

Allegato 4.2.2.2/II



Centrale termoelettrica
di Porto Tolle



ENEL Società per azioni DIREZIONE COSTRUZIONI Unità Laboratorio Centrale		RELAZIONE TECNICA						Documento PT00311TISIPE024		
								Pag. 1 di 35		
<p>Impianto: <u>CENTRALE DI PORTO TOLLE</u></p> <p>Titolo: CARATTERIZZAZIONE DELLA PERTURBAZIONE TERMICA CON SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO IN ASSETTO FIUME-FIUME. Sintesi dei dati di 8 campagne di misure.</p>										
Rev.	DESCRIZIONE DELLE REVISIONI								S.E.	
2										
1										
0	11.01.93	<i>Lu. De Felici</i>					<i>Lu. De Felici</i>	<i>Lu. De Felici</i>	AU	
	DATA	LPEC:MM	COLLABORAZIONI				LPEC	VI	LPE	
		INCARICATO					SDA		REE	

ENEL Società per azioni DIREZIONE COSTRUZIONI Unità Laboratorio Centrale	RELAZIONE TECNICA	Documento	
		PT00311TISIPE024	
		Pag.	2 di 35

SOMMARIO

La Commissione Permanente di Controllo della Centrale di Porto Tolle ha elaborato nella seduta del 25 marzo 1988 un programma di indagini volte a descrivere la perturbazione termica indotta dallo scarico delle acque di raffreddamento della centrale, in funzione delle condizioni ambientali. L'obiettivo del programma non è quindi quello di verificare il rispetto della legislazione di settore, ma quello di derivare i comportamenti di alcuni indicatori termici correlabili con eventuali effetti sulle risorse biologiche.

In questo contesto, su richiesta di UPT-VE, l'Unità Laboratorio di Piacenza ha svolto nel periodo 1989-1991 otto campagne di rilevamento, i cui risultati dettagliati sono già stati presentati alla Commissione in tre rapporti di avanzamento.

Nel presente rapporto conclusivo vengono analizzati comparativamente i risultati di tutte le 8 campagne e viene proposto un modello statistico che interpreta alcuni parametri indicatori della perturbazione termica in funzione dei principali fattori influenzanti.

- N° Commessa :

- Ambito di diffusione : R E

LISTA DI DISTRIBUZIONE			
COPIE PER DISTRIBUZIONE INTERNA		COPIE PER DIFFUSIONE ESTERNA	
Destinatari	N°	Ente / Destinatario	N°
Archivio Generale	1	DPT-UPT Venezia	15
LPE	1	RIT Porto Tolle	1
LPEC	5	DPT Roma	1
		DCO-AITC	1

<p>ENEL Società per azioni DIREZIONE COSTRUZIONI Unità Laboratorio Centrale</p>	<p>RELAZIONE TECNICA</p>	<p>Documento PT00311TSIPE024 Pag. 3 di 35</p>
<p>1. <u>PREMESSA</u></p> <p>La Commissione Permanente di Controllo della Centrale di Porto Tolle ha elaborato nella seduta del 25 marzo 1988 un programma di indagini volte a descrivere la perturbazione termica indotta dallo scarico delle acque di raffreddamento della centrale, in funzione delle condizioni ambientali. L'obbiettivo del programma non è quindi quello di verificare il rispetto della legislazione di settore, ma quello di derivare i comportamenti di alcuni indicatori termici correlabili con eventuali effetti sulle risorse biologiche.</p> <p>In tale ambito l'Unità Laboratorio di Piacenza ha svolto nel periodo 1989-1991 otto campagne di rilevamento, i cui risultati dettagliati sono riportati integralmente in tre rapporti di avanzamento (amCA/23/89/F, amCA/1/91/F e ECL/CA/27/92/F) già consegnati alla Commissione.</p> <p>Nel presente rapporto vengono analizzati contemporaneamente i dati di tutte le campagne allo scopo di individuare il comportamento generale della temperatura e della salinità in diversi punti dell'area indagata e di ricercare eventuali correlazioni tra alcuni parametri indicatori della perturbazione termica e i principali fattori influenzanti (portata del fiume Po, marea, stagione e carico dell'impianto).</p> <p>2. <u>PIANO SPERIMENTALE</u></p> <p>2.1 CAMPAGNE DI MISURA</p> <p>Il programma della Commissione Permanente di Controllo individua nella stagione, nelle condizioni di marea e nella portata del fiume Po i fattori influenzanti della perturbazione termica sulla base dei quali costruire il piano sperimentale dell'indagine. Per un'esauriente comprensione del fenomeno occorre effettuare la descrizione per tutti i livelli di maggior interesse dei suddetti fattori.</p> <p>Limitati a due il numero di livelli di ciascun fattore influenzante, sono state programmate 8 campagne di misura secondo lo schema seguente:</p>		

Fattore:	portata	marea	stagione
Livelli	magra	sizigia quadratura	estate inverno estate inverno
	morbida	sizigia quadratura	estate inverno estate inverno

Tutte le 8 campagne previste sono state effettuate nel periodo 1989-1991.

Per motivi tecnici legati alla richiesta di energia elettrica dal ripartitore e connessi al funzionamento dei diversi gruppi, non è stato possibile ottenere in tutte le campagne il carico richiesto di almeno 1980 MWe (3 gruppi a pieno carico).

In tabella I sono sinteticamente presentati, a fronte delle date di effettuazione delle campagne, i valori dei principali fattori che le caratterizzano.

La 4^a campagna (17-18/7/89) non è stata completata a causa di un fuori servizio dell'impianto. I dati sono stati comunque parzialmente elaborati e consegnati alla Commissione.

L'ultima campagna (25-26/9/91) che avrebbe dovuto svolgersi in periodo invernale, è stata invece anticipata in periodo autunnale per motivi legati alla programmazione del carico della Centrale.

2.2 UBICAZIONE DELLE STAZIONI DI MISURA

L'area indagata è costituita dai tronchi fluviali interessati dalla perturbazione termica della Centrale in assetto di presa e scarico a fiume, dal canale di scarico a mare e dalla Sacca del Canarin.

All'interno di essa sono state posizionate 11 stazioni tali da consentire una caratterizzazione del comportamento termo-alino delle diverse zone (vedi fig.1). In particolare, per ciascun tronco fluviale, una stazione è stata posizionata in prossimità dell'incile e una vicino alla foce. I punti stazione sono sempre stati ubicati nelle zone in cui la perturbazione termica appariva più intensa. Un'ulteriore stazione (non indicata in figura) è stata posizionata a circa 7 km dal mare lungo l'asta principale del Po di Pila.

Nella tabella II sono riportati, per ciascuna stazione, una breve descrizione della zona entro cui è stata ubicata, il numero e la profondità dei diversi punti di misura.

2.3 STRUMENTAZIONE

Nel corso di ciascuna campagna sono state effettuate registrazioni continue di temperatura e misure discontinue di salinità e temperatura per un periodo di tempo di circa 24 ore. Per le registrazioni termiche sono stati utilizzati termografi a registrazione digitale con sensore a termistore, mentre per le misure termiche e aline sono stati utilizzati dei termosalinometri portatili.

Termografi registratori

Gli strumenti utilizzati per la registrazione delle temperature nelle diverse stazioni sono i termografi MTX serie TAS 1100 a 3 sensori. Le sonde di misura sono formate da termistori lineari di precisione ($\pm 0.15^{\circ}\text{C}$) che permettono, tramite settaggio dell'elettronica interna dell'apparato, di effettuare la misura di temperatura a intervalli prefissati (per le misure in esame si è scelto di registrare il dato ogni 15 minuti).

Tutti gli strumenti sono forniti di certificazione S.I.T.

Gli strumenti sono stati mantenuti in posizione nelle diverse stazioni tramite un sistema di ancoraggi costituiti da un galleggiante e da due corpi morti (vedi fig. 2) in grado di contrastare le correnti mareali di flusso e di riflusso.

Le unità operano singolarmente come delle periferiche: i dati vengono memorizzati su RAM nel corpo centrale dello strumento dove ha sede l'elettronica dell'MTX.

Termosalinometro portatile

Lo strumento (Beckman RS5-3) misura la conducibilità elettrica e la temperatura dell'acqua e utilizza queste misure per calcolare la salinità.

La temperatura viene misurata con un ponte di Wheatstone che utilizza una coppia di termistori uguali come sensori di temperatura. La salinità è ottenuta dalle misure di conducibilità e di temperatura: le due misure sono combinate in un microcircuito per avere la salinità in uscita.

Lo strumento permette di ottenere per la temperatura un range di $0-40^{\circ}\text{C}$ con una precisione di $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, per la salinità un range di $0-40\%$ con una precisione di $\pm 0.3\%$ e per la conducibilità un range di $0-60$ millimhos/cm con una precisione di 0.5 millimhos/cm. Le precisioni ottenibili previa calibrazione in laboratorio risultano sensibilmente migliori:

temperatura	$\pm 0.05^{\circ}\text{C}$
salinità	$\pm 0.05\%$
conducibilità	± 0.05 millimhos/cm

Lo strumento è munito di certificazione S.I.T.

I dati di carico della centrale, di portata del fiume Po e di livello di marea relativi a ciascuna campagna sono stati ricavati ripetutamente dalle registrazioni della potenza erogata dai

quattro gruppi dell'impianto, dai dati dell'idrometro di Pontelagoscuro (Ferrara) gestito dal Magistrato Del Po e dalle registrazioni dell'idrometro ENEL ubicato presso il faro di Busa Dritta.

3. CONSIDERAZIONI GENERALI SUI RISULTATI DELLE 8 CAMPAGNE

3.1 COMPORTEMENTO TERMICO DELLE DIVERSE STAZIONI

I dati in base ai quali sono state effettuate le considerazioni che seguono sono principalmente quelli provenienti dalle registrazioni dei termografi. Le misure istantanee, effettuate con i termosalinometri Beckman, integrano i dati registrati fornendo ulteriori informazioni sugli strati più profondi dove non sempre sono disponibili misure in continuo.

Nella trattazione seguente vengono esaminate le caratteristiche termiche delle 11 stazioni posizionate all'interno dell'area indagata.

3.2.1 Stazione 1 - Po di Pila e canale di presa

E' la stazione a monte dello scarico che, in condizioni di portate medie e alte, presenta le caratteristiche termiche del fiume indisturbato (temperature omogenee nell'intera sezione, dipendenti unicamente dal ciclo stagionale).

In condizioni di portata del Po a Pontelagoscuro inferiore a 900-1000 m³/s, in corrispondenza dei massimi di marea di sizigia, il cuneo salino raggiunge e supera la sezione fluviale corrispondente allo scarico. In superficie acqua calda e salmastra proveniente dallo scarico della centrale interessa sia le sezioni fluviali a monte scarico, sia il canale di presa, dando luogo al fenomeno del ricircolo. Tale fenomeno ha una durata limitata nel tempo valutabile intorno a 4-5 ore per ogni ciclo mareale di ca. 25 ore e presenta incrementi termici di 2-4°C rispetto alla temperatura naturale del fiume (vedi fig.3).

3.2.2 Stazione 2 - Canale di scarico a fiume

L'incremento termico rispetto alla temperatura naturale del fiume in assenza di ricircolo è funzione unicamente della potenza elettrica dell'impianto e della portata delle pompe di circolazione; esso non dipende nè dalle condizioni mareali, nè dalla portata del fiume Po e risulta pari a quella che può essere calcolato mediante la seguente formula approssimata:

$$\text{deltaT} = \frac{1.3 * P_e}{\rho * C_p * Q_{pompe}}$$

dove ρ e C_p indicano densità e calore specifico dell'acqua, Q_{pompe} la portata pompe e P_e il carico elettrico della centrale.

