

MASSIMO RINALDI (\*) & GIULIANO RODOLFI (\*\*)

## EVOLUZIONE OLOCENICA DELLA PIANURA ALLUVIONALE E DELL'ALVEO DEL FIUME SIEVE NEL MUGELLO (TOSCANA)

ABSTRACT: RINALDI M. & RODOLFI G., *Alluvial plain and channel evolution of the River Sieve in Mugello (Tuscany, Italy) during Holocene* (IT ISSN 0391-9838, 1995).

In this note the main results of a research concerning the evolution of both alluvial plain and channel of the River Sieve in the Mugello Valley (Tuscany, Italy) are presented. The Authors analyse the relationships between the dynamics of a typical inter-appenninic alluvial plain and the human disturbances linked to land use in the surrounding areas, which have been influenced, in their turn, by the climatic variations occurred during Holocene. In the past centuries, and in particular during a period in which intense deforestation coincided with a prolonged climatic crisis (the Little Ice Age), a considerable aggradation of the alluvial plain took place. Following this phase of continual deposition, a rapid channel-bed lowering occurred during last decades, related to instream gravel mining and, in the least, to decreasing of sediment supply caused by reforestation and upland sediment retention. Recent dynamics of both channel and banks is analysed on the basis of historical maps, aerial photographs, topographic surveys and detailed geomorphological mapping. The morphological variations occurred and related processes are interpreted as a result of a sequence of stages of both channel-bed and bank-slope evolution. Degradation of the channel-bed caused bank instability and widening, followed by a progressive stabilization, promoted by establishing vegetation.

KEY WORDS: Aggradation, Degradation, Bank instability, Mugello Valley, Tuscany (Italy).

RIASSUNTO: RINALDI M. & RODOLFI G., *Evoluzione olocenica della pianura alluvionale e dell'alveo del Fiume Sieve nel Mugello (Toscana)* (IT ISSN 0391-9838, 1995)

Nella presente nota sono riportati i principali risultati di una ricerca riguardante l'evoluzione morfologica della pianura e dell'alveo del Fiume

Sieve, situata nel Mugello (Toscana). Vengono analizzati i rapporti tra la dinamica evolutiva di questa tipica pianura alluvionale interna dell'Appennino Settentrionale ed i condizionamenti antropici legati all'utilizzazione del territorio circostante, a loro volta influenzati dalle variazioni climatiche succedutesi durante l'Olocene. Negli ultimi secoli, ed in particolare nel periodo in cui vennero a sommarsi gli effetti di estesi disboscamenti e di una lunga crisi climatica (Piccola Età Glaciale) si è verificata una progressiva aggradazione della pianura, per effetto delle inondazioni causate da eventi alluvionali di accresciuta frequenza ed entità. A questa fase di deposizione ha fatto seguito, negli ultimi decenni, un rapido abbassamento dell'alveo, soprattutto in relazione alla escavazione di materiali inerti e, in misura minore, alla riduzione dell'apporto di sedimenti conseguente alle sistemazioni idraulico-forestali dei bacini montani. La dinamica recente dell'alveo e delle sponde è stata analizzata sulla base di cartografie storiche, riprese aeree, rilievi topografici, rilevamenti geomorfologici di dettaglio. Le variazioni della morfologia dell'alveo e delle sponde, nonché i processi in atto, sono interpretati come risultato di una sequenza di stadi di evoluzione: l'abbassamento del fondo avrebbe innescato una fase di instabilità delle sponde con allargamento dell'alveo di piena, cui ha fatto seguito la progressiva stabilizzazione di alcuni tratti delle sponde stesse e l'instaurarsi della vegetazione.

TERMINI CHIAVE: Aggradazione, Abbassamento del fondo, Instabilità delle sponde, Mugello, Toscana.

### INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi secoli in Italia, così come in altre parti d'Europa, la maggior parte dei fiumi di una certa importanza ha subito intense e continue modificazioni (CASTIGLIONI & PELLEGRINI, 1981; BRAGA & GERVAISONI, 1989; PETS & alii, 1989). Le variazioni morfologiche indotte dall'impatto antropico si sono spesso sovrapposte a quelle dovute a cause naturali, in particolare alle variazioni del clima, che non solo hanno influito direttamente sullo svolgimento dei processi morfogenetici, ma hanno anche condizionato i sistemi di utilizzazione del suolo. Numerosi studi hanno messo in evidenza le relazioni tra variazioni della geometria e del regime dei corsi d'acqua ed oscillazioni climatiche (di breve e medio periodo) nel corso dell'Olocene (GRAF & alii, 1991; KNOX, 1984; RUMSBY & MACKLIN, 1994).

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze  
(\*\*) Dipartimento di Scienza del Suolo e Nutrizione della Pianta, Università di Firenze

Il lavoro è stato impostato unitariamente dai due autori; M. Rinaldi ha curato in particolare i cap. 5 e 6, mentre G. Rodolfi i cap. 3 e 4. La nota è stata redatta congiuntamente.

Gli Autori ringraziano sentitamente i Dott. i Giovanni Saulle e Giuseppe Ronconi dello Studio Associato «Progetto Ambiente» per aver messo a disposizione i reperti delle Mozzete e del Fondaccio e per aver descritto i rispettivi siti; il Dott. Marco Fioravanti ed il Prof. Franco Piegai dell'Istituto di Assestamento e Tecnologia Forestale dell'Università di Firenze per la determinazione dei reperti lignei; il Prof. Gilberto Calderoni del Laboratorio di Geochimica del Dipartimento di Scienze della Terra della Università di Roma per le datazioni radiometriche degli stessi.

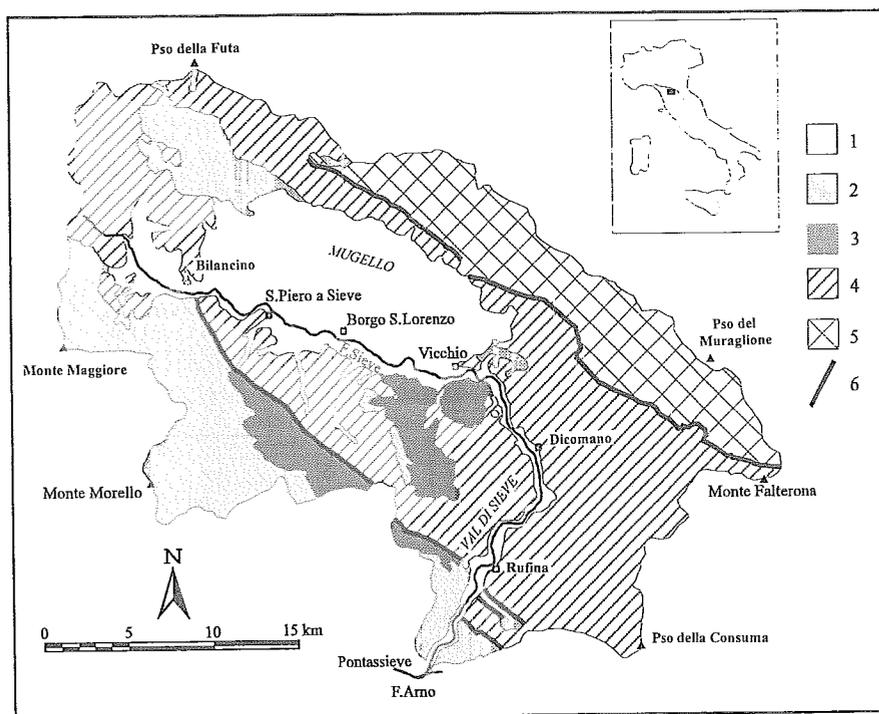


FIG. 1 - Ubicazione e schema litologico-strutturale del bacino idrografico del Fiume Sieve. 1) Depositi lacustri, fluvio-lacustri ed alluvionali (Pliocene Sup. - Quaternario). 2) Unità Liguri s.l. (Cretaceo Inf. - Paleocene) - Unità di M. Morello; Formazione di M. Morello, Pietraforte, Formazione di Sillano; Complesso Caotico. 3) Unità Subliguri (Paleocene - Miocene) - Unità di Canetolo: Arenarie, calcari e brecciole di M. Senario. 4) Unità del M. Cervarola (Paleocene - Miocene Inf.): Scisti Varicolori - Arenarie del Falterona - Arenarie del M. Cervarola. 5) Unità Marchigiano-Romagnola (Miocene Medio-Sup.): Formazione Marnoso-arenacea. 6) Principali elementi tettonici.

FIG. 1 - Location and structural sketch-map of the Sieve River basin. 1) Lacustrine, fluvio-lacustrine and alluvial deposits (Upper Pliocene - Quaternary). 2) Ligurian Units (Lower Cretaceous - Paleocene). 3) Sub-ligurian Units (Paleocene - Miocene). 4) M. Cervarola Units (Paleocene - Lower Miocene). 5) Marchigiano-Romagnola Unit (Middle-Upper Miocene). 6) Main tectonic features.

Più recentemente, da qualche decennio, le pianure alluvionali, ed i relativi alvei, sono state le unità geomorfologiche più direttamente condizionate dall'attività antropica (SCHUMM, 1969, 1977; RHODES & WILLIAMS, 1979; FEDERICI, 1987; COSTA & alii, 1995). Le prime hanno sopportato quasi ovunque una crescente urbanizzazione, che ha progressivamente sostituito l'utilizzazione agricola; i secondi sono stati oggetto degli interventi più diversi (sbarramenti con dighe o traverse, canalizzazioni, restringimenti, tagli di meandro, escavazioni di materiali, ecc.). Le influenze di tali trasformazioni sulla dinamica evolutiva di un alveo fluviale sono state ampiamente analizzate in letteratura (WOLMAN, 1967; PETTS, 1984; SCHUMM & alii, 1984; SIMON, 1989; BROOKES, 1988; LAJZAK, 1995).

La presente nota riferisce sui risultati preliminari di una ricerca che si è proposta due principali obiettivi:

- chiarire, relativamente al tratto mugellano del bacino idrografico del Fiume Sieve, rappresentativo delle depressioni interne dell'Appennino Settentrionale, i rapporti tra dinamica evolutiva del sistema pianura alluvionale — alveo fluviale ed i condizionamenti antropici subiti sia dal sistema stesso che dalle forme di utilizzazione del territorio di pertinenza, a loro volta più o meno direttamente influenzate dalle variazioni climatiche che si sono succedute nel corso dell'Olocene;
- analizzare e documentare la dinamica recente dell'alveo fluviale, i processi in atto e le condizioni di instabilità, riferendoli ad una sequenza temporale di stadi di evoluzione morfologica dell'alveo stesso e delle sue sponde.

#### LINEAMENTI GENERALI DEL MUGELLO ED INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

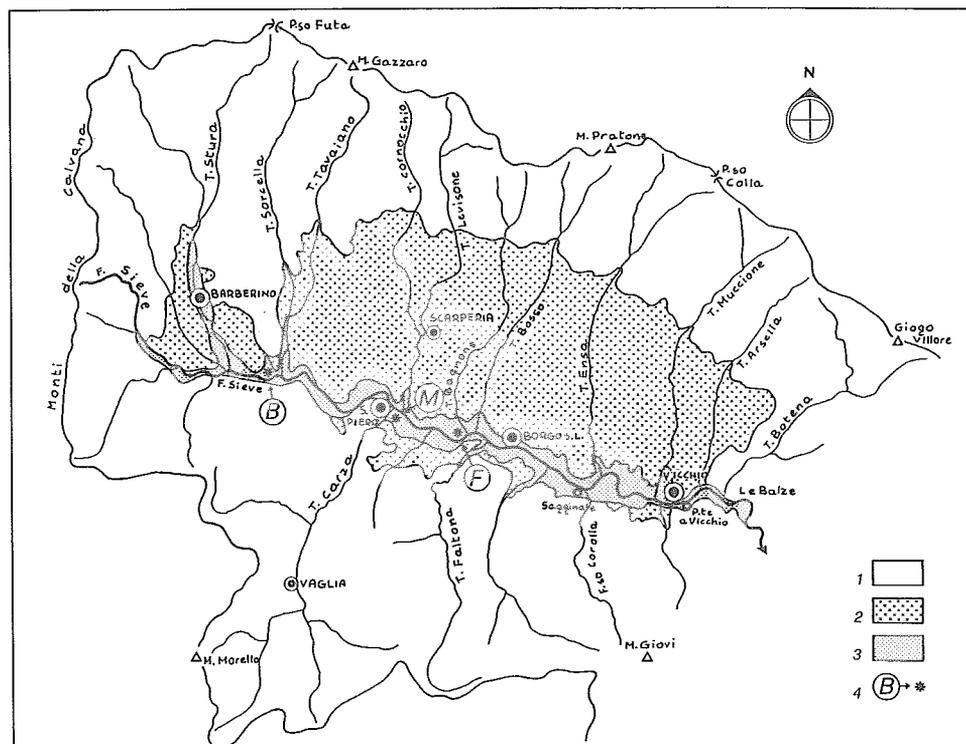
Il toponimo *Mugello* individua quel tratto di bacino idrografico del Fiume Sieve, affluente di destra dell'Arno, che

si estende fra la dorsale dei Monti della Calvana, a NO di Barberino, e la stretta delle Balze, poco a valle dell'abitato di Vicchio (fig. 1). È limitato sugli altri due lati da due dorsali parallele del sistema appenninico, allineate in direzione NO-SE: quella settentrionale costituisce un tratto dello spartiacque Tirreno-Adriatico, mentre l'altra separa il Mugello dall'adiacente bacino di Firenze-Prato-Pistoia.

