

SUL SIGNIFICATO DELLE MISURE TERMOMETRICHE IN PROBLEMI IDROLOGICI

F. MOSETTI (*)

SOMMARIO - Vengono esposte alcune considerazioni sulle caratteristiche termometriche dei terreni in relazione alla presenza di acqua di imbibizione o di acqua percolante in profondità.

Si fa convergere l'attenzione su alcune particolarità che consiglierebbero l'impiego dei metodi termometrici fra i principali mezzi geofisici nella ricerca d'acqua nel sottosuolo e per la precisazione delle zone di alimentazione delle acque superficiali. Viene inoltre aggiunta una breve parte descrittiva sugli strumenti impiegabili in queste ricerche.

1. Premessa

Siamo stati spinti alla stesura di questa nota, senza la pretesa di portare nuovi contributi per la soluzione di problemi termici nell'idrologia, bensì piuttosto per indirizzare che si occupa di ricerche idrologiche, all'uso delle misurazioni termometriche.

Le considerazioni esposte sono molto ovvie; però, forse proprio per la loro ovvietà, non sempre vengono tenute presenti nelle ricerche idrologiche, con la conseguenza di trascurare le preziose informazioni offerte dall'impiego dei metodi geotermometrici.

Mediante misurazioni termometriche sulle acque circolanti, o sul terreno in corrispondenza a queste, si possono ottenere dei ragguagli soprattutto in merito ai seguenti quesiti:

- a) Provenienza delle acque superficiali o sotterranee.
- b) Localizzazione del percorso sotterraneo delle acque.
- c) Discriminazione, tra acque sotterranee più o meno coesistenti, di acque di diversa origine.
- d) Condizioni dei terreni superficiali in rapporto con la percolazione delle acque di origine meteorica o di perdita di corsi superficiali.

2. Generalità

Gli strati più superficiali della crosta terrestre, oggetto delle nostre indagini, sono in generale interessati da imponenti scambi di energia: da un lato essi ricevono calore dall'interno della terra, dalla atmosfera e dallo spazio esterno, dall'altro essi irradiano verso l'esterno parte del calore ricevuto. Il bilancio risultante è, in media e in generale, negativo, da ciò deriva il raffreddamento cui va incontro tutto il pia-

neta. Questo decremento termico è però estremamente lento, tanto che nella generalità degli studi che interessano i problemi idrologici potremo considerare la temperatura media costante nel tempo.

Sovrapposto a questo andamento medio sussiste però il contributo delle fluttuazioni (di origine climatica o cosmica) della temperatura esterna, che si ripercuotono più o meno intensamente sulla temperatura del sottosuolo.

Determinato a priori un certo intervallo di tempo, si potrà sempre definire in questo un valore per la temperatura media a varie profondità. L'escursione della temperatura rispetto la media è massima in superficie e decresce sempre di più con la profondità. Da una certa profondità in poi addirittura non è più percettibile, a meno di non usare lunghissimi intervalli di tempo per le osservazioni, una divergenza della temperatura dal valore medio.

La fluttuazione della temperatura superficiale è determinata per lo più da oscillazioni periodiche. Talune di queste sono persistenti anche in intervalli lunghissimi di tempo, altre sono più contingenti. Possono esistere però anche delle variazioni impulsive, di breve durata e affatto periodiche. Queste onde superficiali si smorzano, penetrando nel terreno, tanto di più quanto più esse sono brevi.

Le note leggi della conduzione porgono infatti che un'onda termica di frequenza α , che alla superficie vale $T(t) = A \sin(\omega t - \epsilon)$, assuma alla profondità z in un terreno omogeneo con conducibilità termica a la forma

$$T(z, t) = A e^{-\gamma z} \sin(\omega t - \epsilon - \gamma z) \quad (1)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$$

(*) Dott. F. MOSETTI, Osservatorio Geofisico Sperimentale - Trieste.

(1) V. ad es. H. S. CARSLAW & J. C. JAEGER: *Conduction of Heat in Solids*, Clarendon Press, 1959, Oxford.

Dato lo smorzamento cui sono assoggettate all'aumentare della profondità, nelle misurazioni geotermometriche hanno significato solo le variazioni di temperatura di periodo abbastanza elevato (per esempio quelle di periodo annuo); peraltro, in talune misure sulle acque circolanti si potranno considerare anche onde molte più brevi quali le diurne. Anche le periodicità più elevate risultano però sempre più ritardate in profondità (e il ritardo può ammontare a molte fasi; se per esempio si avesse modo di misurare a profondità notevoli le variazioni infinitesimali di temperatura determinate dall'oscillazione annua, non si coglierebbero le variazioni stagionali corrispondenti all'epoca considerata, bensì quelle determinatesi in epoche passate, che si propagano lentissimamente all'interno della terra).

In pratica, data l'entità dello smorzamento e la sensibilità degli strumenti, le variazioni con periodo annuo possono esser percepite nel terreno fino a qualche decina di metri di profondità. Più in profondità si possono rendere eventualmente manifeste solo onde con periodo superiore. Nel caso di acque circolanti nel sottosuolo invece, l'onda annua può essere evidente anche dopo decine di chilometri di percorso.

In un terreno omogeneo le isoterme risultanti dal flusso di calore sono regolarmente distribuite e risultano parallele alla superficie.

Se però il terreno non è omogeneo la distribuzione normale della temperatura risulta più o meno fortemente perturbata: in zone di dislocazione, ad esempio, può esservi produzione di calore per attrito; si provocano pure aumenti anomali del valore delle isoterme in presenza di intrusioni magmatiche non ancora completamente raffreddate; o in presenza di contatti tra rocce eterogenee per effetto della differente conducibilità termica.

In fine le zone che sono in rapporto con una circolazione idrica, superficiale o sotterranea, presentano pure anomalie nella distribuzione delle isoterme. Nel nostro caso sarà particolarmente interessante la determinazione di queste isoterme con misure superficiali (o quasi superficiali) della temperatura del terreno.