L'andamento temporale della temperatura nel canale di scarico a fiume può quindi esprimersi come somma della temperatura naturale del fiume e dell'incremento ΔT .

Nel caso di ricircolo delle acque scaricate, anche nella stazione 2 si registra un aumento della temperatura. Tale aumento dipende dall'entità del ricircolo, ossia dalla quantità di acqua scaricata che viene risucchiata dal canale di presa.

3.2.3 Stazioni 3 e 4 - Busa Tramontana

La Busa Tramontana non è direttamente interessata dalla perturbazione termica in quanto si trova a monte rispetto allo sbocco del canale di scarico.

In condizioni di basse portate del Po e in fase di marea calante si registrano, in entrambe le stazioni, improvvisi aumenti di temperatura. Essi sono dovuti al transito di masse di acqua calda che in fase di marea massima e crescente erano state accumulate nel tronco del Po di Pila e che nella successiva fase di marea calante scendono verso il mare ripartendosi nei diversi tronchi fluviali. Tale fenomeno avviene nelle stesse condizioni idrologiche e mareali in cui si verifica il fenomeno del ricircolo descritto nel paragrafo precedente (vedi fig. 4).

3.2.4 Stazioni 5, 6 e 7 - Busa dritta

Delle tre buse in cui si ripartisce il tratto del Po di Pila, la Busa Dritta è quella maggiormente interessata dalla perturbazione termica. Le tre stazioni che la caratterizzano presentano comportamenti termici sensibilmente diversi.

La stazione 5, posta a ca. 100 m dallo sbocco del canale di scarico, si trova al centro della zona in cui ha luogo il mescolamento tra le acque calde provenienti dall'impianto e le acque fredde fluviali (mixing zone). In tale zona sono presenti elevati gradienti termici orizzontali e verticali e le registrazioni termometriche presentano ampie oscillazioni casuali (vedi fig. 5).

Nella stazione 7 il fenomeno del mescolamento, che caratterizza la stazione 5, è sensibilmente ridotto (vedi fig. 6). I picchi di temperatura riscontrabili nella registrazione termica non sono casuali, bensì associati alle fasi del ciclo di marea (essi corrispondono ai momenti di fine marea crescente e di marea massima). L'acqua calda scaricata, diluita dall'acqua del fiume, ha già invaso in superficie l'intera sezione fluviale; il profilo termico verticale presenta una netta stratificazione dovuta alla presenza di uno strato superficiale di acqua dolce riscaldata e uno strato profondo di acqua più fredda e densa di origine marina.

La stazione 6 presenta un comportamento termico intermedio tra quelli delle stazioni 5 e 7.

3.2.5 Stazioni 8 e 9 - Busa di Scirocco

La Busa di Scirocco, che costituisce uno dei rami in cui si suddivide il Po di Pila a valle della centrale, è stata studiata separatamente dal ramo principale (Busa Dritta) per meglio evidenziare i comportamenti indotti dai fattori influenzanti naturali. Essa presenta un comportamento termico simile a quello di Busa Dritta. La stazione 8, più vicina allo scarico della centrale è interessata da fenomeni di rimescolamento tra acque fredde fluviali e acque scaricate dalla centrale che determinano rapide oscillazioni della temperatura. Tali oscillazioni risultano però più contenute rispetto a quella della stazione 5 ad indicare che i fenomeni di mescolamento sono meno intensi a causa della minor portata della busa e della conseguente minor quantità di acqua di diluizione disponibile.

La stazione 9 presenta variazioni termiche più lente associabili al ciclo mareale e una netta stratificazione verticale dovuta alla presenza di acqua marina fredda sul fondo.

3.2.6 Stazione 10 - Sacca del Canarin

La Sacca del Canarin non è direttamente interessata dalla perturbazione termica. Essa però è soggetta a un intenso ricambio di acque con il mare attraverso l'unica bocca. Dato che il mare può essere termicamente perturbato e comunque presenta temperature naturali generalmente diverse da quelle della sacca (maggiori in inverno e minori d'estate), è stata posizionata una stazione di registrazione termica (staz. N.10) in vicinanza dell'idrometro ENEL su un fondale di circa 1 m di profondità. In condizioni di bassa marea lo strato d'acqua presenta uno spessore di poche decine di centimetri e i tre punti di misura, posti a tre diverse profondità lungo la verticale, vengono a coincidere. La stazione è soggetta ad oscillazioni termiche strettamente associate al ciclo mareale con picchi in corrispondenza delle fasi di marea crescente e massima (vedi fig. 7).

3.2.7 Stazione 11 - Canale di scarico a mare

Anche questa stazione non è direttamente interessata dalla perturbazione termica nell'assetto di funzionamento con scarico a fiume. Le oscillazioni termiche registrate sono correlate al ciclo di marea. Esse sono dovute al transito di acque relativamente calde, provenienti dal mare e/o dalla Busa di Scirocco, che in fase di marea crescente e massima risalgono il canale di scarico.

Malgrado il basso fondale (ca. 2 m di profondità), sono spesso presenti due strati di acqua aventi caratteristiche diverse: uno strato dolce superficiale a temperatura più alta che galleggia su uno strato freddo e salato. Il gradiente termico verticale e il gradiente di salinità presentano in taluni casi valori molto elevati che si mantengono a lungo anche a causa della scarsa idrodinamicità del canale (vedi fig. 8).

3.3 CAMPAGNA DI MISURE DEL 17-18/7/89

La quarta campagna di misure, effettuata nel periodo 17-18 luglio 1989, in condizioni di sizigia, ha dovuto essere interrotta per una imprevista fermata della centrale, mentre erano ancora in corso i rilievi di temperatura e salinità. Le registrazioni termiche risultano quindi incomplete. Nelle due estati successive non si sono più ripresentate condizioni di marea, di portata del fiume e di carico della centrale adatte alla ripetizione della campagna.

3.4 COMPORTAMENTO DEL CAMPO ALINO

Nel corso di ciascuna campagna in tutte le stazioni sono state effettuate misure di salinità. I dati così raccolti forniscono una serie di immagini del campo alino nelle condizioni idrologiche e meteomarine più diverse. Tali immagini possono essere interpretate sulla base delle conoscenze già acquisite sul comportamento del cuneo salino.

Fin dai primi anni del 1970, l'ENEL CRIS di Mestre effettuò rilievi sistematici sulla propagazione del cuneo salino all'interno del Delta del Po, in relazione alla portata del fiume. Nel 1976 fu costruita una curva sperimentale (vedi fig. 9) che correla la distanza di massima penetrazione del cuneo salino, alla portata del Po misurata a Pontelagoscuro. La curva è stata recentemente confermata dai dati sperimentali ottenuti nel corso di alcune campagne effettuate per conto del Magistrato per il Po (1990).

Da tale curva si deduce che per portate a Pontelagoscuro inferiori a 1500 m³s⁻¹ il cuneo salino si propaga all'interno del delta; la penetrazione dalla foce, nel caso di portate di ca. 400 mc/s, raggiunge i 16 km.

Per valori della portata a Pontelagoscuro superiori a un valore di soglia stimato intorno ai 1500 m³s⁻¹, la salinità è praticamente assente nei tronchi fluviali della zona indagata. Le 8 campagne di rilievi di cui si tratta nel presente rapporto sono relative a portate del Po misurate a Pontelagoscuro comprese tra 600 e 1100 m³s⁻¹. In tali condizioni, secondo la curva di fig. 10, la testa del cuneo salino, nel momento di massima marea, verrebbe a trovarsi compresa tra metà Busa Dritta e la stazione Case Ocaro.

Dai dati di salinità rilevata nel corso delle diverse campagne si osservano negli strati profondi delle stazioni più vicine alle foci delle diverse buse, in tutte le fasi di marea, valori elevati di salinità. I profili verticali istantanei di salinità delle stazioni più interne del delta dipendono invece da numerosi fattori quali il livello del medio mare, le condizioni e la fase di marea, le caratteristiche batimetriche dei tronchi fluviali, etc.

A titolo esemplificativo, in fig. 10 sono riportati i profili verticali di salinità rilevati nelle stazioni 7 e 1 durante la campagna del 25/26-9-91. Nella stazione 7 ubicata alla foce di Busa Dritta, si possono osservare uno strato superficiale compreso tra 0 e 1 m in cui i valori di salinità risultano contenuti in qualche permille, uno strato profondo (oltre i 3.5 m) in cui la salinità rimane sempre a livello di quella marina e uno strato intermedio, spesso circa 2 m, in cui si verificano ampie variazioni nell'arco di un ciclo mareale. Nella stazione 1, ubicata a circa 3 km dalla foce, è assente lo strato di fondo e, al di sotto di 1.5 m dalla superficie la salinità presenti su tutto il profilo ampie variazioni legate al ciclo mareale.

Oltre che nelle stazioni di registrazione termica, la salinità è stata rilevata anche in una stazione posta alcuni chilometri a monte dello sbocco del canale di scarico della centrale: la stazione Case Ocaro. In fig. 11 sono riportati i profili verticali di salinità rilevati in tale stazione in occasione di diverse campagne, in diversi momenti del ciclo mareale. Contrariamente a quanto si è detto più sopra, in questa stazione interna sono presenti valori di salinità elevata nello strato più fondo in tutte le condizioni di marea. Ciò è dovuto al particolare andamento batimetrico del Po di Pila e alla presenza di una soglia di fondo che provoca il fenomeno del "tidal trapping". Come noto il fenomeno consiste nell'accumulo di acqua salmastra nelle zone morte del fiume, siano esse rami secondari o avvallamenti del fondo.

4. MODELLO STATISTICO DELLA PERTURBAZIONE TERMICA

4.1 APPROCCIO METODOLOGICO

Il programma di indagini varato dalla Commissione prevede di costruire un "modello statistico della perturbazione termica" intendendo come tale un insieme di relazioni quantitative che legano alcuni descrittori significativi della perturbazione termica ai principali fattori ambientali (portata del fiume Po, temperatura del fiume indisturbato, marea). Anche il carico della centrale può essere considerato un fattore influenzante nel momento che esso risulta variato tra una campagna e l'altra.

Il primo problema da affrontare è quello di individuare i descrittori della perturbazione. A tale proposito occorre tener presente che l'ambiente idrico in esame, costituito da tronchi fluviali, canali, sacche e mare, presenta caratteristiche morfologiche ed idrodinamiche molto diversificate, che interagiscono con i fattori idrologici in modo estremamente complesso.

Non sono quindi individuabili in modo semplice descrittori della perturbazione termica ambientalmente significativi, nè sono impiegabili quelli normalmente utilizzabili in ambienti più omogenei, quali ad esempio aree o volumi d'acqua interessati da

determinati sovralti termici, etc. Inoltre le temperature nelle diverse zone del recettore sono così rapidamente variabili nel breve-spazio e nel breve-tempo che non si può sperare in una loro razionalizzazione senza effettuare preventivamente alcune operazioni di mediazione aritmetica.

Si è ritenuto pertanto necessario mediare i sovralti termici, calcolati rispetto alla temperatura del fiume indisturbato, dapprima sul profilo verticale di ciascuna stazione (limitatamente allo strato superficiale di 2 m presente in quasi tutte le stazioni) quindi sul ciclo di marea. L'incremento termico così ottenuto può essere assunto a rappresentare la perturbazione termica tipica di una stazione (PTS) per le circostanze ambientali della singola campagna. Sono state quindi ricercate le correlazioni lineari tra PTS e i fattori influenzanti sopra citati, utilizzando il metodo della "stepwise multiple regression".

