correlazione in termini quantitativi tra le escavazioni e il deficit sedimentario delle spiagge si sono sviluppate le seguenti considerazioni (tab. 14.2).

Il consumo d'inerti (ghiaia e sabbia, provenienti da depositi alluvionali, in alveo o fuori alveo, pietrisco, proveniente da cave di monte) fino agli anni '50 era in Italia inferiore a 10 Mt/a (milioni di tonnellate/anno), ossia a 0,2 t/a pro capite. Successivamente il consumo è andato crescendo sino agli anni 1967/68, durante i quali si raggiunse un consumo complessivo di sabbia, ghiaia e pietrisco di circa 90 Mt. Non sono disponibili dati successivi, ma si può assumere come dato medio attuale un valore di 100 Mt/anno pari a un consumo annuo di circa 2 t pro capite sull'intero territorio nazionale. Di questi inerti, circa il 50% è formato da pietrisco, o roccia frantumata, derivante da cave di monte. Della restante frazione, ossia ghiaie e sabbie alluvionali, solo una parte è stata o è attualmente estratta dagli alvei: il valore stimato è di circa il 25% del totale. Quest'ultimo dato è il più incerto, in quanto mancano aggiornamenti al riguardo; la porzione tratta dagli alvei attivi si è in questo periodo, posteriormente al 1980, ormai molto ridotta (Idroser, 1994).

Secondo dati ufficiali, il volume di inerti estratti dal Po e dai suoi affluenti tra il 1958 e il 1981, periodo di massimo sviluppo delle estrazioni in alveo, è stato indicato in 138 Mm³ (200 Mt circa, pari a 8,7 Mt/a) (Dal Cin, 1983). Il dato è abbastanza vicino a quello ricavato per altra via in tab. 14.2. Le quantità effettivamente estratte sono probabilmente superiori, da 2,5 a 4 volte (Simeoni & Bondesan, 1997).

Gli apporti naturali del Po relativi al periodo 1918-1991, sono stati valutati in 6,2 Mm³/a (Idroser, 1994) di cui l'87% a granulometria > 0,13 mm. Ciò corrisponde a 5,4 Mm³/a, pari a circa 8,1 Mt/a.

Pertanto gli apporti medi del Po di materiali idonei al ripascimento delle spiagge sul periodo 1918-1991 sono stimabili in 8,1 Mt/a, mentre le estrazioni nel periodo di punta 1958-1981, come indicato in tab. 14.2, sono di poco superiori (8,7 Mt/a).

Tuttavia occorre mettere in bilancio il periodo pre 1958 in cui le estrazioni sono state di molto inferiori, e quello post 1981 nel quale le estrazioni si sono verosimilmente ridotte per effetto dei nuovi interventi normativi;

beds, rough stone from mountain quarries) was less than 10 Mt/year, or 0.2 tons/year per head. Later, the rate increased until 1967-68, during which the total consumption of sand, gravel and stone was about 90 Mt. Data for later years are not available, although a mean value of 100 Mt/year may be assumed, i.e., total current annual consumption of about 2 tons per head throughout Italy. Of this aggregate, about 50% is rough stone or broken rock from mountain quarries. The rest, i.e. alluvial gravel and sand, estimated at about 25% of the total, was or is still quarried from river beds. This last value is the most uncertain, since updated estimates are lacking; the quota taken from active river beds after 1980 has greatly fallen (Idroser, 1994).

According to official sources, the volume of aggregate extracted from the Po and its tributaries between 1958 and 1981, the period of maximum river-bed quarrying, is estimated to be 138 Mm³ (about 200 Mt, or 8.7 Mt/year) (Dal Cin, 1983), quite close to that obtained by another method (see tab. 14.2). The effective quantities are probably between 2.5 and 4 times greater (Simeoni & Bondesan, 1997).

The natural supplies of the Po for the period 1918-1991 have been estimated at 6.2 Mm³/year (Idroser, 1994), of which 87% had a grain size of more than 0.13 mm. This corresponds to 5.4 Mm³/year, or about 8.1 Mt/year. Thus, the mean supplies of the Po material suitable for beach enrichment between 1918 and 1991 may be estimated at 8.1 Mt/year, whereas quarrying in the peak period of 1958-1981, as shown in tab. 14.2, was slightly higher (8.7 Mt/year).

However, against this must be set the fact that, before 1958, quarrying was much less, and after 1981 it was probably further reduced owing to new legislation. In addition,

TABELLA 14.2 - Stima dei consumi di inerti nelle regioni padane (Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Veneto, Trentino-Alto Adige, Friuli, Emilia-Romagna).