3. Termometria delle acque circolanti

3.1 Un corso d'acqua, superficiale o sotterraneo, determina in generale nel sottosuolo, almeno nella sua parte più superficiale, un'anomalia nella distribuzione delle isoterme.

La distribuzione normale della temperatura con la profondità risulta pure perturbata dalla presenza di orizzonti acquiferi nel sottosuolo.

Tale comportamento deriva dal fatto che l'acqua circolante non è in equilibrio con la temperatura dell'ambiente ed è dovuto a vari fattori quali principalmente la differente conducibilità termica dell'acqua, la velocità di afflusso, e il regime termico delle zone di alimentazione.

Inoltre, almeno per i corsi superficiali o per le acque percolanti negli strati più prossimi alla superficie (o con questa in diretto rapporto), intervengono anche le perdite di calore dovute ad evaporazione.

In ogni caso si dovrà naturalmente tener conto che, a seconda delle condizioni, l'entità dell'anomalia termica sarà anche molto differente; essa potrà risultare talora così debole da non render possibile la sua evidenziazione con i mezzi strumentali di cui si dispone, o da permettere il suo mascheramento da parte di altre cause.

L'anomalia termica provocata dalla circolazione idrica si può ritenere costituita da due parti, una in rapporto con la temperatura media, pochissimo variabile nel tempo, l'altra fluttuante come le corrispondenti oscillazioni della temperatura superficiale.

L'anomalia determinatasi nella distribuzione della temperatura media, che deriva per lo più dalle differenti condizioni termiche delle zone di alimentazione, non è in generale costante nel tempo. Sia pur lentissimamente essa tende ad annullarsi, dato che la temperatura media dell'acqua a lungo andare si equilibra, in tutto il percorso, con la media ambientale.

Così, in corrispondenza ad acque che hanno stabilito il loro corso ormai da epoche molto antiche (o per le quali da lunghissimo tempo non vi sono state variazioni nelle zone di alimentazione), si noteranno anomalie termiche appena accennate e molto estese superficialmente. Invece se si tratta di percorsi di tracciato più recente, o che hanno avuto nuovi apporti con zone precedentemente da essi isolate, o se nelle zone alimentanti si sono verificate mutazioni climatiche importanti, allora le anomalie saranno più pronunciate ma nel contempo molto più localizzate attorno al corso stesso (Fig. 1).

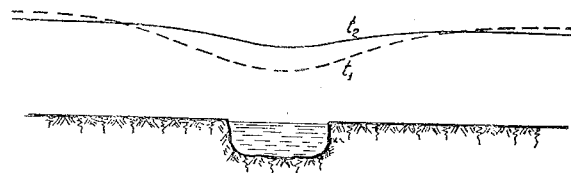


Fig. 1 - Anomalia termica media in corrispondenza ad un corso d'acqua, corrispondentemente a due tempi diversi, t_1 e t_2 , dalla costituzione del corso stesso.

Riguardo la parte fluttuante dell'anomalia, l'oscillazione più degna di considerazione è, come abbiamo già menzionato, quella con periodo annuo. In definitiva l'anomalia osservabile presenta (per la sovrapposizione delle due cause) ampiezza variabile: in determinate stagioni, essa risulta più pronunciata dell'anomalia « media » in altre potrà invece non aversi anomalia perché l'effetto variabile maschera quello costante.

L'escursione d'ampiezza dell'anomalia variabile nel tempo può risultare molte volte maggiore dell'ampiezza dell'anomalia costante. Sarà tanto maggiore quanto maggiore è l'escursione della temperatura della zona di alimentazione, se questa è soggetta a variazioni (bacino di raccolta di acque meteoriche o bacino lacustre), ma potrà ovviamente non dipendere da questa se la zona di alimentazione non presenta variazioni di temperatura o le presenti minime (ghiacciai, risorgive). Inoltre l'ampiezza dell'oscillazione termica in un punto del corso d'acqua dipenderà dalla portata e dalla velocità dell'acqua, nonché dalla possibilità

che ha questa di risentire delle fluttuazioni esterne durante il suo percorso.

Così ad esempio, se un corso superficiale viene alimentato da un ghiacciaio o da risorgive di acque provenienti da lontano e scorrenti per lo più in profondità (tali cioè da presentare minime variazioni di temperatura), e fin dall'inizio le acque si raccolgono in un unico corso, di grande portata, anche dopo molti km di percorso le escursioni termiche saranno minime, minori addirittura di quelle osservabili nel suolo.

mettere forti velocità di flusso, una corrispondenza quasi perfetta con l'escursione nella zona alimentante.

La correlazione tra le due fluttuazioni sarà tanto maggiore quanto più breve è il percorso dell'acqua nel sottosuolo.

Purché la profondità della falda sia sufficientemente grande ed esista una protezione verso la superficie, di materiali impermeabili, l'escursione della temperatura della falda sarà indipendente da quella superficiale.