Per individuare un descrittore significativo della perturbazione termica globale (PTG) di ciascuna campagna, i diversi PTS delle stazioni poste a valle dello scarico (stazioni 5, 7, 8, 9, 10, e 11) sono stati combinati attraverso il metodo delle "componenti principali". In pratica la PTG è rappresentata come un vettore nell'iperspazio a 6D delle PTS; quindi viene realizzata una trasformazione e una rotazione degli assi in modo tale da ottenere le seguenti proprietà:

- l'origine degli assi viene collocata nel centroide dell'insieme dei punti dell'iperspazio che rappresentano le PTG delle diverse campagne;
- il primo asse viene orientato nella direzione di massima varianza dell'insieme dei punti PTG;
- il secondo asse è ortogonale al primo e orientato nella seconda direzione di massima varianza;
- il terzo asse è ortogonale ai primi due e orientato nella terza dimensione di massima varianza;
- così via fino al sesto asse.

Gli assi derivati, cioè le componenti principali, sono rappresentati nell'iperspazio originale come combinazione lineare degli assi originali (PTS) aventi le proprietà sopra elencate.

Se le PTS risultano tra loro correlate le prime componenti principali descrivono da sole tutta la variabilità delle PTG: in questo caso è possibile descrivere in termini essenziali le PTG con pochissimi valori scalari (cioè con i valori delle prime due o tre componenti principali) e studiare la loro dipendenza dai fattori influenzanti.

4.2. RELAZIONE TRA I FATTORI INFLUENZANTI E LA PERTURBAZIONE TERMICA DELLE SINGOLE STAZIONI.

Nella tabella III sono riportate le perturbazioni termiche delle diverse stazioni (PTS), calcolate secondo le modalità sopra definite e relative alle campagne di misure portate a compimento.

Nella stessa tabella sono riportati i principali parametri statistici descrittivi.

La perturbazione termica varia tra il massimo della stazione 2 (canale di scarico) al minimo della stazione 3 (Busa di Tramontana). La varianza e la corrispondente deviazione standard assumono valori massimi nelle stazioni 8 e 9 della Busa di Scirocco che presentano anche il massimo range.

Allo scopo di individuare le relazioni funzionali che legano le PTS ai principali fattori influenzanti è stata costruita la matrice di correlazione (riportata in tab. IV) tra la perturbazione termica delle stazioni e i fattori carico elettrico (Pe), portata del Po a Pontelagoscuro (QPo) e temperatura indisturbata del fiume (Tfiu). La PTS della stazione 4 ubicata alla foce di Busa Tramontana non è stata inserita data la scarsità dei dati a disposizione.

Dalla tab. IV si deduce che gli incrementi nelle stazioni 5,7,8 e 9 risultano correlati positivamente al carico elettrico della centrale con coefficienti di correlazione compresi tra 0.45 e 0.80, cui corrispondono livelli di significatività compresi tra 0.150 e 0.020. Nelle stazioni 8 e 9 gli incrementi risultano correlati negativamente alla temperatura imperturbata del fiume (Tfiu) a livelli di significatività dello 0.001 e alla portata del fiume Po a livelli molto più bassi (significatività dello 0.200).

Anche le stazioni 10 e 11 appaiono correlate significativamente alla temperatura del fiume Tfiu (significatività dello 0.025) e, a livelli di significatività più bassi (0.100), a portata del Po e al carico della centrale.

Le stazioni 1,2 e 3 presentano coefficienti di correlazione scarsamente significativi e in molti casi di segno contrario alle attese (ad esempio le PTS delle stazioni 1 e 3 presentano coefficienti di correlazione negativi con il carico della centrale, cioè aumentano al diminuire del carico). Occorre ricordare che una correlazione significativa tra variabili o l'associazione di due variabili in un modello di correlazione multipla, stanno a significare solo che le variabili stesse sono linearmente associate e non è implicata l'esistenza di una relazione causale. Quest'ultima può essere asserita solo sulla base di una più generale conoscenza dei fenomeni fisici che intervengono ed eventualmente confermata dalla dipendenza lineare delle variabili.

La matrice di correlazione è la base di partenza del metodo della "stepwise multiple regression".

Il metodo opera come segue:

- per ciascun set di variabili indipendenti viene selezionata quella che presenta il maggior coefficiente di correlazione con la variabile dipendente in studio;
- vengono determinati con il metodo dei minimi quadrati i coefficienti di correlazione lineare tra le due e vengono calcolati i residui, cioè le differenze tra la i valori della

variabile dipendente e i corrispondenti valori teorici calcolati dalla retta di regressione;

-i residui vengono utilizzati per calcolare i nuovi coefficienti di correlazione con le restanti variabili indipendenti e selezionare quella che risulta significativamente correlata.

I risultati dell'applicazione del metodo sono riportati nel seguente prospetto.

Stazione	Variabili nel modello	Coeff. angolare della retta di regressione	% varianza spiegata
5	Carico	0.0022 [°C/MWe]	31
6	Dati non sufficienti		
7	Carico	0.0007 [°C/MWe]	20
8	Tfiume	-0.1337	86
9	Tfiume	-0.1400	90
10	Tfiume	-0.0584	51
11	Tfiume	-0.1009	71

Nel prospetto sono riportati, a fronte delle PTS considerate, le variabili selezionate nel modello, i coefficienti angolari delle rette di regressione calcolate e la percentuale di varianza spiegata. Si nota che la variabile portata P_o non interviene mai nel modello: questo non comporta che la perturbazione termica non dipenda in assoluto dalla portata, ma semplicemente che la dipendenza della perturbazione dalla portata del fiume non è emersa statisticamente in modo significativo. Ciò è dovuto alla ristrettezza del range di valori di portata indagati (da 560 a 1100 m³s⁻¹, escludendo la campagna del luglio 89), tutti al di sotto della portata media.

Non è da escludere che, estendendo l'indagine a portate medio-alte o alte, si manifesti una dipendenza statisticamente significativa tra incrementi medi e portata fluviale.

Si nota poi che gli incrementi delle stazioni 5 e 7 sono gli unici a presentare una dipendenza dalla variabile potenza elettrica della centrale e per di più con una percentuale di varianza spiegata dalla regressione relativamente bassa (31 e 20% rispettivamente). Il carico della centrale, che può considerarsi proporzionale alla quantità di calore scaricata nel fiume, non sembra dunque influenzare in modo significativo la perturbazione

termica nell'area indagata ad eccezione delle due stazioni poste nella Busa Dritta. In effetti il calore scaricato costituisce solo uno dei termini che caratterizzano la perturbazione termica, essendo gli altri le modalità con cui tale calore è immesso nell'ambiente (portata e incremento termico dello scarico) e la capacità del corpo idrico recettore di disperdere tale calore. Dal prospetto appare chiaro che la temperatura del fiume indisturbato a monte dello scarico costituisce il principale fattore influenzante della perturbazione termica in tutte le rimanenti stazioni (8, 9, 10 e 11). In questo caso però la temperatura del fiume è solo un indicatore e il vero fattore influenzante è da ricercarsi nella stagione e, più precisamente, nella naturale differenza di temperatura esistente tra l'acqua del mare e quella del fiume.

Il coefficiente di regressione calcolato dal modello risulta negativo e indica che gli incrementi termici risultano tanto maggiori quanto minore è la temperatura del fiume. Ciò concorda con le attese, infatti in inverno, quando la temperatura del fiume è bassa, gli incrementi termici risultano massimi in quanto risentono di apporti di acqua marina relativamente più calda. In estate la situazione è invertita.

Le stazioni che risentono maggiormente del fenomeno sono quelle situate lungo la Busa di Scirocco che, per basse portate e in marea crescente o massima, viene invasa da acqua marina. La stazione invece che risente meno di tale fenomeno è quella ubicata nella sacca del Canarin dove le acque presentano un comportamento termico stagionale più simile a quello del fiume che non a quello del mare. E' noto che le sacche del delta presentano una maggiore escursione termica annuale rispetto al mare per effetto dei bassi fondali e dello scarso ricambio.

4.5 RELAZIONI TRA I FATTORI INFLUENZANTI E LA PERTURBAZIONE TERMICA GLOBALE

L'analisi delle componenti principali è stata applicata alle variabili PTS relative alle stazioni di misura più direttamente interessate dalla perturbazione termica, che si trovano a valle rispetto allo scarico termico della centrale (stazioni 5,7,8,9,10 e 11).

L'applicazione del metodo allo spazio dei punti osservazione (PTG) fornisce come primo risultato la distribuzione delle varianze sulle diverse componenti. Nel prospetto allegato sono riportate, per le 6 componenti, le percentuali di varianza e di varianza cumulata associate.

Componente	Varianza [%]	Varianza cumulata [%]
1	57.6	57.6
2	29.0	86.6
3	9.0	95.6
4	4.0	99.6

5	0.3	99.9
6	0.1	100.0

Si può notare come le prime due componenti principali riflettano oltre l' 85% della varianza totale. L'alta percentuale di varianza associata alle prime due componenti indica che le variabili originali sono tra loro correlate e che bastano poche componenti per descrivere in modo completo la maggior parte della variabilità dei punti osservazione.

L'analisi dei "factor loadings" consente di individuare a quali variabili risultano correlate le diverse componenti principali. I "factor loadings" relativi alle prime due componenti sono i seguenti:

	st.5	st.7	st.8	st.9	st.10	st.11
I comp	-0.01	0.18	0.51	0.53	0.39	0.51
II comp	0.66	0.65	0.02	-0.01	-0.35	0.04

In fig.12 è riportata la proiezione nel piano delle prime due componenti sia dei punti osservazione che rappresentano la perturbazione termica globale (PTG) relativi alle 7 campagne di misura effettuate, sia gli assi delle 6 variabili originali (PTS).

Gli assi delle variabili originali che vengono a trovarsi vicini indicano i gruppi di stazioni le cui perturbazioni presentano un comportamento analogo: le stazioni 5 e 7 poste sul Po di Pila, le stazioni 8, 9 e 11, poste in Busa di Scirocco e nel canale di scarico a mare e, indipendente dalle altre, la stazione 10 posta nella Sacca del Canarin.

Dal grafico si può notare quanto già in parte riscontrato con la "stepwise multiple regression" e cioè che la prima componente principale (correlata con le PTS delle stazioni 8, 9 e 11 e, in misura minore, con la 10) rappresenta essenzialmente la variabilità delle PTS delle stazioni raggruppate a sud del Po di Pila e che la seconda componente rappresenta le stazioni poste sul Po di Pila (stazioni 5 e 7).

Con riferimento a questi due gruppi di stazioni, il comportamento della perturbazione termica globale è pertanto sintetizzabile nel modo seguente:

le campagne 3, 6, 7 e 8 sono caratterizzate da perturbazioni termiche relativamente ridotte nel gruppo di stazioni a sud del Po di Pila rispetto all'altro gruppo; la campagna 2 è caratterizzata da perturbazioni elevate sia nel primo che nel secondo gruppo di stazioni; le campagne 1 e 5 da valori bassi della perturbazione nelle stazioni del Po di Pila e da valori elevati in quelle a sud di esso.

Risulta quindi che le stazioni poste a sud del Po di Pila sono relativamente poco perturbate in tutte e solo le campagne svolte in condizioni estive, indipendentemente dai valori assunti dagli altri fattori (marea e carico); le campagne invernali presentano

invece un comportamento differenziato, limitatamente però alle stazioni sul Po di Pila ove si registrano perturbazioni relativamente piccole nelle campagne 1 e 5 e relativamente alta nella campagna 2. Tale diversità di comportamento non sembra associabile nè al carico, nè alle condizioni di marea.

