

**STRUTTURE SISMOGENETICHE LUNGO IL PROFILO CROP 1-1A
(SEGMENTO FRIULANO)**

INDICE

RIASSUNTO	pag.	71
ABSTRACT	"	71
INTRODUZIONE	"	71
METODOLOGIA	"	72
BASE DI DATI PER LE SEZIONI DI PROBABILITÀ IPOCENTRALE	"	72
RISULTATI	"	75
INTERPRETAZIONE	"	76
BIBLIOGRAFIA	"	76

RIASSUNTO

È stata recentemente messa a punto una metodologia basata su criteri probabilistici per evidenziare e riconoscere strutture sismogenetiche crostali, a partire da una base di dati sismologici. Con questa metodologia si riesce a rappresentare, e quantificare, la concentrazione di terremoti avvenuta in una certa regione della crosta terrestre, tenendo in considerazione l'imprecisione delle determinazioni ipocentrali.

Tale approccio è stato applicato alla regione friulana, lungo il profilo di progetto della linea CROP 1-1A. Sono state evidenziate, così, strutture sismogenetiche attive nel periodo 1977-1990; tramite una serie di profili seriati, si riconoscono sovrascorrimenti a basso angolo, di direzione dinarica, nel settore più esterno della catena delle Alpi meridionali, associati a strutture di svincolo più settentrionali, di direzione alpina, dalla geometria prevalente di faglia verticale. Oltre i 15 km di profondità scompare la sismicità significativa.

ABSTRACT

A methodology based on probabilistic criteria has been recently developed and enables to recognize deep seismogenic structures starting from an instrumental earthquake catalogue. It is possible in such a way to represent and quantify the hypocenter concentration occurred in a given region of the Earth crust, taking into account the reliability of instrumental earthquake location.

This approach has been applied to the Friuli region (northeastern Italy) along the planned trace of the deep seismic profile CROP 1-1A. The seismogenic structures activated in the period 1977-1990 have been recognized in Dinaric oriented low-angle overthrusts, located in the external part of Southern Alps, with northernmost Alpine oriented disengagement elements with vertical faulting geometry. Beyond 15 km of depth the seismicity dramatically decreases.

(*) CNR Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, presso OGS, Trieste

(**) Osservatorio Geofisico Sperimentale, Trieste

PAROLE CHIAVE: Probabilità ipocentrale, strutture sismogenetiche, Friuli (Italia).

KEYWORDS: Hypocentral probability, seismogenic structures, Friuli region (Italy).

INTRODUZIONE

La registrazione strumentale dei terremoti, iniziata alla fine del secolo scorso, ha fatto straordinariamente sviluppare la conoscenza dell'interno della Terra, guidando l'evoluzione delle teorie geodinamiche. Particolarmente a piccola profondità, dove l'energia rilasciata da un terremoto testimonia la reologia prevalentemente fragile della crosta, è estremamente importante riuscire ad associare la sismicità a strutture tettoniche, e considerare quindi l'attività sismica come un indicatore delle discontinuità crostali.

Molte discipline contribuiscono oggi a correlare la sismicità ad eterogeneità crostali o a strutture tettoniche: tra queste la sismica attiva di prospezione ha fornito notevolissimi contributi in questo campo, individuando le strutture sepolte tramite le caratteristiche acustiche delle rocce attraversate. Il più usuale e comune approccio per riconoscere l'attività di strutture sismogenetiche consiste, comunque, nell'analisi della distribuzione spaziale degli ipocentri: a tale scopo vengono elaborate sia delle carte degli epicentri, per visualizzare la disposizione in pianta degli eventi, sia delle sezioni verticali di ipocentri, per analizzarne l'andamento in profondità. A tali immagini della sismicità si riconducono poi alcune geometrie tettoniche, congruenti con altre informazioni, di superficie e di profondità.

Tralasciando tutti i problemi della geometria prospettiva (problemi che conducono talvolta ad errate valutazioni sulla inclinazione, o direzione, della struttura sismogenetica), l'inesattezza della localizzazione ipocentrale, intrinseca in qualunque metodo di determinazione, non viene minimamente considerata; ciascun terremoto viene trattato come un punto, al quale può venire associato un simbolo grafico per indicare la magnitudo relativa, e l'interpolazione, soggettiva e più o meno arbitraria di tali punti, definisce la geometria della struttura ricercata. In questo procedimento, pertanto, l'intervento interpretativo può risultare determinante nel riconoscimento delle strutture sismogenetiche.

