

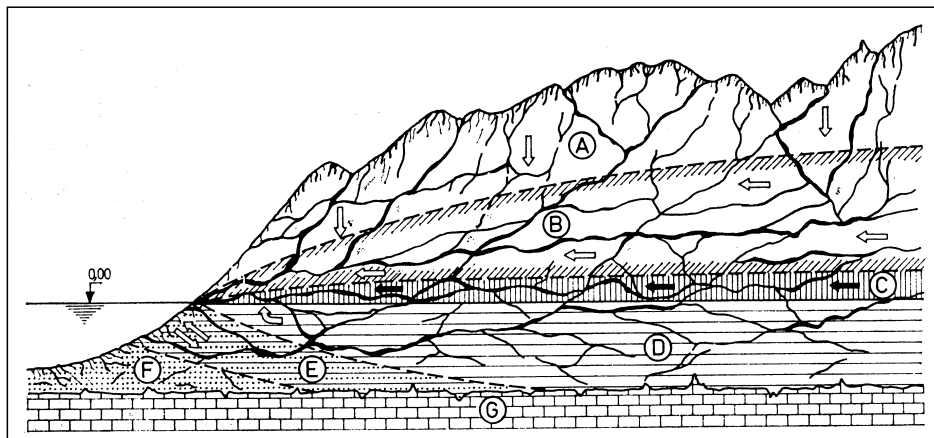
La nuova idrogeologia carsica

Le ricerche di riserve d'acqua meno inquinate per l'acquedotto di Trieste vengono estese anche alle falde profonde della piana di Ronchi, destinate a diventare in futuro (dal 1995) la sua principale fonte di alimentazione. Queste ricerche offrono l'occasione per una nuova importante scoperta, fortuita quanto fortunata. Poco lontano dalla sponda sinistra dell'Isonzo, vengono perforati nel 1974 due profondi pozzi che attraversano tutta la coltre alluvionale fino al substrato roccioso. In uno di essi, nei pressi di Cassegliano, a 193 metri di profondità (178 sotto il livello del mare) si incontra il basamento di roccia calcarea: la perforazione viene prolungata ancora per constatare l'eventuale presenza di acqua e, dopo quattro metri di calcare compatto, la sonda penetra nella volta di una caverna. Si scopre così una cavità carsica di grandi dimensioni e il sondaggio viene fermato a 198 metri sotto il livello del mare senza raggiungerne il fondo roccioso. Vi si rinvennero depositi di concrezioni calcitiche, argilla rossa e ciottoli arrotondati, nonché un flusso idrico di discreta portata¹⁵⁶. Viene in tal modo accertato lo sviluppo dell'incarsimento in profondità, molto al di sotto dell'attuale livello del mare e anche molto al di sotto di quanto fino ad allora immaginato (83).

Il fenomeno peraltro non è per niente eccezionale, come confermano le perforazioni profonde eseguite altrove, che in quegli anni raggiungono rocce carsificate fino a 2300 metri di profondità¹⁵⁷. L'esistenza di una circolazione idrica profonda nei massicci calcarei viene ormai codificata nei nuovi schemi dell'idrologia carsica,

156. Mosetti F. (1977): *Contributo alla conoscenza della profondità dell'incarsimento nel Carso Triestino*, Atti del 3. Convegno di Speleologia del Friuli Venezia Giulia, Gorizia 1977, 273-278.

157. Milanović P. (1981): *Karst Hydrogeology*, Water Research Publications, Littleton, Colorado.



Schema della circolazione sotterranea in un carsismo costiero, elaborato da Petar Milanović dell'Istituto di Ricerche sull'Idrologia Carsica di Trebinje. Legenda: A. zona di percolazione; B. zona delle riserve dinamiche a ricambio idrico assai veloce; C. parte delle riserve dinamiche a lento ricambio idrico; D. zona della circolazione sifonante; E. zona dell'acqua salmastra; F. zona dell'acqua salsa; G. zona al di sotto della base della carsificazione. Da: Milanović P. (1979): Hidrogeologija karsta i metode istraživanja, Trebinje, 83.

Le acque più profonde, come è intuitivo, sono quelle di provenienza più lontana; più superficiali rimangono le acque di percolazione alimentate dalle precipitazioni meteoriche sul bacino carsico.

che sta diventando una vera e propria disciplina scientifica a sé stante. Sulla base delle esperienze accumulate nelle numerosissime aree carsiche del mondo si sta infatti costruendo una teorizzazione sempre più sofisticata della circolazione sotterranea nelle rocce fessurate, nel tentativo di giungere alla valutazione del fenomeno secondo modelli quantitativi. Nel lessico dell'idrogeologia, e della speleologia medesima, vengono importati termini e concetti finora pertinenti soltanto all'idraulica ingegneristica: il "moto laminare" e il "moto turbolento" dell'acqua nelle fessure — introdotti da Otto Lehmann¹⁵⁸ ancora negli anni Trenta — l'"acquifero" (ossia la massa rocciosa che immagazzina e "trasmette" l'acqua), la "conduttività idraulica" dell'acquifero e la sua "trasmissività" (ossia la capacità dell'acquifero di trasmettere acqua, dipendente dal suo spessore e dalla conduttività), il "deflusso specifico" dell'acquifero (proporzionale al gradiente idraulico), la "ricarica" dell'acquifero, le "risorse dinamiche", le riserve "regolatrici" e "permanenti" e così via. Nella nuova manualistica scientifica ritornano nell'uso corrente i termini che all'ini-

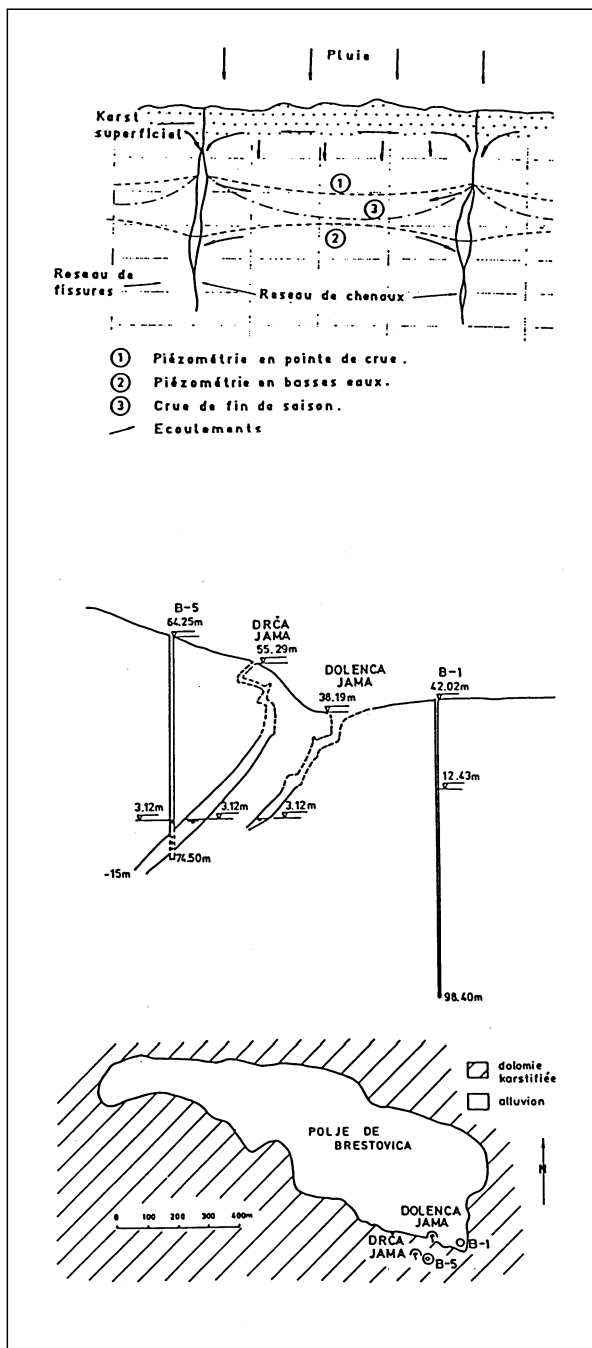
158. Lehmann O. (1932): *Die Hydrographie des Karstes*, Enzyklopädie der Erdkunde, Leipzig und Wien.