Essa può essere spiegata tenendo presente che nel periodo invernale le differenze di densità tra acque calde scaricate e acque fredde del corpo ricettore risultano praticamente nulle, per cui l'effetto di galleggiamento del pennacchio è assente e minime differenze di salinità possono causarne l'affondamento. In questi casi la PTS, che come noto viene calcolata come media nello strato superficiale di spessore pari a due metri, può non essere rappresentativa del reale incremento termico della stazione specie quando essa presenta profondità di oltre 4 metri come è il caso delle stazioni 5 e 7 del Po di Pila.

L'influenza dei fattori enucleati sul comportamento collettivo dei due gruppi di stazioni può essere messa in evidenza da uno studio della correlazione con le componenti principali.

In fig. 13 si può osservare la stretta dipendenza tra la perturbazione termica delle stazioni a sud del Po di Pila (prima componente) con la temperatura naturale del fiume, indicativa della stagione. Nella stessa figura risulta che la seconda componente, rappresentativa delle stazioni del Po di Pila, risulta strettamente correlata con il carico della centrale in condizioni estive (campagne 3, 6, 7 e 8); non risulta correlata invece nelle condizioni invernali (campagne 1, 2 e 5) quando si verifica il fenomeno di sprofondamento del pennacchio cui si è accennato più sopra.

4.6 EFFETTO DELLE DIVERSE CONDIZIONI DI MAREA

Allo scopo di valutare l'effetto delle diverse condizioni di marea (sizigia e quadratura) sulle caratteristiche della perturbazione termica, sono stati messi a confronto, zona per zona, gli incrementi termici medi rilevati nelle due diverse condizioni. Gli incrementi relativi alla sizigia sono stati aggiustati, utilizzando i coefficienti di regressione calcolati all'articolo 4.2, per tener conto delle diverse condizioni di carico della centrale e della stagione a cui sono riferiti. Essi sono stati riportati alle stesse condizioni medie di carico e allo stesso periodo stagionale cui sono riferiti gli incrementi misurati in condizioni di quadratura.

Nella tabella V sono riportati i valori degli incrementi tal quali, degli incrementi corretti, delle rispettive varianze e, nell'ultima colonna, la significatività del test t di student.

In tutte le stazioni indagate, l'ipotesi H₀ che gli incrementi termici medi rilevati in condizioni di sizigia e di quadratura, corretti per tener conto del diverso carico elettrico dell'impianto e della diversa stagione, risultino uguali non può essere respinta al livello di significatività dello 0.05.

5. CONCLUSIONI

L'elaborazione dell'insieme dei dati raccolti nelle otto campagne sperimentali ha permesso di sintetizzare il comportamento (in funzione dei principali fattori influenzanti) della perturbazione termica complessiva e del campo salino, elementi base per lo studio degli eventuali effetti sulle risorse biologiche. E' stato così raggiunto l'obbiettivo del programma proposto dalla Commissione Permanente di controllo.

Il campo delle salinità presenta le caratteristiche tipiche delle zone estuariali; le misure sullo spessore del cuneo salino nel tronco fluviale di Pila hanno confermato i precedenti studi svolti da ENEL-CRIS nel periodo 1970-1980.

In tutte le stazioni di misura ubicate nei rami fluviali del delta a valle dello scarico termico della centrale sono state osservate, in misura maggiore o minore a seconda della distanza, ampie variazioni di temperatura dovute sia ai fenomeni di turbolenza a breve periodo sia al ciclo mareale. Anche le stazioni poste nella Sacca del Canarin e nel canale di scarico a mare, non direttamente interessate dallo scarico della centrale hanno mostrato variazioni significative legate alle fasi mareali.

Nel suo complesso la perturbazione termica è risultata molto variabile nel tempo e difficilmente rappresentabile con misure di carattere istantaneo.

La scelta di indicatori della perturbazione che possano ritenersi rappresentativi di particolari condizioni di carico della centrale, di portata del fiume Po, di marea, etc. passa attraverso la realizzazione di medie temporali e spaziali. L'incremento termico medio rispetto alla temperatura fluviale indisturbata, calcolato su in intero ciclo di marea e sullo strato superficiale di spessore pari a due metri, è risultato un buon indicatore della perturbazione termica.

Il comportamento termico complessivo nell'area indagata è risultato differenziato tra il gruppo di stazioni più direttamente influenzate dal fiume e quelle influenzate dal mare.

Per le prime l'incremento termico medio rispetto alla temperatura del fiume indisturbato risulta correlato al carico della centrale solo in condizioni estive, mentre, in condizioni invernali, complesse interazioni tra i fattori idrologici mascherano tale dipendenza.

Per le seconde il fattore dominante è risultato quello stagionale che determina incrementi termici legati alla differenza naturale di temperatura tra il fiume e il mare

Non è stata trovata invece alcuna correlazione con la portata del fiume Po, forse a causa del ristretto range di valori indagati.

Anche la diversa condizione di marea, sizigia o quadratura, non sembra influenzare in modo significativo la configurazione della perturbazione termica.

Tabella I

Campagne di misura effettuate

camp.	data	carico MWe	portata m3s-1	marea	Tnat °C
1	07-08/2/89	1862	695	siz.	6.1
2	14-16/2/89	2473	682	quad.	7.1
3	27-29/6/89	1428	780	quad.	24.3
4	17-18/7/89	--	1460	siz.	24.5
5	16-18/1/90	2480	643	quad.	3.9
6	01-02/7/91	2165	1100	quad.	23.9
7	24-25/7/91	1682	560	siz.	27.6
8	25-26/9/91	1952	830	siz.	22.7

Tabella II

Descrizione delle stazioni di misura
e profondità dei sensori

st.	ubicazione	profondità [m]
1	Po della Pila e Canale di presa	-.5,-1,-2
2	Canale di scarico a fiume	-.5,-1,-2
3	Busa di Tramontana - monte	-.5,-1,-2
4	Busa di Tramontana - valle	-.5,-1,-2
5	Busa Dritta - monte	-.5,-1,-2,-3,-4,-6
6	Busa Dritta - intermedio	-.5,-1,-2
7	Busa Dritta - valle	-.5,-1,-2
8	Busa di Scirocco - monte	-.5,-1,-2
9	Busa di Scirocco - valle	-.5,-1,-2
10	Sacca del Canarin	-.5,(-1)
11	Canale di scarico a mare	-.5,-1,(-2)

Tabella III
Incrementi termici medi delle stazioni (1)
[°C]

Campagna	st.1	st.2	st.3	st.5	st.7	st.8	st.9	st.10	st.11
1	0.4	6.9	0.1	2.4	1.0	5.3	3.6	1.4*	2.2
2	0.0	7.0	0.0	4.3	2.9	6.4	4.4	0.7	3.7
3	0.2	6.0	0.0	2.3	1.3	3.8	1.2	-0.1	1.7
4	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5	0.2	6.9	0.0	2.6	1.4	5.8	4.9	2.3	3.6
6	0.2	7.9	0.0	4.1	1.7	3.2	2.1	0.6*	1.0*
7	0.7	8.4	0.6	2.7	2.0	2.9	1.6	0.8	1.3
8	0.4	9.0	0.2	3.8	1.3	2.7	1.3	0.5*	0.5
media	0.3	7.44	0.12	3.17	1.66	4.3	2.73	0.94	2.00
mediana	0.2	7.0	0.0	2.7	1.4	3.8	2.1	0.5	1.7
moda	0.2	6.9	0.0	2.6	1.3	3.2	1.6	0.5	1.3
varianza	0.05	1.07	0.05	0.74	0.40	2.3	2.39	0.86	1.56
minimo	0.0	6.0	0.0	2.3	1.0	2.7	1.2	-0.1	0.5
massimo	0.7	9.0	0.6	4.3	2.9	6.4	4.9	2.3	3.7
range	0.7	3.0	0.6	2.0	1.9	3.7	3.7	2.4	3.2

- (1) Gli incrementi medi riportati in tabella sono:
- relativi a stazioni di misura ubicate nelle zone dove la perturbazione termica risulta più intensa;
 - mediati su un intero ciclo mareale (ca. 24 ore);
 - mediati sulla verticale del punto stazione fino alla profondità di 2m .

* Incremento stimato sulla base di rilevazioni istantanee.

Tabella IV

Matrice di correlazione (r)

staz.	1	2	3	5	7	8	9	10	11
Pe	-.56	.05	-.42	.56	.45	.62	.80	.55	.62
Q Po	-.36	.10	-.49	.46	-.19	-.40	-.39	-.48	-.50
Tnat	.47	.45	.49	.59	-.07	-.93	-.95	-.76	-.85

Nota

Vengono di seguito riportati i valori di r per i quali si può affermare che la correlazione è significativa (cioè r diverso da zero) a diversi livelli di significatività.

Livello di significatività	valore di r
0.100	0.50
0.050	0.67
0.025	0.75
0.005	0.87

Numero di gradi di libertà = 5

TABELLA V

Zona	Incrementi tal quali		Incrementi corretti		Varianza (tutti i dati)	test t a=0.05
	siz.	qua.	siz.	qua.		
5	2.96	3.32	3.62	3.32	0.84	n.s.*
7	1.43	1.82	1.64	1.82	0.43	n.s.
8	3.63	4.80	4.13	4.80	2.26	n.s.
9	2.16	3.15	2.72	3.15	2.53	n.s.
10	0.90	0.87	1.09	0.87	0.94	n.s.
11	1.33	2.50	1.73	2.50	1.40	n.s.

*) differenza statisticamente non significativa

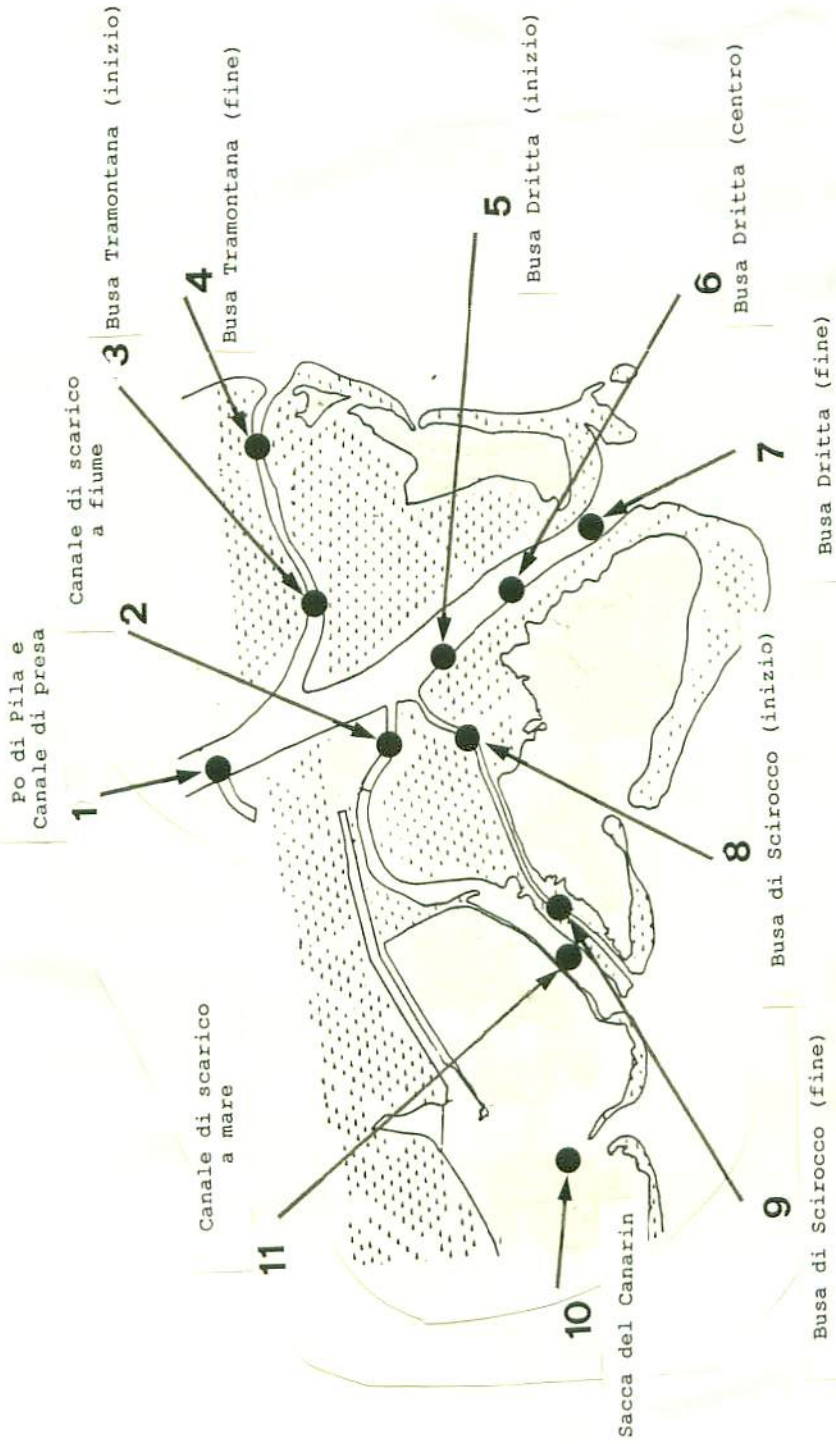


Fig. 1 Ubicazione delle 11 stazioni di misura.

