

Come la natura reagisce all'intervento dell'uomo

Responsabilità di chi provoca e di chi interpetra tali reazioni

P. CALOI

Ricevuto il 20 Ottobre 1970

... la natura va "coltivata"; non si manomette impunemente per cupidigia: agire su un punto senza conoscere fino in fondo quali siano le conseguenze e se si alterino degli equilibri, non è scienza, è affidarsi al caso...

M. F. SCIACCA: *L'oscuramento dell'intelligenza*, pag. 138.
(Marzorati - 1970)

RIASSUNTO. -- Vengono esaminate alcune delle risposte che la natura, disordinatamente sollecitata, dà agli interventi dell'uomo. Sono riportati casi in cui scosse sismiche sono state provocate dall'estrazione di enormi quantità di minerali, fluidi o solidi, dal sottosuolo; oppure dalla creazione di bacini artificiali.

L'estrazione di grandi quantità di fluidi dal sottosuolo può altresì provocare — come ha effettivamente provocato — cospicue flessioni del terreno, come nel Delta del Po, nella Valle di San Joaquin, a San Diego, ecc.

Particolare attenzione è posta alla sismicità provocata da bacini artificiali, formati con l'erezione di grandi dighe di sbarramento. L'A. si occupa di questo problema da circa un ventennio. Qui vengono riassunti alcuni dei risultati delle sue esperienze. La sismicità può insorgere in qualsiasi bacino idrico, indipendentemente dalle sue dimensioni e dalla sua profondità. Essa è strettamente legata al campo elastico preesistente: più questo è instabile, più facile si presenta l'insorgere della microsismicità. L'inomogeneità delle caratteristiche fisiche della roccia (anche per bacini geologicamente uniformi), può essere causa di una microsismicità locale (bacino di Pieve di Cadore).

Un disturbo tettonico assopito può venire ridestato, con conseguenze talvolta disastrose (Vajont). La profondità del bacino non è elemento determinante per l'insorgere di locale sismicità. Il bacino artificiale di La Maina (Sauris), ha una profondità di 130 metri; ciò malgrado, la microsismicità locale è pressoché inesistente. Questo si spiega con l'elevatissima rigidità

della roccia « in loco », che garantisce un'elevata stabilità al campo elastico associato.

La microsismicità non sempre è legata alla pressione e all'infiltrazione delle acque d'invaso. Talvolta, anche la decompressione susseguente a rapido svaso può provocare scosse sismiche (Pieve di Cadore). In ogni modo — come si è detto —, non sempre la formazione di un bacino artificiale è causa di sismicità. In Italia, oltre al citato bacino di La Maina, si hanno esempi di estesi bacini idrici, ricavati in zone sismiche, presso i quali la microsismicità è minima o inesistente (Mis, Ambiesta, ecc.).

L'A. è del parere che, comunque, un bacino artificiale non può mai provocare grossi terremoti ($M > 4$): se questi si verificano con epicentro prossimo, è da ritenere trattarsi di pura coincidenza o di semplice concausa anticipatrice di un fenomeno, che si sarebbe in ogni caso verificato. D'altronde, non è tanto l'azione di forti terremoti isolati che preoccupa nella preservazione delle dighe e dei relativi bacini, quanto l'insidia, ben più grave, nascosta in una microsismicità, prolungata nel tempo, capace di demolire inavvertitamente il tessuto molecolare della roccia, formante la culla della diga e il sostegno del bacino.

Non va taciuta, a questo punto, la responsabilità degli uomini di scienza, chiamati a discutere, e a chiarire nelle loro cause, anomalie provocate nel sottosuolo, da interventi più o meno massicci. Sovente, indagini del genere, vengono finanziate dagli Enti patrocinatori di tali interventi. E qui il discorso esula dai casi specifici, cui si fa cenno nel testo, per assumere un significato più generale. È sempre pericoloso, dal punto di vista della libertà e dell'indipendenza di giudizio, lavorare su commissione. Chi commette una ricerca (sia esso un Ente pubblico o privato), quasi sempre lo fa per scopi particolaristici, di sfruttamento: mai a favore della comunità, intesa in senso lato. Avviene così che, talvolta — quasi inavvertitamente — lo scienziato abdichi alla sua dignità, per porsi al servizio di interessi, sovente inconfessabili. Era pietosamente caricaturale il poeta cesareo, addirittura grottesco diviene lo scienziato « cesareo ». L'intelligenza non va resa schiava degli appetiti di classi o di popoli privilegiati, per scopi di predominio o di sfruttamento. Anche perché la natura si vendica di questi attentati: i veli che le vengono sollevati con malizia, spesso scatenano forze che si ritorcono contro gli attentatori o — peggio — contro gli innocenti e gli inconsapevoli. È giusto prodigarsi nello sfruttamento delle risorse naturali. La Natura va però interrogata con animo spoglio da ambizioni o da cupidigie, in piena umiltà ed onestà d'intenti, con profondo rispetto e doverosa cautela: solo in tal modo essa darà risposte generose e consentirà di essere domata.

Generalità. — Il titolo può apparire — ed è — alquanto pretenzioso. Intendo infatti precisare che non è mia intenzione indagare (anche perché l'impresa sarebbe per me impari) come la natura reagisca, comunque sollecitata dall'uomo. Mi limiterò a richiamare quei casi che ho avuto la ventura (e la sventura) di sottoporre ad esame personale; e qualche altro, osservato qua e là per il mondo.

Dividerò le conseguenze dei cospicui interventi dell'uomo sulla natura in due grandi categorie; quelle in campo *elastico* e quelle in campo *plastico*. Alle prime è collegata la *microsismicità e la sismicità provocata*; alle seconde le *flessioni* (abbassamenti, indicati anche con il barbarismo « subsidenze ») *del suolo*.

1. - MICROSISMICITÀ E SISMICITÀ PROVOCATA.

1.1 *Microsismicità presso le grandi dighe*. È un argomento su cui mi sono intrattenuto più volte nell'ultimo ventennio (1-22). Riassumerò qui gli aspetti che caratterizzano la microsismicità, quale venne da me registrata presso grandi dighe, rimandando — per quanto concerne i particolari e le interpretazioni — ai lavori sopra citati.

La microsismicità presso una grande diga può essere di tipo *naturale*, preesistente cioè alla costruzione del manufatto, o di tipo *latente* e quindi riattivata dalle perturbazioni in campo elastico, provocate dal complesso delle esplosioni che hanno accompagnato lo sbancamento dei sistemi rocciosi, nei quali la diga venne successivamente innestata, o di tipo *provocato*, come conseguenza appunto dello sbancamento, dei movimenti della diga (legati alle variazioni di livello dell'acqua nel

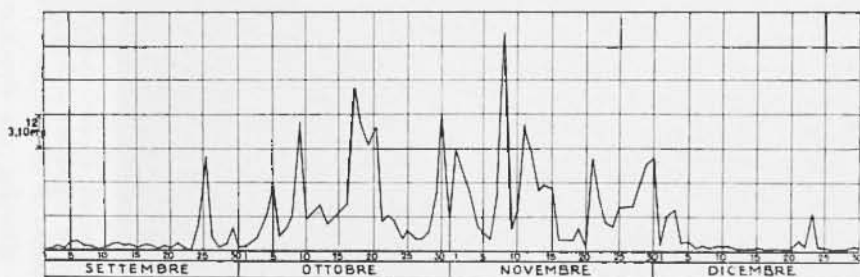


Fig. 1 - Alle notevoli flessioni verso valle, osservate mediante clinografi nell'autunno 1951 e provocate dal raffreddamento stagionale, fece riscontro un'accentuata attività microsismica, di cui il diagramma fornisce la media energia liberata. Tale microsismicità, presso la diga di Pieve di Cadore, andò scemando di anno in anno, per estinguersi praticamente nel volgere di un quinquennio.

Fig. 1 - To the considerable bendings downstream, observed by clinographs in autumn 1951 and produced by seasonal cooling, corresponded a marked microseismic activity. The mean energy set free by it is shown in the diagram. Near the Dam of Pieve di Cadore this microseismicity subsided year after year and virtually came to an end within a five year period.

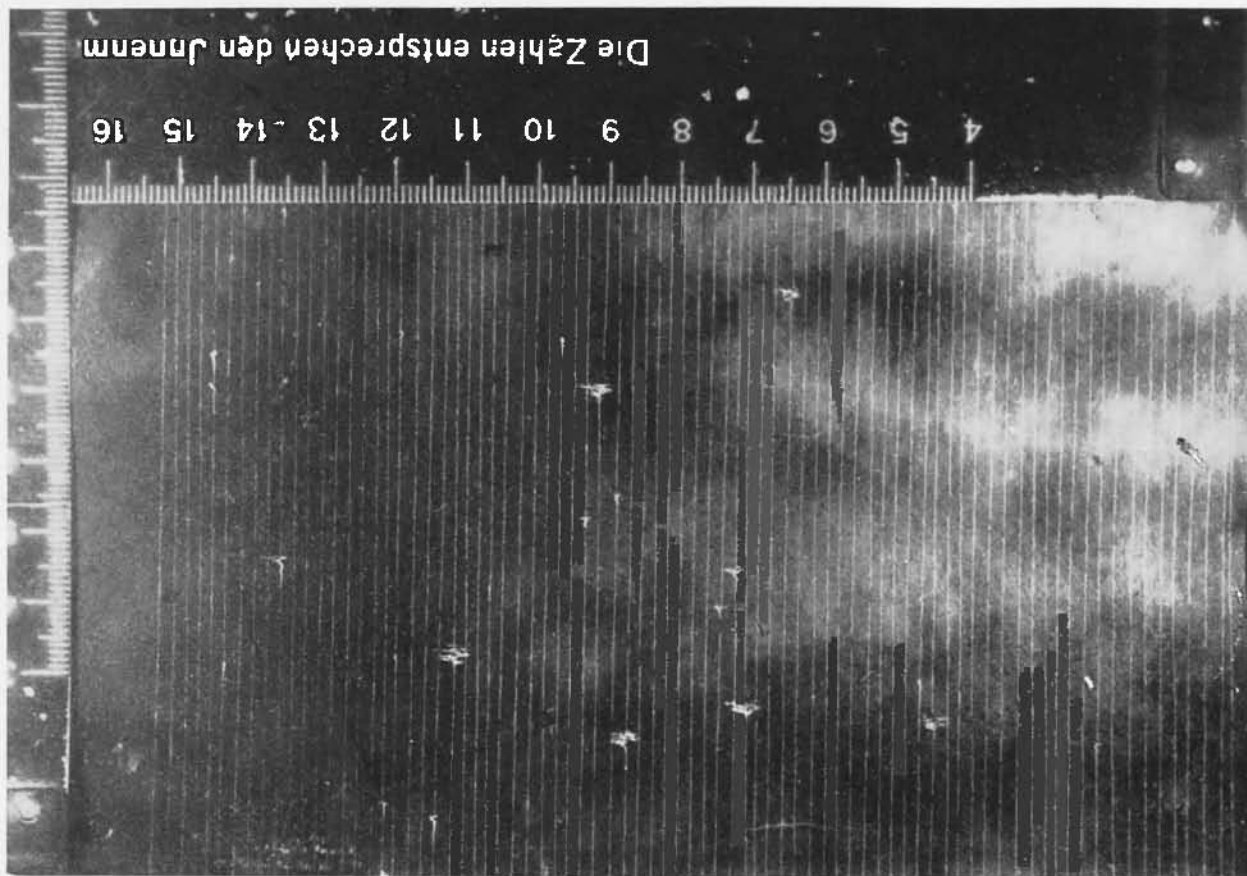


Fig. 2 - Scossette interessanti i conci della diga, in periodo di sensibile flessione verso valle. Le scossette riportate in figura, e registrate dalla locale stazione sismica (comp. EW) il 12-13 Novembre 1951, hanno avuto energie variabili fra 10^{11} e 10^{12} erg (v. Fig. 1).

Fig. 2 - Light shocks affecting the structure of the dam in a period of sizeable bending downstream. The light shocks shown in the figure and recorded by the local seismic station (comp. EW) on November 12 and 13, 1951 had a variation of energy between 10^{11} and 10^{12} erg (see Fig. 1).

bacino idrico a monte, all'insolazione, alle vicende climatiche stagionali ed accidentali, ecc.) e dell'azione dell'invaso (sia come variazione di pressione sul fondo, sia in causa delle infiltrazioni d'acqua in zone instabili del bacino idrico o prossime ad esso).

Della copiosa casistica ottenuta in oltre un ventennio di osservazioni, mi limiterò a qualche esempio. Per quanto concerne la diga di Pieve di Cadore, la stazione sismica ivi funzionante, già all'inizio della sua attività (Gennaio 1951) ha dato chiarissima testimonianza di una microsismicità, nei suoi aspetti caratteristici inequivocabilmente legata all'esistenza della diga e dei suoi movimenti. La Fig. 1 riproduce uno dei tanti periodi, durante i quali la crisi microsismica si è manifestata. Questo tipo di microsismicità, strettamente legata ai movimenti di una diga, tende ad attenuarsi nel volger del tempo: per quanto concerne la diga di Pieve di Cadore, essa si è praticamente estinta nel primo quinquennio, successivo alla sua costruzione.

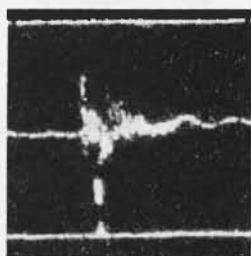


Fig. 3 - Esempio di microscosse provenienti dal bacino o da zona a valle della diga (registrate nel 1951, energia di $2 \cdot 10^{12}$ erg ca). Numerosi altri esempi su pubblicazioni precedenti, specie in (2,4,5).

Fig. 3 - Example of microshocks deriving from the waterbasin or from downstream areas of the dam. Recorded in 1951, energies about $2 \cdot 10^{12}$ erg. Many other examples in previous publications, chiefly in (2,4,5).

L'altro tipo di microsismicità (e sismicità) provocata è quella proveniente dal bacino idrico e dalle sue variazioni. Anche qui mi limiterò a due sole testimonianze.

Sempre con riferimento alla diga di Pieve di Cadore, i periodi di invasi e svasi in rapida alternazione o di lunghi svasi seguiti da invaso, furono caratterizzati da microsismicità e sismicità provocata. Particolarmente significativo il periodo sismico verificatosi fra il 1963 e il 1964. Gradatamente, dal massimo invaso dell'Ottobre 1963, il lago di Pieve di Cadore perse di quota e, verso la fine del Marzo 1964, poteva ritenersi praticamente vuoto (Fig. 10b). Tutta la zona interessata dal lago si è trovata quindi in fase di decompressione, con conseguente alterazione dell'equilibrio elastico, alterazione che si è tradotta in alcune serie di microscosse. La prima, verificatasi, dal 5 al 26 Marzo, è costituita da 17 microscosse, registrate dalla stazione sismica — sistemata nella cabina-comandi, a ca 22 m dalla diga — senza possibilità di risoluzione fra

onde longitudinali e trasversali, data la vicinanza della loro origine, da localizzarsi nelle immediate vicinanze della stazione stessa (19). Un'altra serie di scosse di maggiore intensità (alcune avvertite dalle popolazioni

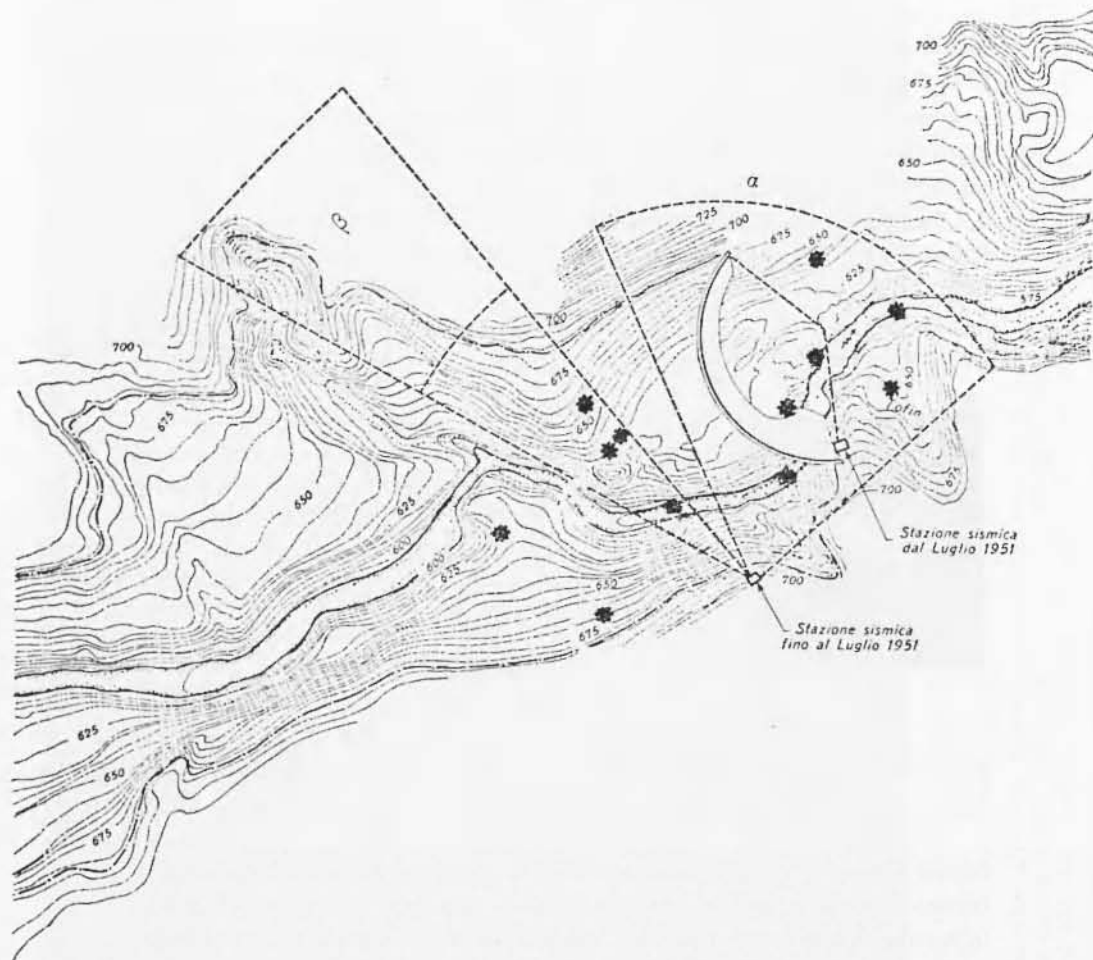


Fig. 4 - Epicentri di alcune microscosse provenienti da punti in prossimità della diga di Pieve di Cadore. Dal settore β provennero numerosissime le scossette negli anni 1950-51; anche dal settore α originarono numerosissime microscosse, specie nei primi tre anni di funzionamento (1950-1953).