zio del secolo hanno scatenato le polemiche fra Grund e Martel: in particolare “zona freatica”, “acqua di fondo” e “water table” o superficie piezometrica. La loro validità è indiscutibile, purché si ammetta — anche se sembra un gioco di parole — una zona freatica senza caratteri di freaticità e sistemi di vasi comunicanti nei quali l’acqua non raggiunge il medesimo livello. Una perforazione cioè potrebbe non incontrare affatto le fessure acquifere o incontrarne di poco drenanti che risultano, al pompaggio, di minima portata. Inoltre i sistemi di fessure possono essere ostruiti da sedimenti argillosi o da concrezioni calcitiche in modo da ostacolare la circolazione dell’acqua; questa a sua volta nel reticolo delle canalizzazioni può essere sottoposta a pressioni idrostatiche di diversa entità anche in luoghi molto vicini.

In definitiva bisogna tenere presente che al di sotto della superficie piezometrica l’acquifero è comunque costituito da incommensurabilmente molta più roccia che acqua e che la validità degli schemi teorici, per usare un linguaggio cartografico, è soltanto una questione di scala. Infatti è indubbio che, considerando l’intero altopiano del Carso, si possa ammettere l’esistenza di una superficie teorica dell’acqua sotterranea convergente con una certa pendenza verso i punti di sbocco; è altrettanto indubbio però che nel dettaglio questa superficie risulta estremamente irregolare e discontinua. Sono indicativi in proposito i dati emersi dalle perforazioni di Brestovizza, di cui già si è detto in precedenza. Ad un centinaio di metri dalla grotta sfruttata dagli austriaci per un acquedotto campale (Dolenca jama) un’altra cavità raggiunge l’acqua sotterranea alla medesima quota (Drča jama); quasi alla stessa distanza, ma in altra direzione, viene perforato un pozzo geognostico fino a 50 metri sotto il livello del mare, nel quale il livello dell’acqua è quasi dieci metri più alto di quello misurato nelle due grotte vicine (ma con una portata, al pompaggio, estremamente scarsa).

In teoria l’acqua di base tende bensì a disporsi, in tempi più o meno lunghi, secondo un’uniforme superficie di equilibrio negli interstizi della massa rocciosa, ma nella realtà, sotto l’incessante azione dei fattori perturbatori (precipitazioni meteoriche, apporti e deflussi sotterranei) la pressione idraulica presenta valori diversi anche in canalizzazioni molto vicine; dovunque si siano effettuate perforazioni ravvicinate nei massicci calcarei, si è sempre avuto modo di constatare questo fenomeno.

I modelli matematici di idraulica sperimentale elaborati a metà Ottocento in base agli studi sui movimenti dei liquidi nelle tubature e attraverso i filtri di sabbia, vengono successivamente estesi alla circolazione sotterranea nei terreni incoerenti ed ora sono applicati anche alle rocce fessurate. In base a tali modelli, l’analisi degli idrogrammi (le curve della quantità di deflusso nel tempo) e in particolare il loro coefficiente di recessione (calcolato sul tempo di decrescita delle piene) forniscono utili indicazioni sulla proporzione tra il flusso diffuso e quello canalizzato nei

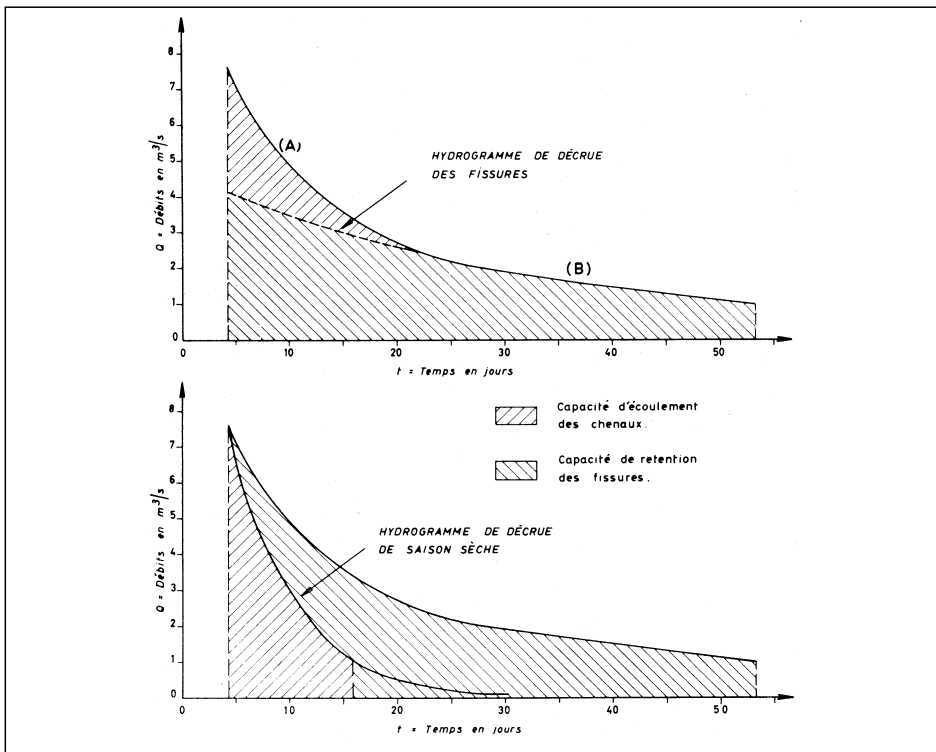


Le canalizzazioni drenano o alimentano i "blocchi" di roccia minutamente fessurata a seconda del regime idrologico. In magra e in condizioni normali l'acqua nei canali si dispone ad un livello più basso rispetto al reticolo di fessure, in piena invece ad un livello più alto; da Drogue C. (citato nella nota 161).

Trova spiegazione in tal modo la particolare situazione rilevata nelle perforazioni di Brestovizza (B-1 e B-5) nella zona circostante la Dolenca jama. In questa cavità, come pure nella vicina Drča jama e nel pozzo B-5 che ne intercetta la galleria sommersa, il livello dell'acqua viene misurato alla medesima quota di m. 3,12 sul livello del mare. Contemporaneamente, nel vicino pozzo B-1, che attraversa rocce sottilmente fessurate e a debole trasmissività idraulica, il livello è quasi dieci metri più alto (ma la portata, al pompaggio, estremamente scarsa). da: Krivic P. (55).

