RICERCHE FOTOMETRICHE SUBACQUEE NEL LAGO DI CALDONAZZO

SILVIO POLLI

1. *Scopo delle ricerche.* — Per iniziativa e coi contributi del Centro di Studi Alpini e del Centro di Studi Talassografici sono state eseguite, nei giorni 18-22 agosto 1948 nelle acque del lago di Caldonazzo, esperienze e determinazioni fotometriche subacquee. Il lago giace 11 km a ESE da Trento, l'altitudine è di 450 m, ha la profondità massima di 48 m.

Il sopraluogo aveva due scopi principali:

1) adattare l'apparato fotometrico già usato in mare su grosse imbarcazioni a misurazioni sul lago a bordo di barche leggere;

2) effettuare misure sulla penetrazione delle radiazioni luminose nei successivi strati acquei e determinare i corrispondenti coefficienti ottici.

Queste ricerche si resero necessarie sia per studiare il complesso fotometrico più adatto per le misure sistematiche che il Centro di Studi Alpini intende eseguire nei laghi ad alta quota, sia per completare lo studio generale del lago di Caldonazzo, ora in corso di effettuazione.

Preziosi consigli diedero il prof. F. Vercelli per la parte fotometrica e il prof. V. Marchesoni per quanto riguarda la conoscenza del lago. Collaborarono alle ricerche la dott. I. Schenk e il sig. T. Perini del centro di Studi Alpini.

2. *Strumenti.* — E' stato adoperato il fotometro subacqueo a cellule fotoelettriche ideato e fatto costruire dal prof. Vercelli nel 1938, appartenente all'Istituto di Geodesia e Geofisica dell'Università di Padova.

Una cassa cilindrica di bronzo, con due spessi cristalli alle basi, contiene 6 cellule a strato di sbarramento al ferro-selenio (Photronic Cell Weston, mod. 594, Newark, N.J., U.S.A.): quattro di queste con la parte sensibile volta verso l'alto, le altre due verso il basso. Le prime ricevono la luce diretta, le altre quella diffusa. Una delle superiori e una delle inferiori sono coperte con vetri neutri, le rima-

nenti con vetri-filtri che lasciano passare solo radiazioni corrispondenti a determinate zone spettrali.

Un cavo isolato con 7 fili conduttori collega le cellule, attraverso un commutatore e un sistema di resistenze, con un galvanometro Kipp-Zonen e specchio riflettente; questo ha una sensibilità massima di $6.2 \cdot 10^{-8}$ ampère per 1 mm della scala posta a 50 cm e un periodo di 0,2 secondi. L'alta sensibilità dello strumento implica una stabilità che è difficile ottenere in una barca, e questo costituisce la parte più delicata del complesso strumentale. Il galvanometro ha una resistenza interna di 13 ohm ed è accoppiato con resistenze in serie e in derivazione in modo che quella del circuito cellula-galvanometro rimanga quasi costante, sui 300 ohm, quando si adoperano i vari shunt per variare la sensibilità dello strumento.

L'apparecchiatura fotometrica completa (cassa delle cellule, cavo di trasmissione, cavo di sospensione, verricello, contagiri, galvanometro e accumulatori) pesava in origine 120 kg. La sua manovra su una grossa imbarcazione non presentava eccessive difficoltà, ma è evidente che su una barca leggera, come quelle usate nei laghi, essa sarebbe stata molto difficile. Molte parti sono state perciò alleggerite: furono cambiati il verricello e il sistema di illuminazione (per eliminare gli accumulatori), ridotti il rullo portacavo e la grande cassa oscura del galvanometro. Si arrivò così al peso di 85 kg, ed è con questo complesso che si sperimentò nel lago: l'insieme risultò però ancora troppo pesante.

Dopo vari tentativi si è visto che, sistemando gli strumenti molto bassi nella barca ed evitando ogni minimo movimento, si può ottenere che l'indice luminoso risulti fermo sulla scala tanto nella posizione dello zero che in quella della misura: occorre naturalmente che lago ed aria siano calmi. Il ritorno allo zero, dopo eseguite le letture alle sei cellule, riesce in queste condizioni spesso perfettamente.