Quest'ampia depressione ospitò, durante il Villafranchiano, un vasto e profondo lago (RISTORI, 1889; NELLI, 1923; PRINCIPI, 1926; SANESI, 1965, RODOLFI & alii, 1978) i cui sedimenti affiorano attualmente lungo i fianchi delle valli dei principali tributari della Sieve, sotto ai depositi dei successivi cicli alluvionali pleistocenici. I sedimenti lacustri sono costituiti da argille, argille sabbiose lignitifere e limi nella parte centrale, e da sabbie e ciottolami fluvio-lacustri ai margini. Sondaggi profondi (GEMINA, 1963) hanno consentito di individuare un conglomerato basale e di valutare in più punti lo spessore della serie. Nella parte centrale (Borgo San Lorenzo) essa è risultata superiore a 500 m, mentre in quella occidentale (Barberino) il substrato pre-lacustre, costituito dalle siltiti e marne dell'Unità del M. Cervarola, è stato sempre raggiunto entro i 100 m. La conca del Mugello può quindi essere considerata, dal punto di vista strutturale, come sdoppiata in due consecutive depressioni: una più ampia e profonda (Mugello Centrale) ed un'altra marginale e meno estesa (bacino di Barberino), separate da una soglia oggi individuabile nella dorsale Colle Barucci-Poggio Mausoni, nella quale il Fiume Sieve incide la stretta di Bilancino. Una seconda soglia è presente al margine orientale (Vicchio), in corrispondenza di un affioramento delle Arenarie di Montesenario. SANESI (1965), prendendo come riferimento la successione delle glaciazioni pleistoceniche alpine, fa coincidere il colamento del lago con la fine del Gunz.

FIG. 2 - Carta geologica schematica dell'alto bacino della Sieve. 1) Formazioni pre-lacustri; 2) Sedimenti lacustri e fluvio-lacustri (Villafranchiano) e depositi alluvionali terrazzati (Pleistocene medio-superiore), indifferenziati; 3) Depositi alluvionali olocenici; 4) Siti dei ritrovamenti: B = Bilancino, F = Fondaccio, M = Mozzete.

FIG. 2 - Geological sketch-map of the upper Sieve R. basin. 1) Pre-lacustrine formations; 2) Lacustrine and fluvio-lacustrine sediments (Villafranchian) and terraced alluvial deposits (Middle-Upper Pleistocene), undifferentiated; 3) Holocene alluvial deposits; 4) Archeological findings.



Successivamente, almeno tre alterne fasi di erosione e deposizione da parte della Sieve e dei suoi principali affluenti devono essersi verificate, come testimoniato dai lembi residuali di superfici alluvionali posti a quote diverse rispetto alla pianura alluvionale attuale. Gli Autori concordano nell'attribuire cronologicamente la costruzione di ognuna di tali superfici ai periodi glaciali alpini (Mindel, Riss, Würm) e la loro successiva pedogenesi ed incisione ai relativi interglaciali. I sedimenti alluvionali attribuiti all'ultimo episodio glaciale furono depositi da corsi d'acqua di tipo *braided*, a costruire estese superfici allungate in prevalente direzione N-S, che nella loro parte distale assumevano i caratteri morfologici di coni di deiezione molto appiattiti (RODOLFI & alii, 1978). L'unghia di tali corpi sedimentari termina attualmente con una netta scarpata di erosione, di altezza variabile da 1 a 3 m, sulla pianura alluvionale attuale.

Per quanto concerne il clima attuale del Mugello, l'andamento delle precipitazioni è quello tipico del *regime pluviometrico appenninico* (LANDI, 1976). Le precipitazioni medie mensili sono caratterizzate da un minimo estivo (Luglio), con valori tra i 30 e 50 mm, e due massimi, uno autunnale (Novembre) ed uno a fine inverno (Febbraio), con valori generalmente compresi tra 100 e 150 mm. L'afflusso medio<sup>o</sup> annuo è dell'ordine dei 1000-1200 mm, distribuito su circa 100 giorni piovosi. Le temperature più basse si registrano in Gennaio-Febbraio e le massime in Luglio-Agosto. Relativamente al decennio 1960-1970, i valori più bassi (-8°C/-10°C, con punte di -14°C) si raggiungono fra Dicembre e Marzo, ma anche in Aprile ed Ottobre si sono verificate minime assolute inferiori a 0°C (-3,5°C nell'A-

prile del 1970 e -4,2°C nell'Ottobre dello stesso anno). Paragonando i minimi ed i massimi assoluti annuali registrati alla stazione di Borgo San Lorenzo con quelli della stazione di Firenze, relativamente vicina, si osserva che i minimi a Borgo sono costantemente più bassi di circa 4°C ed i massimi più alti di circa 1,5°C. Si può pertanto affermare che, anche se per grandi linee ricade entro la *zona temperata con una stagione arida* (cfsa di Köppen, cioè *mediterranea*) il clima del Mugello presenta alcuni caratteri di continentalità.

#### L'ALVEO E LA PIANURA ALLUVIONALE ATTUALE DEL FIUME SIEVE: PROBLEMI APERTI

La Sieve trae origine dai Monti della Calvana, a circa 700 m.s.l.m. di quota, e confluisce in Arno a Pontassieve ad una quota di 73 m.s.l.m., sviluppandosi per una lunghezza totale di 58 km. Le stazioni di misura delle portate sono ubicate a Bilancino (150 km<sup>2</sup> di bacino sotteso) e a Fornacina (830 km<sup>2</sup>). Le portate misurate durante gli intervalli di registrazione variano tra 0,01 e 546 m<sup>3</sup>/s a Bilancino, e tra 0,31 e 1340 m<sup>3</sup>/s a Fornacina.

La sua pianura alluvionale, nel tratto mugellano, può essere scomposta in tre settori principali (fig. 2). Uscito dalla dorsale della Calvana, all'estremità occidentale del bacino del Mugello, il corso d'acqua attraversa per circa 11 Km la conca di Barberino fino alla soglia di Bilancino. In questo primo tratto scorre incassato di 3-4 m nella pianura alluvionale da lui stesso costruita nel corso di ripetute

esondazioni. La larghezza di questa superficie, a sua volta incassata nei sedimenti alluvionali del ciclo precedente, non oltrepassa i 300 m. Superata la stretta di Bilancino il fiume incide profondamente, fin quasi a S. Piero a Sieve, le siltiti e le marne dell'Unità di M. Cervarola. Si mantiene poi, per alcuni Km, sul lato meridionale della depressione principale; in questo tratto, e fino alla soglia di Vicchio, la pianura alluvionale si allarga, raggiungendo in alcune sezioni una larghezza massima di 1,5 Km. Pur trattandosi di una superficie intensamente trasformata dall'uomo, le tracce della primitiva morfologia non sono state ancora del tutto cancellate: le quote decrescono gradualmente dalla fascia limitrofa all'alveo attuale verso le parti marginali, sovrastate dalle scarpate che bordano la superficie terrazzata del ciclo alluvionale precedente. La granulometria dei sedimenti varia nello stesso senso, divenendo progressivamente più fine. Anche in questo tratto il corso della Sieve, che sembra ricalcare alcune importanti lineazioni strutturali, si trova inciso per 3-4 m nella pianura. L'alveo è di tipo ghiaioso e caratterizzato da una bassa sinuosità (indice compreso tra 1 e 1,5); la larghezza media dell'alveo di piena è di circa 60 m, e la pendenza media è compresa 0,002 e 0,004. In precedenti condizioni naturali la sinuosità dell'alveo doveva essere più accentuata; nel corso degli anni, lunghi tratti sono stati artificialmente rettificati e le sezioni idrauliche generalmente ridotte per lasciare maggiore spazio alle colture. Per il rimanente settore, a valle della soglia di Ponte a Vicchio e fino alla confluenza con l'Arno, l'alveo si presenta spesso solo parzialmente incassato in una stretta pianura; mantiene gli stessi valori di sinuosità e larghezza, ma la sua pendenza aumenta sensibilmente.

Come verrà meglio specificato in seguito, la frequenza degli eventi alluvionali che provocavano inondazioni era in passato piuttosto elevata; ne è testimonianza la pressoché totale assenza di insediamenti stabili nella pianura e la fitta trama di opere di difesa idraulica ancor oggi osservabili. L'ultimo episodio alluvionale con carattere di eccezionalità fu quello del 4 Novembre 1966, in seguito al quale si produssero, oltre alla completa inondazione della pianura, profonde modificazioni morfologiche. Esondazioni parziali, che hanno interessato i tratti più vulnerabili, si sono verificate più recentemente, negli anni 1991 e 1993. Queste evidenze ci inducono a ritenere, in prima istanza, che la pianura alluvionale della Sieve, almeno nel tratto considerato, si trovi tutt'ora in fase di continua aggradazione. Restano comunque da valutare sia lo spessore totale della successione alluvionale più recente, che l'intervallo di tempo nel quale essa si sarebbe depositata. A questo proposito, se si considera «würmiana» la superficie terrazzata immediatamente superiore si può ritenere «tardiglaciale» o addirittura «postglaciale» l'inizio della successiva fase di erosione fluviale e di contemporanea pedogenesi della superficie superiore (RODOLFI, 1994a). Pochi Km a valle della soglia di Vicchio alcuni sondaggi geognostici (RODOLFI, 1971) hanno accertato per circa 600 m la presenza di un alveo inciso nelle siltiti della Formazione del Cervarola, sepolto sotto 11 m di sedimenti alluvionali. Nell'ipotesi che la pendenza media dell'alveo non sia variata significativamente da allora, si può ritenere che anche nel tratto oggetto di studio la quota più bassa raggiunta dalla Sieve in questa fase ero-

siva non superi gli 8-9 metri dalla superficie attuale. Contemporaneamente, potrebbe essersi verificata una «calibratura» del fondovalle per erosione laterale, fino ad interessare le parti terminali della superficie terrazzata più antica («würmiana»), come dimostrato dalle brusche scarpate di erosione che attualmente la delimitano.

Il problema che rimane aperto è però quello di stabilire quali siano state, ed in quale momento abbiano agito, le cause che hanno determinato l'interruzione della fase erosiva ed innescato un processo di aggradazione. A proposito della prima questione, due ipotesi possono essere formulate. Non si può escludere un leggero sollevamento di qualche tratto del fondovalle, che risulta orientato, da Dicomano in poi, lungo la linea tettonica Piombino-Faenza (BARTOLINI & alii, 1984); ricordiamo inoltre che il Mugello è stato, ed è tutt'ora, caratterizzato da un elevato grado di sismicità. Ma il Mugello è stato anche da molti secoli soggetto ad attività antropica, per cui non si può non prendere in considerazione l'influenza più o meno diretta della utilizzazione del territorio sulla inversione di tendenza nella evoluzione dell'alveo della Sieve e della sua pianura alluvionale. Nonostante l'esistenza di una nutrita letteratura, non si è in grado di verificare nel dettaglio l'eventuale influenza della componente neotettonica. È questo il motivo per il quale la ricerca si è orientata verso la ricostruzione delle fasi più recenti dell'evoluzione del sistema «corso d'acqua-bacino idrografico sotteso», sia in relazione al susseguirsi delle forme di utilizzazione del suolo, che tenendo conto delle oscillazioni climatiche che hanno caratterizzato l'Olocene. A questo proposito si è fatto riferimento agli schemi cronologici del Quaternario proposti da PANIZZA (1985). Il ritrovamento di reperti significativi, alcuni dei quali datati con metodi radiometrici, ha consentito di collocare in una scala cronologica abbastanza precisa la successione degli eventi.

#### EVOLUZIONE DELLA PIANURA ALLUVIONALE DEL FIUME SIEVE IN RELAZIONE ALLE VARIAZIONI DEL CLIMA E DELLE FORME DI UTILIZZAZIONE DEL SUOLO

La presenza dell'Uomo nel Mugello fin da tempi remoti è sufficientemente documentata. *Chopping tools* furono rinvenuti oltre un secolo fa nei pressi di Barberino, mentre numerosi resti di industrie litiche, provenienti dai dintorni di Galliano, sono stati attribuiti al Mousteriano (PALMA DI CESNOLA in SANESI, 1965). Più recentemente (1995) è stato portato alla luce nei pressi di Bilancino un insediamento ritenuto Gravettiano (ARANGUREN, com. pers.), tutt'ora in corso di studio. Reperti neolitici, provenienti però dalla bassa Val di Sieve e consistenti sia in strumenti litici che in frammenti ceramici e resti di focolari (CECCANTI, 1982) potrebbero tuttavia testimoniare la presenza nella valle di comunità che per prime si dedicarono all'agricoltura. Durante l'Età del Rame e del Bronzo (Sub-boreale) il Mugello doveva costituire soprattutto un'area di transito fra i due versanti dell'Appennino: i siti dei ritrovamenti sono infatti allineati secondo direttrici parallele Nord-Sud, come tratti di una viabilità che collegava la costa tirrenica con la pianura padana (BELLANDI & GUCCI, 1993).

Come sopra accennato, la serie alluvionale che occupa il fondovalle mugellano può considerarsi genericamente «olocenica» pur non essendo stato ancora fissato nel tempo il momento iniziale della sua messa in posto. Si può solo supporre che la fase durante la quale la Sieve incise i depositi alluvionali del ciclo precedente (ritenuti würmiani) fino ad intaccare il substrato, si sia protratta per tutto il Sub-boreale, in condizioni di clima caldo o mite; a questa potrebbe aver fatto seguito, come conseguenza della prima oscillazione fredda del Sub-atlantico (800 a.C.), una fase alluvionale.

#### *Il periodo antecedente al 1850*

A partire dal VII secolo a.C. alle tribù liguri (*Ligures Magelli*) che abitavano questa parte dell'Appennino si sostituirono gli Etruschi. Fino al II secolo a.C. risultano chiare le tracce di insediamenti stabili in Mugello (necropoli di San Piero a Sieve, complesso di Poggio Colla presso Vicchio, per citare i principali a tutt'oggi conosciuti). L'economia etrusca era sostanzialmente basata sulla agricoltura; si può quindi ritenere che le prime e consistenti modificazioni del territorio (disboscamenti nelle aree collinari, tentativi di bonifica delle fasce paludose di fondovalle) siano state opera di queste popolazioni (CHINI, 1875). Da questo momento comincia a prendere forma il paesaggio agrario: SERENI (1962) fa risalire proprio agli etruschi una tecnica culturale ancor oggi praticata, l'«alberata», che consiste nell'utilizzare piante arboree forestali come sostegno di piante coltivate (della vite in particolare). La messa a coltura delle superfici sottratte alla foresta, anche se non molto estese, segnò il momento dell'innescò della erosione accelerata dei suoli, rimasti privi di protezione naturale, e di una conseguente sedimentazione nelle aree alluvionali di fondovalle. A rendere più intenso il processo di erosione-sedimentazione contribuì senz'altro la concomitante azione, almeno fino al 300 a.C., di un clima freddo e piovoso.

