

SERGIO PINNA (*)

MODIFICAZIONI MORFOLOGICHE E DISSESTI DEL TERRENO DETERMINATI DALL'ESTRAZIONE DEL SALGEMMA IN VAL DI CECINA (TOSCANA)

Abstract: PINNA S., *Morphological changes caused by rock salt exploitation in the Cecina basin (Tuscany)*. (IT ISSN 0391-9838, 1993).

The Author studies the changes in landscape due to the mining of rock salt in a zone of the Cecina basin. The salt forms lenticular deposits in the Messinian layers and it is exploited by dissolution *in situ*. The voids caused by exploitation produce important saggings and some collapses in the surface ground. In this paper the new morphology, generated by these phenomena, is studied; in the last part of the work a quantitative evaluation of the ground settling is carried out for two sample areas.

KEY WORDS: Rock salt exploitation, Surface collapses, Ground settlings, Tuscany (Italy).

Riassunto: PINNA S., *Modificazioni morfologiche e dissesti del terreno determinati dall'estrazione del salgemma in Val di Cecina (Toscana)*. (IT ISSN 0391-9838, 1993).

Vengono studiate le modificazioni subite da una zona della Val di Cecina in relazione con l'attività di estrazione del salgemma. Poiché questo si trova in depositi (messiniani) lentiformi di spessore non superiore a 40 m, il giacimento viene coltivato mediante il processo della dissoluzione *in situ*. A causa dei vuoti lasciati dall'estrazione del sale, si hanno crolli ed estesi abbassamenti del terreno. Nell'articolo viene dapprima studiata la morfologia particolare generata da questi fenomeni (formazione di laghi, modificazione del reticolo idrografico, ecc.), mentre nella seconda parte è esaminato in dettaglio, dal punto di vista quantitativo, l'andamento degli assestamenti del terreno in due aree campione.

TERMINI CHIAVE: Salgemma, Coltivazione mineraria, Dissesti, Cecina (Toscana).

1. PREMESSA: ATTIVITÀ MINERARIA E ALTERAZIONI DELLA TOPOGRAFIA

L'attività estrattiva volta a ricavare materiali utili all'uomo determina spesso profonde modificazioni della superficie topografica delle aree minerarie; in certi casi tali trasformazioni sono previste e controllate, in altri avvengono improvvisamente arrecando danni ai centri abitati e alle infrastrutture e provocando anche la perdita di vite umane. Questa alterazione della morfologia, come è noto, si esplica in tre modi diversi: con l'accumulo di grandi quan-

tità di inerti in prossimità delle miniere e delle cave, con vere e proprie ferite provocate dall'attività estrattiva a cielo aperto e infine con il graduale o improvviso sprofondamento del terreno a causa dei vuoti provocati dall'asportazione dei materiali in profondità. Questi ultimi fenomeni vengono studiati da ricercatori di diversa formazione e con finalità differenti: gli specialisti di geologia applicata e gli ingegneri minerari per cercare di evitare, là dove ciò sia possibile, il verificarsi di sprofondamenti e di altre forme di alterazione del terreno o per limitare i danni quando quei fenomeni si verificano; i cultori di geomorfologia per dare un quadro completo delle trasformazioni operate dall'uomo nel paesaggio geografico e per tentare di pervenire a una valutazione quantitativa di questa degradazione antropica dell'ambiente: tale valutazione viene fatta normalmente mediante un raffronto dell'entità di questa «erosione» con quella che è determinata dalle sole forze naturali.

Gli studi in questo campo riguardano soprattutto i giacimenti di salgemma e di sali potassici, perché è proprio con lo sfruttamento di questi minerali che si generano le modificazioni più importanti: sprofondamenti e avvallamenti del terreno (soprattutto quando si coltivano giacimenti di grandi dimensioni orizzontali), inaridimento delle sorgenti, perturbazioni nel deflusso dei corsi d'acqua, formazione di laghetti o di acquitrini nelle miniere abbandonate a cielo aperto o nelle superfici topografiche sprofondate, e così via. Tutte le zone europee nelle quali si estraggono quei minerali sono interessate da lenti abbassamenti del terreno, non di rado accompagnati da sprofondamenti improvvisi. Tali fenomeni risultano particolarmente estesi nella Germania centrale, dove si trovano potenti giacimenti di salgemma e di sali potassici, e in Alsazia, dove si hanno pure cospicue masse di sali di potassio. Ben noto è il caso della città tedesca di Stassfurt, all'interno della quale si sono verificati degli avvallamenti di oltre 5 m, per cui numerosi edifici sono rimasti gravemente danneggiati. Altrettanto è avvenuto in Gran Bretagna, nei pressi di Norwich, dove si sono avuti pure gravi danni alle opere umane. In tutte queste aree si è notato che gli abbassamenti del suolo sono lenti e uniformi per ampio tratto quando l'estrazione del minerale è da poco iniziata e che si accentuano poi quando si accresce il volume dei vuoti lasciati dalla coltivazione; d'altra parte quei

(*) Istituto di Costruzioni Stradali e Trasporti (Fac. di Ingegneria) dell'Università di Pisa.

movimenti continuano ancora per qualche tempo anche dopo che l'estrazione viene a cessare; si è pure constatato che i crolli improvvisi sono all'inizio piuttosto rari, per diventare in seguito più frequenti, ma senza un comportamento ben definito (HONINGEN-HUENE, 1957).

In Italia gli studi in questo campo sono ben scarsi, ma ciò è comprensibile, sia per la modesta entità dei nostri giacimenti salini, che si trovano in Calabria (presso Lungro e Belvedere di Spinello), in Sicilia (presso Enna e Agrigento) e in Toscana (nella Val di Cecina), sia perché la loro utilizzazione non ha mai compromesso la stabilità di aree abitate. I geologi italiani, unitamente ai tecnici dell'Agip, hanno invece studiato con grande attenzione i fenomeni di subsidenza che si verificano in alcune parti del nostro territorio a causa dell'estrazione di fluidi dal sottosuolo (gas naturale, soprattutto), come dimostra anche un importante convegno svoltosi di recente a Venezia (BONDESAN, 1990).

Tra gli studi di geografia fisica però non possiamo trascurare un articolo di SESTINI (1938), ispirato ad analoghe ricerche condotte all'estero, nel quale l'Autore esamina l'escavazione del marmo nelle Alpi Apuane, del calcare nel Monte Pisano e delle ligniti del Valdarno Superiore, per fornire una misura della degradazione del rilievo provocata dall'uomo; tale misura è stata effettuata mettendo a confronto questa forma di erosione con quella che è normalmente operata dagli agenti modellatori del rilievo. Considerazioni simili sono state fatte da M. PINNA (1958) in un suo studio preliminare sui mutamenti morfologici che si sono avuti in Val di Cecina in conseguenza dell'estrazione del sale; in quel lavoro però non vengono presi in considerazione né la geologia della regione né i fattori geologici che entrano in gioco nell'origine dei dissesti (giacitura delle lenti saline, natura delle rocce che li inglobano, ecc.). Venendo a tempi più recenti, troviamo un argomento molto simile a quello trattato nel presente lavoro in un articolo di IETTO (1986), il quale descrive i dissesti indotti dalla coltivazione del giacimento di salgemma di Belvedere di Spinello, in Calabria. In questa miniera viene impiegato il metodo di coltivazione per dissoluzione, del tutto analogo a quello utilizzato nella Val di Cecina, ma l'Autore ritiene che esso non sia adatto alla situazione locale, dato che le lenti saline sono localizzate al di sotto di un territorio antropizzato. In effetti nell'Aprile del 1984 si era verificato un brusco collasso dei terreni a tetto della miniera, con conseguenti frane e allagamenti, ma soprattutto con l'inquinamento salino del fiume Neto e delle falde acquifere che esso alimenta. L'articolo risulta quindi interessante dal punto di vista delle problematiche di impatto ambientale, ma si limita a pochi dati nella valutazione della subsidenza complessiva del terreno.

Nel mio lavoro, invece, ho inteso offrire non solo la descrizione dei mutamenti che ha subito la morfologia superficiale della media Val di Cecina, ma anche una valutazione quantitativa della degradazione dell'originario rilievo collinare determinata dall'attività di estrazione del salgemma. Più precisamente, ho rivolto l'attenzione agli abbassamenti del terreno verificatisi nelle zone di più intensa utilizzazione del giacimento salino, che sono quelle sfrut-

tate dalla Società Solvay. In tali aree i fenomeni oggetto di studio hanno raggiunto in questi ultimi anni un'intensità tale da trasformare notevolmente il profilo del rilievo, creando anche una morfologia nuova che mi è sembrata meritevole di illustrazione per la sua origine del tutto artificiale.