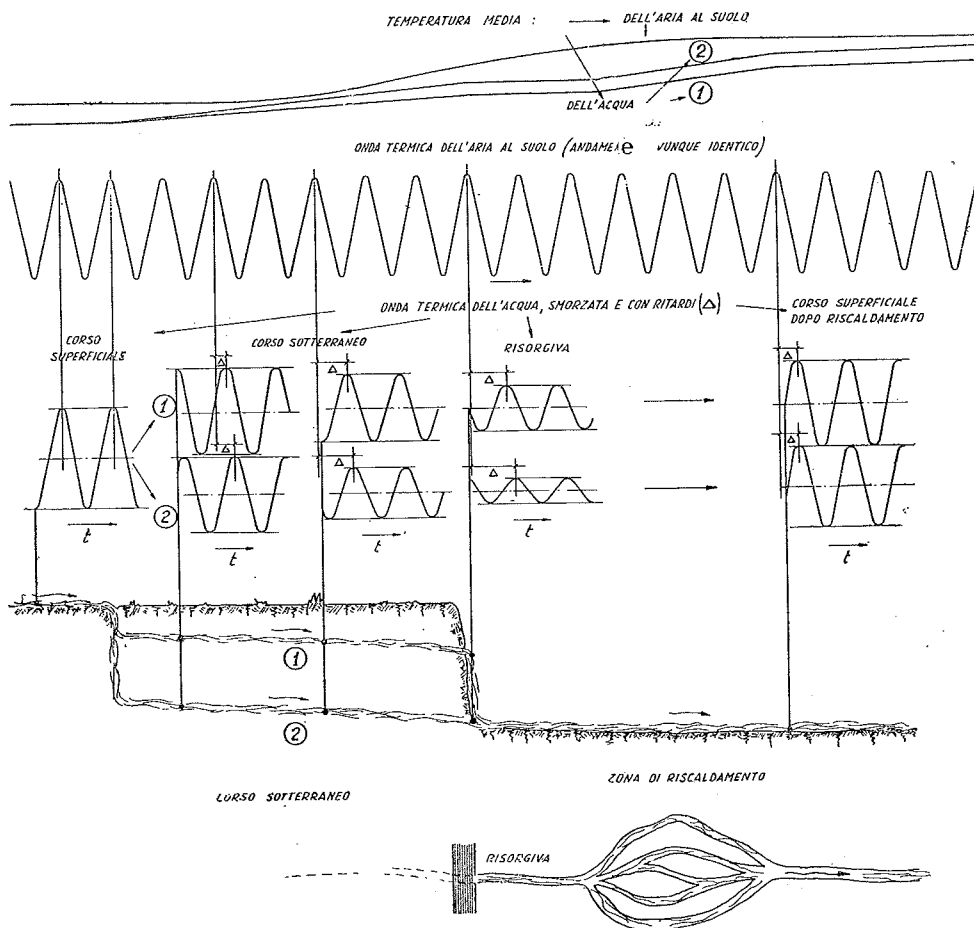


Fig. 2 - Anomalia termica media, lungo un corso d'acqua parte superficiale parte sotterraneo. Escursioni della temperatura annua in vari punti (per due differenti profondità del corso sotterraneo) raffrontata con l'escursione della temperatura superficiale dell'aria. L'escursione si smorza sempre più e subisce un progressivo ritardo, quanto più si prolunga il corso sotterraneo. Se questo è situato a non grande profondità, smorzamento e ritardo sono meno forti, essendo ancora influenzati dalla temperatura superficiale. Se il corso superficiale si disperde, l'effetto diretto della temperatura esterna si farà sentire molto fortemente sull'escursione termica dell'acqua.

Se invece un unico tronco terminale raccoglie l'acqua proveniente da un'estesa rete di affluenti, qualunque sia l'origine di questi; purché la loro lunghezza sia sufficiente, questo presenterà escursioni di temperatura considerabilissime. Effettivamente in questo caso l'acqua, suddivisa in tanti corsi di piccola portata, ha tutto il tempo di subire l'effetto delle escursioni esterne della temperatura e di seguirle quindi con la massima fedeltà (Fig. 2).

3.2 Altri interessanti rapporti si manifestano nel caso delle acque sotterranee. Nella temperatura dell'acqua di una falda si potrà osservare, specie se il terreno è grossolanamente permeabile, tanto da per-

A parità di lunghezza del percorso però, e dipendentemente dalla granulometria del terreno di falda (e quindi della velocità di percolazione), le escursioni della temperatura della falda risulteranno sempre più smorzate e ritardate rispetto alle fluttuazioni osservabili nella zona alimentante.

La legge seguita dalla temperatura dell'acqua in rapporto alle escursioni superficiali nella zona alimentante è simile a quella della propagazione di un'onda termica in profondità ma non eguale, intervenendo dei coefficienti di differente significato e tali da permettere smorzamenti e sfasamenti relativamente molto più piccoli anche dopo distanze assai grandi.

3.3 Se in un medesimo terreno si trovano differenti orizzonti acquiferi alimentati da bacini differenti, più o meno distanti, prescindendo dalla distribuzione della temperatura media del terreno, profondamente variata rispetto a quella di un terreno omogeneo, le escursioni della temperatura risulteranno con ampiezze e fasi diverse da orizzonte ad orizzonte (potendosi perfino osservare ampiezze più grandi negli orizzonti più profondi se questi sono molto più permeabili), salvo naturalmente l'effetto compensativo determinato per conduzione tra livello e livello, o addirittura da scambi idrici se i vari orizzonti non sono perfettamente separati.

Naturalmente, le medesime particolarità osservabili nell'esame in profondità, su vari livelli acquiferi sovrapposti, possono risultare anche in superficie, corrispondentemente a falde coesistenti una accanto all'altra, più o meno in comunicazione ma provenienti da differenti zone di alimentazione.

Il caso capita frequentemente nelle alluvioni interessate da perdite di subalvea. La falda alluvionale, che si origina dalle precipitazioni o per l'apporto di bacini montani, è soggetta ad una vicissitudine termica particolare e di solito le sue escursioni termiche sono poco pronunciate. Invece l'acqua di provenienza più vicina, derivata direttamente dal fiume, segue di solito con grande ampiezza l'oscillazione termica di questo.

Seguendo l'andamento delle fluttuazioni termiche si possono allora discriminare, in seno al medesimo materasso alluvionale, i tributi derivanti dai due tipi di alimentazione. Le misure più significative in questo caso saranno quelle eseguite in pozzi opportunamente ubicati; anche le misure superficiali potranno però fornire utili ragguagli, purché protrate sufficientemente nel tempo.

In maniera analoga alla differenza di alimentazione, anche la diversa permeabilità di un terreno alluvionale può giocare in un certo verso nella determinazione della temperatura media superficiale e nell'ampiezza e fase delle escursioni termiche.