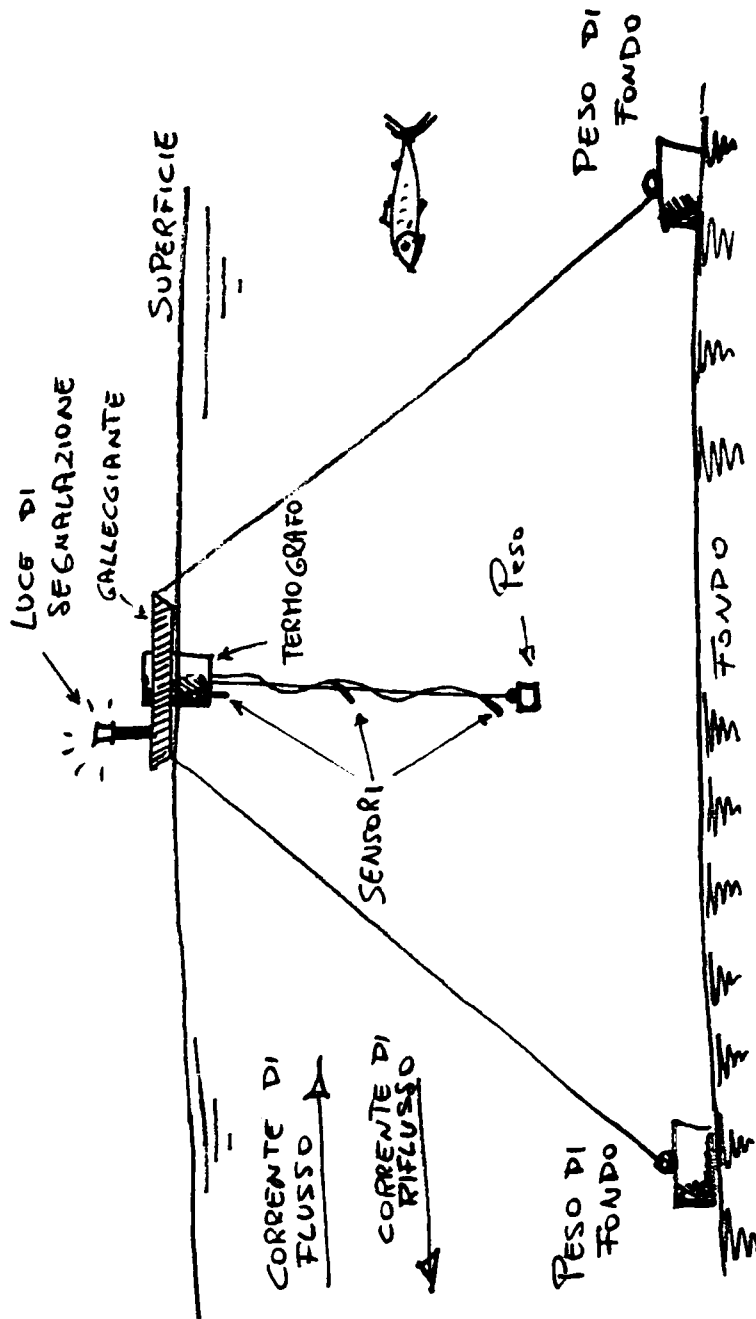


Fig. 2 Schema del sistema di ancoraggio in fiume dei termografi MTX.

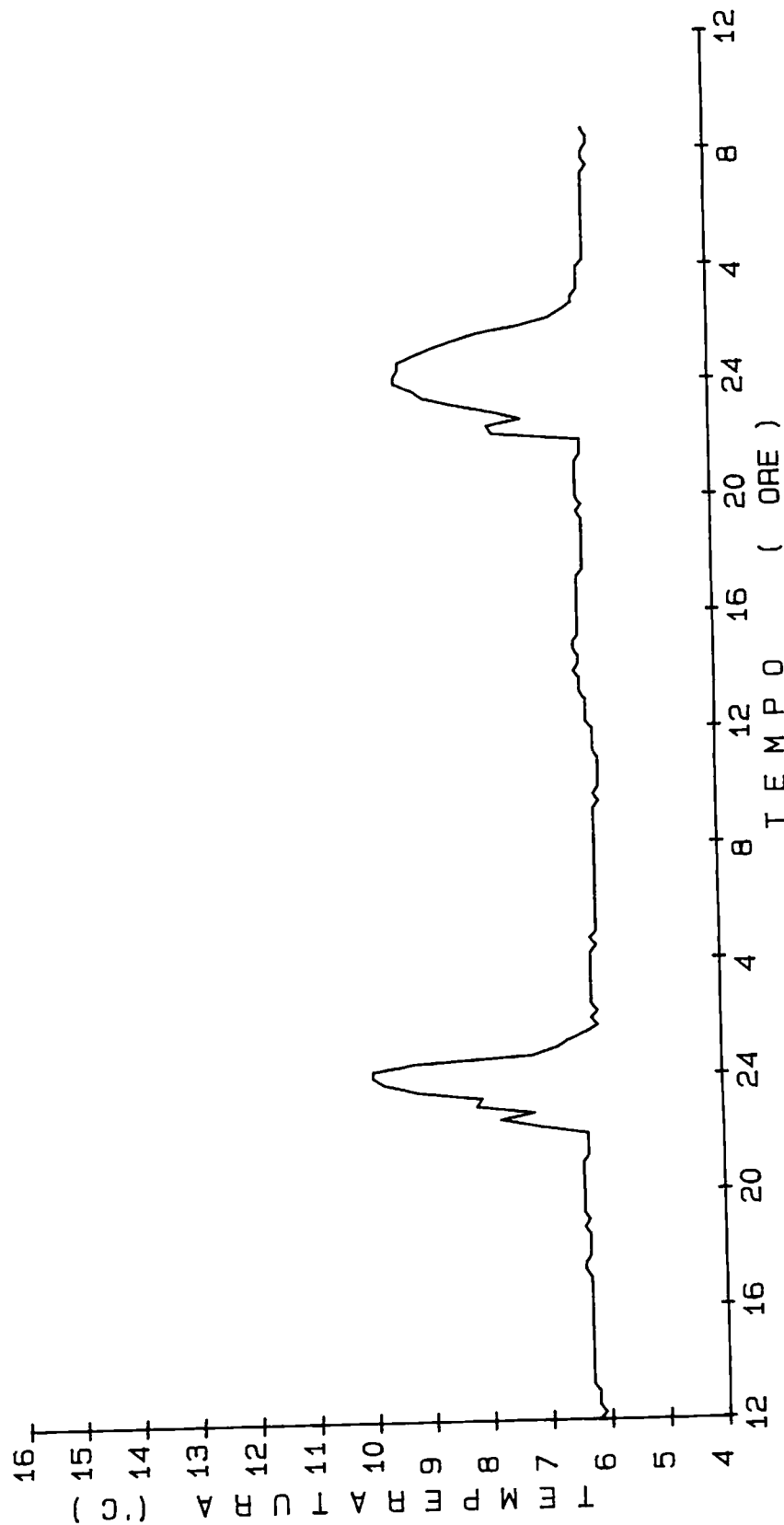


Fig. 3 Andamento temporale della temperatura nella stazione 1 (canale di presa). Campagna del 7/2/89.

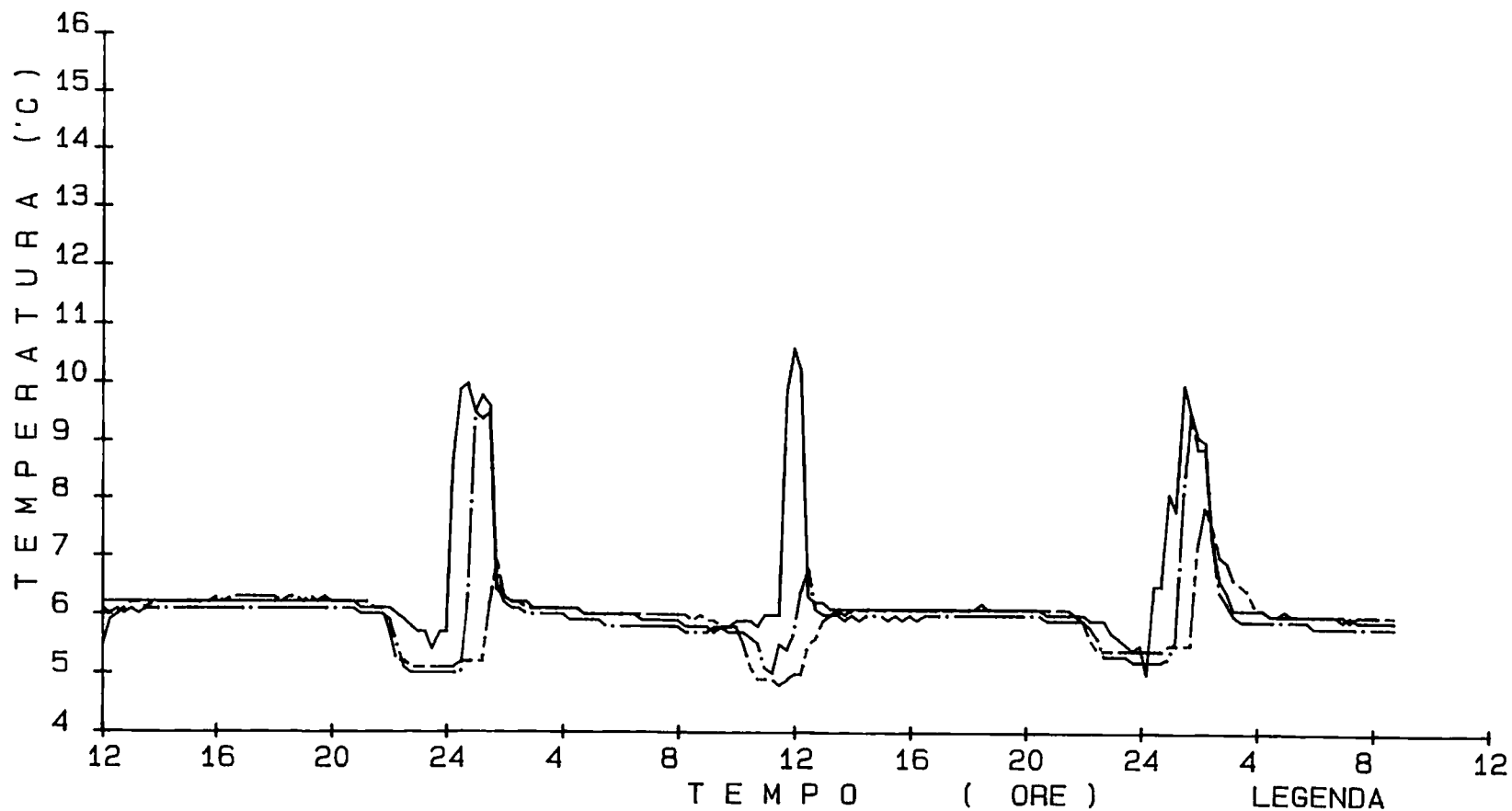


Fig. 4 Andamento temporale della temperatura, a tre diverse profondità, nella stazione 3 (Busa Tramontana). Campagna del 7/2/89.