Nell'area mineraria della Solvay, come vedremo tra poco, si usa quella particolare tecnica di coltivazione del giacimento che comporta l'immissione di grandi quantità di acqua dolce nel sottosuolo e successivamente l'estrazione di salamoie sature mediante pompaggio. Tale metodo è imposto dalla natura lentiforme e dal debole spessore dei depositi salini, per cui la coltivazione si svolge in condizioni ben diverse da quelle delle grandi miniere di salgemma dell'Europa centrale. L'estensione spaziale dei dissesti del terreno però rimane notevole, data la particolare distribuzione geografica dei depositi di sale e l'intensità della coltivazione.

2. L'EVOLUZIONE GEOLOGICA DELLA VAL DI CECINA E LA GENESI DEI DEPOSITI SALINI

Nell'area della concessione mineraria affiorano alcune formazioni appartenenti al Miocene Superiore e al Pliocene (Neoautoctono), mentre non sono presenti in superficie argille, marne e conglomerati della serie lignitifera lacustre (pure del Miocene Superiore ma più antichi) che si rinvengono nelle zone contermini.

È noto che agli inizi del Messiniano sopra i suddetti depositi di ambiente lacustre è entrato il mare, ed è stato rilevato che nell'area di Saline la trasgressione è avvenuta con continuità di sedimentazione al di sopra di essi. In questo territorio le formazioni del Neoautoctono costituiscono nel loro insieme una serie ben definita, che MAZZANTI & alii (1963) indicano come «Serie di Saline». Essa comporta una successione, dal basso verso l'alto, di arenarie gessifere con marne ad anellidi, argille sabbiose a *Pycnodonta navicularis* e infine gessi. Di queste formazioni nell'area mineraria esaminata affiora soltanto quella dei Gessi, che qui è costituita da un'alternanza di marne e argille con intercalazioni lentiformi di salgemma e di gesso. Queste lenti saline, oggetto di coltivazione da parte della Solvay, hanno per lo più uno spessore compreso fra 10 e 35 m, che arriva in qualche caso a 50 m e sono localizzate a profondità variabili da poche decine a varie centinaia di metri. I tipi litologici della serie di Saline si presentano con modalità diverse da luogo a luogo, senza che si possa ricostruire una successione tipica, ossia valida per tutte le località. L'esame paleontologico, comunque, ha rivelato la presenza di livelli salmastri o addirittura di acqua dolce, la cui presenza viene attribuita ad un cospicuo apporto di acque continentali nelle lagune costiere che costituirono l'ambiente di sedimentazione di questi strati. Sembra che il gessifero abbia una potenza di qualche centinaio di metri, ma rimane incerta l'attribuzione delle parti più profonde (fig. 1).

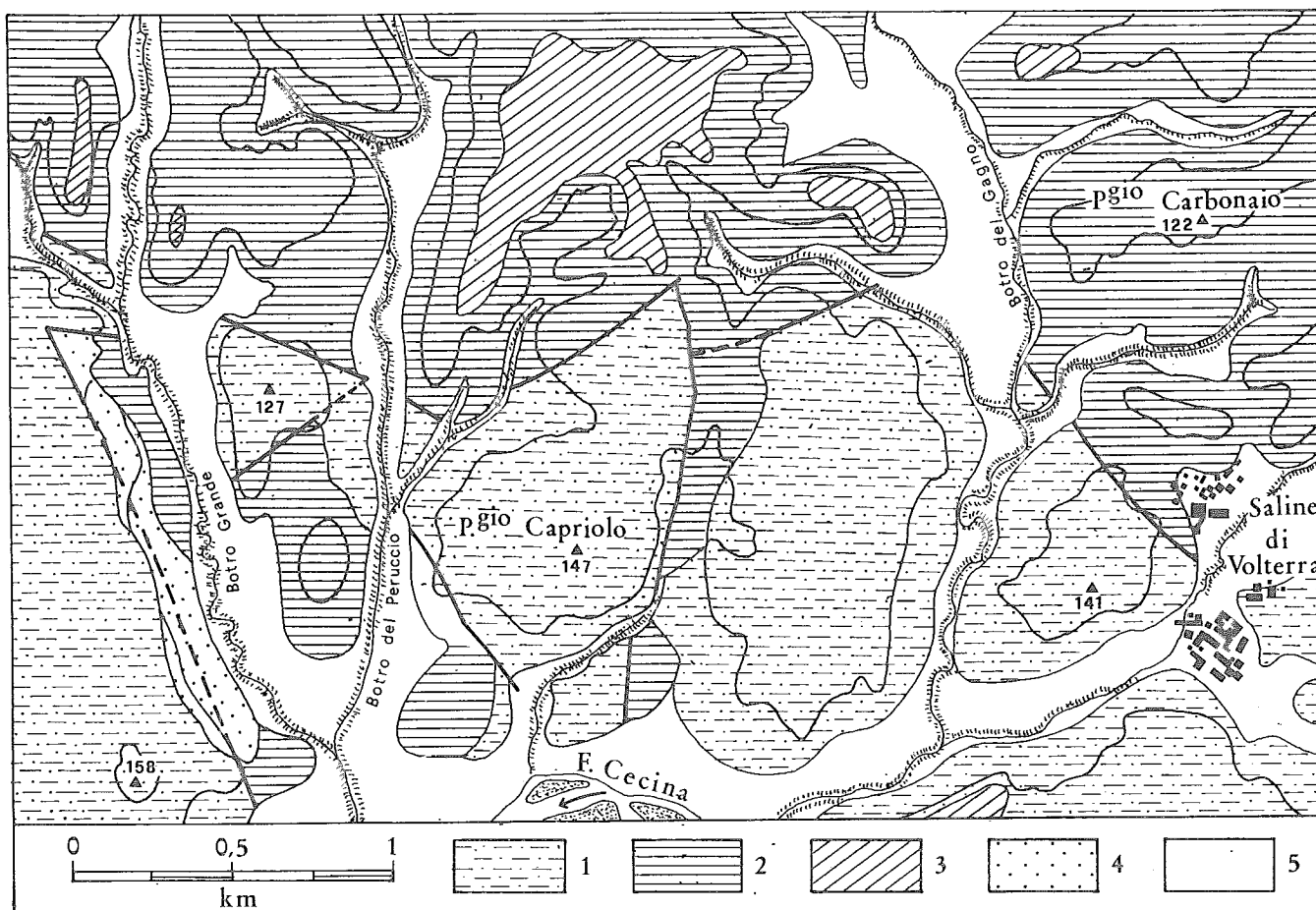


FIG. 1 - Schema geologico del territorio della concessione mineraria di Buriano, Val di Cecina (da MAZZANTI & *alii*, 1963, ridisegnato): 1) gessi; 2) argille cenerine; 3) alluvioni terrazzate; 4) detriti di falda (dei gessi); 5) alluvioni recenti e attuali.

FIG. 1 - Geological drawing of the Buriano mining concession area, Val di Cecina (from MAZZANTI & *alii*, 1963, redrawn).

Sugli strati gessiferi poggiano i depositi marini del Pliocene, che si distinguono dai primi anzitutto per i caratteri litologici (sono costituiti esclusivamente da argille) poi per il fatto di non contenere gesso, salvo qualche traccia nella parte basale, e infine per la ricca microfauna che contengono. Essi rappresentano la ripresa della sedimentazione marina dopo la fase evaporitica della laguna. Tra le rocce sedimentarie tipiche della Val di Cecina e di altre valli del Preappennino toscano soltanto le argille piacentiane sono presenti nella concessione mineraria, dove risultano frequentemente in contatto per faglia con i gessi. Si tratta delle ben note argille di colore cenerino o azzurrognolo, talvolta con notevole contenuto in sabbia, che si distinguono non solo per la ricca microfauna di cui si è già fatto cenno, ma anche per la presenza di numerosi macrofossili, tipici di un ambiente marino con salinità normale. Anche queste argille, che poggiano sul gessifero in concordanza di stratificazione, hanno una potenza diversa da luogo a luogo; tuttavia questa è in genere maggiore di quella dei gessi, dato che in due sondaggi sono stati misurati 650 m e 950 m.