TABLE 14.2 - Estimated consumption of aggregate sand and gravel in Po Plain regions (Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Veneto, Trentino-South Tyrol, Friuli, Emilia-Romagna).

Abitanti del Bacino Padano-Veneto <i>Population of Po-Veneto basin</i>	17,5 milioni di abitanti
Consumo medio annuo pro-capite d'inerti <i>Mean annual per capita consumption of gravel and sand</i>	2 t/anno
Totale consumo annuo inerti <i>Total annual consumption of gravel and sand</i>	35,0 Mt/a (megatonnellate)
Inerti provenienti da alvei (stima) <i>Estimated gravel and sand from river beds</i>	25%
Totale annuo inerti da alvei <i>Total annual gravel and sand from river beds</i>	35x0,25 = 8,75 Mt/anno

occorre inoltre precisare che il consumo *pro capite* indicato in tabella è il valore attuale, considerato come valore massimo. Si può pertanto concludere che i volumi complessivamente estratti in alveo negli ultimi 50 anni, anche considerando la discrepanza tra valori ufficiali e valori reali, sono inferiori al volume dei sedimenti utili trasportati e che l'estrazione in alveo non spiega da sola il fenomeno dell'arretramento dei litorali.

È evidente che gli apporti fluviali residui non sono in grado di compensare le altre perdite del sistema e che la crisi sedimentaria dei litorali ha anche altre cause.

Tra queste, la profonda mutazione dell'uso del suolo, intervenuta negli ultimi decenni, durante i quali si è assistito ad una progressiva e forte riduzione dei seminativi, soprattutto alle quote medie e alte, ed un simultaneo aumento dei boschi e dei pascoli: ciò ha comportato una parallela riduzione dell'erosibilità dei terreni e quindi del trasporto solido dei fiumi. Una prova indiretta di questa ipotesi è il processo inverso, ossia l'avanzata generalizzata delle spiagge adriatiche verificatasi tra il 1820 e la prima metà del presente secolo. Nei litorali ferraresi, ravennati e forlivesi, si registrarono in questo periodo avanzamenti da 200 a 300 m (Ciabatti & alii, 1979), in concomitanza con gli intensi mutamenti colturali, quali i disboscamenti della seconda metà dell'Ottocento e dei primi del Novecento e la «battaglia del grano» degli anni Trenta.

Un'altra importante causa della riduzione dei trasporti solidi, e quindi dell'erosione costiera, è costituita dalle opere idrauliche lungo i corsi d'acqua e tutti gli interventi di bonifica, sia di sistemazione dei versanti sia di controllo dei corsi d'acqua, come briglie, traverse, casse d'espansione ecc. Un esempio chiarificatore è quello della diga del T. Conca, opera di sbarramento costruita nel 1972 a circa due km dalla foce del fiume ad Ovest di Cattolica. Nell'invaso s'accumula quasi l'intero ammontare del deflusso torbido, pari a circa 330.000 t/anno, delle quali 60.000 t di sabbia e ghiaia: ne è derivato, negli otto anni immediatamente successivi alla costruzione, un arretramento del litorale d'oltre 3 m/anno e una perdita di spiaggia di 5.000 m²/anno, su un fronte di 1.600 m (Elmi & Rabbi, 1987). Il confronto con i dati precedenti mostra che il deficit annuo dovuto alla diga è superiore a quello medio stimato per le escavazioni su tutto il litorale padano.

Si può pertanto concludere, con le cautele derivanti dall'incertezza delle premesse, che le escavazioni in alveo corrispondono solo ad una frazione, sia pure rilevante, del trasporto di fondo, e che le opere idrauliche lungo gli alvei hanno effetti quantitativamente confrontabili con quelli delle escavazioni stesse.

Tra le cause degli arretramenti costieri sono da indicare infine i processi di subsidenza, naturale e soprattutto artificiale, esaminati e discussi nel precedente paragrafo. Le piane costiere hanno pendenze spesso inferiori all'1‰: un abbassamento di soli 10 cm, pari ad un secolo di subsidenza naturale o ad un anno di subsidenza antropica, può teoricamente produrre un arretramento di 100 m. La risposta non è immediata, in quanto l'arretramento della costa avviene inizialmente a carico dei rilievi dunosi costieri, ove

it must be noted that the per capita consumption shown in tab. 14.2 is the present-day value, considered to be maximum. To conclude, therefore, the overall volume from river beds in the last 50 years, even considering the discrepancy between official and true values, is lower than the volume of sediments effectively transported, and river-bed quarrying cannot, alone, explain the phenomenon of beach retreat. Clearly, residual fluvial supplies cannot compensate for other losses in the system, and the current critical beach impoverishment must also have other causes.