Anche nella Dolenca jama, che pure raggiunge le canalizzazioni sotterranee di un'importante direttrice drenante, la trasmissività idraulica varia sensibilmente nelle diverse condizioni dell'acquifero. In una prova di pompaggio effettuata a scopo irriguo nell'agosto 1953, in epoca di siccità (con il livello dell'acqua alla quota di m 0,80), i risultati sono infatti deludenti: con un prelievo di soli 7 litri al secondo la cavità in breve tempo viene quasi interamente vuotata. Si veda: Jenko F. (1959): Poročila o novejših raziskavah podzemeljskih voda na Slovenskem krasu, "Acta Carsologica", Ljubljana, 2:209-227.

Nella Drča jama l'esplorazione subacquea ha raggiunto la profondità di 15 metri sotto il livello del mare.



L'esistenza di una rete di sottili fessure nel sistema carsico è provata dal fatto che, dopo il brusco aumento di portata delle risorgive a seguito di forti precipitazioni, il deflusso decresce dapprima rapidamente, per stabilizzarsi poi su valori quasi costanti o lievemente decrescenti per effetto dello svuotamento lento dell'acqua dalla fitta rete di fessure compresa fra le canalizzazioni maggiori. L'analisi della curva di recessione consente di stabilire il rapporto fra il drenaggio canalizzato e il drenaggio diffuso. Le figure rappresentano due diversi metodi di valutazione della capacità di ritenzione nelle fessure e nelle canalizzazioni: in alto con la separazione dei componenti dell'idrogramma (A - deflusso rapido nelle canalizzazioni, B - scarico più lento delle fessure); in basso con la scomposizione dell'idrogramma in base alla decrescita nella stagione secca (al termine della quale una piena si esaurisce rapidamente attraverso le canalizzazioni maggiori, senza ricevere significativi apporti dal sistema delle fessure, ormai completamente scaricato); da: Drogue C. (1963): Essai de détermination des composantes de l'écoulement des sources karstiques, "Annales de Spéléologie", C.N.R.S. Paris, 18(4):415-420. La rapida decrescita delle piene nella grotta Lindner e nella grotta di Trebiciano (più di un metro all'ora nella grande caverna) dimostrerebbe l'esistenza di grandi canalizzazioni nella massa calcarea e, apparentemente, una scarsa ritenzione idrica. La valutazione di quest'ultima però può essere effettuata soltanto con l'analisi della curva di recessione alle risorgive; Drogue infatti (citato nella nota 161) osserva che, in generale, una decrescita inizialmente troppo rapida può indicare un'elevata capacità di ritenzione e può essere spiegata con la sottrazione dal deflusso di una parte dell'acqua della piena per ricostituire le riserve idriche del sistema carsico. Nel caso del Carso triestino sarebbe problematico — ad ogni modo — distinguere il deflusso da una rete di sottili fessure da quello proveniente da un labirinto di cavità vere e proprie, estese in prossimità del livello di base e parzialmente intasate dai riempimenti argillosi.

sistemi carsici. Inoltre il confronto della curva delle portate con le curve dei parametri idrochimici, della torbidità e della conducibilità elettrica consente di definire le caratteristiche del sistema e in particolare il grado della “eterogeneità idraulica” che nel tempo aumenta progressivamente. Ciò significa che, nel complesso reticolo di meati e fratture del massiccio calcareo, coesistono canalizzazioni a elevata conduttività e reticoli di sottili fessure a debole conduttività idraulica; inoltre che l’allargamento delle canalizzazioni è comunque più rapido di quello delle fessure, per cui aumenta sempre più la differenza di conduttività fra le direttrici di drenaggio preferenziale e le zone di ritenzione¹⁵⁹. L’idea di un’evoluzione dinamica della circolazione carsica viene espressa già a suo tempo da Jovan Cvijić, che immagina un progressivo aumento della permeabilità del sistema idraulico in conseguenza dell’allargamento delle fessure (permeabilità “secondaria”). Diversi studiosi, tra i quali anche il triestino Walter Maucci¹⁶⁰, in questa ottica tentano di conciliare le teorie di Grund e di Martel, considerandole “espressioni di diverse fasi evolutive di un medesimo fenomeno”: l’acqua di base nelle fessurazioni sottili sarebbe caratteristica della fase giovanile, i corsi canalizzati della fase senile del ciclo carsico. Questa concezione legata all’evoluzione ciclica del rilievo — il “ciclo geografico” proposto a fine Ottocento da W.M. Davis — si traduce però in astratte esercitazioni accademiche; in realtà le due forme di circolazione sotterranea coesistono nel medesimo tempo ma in spazi diversi del massiccio calcareo, come intuito quarant’anni prima da Otto Lehmann e come ora viene efficacemente schematizzato da Claude Drogue¹⁶¹, che nelle perforazioni effettuate nella regione del Languedoc studia l’interazione fra l’acqua di base e le correnti a rapido deflusso. Secondo lui, lo sviluppo più o meno grande delle discontinuità tettoniche nel massiccio calcareo consente di distinguere nel sistema drenante una rete di sottili fessure, nelle quali la circolazione si mantiene lenta e laminare, e una rete ben più larga di canalizzazioni a deflusso rapido e turbolento. La maglia delle fessure sottili che interessa l’insieme della massa calcarea è dell’ordine del metro o della decina di metri; la maglia delle ca-

159. Mangin A. (1975): *Contribution à l’étude hydrodynamique des aquifères karstiques*, “Annales de Spéléologie”, C.N.R.S. Paris, 29/1974(3):283-332; 29/1974(4):495-601; 30/1975(1):21-124.

Williams P.W. (1983): *The role of subcutaneous zone in karst hydrology*, “Journal of Hydrology”, Amsterdam, 61:45-67.

Bonacci O. (1985): *Hidrologija Krša*, Metode mjerenja i obrade s računskim primjerima, Predavanja održana na 4. seminaru J.D.H. (Jugoslovensko Društvo za Hidrologiju), Bled, 481-545.

160. Maucci W. (1962): *Considerazioni sistematiche sul problema dell’idrografia carsica ipogea*, Actes du 2. Congrès International de Spéléologie, Bari-Lecce-Salerno 1958, 1:23-43.

161. Drogue C. (1974): *Structure de certain aquifères karstiques d’après les résultats de travaux de forages*, “Comptes Rendus de l’Académie des Sciences”, Paris, Série D, 278:2621-2624.

Nella pagina a fronte:

“L’interpretazione della provenienza dell’acqua dall’idrogramma di una sorgente carsica”. L’analisi degli idrogrammi e la sua correlazione agli altri parametri idrologici consente di ricostruire le diverse fasi del drenaggio. Si tratta di uno schema teorico e semplificato, riferito ad un ipotetico sistema carsico di piccole dimensioni ed alimentato dalle sole precipitazioni meteoriche; da: Bonacci O. (citato nella nota 159).