Il Quaternario appare con varie formazioni: anzitutto si trovano lembi di alluvioni terrazzate, per lo più al di sopra delle argille piacentiane, ma in qualche caso, come a sud-ovest di Saline di Volterra, anche sopra la formazione dei gessi; sono poi da segnalare qualche deposito di detrito derivante dalla demolizione dei gessi (ai piedi di alcune colline) e infine le alluvioni recenti lungo il corso dei torrenti e dello stesso fiume Cecina.

Il complesso del Neautoctono ha subito deformazioni soltanto dai movimenti tardivi che hanno operato contemporaneamente e dopo la deposizione dei sedimenti di questa serie. La tettonica si è manifestata attraverso una serie di faglie dirette che hanno portato alla suddivisione di tali formazioni in tanti blocchi a stile rigido, nonostante la plasticità dei tipi litologici che li costituiscono. Il Piacenziano segna la fine della tettonica di sprofondamento, poiché il ciclo si chiude con il generale sollevamento della Toscana occidentale nella fase astiana; ma nessuna formazione di questo periodo appare nella zona mineraria. Merita però di rilevare, in questa sede, che durante la trasgressione mio-pliocenica la tettonica ha determinato nella me-

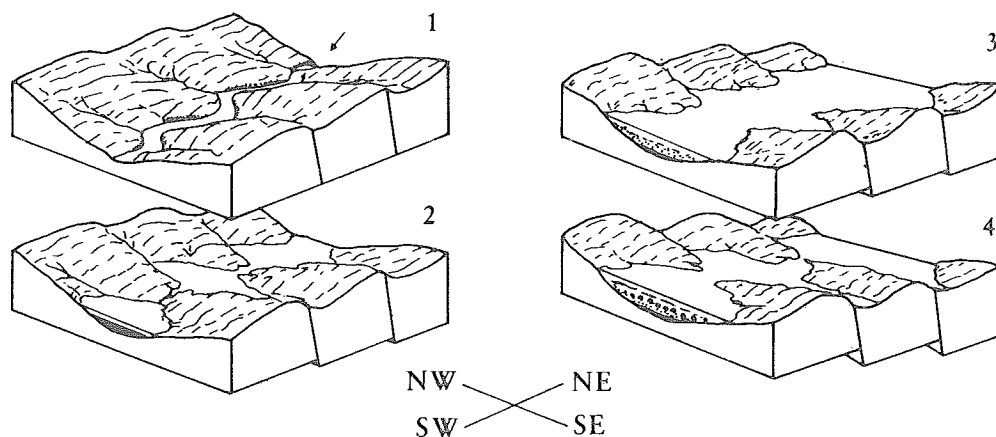


FIG. 2 - L'evoluzione paleogeografica della media Val di Cecina nel Miocene superiore in relazione alla tettonica: 1) valle trasversale dopo il corrugamento principale; 2) un movimento delle faglie a gradinata determina una serie di ristagni che diventano paludi lignitifere; 3) la trasgressione tortoniana porta un braccio di mare nella valle; 4) una ripresa del movimento delle faglie riduce le comunicazioni col mare aperto, creando dei bacini nei quali si ha precipitazione di gesso e di salgemma (da TREVISAN, 1951, ridisegnato).

FIG. 2 - The paleogeographic evolution of mid-Val di Cecina during the Late Miocene and relating to the tectonics: 1) transversal valley after the main tectonic phase; 2) a movement of the terraced faults leads to a series of stagnations which become lignified swamps; 3) the Tortonian transgression brings a strait of the sea into the valley; 4) a renewal of the fault movement diminishes communication with the open sea, creating basins in which chalk and rock salt precipitations occur; (from TREVISAN, 1951, redrawn).

dia Val di Cecina e in altre parti della Toscana occidentale sistemi di faglie a gradinata che hanno interessato anche le formazioni del Pliocene. Secondo TREVISAN (1951) queste gradinate non si sono originate in una fase unica e isolata ma attraverso una serie di episodi successivi. In tal modo si sono formati dapprima stagni e lagune lignitifere e in seguito anche bacini lagunari aventi piccole comunicazioni con il mare aperto, così da favorire la deposizione del salgemma e del gesso. La discontinuità spaziale dei giacimenti salini sarebbe quindi da ricollegare, sempre secondo TREVISAN, alle faglie che hanno suddiviso la serie sedimentaria in vari blocchi (fig. 2).

3. L'ESTRAZIONE DEL SALE

La presenza del sale nelle colline volterrane era nota fin dal Medioevo (almeno dal X secolo). In quell'epoca, e per molti secoli successivi, si utilizzavano numerose sorgenti e piccoli torrenti, tributari del Cecina, le cui acque circolando nel sottosuolo si arricchiscono di una certa percentuale di sale. Le modalità di utilizzazione erano molto semplici, dato che queste acque, dopo essere state raccolte in grandi depositi, venivano sottoposte a ebollizione così da poter raccogliere il sale depositatosi in fondo ai recipienti. Tale operazione era effettuata in numerosi piccoli laboratori, ma nel XVIII secolo il Granduca Leopoldo II decise di concentrare la produzione del sale in un unico grande stabilimento, determinando così il passaggio da una lavorazione di tipo artigianale a una vera e propria attività industriale: ciò poté avere inizio nel 1790. L'erede di

questo stabilimento è l'attuale Salina di Stato, che utilizza lo stesso procedimento, ma con apparecchiature ben più razionali, per la produzione di sale alimentare, anche altamente raffinato.

In epoca più recente hanno ottenuto concessioni per l'estrazione del salgemma a fini industriali la Società Solvay e la Società Samatec (gruppo Eni). Mentre quest'ultima è subentrata solo negli anni '50, dopo aver ottenuto di poter utilizzare i depositi situati tra Saline di Volterra e Pomarance, la Solvay si è insediata in Val di Cecina fin dal secondo decennio di questo secolo. Impegnata nella produzione della soda caustica e di altri composti chimici, la Solvay ha costruito un grande stabilimento industriale nel comune di Rosignano, dove il sale giunge in forma di salamoia per mezzo di una lunga conduttura. L'estrazione, iniziata nel 1919, si è accresciuta fortemente di anno in anno, come dimostrano questi pochi dati (in migliaia di tonnellate):

1920	10	1960	1069
1930	244	1970	1478
1940	564	1980	1699
1950	585	1990	1853

In val di Cecina la Solvay ha ottenuto le due concessioni di Buriano e di Querceto, per un totale di 1643,3 ha. Esse sono nettamente separate tra loro perché, mentre la prima si trova tra Saline di Volterra e Ponte Ginori, sulla destra del Cecina, l'altra si estende presso il centro di Querceto, sulla sinistra del fiume. La concessione Buriano, che già all'origine era la più ricca di sale (e anche la più estesa, con i suoi 1063 ha), è oggi la sola utilizzata, dato che quella di Querceto, ormai esaurita, è stata restituita alle prati-