Un notevole miglioramento del clima, che può aver contribuito al diffondersi della civiltà romana in tutto il bacino del Mediterraneo, si verificò intorno al 300 a.C. In Mugello non sono stati riscontrati, almeno fino ad oggi, insediamenti romani di una certa importanza; i ritrovamenti fanno pensare piuttosto a piccoli agglomerati rurali sparsi, dei quali sono oggi conservati i tipici toponimi prediali. Probabilmente, già nel I secolo a.C. il Mugello era caduto sotto l'influenza romana, quando Silla espropriò i fondi etruschi per distribuirli ai suoi veterani. Durante la presenza romana, almeno fino al 400 A.D., le attenzioni furono soprattutto rivolte al miglioramento della viabilità (CHINI, 1875; RIGHINI, 1956). La pianura alluvionale non ha fornito, per ora, nessun reperto significativo a questo proposito; forse la Sieve, continuando a mantenere un carattere di estrema dinamicità, fu evitata dalle vie di grande comunicazione; sembra fare eccezione il tratto Fiesole-Bologna della Via Cassia, anche se non è stato individuato con certezza il punto di attraversamento della Sieve. Mancano, per questo periodo, prove dirette di eventi alluvionali di una certa importanza; probabilmente essi sono rimasti registrati nella porzione basale della serie alluvionale, non esposta in nessun tratto, che pertanto sfugge alla osserva-

zione diretta. Si rifletta, però, sul fatto che la stabilità del clima durante tutto il periodo romano può aver favorito l'espandersi delle colture, sempre a spese della copertura forestale: l'attività agricola cominciò a divenire un vero e proprio fattore di morfogenesi anche se, in generale, la utilizzazione del suolo continuava ad essere condizionata dalla dinamica naturale.

Sul finire del periodo romano le grandi migrazioni dei popoli asiatici verso occidente, in non casuale concomitanza con una variazione del clima in senso fresco-umido, causarono una situazione di generale abbandono degli insediamenti sparsi e, di conseguenza, la crisi dell'agricoltura. L'attività dei processi morfogenetici subì un incremento in tutta la regione, lasciando tracce sporadiche, ma ancor oggi evidenti. Ad esempio, nell'Alto Mugello, appena oltre lo spartiacque appenninico, fra il 430 e il 570 A.D. (RODOLFI, 1994b) un movimento di massa di notevoli dimensioni sbarrò il corso del Fiume Santerno, creando un lago temporaneo che invase il fondo della vasta conca intermontana ove molto dopo (1335) la Repubblica Fiorentina fonderà il borgo fortificato di Firenzuola. La crescita degli insediamenti, dopo un temporaneo arresto causato dalle invasioni barbariche, subì successivamente un forte impulso in seguito alla riorganizzazione feudale della società alto-medievale. Fino a quest'epoca il popolamento delle valli e delle pianure era stato fortemente condizionato dai rischi connessi con la dinamica fluviale, cosicché le aree collinari e pedemontane erano state preferite al fondovalle, soggetto a continue inondazioni e a conseguenti impaludamenti. Tale situazione andò progressivamente modificandosi attraverso l'apertura di nuove vie di comunicazione, parallele ai corsi d'acqua. Gli assi viari di fondovalle, sfruttando le superfici terrazzate, andavano progressivamente sostituendo quelli collinari. Probabilmente, in coincidenza con una graduale oscillazione del clima in senso più caldo, il feudalesimo raggiunse il suo massimo sviluppo. L'agricoltura era praticata con metodi ancora molto primitivi dai «servi della gleba», soprattutto nelle immediate adiacenze dei «castellari» e quindi in collina.

Un nuovo deterioramento del clima, che raggiungerà il suo apice nel Basso Medioevo, provocò un'intensificarsi della dinamica fluviale, con frequenti episodi alluvionali. Ne è prova quanto rinvenuto nel corso dei lavori per la diga di Bilancino sulla Sieve, poche centinaia di metri a monte della stretta omonima, in località Colombaiotto. Le analisi radiometriche (<sup>14</sup>C, campione *Rome 522*) di un frammento ligneo di *Quercus robur* appartenente alle trabeazioni di un ponte sostenuto da cinque pile in muratura, hanno collocato il momento del taglio della pianta in un periodo compreso fra il 945 ed il 1035 A.D. Il fatto che questa opera, di notevole importanza per la viabilità dell'epoca, sia stata sepolta sotto 3,5 m di sedimenti alluvionali, e mai menzionata nelle cronache o riportata nelle mappe più antiche, fa pensare ad un rapido abbandono del sito in conseguenza o di un unico evento catastrofico, o di una serie di eventi di minore intensità, ma ravvicinati nel tempo (RODOLFI, 1994a). Nel 1177 le cronache riportano per la prima volta notizia di una inondazione di Firenze da parte dell'Arno. A questi eventi alluvionali con caratteri di eccezionalità cui Firenze è andata da sempre soggetta, la Sieve

ha contribuito in gran parte; non solo per essere il principale affluente (800 Km<sup>2</sup> di bacino) dell'Arno, ma anche per la sua particolare ubicazione. Vale a questo proposito l'antico adagio popolare «...Arno non cresce se Sieve non mesce...» che, sia pure non sempre rispettato, ci sostiene nel riferire anche alla pianura della Sieve gli eventi alluvionali dell'Arno a Firenze. È quanto, peraltro, si è verificato nel corso dei due eventi eccezionali più recenti (1844 e 1966). Il raffreddamento generale del clima si protrasse fino alla prima metà del XIV secolo. Nel bacino dell'Arno a monte di Firenze, e quindi anche in Mugello, si verificarono episodi eccezionali, come le inondazioni del 1333 e 1334, nonché la colossale frana di Castagno (1335), tutti descritti dal Villani (in AIAZZI, 1845). Le terre mugellane passarono nel frattempo dai feudatari alla borghesia comunale fiorentina. Contemporaneamente si affermò un nuovo rapporto fra coltivatore e proprietario terriero: il *contratto di mezzadria*, che è sopravvissuto fino ai giorni nostri. Il paesaggio agrario rimase profondamente trasformato: cominciarono ad essere praticate le colture promiscue su spazi sempre più ampi, si compirono le prime opere di bonifica, si cominciò ad utilizzare il lavoro animale. Le arature più profonde consentirono un temporaneo aumento della produttività, ma contribuirono decisamente ad incrementare l'intensità dei processi di degradazione del suolo. La situazione raggiunse probabilmente livelli di vera e propria crisi, tanto che, a partire dal 1300, le pratiche di disboscamento furono severamente proibite da una serie di leggi. In particolare, una *provvisione* che proibiva i tagli del bosco nel Mugello seguì immediatamente l'evento alluvionale del 1333 (MORETTI, 1988).

Nei successivi due secoli il clima si mantenne mite, favorendo la ripresa dell'agricoltura: si affermarono la rotazione delle colture ed una costante e capillare cura del territorio, fino a raggiungere quelle espressioni di generale equilibrio immortalate dai pittori toscani del Rinascimento. Tuttavia, a questo incremento qualitativo della agricoltura non fece seguito quello dell'allevamento del bestiame, che rimase per lo più limitato agli animali da cortile o a quelli da traino. Le migliori condizioni di vita si tradussero inoltre in un progressivo aumento della popolazione: si verificò un altrettanto graduale estendersi delle terre coltivate. Per far fronte alle aumentate necessità alimentari, non potendosi migliorare la fertilità del suolo per penuria di concime animale, si preferì aumentare ulteriormente la superficie agraria a spese del bosco, o a ricorrere a tecniche più efficaci di coltivazione (vangature ed arature ancor più profonde). In un caso e nell'altro, però, queste azioni aggravarono ulteriormente la situazione precedentemente innescata: si tradussero in un intensificarsi del processo di erosione sui versanti e di conseguente accumulo del materiale, così mobilitato, nella piana di fondovalle durante le inondazioni.

Una nuova crisi climatica verso condizioni di resistenza, nota in letteratura come *piccola età glaciale* (1550-1850) era già stata annunciata dalla rovinosa alluvione del 1521, descritta dal Berni (in AIAZZI, 1845) e confermata da quella, altrettanto catastrofica, del 1557. Ad esse seguì una lunga serie di eventi meno intensi ma più frequenti.

A questo momento (seconda metà del XVI secolo) possono essere riferiti i frammenti ceramici venuti alla luce in località «Mozzete» nei pressi di San Piero a Sieve, alla confluenza fra la Sieve ed il Torrente Levisone, sepolti sotto 2-3 m di sedimenti alluvionali fini (limi, limi argillosi e sabbie) (RODOLFI, 1994a). Dal XVI secolo si registra infatti una forte accelerazione nelle pratiche di disboscamento e dissodamento delle aree collinari e montuose, frenata poi dalla legislazione medicea che pose nuovi severi vincoli al taglio dei boschi (leggi del 1622, 1633, 1646). La successiva legislazione leopoldina (leggi del 1776 e 1780), eliminando i vincoli precedenti, favorì una netta ripresa dell'attività di disboscamento che raggiunse il suo massimo nella seconda metà del 1700. A partire dal XVII sec. diventano sempre più numerosi i documenti storici, cartografici e bibliografici, che testimoniano il progressivo intensificarsi del rapporto tra uomo e fiume, soprattutto durante l'epoca delle grandi sistemazioni idrauliche che interessarono numerose aree della Toscana. Il sistema di arginature longitudinali e trasversali, ancor oggi osservabili nel fondovalle del Mugello, è quindi il risultato di interventi discontinui e disorganici realizzati in varie epoche (NATONI, 1944). Contemporaneamente, dalla frammentarietà della piccola proprietà si passò gradualmente al latifondo, sempre restando attivo il rapporto di mezzadria, e quindi la policoltura, ma privilegiando ulteriormente le colture cerealicole, che si estesero ancora. Mentre permaneva un clima caratterizzato da una certa «aggressività», come testimoniato dagli estesi movimenti franosi che nel 1641 colpirono il versante settentrionale del Gruppo del Falterona (GRAZI, 1966), questo complesso di situazioni naturali ed antropiche favorì a lungo il processo di erosione del suolo sui versanti e di sedimentazione nella piana alluvionale. Il succedersi di questi eventi è chiaramente registrato in una sezione naturale ubicata sulla sponda sinistra della Sieve (località Fondaccio) poco a monte della confluenza col Torrente Bagnone, in corrispondenza della parte concava di un ampio meandro in fase di rapida evoluzione. Anche in questo caso la successione stratigrafica è risultata analoga a quella riscontrata nelle sezioni precedenti (RODOLFI, 1994a). Al passaggio fra il livello grossolano di base e quello fine superiore sono stati rinvenuti alcuni frammenti di tronchi d'albero, determinati come *Populus* o *Salix* (l'incertezza deriva dal loro cattivo stato di conservazione). Il campione Rome 434 ha fornito una età di 270 ± 50 anni B.P.; in termini di età calibrata (STUIVER & REIMER, 1993) la pianta risulta morta in un intervallo di tempo compreso fra il 1625 ed il 1670 A.D. Ciò significa che i sedimenti fini che l'hanno ricoperta si sono depositati posteriormente a tale periodo.

Caratteristica comune alle tre diverse sezioni (Bilancino, Mozzete, Fondaccio) risulta essere il sovrapporsi di un livello fine ad uno basale grossolano, anche se alla loro interfaccia sono stati portati alla luce reperti di età diversa. La sepoltura del tronco rinvenuto al Fondaccio sotto a circa 2 m di sedimenti fini nettamente stratificati, con livelli millimetrici di materiale organico chiaramente corrispondenti ad altrettanti successivi episodi di esondazione, suggerisce un tasso particolarmente elevato (quasi 1 cm all'anno, in media) di aggradazione

FIG. 3 - La situazione di estremo degrado dei versanti montani (Passo della Colla di Casaglia) in una cartolina dei primi anni di questo secolo. Si noti la totale assenza di vegetazione forestale.

FIG. 3 - Extreme degradation of mountain slopes, as illustrated in a postal card of the beginning of this century (Colla di Casaglia Pass).

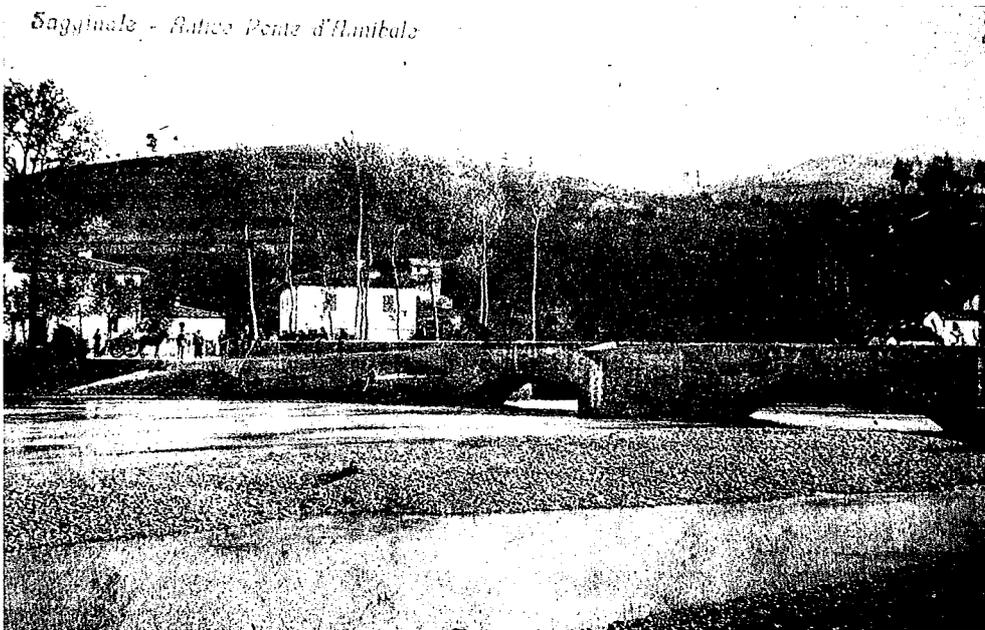


FIG. 4 - Ancora una immagine da una cartolina degli inizi del secolo che ci mostra le conseguenti condizioni di grave sovralluvionamento nell'alveo della Sieve (ponte di Sagginale). In questa situazione, deflussi anche non eccezionali potevano determinare frequenti esondazioni.