Legenda della figura B: a. acqua immagazzinata nei canalizzazioni della zona satura (freatica); b. acqua immagazzinata nella zona sottocutanea e nella zona vadosa, trasportata da un flusso turbolento nelle canalizzazioni; c. acqua di percolazione trasportata velocemente attraverso il sistema di canalizzazioni; d. acqua circolante nelle strette fessure della zona satura, trasportata da un flusso prevalentemente laminare. Nella figura A, l’istante t_0 corrisponde all’inizio delle precipitazioni (i); nell’istante t_1 si registra l’inizio dell’incremento di portata (Q); nel periodo fra t_1 e t_2 l’idrogramma è formato dall’acqua accumulata nelle canalizzazioni della zona freatica (a) “spremuta” dalla pressione della sopravveniente onda di piena; con l’incremento della portata aumentano la torbidità e, nel caso di precipitazioni dopo una siccità prolungata, la concentrazione di microrganismi (c); l’istante t_2 coincide con la repentina diminuzione della durezza dell’acqua (H), causata dall’arrivo alla risorgiva dell’acqua della piena che ha attraversato la zona vadosa (b); la portata raggiunge il suo massimo (IM); l’istante t_3 coincide con un ulteriore deciso aumento della torbidità (c) e l’arrivo dell’acqua di veloce percolazione (c); t_4 coincide con il ripristino dei valori iniziali della durezza (H) e da questo istante, fino ad una nuova precipitazione, la sorgente è alimentata dall’acqua immagazzinata nelle strette fessure della zona freatica.

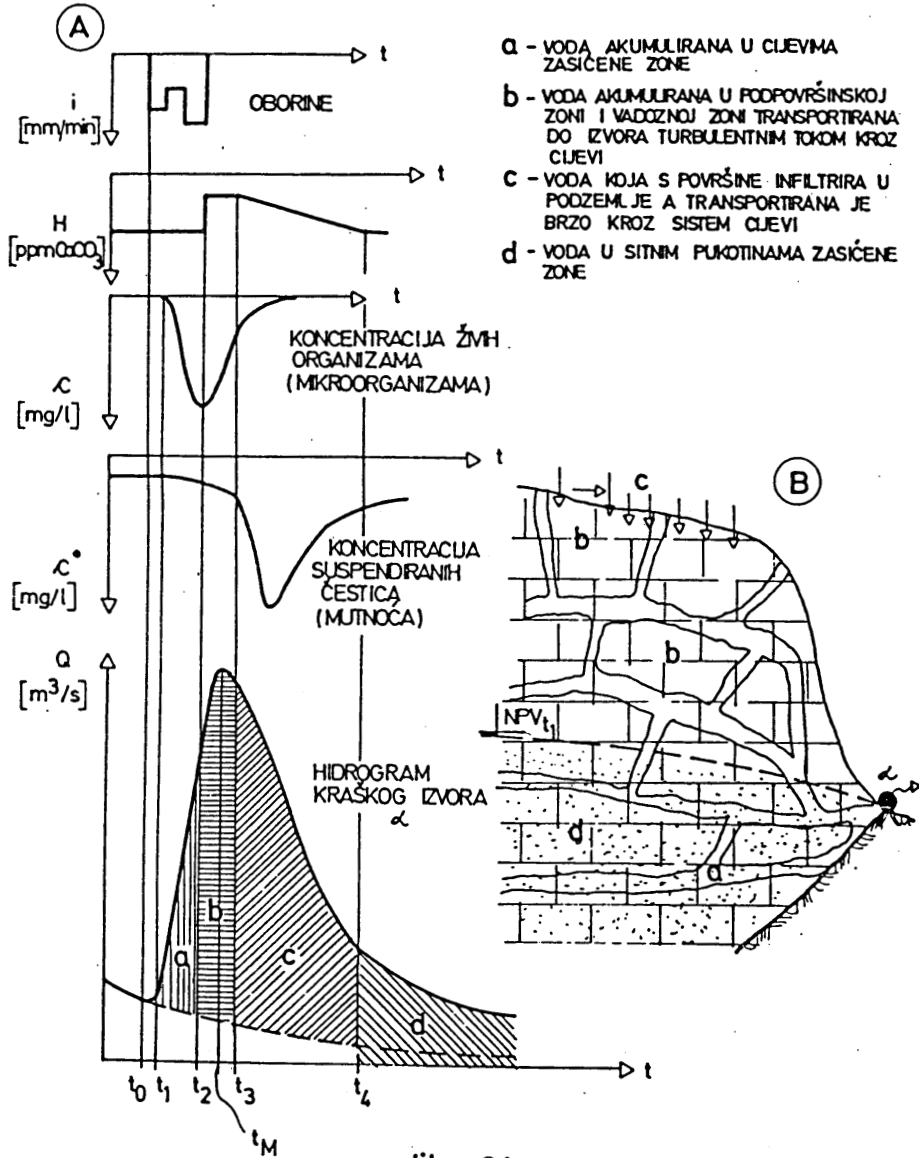
Va rilevato come questo caso teorico sia riferibile ad un acquifero carsico “parzialmente omogeneo”, nel quale l’apporto dei blocchi fessurati è paragonabile a quello delle canalizzazioni (rapporto tra portata massima e minima alle risorgive compreso tra 100 e 300); l’iniziale diminuzione della durezza totale dell’acqua è riferibile all’inizio dell’onda di piena. L’andamento della durezza totale sarebbe diverso in un acquifero carsico omogeneo, in cui l’apporto idrico delle canalizzazioni — scarsamente sviluppate — è trascurabile (rapporto fra portata massima e minima inferiore a 50); in questo caso la durezza totale tende ad aumentare col montare della piena, in quanto viene recapitata alle risorgive l’acqua che stazionava già da tempo all’interno dei blocchi fessurati e che viene “spremuta” dal carico piezometrico delle acque di infiltrazione.

Diverso ancora sarebbe l’andamento della durezza totale in un acquifero carsico del tutto “inomogeneo”, in cui l’apporto dei blocchi è irrilevante rispetto a quello delle canalizzazioni; in questo caso le variazioni della durezza totale presentano un andamento di difficile interpretazione, senza differenze significative tra regime di magra e di piena; si veda: Forti P. (1987): Gli acquiferi carsici, “Speleologia - Rivista della Società Speleologica Italiana”, Milano, 16:28-30.

Nel caso del Timavo, alimentato da un corso superficiale con un bacino imbrifero esteso quanto il bacino carsico vero e proprio, la durezza totale diminuisce quando la portata raggiunge il valore massimo ed alle risorgive arriva l’acqua delle piene del Recca; la durezza torna ad aumentare quando la piena si è esaurita e cala la pressione idrostatica nelle canalizzazioni per cui viene nuovamente drenata la falda carsica. Si veda: Gemiti F. (47).

L’aumento delle sostanze inquinanti durante le piene è dovuta non soltanto all’apporto diretto del Recca, ma anche alla mobilizzazione e “restituzione” delle sostanze inquinanti stesse sedimentate lungo il corso sotterraneo.