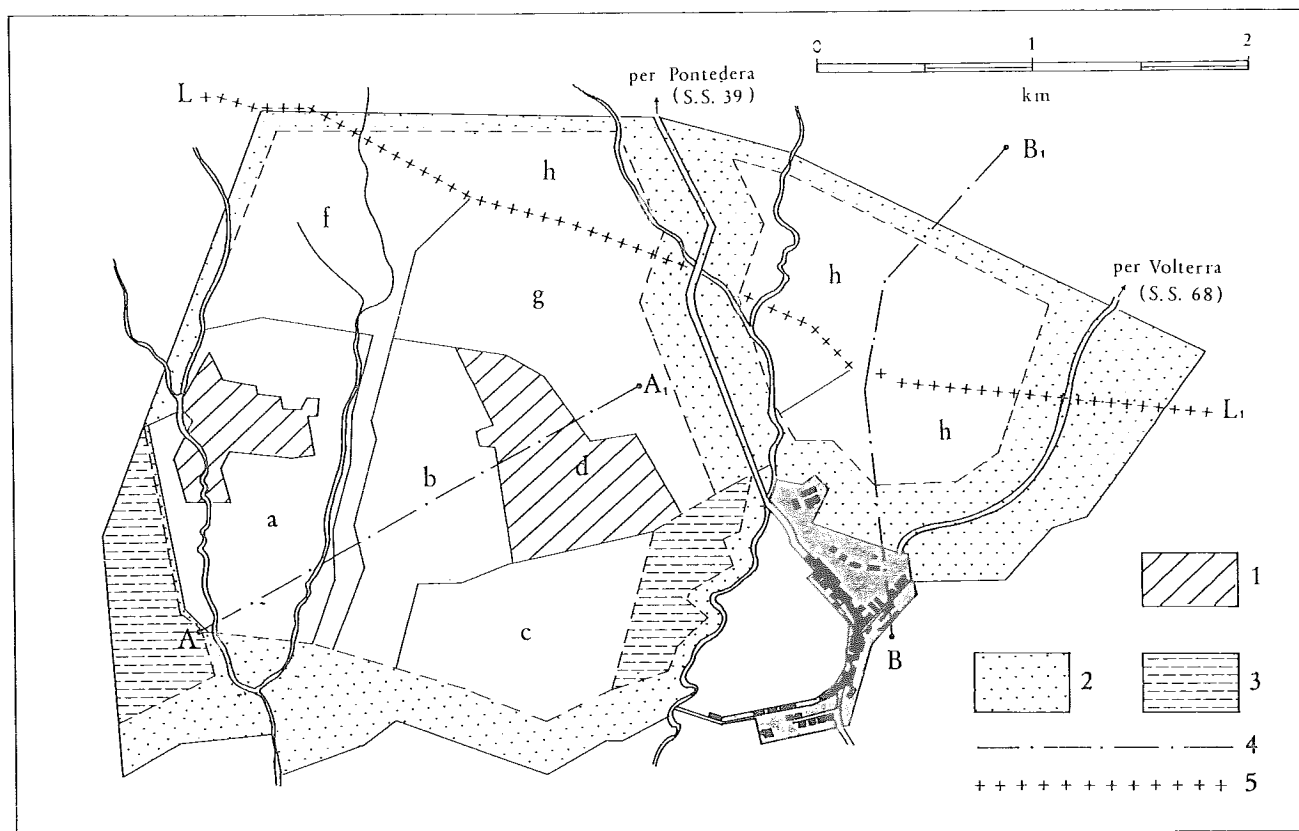


FIG. 3 - La concessione di Buriano e la sua suddivisione in zone operative: 1) zone oggetto di studio; 2) zone di rispetto; 3) aree sterili; 4) tracce delle sezioni delle lenti saline di cui alla fig. 4; 5) linea lungo la quale i depositi salini si rinvencono alla profondità di 400 metri sotto il l.m.

FIG. 3 - The Buriano concession and its division into operative areas: 1) areas under study; 2) area of respect; 3) sterile areas; 4) traces of the salt plugs referred to in Fig. 4; 5) line along which salt deposits are found at 400 m. below sea level.

che agricole e tra breve sarà oggetto di varie iniziative di ripristino ambientale. La coltivazione del giacimento, come si è già detto, avviene mediante dissoluzione in situ del sale. Secondo la procedura normalmente seguita, ogni anno si praticano le necessarie perforazioni fino a una profondità massima di 400 m nella ristretta zona che si è deciso si coltivare. In ogni foro si immette l'acqua dolce, che provoca un'ampia dissoluzione nel letto del giacimento più profondo; a questo iniziale scioglimento del sale segue in genere una fratturazione del terreno sovrastante, che consente all'acqua in pressione di sciogliere anche le eventuali lenti superiori. Poiché la pendenza del terreno non coincide sempre con quella del deposito salino, i fori si praticano a scacchiera, realizzando così allineamenti di fori e perciò di «piste di dissoluzione». Una volta individuato l'allineamento ottimale, è sufficiente immettere l'acqua dolce nella parte più alta della lente salina per estrarre poi la salamoia in quella più bassa ⁽¹⁾. Merita di rilevare, infine, che con le tecniche attuali è possibile estrarre al massimo il 60-65% del sale contenuto in ogni deposito.

In funzione dei programmi di coltivazione e di certi criteri di ordine economico e tecnico stabiliti dagli inge-

gnieri della Solvay, la concessione Buriano è stata suddivisa in zone (e alcune di queste anche in subzone) operative. La fig. 3, che indica questa ripartizione, ci mostra pure che lungo tutto il perimetro esterno vengono lasciate delle fasce di rispetto per non danneggiare le proprietà confinanti; altre fasce di protezione si estendono lungo le strade principali e soprattutto intorno al centro di Saline di Volterra. Nella carta sono poi indicate le tracce A-A₁ e B-B₁ corrispondenti alle sezioni dei giacimenti salini riportate nella fig. 4, e infine la linea L-L₁, lungo la quale il letto del sale si trova a 400 m sotto il l.m.; questa profondità è considerata come il limite di convenienza economica dell'estrazione del sale. Ovviamente le aree che si trovano a nord di questa linea non vengono sfruttate.

⁽¹⁾ Per quanto il procedimento sia da tempo ben noto agli specialisti (GERBELLA, 1948), molti chiarimenti a riguardo mi sono stati forniti dall'ing. Patrick Balletto, della Soc. Solvay di Rosignano. Lo ringrazio molto per questo, ma soprattutto per i dati, le carte e i risultati dei sondaggi che egli mi ha gentilmente fornito. Nelle ricognizioni in campagna ho avuto altre spiegazioni, sul piano operativo, dal geometra Sergio Vittori, che pure ringrazio vivamente.

Sul piano strettamente scientifico sono molto grato al Prof. RENZO MAZZANTI per i preziosi consigli che mi ha dato.

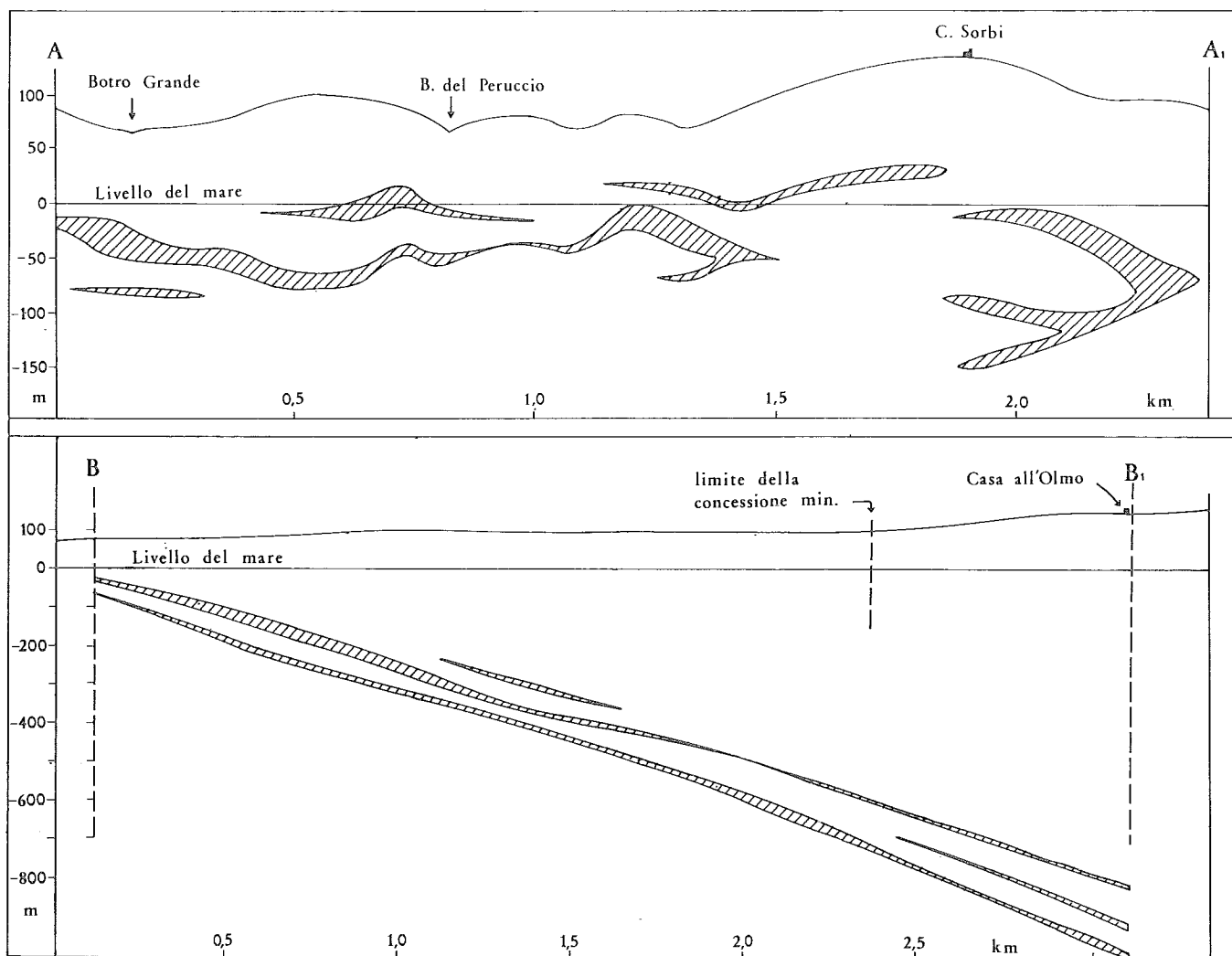


FIG. 4 - Sezione dei giacimenti salini nella parte sud-occidentale della concessione (in alto, linea A-A₁) e in quella orientale (linea B-B₁).
 FIG. 4 - Section of the salt deposits in the south-western part of the concession (top: line A-A₁) and in the eastern part (B-B₁).

za risulta di 27,5 m per la lente superiore e di 25,7 m per quella sottostante.