FIG. 4 - Another picture from the early '900, showing the strong aggradation in the Sieve River channel (Sagginale bridge).

della pianura alluvionale della Sieve negli ultimi tre secoli<sup>(1)</sup>.

Il fatto che nel livello limoso-sabbioso la stratificazione sia ben conservata ed evidente, non rimaneggiata dalle ara-

(1) In un'area degli Stati Uniti meridionali sono segnalati notevoli spessori di sedimenti depositati durante gli ultimi 150 anni, come risultato di una rapida accrezione verticale (quasi 5 m tra il 1839 e 1930) (SCHUMM & alii, 1984). Nel caso del Fiume Vistula (Polonia) sono segnalati spessori di depositi di esondazione recenti, nelle immediate adiacenze dell'alveo, di oltre 4 m, la cui sedimentazione è stata favorita e accelerata a causa degli interventi di canalizzazione e di arginatura durante gli ultimi 150 anni (LAJZAK, 1995). Altri tassi di accrezione verticale sono documentati anche da MACKLIN & alii (1992).

ture, può significare che la pianura alluvionale si trovava ancora allo stato naturale. Si è indotti a pensare che, fino a quel momento, gli interventi di difesa dagli eventi alluvionali fossero solo puntuali, come dimostrato da una serie di mappe dell'epoca reperite presso l'Archivio di Stato di Firenze (RINALDI & RODOLFI, 1993; RINALDI, 1995) o che, comunque, gli stessi fossero talmente frequenti da scoraggiare l'uso agricolo di gran parte della pianura anche per colture cerealicole. Oltre alla particolare posizione di fondovalle, allora molto più soggetto di oggi a gelate precoci e tardive, doveva sussistere una accentuata differenza di quota fra le aree immediatamente adiacenti all'alveo e quelle distali più depresse (caratteristica che abbiamo detto essere tipica di ogni pianura alluvionale), che favoriva il



prio in seguito all'alluvione del 1844: fu realizzata una serie di casse di espansione, delimitate da argini longitudinali e trasversali, che svolgevano nello stesso tempo il doppio ruolo di regimare le acque durante le piene e favorire una progressiva colmata dei terreni più bassi. Gli eventi naturali critici cominciarono a rarefarsi, man mano che con la metà del XIX secolo si andava esaurendo la Piccola Età Glaciale. Il clima tese progressivamente, da allora, verso quella nuova fase di aumento della temperatura che è tutt'ora in atto. In seguito alla realizzazione del sistema di arginature, le zone golenali comprese entro gli argini assunsero la funzione di pianura inondabile (allagata, cioè, quasi annualmente), molto meno estesa, però, della pianura alluvionale naturale. Queste mutate condizioni causarono una sedimentazione obbligata entro gli argini, con tassi accelerati di accrezione verticale. Inoltre si verificò una differenziazione più marcata fra i processi che si esplicavano all'interno dell'alveo di piena ordinaria e quelli che interessavano le zone golenali, analogamente a quanto descritto per altri sistemi fluviali soggetti a canalizzazioni ed arginature (LAJCZAK, 1995). L'attività agricola si estese all'intera pianura, sempre nella ormai caratteristica forma del seminativo arborato. Le lavorazioni sconvolsero la parte superiore della successione sedimentaria, facendo apparire massivo e privo di stratificazione il livello superficiale per almeno 50 cm (RODOLFI, 1994a). Sostenuta anche da una meccanizzazione rudimentale, la conduzione mezzadrile raggiunse il suo massimo sviluppo; la produttività della terra aumentò, anche grazie all'uso dei primi fertilizzanti artificiali, ma anche a causa di arature più profonde e nel senso della massima pendenza del versante, che agevolarono ulteriormente il processo erosivo. Le immagini fotografiche del tempo mostrano pendici collinari dolci e pianure densamente coltivate a seminativo arborato, ma anche versanti montani spogli di vegetazione e con estesi affioramenti di roccia (fig. 3). Gli alvei appaiono invece ovunque in chiaro sovralluvionamento, tale da ridurre di molto le luci dei ponti (fig. 4) e da rendere annuale il manifestarsi di inondazioni, peraltro ben sopportate dal sistema di difesa idraulica appena realizzato.

Una seria politica di bonifica montana, che mirava alla ricostituzione del manto forestale ed alla regimazione idraulica, fu finalmente attuata: una legge del 1923 riconosceva come assolutamente necessarie una serie di sistemazioni idraulico-forestali e di rimboschimento delle aree montane. In particolare (NATONI, 1944) i bacini montani che rientrarono in tale disposizione legislativa furono quello del Rufina (Decreto del 1926), dell'Ensa, del Moscia e del Rincine (Decreti del 1930), dell'Alta Sieve e del S. Godenzo (Decreti del 1931), del Carza e del Carlone (Decreto del 1932). Per eseguire tali lavori furono costituiti Consorzi di proprietari interessati che, avuta in concessione l'esecuzione dei lavori, provvidero alla costruzione di briglie ed a lavori di consolidamento e rimboschimento dei versanti. Nel 1956 i terreni rimboschiti nel bacino della Sieve si estendevano complessivamente per 806 ettari; inoltre furono ricostituiti 193 ettari di boschi deteriorati (GIULIANI, 1956). Tra i tipi prevalenti di sistema-

zioni idraulico-agrarie vennero realizzati i terrazzamenti, specialmente nell'ultimo tratto del corso della Sieve, mentre nella parte alta del bacino si preferirono ciglioni, spesso alternati ai terrazzamenti o ai gradoni. Sistemazioni più intensive con affossatura trasversale rettilinea ad andamento orizzontale, od anche a cavalcapoggio, alternate al ciglionamento, furono realizzate sulle terre a modesta pendenza tra Vicchio e Borgo, anche se non diffusamente. Nei primi decenni di questo secolo, in definitiva, nel bacino della Sieve le sistemazioni idraulico-forestali risultavano interessare dal 70 all'80% della superficie catastale collinare.

A partire dal dopoguerra si verificarono, come altrove, profonde trasformazioni nel tessuto sociale mugellano. La crescente industrializzazione richiamò nei centri urbani di fondovalle, o nelle grandi città, la popolazione rurale che sfruttò largamente la sola occasione per sfuggire al «giogo» mezzadrile. A cominciare dalle aree più marginali e svantaggiate (montagna ed alta collina) si assisté ad un rapido abbandono dell'agricoltura, cui seguì un altrettanto convulsa urbanizzazione del fondovalle. Il «boom» edilizio e della viabilità nazionale, che caratterizzò i primi anni '60, richiese una enorme quantità di materiali inerti che furono direttamente strappati, oltre misura, agli alvei dei corsi d'acqua. Il paesaggio agrario ne risultò, nel giro di pochi anni, completamente modificato (RODOLFI & alii, 1978; RODOLFI, 1988). L'effetto benefico dell'estendersi del bosco nei terreni di montagna, rimasti incolti, fu però obliato da una nuova conduzione dell'attività agricola nella sottostante collina e nel fondovalle: alla minuta trama delle colture promiscue, che caratterizzava il «podere» mezzadrile, fu progressivamente sostituita una agricoltura estensiva e specializzata, quasi totalmente meccanizzata, che tornò a privilegiare le colture erbacee (grano, mais). I livellamenti con mezzi meccanici, per rendere le pendici collinari adatte ai nuovi sistemi di conduzione, alterarono profondamente lo schema delle sistemazioni idraulico-agrarie, fino ad allora mantenute ad un livello ottimale di efficacia. Nello stesso tempo estese superfici venivano rese definitivamente impermeabili con il procedere della espansione dei centri urbani ed industriali. Il risultato pressoché immediato di questi interventi sul ciclo idrologico fu quello di favorire il rapido ruscellamento superficiale delle acque, a scapito dell'infiltrazione, e di accorciare notevolmente i tempi di corrivazione. Le piogge eccezionali che flagellarono il bacino dell'Arno ai primi del Novembre 1966 trovarono quindi un territorio in condizioni tali da non potere non amplificarne gli effetti. In Mugello le acque furono convogliate rapidamente negli alvei; si espansero con estrema violenza nella pianura, ruppero in più punti gli argini danneggiando seriamente le opere idrauliche rimaste nel frattempo prive di manutenzione, ed incisero gli alvei abbassandone in alcuni punti il livello di oltre un metro (RODOLFI, 1994a) con gravi effetti sulla falda freatica adiacente (RINALDI & RODOLFI, 1993).

Dopo l'evento del 1966, forse a causa dell'aumentata sezione idraulica dei corsi d'acqua, o per il susseguirsi di annate poco piovose, per molti anni non si verificarono nel bacino dell'Arno eventi di piena degni di nota. I piani

«di immediato intervento» per prevenire il ripetersi di simili catastrofi persero di attualità, mentre le competenze in materia di difesa idraulica del territorio furono «diluite» fra vari Enti, senza che il problema venisse affrontato nella sua globalità. Per quanto concerne la Sieve, negli ultimi decenni il forte incremento demografico ed il conseguente sviluppo di insediamenti ed infrastrutture nelle immediate adiacenze dell'alveo modificarono profondamente il ruolo delle aree che in passato erano normalmente soggette alle esondazioni del fiume. I vecchi sistemi di contenimento e di regimazione legati al funzionamento delle casse di espansione caddero in disuso e numerosi argini facenti parte di tale sistema furono rimodellati dalle attività antropiche. Eventi alluvionali con parziale inondazione della pianura si sono verificati nel Dicembre 1981 e nell'autunno del 1991 e 1993, a segnalare un nuovo ritorno a situazioni di rischio.

## EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELL'ALVEO

Lo studio della evoluzione morfologica dell'alveo della Sieve si è basato sia sulla documentazione storica reperita presso Archivi e Biblioteche, che sul confronto fra cartografie, fotografie aeree, profili altimetrici longitudinali e sezioni topografiche trasversali rilevate in momenti diversi, più o meno lontani fra di loro. Le prime informazioni utili risalgono al XVII secolo, epoca a cui si riferiscono le prime carte storiche che riportano con sufficiente precisione la forma di alcuni tratti dell'alveo. Anche in questo caso si è ritenuto opportuno distinguere due principali fasi evolutive, tenendo sempre presenti le relazioni fra attività antropica e dinamica ambientale. Per la prima, coincidente approssimativamente con la Piccola Età Glaciale, e quindi antecedente all'evento alluvionale del 1844, le informazioni deducibili da cartografia storica sono limitate e puntuali; la seconda, dal 1850 ad oggi, è ovviamente più ricca di documentazione di qualsiasi tipo.

### *Il periodo precedente al 1850*

Le informazioni ricavate dalle fonti storiche riguardano sia la forma dell'alveo in condizioni relativamente naturali, che gli interventi di sistemazione idraulica realizzati durante gli ultimi secoli. La maggior parte della documentazione rientra nei fondi della Magistratura dei Capitani di Parte Guelfa (Archivio di Stato di Firenze), Ufficio allora competente per la manutenzione della rete viaria della Toscana, nonché per la sorveglianza e regimazione dei corsi d'acqua. Le carte storiche relative al XVIII secolo evidenziano un corso d'acqua con tracciato a sinuosità medio-bassa (tipo *wandering* o *pseudo-meandering*) che può essere considerato come una forma di transizione tra rettilineo, meandriforme e a canali intrecciati, nella quale i caratteri di sinuosità e di intrecciamento coesistono in di-

versa misura (CARSON & GRIFFITHS, 1987; BILLI, 1988; FERGUSON & ASHWORTH, 1991) (Fig.5). La pianura alluvionale era progressivamente rimodellata e costruita dalle continue divagazioni laterali del corso d'acqua, attraverso l'accrescimento di barre laterali o di meandro e la sedimentazione di depositi di esondazione. L'alveo era generalmente caratterizzato da un canale principale attivo, che scorreva con media sinuosità tra barre laterali alternate; a tratti veniva affiancato da un canale secondario di taglio che causava talvolta la formazione di barre longitudinali ed un conseguente aumento locale del grado di intrecciamento. Le carte e le altre fonti storiche documentano numerose tecniche di sistemazione idraulica (arginature, difese e sistemazioni delle sponde attraverso palificate, steccate, fascinate) praticate soprattutto a partire dalla seconda metà del 1600. L'ubicazione degli argini e delle opere di difesa di sponda era regolamentata, su decisione dei tecnici dei Capitani di Parte Guelfa, dalle cosiddette linee terminatrici o terminazioni del fiume (Fig.5): si stabiliva cioè *...che venisse fatta al suddetto fiume, col quale alcuni effetti de confinanti litigavano, una terminazione alla larghezza... acciocché fuori alle linee terminatrici assegnate potesse ognuno di essi fabbricare de ripari...* (Capitani di Parte Guelfa, Filza 1149). In seguito ai continui interventi di sistemazione idraulica il fiume subiva una progressiva regolarizzazione del tracciato e un restringimento dell'alveo di piena.