Per ovviare a tali inconvenienti è stata recentemente messa a punto una nuova metodologia (PERUZZA *et al.*, 1991) che, definendo alcuni nuovi parametri statistici collegati alla determinazione ipocentrale del terremoto, consente il riconoscimento di strutture sismogenetiche, senza determinanti interventi interpretativi, e tiene in considerazione l'accuratezza della localizzazione.

In questo lavoro vengono presentati una serie di profili realizzati con questa nuova metodologia, tracciati su una vasta area del Friuli dove è prevista l'esecuzione del profilo di sismica CROP 1, previsto dal CNR nell'ambito del progetto di indagine sulla crosta profonda. In tal modo i risultati ottenuti a partire da una base di dati sismologici potranno venir confrontati ed integrati con le evidenze desunte dalle future interpretazioni delle linee sismiche.

METODOLOGIA

La metodologia utilizzata definisce alcuni nuovi parametri basati su criteri probabilistici (PERUZZA *et al.*, 1991). Si assume, infatti, che i parametri statistici associati alla localizzazione ipocentrale siano rappresentativi dell'accuratezza della soluzione e che, quindi, tali errori possano individuare un volume di indeterminazione associato alla posizione dell'ipocentro. Questo trattamento distribuisce l'ipocentro, originariamente considerato un punto, su di un volume in maniera non uniforme, mediante la definizione, per ogni terremoto, di un campo di probabilità.

La *probabilità elementare EP* viene definita come la probabilità che l'ipocentro di un terremoto cada all'interno di un dato volume elementare (cella). Per calcolarla si fa riferimento al caso semplice e generalizzato di una distribuzione normale (gaussiana) degli errori di localizzazione.

Quando si è verificato più di un evento si definisce come *densità ipocentrale HD* la sommatoria di tutte le EP calcolate in una data cella: è una grandezza che rappresenta una sorta di conteggio del numero di terremoti localizzati in quella cella, considerando che un evento può cadere solo in parte entro il volume in analisi.

Più sofisticato è il concetto di *probabilità ipocentrale HP* che consiste nella probabilità che almeno un terremoto abbia avuto l'ipocentro localizzato in una data cella durante il periodo di tempo analizzato. Il calcolo di questo parametro è molto oneroso, in termini di tempo di calcolo e di memoria, in quanto vengono considerate le possibili combinazioni dei campi di probabilità di tutti i terremoti avvenuti, ma sono state ultimamente introdotte (BULFON, 1992; comunicazione personale) delle modifiche all'algoritmo originale che migliorano decisamente le prestazioni. Poiché HP è effettivamente una probabilità, può assumere solo valori compresi tra 0 e 1 (o, se espressi in percentuale, tra 0% e 100%): ciò la rende particolarmente adatta per rappresentare in maniera omogenea e quantitativa la sismicità di aree diverse. È sufficiente infatti definire l'unità di volume e l'unità di tempo di riferimento per avere un parametro rappresentativo della sismicità. Al contrario il parametro HD (densità ipocentrale) non è normalizzabile e presenta talvolta una dinamica così elevata da risultare di difficile rappresentazione; conviene quindi utilizzarlo nelle prime fasi di indagine per la sua rapidità di calcolo.

Le principali potenzialità del metodo consistono, quindi, in:

1) consentire una rappresentazione in scala assoluta della sismicità, tramite il parametro HP;

2) considerare l'effetto degli errori di localizzazione, neutralizzando automaticamente l'effetto di terremoti mal localizzati;

3) costruire rappresentazioni praticamente bidimen-

sionali della sismicità, evitando di "sporcare" l'eventuale struttura sismogenetica con il contributo della sismicità ad essa esterna;

4) poter analizzare l'evoluzione della sismicità tramite opportune finestre temporali.