Nella parte sud-occidentale della concessione (sezione A-A₁, fig. 4) la situazione è molto diversa, sia per la disposizione sostanzialmente orizzontale dei depositi salini, sia per l'estrema irregolarità delle loro forme, con spessori molto variabili da luogo a luogo, ma con massimi, anche in tale settore, non superiori a 40 m.

Questo è il quadro sintetico della giacitura dei depositi di sale, principale fattore da cui dipendono l'economicità della estrazione e le condizioni tecnico-operative del lavoro in campagna. Utilizzando poi tutti i dati disponibili, è possibile realizzare sezioni di grande dettaglio nell'ambito di ciascuna zona o subzona per giungere così a una conoscenza assai realistica delle singole condizioni locali. Al gran numero di perforazioni che caratterizza il lavoro di campagna fa riscontro la costante e precisa misura dei fenomeni di abbassamento del terreno; ciò viene fatto in

In generale le lenti saline risultano abbastanza vicine alla superficie nel settore meridionale (non lontano dal corso del Cecina) e si fanno sempre più profonde col procedere verso nord, come risulta molto chiaramente dalla sezione B-B₁ riportata nella fig. 4, che è stata costruita in base a una fitta serie di sondaggi effettuati dalla Solvay; essa esprime bene la situazione della parte orientale della concessione. Vi appaiono, oltre ad una piccola lente lunga solo 500 m e spessa 4 m e ad un'altra di estensione imprecisata in quanto interamente fuori concessione, due grandi depositi salini separati da un diaframma di argille, che vanno appunto diventando sempre più profondi col procedere verso nord. Nel punto B, vicino al centro di Saline di Volterra, il deposito più superficiale ha il tetto a 107,8 m e il letto a 110,3; quello più profondo è compreso fra 141,3 e 154,3 m. La pendenza è molto regolare e porta il tetto delle due lenti, in corrispondenza del sito «Casa all'Olmo» (B₁) rispettivamente a 950 e 1 126 m. La maggiore poten-

base a periodiche rilevazioni topografiche che si appoggiano a un gran numero di caposaldi, alcuni dei quali situati al di fuori della zona mineraria. La particolare fittezza dei punti quotati e la ricchezza di dati forniti dalla Solvay hanno consentito la realizzazione delle carte a isolinee qui riportate, che offrono un'immagine molto precisa del fenomeno ⁽²⁾.

4. MODIFICAZIONI MORFOLOGICHE E DISSESTI PROVOCATI DALL'ESTRAZIONE DEL SALGEMMA

La concessione di Buriano, che si estende a sud-est di Montecatini ed è limitata a sud dal corso del Cecina, risulta compresa all'incirca tra l'alveo del Botro Grande a ovest e la strada Volterra-Saline a est. Il suo paesaggio è dominato da una serie di colline dalle forme dolci e di debole altitudine (raramente si superano i 150 m), incise da vari torrenti affluenti del Cecina, che scorrono da nord a sud. Nella morfologia di quest'area sono ben percettibili le differenze tra le zone già sottoposte all'attività estrattiva e quelle ancora non sfruttate. In queste ultime i dossi argillosi non solo conservano i loro pendii regolari ma presentano anche una certa copertura vegetale; nei territori intensamente sfruttati, invece, la morfologia è più tormentata perché i pendii dei colli risultano interrotti da dirupi e incisioni che l'erosione delle acque non può rapidamente eliminare, dato che gli abbassamenti del terreno, loro causa principale, si verificano continuamente. La vegetazione per ampi tratti è scomparsa sia per la forte erosione che caratterizza queste aree, sia per la frequente fuoriuscita di acque salate dalle condutture necessarie all'attività estrattiva.

I crolli sono meno frequenti che in passato, da quando una rete di geofoni opportunamente collocati consente di percepire i primi segnali di un'alterazione della stabilità; in tal caso si sospende l'estrazione, da un lato per non mettere a repentaglio la vita del personale che opera sul posto e dall'altro per rallentare il processo di assestamento del terreno, in modo che i vuoti vengano colmati con lenti cedimenti e non con il crollo degli strati superficiali.

Non è sempre facile prevedere nella loro estensione e nella loro entità gli abbassamenti del terreno, che cominciano a verificarsi qualche tempo dopo l'inizio dell'estrazione del sale, dato che quei fenomeni dipendono dall'intervento di diversi fattori: lo spessore e la profondità dei banchi salini, lo stato di sfruttamento della zona (e quindi l'ampiezza e la continuità del vuoto sotterraneo), la vicinanza ad altre zone coltivate e infine l'infiltrazione non voluta di acque superficiali. In generale si può dire che quanto maggiore è la potenza della massa salina utilizzata e quanto più essa è vicina alla superficie, tanto più celermente

gli abbassamenti seguono l'inizio dell'attività estrattiva e tanto maggiore è la possibilità che si verifichino crolli e franamenti.

Nelle ristrette aree in cui i dissesti del terreno sono stati più intensi si formano delle cavità di forma circolare o ellittica, con pareti tanto più acclivi quanto più rapido è stato lo spostamento verticale delle masse argillose; il fondo è quasi piatto con una leggera pendenza verso il centro. Quando queste cavità derivano da crolli improvvisi, esse hanno minori dimensioni, forma quasi circolare e pareti ripide, così da assumere l'aspetto di piccole doline (fig. 5 in alto). Cavità grandi e piccole sono ormai occupate da masse d'acqua che formano veri e propri laghetti; alcuni di questi rimangono asciutti durante l'estate, mentre altri, i più estesi, diventano permanenti. Non è raro poi che due cavità molto vicine e separate da un margine sottile e molto fessurato si riuniscano in una sola, o per ulteriore abbassamento del terreno o per azione delle acque superficiali. Contorno abbastanza regolare e profondità di qualche metro si osservano nei laghetti formati di recente, perché in seguito l'erosione e gli smottamenti tendono ad allargare le sponde e a farle meno acclivi. Queste forme dolci si notano anche negli specchi d'acqua formati nella parte centrale di una zona piuttosto ampia, in cui l'abbassamento è avvenuto lentamente ma con valori crescenti dalla periferia verso il centro (fig. 5 in basso). In questi casi una vegetazione palustre ben presto si insedia lungo le sponde e all'interno dello specchio d'acqua, rianimando in qualche modo il paesaggio d'insieme ma portando anche a una rapida fine del piccolo lago.

Gli abbassamenti del terreno determinano anche altre alterazioni della morfologia superficiale. Sui pendii dei colli infatti essi creano rotture di pendenza che a loro volta sono causa di un accentuato dilavamento dei dossi argillosi. Nelle aree quasi pianeggianti o a debole pendenza determinano crepe e fenditure del terreno, larghe talvolta anche più di 50 cm e lunghe varie decine di metri, ma con andamento del tutto regolare.

Un cenno infine sulle modificazioni dell'idrografia. È da rilevare anzitutto che la formazione dei laghetti fa sì che una parte delle precipitazioni cadute nella zona convergano verso di essi e non verso gli affluenti del F. Cecina; inoltre gli abbassamenti del terreno non solo fanno spostare lo spartiacque tra i piccoli bacini imbriferi del reticolo originario ma alterano anche il profilo verticale dei corsi d'acqua, frutto di una lunga evoluzione naturale. In tal modo viene riattivata l'erosione, per cui l'alveo di quei torrenti si è ulteriormente incassato nel terreno argilloso entro cui era scavato. Ovviamente questa intensificata erosione di origine antropica non potrà non influire su tutto il modellamento delle forme del terreno nel prossimo futuro.

5. GLI ABBASSAMENTI DEL TERRENO: UNA VALUTAZIONE QUANTITATIVA

Per valutare l'entità generale degli assestamenti del terreno si può partire da queste prime considerazioni. Attual-

⁽²⁾ Annualmente la situazione degli abbassamenti viene sintetizzata con la costruzione di carte a isolinee. Le carte presentate in questo lavoro sono state invece da me costruite con i dati dell'abbassamento complessivo dall'anno di inizio dell'estrazione a tutto il 1990.