Fig. 4 -- Epicentres of some microshocks coming from spots near the dam of Pieve di Cadore. Very numerous were the light shocks of 1950/51 from the area marked β . Also the area marked α give rise to large amounts of lights shocks, especially during the first three years of operation (1950-1953).

rivierasche) si è verificata fra il 10 e il 18 Maggio 1964: le cinque principali (di magnitudo dell'ordine di 1,5 ~ 2) ebbero il loro epicentro a qualche chilometro dalla diga (¹⁹); due di tali epicentri cadono nel bacino idrico, altri ai margini (Fig. 11). Successivamente fino al Luglio compreso, si ebbero altre sporadiche manifestazioni sismiche, di minore entità. Da Maggio ad Agosto il numero complessivo delle microscosse fu di 65.

Le manifestazioni sismiche sopra citate hanno avuto origine sopra una zona relativamente estesa, or qua or là, quasi statisticamente, senza riferimenti preferenziali: è questa la caratteristica distintiva della microsismicità provocata nel bacino idrico di Pieve di Cadore.

Non così, purtroppo, si presentarono le cose nel bacino del Vajont.

Ultimata la diga, in corrispondenza dei primi invasi, fu messa in evidenza una zona, in sponda sinistra, a monte della diga, da cui provenivano sistematicamente microscosse provocate da cedimento.

A Sud di detta zona (Fig. 14), nel corpo del monte Toc, veniva una risposta elastica caratterizzata da segno contrario, come per un residuo di orogenesi. Particolarmente frequenti, si succedettero le microscosse nell'Ottobre del 1960, nella zona dove poi si verificò il collasso finale. A questa serie di microscosse attribuii il decadimento delle caratteristiche elastiche del sistema roccioso in sponda sinistra, rivelato dall'enorme diminuzione di velocità delle onde elastiche, intervenuto fra il Dicembre 1959 e il Dicembre 1960. Per i particolari su queste indagini, rimando alle pubblicazioni specifiche (²⁰⁻²¹).

Qui mi preme sottolineare la particolarità delle manifestazioni sismiche osservate al Vajont: l'esistenza cioè di una zona ben delimitata, contraddistinta da una spiccata predisposizione alle perturbazioni in campo elastico, associate all'aumento del livello del lago artificiale. A differenza di quanto si verifica nel bacino di Pieve di Cadore, dove la sismicità si rivela diffusa, disordinata, sopra una zona relativamente vasta, nel bacino del Vajont le microscosse provennero pressoché esclusivamente dalla stessa zona, in sponda sinistra, quasi affetta da un antico male (la preesistenza di una soprastante stratificazione franosa è sintomatica), ridestato dai primi invasi del lago artificiale. La Fig. 14 riassume gli aspetti esteriori di questa attività, alla fine rivelatasi micidiale.

Anche dopo il disastro del 9 Ottobre 1963, la stazione sismica ricostruita di fianco alla diga, in sponda sinistra, ripropose lo stesso meccanismo: aumenti improvvisi del lago residuo, rimasto di fronte a Erto, provocarono centinaia di piccole scosse, provenienti dalla solita zona.

Così avvenne per l'alluvione dei primi di Settembre 1965 e si ripeté per l'alluvione del 4-6 Novembre 1966. Ciò è ampiamente discusso nelle

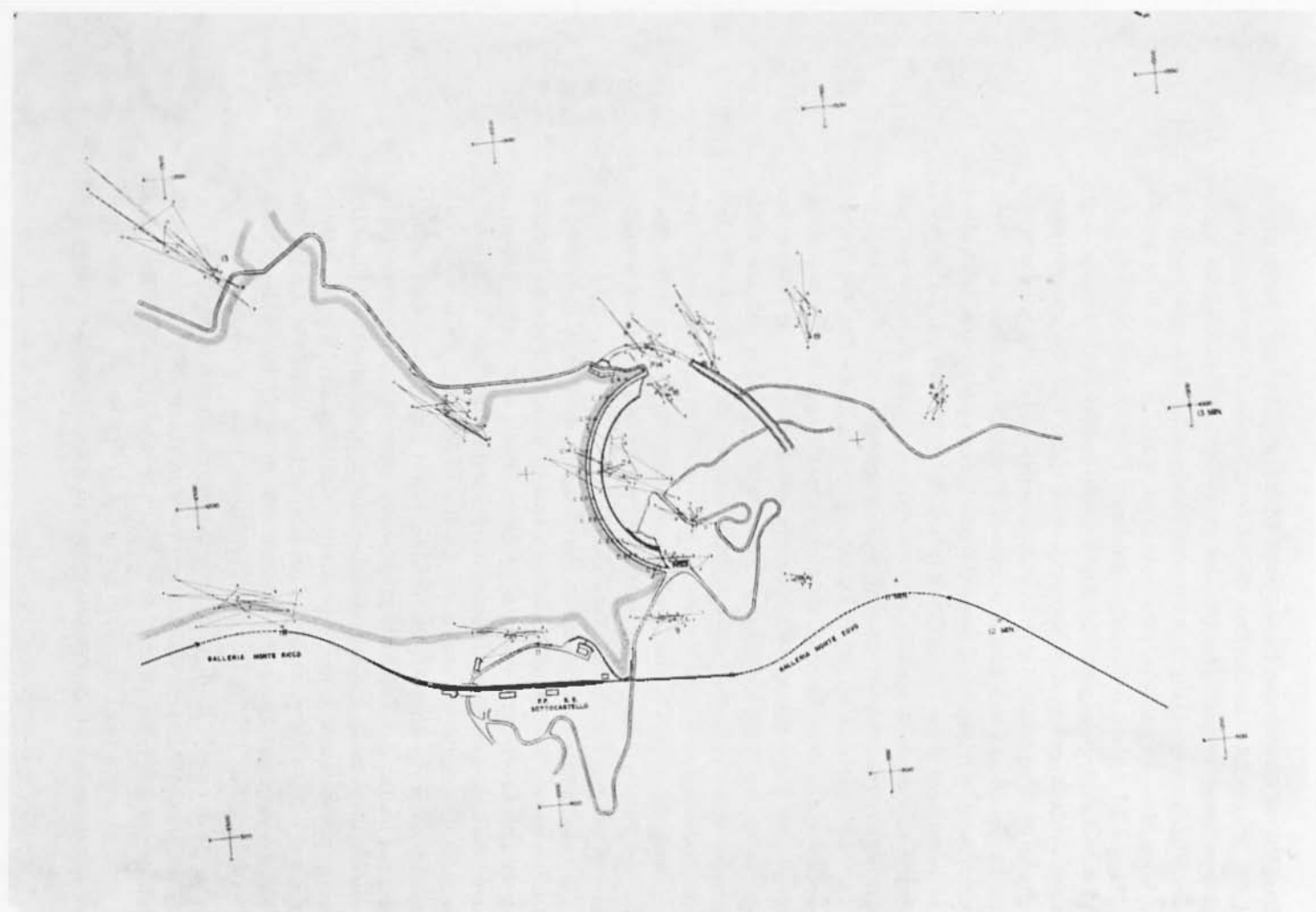


Fig. 5 - Spostamenti della catena trigonometrica, osservati presso la diga di Pieve di Cadore fra il 1949 e il 1955. Tali spostamenti furono poi elaborati dal punto di vista geofisico (13,14). Si noti che la zona dove gli spostamenti risultarono più cospicui, rientra nel settore β della Fig. 4. (Spostamenti ridotti a metà)

Fig. 5 - Movement of the trigonometric chain, observed near the Pieve di Cadore Dam between 1949 and 1955. These movements were successively elaborated geophysically (13,14). It will be noted that the spots where movements were strongest belong to the area marked β in Fig. 4. (Movements at $1/2$)

pubblicazioni specifiche (20-23). Qui mi limito a riportare la Fig. 17, in cui viene riassunta l'attività sismica nella zona del Vajont dal 1964 al 1967. Da quando è stato possibile impedire aumenti di livello nel residuo lago di Erto, grazie ad un capace scarico verso la valle del Cellina, il fenomeno non si è più ripetuto.

1.1.1. Quali le cause della microsismicità provocata presso alcune grandi dighe e relativi bacini idrici?

Ritengo che la microsismicità osservata nei pressi immediati di qualche grande diga, oltre che nella perturbazione del campo elastico, provocata dallo sbancamento, sia da ricercare nei movimenti stessi della diga.

Una volta costruita la diga di Pieve di Cadore, si sono venute a determinare nel bacino delle condizioni di più o meno accentuata instabilità, causate dalla tendenza del sistema roccioso verso nuove posizioni di equilibrio. Al variare del livello dell'acqua nel bacino e in corrispondenza delle variazioni termiche stagionali, la diga compie dei movimenti, flettendo ora verso valle, ora verso monte. È in corrispondenza di queste flessioni che avvengono brusche rotture d'equilibrio in campo elastico, rivelate da lunghe serie di scosse sismiche (*) (Fig. 1).

(*) Per quanto concerne la diga di Pieve di Cadore, va detto che, — con riferimento alla natura geologica della zona — la sezione, in cui lo sbarramento è stato costruito, è scavata nelle rocce dolomitiche del Trias superiore (Dolomia principale), il cui andamento è quasi normale all'asse del Piave. Nel suo complesso, la serie rocciosa del fianco destro — salvo qualche zona in cui la roccia si presenta un po' fratturata — risulta regolare e continua. Sul fianco sinistro si trovano due tipi morfologici diversi: il superiore (che ha per base il Pian delle Ere, q. 625), rispondente al fondo del soleo percorso dall'antico ghiacciaio del Piave; l'inferiore rispondente all'incisione profonda provocata dal fiume Piave. Lo zoccolo a gradino del Pian delle Ere presenta lo stesso tipo di roccia formante il fianco destro. Anche in esso si osservano qua e là fratturazioni nella roccia, provocate da movimenti tettonici. (Da una relazione del compianto Prof. Giorgio Dal Piaz). Indagini successive sull'elasticità della roccia, hanno trovato, sia in sponda sinistra che in sponda destra, un modulo di Young molto basso, corrispondente, in media, a velocità per le onde longitudinali, di 2.2 km/sec per la roccia al di sopra di quota 625. Al di sotto di tale quota, il modulo di elasticità si presenta molto più elevato (velocità per le onde longitudinali di 4 e più km/sec) mentre lo zoccolo del Pian delle Ere presenta un modulo elevatissimo, corrispondente a velocità, per le onde longitudinali, variante da 5 a 7 km/sec (24,21). È a questa difformità nelle caratteristiche elastiche del mezzo che vanno attribuite le alterazioni in campo elastico, tramutate in microsismicità diffusa, appunto a motivo della difforme risposta del mezzo alle varie sollecitazioni.

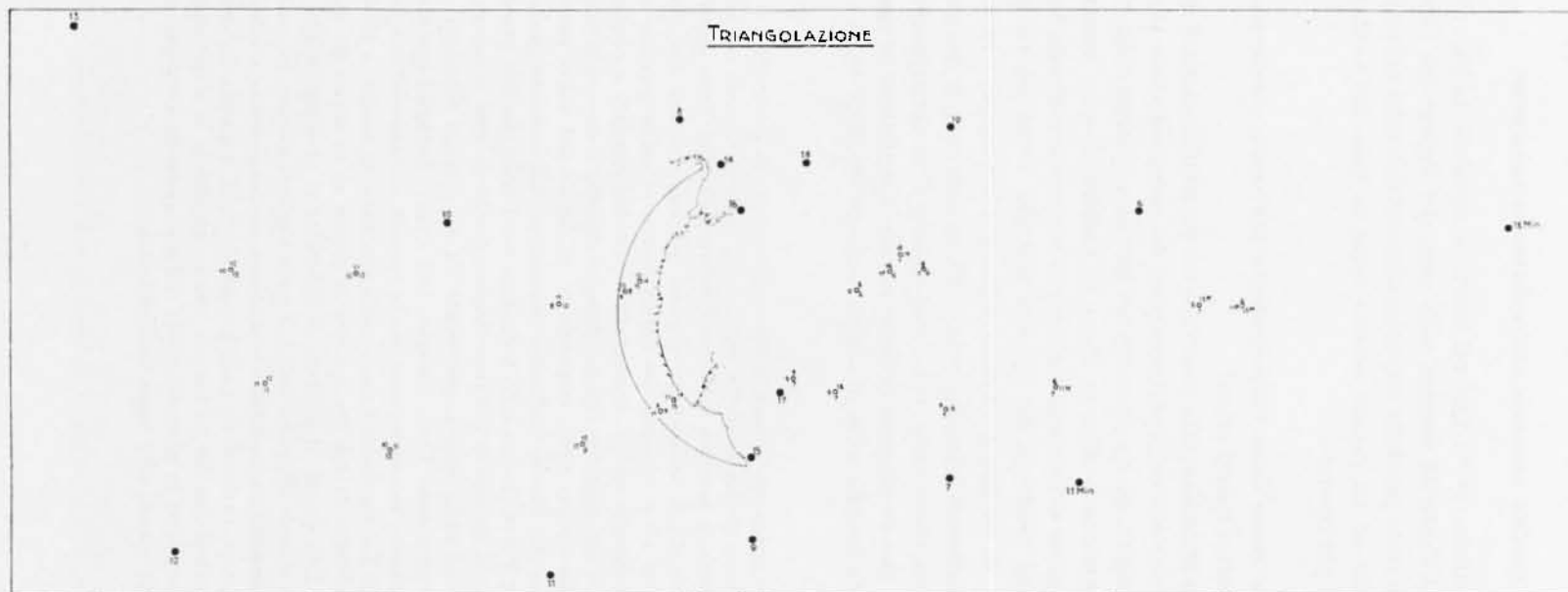


Fig. 6 - I cerchietti rappresentano i capisaldi della triangolazione; le circonferenze, i baricentri dei relativi triangoli.

Fig. 6 - Small circles stand for the datum points of triangulation; the circumferences, the points of gravity of the respective triangles.

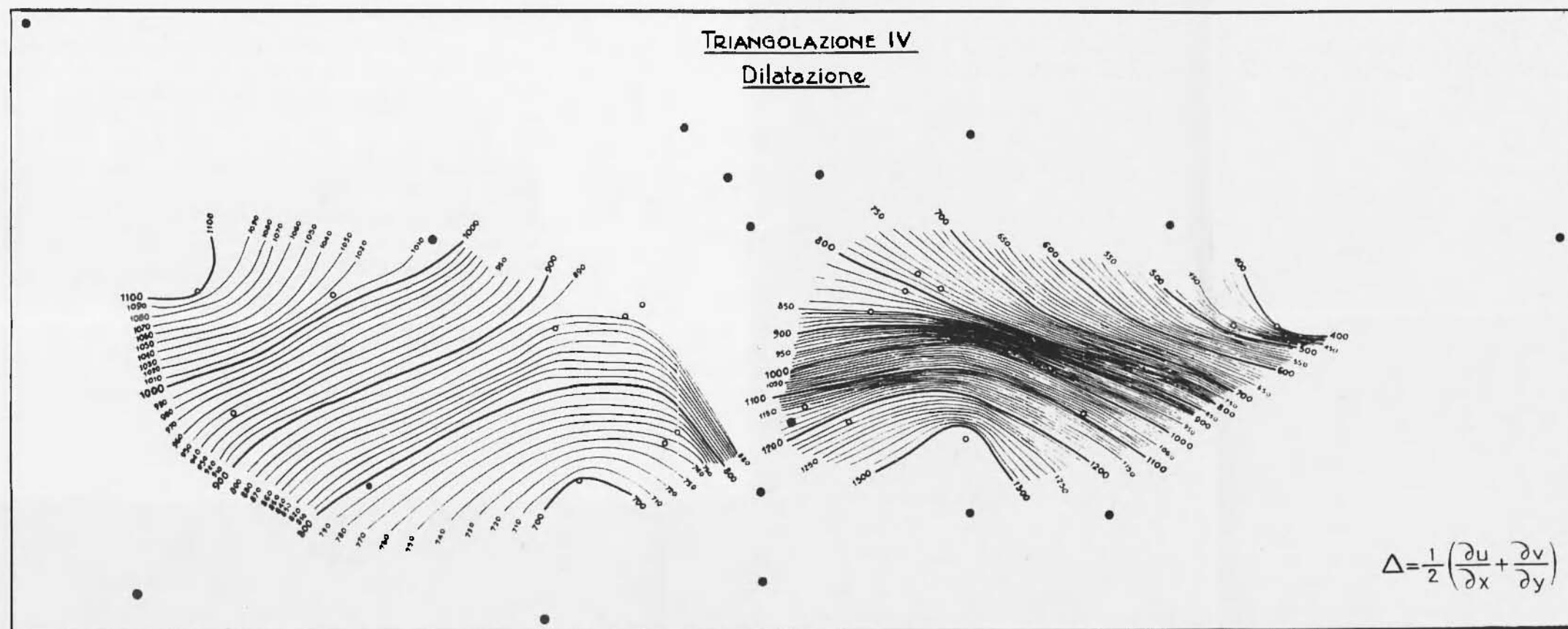
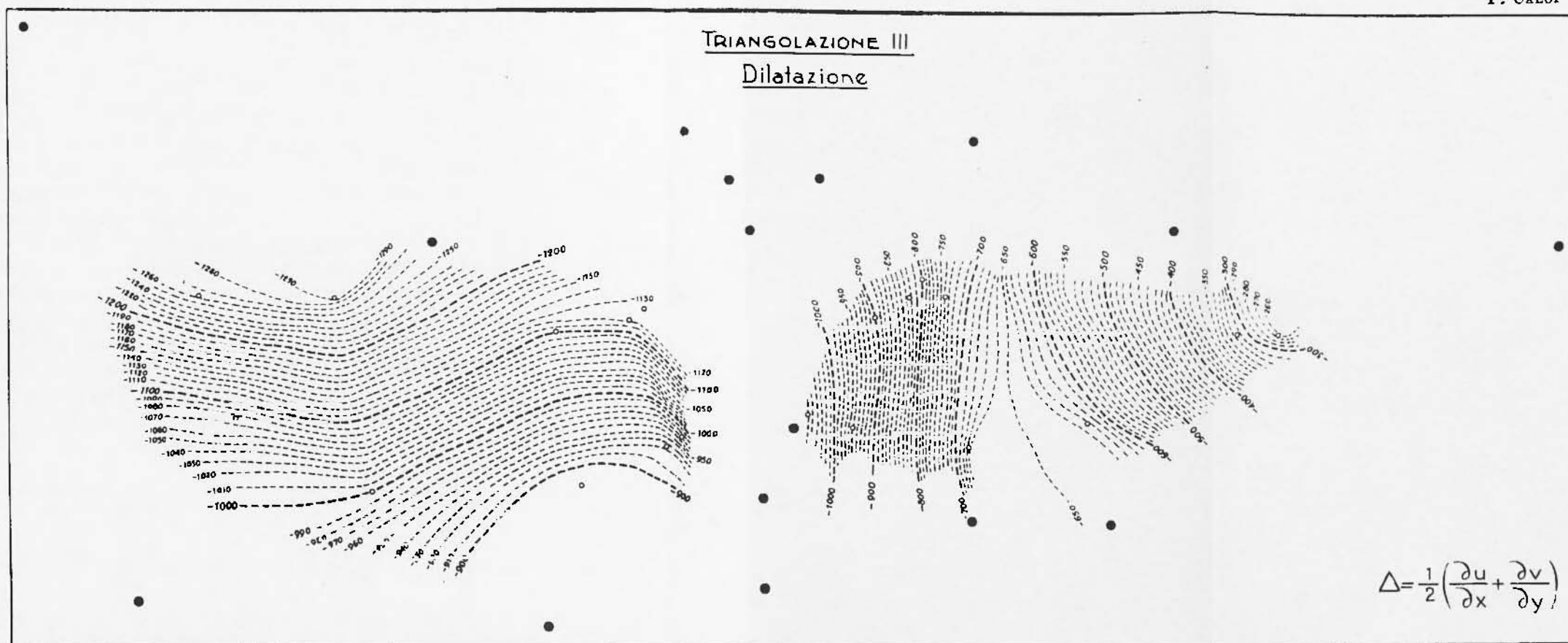


Fig. 7 - Andamento della «dilatazione» da una triangolazione all'altra. Nell'esempio riportato, nel passaggio dalla triangolazione II alla III, si è verificata una contrazione del terreno; nel passaggio dalla III alla IV, una espansione (dilatazione positiva). (Altri esempi nel lavoro originale ⁽¹³⁾).