BASE DI DATI PER LE SEZIONI DI PROBABILITÀ IPOCENTRALE

Il metodo brevemente descritto è stato applicato all'area friulana interessata dal progetto del profilo sismico CROP 1.

L'area dispone per gli ultimi decenni di un catalogo sismologico strumentale molto accurato rispetto alla maggior parte del territorio italiano, in quanto, a seguito al terremoto di Gemona del 1976 ($M_{wa} = 6,4$), è stata installata in Friuli una rete sismometrica locale. La rete, gestita dall'Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste, ha permesso la localizzazione (LEE & LAHR, 1975) nel periodo

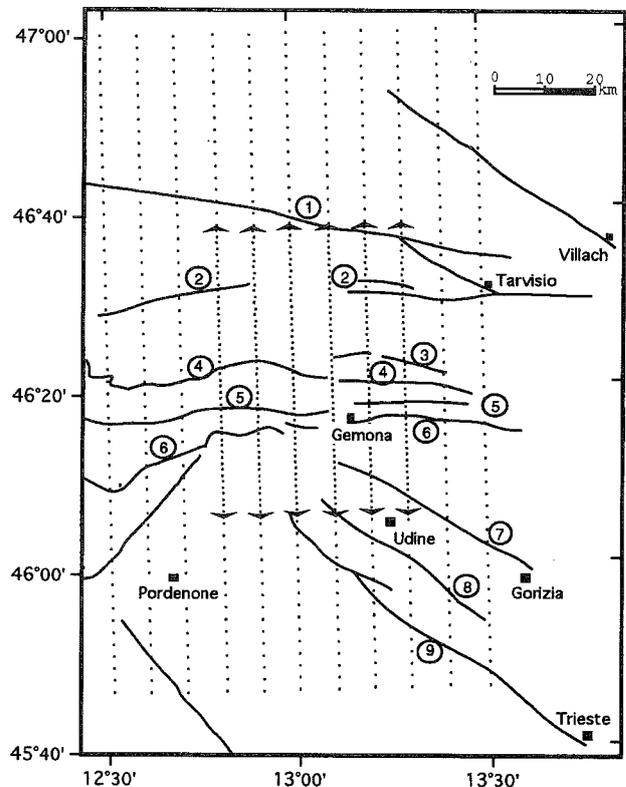


Fig. 1 - Schema tettonico sintetico (tratto da BIGI *et al.*, 1992) e pianta di posizionamento delle sezioni. Le sezioni di HP complessivamente analizzate sono individuate con la linea punteggiata più larga; i sei segmenti qui presentati hanno la punteggiatura più fitta e sono racchiusi tra le frecce. Per la nomenclatura degli elementi tettonici si è fatto riferimento a CASTELLARIN (1981) e ZANFERRARI *et al.* (1982). In dettaglio:

- 1) Linea della Gailtal;
- 2) Linea della Fella-Sava e Linea della Val Pesarina;
- 3) Linea della Val di Resia e Linea del M. Amariana;
- 4) Sovrascorrimento dell'Alto Tagliamento o Sovrascorrimento del M. Dof-M. Anda-Linea dell'Alto Tagliamento-Linea del Clapon del Mai-Val Uccia;
- 5) Sovrascorrimento di Tramonti o Linea Pinedo Avasinis-Linea Brancot-Caporetto-Circhina;
- 6) Sovrascorrimento Periadriatico;
- 7) Linea Buja-Tricesimo o fascio di strutture Buja-Cividale;
- 8) Linea Udine-Buttrio;
- 9) Linea di Palmanova o Linea Lariano-Palmanova-Golfo di Panzano-Baia di Muggia.