Generalmente le zone più permeabili saranno quelle in cui la temperatura media sarà più bassa e in cui le caratteristiche dell'oscillazione termica saranno più differenti che nel resto del terreno (Fig. 3).

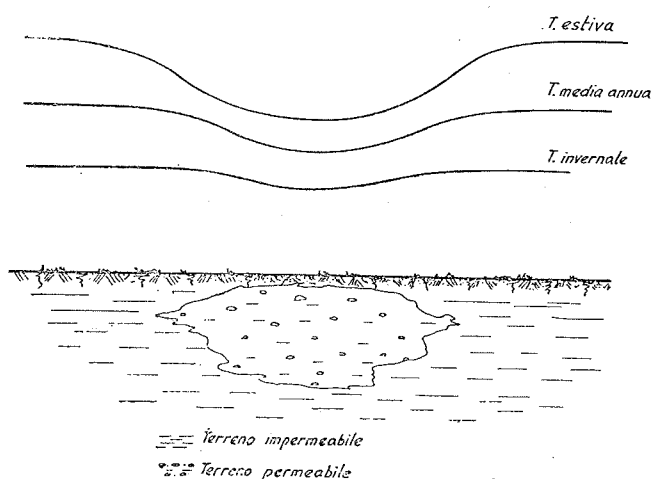


Fig. 3 - Andamento stagionale dell'anomalia termica in corrispondenza ad un flusso idrico nel sottosuolo.

3.4 In certi terreni impermeabili o semimpermeabili (argille, argille sabbiose) può alle volte trovarsi dell'acqua in quantità superiori di quella presente nelle zone circostanti, tanto da favorire lo spappolamento della massa e, se le condizioni orografiche lo permettono, al suo colamento.

Anche in queste condizioni le misure termometriche possono denotare dei valori anomali della temperatura media, di solito più bassi nelle parti più imbibite.

Misure simultanee di temperatura eseguite nella stessa posizione a profondità differente permettono di precisare il valore della conducibilità termica del terreno mediante l'esame dell'andamento di un'onda termica di periodo qualunque. La conducibilità termica è, per la medesima roccia, in diretto rapporto col contenuto in acqua.

In rocce del tipo delle arenarie può alle volte manifestarsi un certo flusso d'acqua attraverso zone più fratturate o negli intervalli tra banco e banco. Non esiste praticamente nessun metodo geofisico atto ad evidenziare questa circolazione idrica, salvo la termometria, che può evidenziare in corrispondenza delle anomalie termiche negative (di intensità dipendente, al solito, dalla profondità e dalla portata e variabile con la stagione).

3.5 Un caso ancor più interessante di comportamento termometrico di acque sotterranee ricorre nei fiumi carsici.

L'acqua che entra nelle cavità superficiali attraverso un corso superficiale o semplicemente per assorbimento meteorico, è assoggettata di norma a forti escursioni di temperatura.

Se il fiume sotterraneo è accessibile in qualche punto del suo corso, si osserverà in questi uno smorzamento e un progressivo ritardo delle escursioni della temperatura. Smorzamento e sfasamento risulteranno massimi alle risorgive, queste due grandezze sono in stretto rapporto con la velocità dell'acqua e con lo scambio di calore dal corso sotterraneo all'ambiente circostante, esse aumentano sempre di più con la lunghezza del percorso sotterraneo.

Se il fiume si trova a discreta profondità esso non risentirà più degli effetti superficiali e l'escursione osservabile lungo il suo corso o alle risorgive dipenderà unicamente dai fattori suaccennati.

Un classico esempio di questo comportamento è rappresentato dall'andamento dell'onda annua di temperatura lungo il corso del Timavo (2).

Tale esempio è riportato nella Fig. 4. In essa il grafico A dà l'oscillazione annua della temperatura del fiume superficiale prima dell'inabissamento nelle grotte di S. Canziano; il grafico B dà l'andamento della temperatura in un punto del percorso sotterraneo (Grotta di Trebiciano a circa 15 km dall'inabissamento); sul grafico C sono riportate le temperature alle risorgive, dopo quasi 40 km di corso sotterraneo. Il decremento termico e lo sfasamento progressivo dell'onda sono molto evidenti, essi sono regolati dalla formula

$$T(l, t) = T_0 e^{-\gamma l} \cos(\omega t - \chi l - \epsilon)$$

(2) MOSETTI F., *Étude sur le mouvement des eaux souterraines par le procédé thermométrique*, Boll. Geof. Teor. ed appl., II, 8, 1960.

ove

$$T(t) = T_0 \cos(\omega t - \varepsilon)$$

rappresenta l'onda termica annua all'inizio del percorso sotterraneo, l la lunghezza del percorso tra l'inizio e il punto considerato γ e χ coefficienti che dipendono anche dalla velocità di flusso.

3.6 Un giudizio importante in molti quesiti idrologici si può conseguire, sulla scorta delle osservazioni termometriche delle acque sotterranee, dal comportamento termico delle sorgenti e delle risorgive.

Se la temperatura media di una risorgiva è molto più bassa di quella del terreno circostante, si dovranno ricercare le zone di alimentazione a quote elevate, dove la temperatura media ambiente è notevolmente bassa. Se invece la temperatura delle sorgenti è più elevata di quella del terreno, devono naturalmente esser invocati fenomeni termali in corrispondenza a qualche punto del percorso.

Una grande escursione termica è indice di una relativa superficialità dei percorsi sotterranei se la fase è pressapoco quella dell'escursione termica in superficie; altrimenti sarà indice di una forte permeabilità dei terreni attraversati e quindi di un rapido smaltimento delle acque dalle zone di raccolta. Più piccola è invece l'escursione della temperatura alle sorgenti maggiore sarà la lunghezza e profondità del percorso sotterraneo o minore la permeabilità dei terreni attraversati.