### *Il periodo 1850-1996*

Al fine di analizzare le variazioni planimetriche dell'alveo in tempi più recenti, sono state esaminate la Carta Topografica dello Stato Pontificio e del Granducato di Toscana (1851), la cartografia storica dell'Istituto Geografico Militare (1890-1904) e tutte quelle disponibili relative al nostro secolo. Durante tale intervallo di tempo il fiume ha mantenuto abbastanza inalterato il suo tracciato planimetrico, ad eccezione del tratto compreso tra la località Le Lazze e la confluenza del T. Bagnone (in prossimità della quale è ubicata la sezione del Fondaccio). In tale tratto si riscontra la situazione con la maggiore mobilità planimetrica, consistente nella rapida evoluzione di un meandro manifestatasi a partire dal 1947 e tutt'ora in atto. Le variazioni altimetriche dell'alveo sono sufficientemente note dal 1844, anno del primo rilievo topografico (MANETTI & RENARD, 1847), mentre non si hanno dati certi relativamente al periodo precedente. Si può comunque escludere, in base alle testimonianze storiche, che l'alveo fosse in abbassamento prima del 1844, nonostante i continui interventi idraulici di restringimento dell'alveo di piena e di regolarizzazione del tracciato. Al contrario, si pone più volte l'accento sulla tendenza verso un continuo innalzamento del fondo (MOROZZI, 1762; ROSSINI, 1852; NATONI, 1944). Nella fig. 6 sono rappresentati tre profili longitudinali della Sieve nel tratto preso in esame, relativi a tre epoche diverse: 1844-47 (dopo l'alluvione del 1844), 1971 (dopo l'alluvione del 1966) e 1988-89. Il loro confronto di

FIG. 7 - Variazione dell'area bagnata delle sezioni tra il 1971 ed il 1989: 1) erosione; 2) sedimentazione.

Fig. 7 - Cross-section area changes referred to 1971 and 1989: 1) erosion; 2) sedimentation.

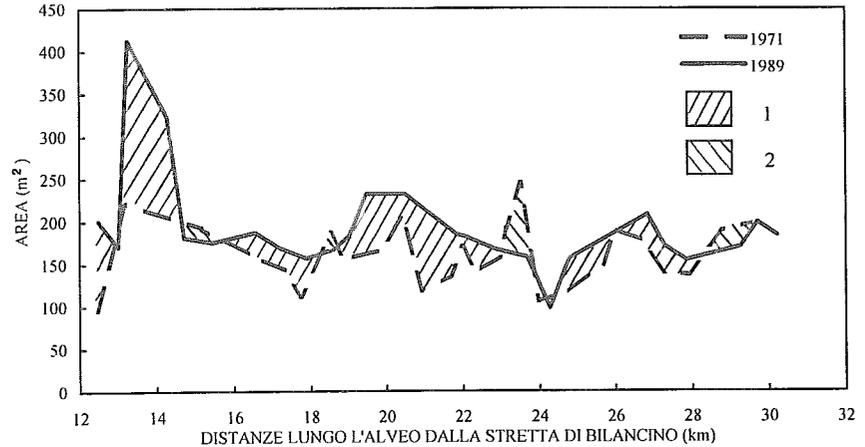


FIG. 8 - I processi di erosione di sponda, secondo meccanismi di scioglimento planare o rotazionale, interessano a volte ininterrottamente lunghi tratti dell'alveo.

Fig. 8 - Bank erosion processes, by planar or rotational failure, are continuously interesting long reaches of the channel.



mostra un generale abbassamento, sia pure non uniforme. Si notano le seguenti anomalie: a) evidente abbassamento localizzato (circa 4 metri) immediatamente a valle del ponte della S.S. del Giogo all'altezza di S. Piero a Sieve; si tratta dell'effetto conseguente alla realizzazione, prima del 1988, di una briglia a difesa del ponte stesso; b) coincidenza dei tre profili in corrispondenza del ponte di Borgo S. Lorenzo; le sue pile sono fondate su di una soglia continua in calcstruzzo; c) all'altezza del Ponte a Vicchio, la quota del fondo nel 1844 risulta sensibilmente più elevata rispetto a quelle del 1971 e del 1989, che invece coincidono; l'incisione verticale può aver asportato la coltre alluvionale e raggiunto il substrato roccioso.

Se si escludono questi effetti puntuali e del tutto occasionali, risulta confermato un abbassamento medio del fondo dell'ordine di 2-3 metri, che ha interessato l'intero tratto di fiume che attraversa il Mugello. Non è possibile, tut-

tavia, risalire al momento in cui il processo si è innescato. Significativa è però la coincidenza, per alcuni tratti, del profilo del 1971 con quello del 1844-47, a dimostrazione del fatto che l'abbassamento si è verificato, almeno in questi, negli ultimi decenni. Per la rimanente parte del tracciato, in cui si osserva invece una differenza già tra il 1844-47 ed il 1971, il processo è probabilmente divenuto attivo a partire dall'evento alluvionale del 1966. Non è tuttavia da escludere che la probabile fase di aggradazione in cui si trovava l'alveo nel 1844 sia proseguita anche durante i decenni successivi, fino a raggiungere un massimo agli inizi del 1900 (periodo cui si riferiscono le figg. 3 e 4) e che la fase di abbassamento si sia già innescata prima del 1971, seppure con tassi inferiori rispetto a quelli degli ultimi decenni. Il rilievo topografico eseguito nel 1971 ha consentito inoltre un confronto delle sezioni trasversali con quelle più recentemente rilevate nel 1988-89 a cura dell'Ufficio

Idrografico dell'Arno. I due parametri morfologici che esprimono meglio le variazioni di forma dell'alveo e che sono più direttamente legati ai processi evolutivi sono la larghezza e l'area della sezione, misurate facendo riferimento alla massima altezza idrometrica contenibile all'interno dell'alveo di piena. Il confronto tra le aree delle sezioni mostra come prevalgano i tratti in erosione, cioè quelli in cui l'area è aumentata in conseguenza dei processi di abbassamento e di erosione laterale (fig. 7).

Il periodo di tempo in cui si è manifestato l'abbassamento del fondo risulta essere in stretta concomitanza con il periodo di più intensa estrazione di materiali inerti dall'alveo, fattore che può essere quindi considerato come la principale causa di innesco del fenomeno. Nello stesso intervallo di tempo un analogo ruolo, sia pure marginale, può essere stato svolto dagli interventi di sistemazione idraulico-forestale che sono stati intrapresi in molte parti del bacino a partire dagli anni 30, i quali hanno provocato una drastica riduzione di alimentazione di sedimenti da parte degli affluenti della Sieve rispetto alle epoche precedenti. Anche la realizzazione di piccoli invasi per l'irrigazione, secondo un criterio di incremento della produttività agricola adottato nello stesso periodo, può aver contribuito a trattenere in collina volumi, ancorché insignificanti, di sedimenti. Gli effetti dell'estrazione di materiale da un alveo fluviale sono stati relativamente poco studiati rispetto a quelli provocati da altri tipi di interventi o di condizionamenti antropici. L'escavazione di materiale dall'alveo di un fiume può causare la formazione di un punto di inflessione nel profilo longitudinale che migra gradualmente verso monte per erosione regressiva (*nickpoint migration*, SCHUMM, 1977). Le conseguenze di una estrazione di materiale prolungata nel tempo possono essere risentite anche a valle del punto di escavazione, causando possibili variazioni, oltre che del profilo longitudinale, anche della larghezza dell'alveo e della composizione granulometrica del materiale (LAGASSE & *alii*, 1980; CHANG, 1987). Nel punto o nel tratto di escavazione si verifica infatti un intrappolamento di parte del materiale trasportato sul fondo, cosicché la portata solida a valle viene ad essere privata di una certa frazione, mentre la portata liquida rimane invariata. Ciò comporta un eccesso di capacità di trasporto per cui nuovo materiale viene preso in carico dalla corrente; si innesca allora una fase di abbassamento, con conseguente riduzione della pendenza a valle del punto di escavazione, che si protrae fino a che il bilancio tra portata solida proveniente da monte e capacità di trasporto della corrente non si ristabilisce (CHANG, 1988; MONTEFUSCO & *alii*, 1987). Nel caso della Sieve l'evoluzione altimetrica e le variazioni della pendenza del fondo sono complicate dal fatto che l'escavazione è stata effettuata in maniera diffusa e prolungata in diversi punti del tratto mugellano, causando così una complessa sovrapposizione di effetti risentiti sia verso monte che verso valle<sup>(2)</sup>.

(2) Gli effetti dell'abbassamento del fondo si riflettono direttamente sulla stabilità dei manufatti, in particolare dei ponti. Ad esempio, nel corso dell'evento alluvionale del 1966 si verificò il crollo di un ponte pedonale che attraversava la Sieve poco a monte di una zona di estrazione; lo stesso ponte di S. Piero a Sieve rischiò di crollare per scalzamento della pila centrale. L'abbassamento lungo l'alveo principale causò inoltre l'innesco di erosione regressiva lungo alcuni affluenti, determinando in alcuni casi (es. Bagnone e Levisone) il crollo, per erosione al piede o sifonamento, di importanti opere di protezione idraulica. Un altro importante effetto dell'abbassamento del fondo è quello di far assumere alle sponde maggiore altezza e pendenza e quindi di incrementarne la loro instabilità nel caso che la loro base sia erosa dalla corrente.



FIG. 9 - Aspetto di una sponda-tipo: il livello ghiaioso-ciottoloso di base passa verso l'alto a sedimenti fini di esondazione. Il contatto fra i due depositi è coperto da una coltre di materiale appena franato dalla parte sommitale della sponda.

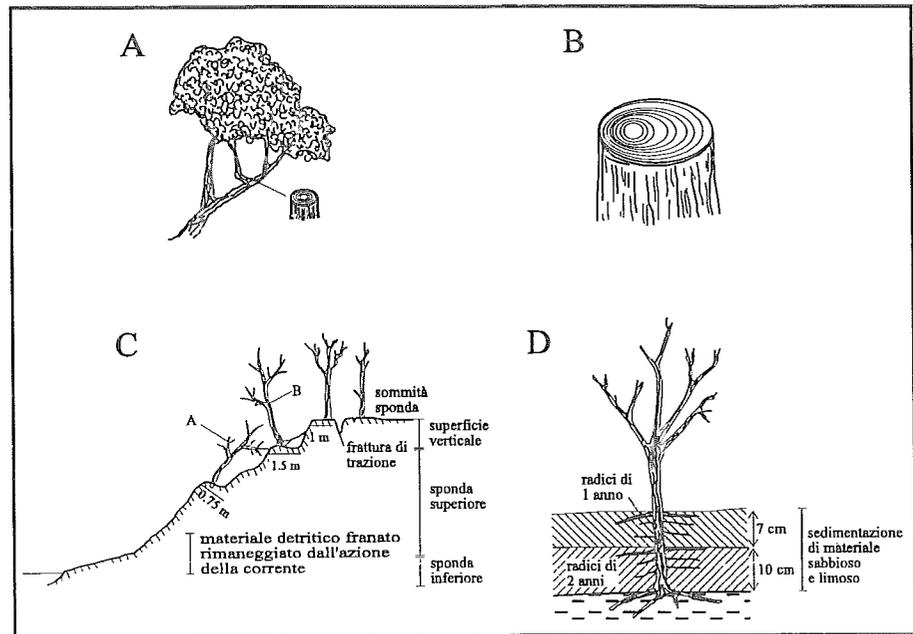
FIG. 9 - A typical bank of the Sieve River: a basal gravelly layer is overlapped by overbank fine sediments. The contact between these deposits is hidden by a thick debris cover, just fallen from the upper part of the bank.

## CARATTERI GEOMORFOLOGICI ED EVOLUZIONE DELLE SPONDE

I processi di erosione di sponda, accentuati dall'abbassamento del fondo dell'alveo, costituiscono una caratteristica predominante nella attuale dinamica del corso d'acqua (fig. 8). L'analisi delle forme e dei processi che caratterizzano le sponde si è basata su di una combinazione di osservazioni e di misure, riguardanti sia le caratteristiche generali (geometria, tipo di materiale, tipo di vegetazione) che i processi in atto (erosione fluviale, degradazione meteorica, movimenti di massa). I principali parametri morfometrici delle sponde, altezza e pendenza, sono stati misurati direttamente in campagna, scegliendo una trentina di tratti rappresentativi, ubicati in corrispondenza delle sezioni topografiche trasversali relative all'ultimo rilievo disponibile (1988/89) dell'Ufficio Idrografico dell'Arno. L'altezza risulta in generale

FIG. 10 - Tecniche di dendrocronologia applicate all'ambiente fluviale (da SIMON & HUPP, 1992, modificato). A: crescita di rami avventizi; B: crescita eccentrica delle cerchie annuali; C: tipico assetto della vegetazione in una sponda instabile; D: determinazione del tasso di sedimentazione alla base della sponda.

FIG. 10 - Dendrochronologic techniques applied to the fluvial environment (from SIMON & HUPP, 1992, modified). A: adventitious sprouts from tilted parent; B: eccentric growth of annual tree-rings; C: typical vegetational features on an unstable bank; D: generalized form of buried sapling.



compresa tra 2,5 e 6 m; la pendenza media varia tra  $10^\circ$  e  $90^\circ$ . Le sponde sono, nel 65% dei casi, di tipo composito, con un livello basale prevalentemente ghiaioso, di spessore variabile tra 0,5 m e 2,5 m, sovrastato da un livello di materiale limoso-sabbioso di esondazione, di spessore variabile tra 2 m e 4 m. Per il restante 35% le sponde rilevate sono costituite da materiale limoso-sabbioso relativamente omogeneo.

I processi che concorrono all'erosione di una sponda possono essere complessivamente distinti in due principali gruppi (THORNE, 1982): (a) processi di erosione fluviale, dovuti all'azione della corrente (*basal undercutting*) e (b) processi di degradazione meteorica e di dilavamento. La loro combinazione favorisce o innesca direttamente una serie di meccanismi di rottura, strettamente legati alla geometria della sponda ed alle proprietà geotecniche del materiale (THORNE, 1982; LAWLER, 1992). Nel caso in esame, per quanto riguarda le sponde composite, è stato osservato generalmente un elevato addensamento ed embriciamento del livello ghiaioso basale. L'azione combinata di erosione fluviale e di degradazione subacrea o subacquea concorre alla formazione di un accumulo di materiale detritico sciolto alla base della sponda; sono così distinguibili due porzioni del livello basale, caratterizzate da angoli di attrito e di resistenza rispetto all'azione erosiva della corrente marcatamente differenti (THORNE & TOVEY, 1981). Il livello basale nel suo complesso risulta esposto all'azione erosiva della corrente con maggior frequenza rispetto al livello limoso-sabbioso soprastante; inoltre il materiale ghiaioso-sabbioso è in genere più facilmente erodibile rispetto alla porzione coesiva. Il risultato di questa erosione differenziale esercitata dalla corrente è uno scalzamento alla base della sponda che induce continui crolli e ribaltamenti di blocchi aggettanti del livello coesivo (*cantilever*, THORNE & LEWIN, 1979; THORNE & TOVEY, 1981).