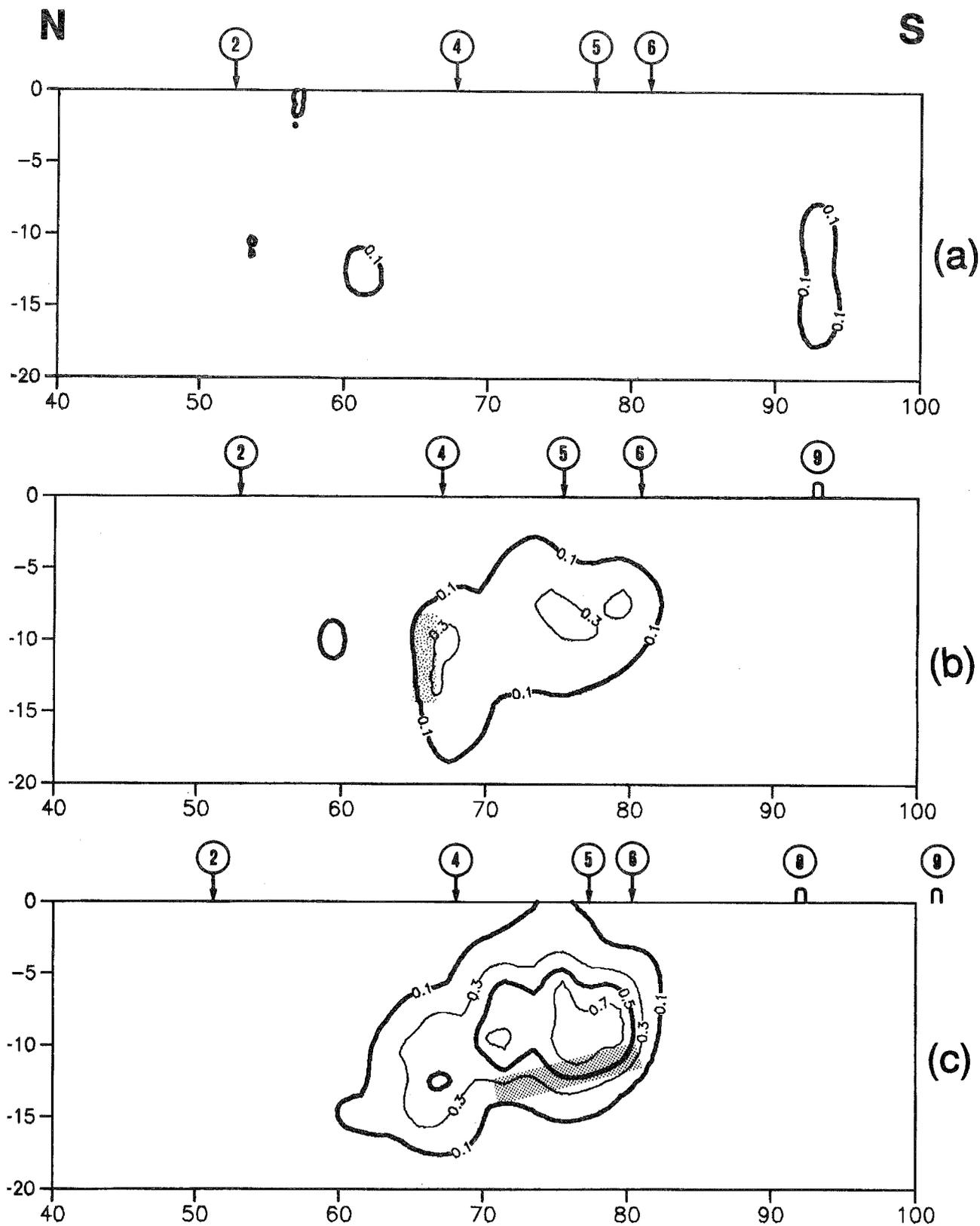


Fig. 2 - Sezioni di probabilità ipocentrale HP in Friuli. Con il tratto ingrossato vengono rappresentate le isolinee di valore 0,1 (10%), 0,5 (50%), 0,9 (90%); col tratto sottile i valori 0,3 (30%) e 0,7 (70%). I cerchi numerati riportati sul lato superiore di ciascuna sezione individuano le strutture tettoniche superficiali di Fig. 1; con la freccia viene indicata l'intersezione effettiva con il profilo, la U rovesciata indica l'intersezione presunta quando la struttura si interrompe in vicinanza del profilo. Il retino evidenzia le strutture individuate: a) sezione meridiana di longitudine $12,80^{\circ}$ E; b) idem per $12,90^{\circ}$ E; c) idem per $13,00^{\circ}$ E.