Nel caso di sorgenti carsiche una debole escursione termometrica potrà anche esser indice della presenza di bacini sotterranei di ristagno.

Queste considerazioni sono tanto più interessanti se corrispondenti a confronto relativo di risorgive vicine, per le quali possono esser così evidenziate differenze di provenienza.

3.7 In definitiva, almeno in una fase qualitativa dell'interpretazione dei dati geotermometrici in ricerche idrologiche potranno esser tenuti presenti i seguenti criteri:

A) A seconda del risultato che si vuol ottenere e delle condizioni del problema, le misure termometriche possono venir svolte direttamente nell'acqua (misure sui corsi superficiali, misure in pozzi attingenti alla falda, misure su sorgenti) oppure sul terreno, più o meno vicino o in rapporto all'acqua (misure relative a indagini su corsi sotterranei, misure in zone di percolamento in terreni porosi).

Anche quando le misure vengono eseguite nel terreno, ci si trova peraltro quasi sempre in rapporto alla fase liquida.

Questa può esser rappresentata semplicemente da acqua di imbibizione superficiale, ma in rapporto con le acque profonde su cui si vuol indagare, oppure può costituire l'oggetto diretto dell'indagine.

Naturalmente anche l'equipaggiamento strumentale e la tecnica di misura devono opportunamente variare a seconda si misuri nell'acqua o alla superficie del terreno.

B) Un corso d'acqua superficiale o sotterraneo provoca generalmente un'anomalia nella distribuzione

delle temperature superficiali del terreno. Risultano cioè variati, in corrispondenza alla circolazione della acqua, sia il valore medio nel tempo della temperatura, sia l'escursione della temperatura.

Nel caso di acque sotterranee l'entità dell'anomalia e le caratteristiche dell'escursione varieranno in rapporto alla profondità e all'estensione della causa perturbante. Se si tratta di acque circolanti in materiali porosi, superficiali o prossimi alla superficie, si avrà una ulteriore causa di anomalia derivata dall'evaporazione.

C) Sia il valore medio che l'escursione della temperatura di un'acqua sotterranea o di risorgiva, sono differenti, a parità delle altre condizioni, a seconda della distanza della zona di alimentazione e della velocità media di afflusso dell'acqua. Più piccola è l'escursione più da lontano proviene l'acqua e più lento è il suo moto.

Se la temperatura media è molto discosta da quella del resto del terreno ciò sta a significare che i bacini di alimentazione sono sottoposti a condizioni climatiche molto diverse da quelle delle zone esaminate.

D) In un materasso alluvionale, presso un corso d'acqua superficiale, possono coesistere acque di perdita di subalvea e acque di falda di differente origine.

Se le acque non si mescolano, quelle di subalvea presenteranno caratteristiche termiche differenti da quelle del resto della falda, dato che seguono assai da vicino l'escursione termica del fiume superficiale.

E) In certi casi anche la più o meno diretta comunicazione di un'acqua sotterranea con il mare può esser chiarita dalle misure termometriche, confrontando la temperatura di questa con quella del mare.

F) A scopo di indagine geotermica applicata a questioni idrologiche si possono considerare anche onde di periodo diverso da quello annuo o anche impulsi aperiodici quali quelli derivanti da rapide immissioni di acque con caratteristiche termiche differenti (p. es. forti piene o rapide scariche di bacini artificiali).

4. Strumenti per la misura della temperatura del suolo

4.1 La misura della temperatura del suolo, alla superficie o all'interno di pozzi, e delle acque circolanti, si può compiere (tralasciando di considerare altri sistemi non applicabili in campagna per la loro complessità o per la loro grossolanità) in tre vie: con termocoppie, con termometri a mercurio, con termometri a resistenza.

Il primo metodo è molto accurato e particolarmente indicato per misure assolute, ma implica in questo caso notevoli difficoltà di lettura e accorgimenti particolari nonché apparecchiature alquanto ingombranti (occorre ad esempio che uno dei terminali della termocoppia sia costantemente mantenuto alla temperatura del ghiaccio fondente).

La termocoppia ha però una piccolissima inerzia, quindi il termometro da essa costituito è assai « pronto », da ciò l'interessante applicazione sui carotaggi

termici continui in pozzo. Salvo questa applicazione però, il metodo, benché molto usato un tempo, è ora quasi completamente abbandonato specie considerando che è sufficiente in quasi tutti i casi pratici disporre semplicemente di misure relative (tuttavia riconducibili con buona approssimazione a valori assoluti) molto più facilmente ottenibili.

Anche il metodo basato sull'impiego dei termometri a mercurio, pur essendo ancor in uso, tende a scomparire sempre di più. Il termometro a mercurio, poco adatto nelle misure di campagna, resta sempre l'elemento di paragone per la campionatura in laboratorio dei termometri a resistenza, il cui impiego è ormai consigliabile nella maniera più estesa.

Oltre ai termometri a resistenza di platino si usano nella pratica anche termometri a resistenza di nichelio. Benché questi siano più sensibili dei primi, tuttavia la loro stabilità non è così perfetta e il loro impiego non è quindi consigliabile nel nostro caso.