Un processo comunemente osservato nel materiale sommitale è la formazione di fessure da disseccamento, in particolare su pareti subverticali prive di vegetazione (fig. 9). Durante le precipitazioni successive allo svilupparsi di tali fessure, l'acqua penetra al loro interno e causa una asportazione di materiale sotto forma di aggregati di limitato volume (THORNE, 1982; LAWLER, 1992). I tipi di movimenti di massa più frequentemente osservati sulle sponde sono gli scivolamenti planari (fig. 8 e fig. 9), cioè movimenti lungo una superficie inclinata che, passando per la base del livello sabbioso-limoso, si raccorda ad una frattura di trazione subverticale (*slab failure* o *planar failure*, HOECK & BRAY, 1981). Tali meccanismi sono fortemente influenzati dalle rapide variazioni dei livelli idrometrici durante le piene e, di conseguenza, dalle pressioni interstiziali nella sponda (CASAGLI & RINALDI, 1994). In particolare, le condizioni di massima instabilità si verificano durante la fase di rapido abbassamento del livello idrometrico nell'esaurirsi della piena (T'WIDALE, 1964; HOOKE, 1979). Il materiale derivante dai vari meccanismi di rottura che non viene preso immediatamente in carico dalla corrente, unitamente a quello prodotto dai vari processi di erosione fluviale, degradazione meteorica e dilavamento, tende a rimanere depositato alla base della sponda, almeno per un certo tempo. La probabilità di rimozione o di definitivo stabilizzarsi di tale accumulo dipende principalmente dal bilancio tra tasso di alimentazione da parte dei processi che agiscono sulla sponda e tasso di asportazione ad opera della corrente, secondo un meccanismo noto come controllo del punto basale (*basal endpoint control*: CARSON & KIRKBY, 1972; THORNE, 1982).

#### La vegetazione riparia

Diversi Autori hanno evidenziato l'importante ruolo svolto dalla vegetazione, non solo come fattore principale

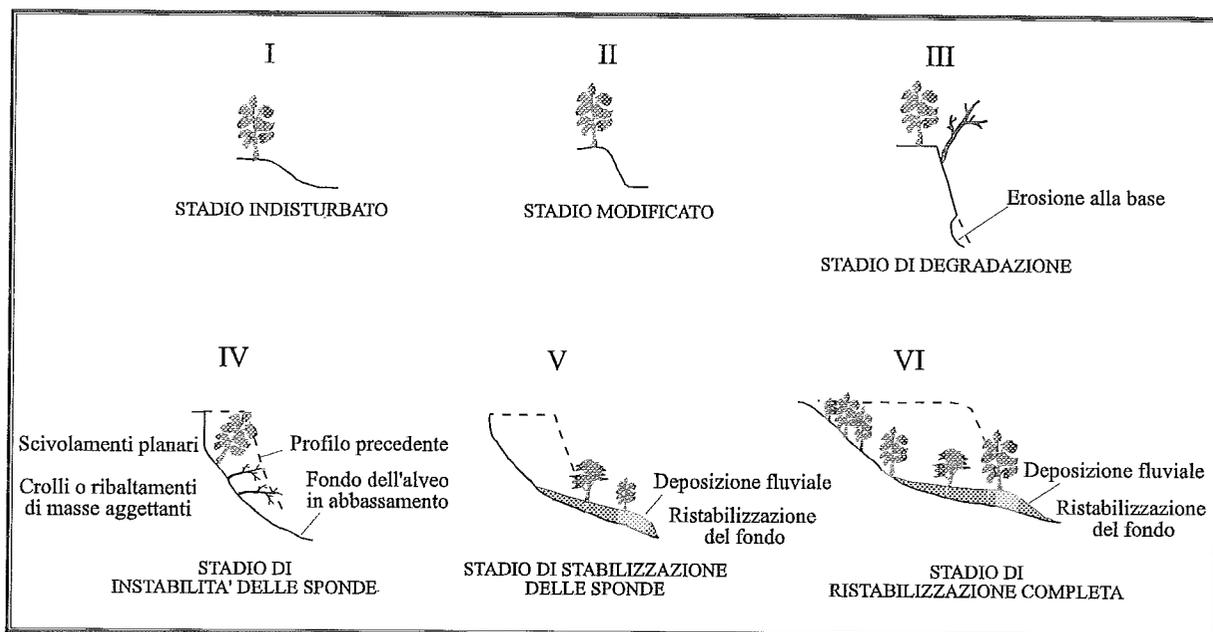


Fig. 11 - Modello di evoluzione morfologica delle sponde del Fiume Sieve.

Fig. 11 - Model of channel banks evolution of the Sieve River

nell'influenzare la stabilità delle sponde fluviali (CHARLTON, 1982; THORNE, 1990), ma nello stesso tempo come indicatore dei processi attivi nell'intero ambiente fluviale (HUPP & SIMON, 1986, 1991; HUPP, 1988; 1990). Si descrivono di seguito i caratteri generali della vegetazione delle sponde della Sieve, riportando in sintesi quanto più dettagliatamente illustrato in un recente rilevamento (GRAZI & RODOLFI, 1992). L'alveo è caratterizzato da una certa diffusione di vegetazione pioniera, con dominanza di salici (*Salix sp.*); normalmente essi formano una fascia continua lungo la base della sponda, soprattutto dove la sommersione delle acque è più rara; vi compaiono altre specie, come l'ontano nero (*Alnus glutinosa*), il pioppo nero (*Populus nigra*), il gattice (*Populus alba*), la robinia (*Robinia pseudoacacia*). Le altezze dei salici e degli ontani variano normalmente da un minimo di qualche metro ad un massimo di una decina di metri. In situazioni di instabilità delle sponde per erosione in atto domina la robinia, che si adatta a crescere oltre l'alveo di piena ordinaria, al limite esterno più elevato della vegetazione riparia, segnando il confine con le colture agricole; nello strato superiore le dimensioni delle piante arboree sono ridotte sia in altezza (15-20 m) che in diametro (massimo 15 cm); alle prevalenti robinie possono mescolarsi altre essenze, come il pioppo nero; nello strato inferiore, molto denso e talora impenetrabile, si ritrovano frequentemente l'acero di monte (*Acer pseudoplatanus*), il carpino nero (*Ostrya carpinifolia*), il tiglio platifillo (*Tilia platyphyllos*), il ciliegio (*Prunus avium*) e alcune essenze arbustive: il sambuco (*Sambucus racemosa*), il biancospino (*Crataegus monogyna*), il ligustro (*Ligustrum vulgare*; in corrispondenza di tratti di sponda soggetti ad erosione basale, la robinia rimane isolata nella parte superiore della scarpata. I corpi sedimentari basali sono spesso occupati da pian-

te pioniere, con alcuni individui isolati di robinia che non superano normalmente i 6-7 m, in quanto, in occasione delle piene, lo sviluppo delle piante è continuamente interrotto.

Nel tratto inferiore del fiume, per le condizioni geomorfologiche del fondovalle e dell'alveo già sottolineate in precedenza, la vegetazione in alveo ha minori possibilità di insediarsi, mentre la vegetazione riparia, sebbene costretta entro scarpate piuttosto strette, può evolvere verso forme di maggiore stabilità, anche a causa di un più limitato intervento antropico per scarsità di aree coltivabili e per la presenza del bosco nelle immediate adiacenze dell'alveo. In tali situazioni le piante (pioppi, aceri, ontani) raggiungono maggiori dimensioni.

La presenza o l'assenza di alcune specie o di particolari associazioni vegetali possono fornire importanti indicazioni sulla tendenza evolutiva della sponda (HUPP, 1988). Informazioni altrettanto utili sui processi di erosione e di sedimentazione in atto e sui meccanismi di rottura che interessano le sponde, normalmente non ricavabili attraverso altri metodi idrologici e/o geomorfologici, possono derivare dall'applicazione di tecniche di dendrocronologia condotte sulla vegetazione riparia (HUPP & SIMON, 1986; HUPP, 1987). Queste sono state applicate sulle sponde della Sieve (RINALDI, 1995) in alcune situazioni rappresentative (fig. 10). In particolare, sono stati usati due tipi di evidenze botaniche relative ai meccanismi di rottura (fig. 10): (a) crescita di rami avventizi, e (b) crescita eccentrica. Essi sono comuni quando il tronco della pianta si inclina o si piega in conseguenza di movimenti di massa sulla sponda, in seguito ai quali si può verificare o la crescita di rami avventizi verticali o una crescita eccentrica delle cerchie annuali. Attraverso l'analisi dendrocronologica si può risalire all'an-

no esatto in cui si è verificato l'evento che ha causato lo spostamento dalla verticale della pianta. Un terzo tipo di informazione riguarda il tasso medio di sedimentazione alla base della sponda (fig. 10.D), valutando lo spessore di materiale sedimentato al di sopra dell'apparato radicale e dividendo tale spessore per l'età della pianta. Tali analisi, condotte su sei sponde rappresentative, hanno evidenziato in quattro casi una sedimentazione alla base della sponda con tassi compresi tra 1,5 e 9 cm/anno; hanno inoltre consentito di attribuire agli eventi di piena del 1991 e del 1993 alcuni scivolamenti planari, più raramente planorotazionali, che in quelle occasioni interessarono le sponde.

### *Evoluzione geomorfologica delle sponde*

Diversi Autori hanno dimostrato l'esistenza una stretta relazione tra variazioni altimetriche del fondo e stadi di evoluzione morfologica delle sponde di un alveo fluviale (SCHUMM & *alii*, 1984; HARVEY & WATSON, 1986; SIMON, 1989). I modelli di evoluzione geomorfologica proposti sono basati sul concetto di migrazione spazio-temporale delle forme e dei processi (SCHUMM & KHAN, 1972): in seguito alla migrazione verso monte dell'abbassamento del fondo (erosione regressiva) i processi che interessano una sezione a valle sono gli stessi che interessano una sezione a monte dopo un certo intervallo di tempo. Modelli di tale tipo sono stati applicati nel caso particolare di fiumi incisi nei depositi loessici che affiorano nella parte centrale degli USA (SCHUMM & *alii*, 1984; SIMON, 1989), soggetti ad una fase abbassamento del fondo dovuta ad interventi di canalizzazione. Una evoluzione geomorfologica simile è stata osservata anche da DARBY & THORNE (1992) e dallo stesso SIMON (com. pers.) anche nel caso di alvei ghiaiosi. Partendo da questo presupposto, le modificazioni morfologiche subite nel corso del tempo dall'alveo e dalle sponde, nonché i processi in atto, sono stati interpretati sulla base del modello proposto da SIMON (1989), adattato opportunamente al caso della Sieve. Il modello riportato in Fig. 11 costituisce una rappresentazione schematica dei processi dominanti e delle relative forme nei vari stadi di evoluzione.

Nello *stadio indisturbato (I)*, cioè nelle condizioni relativamente naturali, osservabili nella cartografia storica (1600-1700), l'alveo è di tipo *wandering* o *pseudomeandering*, con medio-bassa sinuosità, barre longitudinali e laterali prevalenti. Le sponde presentano una altezza limitata ed un profilo a debole inclinazione degradante verso il canale di magra. Situazioni riconducibili a tale stadio si osservano in alcuni punti a valle dell'area di studio (Val di Sieve), che non hanno subito modifiche sostanziali della quota del fondo a causa della presenza di soglie rocciose, come confermato da alcune carte storiche (profili dei ponti sul Fiume Sieve, Miscellanea di Piante, Archivio di Stato di Firenze, XVIII sec.) o bibliografiche (ad esempio NICCOLAI, 1914). L'alveo migra nel tempo lateralmente, erodendo una sponda e deponendo simultaneamente materiale sulla sponda opposta; in virtù di tale combinazione di processi le dimensioni dell'alveo rimangono tuttavia invariate, per lo stabilirsi di una condizione di equilibrio dinamico (LEOPOLD & *alii*, 1964). Il livello ad alveo pieno (*bankfull*

*stage*: WOLMAN, 1955) coincide con la quota della pianura inondabile (*floodplain*). Come è noto, quest'ultima costituisce una superficie pianeggiante costruita dal fiume in determinate condizioni climatiche e comincia ad essere inondata non appena che il pelo libero della corrente supera il livello di alveo pieno. Ciò accade molto frequentemente, in genere quasi annualmente (WOLMAN & LEOPOLD, 1955; LEOPOLD & *alii*, 1964; WILLIAMS, 1978).

Lo *stadio modificato (II)* comprende le modificazioni conseguenti a tutti gli interventi di inalveamento, rettificazione e arginatura (1700-1900) che hanno comportato nel complesso un generale restringimento dell'alveo di piena e una riduzione della sinuosità a causa della regolarizzazione del tracciato. La sedimentazione forzata entro gli argini comporta una aggradazione accelerata nelle aree golenali, quindi un innalzamento della sommità delle sponde. Di conseguenza, nell'ipotesi che il regime idraulico rimanga costante, il precedente livello ad alveo pieno decresce rispetto alla sommità delle sponde; la frequenza delle esondazioni nelle aree golenali, pur diminuendo, si mantiene tuttavia elevata.

Lo *stadio di degradazione (III)* è dominato dal processo di abbassamento del fondo, verificatosi a partire dagli anni '50, riconducibile all'attività di estrazione di inerti e al conseguente deficit di portata solida rispetto alla capacità di trasporto della corrente. Le sponde incrementano progressivamente altezza e pendenza, le barre sono spesso erose. L'eccesso di erosione basale (*excess basal capacity*: THORNE, 1982) è dominante: l'energia della corrente è tale da rimuovere completamente il materiale detritico alla base delle sponde e da produrre un abbassamento del fondo. Il livello ad alveo pieno è progressivamente più basso rispetto alla sommità delle sponde; la pianura precedente, raggiunta dalle acque solo in occasione di eventi eccezionali, diviene terrazzo. Di conseguenza anche il tasso di aggradazione della pianura si riduce.