OBJAŠNJENJE PORIJEKLA VODE U HIDROGRAMU KRAŠKOG IZVORA



- a - VODA AKUMULIRANA U CJEVIMA ZASIĆENE ZONE
- b - VODA AKUMULIRANA U PODPOVRŠINSKOJ ZONI I VADOZNOJ ZONI TRANSPORTIRANA DO IZVORA TURBULENTNIM TOKOM KROZ CJEVI
- c - VODA KOJA S POVRŠINE INFILTRIRA U PODZEMLJE A TRANSPORTIRANA JE BRZO KROZ SISTEM CJEVI
- d - VODA U SITNIM PUKOTINAMA ZASIĆENE ZONE

slika 24
540

nalizzazioni è invece dell'ordine delle centinaia di metri. In questo schema teorico, nelle canalizzazioni il livello dell'acqua in magra è più basso che nella rete delle fessure circostanti ed è più alto in piena; le canalizzazioni dunque al mutare del regime idrologico invertono la loro funzione, per cui drenano oppure alimentano gli adiacenti "blocchi" rocciosi sottilmente fessurati.

* * *

Il governo jugoslavo impegna somme ingenti nelle perforazioni e negli studi relativi, finalizzati al reperimento di risorse idriche ad uso potabile ed irriguo nei Carsi dinarici. Nell'entroterra della Dalmazia vengono effettuati grandiosi lavori di bonifica nei grandi polje tettonici e in alcuni vengono creati bacini d'invaso a scopo idroelettrico, fatto questo che costituisce la verifica sperimentale delle diverse teorie sul comportamento delle acque nei massicci calcarei¹⁶². La quantità enorme di osservazioni e di dati così ottenuti consente ai ricercatori e ai tecnici coinvolti in queste operazioni di collocarsi all'avanguardia nello studio dell'idrologia carsica sotterranea.

Il Servizio geologico di Lubiana, che dispone di un Dipartimento di idrogeologia e geologia tecnica, intraprende nel 1978 un ciclo di ricerche nei pozzi geognostici perforati l'anno prima nel vallone di Brestovizza. I lavori sono coordinati da Primož Krivic, uno dei pionieri della speleologia subacquea in Slovenia, che ora sta preparando la sua tesi in ingegneria (*Etude hydrodynamique d'un aquifère karstique*) all'Università di Montpellier.

Si eseguono regolari misure piezometriche nei diversi pozzi, che vengono correlate con le precipitazioni sul bacino del Carso e con le misure idrometriche del Recca, del Vipacco e dell'Isonzo all'ingresso nella piana di Gorizia (54); l'onda di piena si propaga attraverso l'acquifero in due giorni sia dal Recca che dalle perdite del Vipacco — benché questo fiume sia molto più vicino — e in due giorni e mezzo dall'altrettanto vicino Isonzo, il quale però alimenta la falda carsica attraverso uno spesso materasso alluvionale. Krivic osserva come la celerità di propagazione dell'onda di piena da lui riscontrata sia molto più elevata della velocità effettiva delle particelle d'acqua, misurata tra il Recca e le risorgive del Timavo nel corso dell'esperimento di marcatura col trizio. Successive prove di marcatura effettuate in periodo di piena (44) dimostrano però — come vedremo — che anche l'ef-

162. Mikulec S. (1976): *Engineering works in karst regions of Yugoslavia*, Proceedings of the U.S.-Yugoslavian Symposium "Karst hydrology and water resources", Dubrovnik 1975, Water Resources Publications, Fort Collins Co., 2:443-488.

fettiva velocità dell'acqua diventa molto elevata in queste particolari condizioni idrologiche e che soltanto le fasi iniziali dell'aumento di portata alle risorgive possono essere attribuite alla trasmissione della pressione idraulica attraverso l'acqua di base. Il sistema drenante dell'acquifero carsico presenta comunque dei collegamenti sotterranei molto più diretti e veloci nel solco di Aurisina (drenaggio concentrato) rispetto al solco di Brestovizza (drenaggio diffuso), come risulta dagli esperimenti di marcatura e dalla diffusione degli inquinanti.

Krivic studia inoltre la propagazione attraverso l'acqua carsica delle onde di marea dell'Adriatico, registrate — con un certo sfasamento — nel pozzo B4 a quattro chilometri dalla costa. Questi dati sono oggetto di complesse analisi matematiche allo scopo di caratterizzare il comportamento idrodinamico dell'acquifero e di valutarne la diffusività (55); i risultati sono comunque di difficile interpretazione per la particolare natura della falda carsica. Infatti l'acqua di base nel massiccio calcareo non è una superficie libera — libera di innalzarsi senza ostacoli — come le falde idriche nei terreni incoerenti, ma presenta un certo grado di artesianità (si tratterebbe di una “falda imprigionata con un effetto di ristagno parziale al tetto della zona drenante”), in quanto le fessurazioni profonde non sono indefinitamente aperte verso l'alto né sono tanto immediatamente interconnesse sul piano verticale da consentire all'acqua, sotto carico idrostatico, di compiere oscillazioni indisturbate.

Oltre a queste ricerche sulle variazioni naturali del livello piezometrico, che considerano il sistema carsico nel suo insieme, vengono effettuate prove di pompaggio nelle singole perforazioni per determinare la loro portata di produzione ed i valori locali dei parametri idrodinamici della falda; la curva di abbassamento e di rimonta del livello dell'acqua permette infatti di risalire alla trasmissività e al coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero (56).

Le ricerche nel vallone di Brestovizza confermano l'elevata eterogeneità idraulica del massiccio carsico, che si configura come un sistema complesso in cui i principali canali di drenaggio sono interconnessi con canalizzazioni minori e con blocchi intermedi sottilmente fessurati, a bassa conduttività, dove l'acqua è più o meno ritenuta e accumulata (52). È probabile che proprio la mobilitazione di queste riserve idriche lentamente filtranti, realizzata dal pompaggio, sia la causa dell'elevato tenore salino riscontrato nell'acqua dei pozzi di Brestovizza; sono attualmente allo studio casi analoghi verificati altrove¹⁶³.

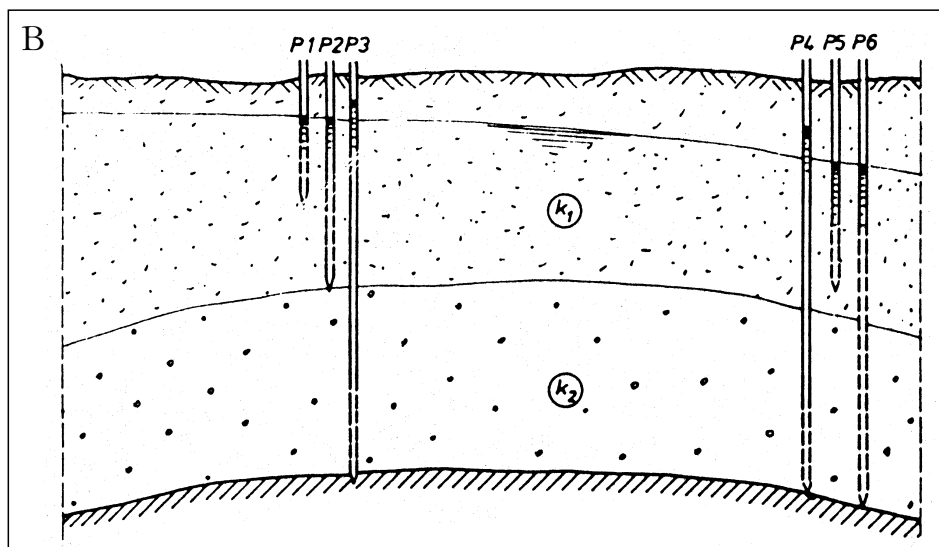
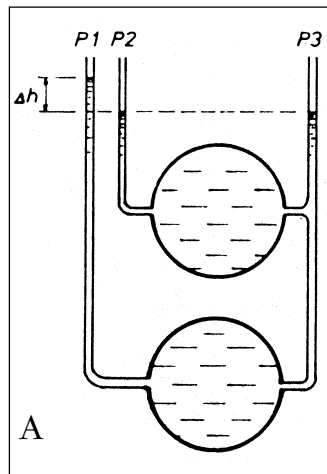
163. Pulido-Bosch A., Morell I., Andreu M. (1996): *Modifications hydrogéochimiques provoquées par la surexploitation d'un aquifère karstique*, “Comptes Rendus de l'Académie des Sciences”, Paris, 323(2.a):313-318.