Fig. 7 - Development of "dilatation" from one triangulation to another. In the example shown here there was a contraction of ground between triangulations II and III, and a positive dilatation (expansion) between triangulations III and IV. (For further examples see the original work ⁽¹³⁾).

Delle triangolazioni eseguite periodicamente nell'area interessata dalla diga, possono dare gli elementi atti alla determinazione delle variazioni delle caratteristiche elastiche. Infatti, le misure degli spostamenti orizzontali di punti determinati, quali risultano dalle triangolazioni, possono servire al calcolo delle componenti della deformazione orizzontale per ogni triangolo (nell'ipotesi che la deformazione sia uniforme in tutto un triangolo), nonché permettere la valutazione della grandezza e della direzione delle deformazioni principali, della dilatazione, della rotazione e della distorsione: gli elementi cioè atti a caratterizzare la deformazione elastica (3).

Non mi soffermerò naturalmente su questioni teoriche, riassunte nei lavori specifici (13-14). Mi limiterò ad osservare che, con riferimento ad un arbitrario sistema di coordinate, x, y , se u e v indicano le componenti dello spostamento di un punto trigonometrico, quando si assuma come immutabile la linea base — alla quale gli spostamenti orizzontali misurati sono riferiti —, si ottengono per la dilatazione A , per la rotazione φ , per la distorsione S , per gli assi principali e_1 e e_2 della deformazione, per l'angolo δ , che la direzione e_1 fa con l'asse delle x , le espressioni:

$$A = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}; \quad 2\varphi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}; \quad 2S = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y};$$

$$e_{1,2} = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2};$$

$$\delta_{1,2} = \operatorname{artg} \left[\frac{\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \pm \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2}}{\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}} \right].$$

La distorsione massima assume l'espressione:

$$S_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} = \frac{1}{2} (e_1 - e_2).$$

Nel bacino di Pieve di Cadore, dal 15 Agosto 1949 al 24 Giugno 1952, furono compiute, dalla Società Adriatica di Elettricità, otto triangolazioni. Ritenni di notevole interesse eseguire un'elaborazione geofisica delle osservazioni ottenute, e tabulate, in dette triangolazioni. La Fig. 5 riproduce gli spostamenti della catena trigonometrica, come

furono misurati nelle predette otto triangolazioni. La Figura 6 riporta, assieme ai capisaldi di misura, anche la posizione dei baricentri dei triangoli esaminati. Il metodo seguito per l'elaborazione e i risultati del gravoso lavoro sono stati riassunti in pubblicazioni apparse nel 1957⁽¹³⁾ e nel 1958⁽¹⁴⁾. I calcoli dell'elaborazione sono raccolti in 14 tabelle; la ricostruzione grafica degli elementi della *deformazione* elastica, figura in 35 tavole. Qui mi limito a riportare la *dilatazione*, la *rotazione*, la *distorsione* e gli *assi principali della deformazione* (Figg. 7-9, in 10^{-7} egs) quali risultarono in corrispondenza della IV e della V triangolazione. Come osservazione generale, è stato messo in rilievo che ogni triangolazione fu generalmente caratterizzata da un solo segno (positivo — tratto pieno — o negativo) per la *dilatazione*. Ciò sta a significare che, in tutta la zona interessata dalla diga e dalla parte di bacino idrico in esame, si ebbe *contemporaneamente* o *espansione* del mezzo (dilatazione positiva) o *contrazione*. Il variare dell'intensità e della direzione di questi fenomeni dette luogo a *distorsioni*, più o meno accentuate. Gli assi principali delle ellissi di deformazione (tese o contratte) esprimono — con le loro lunghezze e direzioni — l'entità della deformazione elastica e l'azimut secondo cui si manifestò. Per gli altri commenti interpretativi, si rimanda alle pubblicazioni citate. L'accento qui riportato ci sembra, in ogni modo, sufficiente a *giustificare* la microsismicità, comunque legata alla diga, quale si è manifestata durante il primo quinquennio di funzionamento della grande diga di Pieve di Cadore. Le alterazioni rilevate, in campo elastico, sono responsabili delle migliaia di micrososse registrate dalla stazione sistemata presso la diga. Nella planimetria della Fig. 4 sono riportati, con asterischi, gli epicentri di alcune delle principali scossette registrate (di magnitudo compresa fra 0 e 1) nel biennio 1950-1951. È indicato con β uno dei settori da cui provennero numerosissime le micrososse nel biennio accennato. Va fortemente sottolineato che detto settore, da cui ebbe origine il massimo numero di micrososse, coincide con quella parte del bacino che, secondo i calcoli della sezione geodetica della SADE, ebbe a subire la massima azione di traslazione.

Per quanto concerne l'attività sismica e microsismica, verificatasi nel bacino di Pieve di Cadore a qualche chilometro di distanza dalla diga, essa fu sempre associata a svassi e successivi invasi, come nel citato periodo Marzo-Luglio 1964. È questo il tipo di sismicità provocata, al quale sono da ascrivere le scosse più intense (M variante da 1 a 2). Non sembra dubbio esso sia da attribuire all'alternarsi di stati di decompressione e successiva compressione, nel passaggio da uno svasso al

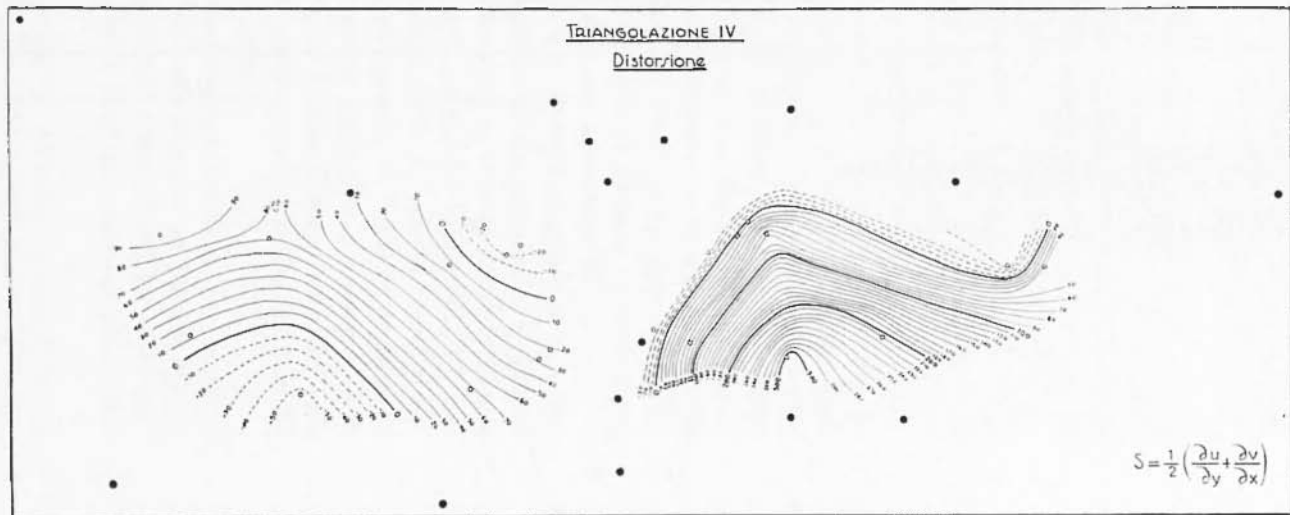
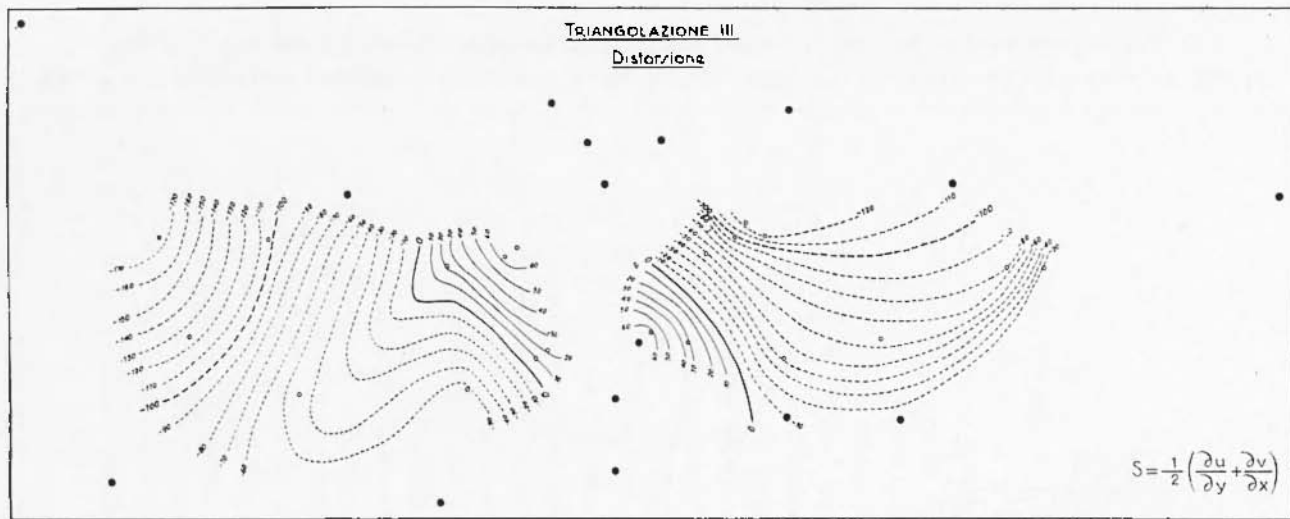


Fig. 8 - La distorsione nasce dalla variazione degli spostamenti in senso tangenziale. L'esempio sopra riportato riassume il suo andamento nei passaggi, cui si riferisce la dilatazione della Fig. 7.

Fig. 8 - Distortion derives from variations in tangential movements. The above example resumes its development in the passages to which refers the dilatation of Fig. 7.

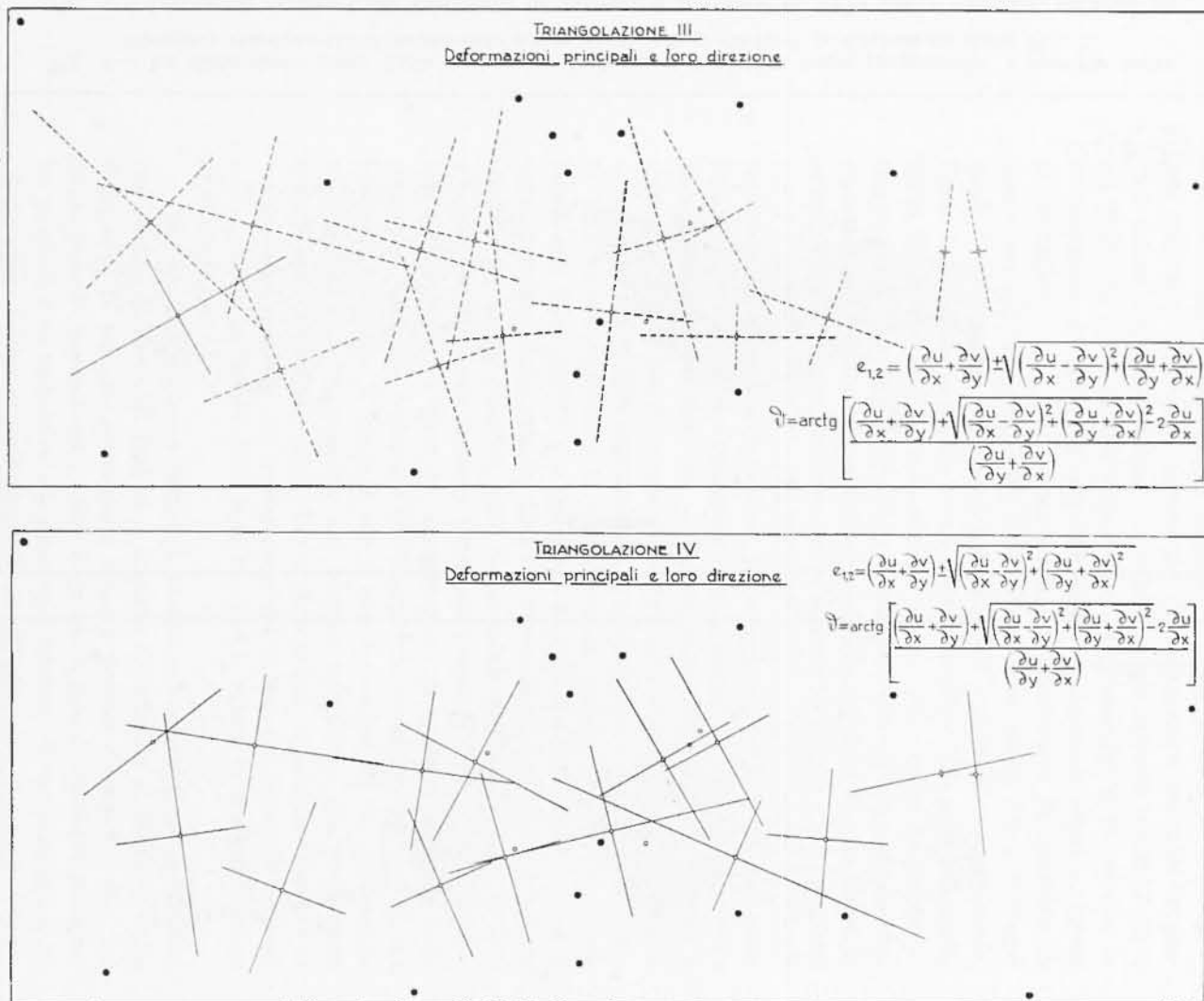


Fig. 9 - I segmenti tratteggiati si riferiscono a contrazione, quelli a tratto intero ad espansione (v. Fig. 7).

Fig. 9 - The dashed sections indicate contractions, those drawn out expansions (see Fig. 7).

sussequente reinvaso. In una zona di sismicità latente, quale è quella della valle del Piave fra Pelos e Perarolo, alterazioni, anche minime, del campo elastico superficiale possono condurre a microfratture, dell'ordine di quelle osservate.

Un discorso a parte esige la microsismicità provocata in sponda sinistra, a monte della diga del Vajont: microsismicità a cui va attribuita la demolizione del tessuto elastico del sistema roccioso sopportante quella parte del monte Toc, fulmineamente precipitata nel lago la sera del 9 Ottobre 1963. Fino dalle prime relazioni sull'argomento, del 1960-61, avevo attribuito il preoccupante fenomeno in atto, come dovuto ad un contrasto tettonico fra la parte della sponda sinistra in fase di cedimento e le pendici del monte Toc, su cui forse ancora agivano residui di orogenesi. Questa ipotesi fu ribadita nelle relazioni successive, fino a qualche giorno prima del disastro (20). Successivamente (21), fu anche prospettata l'ipotesi che la zona in atto di sprofondare fosse « risuechiata » dalla tendenza allo scorrimento Sud-Nord della sottostante stratificazione, nella quale in parte sporgeva, con effetto contrario sulle collaterali pendici del Toc: si invocava, in questa ipotesi, l'azione — esistente ormai soltanto sotto forma di tendenza — di un ramo fossile di corrente convettiva, forse agevolato nei suoi residui movimenti dal sovrastante bacino idrico. Sondaggi successivi, eseguiti in zone circostanti, fanno ritenere l'ipotesi tutt'altro che azzardata (21).

Ma l'argomento non si esaurisce qui. Recenti ricerche, su casi presentanti qualche analogia, hanno condotto a nuove ipotesi sul meccanismo origine di certi terremoti (23). È di due anni or sono la proposta di una nuova teoria sull'origine dei terremoti, quella che li attribuisce a collasso per estensione (« Extension failure ») (26). In questa teoria si descrive un nuovo meccanismo che opera quando un liquido è presente in un solido fratturato, non omogeneamente sottoposto a pressione. Non mi soffermo naturalmente sulla nuova teoria. Osservo solo che essa presenta tutti gli aspetti per essere applicata alla microsismicità nella ristretta zona del Vajont, più volte citata.

Le infiltrazioni d'acqua, particolarmente cospicue nei massimi invasi, o nei bruschi innalzamenti del livello d'acqua nel bacino, creano le condizioni per l'effettuarsi del meccanismo accennato. La netta suddivisione fra zona delle dilatazioni e zona delle compressioni, costituisce un altro elemento a favore.