Anche i termistori, recentemente introdotti, si fondano sulla variazione della resistenza (di particolari miscele di ossidi metallici) con la temperatura. La variazione non è però lineare ed è negativa. A parità di differenza di temperatura la variazione della resistenza è però enormemente maggiore che per i termometri a resistenza metallica. I termistori sono però assai poco stabili e il loro impiego nelle misure geotermiche (ove tutte le osservazioni non sono indipen-

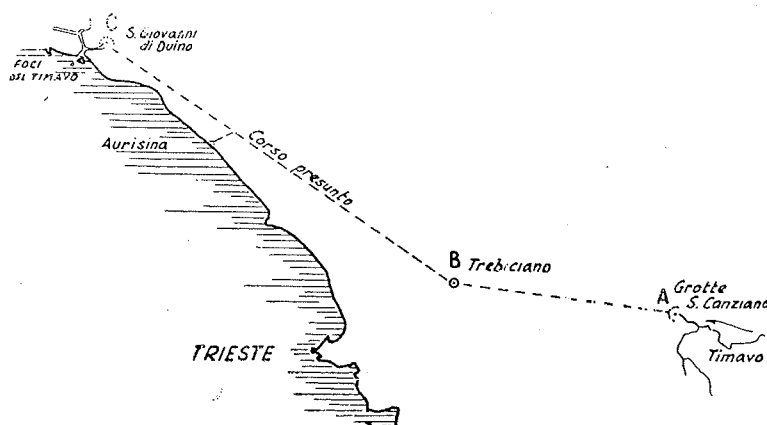
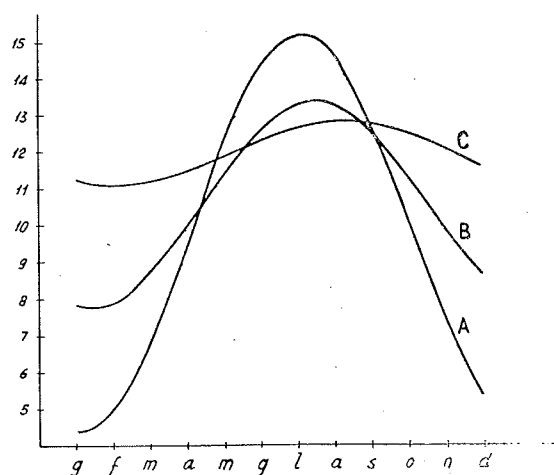


Fig. 4 - Schema del percorso del fiume sotterraneo Timavo con ubicazione di tre stazioni di misura della temperatura dell'acqua. Andamento dell'onda termica a periodo annuo nelle tre stazioni.

I termometri a resistenza (di platino) costituiscono uno strumento ideale, di grandissima precisione e facile impiego (3). La linearità praticamente perfetta di variazione della resistenza con la temperatura e la loro stabilità, cioè la costante riproducibilità delle misure, li rendono assai simili ai termometri a gas, che sono notoriamente lo strumento più perfetto di cui oggi si dispone per le misure di temperatura.

(3) MANASSI V., *La misura della temperatura con termometri elettrici a resistenza*, La Termotecnica, 4, 1950.

denti ma devono venir rese confrontabili) implicherebbe pertanto continue operazioni di taratura e ricontrollo.

Tali dispositivi non sono ancora entrati nella pratica geotermometrica dato che la loro fortissima sensibilità non è compensata da una semplice modalità di impiego.

Discuteremo nel seguito alcune delle principali modalità di impiego dei termometri a mercurio e di quelli a resistenza che sono tuttora i più usati nelle indagini geotermiche.

4.2 I termometri a mercurio possono venir usati con profitto solo in misure di superficie (o a pochi m di profondità), del suolo o delle acque. Per misure in pozzo occorrerebbero dispositivi del tipo di quelli usati in oceanografia (termometri a rovesciamento e rottura della colonna di mercurio), che però hanno dimensioni troppo ingombranti e possono quindi venir usati solo in pozzi di largo diametro.

I termometri a mercurio presentano il vantaggio (assai relativo del resto) rispetto ai termometri a resistenza, di dare direttamente la lettura della temperatura. Tuttavia, onde ottenere il valore vero della temperatura sono necessarie, sui valori letti, alcune riduzioni che rendono assai poco maneggevole il metodo per misure correnti e precise.

Le correzioni da apportare a questi termometri sono notoriamente tre: per lo spostamento eventuale dei punti fissi 0° e 100° , per la colonna sporgente e per l'irregolarità di calibro del capillare.

La prima correzione viene eseguita sottoponendo in fase di taratura il termometro all'azione del ghiaccio fondente e al vapore in presenza di acqua bollente a 760 mm di Hg. Dell'eventuale differenza con i punti fissi segnati si deve tener conto nella riduzione delle letture, riportandone gli scarti lungo la colonna.

Data la precisione richiesta (lettura almeno di $0,05^{\circ}\text{C}$ preferibilmente di $0,02^{\circ}\text{C}$) i geotermometri non possono portare tutte le scale da 0° a 100° su un'unica colonna, nè questo è richiesto nella generalità dei casi (temperature di 60° - 80° sono già eccezionali in zone termali). Occorre allora disporre di tutta una serie di termometri abbracciati ognuno un breve tratto dell'intervallo da 0° a 100° (5° o 10° al massimo). La taratura diventa allora più complicata dovendo disporre di differenti punti fissi, di solito difficilmente ottenibili, oppure limitarsi alla operazione di confronto con un termometro campione (questa operazione è sempre approssimata perché anche nei più precisi termometri i punti intermedi della scala sono solo interpolati).

La seconda correzione richiesta nelle operazioni con termometri a mercurio è forzatamente approssimata. Infatti, nelle formule più semplici di riduzione, si suppone costante la temperatura cui si trova il bulbo e costante quella che viene ad interessare tutto il capillare. Tale riduzione può esser sufficientemente approssimata quando il bulbo si trova in un mezzo (ad esempio nell'acqua superficiale) e tutto il capillare ne sporge. Invece i geotermometri devono necessariamente disporre di un bulbo distanziato, mediante un gambo di lunghezza anche superiore ad 1 m, dalla parte graduata del capillare, per permettere le misure alle profondità usuali. Il gambo è quindi assoggettato ad una variazione continua della temperatura secondo la sua lunghezza, variabile da luogo a luogo e con le condizioni e spesso tale da produrre agli estremi differenze di temperatura anche superiori al grado.