Of these, the profound change in land use which has occurred in recent decades, during which arable land has been progressively and severely reduced, mainly at medium and high altitudes, with simultaneous increases in woodland and pasture: this has led to a parallel reduction in soil erosion and thus of solid transport by rivers. Indirect proof of this is the inverse process, i.e., the generalized advance of the Adriatic beaches which took place between 1820 and the first half of the 20th century. Along the Ferrara, Ravenna and Forlì beaches, advances from 200 to 300 m took place during this period (Ciabatti & alii, 1979), together with considerable changes in farming practices, such as deforestation in the second half of the 19th century and early 20th century and Mussolini's «battle for wheat» during the 1930s.

Other important causes of reduced solid transport, and thus of coastal erosion, are hydraulic works along watercourses and all reclamation operations, involving both control of slope stability and control of riverbeds by mean of traverses, flood washland (casse di espansione) etc.

One clear example is the dam on the river Conca, built about 2 km from the river mouth in 1972. Almost the entire load, about 330,000 tons/year, of which 60,000 tons are composed of sand and gravel, accumulates in the reservoir. The result was that, in the eight years after building, the nearby beach retreated by more than 3 m/year, with a beach loss of 5,000 m²/year along a distance of 1,600 m (Elmi & Rabbi, 1987). Comparisons with the preceding data show that the annual deficit due to the presence of the dam was greater than the mean estimate for quarrying throughout the Po Plain littoral.

It may thus be concluded, although in a precautionary manner due to the uncertainty of basic assumptions, that river-bed quarrying only represents an admittedly relevant fraction of the total bedload, and that hydraulic works in river beds have effects which may be compared quantitatively with those of quarrying itself.

Lastly, other causes of coastline retreat are both natural and, above all, artificial subsidence, already examined and discussed in the preceding section. The mean gradient of these coastal plains is often less than 1‰, so that only 10 cm of lowering, equal to a century of natural subsidence or one year of anthropic subsidence, may theoretically produce a retreat of 100 m. The response is not immediate, since coastline retreat takes place initially at the expense of littoral dune ridges, if preserved, but other side-effects, such as a rise in the water-table, are immediately felt. A similar influence is the rise in sea level, hypothesized to

siano conservati, ma gli altri effetti collaterali, come l'innalzamento della falda, sono immediatamente risentiti. Analoga influenza ha l'innalzamento del livello marino, a causa del quale si sono ipotizzati arretramenti della costa dell'ordine di 20 cm/a (Simeoni & Bondesan, 1997).

Si calcola che il volume perso per subsidenza-eustatismo lungo le coste dell'Emilia-Romagna tra il 1984 e il 1993 ammonta ad oltre 19 Mm³, superiore all'apporto del sistema fluviale per lo stesso periodo (Idroser, 1994).

La dinamica sedimentaria naturale lungo l'intero tratto costiero nord-adriatico è stata interamente modificata, a partire dalla seconda metà del 17° secolo, dalla costruzione di un sistema di difese costiere pressoché continue: il 50% delle coste friulane, il 78% delle coste venete e oltre l'80% delle coste emiliano-romagnole sono interessate da differenti sistemi di protezione (Simeoni & Bondesan, 1997). Gli interventi sono stati particolarmente concentrati negli ultimi 50 anni, quando hanno iniziato a manifestarsi i più vistosi fenomeni di arretramento costiero.

Tra le opere che, come è noto, hanno effetti diretti e veloci sulle coste, sono da considerare quelle portuali, ossia la costruzione o il prolungamento dei moli foranei, e quelle di difesa (pennelli, scogliere), che interrompono o modificano il trasporto costiero, con effetti a breve termine sia sull'evoluzione del sistema litorale sia sulla qualità delle acque (Simeoni & Bondesan, 1997): si producono forti avanzamenti nel lato di provenienza della deriva litorale (sopraflutto) e erosione del litorale sul lato opposto (fig. 14.4).

Le difese di vario tipo («scogliere» longitudinali o trasversali, difese «soffolte», tubi «Longar» ecc.) hanno simili rapidi effetti di inversione del processo erosivo e spesso risultano sovradimensionate rispetto alle esigenze di riequilibrio del sistema idrodinamico: misure dirette del ripascimento su tratti protetti da scogliere longitudinali hanno mostrato che dopo un anno si raggiunge il 60-70% dei risultati finali attesi (Elmi & Gori, 1987).

cause retreat of up to about 20 cm/year (Simeoni & Bondesan, 1997).

The volume of beach lost by subsidence along the Emilia-Romagna coast between 1984 and 1993 has been estimated at more than 19 Mm³, i.e., more than river supplies for the same period (Idroser, 1994).