Sui fenomeni di fratturazione provocati da iniezioni idrauliche nel sottosuolo esistono ormai numerose pubblicazioni. Mi limiterò a citarne qualcuna (27-29). Che queste iniezioni possano provocare veri e propri

terremoti è pure arcinoto. Notevoli, a questo riguardo, le testimonianze portate da Evans e collaboratori (30-33), a proposito della lunga serie di terremoti provocati nella zona di Denver (Colorado), in seguito alle iniezioni di acque di rifiuto, eseguite dalla U.S. Army in una regione montuosa adiacente (« Rocky Mountain Arsenal » a NE di Denver). La Fig. 18 dimostra la stretta correlazione fra iniezioni di acque nel sottosuolo e sismicità nella zona di Denver. Anche presso dighe americane si sviluppò una sismicità locale, attribuita all'azione del bacino idrico (Carder, Evans...).

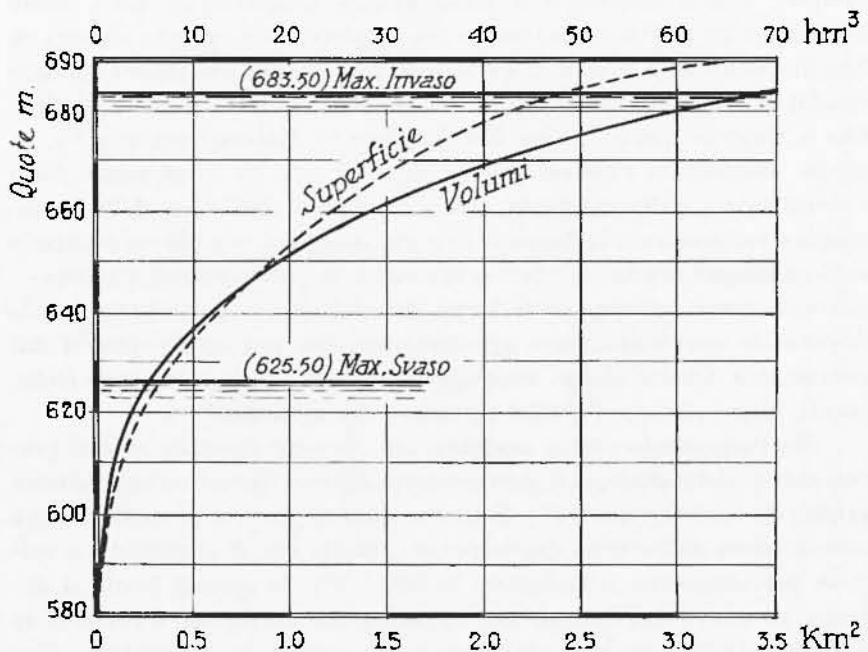


Fig. 10a Serbatoio di Pieve di Cadore. Curve d'invaso in funzione dell'altezza d'acqua (capacità specifica $0,08 \text{ hm}^3/\text{km}^2$) — secondo M. Tonini (54).

Fig. 10a — The Pieve di Cadore water basin. Filling curves according to water levels (specific capacity $0,08 \text{ hm}^3/\text{km}^2$) — after M. Tonini (54).

Per quanto afferisce alla microsismicità osservata in sponda sinistra, a monte della diga del Vajont, resta comunque provato che essa — prima e dopo il disastro — è da attribuire all'infiltrazione d'acque, sotto una certa pressione (massimi invasi), in una zona caratterizzata da spiccata attitudine alla sismicità.

1.1.2 - Naturalmente, non tutti i bacini artificiali sono soggetti a microsismicità provocata. Le stazioni sismiche funzionanti presso alcune dighe del Veneto, non registrano attività attribuibile a perturbazioni provenienti dal relativo bacino idrico, se non eccezionalmente. Il grosso bacino artificiale, formato nell'alta valle del Luminè (Carnia) da una diga alta 136 metri, sebbene sia soggetto a sbalzi di livello di 40-50 e più metri, non è stato mai (almeno finora) sede di microsismicità provocata; qualche rara microscossa, proviene da una vecchia zona di frana in sponda sinistra (sotto la borgata di Lateis). Ciò sta a provare la notevole stabilità del campo elastico locale, del resto testimoniata dall'altissima velocità delle onde longitudinali ivi rilevata, i cui valori, in alcuni tratti della roccia d'imposta della diga, superano i 6000 m/sec. Nemmeno il bacino dell'Ambiesta (affluente di destra del Tagliamento, presso Tolmezzo) ha dato origine a cicli di microsismicità vera e propria, nonostante la zona — geologicamente tormentata — sia sede di una elevata sismicità. Anche il bacino del Mis, presso Sospirolo, solo raramente ha fornito manifestazioni sismiche, attribuibili a microsismicità provocata.

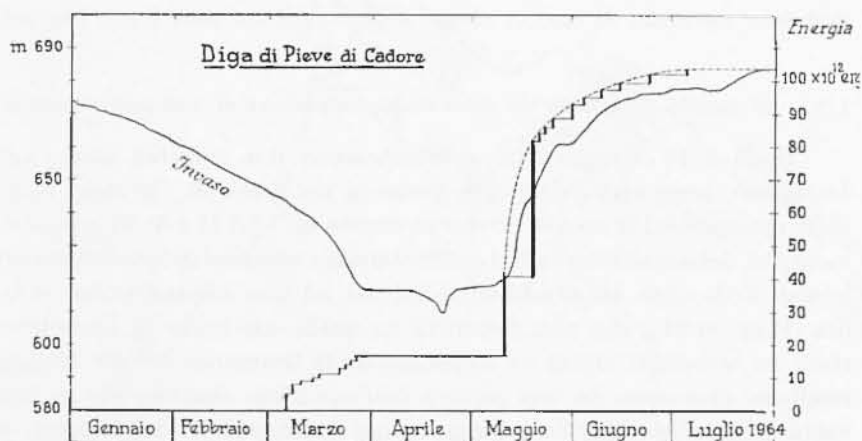


Fig. 10b - Serbatoio di Pieve di Cadore. Microsismicità conseguente allo svuotamento del bacino, operato fra il Gennaio e il Maggio 1964. Tale tipo di microsismicità, va attribuita alla *decompressione* del serbatoio, conseguente all'alleggerimento provocato dallo svaso.

Fig. 10b - The Pieve di Cadore water basin. Microseismicity following the emptying of the basin between January and May 1964. This kind of microseismicity is attributed to the basin's *decompression* as a consequence of weight reduction by the running off of water.

A questo riguardo, ritengo doverosa una precisazione. Ad un periodo iniziale, caratterizzato da generale scetticismo sulla possibilità di terremoti provocati da bacini idrici artificiali, ha fatto seguito un tempo (l'attuale) in cui, a mio parere, si esagera nell'attribuire alla creazione di bacini artificiali, tutti i terremoti che si verificano nelle loro vicinanze. P. es., io non credo che terremoti di magnitudo superiore a 4 possano essere attribuiti alla presenza di bacini artificiali nella zona epicentrale (⁵³). Se ciò si verifica, è mia opinione che si deve vedere nel fatto o una semplice coincidenza, oppure una causa concomitante, nel senso che il terremoto si sarebbe comunque verificato per cause naturali — ben più efficienti — ed è stato, in qualche modo, anticipato, dall'azione di disturbo del campo elastico della zona, provocata dal bacino idrico artificiale.

In un recente studio sulla sismicità nella zona della diga di Mangla (Pakistan) (⁵²), vengono attribuiti all'azione della riserva d'acqua creata dalla diga terremoti con epicentro a 20, 25, 30, 40 e più km dalla riserva stessa. Per quanto vasto sia il bacino (nel caso specifico, esso copre un'area di 250 km² con una profondità media di 26 m), a mio parere ben difficilmente può essere accettata una correlazione fra l'azione perturbante associata al bacino stesso e terremoti da esso tanto lontani.

1.2 - *Sismicità provocata da disordinate estrazioni di sostanze minerali.*

Il 15 e 16 Maggio 1951 si verificarono due sensibili scosse nel Lodigiano. L'epicentro delle due scosse fu nei pressi di Caviaga. Nella zona epicentrale, le scosse furono avvertite di VI-VII e V-VI, rispettivamente, della scala Mercalli. La distribuzione superficiale dei movimenti iniziali delle onde longitudinali, condusse ad una configurazione insolita (Figg. 20-21), che non rientrava in quelle osservate in precedenti studi su terremoti alpini ed appenninici. Il terremoto del 15 Maggio risultava provocato da una rottura dell'equilibrio elastico, che in una vasta area, notevolmente sviluppata nel quadrante di Nord-Ovest, si era manifestata con le caratteristiche della compressione (spinta verso l'esterno). L'area stessa si presentava nettamente decentrata rispetto all'epicentro, il che lasciava presumere che la causa perturbante aveva agito — con una brusca pressione — secondo un asse fortemente inclinato rispetto alla verticale e in direzione SE-NW. Anche il meccanismo della seconda scossa presentava stretta analogia con quello della precedente; soltanto l'asse della zona interessata dalle compressioni aveva avuto, rispetto al Nord, un'inclinazione leggermente diversa.

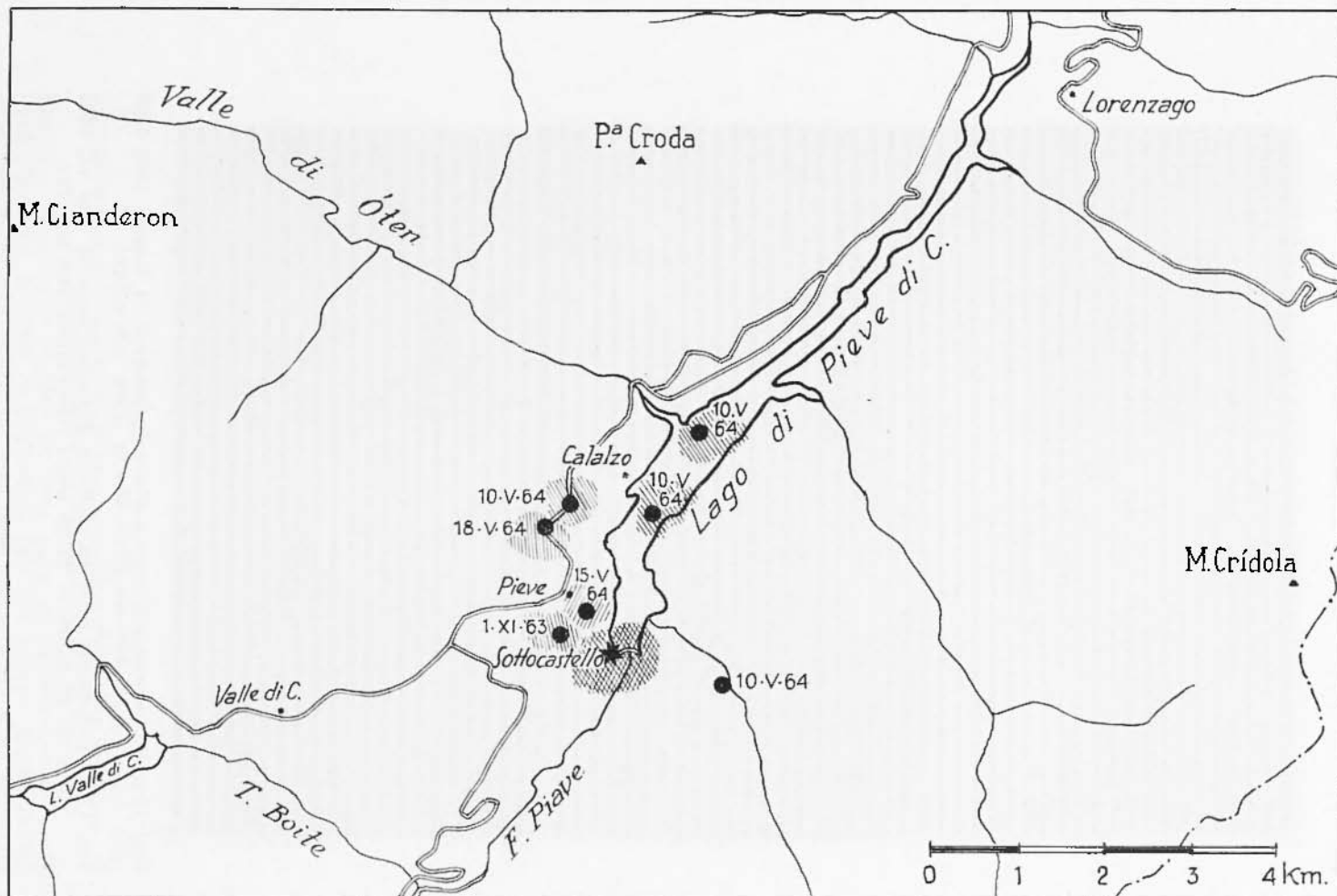


Fig. 11 - Epicentri (cerchietti) delle principali scosse, provocate nella zona del lago di Pieve di Cadore, come effetto della decompressione associata allo svuotamento del serbatoio. (L'asterisco presso la diga, indica la posizione della stazione sismica).

Fig. 11 - Epicentres (small circles) of principal shocks caused in the surroundings of the Lake of Pieve di Cadore by decompression upon emptying of the basin. (The asterisk near the dam indicates the position of the seismic station).

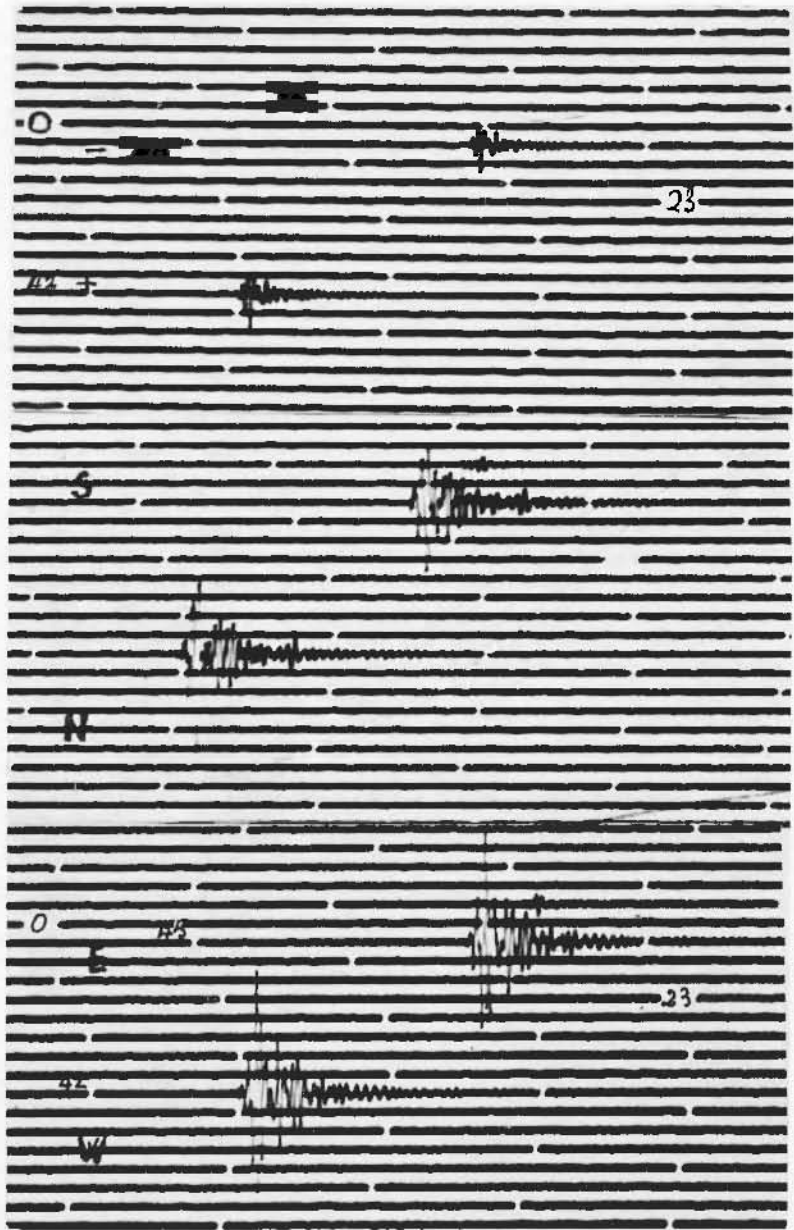


Fig. 12 - Microscosse registrate a Pieve di Cadore il 14 Maggio 1964 dalle 21^h 42^m alle 23^h e 45^m (v. Figg. 10b e 11).

Fig. 12 -- Microshocks recorded at Pieve di Cadore Dam on May 14, 1964 from 21.42 hours to 23.45 hours (see Figures 10b and 11).

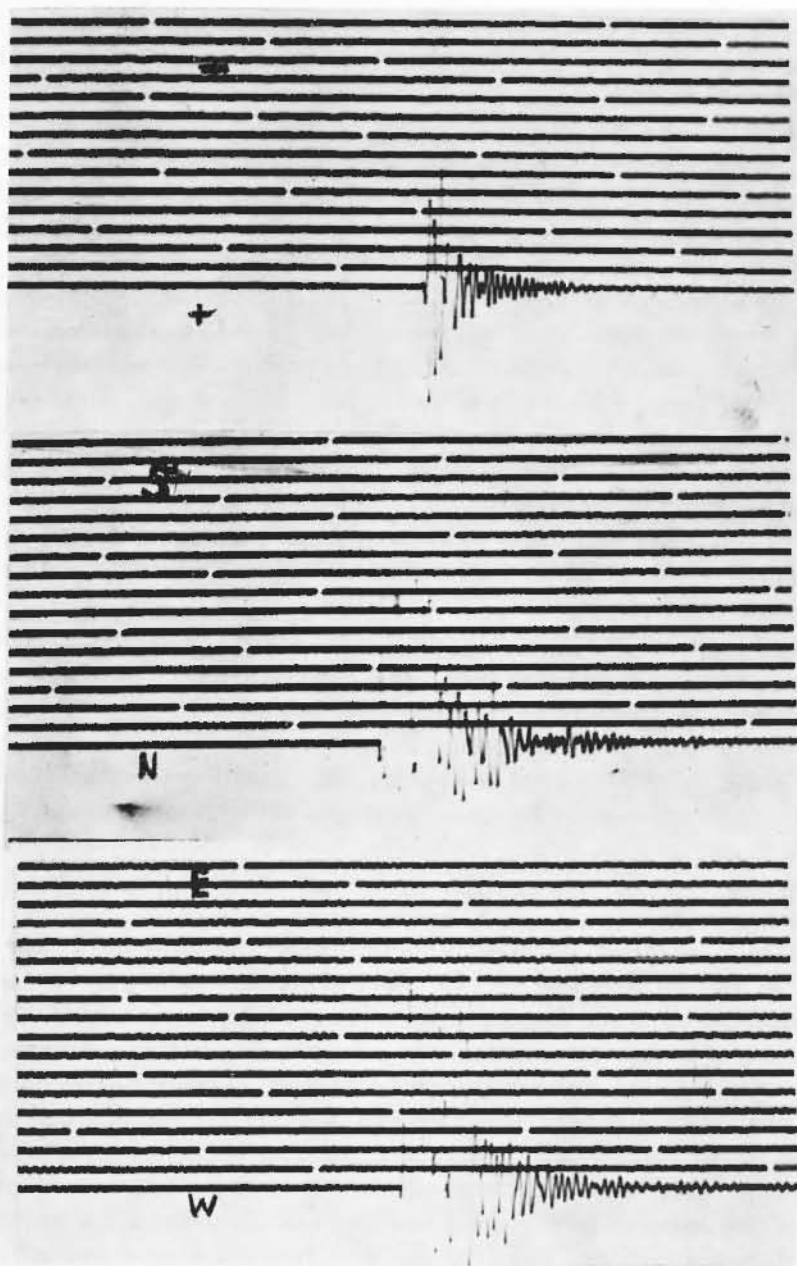


Fig. 13 - Microscosse del 18 Maggio 1964 (zona di Calalzo), verso le 11^h 38^m ($M \sim 1,5$). Va sottolineato che le scosse più intense (avvertite anche dalla popolazione) furono quelle verificatesi a bacino vuoto, per fenomeno di decompressione (v. Figg. 10b e 11).