Nello *stadio di instabilità delle sponde (IV)*, tra i meccanismi di arretramento predominano i movimenti di massa. L'erosione agisce soprattutto alla base della sponda, determinando continui crolli e ribaltamenti di masse aggettanti; i meccanismi di instabilità prevalenti sono gli scivolamenti planari. Attraverso l'abbassamento del fondo e l'allargamento dell'alveo la capacità di trasporto, ancora in eccesso rispetto alla portata solida, tende progressivamente a ridursi. Il controllo del punto basale è dominato dalla condizione di eccesso di erosione basale o di rimozione non impedita (*unimpeded removal*: THORNE, 1982); in questo secondo caso i processi di apporto e di rimozione di materiale si bilanciano tra di loro. La frequenza delle esondazioni che interessano la superficie terrazzata si riduce ulteriormente a causa dell'aumento di area della sezione.

Lo *stadio di stabilizzazione delle sponde (V)* è dominato dall'inizio di sedimentazione alla base della sponda e dalla sua progressiva stabilizzazione. Il bilancio tra capacità di trasporto e portata solida tende verso un nuovo equilibrio; il controllo del punto basale è dominato dalla condizione di rimozione impedita (*impeded removal*: THORNE, 1982), cioè i movimenti di massa apportano materiale alla base della sponda in quantità maggiore di quella che la corrente sia in grado di rimuovere. La forma tipica della sponda, a

partire dalla superficie piana sommitale, è composta da: (a) un tratto superiore verticale; (b) un tratto mediano meno inclinato, costituito da accumulo di materiale franato; (c) uno inferiore, ove si instaurava la vegetazione arborea, composto da materiale franato e rimaneggiato, nonché da materiale derivante da sedimentazione fluviale. Si possono manifestare ancora movimenti di massa sulla parte superiore e mediana della sponda. Cominciano a svilupparsi barre alternate, per cui la sinuosità del canale aumenta progressivamente.

Lo stadio di ristabilizzazione completa (VI) rappresenta la condizione ultima di stabilità: la sponda tende ad assumere definitivamente un profilo generalmente convesso. Il materiale sedimentato alla base della sponda, trattenuto dal crescente sviluppo della vegetazione, determina la progressiva formazione di una coltre detritica la cui superficie assume una debole inclinazione. La forma ed i processi che caratterizzano la porzione inferiore della sponda sono allora riconducibili a quelli dello stadio I. Il livello ad alveo pieno viene a coincidere con la sommità della nuova sponda, formatasi a quota più bassa. Il fiume tende a costruire progressivamente un nuovo livello di pianura inondabile, adattato alla nuova quota del fondo, che torna ad essere inondata poco più che annualmente. Nel complesso l'alveo torna progressivamente in una condizione di equilibrio dinamico.

Situazioni riconducibili allo stadio di ristabilizzazione completa, così come ai primi due stadi, sono attualmente poco rappresentate lungo il tratto di fiume analizzato, mentre le situazioni prevalenti sono quelle relative agli stadi IV e V. Considerando globalmente i processi che si manifestano su entrambe le sponde di uno stesso tratto di fiume, è possibile distinguere due situazioni, a seconda che l'alveo di piena sia relativamente rettilineo o che presenti una certa sinuosità. Nel primo caso, che rappresenta la situazione più ricorrente, si manifesta in genere una simmetria dei processi, cioè le forme e i processi dominanti sulle opposte sponde possono essere interpretate come appartenenti allo stesso stadio di evoluzione. Nel secondo caso esiste, al contrario, una marcata asimmetria, essendo la sponda interna del meandro quella che evolve più rapidamente verso le ultime fasi, mentre nello stesso tempo l'evoluzione della sponda esterna è riconducibile alle fasi rispettivamente precedenti (RINALDI, 1995).

Nel caso in esame si possono riscontrare alcune differenze, quali l'assenza di aggradazione nei tratti di valle del sistema fluviale e la mancanza di una chiara distribuzione spaziale degli stadi evolutivi, rispetto all'evoluzione dei fiumi per i quali i modelli presi come riferimento sono stati originariamente proposti. Le cause di tali differenze possono essere ricercate nei seguenti fattori: a) la diversa morfologia degli alvei; b) il tipo di materiale che ne costituisce il fondo e le sponde; c) la presenza di punti del fondo e delle sponde che si mantengono a quota invariabile nel breve periodo (soglie rocciose o opere artificiali); d) le diverse condizioni climatiche ed idrologiche; e) il tipo di condizionamento antropico. Per quanto riguarda quest'ultimo punto va sottolineato in particolare che nel caso in esame i fattori antropici sono più vari e complessi e sono relativi ad un intervallo di tempo molto più ampio. L'estrazione di

inerti, indicata in precedenza come la principale causa responsabile del recente abbassamento, rappresenta un fattore non ben localizzato nello spazio e nel tempo (come può invece essere la canalizzazione), ma è piuttosto un disturbo che ha interessato in maniera diffusa il fiume e per periodi di tempo anche relativamente lunghi.

## CONCLUSIONI

L'evoluzione morfologica della pianura alluvionale del Fiume Sieve in Mugello, che abbiamo cercato di delineare con riferimento ad alcuni capisaldi cronologici, ci sembra aver confermato l'assunto espresso in premessa: la dinamica di un corso d'acqua e della sua pianura alluvionale costituiscono il risultato più diretto ed immediato delle trasformazioni del paesaggio che si producono nel bacino idrografico di pertinenza, siano esse dovute a cause naturali o innescate dalla attività antropica. Ne è prova la potente coltre di sedimenti alluvionali che, almeno a partire dal Subatlantico (se non addirittura in tempi più recenti), si sono progressivamente accumulati nel fondovalle a costituire la piana di esondazione della Sieve, chiaro effetto dei processi erosivi che, con periodi alterni di maggiore o minore attività, hanno interessato da quello stesso momento il bacino idrografico sotteso.

Durante questo intervallo di tempo è andata progressivamente crescendo l'influenza dell'Uomo nei processi di trasformazione del paesaggio: da componente passiva, che si trovava a subire le conseguenze della dinamica naturale, adattandovisi, è divenuto egli stesso fattore di morfogenesi assumendo, specialmente negli ultimi anni, un ruolo dominante. È sufficiente ricordare, a questo proposito, quanto osservato nella sezione del Fondaccio: a partire dal 1670, cioè da quando il taglio delle foreste cominciò a divenire sconsiderato, ed in concomitanza con l'affermarsi della Piccola Età Glaciale, il livello della pianura è salito di ben 2,50 m, per apporti successivi di sedimenti fini di esondazione.

Agli scopi più particolari dello studio dell'evoluzione morfologica dell'alveo si è stati costretti a prendere in considerazione solo il periodo storico più recente, a partire dal XVII secolo, epoca a cui si riferiscono i primi documenti cartografici. L'alveo presenta dapprima un tracciato «naturale» a bassa sinuosità, che viene in seguito progressivamente alterato dalle sistemazioni idrauliche, consistenti principalmente in restringimenti e calibrature. Come la pianura alluvionale, esso subisce una fase di progressiva aggradazione che si protrae fino ai primi decenni del nostro secolo, favorita soprattutto dall'estendersi delle colture nelle aree collinari e della deforestazione in quelle montane. Le sistemazioni idrauliche, soprattutto quelle successive alla piena del 1844, favoriscono una accrezione verticale forzata all'interno delle zone golenali. A questa fase di aggradazione segue un rapido abbassamento del fondo, principalmente come effetto della escavazione di materiali dall'alveo e, in secondo luogo, della ridotta alimentazione di sedimenti determinata dalle sistemazioni idraulico-forestali. L'abbassamento del fondo innesca a sua volta una rapida evoluzione morfologica delle sponde, creando con-

TABELLA 1 - Schema riassuntivo delle fasi di evoluzione della pianura alluvionale e dell'alveo del Fiume Sieve, in relazione alle variazioni del clima e delle forme di utilizzazione del suolo dalla fine del Sub-boreale ad oggi

TABLE 1 - Evolution of the Sieve River alluvial plain and channel, in relation to climatic and land use changes, from the end of Sub-boreal to the Present

intervallo climatico del Sub-atlantico (secondo PANIZZA, 1985)	utilizzazione del suolo nel bacino	principali eventi geomorfologici nel bacino e/o in aree limitrofe	condizioni dell'alveo	interventi nella pianura alluvionale e in alveo	reperti e date dalle cronache
<b>mite-secco</b> fino al 800 a.C. (sub boreale)	foresta naturale		naturali		industria mousteriana di Galliano; insediamento gravettiano di Bilancino
<b>freddo</b> 800-300 a.C. 2 avanzate glaciali	inizio dell'agricoltura			primi interventi di bonifica (?)	
<b>caldo</b> 300 a.C. - 400	intensificazione dell'attività agricola				
<b>freddo</b> avanzata glaciale 400 ÷ 800	agricoltura collinare	frana Pianaccia (430 ÷ 570)			legno di Firenzuola (430 ÷ 570)
<b>caldo</b> 800 ÷ 1150	riduzione della attività agricola	prima cronaca sulle alluvioni dell'Arno a Firenze (1177)			ponte di Bilancino (945-1035)
<b>freddo</b> avanzata glaciale 1150 ÷ 1350		alluvioni a Firenze (1269, 1282, 1288, e 1334, 1345); prima cronaca di alluvione in Mugello (1333); frana Castagno (1335)			
<b>mite</b> 1350 ÷ 1550	ripresa dell'agricoltura con la mezzadria; rotazione delle colture	alluvioni a Firenze (1380) ed in Mugello (1521, 1547)			ceramiche Mozzete (seconda metà del XVI sec.)
<b>freddo</b> piccola età glaciale 1550 ÷ 1850	prime colture nella pianura alluvionale; deforestazione incontrollata	alluvioni a Firenze (1740, 1758) ed in Mugello (1557, 1844)	seminaturali ( <i>wandering</i> o <i>pseudomeandering</i> )	prime rettifiche dell'alveo	legno Fondaccio (1625 ÷ 1670)
<b>caldo</b> 1850 ÷ oggi	1850- circa 1930	espansione della agricoltura collinare cerealicola	alluvione in Mugello (1852)	alveo in aggradazione	sistemazione idraulica con argini e casse di colmata; difese di sponda
	circa 1930- 1966	inizio della sistemazione idraulico-forestale ed idraulico-agraria		probabile inizio dell'abbassamento dell'alveo	escavazione in alveo, in netta intensificazione dal dopoguerra
	1966-1996	fine della mezzadria, espansione della monocoltura: livellamenti ed ampliamento degli appezzamenti	alluvione del 4.11.1966; parziali inondazioni della pianura (1981, 1991, 1993)	alveo in continuo approfondimento	cessazione della escavazione in alveo

dizioni generali di instabilità e determinando una fase di allargamento dell'alveo di piena, in misura diversa nei vari tratti del fiume a seconda dell'entità dell'abbassamento, della presenza o meno di affioramenti rocciosi o di protezioni artificiali delle sponde. A tale fase fa seguito una progressiva stabilizzazione delle sponde stesse, favorita da sedimentazione alla base e dall'instaurarsi di vegetazione, fino al raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio dinamico.

Il succedersi di oscillazioni climatiche in senso più caldo o più freddo, caratteristico dell'Olocene, sembra aver influenzato direttamente non solo lo svolgersi dei processi morfogenetici, come è ovvio, ma anche l'evoluzione delle forme di utilizzazione del suolo. Agli effetti di una intensa dinamica naturale si sono spesso sommati quelli derivati da uno sfruttamento tutt'altro che conservativo delle risorse naturali, generando situazioni, come quella che stiamo vivendo, di estremo degrado degli alvei fluviali e delle relative pianure.