Natural sedimentary dynamics along the entire North Adriatic were entirely changed, from the second half of the 17th century onwards, by the construction of a more or less continuous system of beach defences: 50% of the Friuli, 78% of the Venetian, and more than 80% of the Emilia-Romagna coastlines have been subjected to various systems of defence (Simeoni & Bondesan, 1997). Operations have been particularly intense in the last 50 years, when the most obvious phenomena of coastal retreat began to manifest themselves.

Among the operations which have well-known direct and rapid effects on the coastline are port and dock works, i.e., construction or lengthening of jetties, or defence works (breakwaters of various types), which interrupt or modify coastal transport, with both short- and long-term effects not only on coast evolution but also on water quality (Simeoni & Bondesan, 1997): considerable advances in the upstream side and erosion on the opposite one take place (fig. 14.4). The defences are of several types (longitudinal or transversal rubble mounds, submerged or half-submerged, «Longar» tubes, etc.). Their effects in inverting the erosional process are equally rapid, and often excessive with respect to the need for re-equilibration of the hydrodynamic system: direct nourishment measures on stretches protected by longitudinal barriers have shown that 60-70% of the predicted final result is already achieved after only one year (Elmi & Gori, 1987).

A very clear example, that of the lido of Pellestrina, is shown in fig. 14.5: artificial nourishment of Adriatic beaches by transporting sand taken directly from ancient submerged littoral belts or quarries is a now widespread

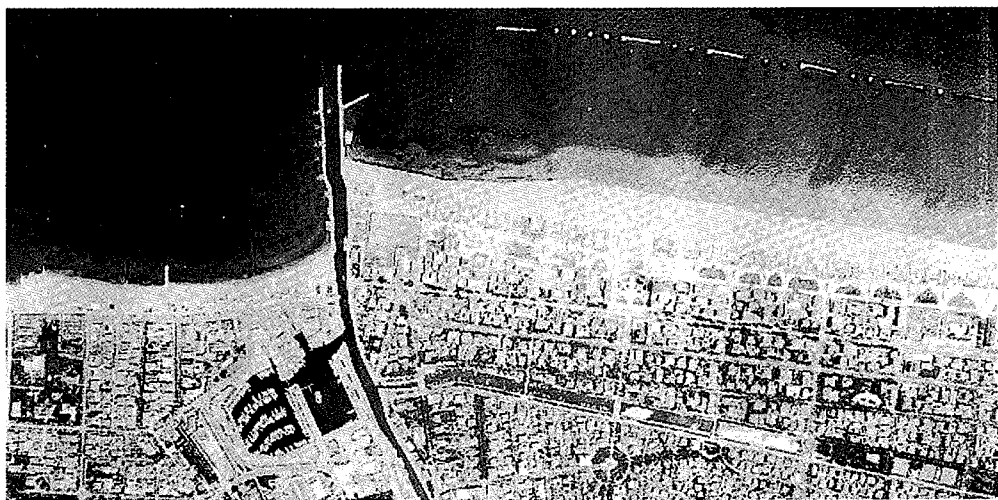


FIG. 14.4 - Effetti della costruzione di opere portuali e di difese longitudinali sul litorale romagnolo (Cesenatico).

FIG. 14.4 - Effects of construction of port and longitudinal defence works on Romagna littoral (Cesenatico).

Un esempio assai suggestivo di interventi di difesa è quello mostrato nella fig. 14.5, relativo al lido di Pellestrina: il ripascimento artificiale delle spiagge adriatiche mediante il trasporto di sabbia, prelevata direttamente da antichi cordoni litorali sommersi antistanti la costa o da cave di monte, è una pratica ormai diffusa e largamente adottata: gli effetti sono limitati e di durata annuale.

and popular practice: its effects are limited and generally short lived (one year).

14.5 Aree alluvionate o soggette a rischio alluvionale

Per definire queste aree, occorre introdurre una delimitazione temporale, in quanto, com'è ovvio, tutta la pianura

14.5 Flooded areas, and areas subject to flooding

In order to define these areas, a temporal limitation must be introduced since, obviously, the whole Po Plain itself was constructed by repeated episodes of flooding and sedimentation. The most extensive and indicative information comes from the period after 1918, although historical documents are available for the two or three centuries preceding the early 20th century.