Fig. 13 - Microshocks of May 18, 1964 (area of Calalzo) around 11.38 hours ($M \sim 1,5$). It must be emphasized that the heavier shocks (which were also felt by the population) were those taking place when the basin was empty, under the decompression effect (see Figures 10b and 11).

Nell'ampio lavoro dedicato alle scosse in questione ⁽²⁴⁾, si prospetta l'ipotesi che la causa dei terremoti avvertiti il 15 e il 16 Maggio 1951 non sia del tutto naturale, nel senso che in essa ha agito pure l'intervento dell'uomo. Riporto testualmente quanto si è scritto allora:

« Osserviamo che l'epicentro cade precisamente nei pressi di Caviaga. In questa località esistono pozzi metaniferi, da cui si estraggono giornalmente notevoli quantità di gas metano che vanno dai 10.000 m³ ai 300.000 m³. La profondità degli strati metaniferi in questa zona è di 1250-1450 m ca dalla superficie, e la pressione massima alla bocca dei pozzi varia dai 130 ai 140 kg/cm². Esistono però nel Lodigiano altri campi metaniferi, dove si verificano analoghe estrazioni di metano, con pressioni alla bocca dei pozzi dell'ordine di quelle sopra riportate, se non superiori. Tale estrazione dura da anni ormai: la decompressione in atto nella zona attiva è quindi notevole. Ci si può fare un'idea di tali decompressioni, quando si pensi che l'estrazione di un milione di metri cubi di gas al giorno, ad una pressione di 100 kg/cm², comporterebbe un lavoro giornaliero di 10²⁰ erg. Decompressione veramente cospicua quindi.

Si tratta naturalmente di uno sprigionamento di energia graduale e non istantanea, come avviene nei terremoti. Non si può negare comunque che, nel sottosuolo, abbia una funzione di equilibrio anche questa enorme quantità di gas compresso.

Tale funzione varierà a seconda della struttura geologica della regione, la quale potrebbe essere tale da annullare praticamente ogni effetto perturbante, come potrebbe facilitare la tendenza verso nuove posizioni di equilibrio, le quali non sempre vengono raggiunte « gradualmente ».

Altri argomenti a favore di questa ipotesi sono riportati a pag. 96 e pag. 103 del lavoro citato. A 15 anni di distanza dalla pubblicazione di quel lavoro, a mio parere l'ipotesi conserva tutta la sua attendibilità. Come si può constatare dalle figure riportate (20, 21), la suddivisione superficiale delle compressioni e delle dilatazioni si concilia con l'effetto di una violenta spinta verso l'esterno, secondo un angolo solido con asse fortemente inclinato verso NW. La singolarità del meccanismo secondo cui le scosse si sono manifestate, il fatto che nella zona, notoriamente asismica, fosse in corso una cospicua estrazione di gas metano, fa ritenere fortemente probabile che la rottura del campo elastico, ivi verificatasi, sia comunque da collegare all'enorme decompressione, in atto negli strati profondi, di dove il gas scaturiva con pressioni dell'ordine di 150 kg/cm².

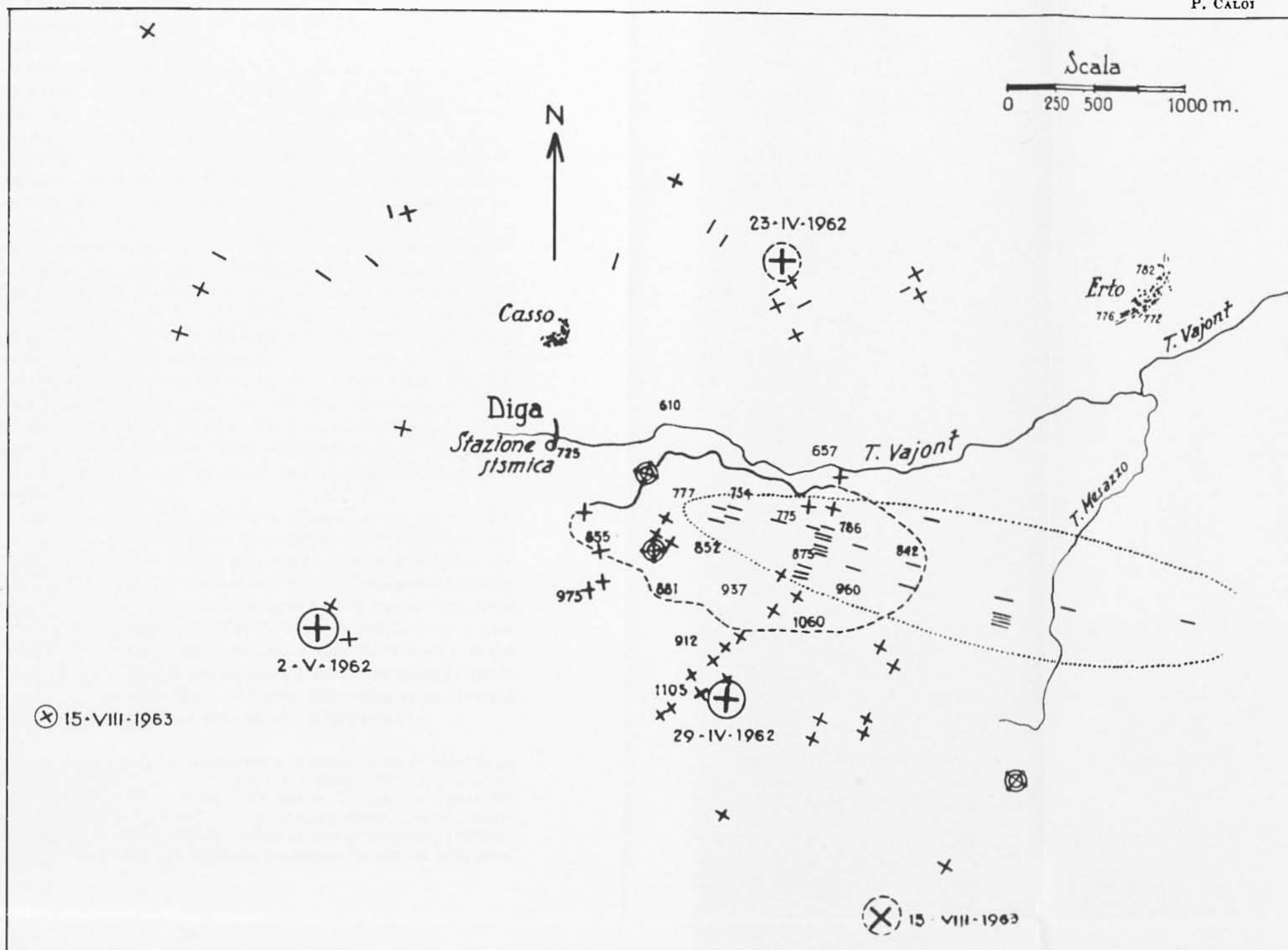


Fig. 14 - Epicentri di alcune delle centinaia di microscosse, verificatesi al Vajont dal Maggio 1959 al 15 Agosto 1963 (a meno di due mesi dal disastro). Gli epicentri sono segnati da segni — (caratterizzati da dilatazione, avvallamento) e da + (compressione, spinta verso l'esterno). Le circostanze indicano ripetizioni delle scosse nello stesso punto (ad ogni circonferenza, corrisponde una replica). Da sottolineare la serie di dilatazioni verificatesi nella zona allungata, racchiusa da punteggiatura: erano caratteristiche dei cedimenti (sprofondamenti), che precedettero la catastrofe del 9 Ottobre 1963, originatasi proprio alla base della zona stessa. Va inoltre rilevato che nel settore fra SE e SW della stazione sismica (diga) verso il monte Toc, si verificarono *soltanto* scosse di compressione (spinta verso l'alto). Le cifre riportate, rappresentano la quota sul livello del mare. (Commenti dettagliati nelle pubblicazioni (^{20,21})).

Fig. 14 - Epicentres of some of the few hundred of microshocks hitting the Vajont from May 1959 to August 1963, less than two months before the disaster. The epicentres are marked — (indicating dilatation, subsidence) and + (compression, outward thrusts). (Circumferences indicate repetitions of shocks on the same spot (each circumference corresponding to a repetition). The series of dilatations in the extended area, limited by dashes, is to be noted; these were clear signs of the sinkings preceding the disaster of October 9, 1963 whose origin was right at the base of that area. It is pointed out, besides, that in the sector lying from SE to SW of the seismic station (dam), toward Mount Toc, there were *only* shocks due to compression (upward thrusts). The Figures indicate heights above sea level (detailed comments in the publications (^{20,21})).

Del resto, fenomeni del genere si sono verificati in altre parti del mondo. Per limitarci all'Europa, ricorderò che geoliscici belgi attribuiscono l'accentuata sismicità dei bacini carboniferi del Belgio all'intensificata estrazione del minerale.

A questo riguardo, va ricordato l'evolversi di fenomeni del genere dal 1965 al 1967 nella miniera di Raibl, presso Cave del Predil. Il 13 Novembre 1965, dopo mezzogiorno, una forte scossa tellurica provocò il panico fra la popolazione. Nella miniera di Cave del Predil (dove si estrae minerale di piombo e zinco), si verificarono numerosi crolli in diverse gallerie. Fortunatamente, nessun operaio si trovava in miniera, a quell'ora. Il terremoto fu registrato presso la stazione sismica di Tolmezzo, con inizio alle 12^h 22^m 43^s,9; analoga registrazione si ebbe a Somplago, presso la centrale in roccia dell'« Enel ». Nelle cave del Predil — come avviene in tutte le miniere del mondo — si verificavano, di quando in quando, a diversi livelli, le così dette « esplosioni di roccia »: piccoli scoppi, nella roccia messa a nudo, per fenomeno di decompressione.

Però, negli ultimi mesi che precedettero il terremoto, si era verificato un anormale aumento del numero delle esplosioni di roccia, con un crescendo sensibilissimo durante l'Agosto e il Settembre. Appariva chiaro che, nella zona, era in atto una notevole alterazione del campo elastico, con un aumento di tensioni, provvisoriamente sfociato nel terremoto del 13 Novembre. Dico « provvisoriamente », perché, purtroppo, quella scossa non aveva completamente liberata la zona dall'accumulo della tensione in atto.

Poco più di un anno dopo, infatti, la stampa tornò a parlare delle Cave del Predil. La sera del 6 Marzo 1967, una scossa di terremoto aveva fatto crollare un tratto di galleria nella miniera. Dei cinque operai che vi lavoravano, due rimasero sepolti ed uno di questi, malauguratamente, vi perse la vita. Come precisava la stampa (« Il Tempo », 7-III-1967) « la scossa tellurica è stata avvertita da tutta la popolazione, le case hanno tremato e parecchi vetri di finestre si sono frantumati ». E che di vero terremoto si fosse trattato (anche se di minore intensità di quello verificatosi il 13 Novembre 1965), risultava dalle registrazioni ottenute a Tolmezzo e a Somplago, ad oltre 50 km di distanza (*).

(*) Questo lavoro era in composizione, quando i giornali riportarono una triste notizia dalle Cave del Predil. L'8 Febbraio 1971, due minatori persero la vita per un nuovo crollo verificatosi in una galleria a circa 300 metri di profondità: per « un movimento del terreno particolarmente violento, quasi uno scoppio, che è stato avvertito anche all'esterno dei pozzi » (« Il Tempo », 9. II. 1971). Impietosa conferma della perdurante instabilità della zona.

2. - ABBASSAMENTI DEL SUOLO, CONSEGUENTI A DISORDINATE ESTRAZIONI DI MINERALI, ALLO STATO FLUIDO.

Nel 1956, quando fui nominato membro del Comitato ministeriale per le ricerche sugli abbassamenti anormali, in atto da qualche anno, nel Polesine, le mie cognizioni sui fenomeni del genere erano limitate e

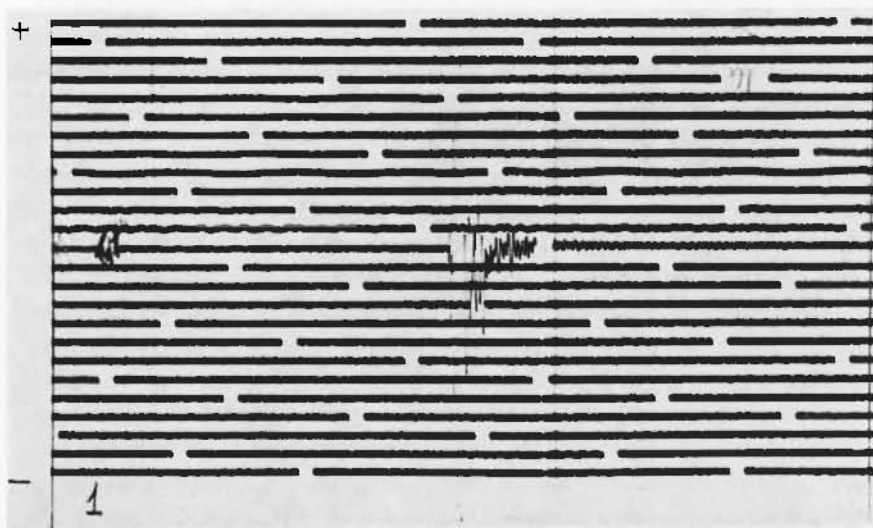


Fig. 15 - Esempio di micrososse originanti dalla zona, in sponda sinistra del Vajont, a monte della diga, dove si verificò il collasso del 9.X.1963 (comp. vert., 22. X. 1960, 11^h41^m49^s,6; $A_h = 1.3$ km, spost. max 60μ , azimuth = 102°).

Fig. 15 - Example of microshocks originating in the upstream area of the dam, on the left shore of Vajont, where the rupture of October 9, 1963 happened (vertical component of Oct. 22, 1960, 11.41.49 hours $A_h = 1.3$ km, max. movement 60μ , azimuth = 102°).

frammentarie. Dopo qualche mese di studio delle condizioni ambientali e di opportuno confronto con l'enorme quantità di acque metanifere estratte da migliaia di pozzi operanti nel Polesine e nel Delta, era maturata in me la convinzione (condivisa da altri membri del Comitato) che principale responsabile della flessione dei terreni del Polesine doveva ritenersi la disordinata estrazione di liquido dal sottosuolo. Purtroppo, quello che per me, e pochi altri, appariva evidente, trovò tenacissima opposizione da parte dell'Ente interessato allo sfruttamento delle acque metanifere (Consorzio Italiano Metano - C.I.M.), il quale si

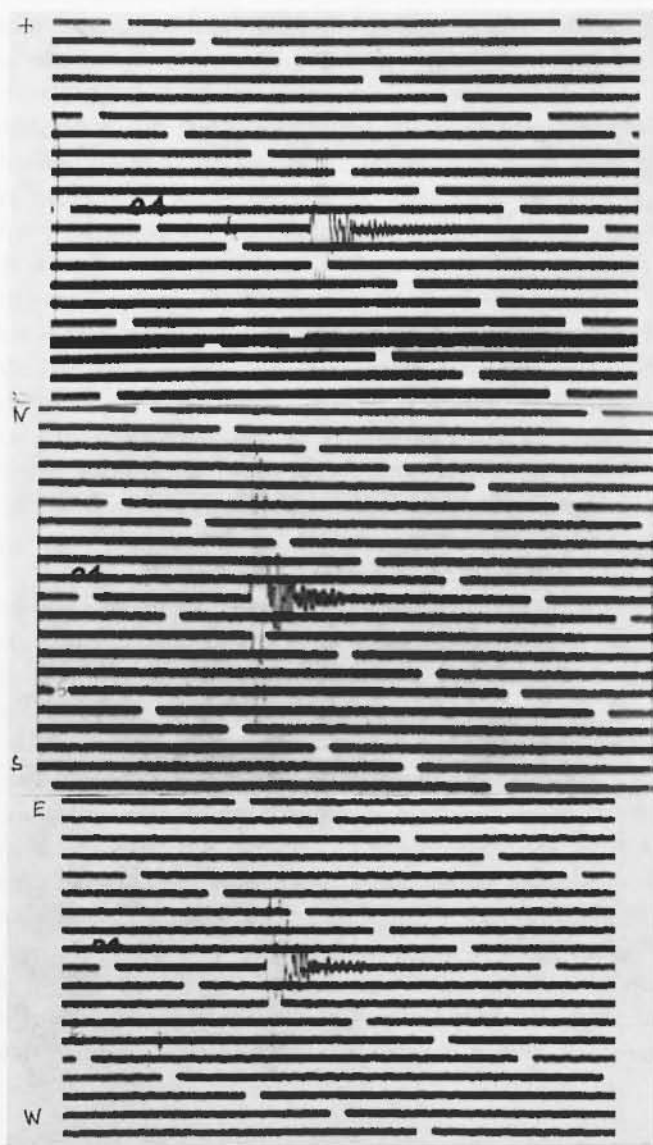


Fig. 16 - Altro esempio di microscossa registrata al Vajont il 25. X. 1960, alle 01^h04^m; $A_h = 1,0$ km, spost. max 12μ , azimuth = 18° .