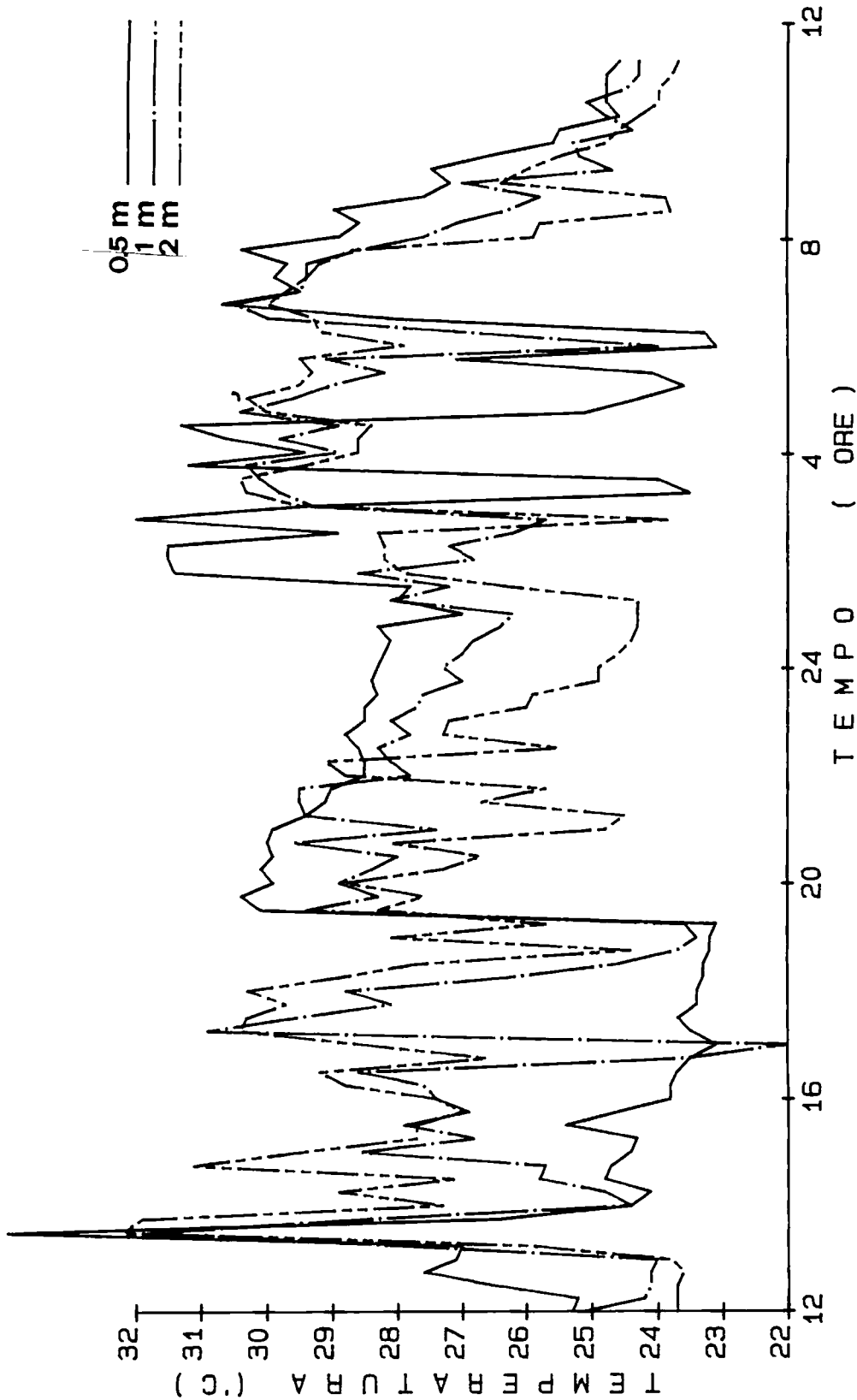


Fig. 5 Andamento temporale della temperatura, a tre diverse profondità, nella stazione 5 (inizio Busa Dritta).
Campagna del 25-26/9/91.

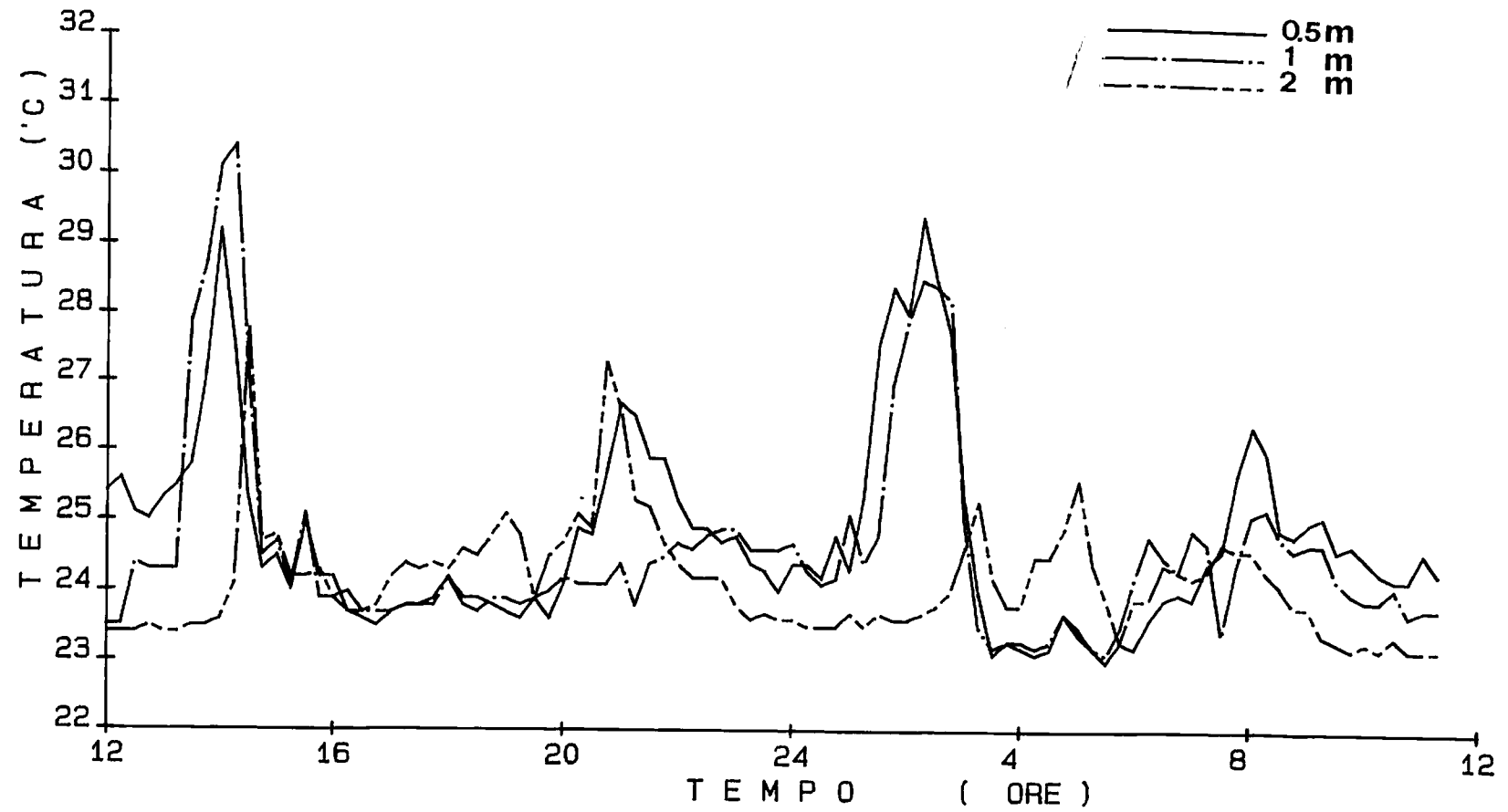


Fig. 6 Andamento temporale della temperatura, a tre diverse profondità, nella stazione 7 (fine Busa Dritta). Campagna del 25-26/9/91.

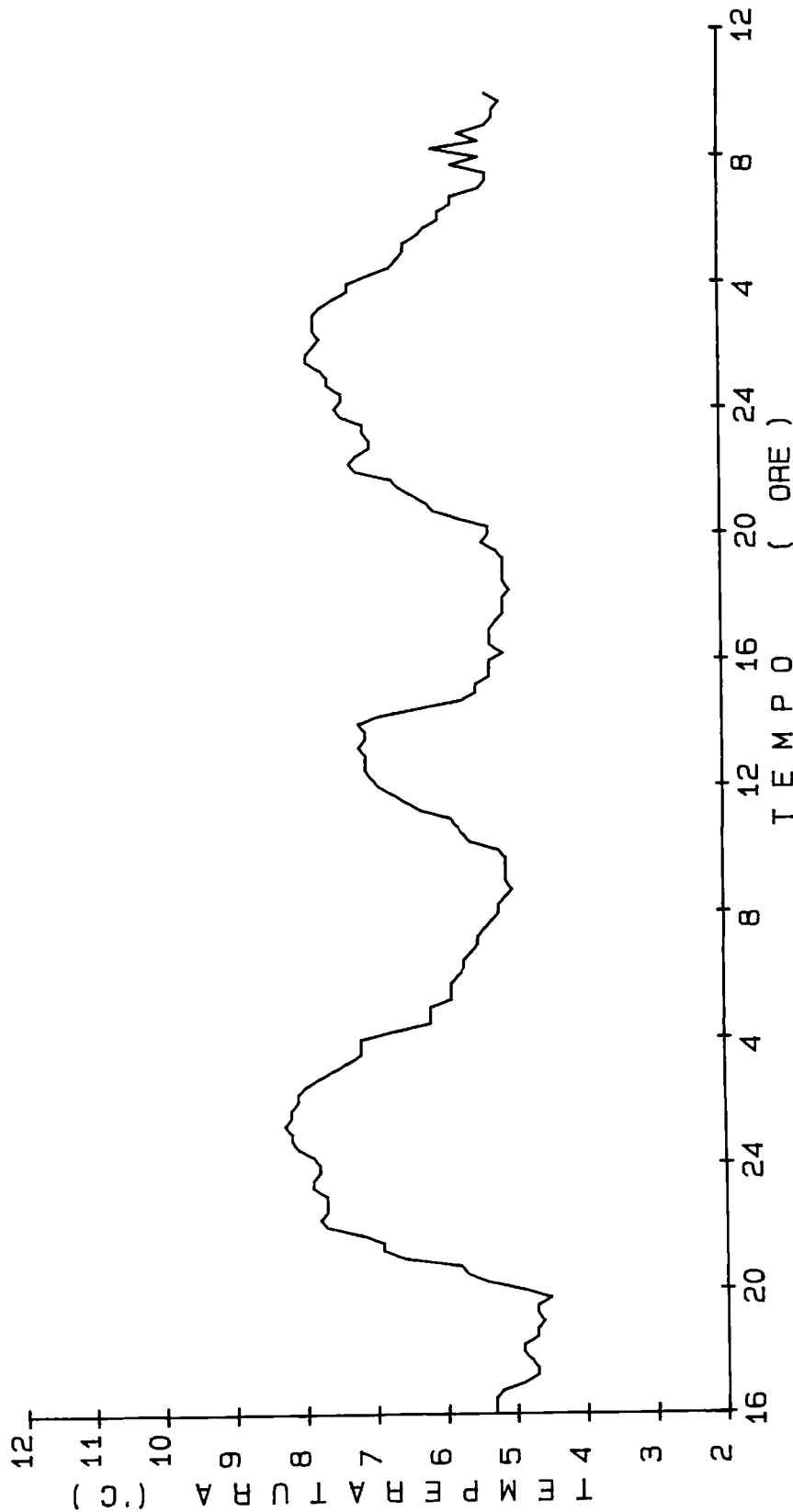


Fig. 7 Andamento temporale della temperatura nella stazione
10 (Sacca del Canarin). Campagna del 16-18/1/90.