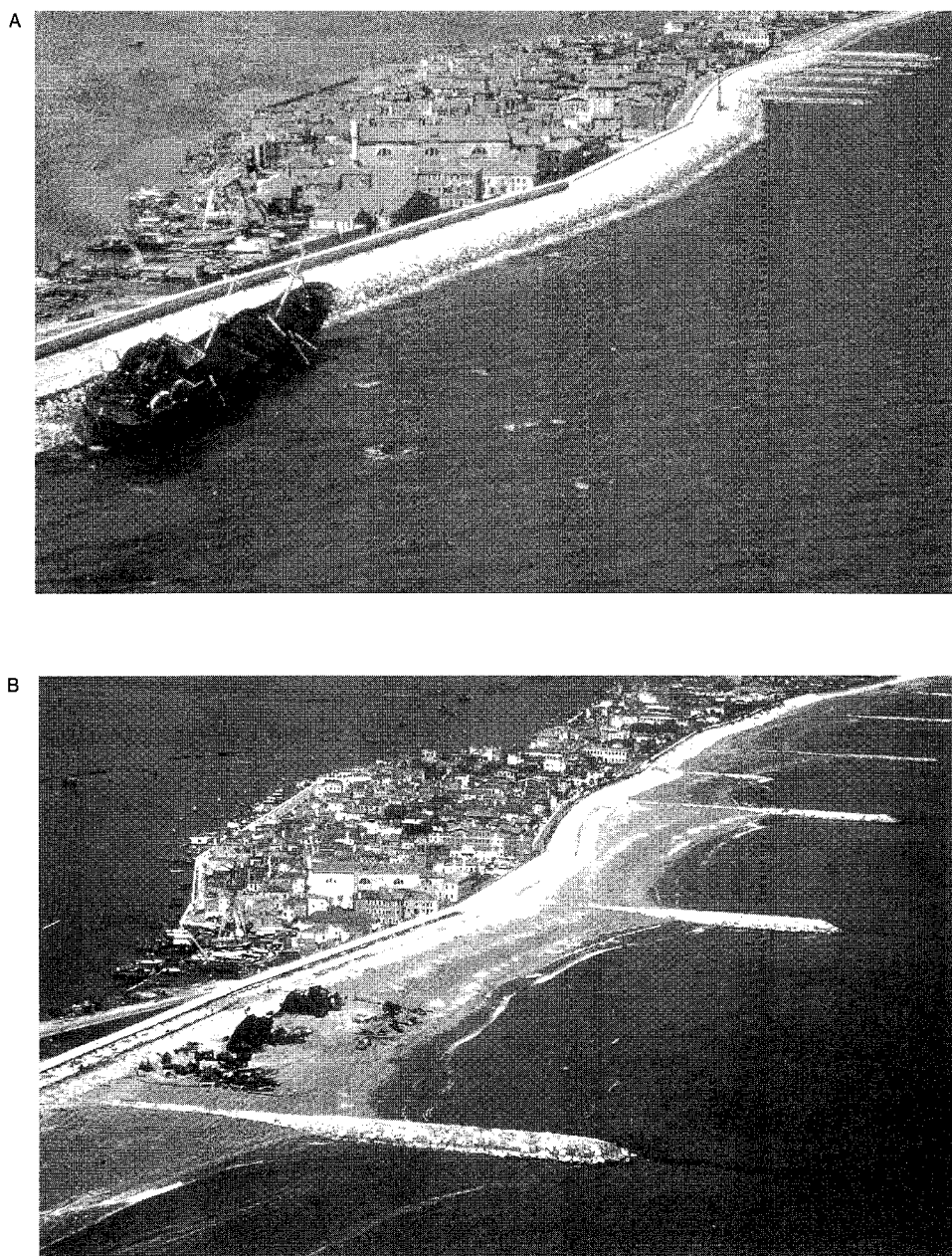


FIG. 14.5 A e B - Interventi di difesa costiera a Pellestrina (Venezia). Per la difesa dalle mareggiate dell'abitato e della retrostante laguna è stata realizzata con ripascimento artificiale un'ampia spiaggia davanti alle precedenti difese. Le foto documentano la situazione prima e dopo i lavori (cortesia di L. Carbognin).

FIG. 14.5 A and B - Coastal defence works at Pellestrina (Venice). To protect town and landward-lying lagoon from flood tides, artificial nourishment created a wide beach in front of previous defence works. Photographs document situation before and after works (by courtesy of L. Carbognin).

Fonte/source: Salvaguardia di Venezia e della laguna. Interventi del Magistrato alle Acque di Venezia - Consorzio Venezia Nuova per il rinforzo dei litorali. Fotografie di A. Chemollo e F. Gatta, © Magistrato alle Acque di Venezia - Consorzio Venezia Nuova. Autorizzazione alla pubblicazione, concessioni SMA n. 696 del 13-6-1990 e n. 12-082 del 23-5-1995 e concessione Aeronautica Militare R.G.S. n. 12-44 del 13-5-1998.