FIG. 5 - *In alto*: una cavità formatasi da pochi anni per crollo improvviso degli strati superficiali; si notano alcuni pendii ripidi generati dal crollo. *In basso*: laghetto formato già da una decina d'anni, con sponde poco acclivi e in parte ricoperte dalla vegetazione.

FIG. 5 - *Top*: a cavern formed a few years ago after the sudden collapse of the surface layers; some steep slopes caused by the collapse can be seen; *Bottom*: a pond which appeared about ten years ago, with not very steep banks which are partly covered by vegetation.



mente la concessione di Buriano produce in media, ogni ora, 650 m³ di salamoia satura (contenuto in sale pari a 0,31 kg/l); in un anno quindi si ottengono 5,7·10⁶ m³ di salamoia, corrispondenti ad un quantitativo di sale estratto pari a 1,77·10⁹ kg. Considerando il peso specifico dell'NaCl (2,2 g/cm³), si calcola che l'attività estrattiva crea in un anno 8,0·10⁵ m³ di vuoti al di sotto della superficie topografica; si tratta di un volume assai rilevante e grosso modo uguale a quello di una galleria stradale lunga una ventina di chilometri. Se tutti i vuoti creati fossero colmati dagli abbassamenti superficiali e se questi fossero uniformemente distribuiti su tutta la concessione mineraria di Buriano, si dovrebbe registrare un abbassamento generale di ben 7,5 cm all'anno. Naturalmente nella realtà si han-

no situazioni estremamente diversificate da luogo a luogo, come vedremo tra poco.

In questo paragrafo, appunto, verranno valutate l'entità e la distribuzione degli abbassamenti in due aree campione che sono state ritenute ben rappresentative della situazione generale, dato che l'una (la zona A5) è totalmente esaurita e ormai assestata, mentre l'altra (la zona D) è tuttora in esercizio, ma con abbassamenti già sensibili, anche dell'ordine di 3-5 m.

La zona A5. Nella concessione di Buriano, che è ancora ricca di depositi salini, è questa l'area considerata esaurita. Essa occupa una superficie di 30,2 ha e si estende tra gli alvei del Botro Grande e del Botro del Peruccio (fig. 3). Benché la coltivazione sia qui cessata verso la fine degli

anni '70, gli abbassamenti del terreno sono continuati per qualche tempo; tuttavia le rilevazioni topografiche effettuate nell'Ottobre del 1990 hanno colto una situazione che si considera definitivamente assestata. Data la potenza dei depositi sfruttati e la loro non elevata profondità, i movimenti verticali del suolo vi sono stati particolarmente intensi, come prova il fatto che questa zona, insieme con quelle contigue, rappresenta la parte più tormentata da dissesti di tutta la concessione Solvay. Notiamo appunto dalla carta a isolinee (fig. 6) che gli abbassamenti più cospicui si sono verificati nella parte sud-occidentale (fino a 15 m) e in quella sud-orientale (16-17 m), al confine con la zona A3, dove il suolo si è abbassato anche di 26 m. La stessa fig. 6 presenta in basso due grafici sovrapposti che si riferiscono alla linea A-B riportata nella carta degli abbassamenti. Il primo è costituito da una sezione indicante la giacitura dei depositi salini, mentre l'altro rappresenta il profilo tracciato attraverso le isolinee lungo la stessa direttrice. Il confronto tra i due grafici conferma la relazione esistente tra lo spessore delle lenti di sale (a parità di profondità rispetto al piano di campagna) e l'entità dei movimenti verticali del suolo. Molto interessante appare anche il raffronto tra l'andamento della superficie topografica che si aveva prima dell'inizio dell'attività estrattiva (sezione in alto) e il grafico che unisce tutti i valori locali degli abbassamenti: è facile dedurre che il paesaggio originario è stato completamente stravolto, tanto da essere ormai del tutto irriconoscibile.

riscono alla linea A-B riportata nella carta degli abbassamenti. Il primo è costituito da una sezione indicante la giacitura dei depositi salini, mentre l'altro rappresenta il profilo tracciato attraverso le isolinee lungo la stessa direttrice. Il confronto tra i due grafici conferma la relazione esistente tra lo spessore delle lenti di sale (a parità di profondità rispetto al piano di campagna) e l'entità dei movimenti verticali del suolo. Molto interessante appare anche il raffronto tra l'andamento della superficie topografica che si aveva prima dell'inizio dell'attività estrattiva (sezione in alto) e il grafico che unisce tutti i valori locali degli abbassamenti: è facile dedurre che il paesaggio originario è stato completamente stravolto, tanto da essere ormai del tutto irriconoscibile.

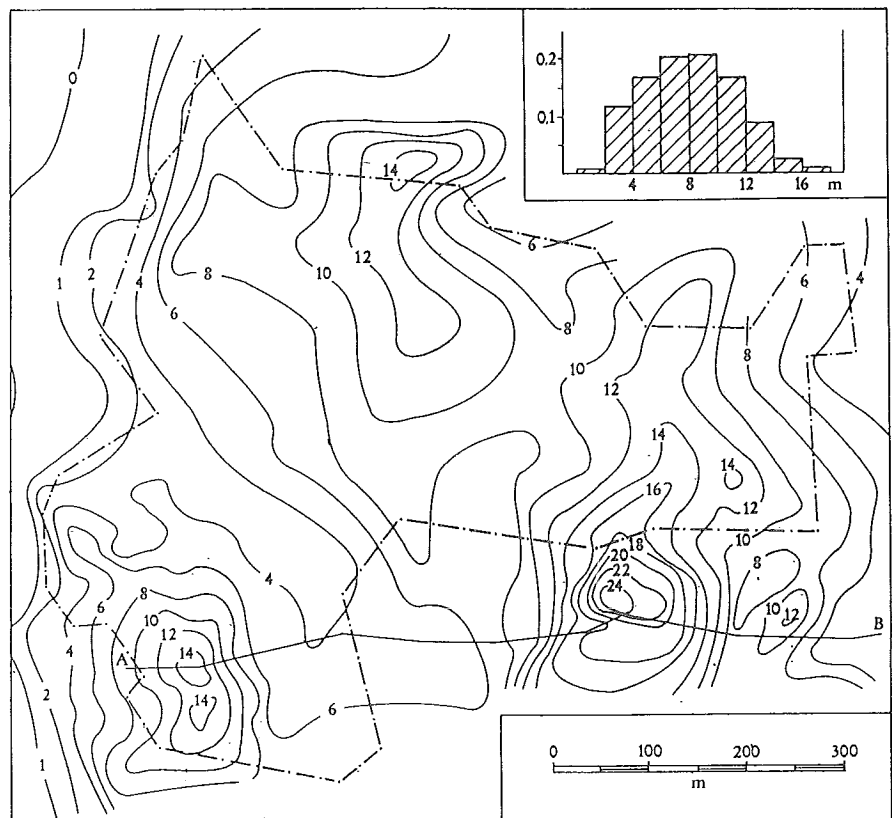
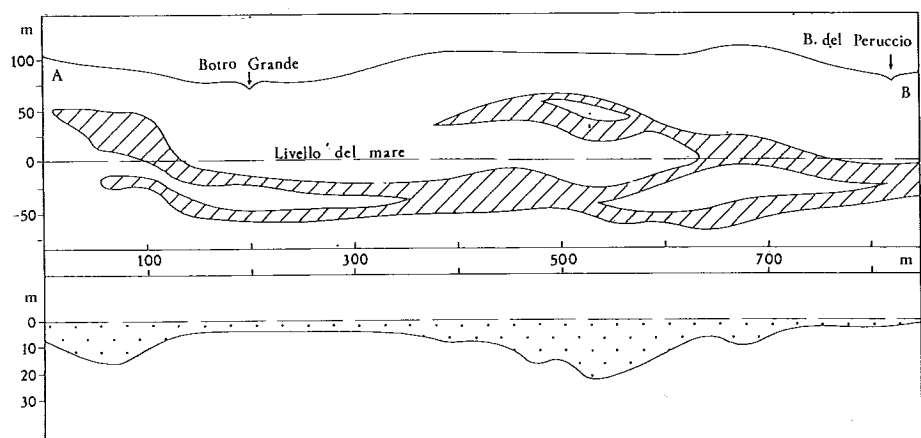


FIG. 6 - In alto: carta degli abbassamenti definitivi del terreno nella zona A5; nel riquadro la ripartizione della superficie complessiva secondo classi di frequenza dei valori di abbassamento, in metri. In basso: lungo la linea A-B sono stati costruiti la sezione riguardante la giacitura delle lenti saline (a tratteggio obliquo) e il grafico dell'entità dei movimenti verticali (a punti).