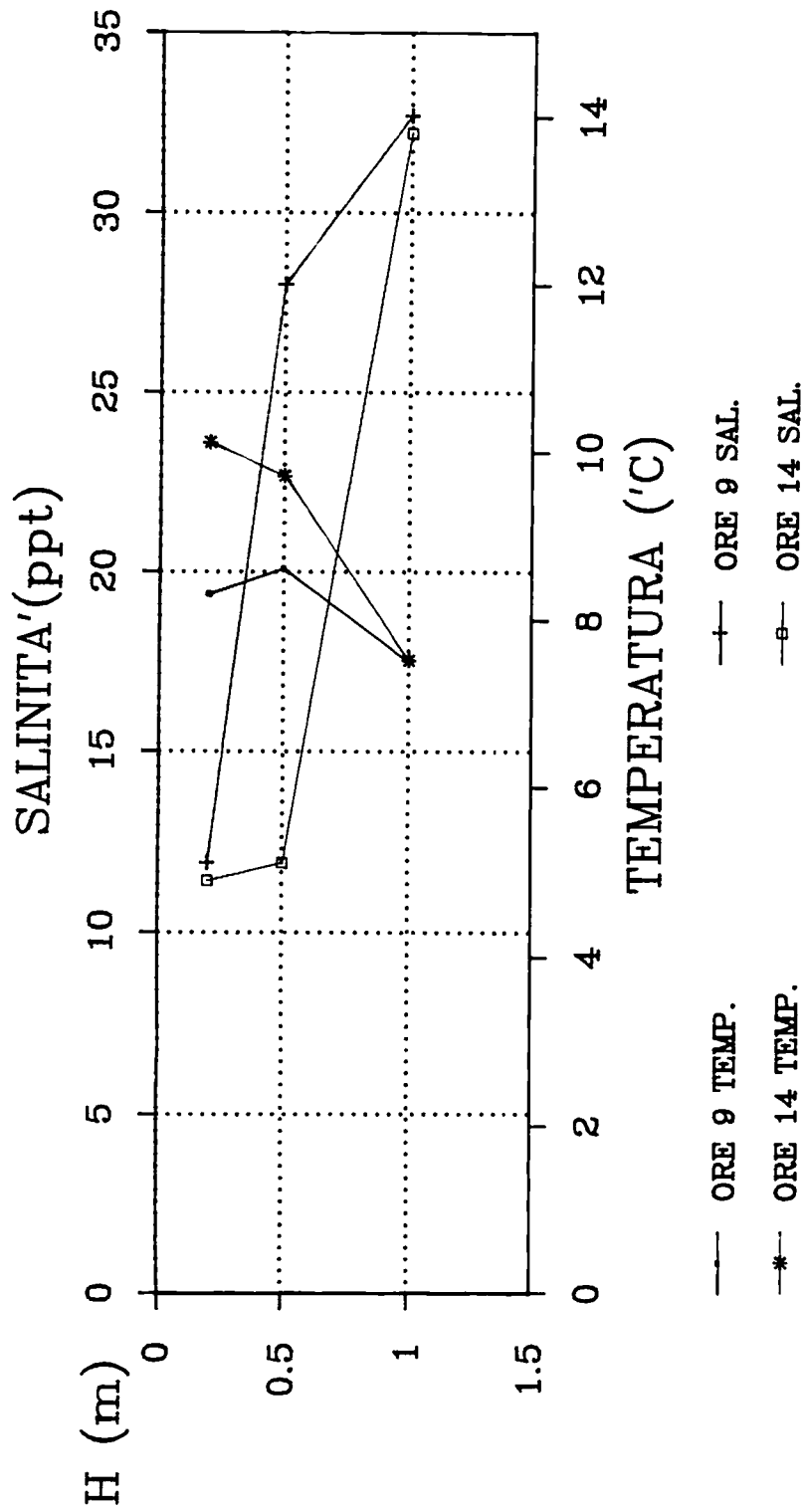


Fig. 8 Profili verticali di temperatura e salinità nella stazione 11 (canale di scarico a mare). Campagna del 7/2/89.

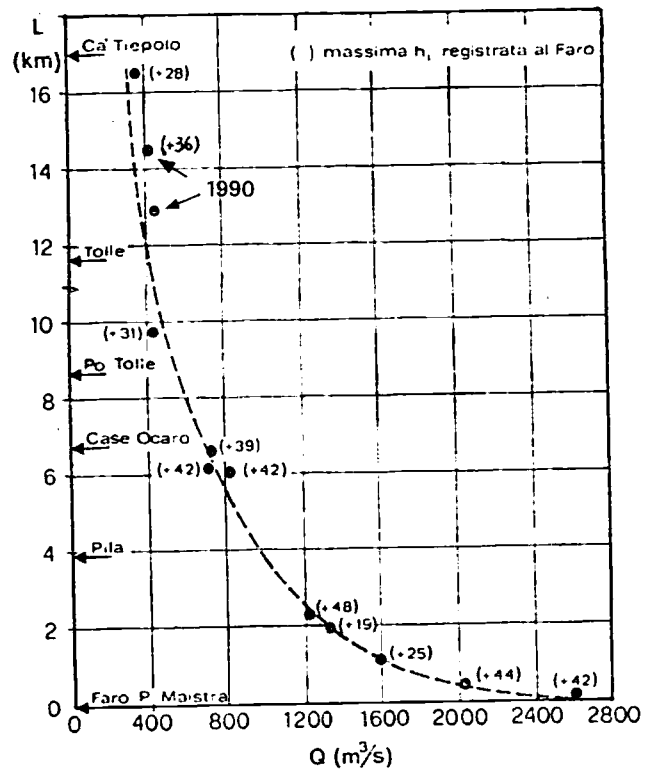


Fig. 9 Distanza di risalita massima del cuneo salino in funzione della portata del Po a Pontelagoscuro (da ENEL CRIS Servizio Idrologico).

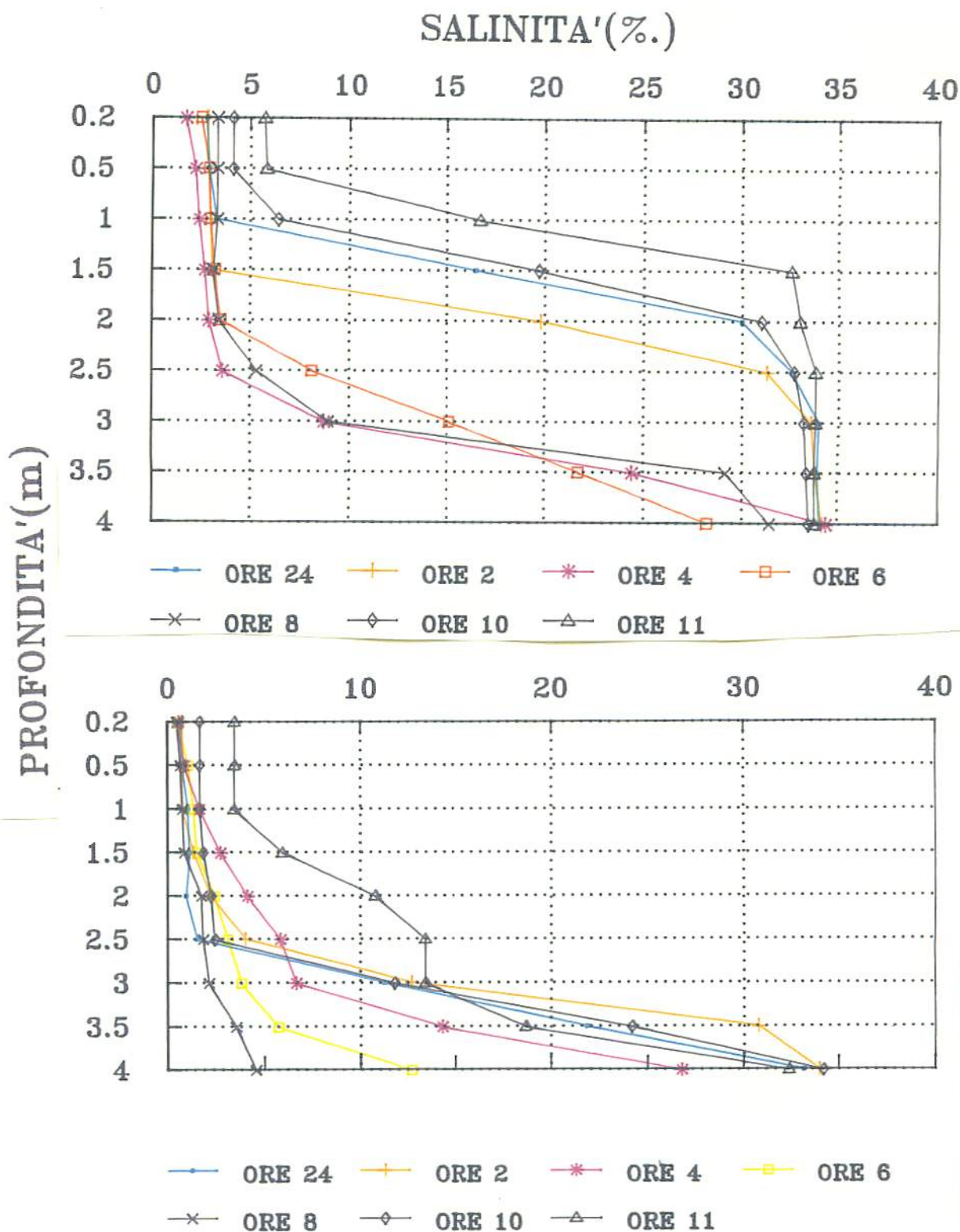


Fig. 10 Profili verticali di salinità nelle stazioni 7 e 1.
Campagna del 25-26/9/91.