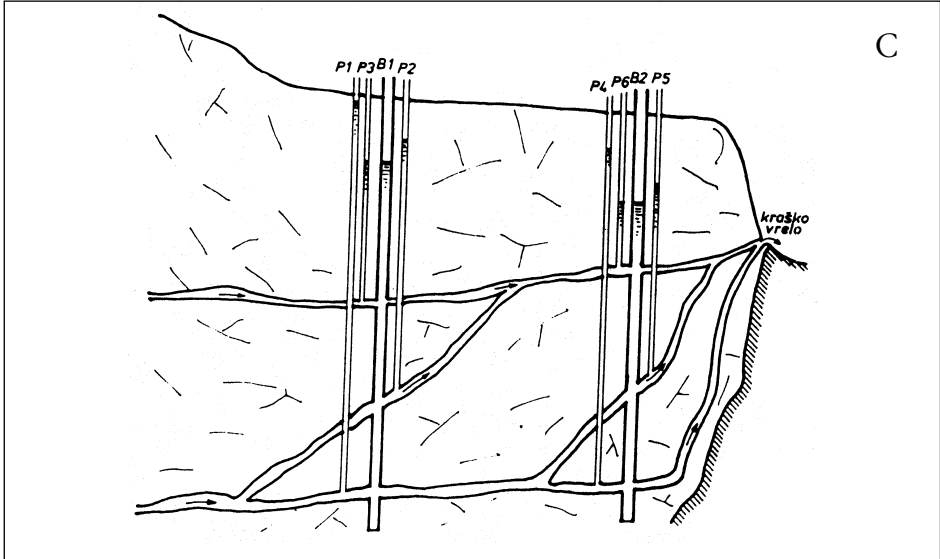
La complessità delle pressioni idrauliche che agiscono nei massicci carsici; da: Kupusović T. (1989): Measurements of piezometric pressures along deep boreholes in karst area and their assessment, "Naš Krš", Sarajevo, 15(26/27):21-30.

Nello schema A i piezometri P1 e P2 indicano che la pressione nella condotta inferiore è più alta di quella nella condotta superiore. In collegamento con entrambe, P3 si stabilizza in accordo con la pressione più bassa della condotta superiore.

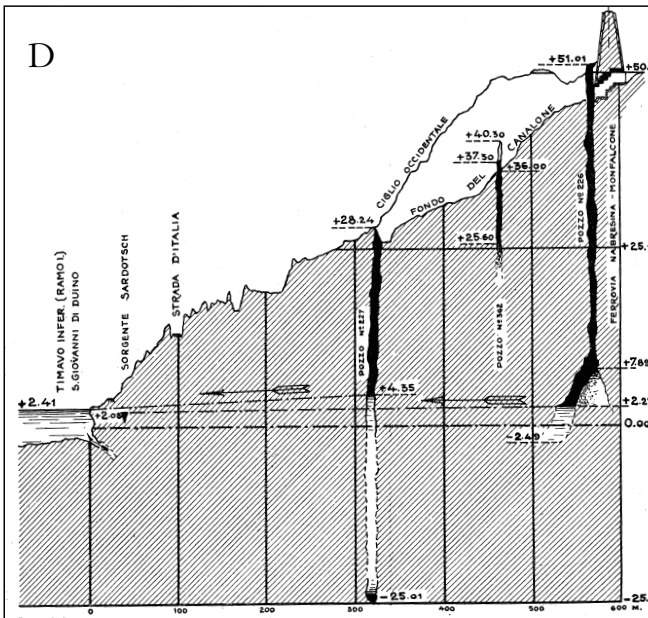
Nello schema B, che rappresenta una serie di perforazioni nella roccia calcarea, P1 e P2 indicano lo stesso livello in quanto le perforazioni giungono, sia pure a differente profondità, sempre nella medesima falda (k_1). Per lo stesso motivo, il piezometro P5 indica il livello corrispondente alla stessa superficie piezometrica. P3 e P4 indicano un livello più alto in quanto attingono in una falda più profonda (k_2), soggetta ad una pressione idraulica più alta. P6 raggiunge la medesima falda profonda, ma non è a tenuta stagna per cui attinge contemporaneamente anche nella falda superiore ed il livello si stabilizza sulla superficie piezometrica di quest'ultima.

Passando dal concetto teorico di falda al modello del reticolo di canalizzazioni (schema C), si osserva come il livello più alto si riscontri nelle perforazioni P1 e P4 che intercettano i canali più profondi dove la pressione è più elevata; il livello è più basso nelle perforazioni P2 e P5 e più basso ancora nelle perforazioni P3 e P6 che intercettano le canalizzazioni superiori. Il livello nei pozzi B1 e B2, che intercettano le canalizzazioni a varia profondità, si stabilizza sui valori minimi. I livelli del gruppo di perforazioni "a valle" sono tutti più bassi dei rispettivi livelli nelle perforazioni "a monte" per effetto della cadente piezometrica. In questo modello trova rispondenza la situazione riscontrata da Eugenio Boegan, ancora all'inizio del secolo, nei pozzi carsici vicini alle risorgive del Timavo (schema D). Da una misurazione di precisione — ripetuta per tre volte nel pozzo 226 VG "con grosso filo di ottone" — il livello dell'acqua risulta alla quota di m 2.41 alle risorgive del Timavo (con una differenza tra il





primo e il terzo ramo!), m 2.08 alla sorgente Sardos, m 4.35 nel pozzo dei Colombi (227 VG) e m 2.27 nel pozzo della Ferrovia (226 VG). Le due cavità raggiungono falde idriche diverse e sottoposte a differenti pressioni idrauliche; il pozzo dei Colombi è in collegamento diretto con le condotte principali del corso sotterraneo, più profonde e sottoposte a pressione idraulica più elevata, mentre il bacino di



“acqua morta” insaccata nel pozzo della Ferrovia è in saltuaria relazione, in occasione delle piene, con la falda più superficiale che alimenta le sorgenti Sardos. Da: Boegan E. (citato nella nota 102). Va comunque precisato che i rapporti fra il drenaggio principale del corso sotterraneo e la falda carsica cambiano col mutare del regime idrologico. Nei periodi di magra del Recca la pressione idraulica nelle grandi condotte del corso sotterraneo diminuisce al punto da diventare inferiore a quella della falda carsica ed in tali occasioni il livello della risorgive del Timavo è più basso della sorgente Sardos.