Fig. 16 - Another example of microshocks recorded at Vajont on Oct. 25, 1960, at 01.04 hours; $A_h = 1.0$ km, max. movement 12μ , azimuth = 18° .

valse — nella sua azione di denegazione di ogni responsabilità da parte dell'emungimento delle acque — di abili funzionari e di alcuni noti esperti di geologia, geodesia e geofisica. Per controbattere le argomentazioni, in gran parte capziose, con cui si tentava di dimostrare l'estraneità dell'enorme pompaggio di acque metanifere negli anormali abbassamenti in atto, oltre a studiare gli aspetti geofisici del fenomeno, fui costretto ad un sottile lavoro di ricerca nella letteratura mondiale sull'argomento e ad un serrato scambio epistolare con Enti e con studiosi che, in altre parti del mondo, si interessavano a variazioni di livello del suolo, comunque determinate. Fu in questa fase che le mie cognizioni in materia andarono via via ampliandosi e approfondendosi. Fra l'altro, venni a conoscere che — contrariamente a quanto, con caparbia insistenza, affermavano il CIM e i suoi esperti — dovunque nel mondo si erano verificati od erano in atto, abbassamenti anormali, questi andavano sistematicamente associati ad enormi estrazioni di liquidi o di gas dal sottosuolo. Le testimonianze furono talmente schiaccianti e numerose, che la mia convinzione sulla causa degli sprofondamenti polesani si trasformò in certezza.

Fra i vistosissimi avvallamenti del suolo legati ad anormali estrazioni di liquidi (e anche di gas) vanno ricordati quelli di Azuma e Oshima (Giappone), verificatisi dal 1940 al 1950; quelli di Wilmington (Long Beach), che hanno raggiunto punte di 8 m⁽³⁶⁻³⁵⁾, e quelli — verificatisi su una zona estesissima — nella « San Joaquin Valley », in California⁽⁴⁶⁻⁴⁸⁾: questi — ed altri — tutti provocati da estrazioni di enormi quantitativi di idrocarburi (Long Beach) o d'acque. In un'ampia relazione inviata al Ministero dei Lavori Pubblici nel Maggio del 1959 (pubblicata nel 1967)⁽³⁹⁾, concludevo suggerendo l'immediata chiusura dei pozzi metaniferi, funzionanti nel Delta, se si voleva, almeno in parte, salvare una situazione ormai seriamente compromessa.

La graduale chiusura dei pozzi, funzionanti ad Est di Adria, a partire dal 1960, dimostrò la fondatezza delle argomentazioni, che avevano condotto a quella, sia pur tardiva, decisione ministeriale.

3. — RESPONSABILITÀ DEGLI ESPERTI DI PARTE, NELLA VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE DI PROLUNGATI INTERVENTI DELL'UOMO, ATTI AD ALTERARE L'EQUILIBRIO NATURALE.

Durante gli ultimi decenni, le estrazioni di minerale o di acque dal sottosuolo, si sono fatte sempre più abbondanti ed estese. Anche la

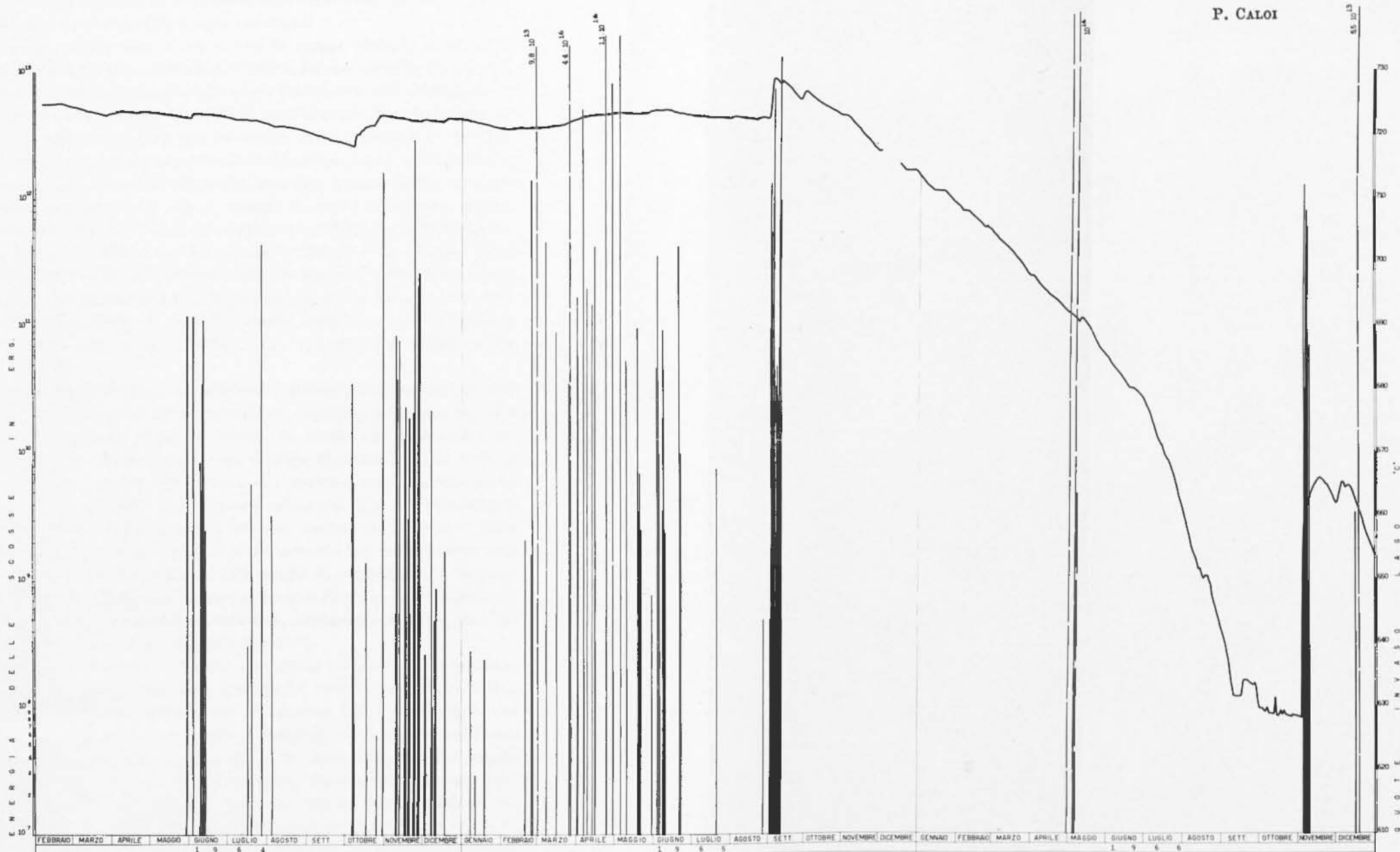


Fig. 17 - Dopo la catastrofe è stata riedificata la stazione sismica di fianco alla diga del Vajont. Come è già stato riferito ⁽²⁰⁾, l'aumento del livello del lago residuo a monte della diga, ha sempre sensibilizzato la sismicità della zona. Durante gli anni 1964, 1965, 1966 — come prova il diagramma sopra riportato — ogni aumento di livello dell'acqua nel lago ha provocato un'intensificazione delle micrososse. L'alluvione dei primi di Settembre 1965, p. es., ha provocato, in pochi giorni, la registrazione di circa 400 scosse. Diminuito il livello delle acque, la sismicità è andata scomparendo, per riprendere con rinnovato vigore in corrispondenza dell'alluvione del 4-5 Novembre 1966, che provocò il brusco aumento del lago di ca 60 m (secondo Migani ⁽²³⁾). La successiva regolamentazione del livello del lago ha avuto come conseguenza la scomparsa della microsismicità.

Fig. 17 - After the disaster the seismic station was rebuilt at the side of the Vajont Dam. As reported before ⁽²⁰⁾, any increase of the water level of the lake remaining behind the dam resulted in a higher seismicity of the area. As shows the above diagram, each rise of the water level of the lake in the years 1964, 1965 and 1966 intensified the micros shocks. The flood early in September 1965, for instance, lead to recording of about 400 shocks within few days. When the water level receded, seismicity almost disappeared, but sprang up again vigorously during the flood of November 4/5, 1966 which caused the lake to rise abruptly by 60 m about (according to Migani ⁽²³⁾). The successive regulation of the level of the lake brought microseismicity to a halt.

costruzione di bacini artificiali ha assunto un notevole sviluppo e, con l'imponenza delle dighe di sbarramento, sono andati via via aumentando, in estensione e in profondità, i laghi artificiali.

Le prime attribuzioni di variazioni in campo elastico associate ai massicci interventi delle industrie estrattive, furono accolte con estremo scetticismo o indifferenza, sia dalle parti interessate allo sfruttamento, sia dai loro esperti (ricordo le reazioni scandalizzate di certi ingegneri, all'annuncio che i clinografi, per la prima volta sistemati in un diga, denunciavano variazioni giornaliere di inclinazione, legate all'insolazione diurna; riusciva loro inconcepibile che una diga potesse inclinarsi sotto azioni così «modeste»). E ciò si spiega: il concetto di una natura statica, imperturbabile, tetragona a qualsiasi intervento esterno era, ed è, molto diffuso. L'attribuzione dei terremoti del 15 e 16 Maggio 1951, presso Lodi, all'enorme estrazione di gas in atto nel quadrilatero Basiasco-Caviaga-Cornigliano-Ripalta fu accolto in Italia da autentica irrisione. Non così all'estero: essa fu infatti riportata, con i caratteri dell'attendibilità, da C. F. Richter, a p. 156 del suo «Elementary Seismology»⁽³⁵⁾.

Ma dove l'opposizione, ad attribuire all'intervento massiccio dell'uomo le flessioni degli strati superficiali, — continua, caparbia, talvolta violenta, — raggiunse carattere corale fu quella che funzionari del C.I.M. e suoi esperti condussero, con dovizia di iniziative, dal 1955 al 1960 contro quei poeli che «osavano» trovare una inequivocabile correlazione fra cedimenti del Delta ed estrazioni di acque metanifere. In pratica, tutti i rappresentanti ufficiali italiani delle scienze della Terra (geologi, geodeti, geofisici) erano d'accordo nel negare detta correlazione. Non starò a richiamare la congerie di pubblicazioni, apparse in quegli anni, su questo argomento: articoli di giornale, di rotocalchi, di riviste scientifiche; rendiconti accademici, conferenze stampe, ecc. Mi limiterò ad alcune fra le più significative⁽³⁷⁻³⁹⁾.

In una pubblicazione del 1957, che porta le firme di un geodeta, un geofisico, un oceanografo e un geologo⁽⁴⁰⁾ (tutti esperti del C.I.M.), dopo varie perentorie confutazioni e illazioni sulla complessità del problema, si elencano ben dieci serie di indagini, da compiersi nel Delta e nel mare adiacente; con la speranza «che dalla somma e dal vaglio di tutti i dati geodetici, geofisici, geologici, oceanografici possano scaturire delle conclusioni generali per una valida interpretazione del fenomeno» (pag. 15). Fra le complesse indagini proposte (che avrebbero richiesto decenni per essere realizzate) mancava la più ovvia: quella della temporanea sospensione dell'estrazione di acque metanifere in

una zona delimitata. In una pubblicazione di un altro geologo (41), dopo una disamina sul fenomeno in atto nel Delta, si propongono alla fine una serie di otto complesse indagini, compiute le quali sarà resa possibile « una discussione proficua e una conclusione fondata su basi razionali ». Si aggiunge però immediatamente che « considerato l'enorme lavoro da compiere per indagare i molteplici aspetti del grave quesito e rispondervi a ragion veduta, vien fatto di pensare con malinconia a quella povera Commissione di valentuomini a cui il Ministero ha prescritto di dare entro pochi mesi il suo ponderato giudizio ». Anche questa volta, si tralascia di accennare all'« experimentum crucis », che avrebbe potuto precisare — appunto in pochi mesi — la causa del pauroso abbassamento in atto. Un altro geologo ancora, parlando sul bacino quaternario Polesano-ferrarese e sui suoi giacimenti gassiferi (42), intrattenendosi sui fenomeni di anormali abbassamenti nel Delta, giunge a questa conclusione: « In definitiva, tutto induce a ritenere che gli eccezionali abbassamenti della superficie del suolo riscontrati nella regione del Delta Padano non abbiano generalmente alcun rapporto con l'estrazione del metano e delle acque che accompagnano il gas ».

E potrei continuare; ma quel poco che ho riferito mi sembra sufficiente a dimostrare quanto fosse massiccio e compatto lo schieramento della scienza ufficiale contro l'attribuzione, anche solo in parte, della flessione del Delta all'estrazione delle acque metanifere. Che meraviglia se il Presidente del C.I.M., forte di tanto appoggio, letteralmente inveiva contro quanti, secondo lui, osavano « fare il processo al metano » con « accuse illogiche e richieste indegne », che andavano decisamente respinte (*)?

Se ciò non bastasse, alle opinioni — più o meno disantibili — intese a scagionare l'emmungimento delle acque metanifere, si aggiunsero cifre sensazionali di abbassamenti in atto, in altre parti del mondo, dove non si sarebbero verificate estrazioni di sorta dal sottosuolo. Basti citare, al riguardo, quanto ebbe ad affermare uno degli esperti geofisici

(*) Si badi che le così dette « richieste indegne » concernevano la proposta della chiusura, a titolo sperimentale, di un certo numero di aziende metanifere: proposta da respingersi, — a detta del Presidente del Consorzio Italiano Metano — senza la minima esitazione « perché si tratta di una sperimentazione che, oltre a riuscire onerosa e gravissima, è soprattutto di equivoca, dubbia, se non addirittura impossibile interpretazione » (Da una delle tante conferenze stampa del Presidente del C.I.M., tenuta l'8 Gennaio 1958 a Milano — « Gazzetta del Veneto », 10 Gennaio 1958).

del C.I.M. in un intervento sulla citata relazione del Prof. Dal Piaz su « Il bacino quaternario . . . », pubblicata dall'Accademia dei Lincei. Ecco le testuali parole di quel geofisico: « . . . da notizie che ho ricevuto recentemente, in una zona dove non c'è sfruttamento del metano, nel delta del Mississippi, si sono trovati sprofondamenti dell'ordine di 20 cm per anno in diverse epoche e in diverse aree; questi dati sono pubblicati e sono studiati a cura del Corps of Engineers degli Stati Uniti. Ancora più recentemente . . . il Bussel riporta il valore di 30 cm per anno, per sprofondamenti tutt'affatto eccezionali nella zona del Delta del Mississippi, . . . in una zona, torno a ripetere, dove il metano non è in discussione perché non c'è coltivazione di metano » (43).

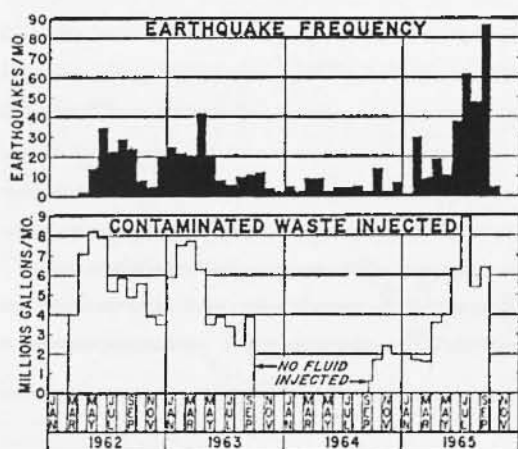


Fig. 18 - Relazione fra iniezioni di acqua e frequenza dei terremoti nella zona di Denver (Colorado), secondo D. Evans.

Fig. 18 - Relation between water injections and frequency of earthquakes in the area of Denver (Colorado) according to D. Evans.

Queste cifre, consentivano al Presidente del « Consorzio Italiano Metano », di inferire contro i pochi oppositori; in una delle sue numerose conferenze stampa (44), questi vengono definiti « superficiali accusatori del metano » « che non pensano e non sanno, a causa delle loro scarse conoscenze ». E, a proposito delle cifre su riferite: « è desolante che i superficiali accusatori del metano, i quali sono oggi a conoscenza, anche se non per scienza propria, di tali argomenti, non sentendosi in grado di controbatterli, fingano di ignorarli completamente e continuano, con imperturbato candore, a ripetere in modo estenuante le loro teorie ».

Quale poteva essere lo stato d'animo dei « valentuomini » — cui accenna il compianto prof. Gortani nella citata relazione — facenti parte della « povera » Commissione ministeriale? Nonostante tutto,

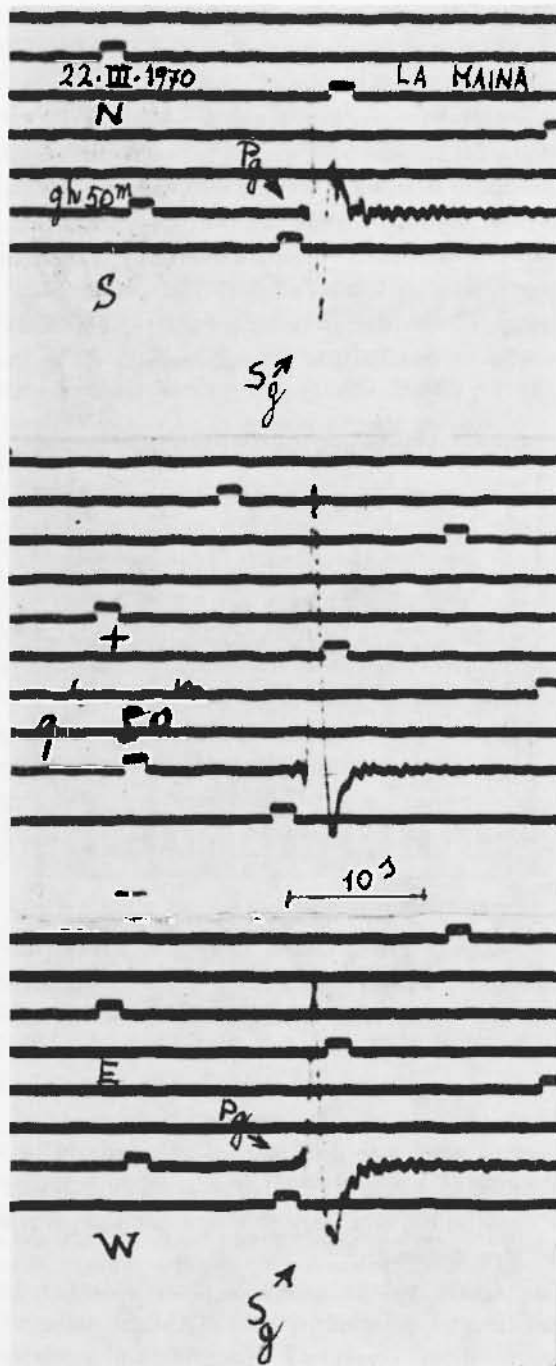


Fig. 19 - Microscossa del 22. III. 1970, registrata dalla stazione sismica presso la diga del Lumiei (La Maina, Sauris), con distanza ipocentrale di ca 4 km (energia dell'ordine di 10^{14} ergs, magnitudo pari a $M \approx 2$). Epicentro verso monte Campo, a NE della diga.