è stata costruita da successivi e ripetuti episodi d'alluvionamento. Le notizie più dettagliate e indicative sono relative al periodo posteriore al 1918. Sono tuttavia disponibili documenti storici anche per i due-tre secoli precedenti.

Posteriormente al 17° secolo, gran parte delle aree della media e bassa pianura è stata interessata da allagamenti, benché siano stati generalmente risparmiati i conoidi, i cordoni dunosi, i dossi e i catini interfluviali più lontani dai fiumi in quel momento attivi.

Nonostante la pratica di munire sistematicamente i fiumi di argini artificiali (cfr. Capitolo 12), sono state numerosissime le rotte, per sormonto, per sifonamento, per erosione al piede e per «crollo» d'argine, segnalate lungo il corso dei fiumi padani e veneti (C.N.R., 1972; Sorbini & alii, 1984; Govi & Turitto, 1996). Le rotte hanno dato luogo all'allagamento di vaste aree con permanenza dell'acqua esondata, nelle aree più depresse e a difficile drenaggio, talora per lunghi periodi (fino ad alcuni mesi).

Per quanto riguarda il corso del Po, le inondazioni degli ultimi due secoli (15 eventi tra il 1801 e il 1951) a valle della confluenza con il F. Ticino sono distribuite pressoché sull'intero sviluppo fluviale considerato (Govì & Turitto, 1998) (fig. 14.6).

Le inondazioni hanno sempre interessato territori di alcune centinaia di km² con un'altezza di acqua al suolo anche di alcuni metri. Nel Novembre 1951, il Po ha inondato, attraverso due sole rotte, pressoché l'intero Polesine di Rovigo per un'area di circa 1.000 km².

Un importante ruolo nella localizzazione delle rotte è attribuibile alle caratteristiche geometriche dell'alveo in relazione alla posizione degli argini maestri; le rotte si sono cioè verificate in corrispondenza dei luoghi di accentuata migrazione dei meandri, in prossimità di isole fluviali e di paleoalvei o di profondi solchi scavati dalle acque in occasione di rotte precedenti.

In tempi recenti, eventi alluvionali di rilevante entità nel bacino padano e veneto si sono avuti nel 1966, nel

After the 17th century, most of the middle and low plain was often flooded, although fans, dune reliefs, ridges and interfluvial basins farthest from the still active rivers were generally spared.

In spite of the systematic practice of building artificial banks to the rivers (see Chapter 12), breaches due to overflow, siphoning, erosion or collapse of levees were extremely frequent and were reported along all the courses of the Po Plain and Veneto rivers (C.N.R., 1972; Sorbini & alii, 1984; Govì & Turitto, 1996). The breaches flooded enormous areas, and floodwater sometimes remained for long periods (from a few weeks to several months) in low-lying parts difficult to drain.

As regards the Po, floods in the last two centuries (15 events between 1801 and 1951) downstream from the confluence with the Ticino, were distributed more or less along the entire course of the river (Govì & Turitto, 1998) (fig. 14.6).

Areas covering hundreds of kilometres have always been flooded, sometimes to depths of several metres. In November 1951, just two breaches due to overflow of the Po flooded the province of Rovigo, an area of about 1,000 km².

Breach location is often dictated by the geometry of the river bed in relation to its main banks. That is, breaches occur near points of accentuated meanders migration, river islands, and paleo-riverbeds or deep furrows excavated by water during preceding breaches.

In recent times, large-scale floods in the Po Plain and Veneto basin have taken place in 1966, 1994 (Po-Tanaro-Orba) and 1996 (C.N.R., 1972; Govì & Turitto, 1996; Maraga & Turitto, 1998).

In the central Po Plain, the rivers Secchia and Panaro have repeatedly flooded areas covering several dozen km²: in the vast depression defined by these two rivers, closed to the north by the Po, numerous floods occurred in the 19th century (e.g., 1839, 1872, 1879). The last floods go back to