Anche nel Carso isontino viene accertata in seguito l'esistenza di "uno scorrimento idrico sotterraneo sia lungo fessure che entro canalizzazioni situate sotto il livello del mare, dove i movimenti sono più rapidi" (13) (in quanto avvengono nelle ampie condotte rimaste affogate dal recente innalzamento del mare Adriatico). Analogamente nella zona delle risorgive del Timavo, a poca distanza dalle grandi gallerie di deflusso, la roccia carsica risulta permeata da una falda idrica dispersa in un comminuto reticolo di fratturazioni. Questa falda viene drenata da una serie di spandimenti diffusi, piccole sorgenti carsiche sottomarine il cui regime sarebbe "direttamente legato alle risorgive del Timavo, anche se alle piene del fiume non corrispondono deflussi locali particolarmente abbondanti e non si notano fenomeni di torbidità delle acque in tali occasioni: i dati misurati indicano d'altronde, a conferma della connessione, un diverso comportamento chimico delle acque al variare delle portate e delle condizioni meteorologiche"¹⁶⁴ (valutazioni peraltro formulate sulla sola base di osservazioni e di misure della temperatura e della conducibilità elettrolitica dell'acqua). Queste sorgenti risultano inoltre contaminate dall'acqua salmastra con l'alternarsi delle maree, contaminazione che interessa anche l'acqua nella grotta presso la Peschiera del Timavo (3948 VG) e nella grotta nuova del Villaggio del Pescatore (5842 VG). Dalle successive indagini idrochimiche (45) quest'ultima risulta in probabile collegamento con il drenaggio principale del Timavo, a differenza della grotta presso la Peschiera che raggiunge la falda idrica dispersa, alimentata dalle acque di percolazione.

* * *

L'ipotesi del livello di base costituito da rocce impermeabili, già formulata dai vecchi autori, viene rivalutata in occasione dei nuovi studi geologici e geomorfologici avviati negli anni Settanta sull'altopiano del Carso. È un nuovo momento di collaborazione fra l'ambiente speleologico triestino e l'Istituto di Geologia dell'Università, che coordina l'applicazione del metodo della ricerca integrale sul carsismo; questo metodo consiste "nell'analisi sistematica e comparata delle varie forme carsiche superficiali e sotterranee, mediante lo studio dei rapporti intercorrenti tra le morfologie esistenti e le condizioni geolitologiche e strutturali che le hanno determinate"¹⁶⁵. Dalla campionatura litologica eseguita nella grotta di Trebicia-

164. Cucchi F., Forti F. (1983): *Primi risultati dello studio di alcune sorgenti carsiche marine presso S. Giovanni di Duino*, Atti del 6. Convegno Regionale di Speleologia del Friuli Venezia Giulia, "Mondo Sotterraneo", Udine, 7(2):67-76.

165. D'Ambrosi C. (1972): *Il "metodo della ricerca integrale sul carsismo" a proposito di fenomeni carsici, paracarsici e pseudocarsici con particolare riguardo al Carso di Trieste*, "Atti del Museo Civico di Storia Naturale", Trieste, 28(1):111-136.

no¹⁶⁶ risulta che gli ultimi cinque pozzi e la grande caverna finale sono scavati nel “complesso dolomitico” cenomaniano, considerato a suo tempo lo spartiacque sotterraneo tra il solco di Brestovizza e il solco di Aurisina. Queste rocce scarsamente carsificabili si incontrano a circa 150 metri sul livello del mare nel tratto da S. Canziano alla grotta di Trebiciano; a valle di questa si immergono progressivamente fino a centinaia di metri di profondità in corrispondenza della zona assiale del solco di Aurisina. Fabio Forti ipotizza che il Timavo sotterraneo da S. Canziano a Trebiciano si sia “scavato il suo alveo in corrispondenza del piano di contatto tra i soprastanti calcari e le sottostanti dolomie, erodendo quest’ultime” (35). Egli ritiene che nel tratto a monte della grotta di Trebiciano le acque scorrano incanalate a pelo libero e in condizioni di sospensione (cioè più alte del livello di base), mentre nel tratto a valle scorrono sotto il livello del mare, parte in una canalizzazione “assai frazionata” e parte nei sistemi di fratturazione della roccia (ipotesi che ricalca il “ricco e assai diffuso sistema vascolare intercomunicante” di Carlo D’Ambrosi).

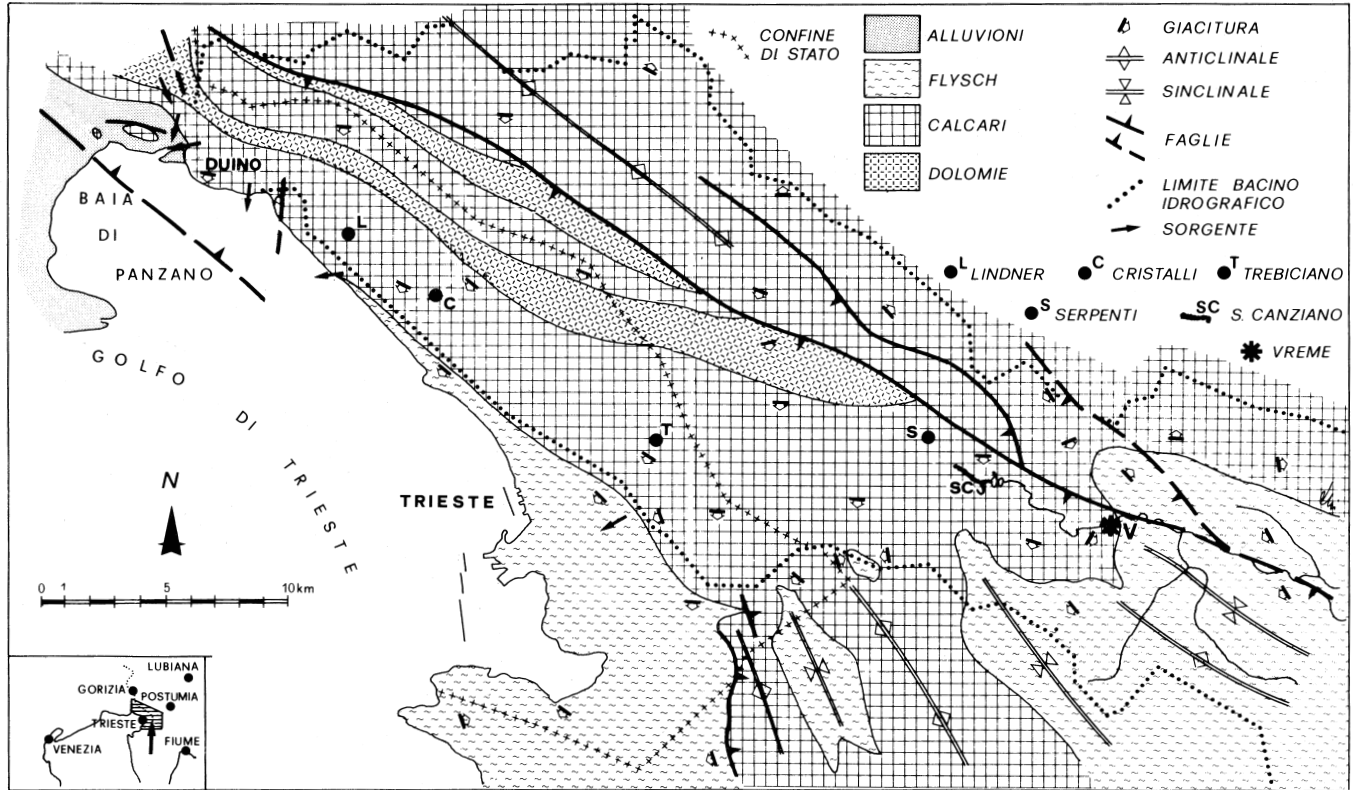
In realtà le canalizzazioni si spingono ben al di sotto del contatto calcari-dolomie, che dovrebbe costituire il piano di scorrimento della circolazione idrica profonda. Nella grotta di Trebiciano, tutta la parte inferiore della cavità si è sviluppata all’interno del complesso dolomitico per una profondità di oltre 150 metri: la alleria immissaria — in una situazione di ringiovanimento morfologico — si sviluppa a nove metri sotto il livello del mare, effetto questo del “recente” innalzamento dell’acqua di base carsica di cui diremo più avanti. Del resto vengono avanzati seri dubbi sulla reale incarsificabilità delle dolomie e dei calcari dolomitici, una volta che la loro compagine sia stata intersecata da un esteso sistema di fratturazioni; tali rocce inoltre, più resistenti del calcare al potere dissolvente delle acque, lo sono di meno nei riguardi della loro azione erosiva. L’eventuale funzione di livello di base del complesso dolomitico e la conseguente condizione di “sospensione” della circolazione idrica sotterranea deve pertanto ritenersi limitata soltanto ad una fase iniziale del suo sviluppo.