Fig. 19 - Microshock of March 22, 1970, recorded at the seismic station of the Lumiei Dam (La Maina, Sauris), hypocentral distance of about 4 km (energy in the order of 10^{14} ergs, magnitude $M \approx 2$), epicentre towards Monte Campo, NE of the dam.

alcuni di quei « valentuomini » non si dettero per vinti. Per quanto mi riguarda, dopo due anni di duro lavoro, riuscii a dimostrare — come ho già ricordato — quanto fallaci fossero le affermazioni dei vari esperti e come riuscissero del tutto erronee le cifre di anormali sprofondamenti (*), che quel geofisico affermava essere stati osservati nel Mississippi e altrove, in località dove le estrazioni metanifere non erano in causa. Nel maggio 1959 presentavo la predetta ampia relazione al Ministero (pubblicata nel 1967) (36), al termine della quale invocavo — a parziale salvezza del Delta Padano — l'immediata chiusura delle migliaia di pozzi metaniferi, ivi in azione.

3.1. Giunti a questo punto, e con particolare riferimento all'abbassamento del Delta Padano, c'è da domandarsi quanto danno venne alla Regione dall'atteggiamento della Scienza ufficiale, concorde nel negare ogni responsabilità all'estrazione del metano nella flessione del Delta; e, soprattutto, dalla violenta denegazione del Presidente del C.I.M., a cui gli esperti fornivano argomenti in apparenza inoppugnabili, quali quelli riassunti nelle cifre di anormali abbassamenti del Mississippi, in località dove non era in corso la cultura metanifera (cifre, come si è visto, senza alcuna base di realtà). Un danno enorme, senza dubbio.

La Fig. 22 sintetizza l'anormale abbassamento verificatosi nel Polesine e nel Delta Padano dal 1951 al 1958.

Le Figg. 23 e 24 riassumono gli anormali abbassamenti, verificatisi nelle stesse zone, negli anni 1958 e 1959 rispettivamente.

La Fig. 25 compendia gli anormali abbassamenti associati al periodo 1958-1963.

(*) Come è dimostrato nella mia pubblicazione, più volte citata, quelle cifre non avevano il minimo riscontro nella realtà. Dei famosi 20-30 cm/anno, nessuna traccia. Russell (39) nel 1936 aveva parlato di 2 « inches » per anno (5 cm/anno) — massimo abbassamento osservato nella Louisiana sud-orientale —, e si riferiva ad un cavo telegrafico teso attraverso la località « The Jump », controllato durante il periodo 1853-1877. Tutti gli altri abbassamenti osservati nel Delta del Mississippi risultarono di trascurabile entità. Questi dati sono desunti da « Geology of the Mississippi River Deltaic Plain Southeastern Louisiana » (50,51), pubblicati a cura di quel « Corps of Engineers », che — a detta di quel geofisico, nell'intervento citato — era occupato in « studi molto dettagliati, sia sulla dinamica che sulle altre possibili cause dei movimenti... in corso nel Delta del Mississippi ». Fu proprio quel « Corpo d'Ingegneri », che, a mia richiesta, negò ogni validità alle enormi cifre di abbassamenti, citate in quel Convegno, organizzato nel 1957 dall'Accademia Naz. dei Lincei e dall'E.N.I.

Finalmente, nel 1960 — vincendo ostilità facilmente immaginabili, attese le opposizioni della parte interessata, forte del giudizio di tanti esperti — la Commissione ministeriale (meglio la « povera »

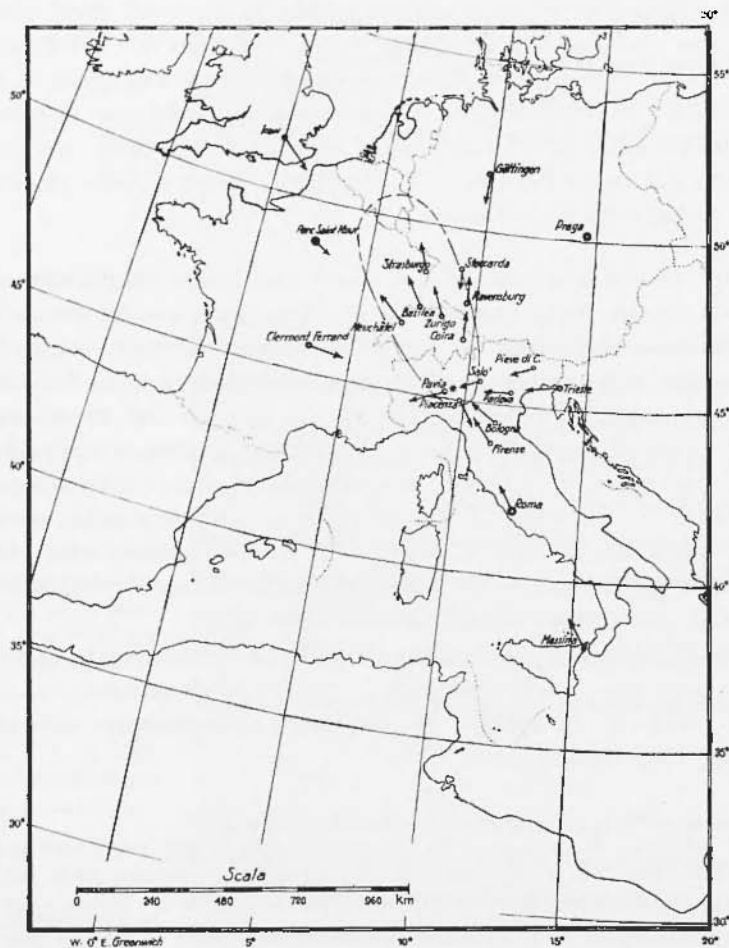


Fig. 20 — Il meccanismo all'ipocentro del terremoto del 15.V.1951, nel Lodigiano, si identifica con quello provocato da una violenta decompressione secondo un'asse inclinata rispetto alla verticale.

Fig. 20 — The mechanism at the hypocentre of the earthquake of May 15, 1951 in the Lodi area is identical with that arising from a violent decompression on an axis inclined against the vertical.

Commissione ministeriale) riuscì ad imporre la chiusura dei pozzi in una zona circoscritta (v. poligonale in Fig. 26). Nella zona, l'abbassa-

mento rallentò come per incanto e iniziò la risalita delle acque nei pozzi. In virtù di questi risultati, il Ministero ordinò la chiusura dei pozzi in altre zone, fra gli anni 1960 e 1964. Le conseguenze di queste chiusure, sono riassunte nelle figure della pubblicazione più volte citata. In ogni modo, grossolanamente, possono essere compendiate nella Fig. 27.

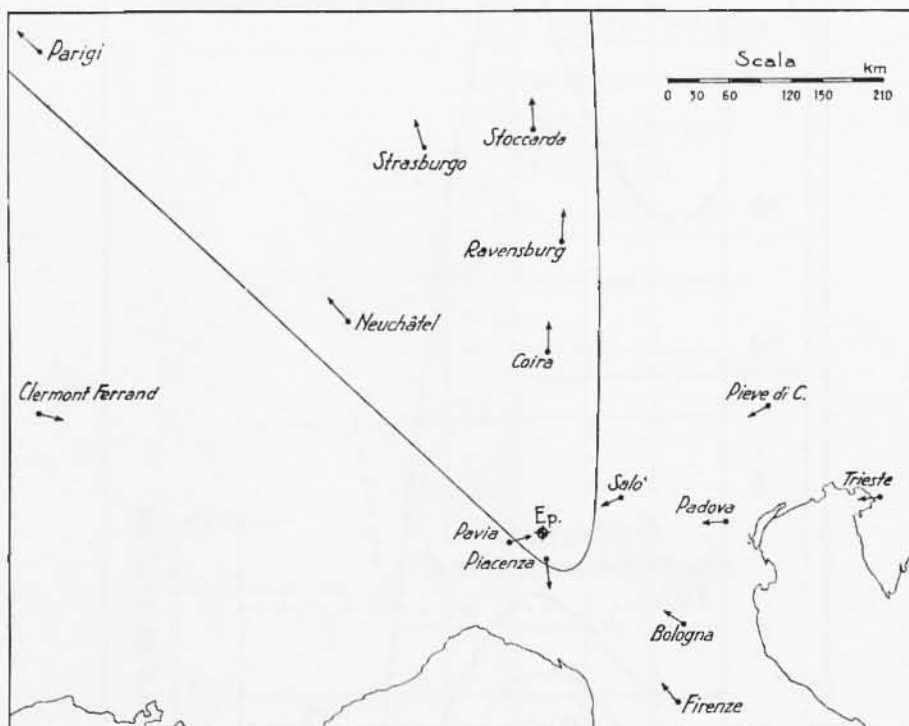


Fig. 21 - Vedi fig. 20.

Fig. 21 - See Fig. 20.

Riassumendo, ecco le conseguenze della tardata chiusura dei pozzi metaniferi del Delta Padano:

1) Se la chiusura fosse avvenuta — com'era stato proposto — nel 1957, non si sarebbero avuti gli anormali abbassamenti, riscontrati nel 1958 (che, in più punti, hanno oscillato tra i 20 e i 30 cm); non si sarebbero verificati quelli, ancora più notevoli, dell'anno 1959, durante il quale, in più zone, gli sprofondamenti furono di ben 35 cm.

2) In sintesi, una chiusura dei pozzi nel 1957, avrebbe evitato gli abbassamenti riportati in Fig. 25 che vanno da un minimo di 30 cm

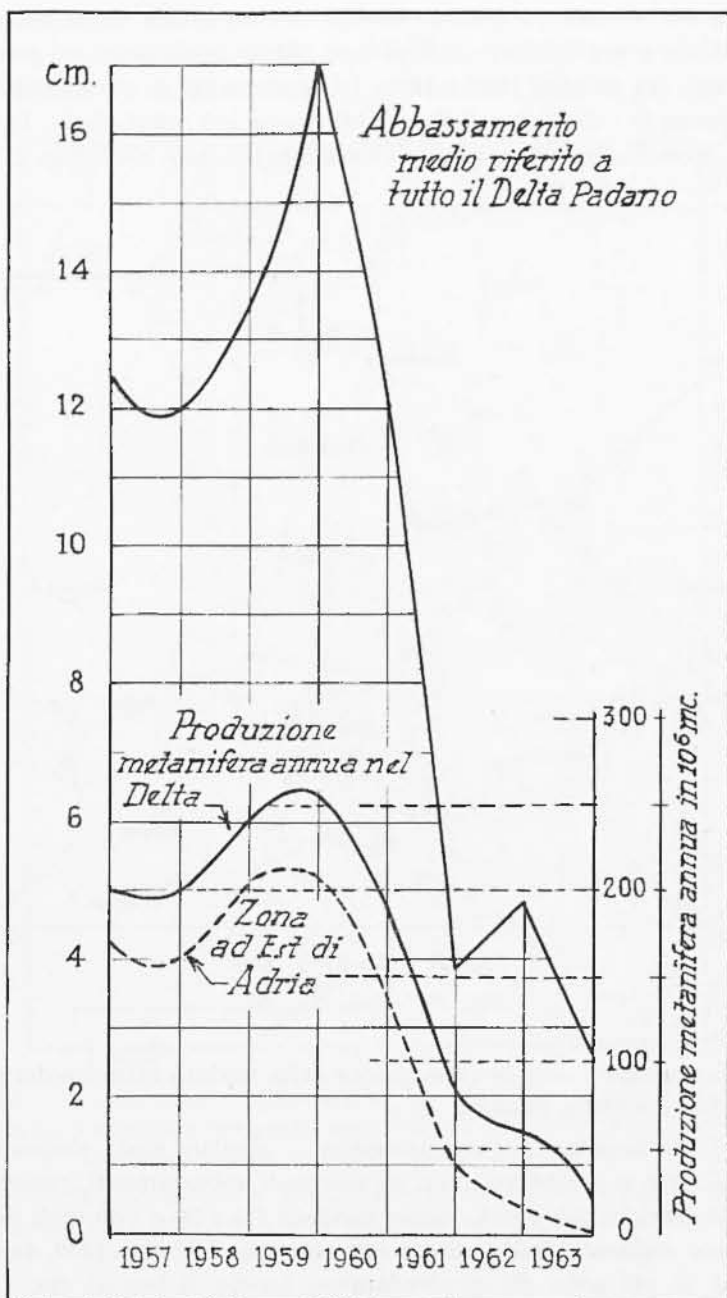


Fig. 27 - Grafico complessivo approssimativo, comprovante come gli abbassamenti osservati nel Delta fossero strettamente collegati all'entità delle estrazioni di acque metanifere.

Fig. 27 - Overall rough graph proving that the subsidence movements observed in the Delta area are strictly linked with the amount of methane water extracted.

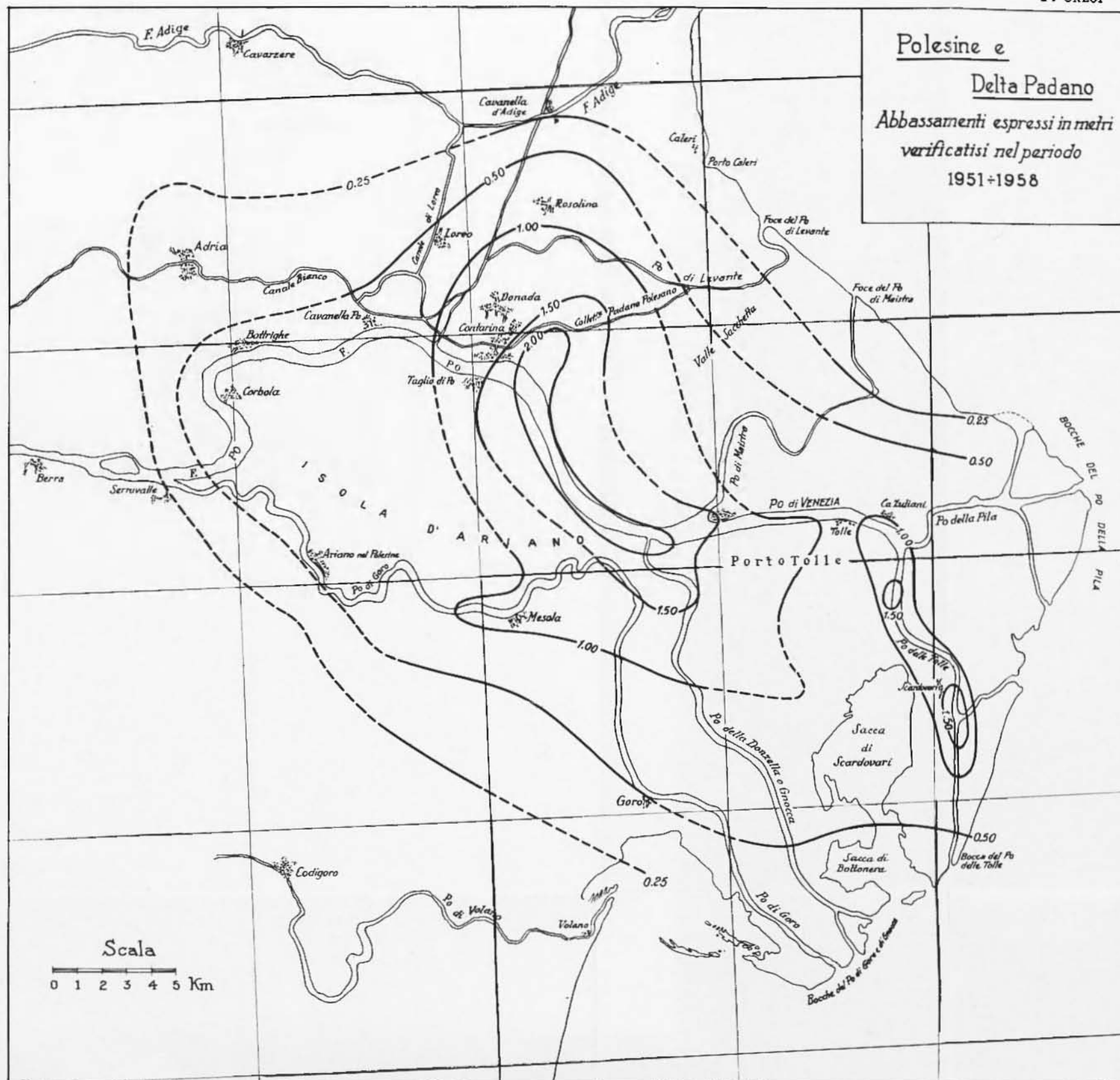


Fig. 22 - Abbassamenti espressi in metri, verificatisi nel periodo 1951-1958.
(Cortese concessione Comitato ricerche sull'abbassamento del Polesine e del Delta Padano).

Fig. 22 - Subsidence movements, expressed in metres, of the 1951-1958 period.