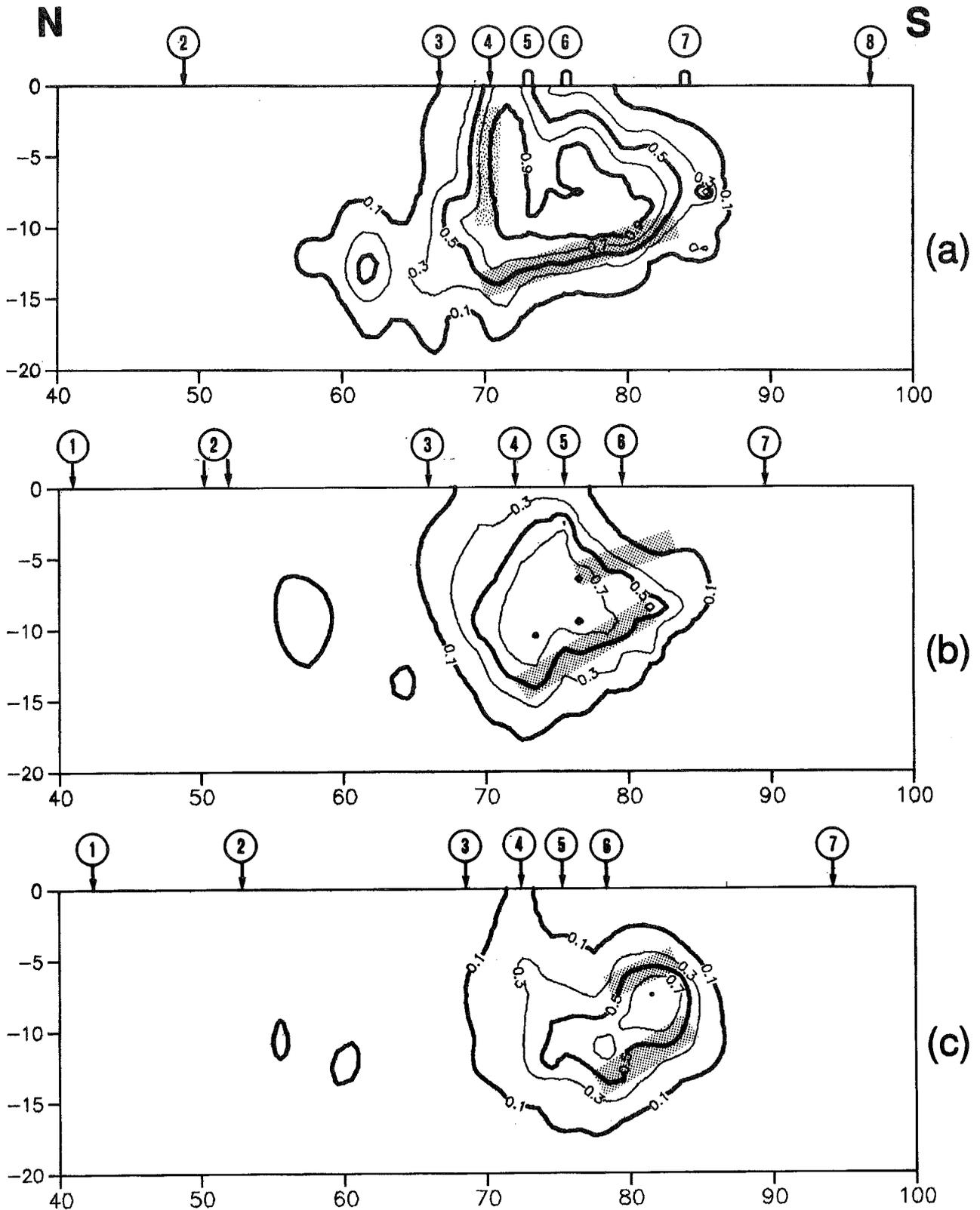


Fig. 3 - Sezioni di probabilità ipocentrale HP in Friuli. Con il tratto ingrossato vengono rappresentate le isolinee di valore 0,1 (10%), 0,5 (50%), 0,9 (90%); col tratto sottile i valori 0,3 (30%) e 0,7 (70%). I cerchi numerati riportati sul lato superiore di ciascuna sezione individuano le strutture tettoniche superficiali di Fig. 1; con la freccia viene indicata l'intersezione effettiva con il profilo, la U rovesciata indica l'intersezione presunta quando la struttura si interrompe in vicinanza del profilo. Il retino evidenzia le strutture individuate: a) sezione meridiana di longitudine 13,10° E; b) idem per 13,20° E; c) idem per 13,30° E.