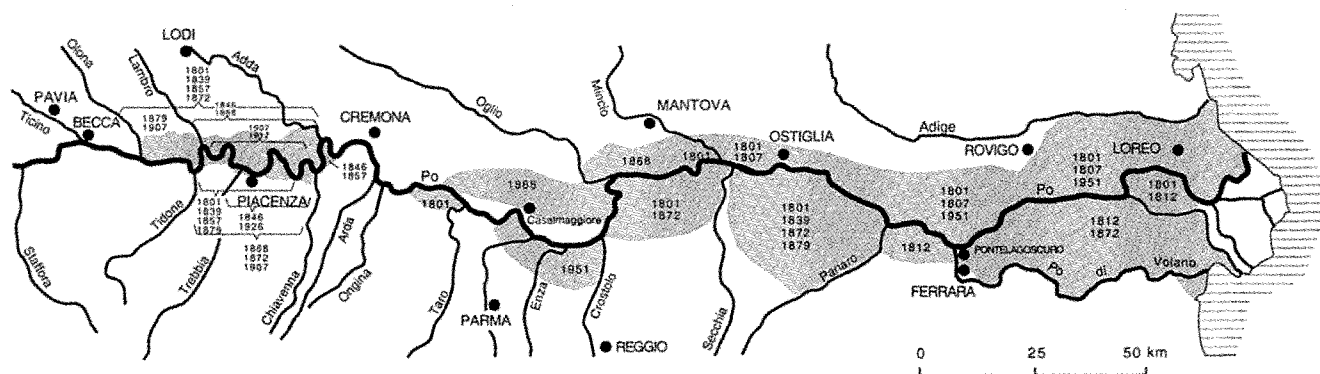


FIG. 14.6 - Aree inondate dal F. Po e dai suoi affluenti, a valle di Pavia, dal 1801 al 1998 (da Govì & Turitto, 1998, pag. 149, fig. 2, ridisegnata).

FIG. 14.6 - Areas flooded by river Po and its tributaries downstream from Pavia, 1801-1998 (from Govì & Turitto, 1998, p. 149, fig. 2, redrawn).

1994 (Po-Tanaro-Orba), e nel 1996 (C.N.R., 1972; Govi & Turitto 1996; Maraga & Turitto, 1998).

Nel settore centro-padano, anche i fiumi Secchia e Panaro hanno ripetutamente allagato aree di diverse decine di km²: nella vasta depressione delimitata dai due corsi d'acqua e chiusa a N dal Po si sono succedute numerose inondazioni nel secolo 19°: 1839, 1872, 1879; le ultime esondazioni risalgono al 1960 e 1972 per il Secchia e al 1952, 1972 e 1982 per il Panaro (Moratti, 1988).

Il settore del Reno e quello dei fiumi appenninici che sfociano direttamente in Adriatico è segnato da serie ripetute di eventi alluvionali di grande entità, i più recenti dei quali risalgono all'ultimo decennio.

Un quadro generale dei principali eventi che si sono prodotti nella pianura dal 1918 in avanti è riportato nella fig. 14.7. Nell'intervallo indicato, sono segnalate oltre 200 esondazioni e ben poche aree, se si esclude l'alta pianura piemontese, appaiono libere da questi fenomeni. Quelle maggiormente colpite, con più di dieci alluvioni nel secolo, sono l'alto Alessandrino, il Milanese, l'area bolognese-ferrarese, il Ravennate, il basso corso del Po. La storia degli eventi alluvionali dimostra la frequenza nel tempo e la gravità di questi rischi anche nell'area del basso Adige e, più in generale, nella pianura veneto-friulana (Miliani, 1937, 1939; Vollo, 1942; C.N.R., 1972).

1960 and 1972 (Secchia) and 1952, 1972 and 1982 (Panaro) (Moratti, 1988).

The sector of the Reno and of the Appennine rivers which debouch directly into the Adriatic is marked by repeated series of large-scale floods, the most recent of which go back to the 1990s.

A general picture of the main events occurring in the Po Plain from 1918 onwards is given in fig. 14.7. In this time-span, more than 200 flood events have been reported and, excluding the high Piemonte plain, very few areas appear to be free. The most frequently affected areas, with more than ten floods per century, are the Alessandria, Milan, Bologna-Ferrara and Ravenna areas and the low course of the Po.

The long history of flood events shows the frequency and severity of these risks, even in the low Adige area and, more generally, in the Veneto-Friuli plain (Miliani, 1937, 1939; Vollo, 1942, C.N.R., 1972).

Flooding is not only due to watercourses and insufficient river-bed size. Near the coast and in depressed areas under sea level, the temporary inefficiency of pumping plant or changes in canal gradients produced by differentiated subsidence may cause localized flooding.

In the coastal belt, partly due to its special altimetric conditions, the danger of direct invasion by the sea is high.