Per mantenersi nei limiti della proporzionalità fra corrente e illuminazioni delle cellule sono stati adoperati, per illuminazioni intense, cioè per profondità sino a 5 m, vetri diffusori bianchi.

Per quanto riguarda il complesso fotometrico si è visto che vi è la possibilità di costruire un fotometro avente gli stessi caratteri di quello attuale, ma del peso complessivo di c. 25 kg, scomponibile in 4 piccoli colli e pertanto facilmente trasportabile a mano. Tale apparecchiatura sarebbe adatta a misure negli alti laghi alpini.

3. *Procedimento.* — Per comprendere il procedimento seguito si presentano le formule principali secondo lo svolgimento teorico elaborato dal Vercelli nel suo lavoro « La penetrazione delle radiazioni luminose nell'acqua di mare » (¹).

Indicando con: I_0 l'intensità dei raggi monocromatici penetranti verticalmente nell'acqua, I l'intensità degli stessi dopo un percorso z , γ una costante caratteristica dei raggi e del liquido considerato: si ha, per la legge di *Lambert*:

$$I = I_0 e^{-\gamma z} \quad [1]$$

Se I_1 e I_2 sono i valori di I misurati ai livelli z_1 e z_2 , si ottiene dalla precedente relazione, usando logaritmi decimali:

$$\gamma = 2,30 (\log I_1 - \log I_2) / (z_2 - z_1) \quad [2]$$

Il valore γ rappresenta il *coefficiente di estinzione della luce* per effetto globale dell'assorbimento e della diffusione.

Indicando con α il *coefficiente di assorbimento*, con β quello di *diffusione* e posto

$$I/J = A \quad [3]$$

($A = albedo$ dell'acqua, I e J essendo rispettivamente l'intensità luminosa della luce diretta dall'alto al basso e quella *diffusa* dal basso all'alto) dalla posizione

$$\gamma^2 = \alpha^2 + 2\alpha\beta$$

risulta

$$\alpha = \gamma(1 - A) / (1 + A)$$

$$\beta = 2\gamma A / (1 - A^2)$$

Lo strumento permette la determinazione dei rapporti I_1/I_2 e di A ; risultano pertanto determinati i coefficienti γ , α e β .

In pratica né le radiazioni sono monocromatiche né i raggi perpendicolari alla superficie.

Adoperando però filtri selezionatori si può operare in campi spettrali limitati.

Per correggere gli effetti dell'obliquità dei raggi occorre determinare l'angolo r che i raggi rifratti nell'acqua fanno con la verticale e introdurre questo valore nella [1] che diviene

$$I = I_0 e^{-\gamma z \sec r} \quad [4]$$

da cui

$$\gamma = 2,30 (\log I_1 - \log I_2) \cos r / (z_2 - z_1). \quad [5]$$

Mediante questa formula sono stati calcolati i coefficienti che si presentano più avanti. Per $\cos r$ si adottò il valore costante 0,9

corrispondente ad un angolo di rifrazione medio nell'intervallo delle misure.

Data la non costante omogeneità del mezzo, i coefficienti furono determinati per i diversi strati posti fra livelli successivi. Per rimanere nel campo di validità delle formule si operò esclusivamente con sole libero e alla massima altezza, eseguendo cioè le misure dalle ore 10.30 alle 13.30 e solamente con cielo sereno. L'intervallo di tempo fra le determinazioni eseguite a due livelli successivi è di qualche minuto. L'intensità luminosa praticamente non varia; per i rapporti I_1/I_2 si ottengono in queste condizioni valori molto precisi.