1977-1990 di circa 7000 scosse di magnitudo compresa tra 1,5 e 5,2 (OGS, 1977-1981, 1982-1990); nel calcolo della posizione dell'ipocentro vengono utilizzati anche i dati delle stazioni italiane e straniere più vicine, ed il modello crostale è stato tarato localmente sui profili sismici esistenti. I risultati sono forniti con la stima degli errori statistici relativi al tempo origine, alle coordinate geografiche ed alla profondità: ciò li rende idonei all'applicazione del metodo prima presentato.

Uno schema delle principali linee tettoniche della zona, desunte dal Modello Strutturale d'Italia (BIGI *et al.*, 1992), è riportato in Fig. 1 assieme alla traccia dei profili complessivamente eseguiti (linea punteggiata larga). Per ottenere una miglior visione dei risultati si è deciso, infatti, di produrre dei profili seriatati, di direzione meridiana, lunghi circa 140 km, a partire dalle Alpi *s.s.* fino alla bassa pianura friulana, tra i valori di latitudine 47,00° N e 45,75° N.

Undici sezioni di probabilità ipocentrale HP relative al periodo 1977-1990, interessano ciascuna uno spessore complessivo di 2 km (+/- 1 km dalla traccia del profilo) fino a 30 km di profondità, e sono equispaziate tra loro di circa 8 km tra i valori di longitudine 12,50° E e 13,50° E di Greenwich. Vengono qui presentati solo i segmenti centrali di 6 sezioni, evidenziati con la punteggiatura più fitta in Fig. 1 e delimitati dalle frecce. La rappresentazione di Figg. 2 e 3 è indeformata ed i valori chilometrici hanno origine per ciascuna sezione in un punto sul livello del mare posto a 47° di latitudine N; il nord compare sempre a sinistra. I richiami numerici marcano inoltre l'intersezione superficiale con le strutture tettoniche di Fig. 1; per un maggior dettaglio i riferimenti chilometrici possono essere utilizzati sulla base tettonico-strutturale originaria (BIGI *et al.*, 1992).

RISULTATI

Nelle Figg. 2 e 3 vengono presentate, da occidente verso oriente, le sezioni localizzate nel Friuli centrale, zona interessata dalla futura realizzazione del segmento friulano del profilo CROP 1. Questa zona (fra longitudine 12,8° E e 13,3° E) è anche quella maggiormente sismica, ed infatti al di fuori di essa i valori di probabilità ipocentrale HP calcolati scemano drasticamente come si vede già nella sezione più occidentale fra quelle qui mostrate (Fig. 2a). I valori più elevati di HP sono raggiunti nella sezione centrata su longitudine 13,1° E (Fig. 3a, dove un'ampia zona presenta valori di HP maggiori di 0,9), e diminuiscono simmetricamente.

L'estensione delle aree a valori più elevati di HP, collegati alle strutture sismogenetiche maggiormente attive, non permette una chiara individuazione della geometria profonda delle strutture stesse. Tale estensione può verosimilmente essere determinata dall'attività di un fascio di strutture vicine. Di maggior significato sono, invece gli andamenti dei gradienti che, nel nostro caso, sembrano delimitare il settore a maggior deformazione.

Le migliori evidenze sono date dall'individuazione di piani immergenti verso nord con basso angolo e di uno o più piani verticali che delimitano la sismicità e che, pertanto, possono essere interpretati come le strutture sismogenetiche più periferiche.