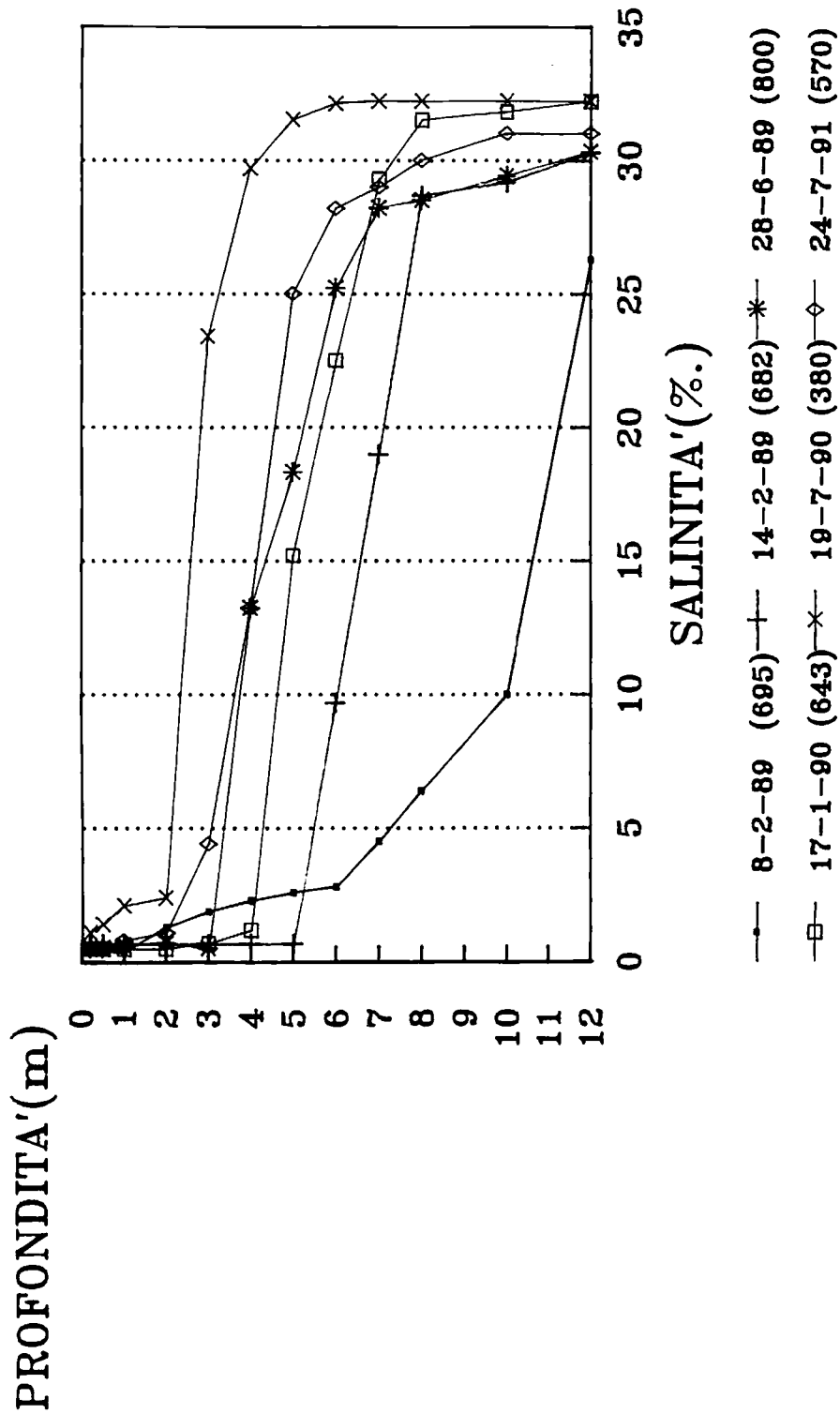


Fig. 11 Profili verticali di salinità nella stazione Case Ocaro (a ca. 7 km dalla foce).

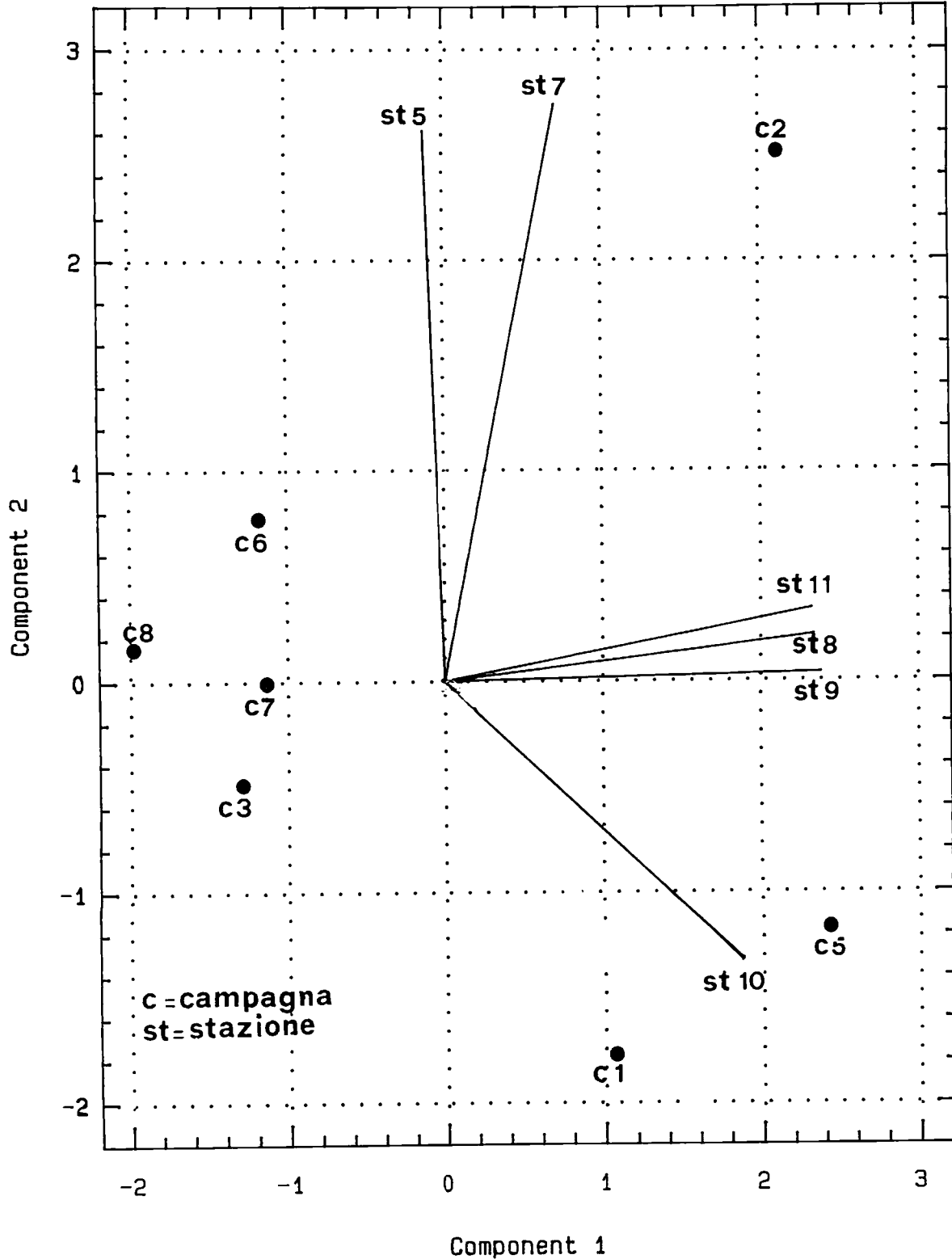


Fig. 12 Proiezione sul piano delle prime due componenti principali dei sei assi (PTS) e dei vettori PTG.

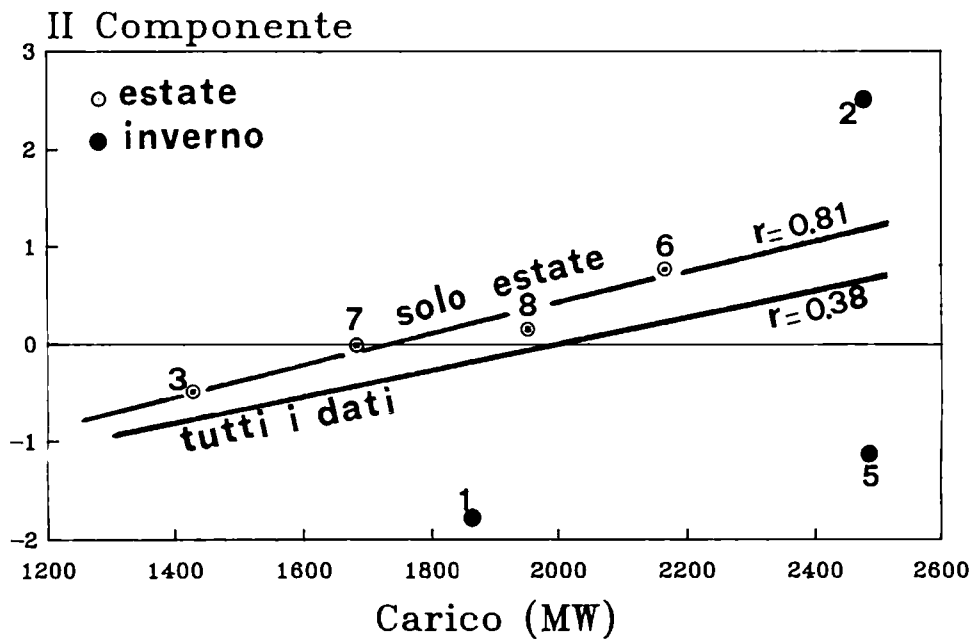
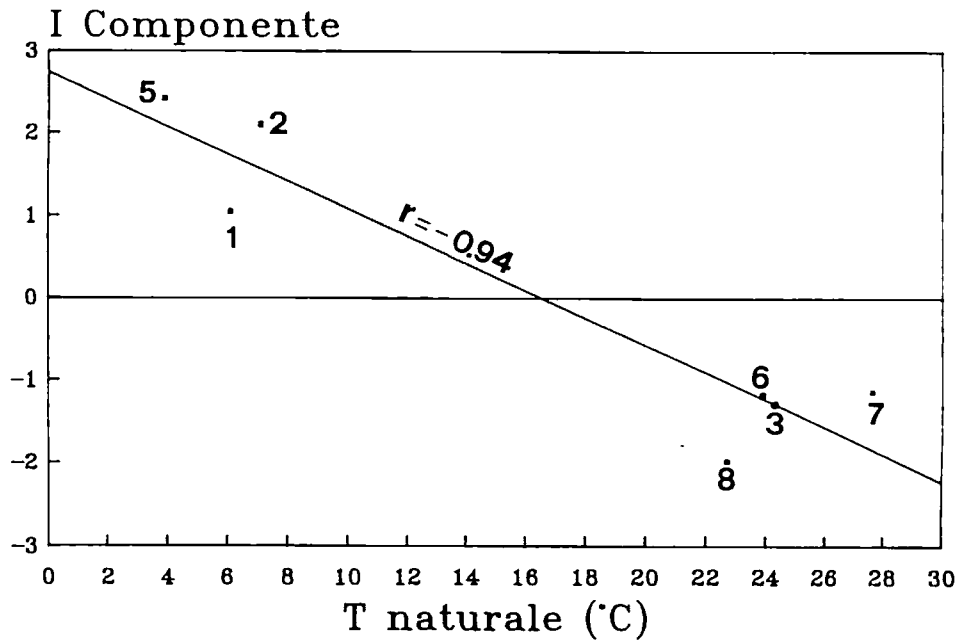


Fig.13 Rette di regressione tra le prime due componenti principali e i corrispondenti fattori influenzanti (temperatura del fiume indisturbato e carico della centrale).