FIG. 6 - Top: map of the final sinking of the land in area A5; the framed part shows the distribution of the entire surface according to incidence categories of the levels of sinking, in metres. Along line A-B there is a reconstruction of the section referring to the salt deposits (dashed line) and the graph showing the degree of vertical movement (dotted line).



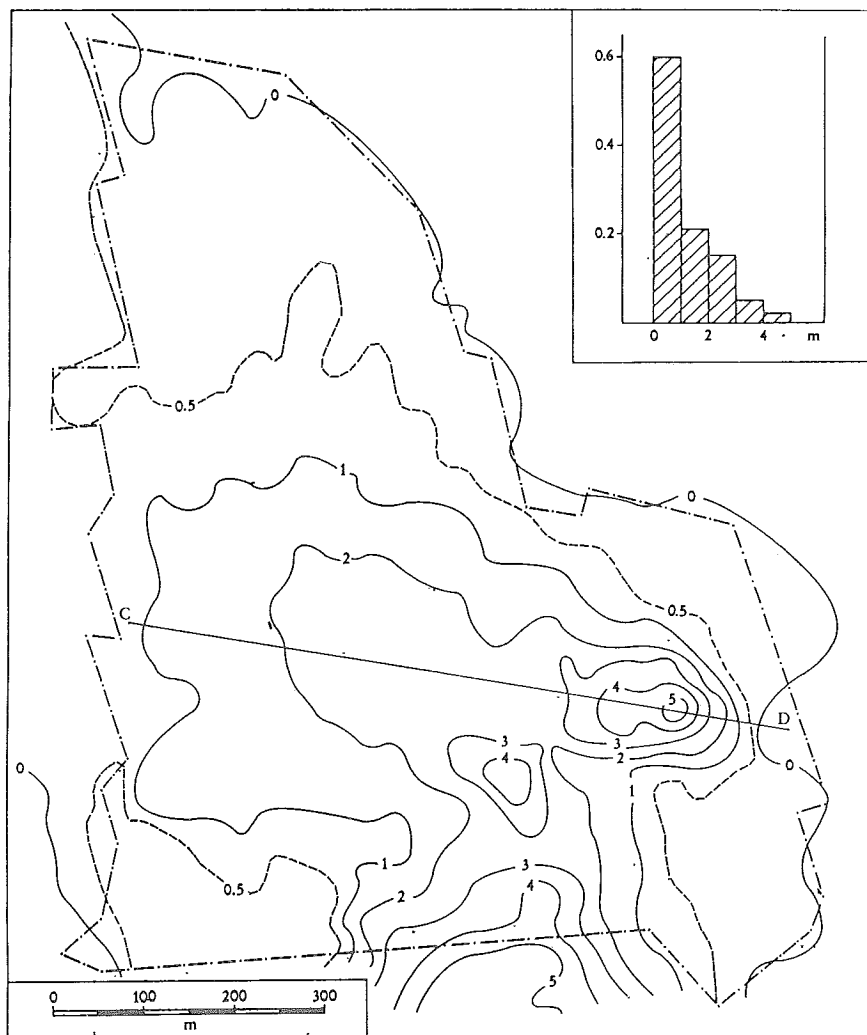
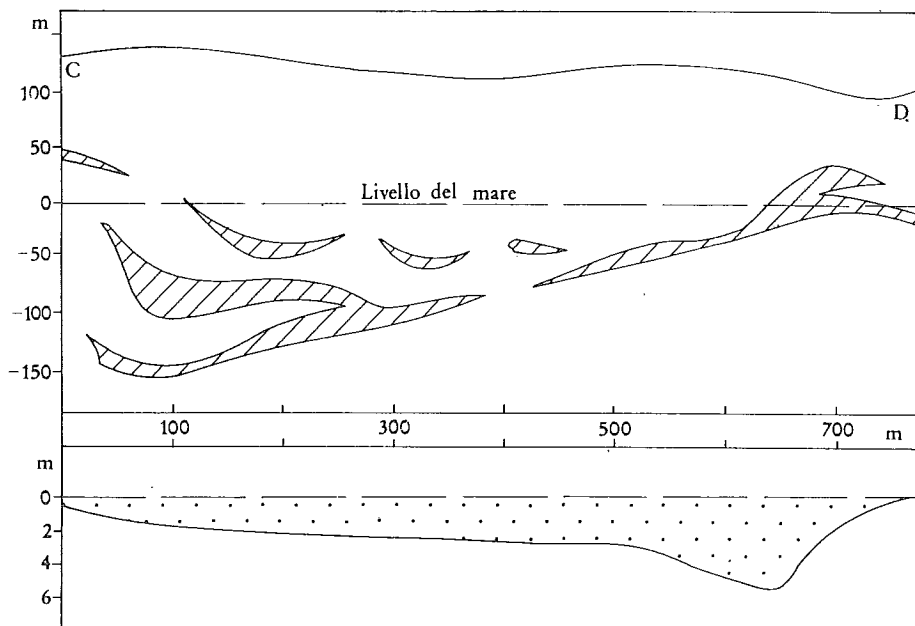


FIG. 7 - *In alto*: carta degli abbassamenti del terreno nella zona D fino alla fine del 1990; nel riquadro la ripartizione della superficie complessiva secondo classi di frequenza dei valori di abbassamento, in metri. *In basso*: lungo la linea C-D sono stati costruiti la sezione riguardante la giacitura delle lenti saline (a tratteggio obliquo) e il grafico dell'entità dei movimenti verticali (a punti).

FIG. 7 - *Top*: map of the sinking of the land in area D up to the end of 1990; the framed area shows the distribution of the entire surface according to incidence categories of the levels of sinking, in metres. Along line C-D there is a reconstruction of the section referring to the salt deposits (dashed line) and the graph showing the degree of vertical movement (dotted line).



Dalla carta degli abbassamenti del terreno, mediante accurate misurazioni planimetriche, è stata ricavata la tabella seguente, che indica la ripartizione dell'intera zona mineraria A5 in aree di diversa ampiezza in funzione di determinate classi di intensità dei movimenti verticali. Come si può rilevare, su una superficie complessiva di poco più di 30 ha, oltre la metà (58,4%) ha subito abbassamenti di valore compreso fra 6 e 12 m, ma risulta abbastanza estesa, così da occupare più di un quarto dell'estensione totale, anche l'area in cui il fenomeno ha oscillato fra 4 e 6 m.

TABELLA 1 - Superficie e volume dei terreni interessati da dissesti.
TABLE 1 - Surface and volume of the collapsed lands.

(ZONA A5)				
Abbas- samento (m)	Superficie (m ²)	%	Volume (m ³)	%
0 - 2	2031	0,7	2031	0,1
2 - 4	35469	11,7	106407	4,4
4 - 6	50469	16,7	252345	10,4
6 - 8	62031	20,5	434217	17,8
8 - 10	63750	21,1	573750	23,5
10 - 12	50625	16,8	556875	22,8
12 - 14	27969	9,3	363597	14,9
14 - 16	7500	2,5	112500	4,6
+ 16	2187	0,7	37179	1,5
TOTALE	302031	100,0	2438901	100,0

In sintesi, in questi spostamenti di masse di varia entità è stato coinvolto un volume complessivo di 2,44 milioni di m³ di terreno, equivalente a quello di un cubo di 134,6 m di lato.

La zona D. Qui la situazione appare completamente diversa. La carta della fig. 7 ci mostra subito che i movimenti verticali hanno avuto modesta entità, dato che per gran parte dell'area sono stati inferiori a 1 m, con valore massimo di 5 m. D'altra parte le isolinee della carta, molto distanziate tra loro, lasciano intuire che le modificazioni della morfologia originaria sono state fino ad oggi assai meno profonde che nell'area mineraria A5. Anche per la zona D abbiamo la possibilità di mettere a confronto l'entità degli abbassamenti del suolo lungo un allineamento di sondaggi e la potenza e la giacitura delle lenti saline lungo la stessa linea. I due grafici compresi nella fig. 7, che sintetizzano tale raffronto, dimostrano ancora una volta che vi è un rapporto diretto tra la potenza del sale e l'intensità dei movimenti verticali tendenti a colmare i vuoti interni. Qui però emerge molto chiaramente anche l'altro fattore importante, ossia la vicinanza del sale alla superficie del terreno. Notiamo infatti che l'abbassamento del suolo di 5 m si è verificato nel settore orientale, dove lo spesso-

re del sale non è maggiore di quello che è stato rilevato presso il margine occidentale; ma mentre in quest'ultimo il tetto della lente di maggiore potenza dista ben 196 m dalla superficie del terreno, nel settore orientale il deposito salino di maggiore spessore giunge a soli 65 m dal piano di campagna.