Entrando in dettaglio possiamo dire che il piano a basso

angolo immergente verso nord viene evidenziato soprattutto dall'elevato gradiente di HP, marcato dalla retinatura tra i 10 e 15 km di profondità nelle Figg. 2c, 3a, 3b e 3c, in corrispondenza della base dell'isolinea 0,5 oltre la distanza di 70 km dall'origine. L'inclinazione apparente di questa struttura sismogenetica aumenta leggermente da W verso E (circa 20° nelle Figg. 2c e 3a; circa 30° nelle Figg. 3b e 3c). La profondità e l'inclinazione consentono di associare queste strutture a lineamenti ad orientazione dinarica localizzati nella pianura friulana: in particolare, ipotizzando una inclinazione pressochè costante, verrebbe coinvolta la Linea di Palmanova (9 in Fig. 1) nella regione interessata dalle Figg. 2c e 3a, la Linea Udine-Buttrio (8) nella regione delle Figg. 3b e 3c. Una simile interpretazione era già stata proposta per la sequenza del 1976 da FINETTI *et al.* (1979).

L'attività del fronte dinarico più interno, dato dalla Linea Buja-Tricesimo (7), trova invece riscontro nelle Figg. 3b e 3c quale limite superiore della zona a più frequente rilascio sismico (retinatura a circa 6 km di profondità attorno al km 80); l'inclinazione apparente di circa 20° viene ottimamente confermata dal meccanismo focale di uno dei terremoti più forti avvenuti nell'area dopo le sequenze sismiche del maggio e settembre 1976 (terremoto del 3/4/1978 di magnitudo 4,5; SLEJKO *et al.*, 1989); esso suggerisce infatti un meccanismo di faglia inversa su un piano di direzione 302°, inclinato 31° (si ricorda che l'angolo di intersezione di circa 60° fra la struttura ed il profilo causa una lieve diminuzione dell'inclinazione apparente rispetto al valore reale) ed immergente verso NNE, con l'ipocentro localizzato a 46° 17,7' N, 13° 09,8' E e 5 km di profondità.

Il progressivo aumento dell'attività sismica attorno alla longitudine 13,1° (dove passa la stretta del Tagliamento) coinvolge volumi sempre più superficiali, rendendo difficile l'individuazione di strutture sismogenetiche a piccola profondità. Il lobo superficiale (tra i 2 e 3 km di profondità) dell'isolinea 0,5 in Fig. 3b, centrato sotto il sovrascorrimento di Tramonti (5) suggerisce l'attività, di un elemento immergente verso nord ad angolo piuttosto alto, attivo tra i 2 ed i 7 km anche nelle contigue sezioni più occidentali di Figg. 3a e 2c. Esso può agevolmente venire attribuito ad una struttura alpina di direzione E-W quale ad esempio il sovrascorrimento di Tramonti (5) o il sovrascorrimento Periadriatico (6).

Più complesso è il collegamento con le informazioni di superficie dell'elemento verticale sottostante al sovrascorrimento dell'Alto Tagliamento (4) evidenziato con la retinatura irregolare dall'area di probabilità 0,3 in Fig. 2b e 0,9 in Fig. 3a. Nel caso di Fig. 3a, l'analisi temporale (PERUZZA *et al.*, 1991) ha permesso di ricondurre l'allineamento verticale ad una anomala crisi sismica del febbraio 1988, mentre l'attività del restante periodo richiama lo stile di Fig. 2c o Fig. 3b; presumibilmente l'interferenza tra strutture alpine e dinariche, che nella stretta del Tagliamento è associata anche a faglie verticali orientate N-S (parallele dunque al nostro profilo), complica il riconoscimento delle geometrie coinvolte. Importante è, comunque, notare come sia stata ipotizzata una attività neotettonica di trascorrenza sinistra riconducibile ad alcuni tratti del sovrascorrimento dell'Alto Tagliamento, o a strutture verticali leggermente più settentrionali ad esso associate (ZANFERRARI *et al.*, 1982). È ancora interessante notare, in Fig. 3, che la

sismicità praticamente scompare a nord della Linea di Resia e della Linea del M. Amariana (qui sinteticamente indicate nell'elemento 3) con un limite verticale molto netto, giustificando anche nel settore orientale l'esistenza di una superficie di svincolo, limite del settore sismogeneticamente attivo. In tal ottica l'attività antitetica (geologicamente documentata) della Linea di Resia, e la trascorrenza (ipotizzata da dati neotettonici) su strutture quali la Linea del M. Amariana, e porzioni della Linea dell'Alto Tagliamento, sono cinematicamente giustificate.