Una correzione esatta in questo senso implicherebbe calcoli tutt'altro che semplici, spesso irrisolvibili per la non perfetta conoscenza di talune condizioni. Le correzioni approssimate possono allora risultare, nonostante la piccola entità in valore assoluto, troppo grossolane ed imprecise.

Riguardo la terza correzione, le case costruttrici forniscono per ogni termometro di precisione dei valori da aggiungere o togliere, lungo tratti della scala, ai valori letti. Nell'uso, l'esistenza di questa correzione implica solo la noia delle operazioni di addizione e sottrazione di piccole quantità ai valori letti.

Riguardo l'impiego di questi strumenti possiamo ancora aggiungere che i termometri sono dotati di un bulbo molto grande e di un sottile capillare, onde esser sensibili e pronti, la lunghezza totale dell'asta termometrica è di 1-2 m, tutto lo strumento è racchiuso in una guaina metallica che lo protegge meccanicamente. La parte della guaina corrispondente alla scala di lettura è opportunamente fenestrata.

Le misure vengono eseguite come di consueto ad una certa profondità nel terreno, che può andare da qualche decimetro fino a 1-2 m circa. Il foro viene eseguito previamente, in esso viene introdotto il termometro con tutta la guaina, curando che solo una piccolissima parte sporga dal terreno (da ciò l'uso di termometri di lunghezza diversa con le diverse profondità cui si vuol operare) onde ridurre al minimo l'effetto diretto della temperatura esterna sullo strumento.

4.3 I termometri a resistenza sono, come già detto, strumenti molto più precisi e di più semplice impiego. Per le loro peculiari caratteristiche essi sono senz'altro i preferibili geotermometri di cui oggi si dispone.

Lo strumento per le misure superficiali da campagna è costituito da un'asta lunga 1-2 m, con diametro di circa 2 cm. La parte inferiore dell'asta è metallica, in alluminio o bronzo onde stabilire un'ottima conduzione del calore tra il terreno e l'elemento sensibile interno ad essa. Questa parte è foggata a punta ed è lunga una decina di cm. Intimamente connesso con questa segue un tratto di 50-60 cm costruito con materiale isolante (bakelite, plexiglass ecc.) che serve ad interrompere il contatto termico fra le piccole zone del terreno in cui si misura la temperatura e l'esterno (Fig. 5).

L'interno di questo tratto è cavo, onde contenere i conduttori che fanno comunicare con l'esterno l'elemento sensibile. Ancor più superiormente l'asta è costituita nuovamente in metallo per ragioni meccaniche.

Lo strumento che viene usato per le misure in pozzo (Fig. 5) è invece costituito semplicemente da un involucro metallico a punta, contenente l'elemento sensibile e opportunamente isolato termicamente da una parte zavorrante del peso di 5-10 kg. Il complesso è calato nei pozzi mediante cavo di acciaio a verricello graduato. Il collegamento elettrico è assicurato da conduttori che raggiungono l'esterno indipendentemente dal cavo di sostegno.

L'elemento sensibile di questo tipo di geotermometri è di norma costituito da una resistenza di platino consistente in un sottile filo avvolto a spirale elicoidale e annegato nel vetro. L'elemento si presenta come un cilindretto lungo 3-4 cm e con diametro di 3-5 mm. La parete esterna dell'elemento viene posta in diretto contatto col metallo della cavità che lo contiene (nella punta dell'asta o della testa per misure in pozzo). A causa di questa interposizione di materiali diversi tra il terreno (o l'acqua) e la spirulina di Pt lo stru-

mento presenta una certa inerzia tanto che tra immissione e istante di lettura devono passare almeno 20-30 minuti.

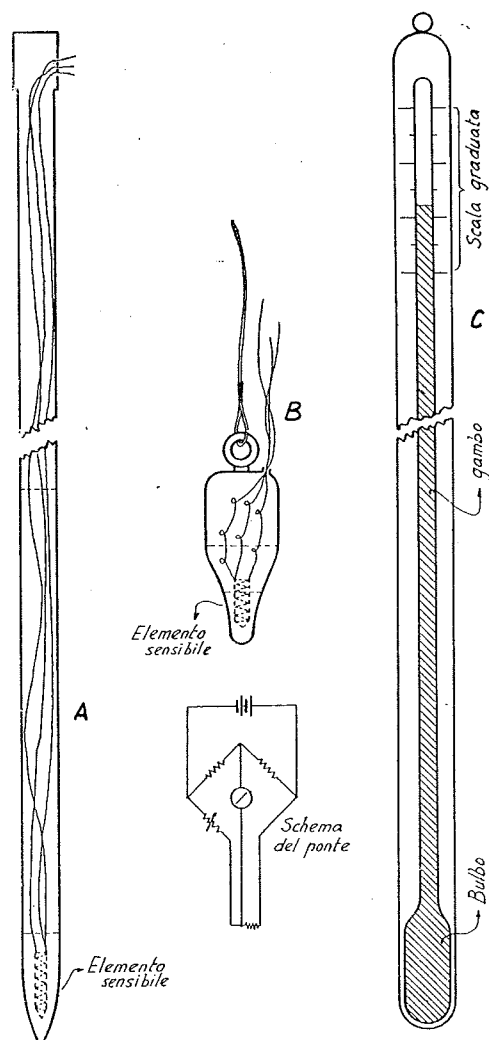


Fig. 5 - Schemi di geotermometri. A asta termometrica a resistenza di Pt, per misure superficiali B termometro a resistenza per misure in pozzo, C geotermometro a mercurio per misure superficiali.

Gli elementi sono forniti per costruzione con resistenza di $100 \pm 0,1 \Omega$ a 0° ; la variazione della resistenza con la temperatura è data dalla nota formula

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t + \dots)$$

(in questa i termini superiori in t sono trascurabili per la piccolezza dei relativi coefficienti; tale approssimazione è tuttavia abbondantemente sufficiente in pratica). Il coefficiente α è, per le resistenze di platino usato, pari a 0,00373. In varie tarature eseguite su resistenze commerciali, abbiamo potuto notare che al massimo tale coefficiente variava di due unità nella quinta cifra decimale. Ciò sta a significare evidentemente il comportamento simile ed omogeneo di tutte le resistenze.