## BIBLIOGRAFIA

- AIAZZI G. (1845) - *Narrazioni storiche delle più considerevoli inondazioni dell'Arno e notizie scientifiche sul medesimo*. Tipografia Piatti, Firenze.
- BARTOLINI C., BERNINI M., CARLONI G.C., CASTALDINI D., COSTANTINI A., FEDERICI P.R., FRANCAVILLA F., GASPERI G.F., LAZZAROTTO A., MARCHETTI G., MAZZANTI R., PAPANI G., PRANZINI G., RAU A., SANDRELLI F. & VERCESI P.L. (1984) - *Carta Neotettonica dell'Appennino Settentrionale*. CNR P.F. Geodinamica, S.P. Neotettonica.
- BARLETTI A. & SQUILLONI E. (1980) - *Mugello*. Firenze, Vallecchi, 145 pp.
- BELLANDI F. & GUCCI P. (1993) - *Preistoria e storia antica del Mugello, Alto Mugello e Val di Sieve, attraverso le testimonianze archeologiche*. Scarperia, Gruppo Archeologico, 43 pp.
- BILLI P. (1988) - *Morfologie fluviali*. Giornale di Geologia, ser. 3<sup>a</sup>, 50/1-2, 27-38.
- BRAGA G. & GERVASONI S. (1989) - *Evolution of the Po River: an example of the application of historic maps*. In: G.E. PETTS, H. MÖLLER & A.L. ROUX (eds), *Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe*, John Wiley & Sons, 113-126.
- BROOKES A. (1988) - *Channelized Rivers. Prospectives for Environmental Management*. John Wiley & Sons, 326 pp.
- CARSON M.A. & GRIFFITHS G.A. (1987) - *Bedload transport in gravel channels*. Journal of Hydrology (N.Z.), 26, No. 1.
- CARSON M.A. & KIRKBY M.J. (1972) - *Hillslope form and process*. Cambridge University Press, Cambridge, 475 pp.
- CASAGLI N. & RINALDI M. (1994) - *Meccanismi di instabilità delle sponde nell'alveo del Fiume Sieve (Toscana)*. Atti IV Convegno dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Riccione, 18-21 Ottobre 1994. In stampa.
- CASTIGLIONI G.B. & PELLEGRINI G.B. (1981) - *Two maps on the dynamics of a river bed*. Proceedings of International Symposium on Erosion and Sediment Transport Measurement, Florence.
- CECCANTI M. (1982) - *Neolitico, Età del Rame*. In: AA.VV., *Testimonianze preistoriche nel Mugello e nella Val di Sieve*, Studi e Materiali, (5), 316-327.
- CHANG H.H. (1987) - *Modelling fluvial processes in streams with gravel mining*. In: C.R. THORNE, J.C. BATHURST & R.D. HEY (eds), *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, John Wiley and Sons, Ltd., Chichester, U.K., 977-988.
- CHANG H.H. (1988) - *Fluvial Processes in River Engineering*. John Wiley and Sons.
- CHARLTON F.G. (1982) - *River stabilization and training in gravel-bed rivers*. In R.D. HEY, J.C. BATHURST AND C.R. THORNE (eds), *Gravel-Bed rivers*, Wiley, Chichester, 635-657.
- CHINI L. (1875) - *Storia antica e moderna del Mugello*. Multigrafica Editrice, Roma, 1969, Biblioteca Nazionale di Firenze.
- COSTA J.E., MILLER A.J., POTTER K.W. & WILCOCK P.R. (eds) (1995) - *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology*. Geophysical Monograph 89, The Wolman Volume, American Geophysical Union, 239 pp.
- DARBY S.E. & THORNE C.R. (1992) - *Impact of channelization on the Mimmshall Brook, Hertfordshire*. UK. Regulated Rivers: Research & Management, 7, 193-204.
- FEDERICI P.R. (1987) - *Introduzione allo studio delle pianure minori italiane*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 10, 5-9.
- DEL NOCE G. (1849) - *Trattato storico-scientifico ed economico delle macchie e foreste del Granducato di Toscana*. Firenze.
- FERGUSON R. & ASHWORTH P. (1991) - *Slope-induced changes in channel character along a gravel-bed stream: the Allt Dubhaig, Scotland*. Earth Surface Processes and Landforms, 16, 65-82.
- GEMINA (1963) - *Ligniti e torbe dell'Italia Continentale*. Geomineraria Nazionale, Roma. 319 pp.
- GIULIANI R. (1956) - *Il bacino dell'Arno*. Accademia Economico-Agraria dei Georgofili.
- GRAF J.B., WEBB R.H. & HEREFORD R. (1991) - *Relation of sediment load and flood-plain formation to climatic variability, Paria River drainage basin, Utah and Arizona*. Geological Society American Bulletin, 103, 1405-1415.
- GRAZI S. (1966) - *La frana del 1960 nel fosso di Falterona*. Monti e Boschi, 5, 37-47.
- GRAZI S. & RODOLFI G. (1992) - *Tutela ambientale del Fiume Sieve a valle della diga di Bilancino*. Comunità Montana Zona E, Borgo S. Lorenzo (rapporto inedito).
- HARVEY M.D. & WATSON C.C. (1986) - *Fluvial processes and morphological thresholds in incised channel restoration*. Water Resources Bulletin, 22(3), 359-368.
- HOECK E. & BRAY J.W. (1981) - *Rock Slope Engineering*. Revised 3rd Edition. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- HOOKE J.M. (1979) - *An analysis of the processes of river bank erosion*. Journal of Hydrology, 42, 39-62.
- HUPP C.R. (1987) - *Determination of bank widening and accretion rates and vegetation recovery along modified West Tennessee streams*. Proceedings International Symposium on Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis, Tarreytown, New York, USA.
- HUPP C.R. (1988) - *Plant ecological aspects of flood geomorphology and paleoflood history*. In: V.R. BAKER, R.C. KOONEL & P.C. PETTON (eds), *Flood Geomorphology*, John Wiley & Sons, 335-356.
- HUPP C.R. (1990) - *Vegetation patterns in relation to basin hydrogeomorphology*. In: J.B. THORNES (ed), *Vegetation and Erosion*, John Wiley & Sons.
- HUPP C.R. & SIMON A. (1986) - *Vegetation and bank-slope development*. Proceedings of the 4th Federal Interagency Sedimentation Conference, Las Vegas, Nevada, March 1986, 2, 5-83 to 5-92.
- KNOX J.C. (1984) - *Fluvial responses to small scale climatic changes*. In: COSTA J.C. & FLEISHER P.J. (eds), *Developments and Applications of Geomorphology*, Springer-Verlag, Berlin, 318-342.
- LAGASSE P.F., WINKLEY B.R. & SIMONS D.B. (1980) - *Impact of gravel mining and river system stability*. Proc. ASCE, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Div., 106 (WW3), 389-404.
- LAJZAK A. (1995) - *The impact of river regulation, 1850-1990, on the channel and floodplain of the Upper Vistula River, Southern Polonia*. In: E.J. HICKIN (ed), *River Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, 209-233.
- LANDI R. (1976) - *Elementi di Agronomia generale, Parte I*. Stamp. Ed. Parenti, Firenze.
- LANE E.W. (1955) - *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 81, No. 745, 17.
- LAWLER D.M. (1992) - *Process dominance in bank erosion systems*. In: P.A. CARLING & G.E. PETTS (eds), *Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives*, Wiley, 117-143.
- LEOPOLD L.B., WOLMAN M.G. & MILLER J.P. (1964) - *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman, S. Francisco.
- LOSACCO U. (1967) - *Notizie e considerazioni sulle inondazioni d'Arno in Firenze*. L'Universo, 5, 1-104.
- MACKLIN M.G., RUMSBY B.T. & NEWSON M.D. (1992) - *Historical floods and vertical accretion of fine-grained alluvium in the Lower Tyne Valley, Northeast England*. In: BILLI P., HEY R.D., THORNE C.R. & TACCONI P. (eds), *Dynamics of Gravel-bed Rivers*, John Wiley & Sons Ltd.
- MAGHERINI M. (1988) - *Contributo alla conoscenza della vegetazione del Mugello*. Tesi di Laurea inedita in Scienze Naturali, Università di Firenze, 123 pp.
- MANETTI A. & RENARD F. (1847) - *Profilo di livellazione della Chiana e dell'Arno dall'argine di separazione presso Chiusi sino al mare e del Torrente Sieve da S. Piero a Sieve al suo sbocco in Arno rilevato nei mesi estivi degli anni 1845-46-47*. Ufficio Idrografico dell'Arno, Pisa.
- MONTEFUSCO L., LAMBERTI A. & PARIS E. (1987) - *Mathematical modeling of river Po morphological evolution*. Excerpta of the Italian Contributions to the Field of Hydraulic Engineering, 2.
- MORETTI I. (1988) - *Le antiche leghe di Diacceto, Monteloro e Rignano. Un territorio dall'antichità al medioevo*. Comunità Montana Zona E, Comuni di Pontassieve, Pelago e Rufina.
- MOROZZI F. (1762) - *Dello Stato antico e moderno dell'Arno e delle cause e de' rimedi delle sue inondazioni*. Ragionamento storico-matematico. Firenze - Stecchi.
- NATONI A. (1944) - *Le piene dell'Arno ed i provvedimenti di difesa*. Felice Le Monnier, Firenze.
- NELLI B. (1923) - *Il bacino pliocenico della Val di Sieve e le sue sponde*. Mem. Prof. B. Nelli.
- NICCOLAI F. (1914) - *Mugello e Val di Sieve, guida topografica, storica artistica, illustrata*. Borgo S. Lorenzo, Tipografia Mugellana.
- PANIZZA M. (1985) - *Schemi cronologici del Quaternario*. Geogr. Fis. Din. Quat., 8, 44-48.
- PETTS G.E. (1984) - *Impounded Rivers: perspective for ecological management*. Wiley-Interscience Publication, 326 pp.
- PETTS G.E., MÖLLER H. & ROUX A.L. (1989) - *Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe*. John Wiley & Sons, 355 pp.
- PRINCIPI P. (1926) - *Alcune osservazioni sulla geologia e geomorfologia del bacino del Mugello*. Boll. Soc. Geol. It., 45.
- RHODES D.D. & WILLIAMS G.P. (eds) (1979) - *Adjustment of the Fluvial System*. Kendall/Hunt Publishing Co., Dubuque, Iowa, 372 pp.

- RINALDI M. & RODOLFI G. (1993) - *Risultati della prima fase dello studio degli effetti della diga di Bilancino sull'alveo del Fiume Sieve e sul campo di moto delle falde acquifere adiacenti*. Quaderni di Idronomia Montana, 13, 85-128.
- RINALDI M. (1995) - *Dinamica di un alveo fluviale antropizzato: il Fiume Sieve (Toscana)*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Geologia Applicata, Geomorfologia e Idrogeologia, Università degli Studi di Perugia, 223 pp.
- RISTORI G. (1889) - *Il bacino Pliocenico del Mugello*. Estr. Boll. Soc. Geol. It., 8, 455-489.
- RODOLFI G. (1971) - *Campagna geognostica per la diga di Dicomano sul Fiume Sieve*. Cons. Bonif. Montana Mugello, Rapporto inedito.
- RODOLFI G. (1982) - *Considerazioni sulla evoluzione della rete idrografica nel Mugello*. In: AA.VV., *Testimonianze preistoriche nel Mugello e nella Val di Sieve*, Studi e Materiali, (5), 298-302.
- RODOLFI G. (1988) - *Geomorphological mapping applied to land evaluation and soil conservation in agricultural planning: Some examples from Tuscany (Italy)*. Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd. 68, 155-174.
- RODOLFI G. (1994a) - *Morfodinamica olocenica ed utilizzazione del suolo in un tipico paesaggio alluvionale interappenninico (Mugello, Firenze)*. Atti II° Sem. Int. «Il sistema uomo-ambiente fra passato e presente» Ravello, Centro Univ. Eur. Beni Culturali, 1994. In stampa.
- RODOLFI G. (1994b) - *Holocene mass movement activity in the Tosco-Romagnolo Apennines*. In: «Rapid Mass Movements and Climatic Variations during the Holocene», Workshop of the European Science Foundation, Mainz, 21-22 Oct, 1993. In stampa.
- RODOLFI G., SAVIO S. & MARTENS P. (1978) - *Esperienze di cartografia tematica nel Mugello Centrale*. Annali Istituto Sperimentale Difesa del Suolo, Firenze, 9, 67-138.
- ROSSINI P. (1852) - *Intorno alle cause dei danni che oggidì apportano più gravi le piene del Fiume Arno e quelle de' suoi influenti, ed al modo di porvi, quanto più possibile, riparo*. Atti della Reale Accademia economico-agraria dei Georgofili di Firenze, II serie, 1818-1853, Biblioteca Nazionale di Firenze.
- RUMSBY B.T. & MACKLIN M.G. (1994) - *Channel and floodplain response to recent abrupt climate change: the Tyne basin, Northern England*. Earth Surface Processes and Landforms, 19, 499-515.
- SANESI G. (1965) - *Geologia e morfologia dell'antico bacino lacustre del Mugello*. Boll. Soc. Geol. It., 84, 169-252.
- SANESI G. (1977) - *I suoli del bacino dei torrenti Diaterna e lineamenti pedologici del Mugello e dell'alta valle del Santerno*. P.F. Conservazione del Suolo, S.P. Dinamica Versanti, Pubbl. n. 12, Firenze.
- SCHUMM S.A. & KHAN H.R. (1972) - *Experimental study of channel patterns*. Geological Society American Bulletin, 83, 1755-1770.
- SCHUMM S.A. (1969) - *River metamorphosis*. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 95, 255-273.
- SCHUMM S.A. (1973) - *Geomorphic thresholds and the complex response of drainage systems*. In: M. MORISAWA (ed), *Fluvial Geomorphology*, Binghamton, State University of New York, 229-310.
- SCHUMM S.A. (1977) - *The Fluvial System*. Wiley, New York, 338 pp.
- SCHUMM S.A., HARVEY M.D. & WATSON C.C. (1984) - *Incised Channels: Initiation, Evolution, Dynamics, and Control*. Water Resources Publication, Littleton, Colorado, 200 pp.
- SERENI E. (1962) - *Storia del Paesaggio Agrario*. Edizioni Laterza, Bari.
- SIMON A. (1989) - *A model of channel response in disturbed alluvial channels*. Earth Surface Processes and Landforms, 14, 11-26.
- SIMON A. (1995) - *Adjustment and recovery of unstable alluvial channels: identification and approaches for engineering management*. Earth Surface Processes and Landforms, 20, 611-628.
- SIMON A. & HUPP C.R. (1992) - *Geomorphic and vegetative recovery processes along modified stream channels of West Tennessee*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 91-502.
- STUIVER M. & REIMER P.J. (1993) - *Extended 14C database revised Calib. 3.0 14C age calibration program*. Radiocarbon, 35 (1), 215-230.
- THORNE C.R. & LEWIN J. (1979) - *Bank processes, bed material movement and planform development in a meandering river*. In: D.D. RHODES & G.P. WILLIAMS (eds), *Adjustment of the Fluvial System*, Kendall/Hunt Publishing Co., Dubuque, Iowa, 117-137.
- THORNE C.R. & TOVEY N.K. (1981) - *Stability of composite river banks*. Earth Surface Processes and Landforms, 6, 469-484.
- THORNE C.R. (1982) - *Processes and mechanisms of river bank erosion*. In: R.D. HEY, J.C. BATHURST & C.R. THORNE (eds), *Gravel-bed Rivers*, Wiley, Chichester, 227-271.
- THORNE C.R. (1990) - *Effects of vegetation on riverbank erosion and stability*. In: J.B. THORNES (ed), *Vegetation and Erosion*, Wiley, pp. 125-144.
- TWIDALE C.R. (1964) - *Erosion of an alluvial bank at Birdwood, South Australia*. Zeitschrift für Geomorphologie, 8, 189-211.
- WILLIAMS G.P. (1978) - *Bankfull discharge of rivers*. Water Resources Research, 14, 1141-1158.
- WOLMAN M.G. (1955) - *The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania*. U.S. Geological Survey Professional Paper, 271.
- WOLMAN M.G. (1967) - *A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels*. Geogr. Ann., 48A (2-4), 385-395.
- WOLMAN M.G. & LEOPOLD L.B. (1957) - *River floodplains: some observations on their formation*. U.S. Geological Survey Professional Paper, 282-C, 87-109.