L'esistenza di una debole attività sismica piuttosto profonda collegabile alla Linea Fella-Sava (2 nelle Figg. 2 e 3) non è qui particolarmente evidente, anche se, mentalmente, le isole di probabilità ipocentrale superiore a 0,1 tra i km 50 e 65 possono essere agevolmente interpolate da una superficie concava. Una rappresentazione di maggior dettaglio per i valori bassi di HP consente di apprezzare senza incertezze tale collegamento, come già descritto in precedenti lavori (PERUZZA *et al.*, 1991) dove l'uso del colore nella resa grafica facilita l'interpretazione.

INTERPRETAZIONE

Le evidenze messe in luce dalle sezioni di probabilità ipocentrale possono trovare una tentativa giustificazione in un modello globale che consideri sismogeneticamente attivi, a diverse profondità e con differenti inclinazioni, i sovrascorrimenti dinarici riconosciuti nella pianura friulana. Un ipotetico piano riconducibile alla Linea di Palmanova costituisce il limite inferiore dell'attività sismica, non più riconoscibile oltre i 13-15 km di profondità; un'altro, qui associato alla Linea Buja-Tricesimo, limita superiormente la sismicità tra i 3 ed i 7 km di profondità, nel suo estendersi verso l'avampaese. L'attività molto superficiale (meno di 5 km di profondità) è meno rappresentata, e diventa significativa solo dove, in corrispondenza dei sovrascorrimenti alpini di direzione E-W, è plausibile una interferenza con i sopracitati lineamenti dinarici. In questa situazione, singole crisi sismiche, così come una generale brusca rarefazione degli ipocentri procedendo verso nord, testimoniano l'attività di piani subverticali di svincolo di

direzione alpina. Una minima porzione degli sforzi può inoltre essere rilasciata da un comportamento fragile di sistemi alpini ancora più settentrionali.

Si auspica che un tale quadro possa essere collegato, o reinterpretato, sulla base dei risultati di sismica profonda attesi dal profilo CROP 1.

BIBLIOGRAFIA

BIGI G., COSENTINO D., PAROTTO M., SARTORI R. & SCANDONE P. (1992) - *Structural Model of Italy*. CNR PF Geodinamica, S.E.L.Ca., Firenze.

CASTELLARIN A. (a cura di) (1981) - *Carta tettonica delle Alpi Meridionali alla scala 1:200000*. CNR PF Geodinamica, Publ. 441, Tecnoprint, Bologna, 220 pp.

FINETTI I., RUSSI M. & SLEJKO D. (1979) - *The Friuli earthquake (1976-1977)*. Tectonophysics, 53, 261-272.

LEE W.H.K. & LAHR J.C. (1975) - *Hypo 71 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes*. U.S.G.S. Open File Report 75-311, Menlo Park, 113 pp.

OGS (1977-1981) - *Bollettino della Rete Sismologica del Friuli-Venezia Giulia*. OGS, Trieste.

OGS (1982-1990) - *Bollettino della Rete Sismometrica dell'Italia nord-orientale*. OGS, Trieste.

PERUZZA L., REBEZ A., SLEJKO D. & PADOAN G. (1991) - *Weighted uncertainties used to detect seismic structures*. Boll. Geof. Teor. Appl., 33, 25-45.

SLEJKO D., CARULLI G.B., NICOLICH R., REBEZ A., ZANFERRARI A., CAVALLIN A., DOGLIONI C., CARRARO F., CASTALDINI D., ILLICETO V., SEMENZA E. & ZANOLLA C. (1989) - *Seismotectonics of the eastern Southern-Alps: a review*. Boll. Geof. Teor. Appl., 31, 109-136.

ZANFERRARI A., BOLLETTINARI G., CAROBENE L., CARTON A., CARULLI G.B., CASTALDINI D., CAVALLIN A., PANIZZA M., PELLEGRINI G.B., PIANETTI F. & SAURO U. (1982) - *Evoluzione neotettonica dell'Italia nord-orientale*. Mem. Sci. Geol., 35, 355-376.