Per ogni livello furono eseguiti due gruppi di misure: uno durante la discesa, l'altro nella salita. Nel calcolo dei coefficienti si considerarono i valori medi. Fra due determinazioni corrispondenti alla medesima quota la differenza è generalmente lieve. Essa può essere dovuta a varie cause: l'intervallo di tempo tra la discesa e la salita alla stessa quota può essere, per piccole profondità, di un'ora e anche più, è allora evidente che durante questo intervallo di tempo le condizioni dello strato possono modificarsi in varie maniere; altra causa può essere l'imprecisione nella determinazione della quota, incertezza che può arrivare a diversi cm e influire specialmente nell'esame di strati poco spessi.

I vetri-filtri adoperati sono quelli della Jenaer Glaswerke Schott & Gen., e precisamente:

MG6, neutro molto chiaro, riduce le radiazioni visibili nel rapporto 100:39;

UG9, violetto estremo e parte dell'ultravioletto;

BG12, azzurro, trasparente per l'ultravioletto, non trasparente per il rosso e l'ultrarosso;

VG9, verde, trasparente dall'azzurro al rosso iniziale;

RG1, rosso chiaro, estingue le radiazioni con lunghezza d'onda inferiore a 590 m μ ;

RG8, rosso molto scuro, estingue i raggi con lunghezza inferiore a 670 m μ .

Lo spessore dei vetri-filtri è di 2 mm, tranne l'UG9 che ne ha 1.

Sono quelli stessi usati dal prof. Vercelli nelle misure eseguite nel Golfo di Napoli (¹).

I risultati che si presentano in questa nota sono pertanto, da questo punto di vista, direttamente confrontabili con quelli; lo sono anzi in tutti i sensi, dato che l'apparecchio è rimasto sostanzialmente

lo stesso. Come era da prevedersi i coefficienti di Caldonazzo risultano molto più alti di quelli trovati per le limpide acque di Capri, sono invece dello stesso ordine di quelli determinati nelle immediate vicinanze della costa dello stesso golfo.

4. Condizioni del lago nei giorni riguardanti le misure. — Le misure effettive furono eseguite nei giorni 20 e 21 agosto 1948, dalle ore 10.30 alle 13.30, con cielo sereno, lago ed aria calmi o quasi.

Nei giorni precedenti si ebbe cielo parzialmente coperto con qualche pioggia, aria e lago quasi calmi nel mattino, vento leggero e lago poco mosso nelle ore pomeridiane. I mesi precedenti furono piovosi, miti, con cielo spesso coperto.

Il posto esplorato è situato poco a N del punto medio tra Teana e Calceranica e corrisponde al sito dove il lago raggiunge la massima profondità; scandagli eseguiti sul posto diedero per questa valori di 46 m.

Diamo le misure di temperatura e di corrente determinate nei due giorni precedenti le determinazioni fotometriche, nei giorni stessi, e nel giorno seguente. Esse sono state eseguite dalla Dr. I. Schenk e fanno parte di una vasta ricerca sulle condizioni fisiche del lago iniziata dal prof. G. Morandini nel 1947.

Temperature in °C misurate con termometro a rovesciamento

giorno: ora: cielo: vento: lago:	18.VIII 16.10 coperto brezza l. mosso	19.VIII 17.20 4/10 cop. q. calmo q. calmo	20.VIII 16.15 5/10 cop. q. calmo q. calmo	21.VIII 16.30 2/10 cop. brezza l. mosso	22.VIII 09.10 9/10 cop. calmo q. calmo
m					
0.20	22.1	21.8	23.1	22.4	21.8
1	22.3	21.8	23.0	22.4	21.8
3	22.2	21.8	22.0	22.4	21.8
5	22.1	21.8	21.8	21.9	21.6
7	21.0	—	—	21.0	21.1
8	—	—	17.9	19.2	18.7
9	16.4	—	17.0	15.7	15.7
10	14.6	12.8	14.6	14.0	14.5
12	—	—	—	11.1	11.6
15	9.2	—	8.6	9.3	9.1
20	7.6	7.4	7.5	7.6	7.6
25	—	—	—	7.0	—
30	6.8	—	6.6	6.8	6.9
40	6.4	—	6.4	6.4	6.4
16	6.2	—	6.2	6.1	6.4

Le correnti alle varie profondità sono state misurate col correntometro Ekman-Merz N. 184. Risultarono debolissime; i valori massimi si raggiunsero nello strato compreso tra i 10 e i 20 metri. Con aria calma la corrente risultò quasi nulla, con vento leggero essa aumentava sensibilmente.