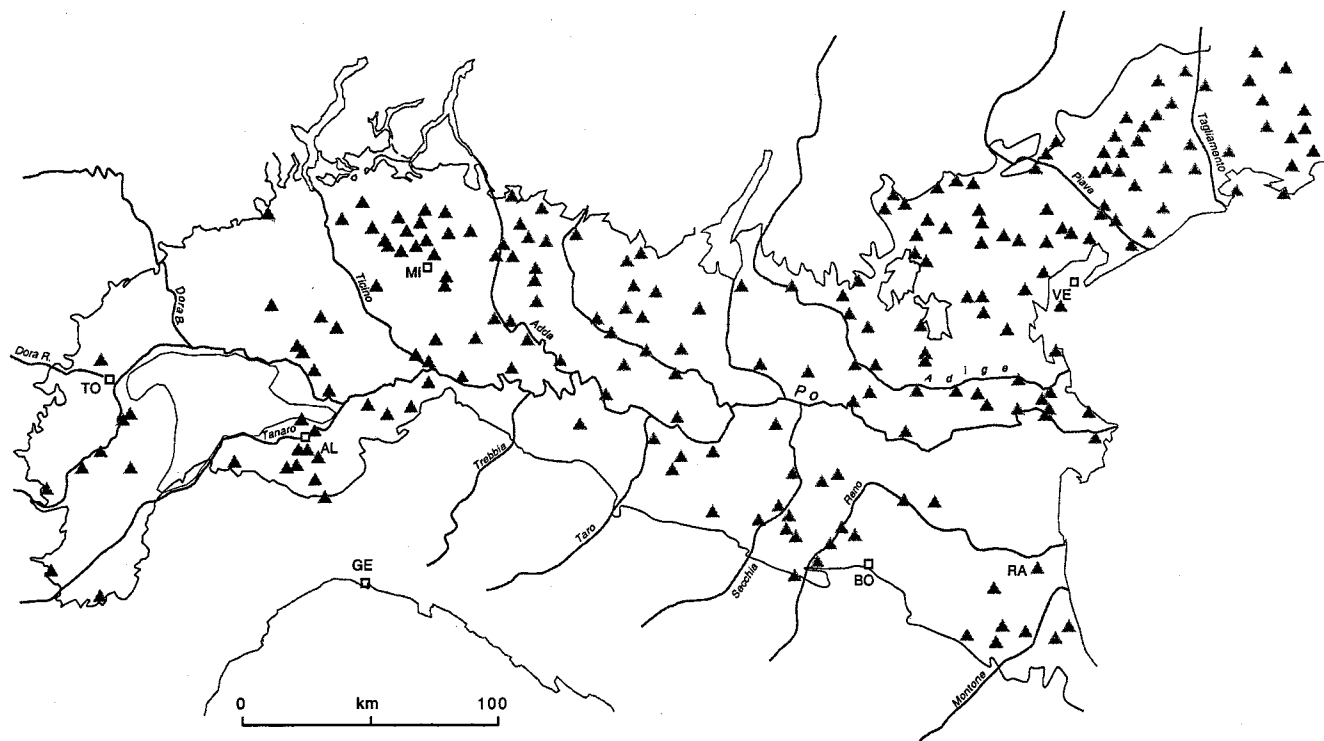


FIG. 14.7 - Aree colpite da inondazioni nel periodo 1918-1990 (da Guzzetti & alii, 1996, modificato).

FIG. 14.7 - Areas flooded in Po Plain from 1918 onwards (modified from Guzzetti & alii, 1996).

Nelle zone prossime alla costa e con quota inferiore al livello marino, la temporanea inefficienza degli impianti idrovori può causare locali allagamenti; così pure la variazione di pendenza dei canali di bonifica prodotta da subsidenza differenziata.

Nella fascia costiera, anche per le particolari condizioni altimetriche, è elevata la pericolosità da allagamento diretto dal mare (v. fig. 10.3). Data la particolare forma e orientazione dell'Adriatico, tutte le lagune vive del litorale padano sono spesso interessate da acque alte. In passato, anche gli eventi d'invasione d'acque marine a carico degli ambienti umidi e dei territori emersi retrostanti sono stati numerosi; i più gravi, nell'ultimo secolo, si sono prodotti nel novembre del 1966. I successivi interventi di potenziamento delle dighe verso mare e verso la laguna e di altri argini interni, ossia delle difese di prima e di seconda linea, hanno sensibilmente ridotto il pericolo, che oggi permane soprattutto per le aree litoranee esterne alle difese di prima linea.

Given the particular shape and orientation of the Adriatic, all the lagoons of the Po Plain littoral are often inundated by storm surges (fig. 10.3). In the past, episodes of invasion by the sea of wetlands and emerging areas farther inland have been frequent, the most serious of which during the 20th century occurred in November 1966. Later improvements to dams towards the sea and lagoons and other internal banking works, i.e., first- and second-line defences, have greatly reduced this hazard, which now still persists mainly for coastal areas in front of first-line defences.