TABELLA 2 - Superficie e volume dei terreni interessati da dissesti.
TABLE 2 - Surface and volume of the collapsed lands.

(ZONA D)				
Abbas- samento (m)	Superficie (m ²)	%	Volume (m ³)	%
0 - 1	332500	59,1	166250	24,8
1 - 2	117500	20,9	176250	26,4
2 - 3	76875	13,7	192187	28,7
3 - 4	25625	4,5	89687	13,4
+ 4	10000	1,8	45000	6,7
TOTALE	562500	100,0	669374	100,0

La tabella conferma quanto si è appena detto. Su una superficie di 56,25 ha più della metà (59,1%) ha subito movimenti verticali non superiori a 1 m e l'80% non superiori a 2 m. In queste due aree insieme gli abbassamenti del terreno hanno riguardato un volume di 343500 m³, pari al 51,2% di tutto il terreno spostato dai dissesti. Nel complesso questi movimenti verticali hanno coinvolto un volume di 669374 m³, che possiamo ragguagliare a quello di un cubo di 87,5 m di lato. Come si vede, su una superficie quasi doppia di quella della zona A5 si è avuta una massa di terreno sottoposta a crolli e abbassamenti di gran lunga inferiore: in queste annotazioni statistiche si sintetizza la differenza tra una zona mineraria totalmente esaurita e gravemente dissestata e quest'ultima ancora in corso di sfruttamento e per tale motivo ancora non molto alterata.

6. CONCLUSIONE: UN RAFFRONTO TRA EROSIONE NORMALE ED «EROSIONE ANTROPICA»

Nel concludere, pare opportuno utilizzare i dati finora raccolti ed elaborati per giungere ad una valutazione dell'intensità di queste modificazioni antropiche in rapporto a quella relativa ai processi naturali. Occorre però rilevare che mentre per la zona D tali considerazioni possono avere soltanto il carattere di previsione, essendo tale area ancora in corso di sfruttamento, per la zona A5 si può tracciare un vero e proprio consuntivo finale.

Iniziando appunto dalla zona A5, ricordiamo anzitutto come essa abbia subito delle modificazioni morfologiche profonde, a causa della concomitanza di più fattori, tra i quali soprattutto la breve distanza dalla superficie delle

lenti saline e l'elevato rendimento ottenuto nel processo di estrazione (fino al 65% della consistenza originaria). In effetti da quest'area sono state ricavate $6,9 \cdot 10^6$ t di sale, che hanno lasciato un vuoto di $3,1 \cdot 10^6$ m³, ai quali hanno fatto riscontro $2,4 \cdot 10^6$ m³ di abbassamenti del terreno. Con questi due ultimi valori si ottiene il «coefficiente di abbassamento», che risulta pari a 0,78, un valore da considerarsi decisamente molto elevato. Rapportando il volume degli abbassamenti alla superficie della zona A5 si ottiene un valore medio di 8,1 metri; tenendo poi presente che questi fenomeni si sono prodotti in un arco di tempo di circa 40 anni, si giunge a valutare una velocità media di assestamento di 20 cm all'anno. Da un semplice esame di questi valori si deduce agevolmente che l'intensità di queste modificazioni è stata estremamente elevata. Se poi si considera che l'erosione naturale nella Val di Cecina è in grado di asportare mediamente uno spessore di 1 mm all'anno, come apprendiamo da ricerche specifiche di VITTORINI (1964) condotte in valli toscane vicine con caratteri geomorfologici molto simili, si può ragionevolmente affermare che in quest'area l'azione antropica ha ottenuto in meno di mezzo secolo quello che gli agenti naturali avrebbero sottratto in ben 8000 anni.

Nella zona D le indagini geognostiche avevano accertato la presenza di $22,8 \cdot 10^6$ t di sale, delle quali alla fine del 1990 era stato estratto poco più del 20%, ossia $4,6 \cdot 10^6$ t, pari a $2,1 \cdot 10^6$ m³. A quella data il volume degli abbassamenti era di $6,7 \cdot 10^5$ m³, con coefficiente di abbassamento di 0,32. Tale valore, che è di gran lunga inferiore a quello ottenuto nella zona A5, potrebbe dipendere in parte dal fatto che lo sfruttamento intensivo è qui iniziato solo da 4-5 anni, per cui gli assestamenti non hanno ancora avuto il tempo sufficiente per esplicarsi nella loro normale entità. Si può però ritenere che la zona D, anche a coltivazione ultimata, non raggiungerà il valore del coefficiente di abbassamento della A5, dato che la profondità media dei giacimenti salini in quest'area ancora in esercizio è sensibilmente maggiore. In effetti, se nella zona A5 il letto dello strato più profondo è situato mediamente a circa 140 m dalla superficie, nella D tale profondità sale a 220 m.

Per quanto sia difficile fare previsioni precise per il futuro, pare poco ragionevole ipotizzare un coefficiente di

abbassamento finale superiore a 0,50. In tal caso, supponendo che anche per la zona D si arrivi al rendimento massimo (65%), si avrebbero in totale $14,8 \cdot 10^6$ t di sale estratto, pari a $6,7 \cdot 10^6$ m³ di vuoti prodotti. Se il predetto coefficiente alla fine dell'attività estrattiva si mantenesse pari a quello attuale (0,32), si otterrebbe un abbassamento medio dell'area di 3,8 metri, mentre con il massimo da me ipotizzato (0,50) si arriverebbe ad un valore medio di 6,0 m. In sintesi, gli effetti dell'azione antropica esercitata in questa zona diverrebbero comparabili con quelli ottenuti dall'erosione naturale in una durata di tempo compresa fra 4000 e 6000 anni.

BIBLIOGRAFIA

- BONDESAN M. (1990) - *Giornata di studio «Subsidenza da estrazione di fluidi dal sottosuolo»*, Venezia, 21 sett. 1989. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 13, 98-99.
- COTECCHIA V. (1978) - *I problemi della subsidenza nella politica del territorio e della difesa del suolo*. Pacini, Pisa.
- DESIO A. (1954) - *Geologia applicata all'Ingegneria*. Hoepli, Milano, 1985.
- FELS E. (1954) - *Der wirtschaftende Mensch als Gestalter der Erde*. 2 Ediz., Frank, Stuttgart.
- GERBELLA A. (1948) - *Arte Mineraria*. 2 Ediz., Hoepli, Milano.
- HONINGEN-HUENE E. (1957) - *Ingenieurgeologische Bedeutung von Auslaugungsschäden*. Zeit. Angewandte Geol. 3, 474-487.
- IETTO A. (1988) - *Analisi di una catastrofe prevedibile: la miniera di salgemma di Belvedere di Spinello (Calabria)*. Atti XXIV Congr. Geogr. It., vol. 3, Torino, 1986, 485-503, Patron, Bologna.
- MAZZANTI R., SQUARCI P. & TAFFI L. (1963) - *Geologia della zona di Montecatini Val di Cecina, in provincia di Pisa*. Boll. Soc. Geol. It., 83, 1-67.
- PINNA M. (1958) - *Modificazioni morfologiche superficiali in rapporto con l'estrazione del salgemma in Val di Cecina*. Pubbl. Istit. Geogr. Univ. di Pisa, 6, 67-86.
- RAGGI G. & BICCHI A.R. (1985) - *Studio idrogeologico e geomorfologico dei bacini dei fiumi Cecina e Fine*. Bastogi, Livorno.
- SESTINI A. (1938) - *Intorno all'opera dell'uomo come agente modificatore della superficie terrestre*. Riv. Geogr. It., 45, 231-243.
- TREVISAN L. (1951) - *Sul complesso sedimentario del Miocene superiore e del Pliocene della Val di Cecina e sui movimenti tettonici tardivi in rapporto ai giacimenti di lignite e di salgemma*. Boll. Soc. Geol. It., 70, 65-78.
- VITTORINI S. (1964) - *La valutazione quantitativa dell'erosione nei suoli argillosi pliocenici in Valdera*. Atti XIX Congr. Geogr. It., Como, 1964, Vol. III, 83-101.