Fig. 1 - Rapporti I_n/I_1 fra le intensità di illuminazione

A titolo indicativo diamo alcuni valori medi:

Profondità in metri:	3	5	10	15	20	30	40
velocità in cm/sec:	5	4	8	10	10	2	1

Misure col disco Secchi:

20. VIII, ore 9.30 ... m 8,30; cielo sereno, lago calmo;

21. » » 10.00 ... 7,30; » » » »

21. » » 13.00 ... 7.00; » 2/10 cop., brezza, lago legg. mosso.

5. *Risultati delle misure.* — Presentiamo i rapporti I_n/I_1 fra le intensità di illuminazione alle varie profondità e quella a 1 m. e i coefficienti di estinzione calcolati mediante la formula [5] del n. 3.

E' necessario tener presente che questi dati offrono solamente un saggio isolato di ricerca: hanno valore esattamente determinato quando siano riferiti alle condizioni del lago riportate nel n. 4 ed agli strumenti adoperati. Possono essere sempre molto utili come dati informativi, ma è evidente che solo una ricerca sistematica, estesa nelle stagioni e alle diverse condizioni fisiche e biologiche del lago, potrà dare risultati definitivi e precisi.

Rapporti I_n/I_1 fra le intensità di illuminazione.

m	luce diretta						luce diffusa		
	bianco	UG9	BG12	VG9	RG1	RG8	bianco	VG9	RG1
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	89	59	71	87	61	57	79	70	50
3	78	—	53	76	43	—	58	47	25
5	59	13	27	57	17	14	39	21	—
10	28	—	5.0	21	1.7	—	11	—	—
15	10	—	1.1	8.4	0.09	—	2.7	—	—
20	3.6	—	0.32	2.9	0.06	—	1.2	—	—
25	1.0	—	0.10	0.77	0.05	—	0.58	—	—
30	0.23	—	0.03	0.16	0.02	—	0.29	—	—
35	0.02	—	—	0.01	—	—	—	—	—

Per questi motivi ci limitiamo a dare i risultati delle misure senza discuterli e senza metterli in relazione con lo stato delle acque.

Il confronto effettivo di questi valori può farsi immediatamente solo con quelli ottenuti secondo lo stesso procedimento e gli stessi ap-

Coefficienti γ di estinzione (1/m)

quote m	luce diretta						luce diffusa		
	bianco	UG9	BG12	VG9	RG1	RG8	bianco	VG9	RG1
1-2	0.110	0.182	0.277	0.126	0.106	0.503	0.215	0.315	0.623
2-3	0.118	—	0.290	0.118	0.365	—	0.283	0.364	0.623
3-5	0.121	0.623	0.312	0.131	0.112	0.623	0.170	0.311	—
5-10	0.135	—	0.302	0.151	0.111	—	0.235	—	—
10-15	0.178	—	0.268	0.189	0.538	—	0.219	—	—
15-20	0.190	—	0.227	0.191	0.051	—	0.150	—	—
20-25	0.226	—	0.206	0.236	0.047	—	0.121	—	—
25-30	0.273	—	0.230	0.282	0.167	—	0.124	—	—
30-35	0.416	—	—	0.131	—	—	—	—	—

parecchi, cioè, per ora, con i dati ricavati dalle misure eseguite nel Golfo di Napoli. Le ricerche sinora svolte nei nostri laghi si basano sullo stesso sviluppo teorico, ma per la determinazione delle radiazioni furono adoperati strumenti fotografici o solarimetrici (pile termoelettriche) invece di cellule fotoelettriche, e pertanto il confronto immediato non è rigoroso.