Il valore di R_0 è dato invece per costruzione con uno scarto non accettabile per misure precise; alla variabilità della resistenza a 0° da termometro a

termometro contribuiscono inoltre i collegamenti tra l'elemento sensibile e l'esterno dello strumento. Pertanto i termometri devono venir tarati uno ad uno fissando il valore esatto della loro resistenza a 0° . Il confronto si fa con un termometro campione di taratura, a resistenza o a mercurio.

Inoltre, onde evitare il contributo incognito della variazione di resistenza con la temperatura dei cavi di collegamento e delle varie connessioni, il circuito a ponte viene stabilito direttamente ai terminali dell'elemento sensibile, tanto che i conduttori uscenti dall'asta sono tre anziché due. La grandezza misurata è dunque la resistenza dell'elemento sensibile, si usa pertanto un normale ponte per le misure di resistenza.

Occorrendo però di poter ricavare il centesimo di grado, lo strumento dovrà permettere la misura di resistenze assai piccole. In altri casi si possono usare strumenti registratori, a più tracce simultanee, per servizio in stazioni fisse di riferimento o di particolare interesse. Tali strumenti sono di solito meno sensibili dei ponti a lettura diretta.

In ogni caso, poiché, pur operando con uno stesso strumento di lettura gli elementi sensibili sono differenti almeno riguardo la R_0 , non conviene mai che il ponte sia tarato in gradi. Dalla R_0 letta al ponte si passa subito alla temperatura con la semplice relazione

$$t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right)$$

Norme da tener presenti nelle abituali misure di campagna con questi strumenti sono:

1) Tutte le aste, nel caso di misure superficiali, vengono poste esattamente alla stessa quota dal piano di campagna per evitare che con l'esame a profondità non eguali si tenga erroneamente conto di anomalie di temperatura inesistenti ma provocate soltanto dalla differente distanza dal piano di campagna degli elementi sensibili.

2) Onde eliminare il più possibile tutte le influenze di variazione di temperatura a più breve periodo, ma nel contempo di non appesantire il lavoro sul terreno, una profondità ottimale per le misure superficiali si otterrà disponendo gli elementi sensibili a 1,5-2 m dal piano di campagna. Se le condizioni del terreno non consentono di raggiungere facilmente tale profondità si potrà ridurre la distanza fino a 80 cm; più superficialmente le cause perturbatrici sono troppe e troppo difficilmente valutabili per consentire una sufficiente approssimazione.

3) Le misure superficiali di temperatura devono convenientemente venir eseguite lungo profili. I termometri vengono posti in punti già perforati a distanze prefissate. Si cerca di effettuare lungo un singolo profilo le misure in maniera più simultanea possibile, specie se la profondità di misura non è tale da consentire una completa eliminazione dell'onda diurne di temperatura.

I vari profili vanno collegati con misure di controllo e di chiusura.

4) Se in una singola zona l'esecuzione del rilievo termometrico implica durate notevoli (un mese o più), necessariamente le misure dovranno venir ridotte per la variazione stagionale dato che, alle usuali quote di misura, l'onda annua si presenta ancora con ampiezza rilevante. A tale scopo serviranno aste fisse, situate in punti opportuni, sulle quali si misura periodicamente, o addirittura si registra, la temperatura.

5) Occorrerà ancora riguardare l'esecuzione del foro, in modo che non vi cadano acqua o zolle superficiali del terreno. Le aste vanno infisse subito nel foro, badando che ne sporga solo l'estremità coi terminali dei conduttori (per misure a profondità diverse occorrerà disporre di aste a differente lunghezza). Prima di eseguire la misura occorrerà accertare che lo strumento sia in equilibrio termico col terreno. Per questo converrà eseguire almeno per un termometro, la curva di decadimento, onde conoscere l'ordine di grandezza del tempo di stabilizzazione.

SOMMAIRE: On expose quelques considérations à propos de caractéristiques thermométriques des terrains en relation à la présence d'eau d'imbibition ou d'eau percolante en profondeur.

On fait remarquer quelques particularités qui conseilleraient l'emploi de méthodes thermométriques parmi les principaux moyens géophysiques dans la recherche d'eau dans le sous-sol ou pour l'individuation des zones d'alimentation d'eaux superficielles.

On ajoute encore une brève partie descriptive à propos des instruments qui sont employés dans ces recherches.

6) Riguardo le misure eseguite direttamente sull'acqua, occorrerà che queste, a meno di circostanze speciali, vengano eseguite in punti riparati, nelle zone di massimo afflusso o nei punti di risorgiva. Per evitare l'effetto sui termometri dell'insolazione diretta sarà opportuno eseguire le misure al mattino presto o di sera.

7) Nelle misure in pozzo occorrerà far scendere lentamente la testa sensibile ed attendere che la temperatura sia equilibrata in ogni punto-misura. Non sono quindi possibili con questo mezzo misure continue, per quanto i punti-misura possano venir disposti molto ravvicinatamente.

Specie se il moto dell'acqua nel pozzo è assai lento e gli orizzonti acquiferi ben distinti, occorrerà eseguire molto lentamente le operazioni di risalita, per evitare il mescolamento dell'acqua che renderebbe ineffettuabile una ripetizione della misura entro poco tempo.

Trieste, Osservatorio Geofisico Sperimentale 22 novembre 1960.

SUMMARY Here are exposed some observations on the thermometric characteristics of soil concerning either the presence of drooping water and the flowing water into depth.

The attention is drawn on some particularities urging the use of thermometric methods out of the principal geophysical means for the research of underground water and for the stating of the zones supplying superficial waters.

Moreover a short description is added of the instruments used in these researches.