Polesine e
Delta Padano

Abbassamenti espressi in metri
osservati nell'Anno
1958

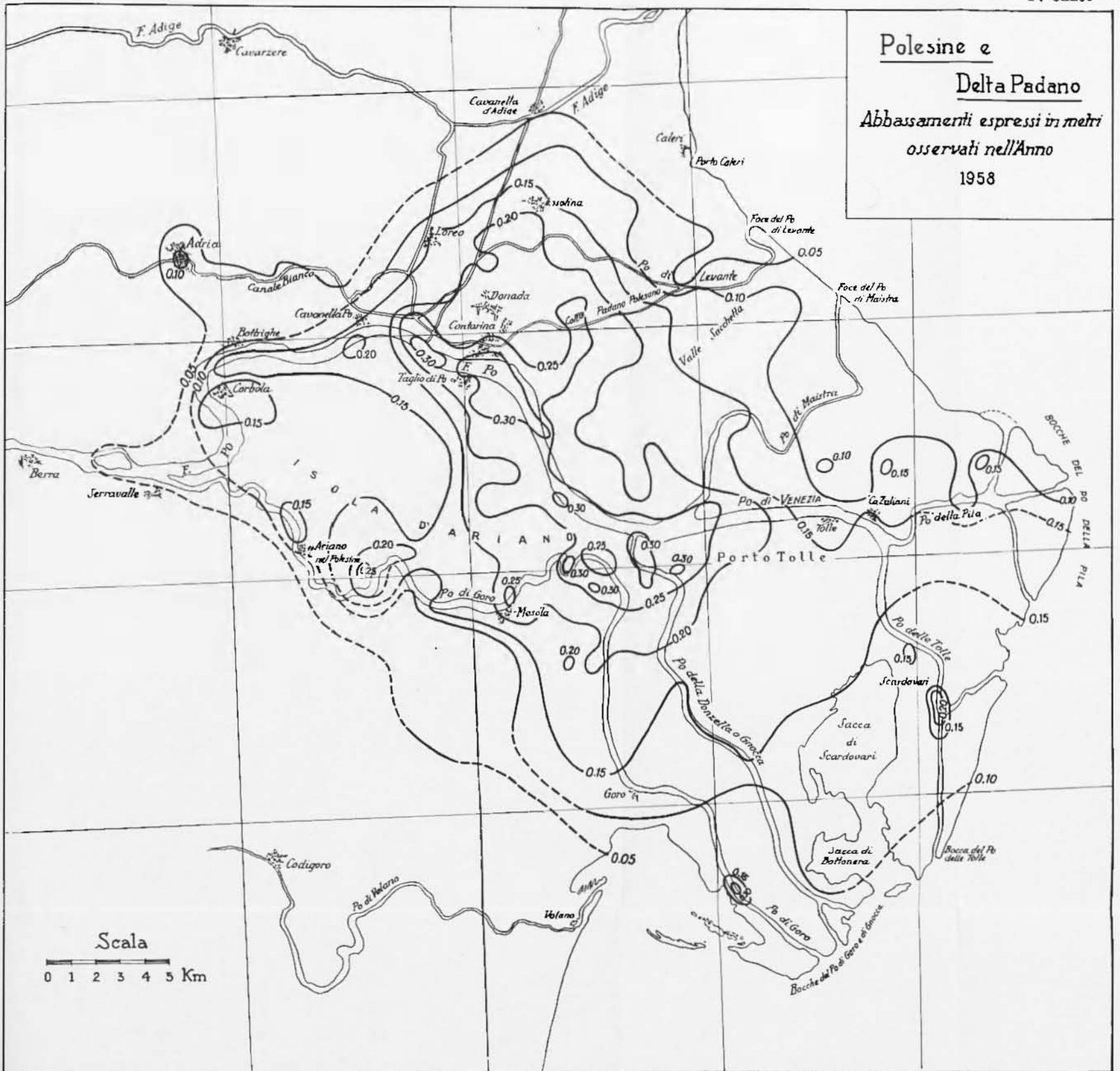


Fig. 23 - Abbassamenti, espressi in metri, verificatisi nel 1958.

Fig. 23 - Subsidence movements, expressed in metres, of the year 1958.

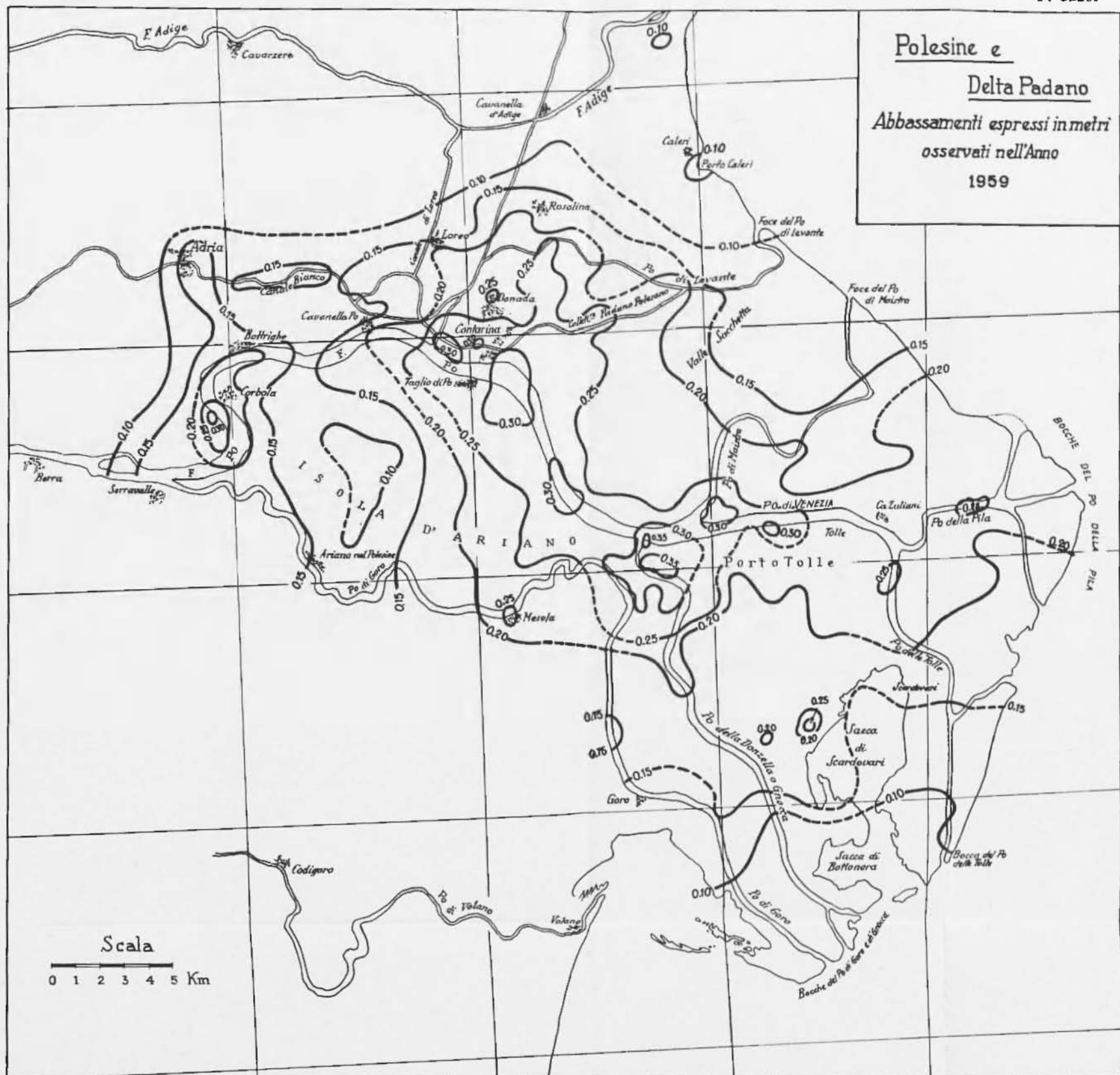


Fig. 24 - Abbassamenti, espressi in metri, osservati durante il 1959.

Fig. 24 - Subsidence movements, expressed in metres, observed in 1959.

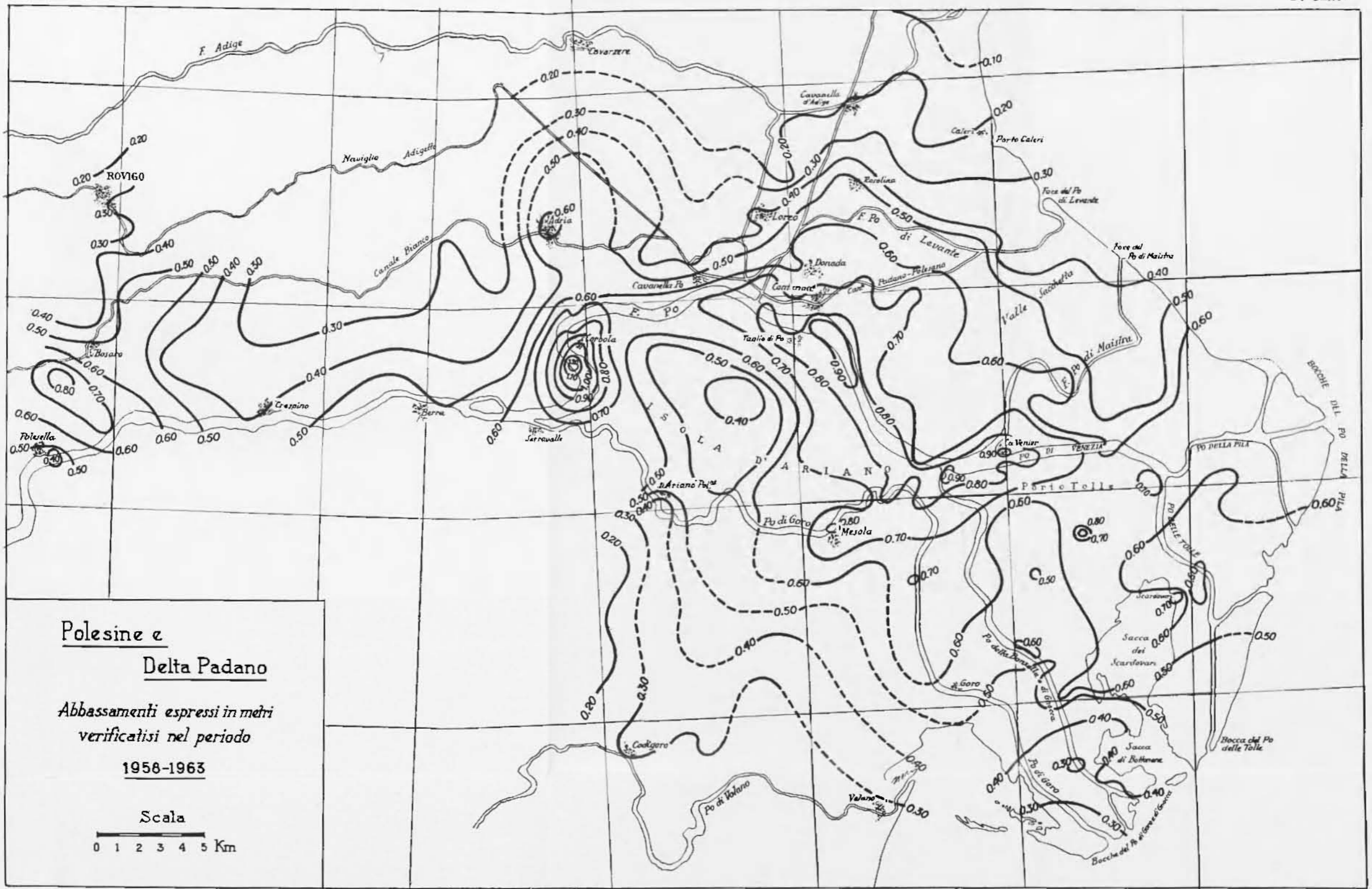


Fig. 25 - Abbassamenti, espressi in metri, verificatisi nel periodo 1958-1963.
Fig. 25 - Subsidence movements, expressed in metres, of the 1958-1963 period.

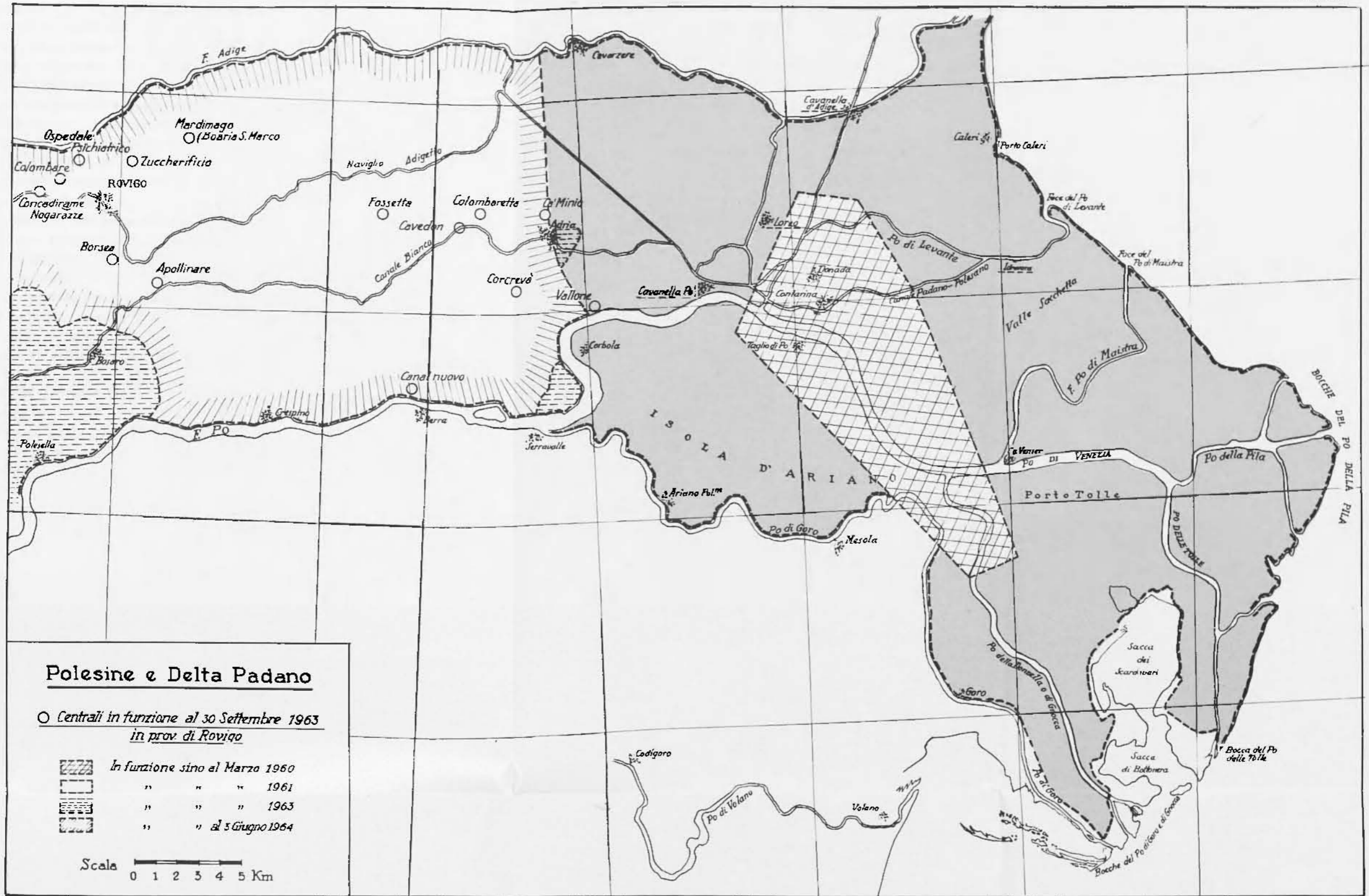


Fig. 25 - L'interruzione delle estrazioni delle acque metanifere, ordinata nella poligonale del Delta, con tratteggio a rete, nel 1960, fu prontamente seguita dall'arresto degli abbassamenti.

Fig. 26 - The interruption of extraction of methane waters, ordered in 1960 in the Delta area marked by net dashes, was immediately followed by the stop of subsidence movements.

ca ad un massimo di ben 120 cm: flessione complessiva enorme, che ha compromesso — forse in maniera definitiva — l'equilibrio terra emersa-acqua di vaste zone del Delta (parecchie delle quali, come è noto, sono ormai sommerse 12 mesi all'anno).

Mi sono soffermato sulla situazione, venutasi a creare nel Delta in seguito alle disordinate estrazioni di acque metanifere, sia per aver partecipato alle indagini atte a precisarne le cause, sia per i riflessi che tanto abbassamento ha certamente determinato in zone, solo in apparenza, lontane, come per esempio la Laguna Veneta, sia per sottolineare la responsabilità che giudizi affrettati o — peggio — interessati, espressi da tante persone, hanno avuto sul prolungamento e, quindi, sull'aggravamento del fenomeno.

Intendiamoci, comportamenti del genere non sono esclusivi degli italiani. Grosse battaglie, in questioni analoghe, sono avvenute anche all'estero. Negli Stati Uniti per es., solo dopo aspre polemiche David M. Evans, è riuscito a convincere — sia pure soltanto in parte — le Autorità di Denver, che i terremoti, cui da tempo la città e i dintorni andavano soggetti, erano provocati da iniezione di acque di rifiuto in località vicina. Lo stesso Evans, in una lettera del 14 Agosto 1968 — con la quale mi accompagnava nuove testimonianze del collegamento tra infiltrazioni d'acqua e attività sismica — così concludeva: « although the political authorities are doing their best to dodge the responsibility ».

È chiaro, in ogni modo, che un'Autorità — politica o no — è portata ad eludere (come dice Evans) le sue responsabilità, quando trova esperti che, con i loro giudizi, gli consentono tale elusione (*).

Attese le conseguenze drammatiche che i giudizi di periti di parte possono avere sull'andamento di fenomeni sotto indagine, è doverosa, da parte di detti periti, la più spassionata obiettività.

(*) Per dare un'idea dell'azione di freno (o di insabbiamento) dei giudizi di taluni esperti su certe iniziative, citerò il caso della « Commissione per la microsismicità delle dighe », nominata dal Ministero dei Lavori Pubblici nel Gennaio del 1965. Detta Commissione — di cui facevo parte — si riunì, per la prima volta, il 18 Maggio 1965. Poi trascorsero i mesi, e con i mesi gli anni, senza il minimo accenno di una ripresa dei lavori. Solo una mia vibrata lettera al Ministro dei Lavori Pubblici dell'epoca (Gennaio 1968) riuscì a provocarne il risveglio. In ogni modo, i lavori furono limitati ad un'altra sola seduta, con la compilazione di una relazione alquanto vaga, in cui soltanto lo scrivente sottolineava la necessità di osservazioni geodinamiche continue presso le grandi dighe.

È senz'altro spiegabile che un esperto sia portato, anche in perfetta buona fede, ad esprimere giudizi favorevoli alla parte che lo ha interpellato. Non è però giustificabile che, a questo fine, vengano citate cifre non rispondenti alla realtà, comunque non doverosamente controllate.

L'uomo di scienza, se è veramente tale, dev'essere sempre ed esclusivamente, al servizio della verità.