La penetrazione risulta minore di quella misurata di fronte a Capo Posillipo; mentre a Caldonazzo a 25 m la illuminazione, per

Fig. 2 - Coefficienti γ di estinzione (1/m)

la luce bianca, è ridotta all'1%, in quelle acque marine risulta ancora del 36%. E' invece dello stesso ordine di quella rilevata nel mare a ridosso di Capo Posillipo, può ritenersi cioè equivalente alla penetrazione che si osserva nelle immediate vicinanze di una costa marina.

Rispetto ai laghi, tenendo presente la diversità dello strumento fotometrico e considerando solo la luce bianca, si osservano a Caldonazzo valori della penetrazione abbastanza grandi, paragonabili solo a quelli dei laghi di Garda e di Molveno.

Nei mari e nei laghi sufficientemente profondi si osserva, in generale, un aumento della trasparenza con la profondità; vicino alle

coste l'andamento può essere invece diverso. Dall'esame dei coefficienti di estinzione delle acque del lago di Caldonazzo risulta una diminuzione della trasparenza con la profondità, particolarmente forte oltre i 25 m. Ciò si osserva bene per la luce bianca e verde; per l'azzurra e la rossa, dopo i 10 m circa, si ha un aumento della trasparenza sino ai 20 m, segue poi una rapida diminuzione. Nel sito esaminato il lago è profondo 46 m.

Questo andamento corrisponderebbe all'esistenza di uno strato acqueo, situato tra le due quote sopra indicate, avente caratteri fisici, eventualmente biologici, diversi da quelli dell'acqua sopra e sottostante; il che sarebbe in accordo con l'andamento della temperatura e delle correnti, come si può vedere dai dati presentati nel n. 4. Ciò potrà essere ben precisato dalle ricerche termometriche e biologiche in corso.

Rapporti J/I fra luce diffusa e luce diretta.

Prof. in m	:	1	2	3	5	10	15	20	25	30
luce bianca	:	0,07	0,07	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05
f. VG9	:	,05	,05	,05	,04	,02	,02	,05	,05	,05
f. RG1	:	,03	,03	,03	,02	,02	,04	,05	,05	,05

Questi rapporti costituiscono valori pressoché normali. Sotto ai 20 m la vicinanza del fondo aumenta la percentuale di luce diffusa.

Trieste — Istituto Talassografico — Ottobre 1948 ()*.

RIASSUNTO

Si adatta il fotometro subacqueo a cellule fotoelettriche a misurazioni nelle acque del lago. Sono eseguite alcune serie di misure dalle quali si calcolano, per le varie profondità e per i diversi gruppi di radiazioni, i rapporti fra le intensità di illuminazione, i coefficienti di estinzione e i rapporti fra la luce diffusa e quella diretta.

BIBLIOGRAFIA

- (¹) DRIGO A., *Principali caratteristiche del funzionamento della cellula fotoelettrica a strato di sbarramento al ferro-selenio*, L'Energia Elettrica, XIV, Milano, 1937.
 (²) DRIGO A. - ALLOCCO G., *Fisica pratica*, Pgg. 1068-1072, Ed. Zanichelli, Padova, 1945.
 (³) VERCELLI F., *La propagazione delle radiazioni solari nelle acque marine*, Estratto dalla monografia « La Laguna di Venezia », vol. I, parte II, Tomo V, Venezia, 1937.
 (⁴) VERCELLI F., *La penetrazione delle radiazioni luminose nell'acqua di mare*, Mem. CCLXXI, del Comit. Talassogr. Ital. del C.N.R., 1939.
 (⁵) VERCELLI F., *Misure subacquee di radiazione in alcuni laghi alpini*, Boll. di pesca, piscicoltura e idrobiologia, anno XV, fasc. 5, Roma 1939.

(*) Lavoro eseguito con i contributi del centro di Studi Talassografici e del centro di Studi Alpini del C.N.R.