166. Ulcigrai F. (1977): *Successione stratigrafica dell’Abisso di Trebiciano*, “Atti e Memorie della Commissione Grotte E. Boegan”, Trieste, 16/1976:21-44.

Forti F., Semeraro R., Ulcigrai F. (1979): *Carsogenesi e geomorfologia dell’Abisso di Trebiciano (Carso Triestino)*, “Atti e Memorie della Commissione Grotte E. Boegan”, Trieste, 18/1978:51-100.

In precedenza viene già segnalata la presenza di ghiaie dolomitiche, sicuramente autoctone, al fondo della grotta di Trebiciano; si veda:

Bussani M. (1970): *Segnalazione sul ritrovamento di ghiaie dolomitiche nella caverna “Lindner” nell’abisso di Trebiciano*, “Atti e Memorie della Commissione Grotte E. Boegan”, Trieste, 9/1969:63-64.



“Carta geologica schematica del bacino idrografico inferiore del Fiume Timavo”; da Cucchi F., Forti F. (19).

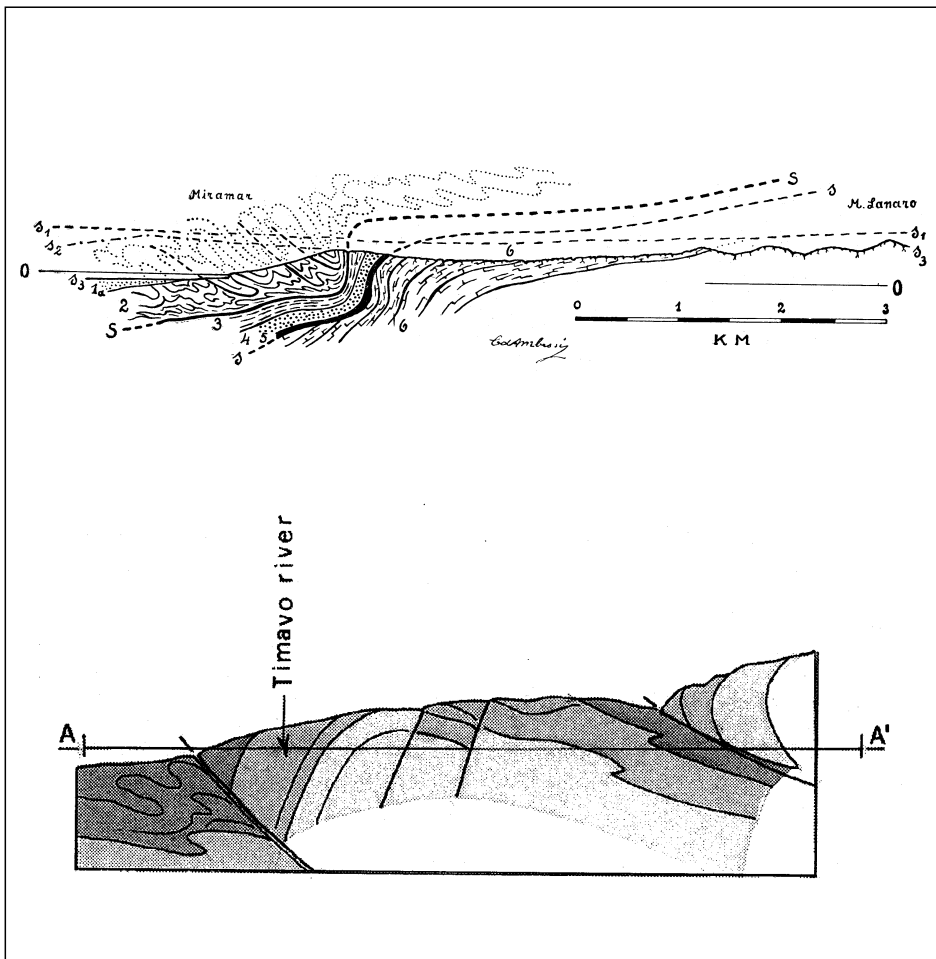
Una nuova interpretazione strutturale dell'altopiano del Carso viene formulata nel 1981 da Ladislav Placer del Servizio geologico di Lubiana¹⁶⁷. L'ampia anticlinale debolmente asimmetrica dei vecchi autori (con una flessura "a ginocchio" al margine sud-occidentale) sarebbe in realtà una piattaforma dislocata da modesti horst e graben, con una netta prevalenza degli elementi disgiuntivi sugli elementi plicativi. La struttura non sarebbe radicata al substrato bensì parzialmente sovrascorsa sull'antistante piattaforma di Capodistria e del golfo di Trieste; la traslazione sarebbe più accentuata ed evidente verso sud, nella "struttura embriata della Ciceria". Questo "complesso parautoctono" sarebbe a sua volta sovrascorso sull'autoctono istriano in corrispondenza della faglia di Buie.

La nuova interpretazione implica un differente rapporto tra flysch e calcare al margine sud-occidentale dell'altopiano¹⁶⁸, dove le acque sotterranee del Carso traboccano nel mare. Il tamponamento impermeabile delle rocce arenaceo-marnose, che costituisce con poche interruzioni la linea di costa del Carso triestino, non risulta infatti semplicemente addossato alla piattaforma calcarea (in quanto stratigraficamente più elevato) né semplicemente scivolato e ripiegato lungo il suo margine per colamento gravitativo (come un tempo si è creduto); la piattaforma calcarea risulta invece sovrascorsa sul flysch per una distanza non ancora valutata, lungo un piano di scorrimento poco inclinato sull'orizzontale. Procedendo verso sud-est tale piano si presenta sdoppiato in più faglie parallele, assetto tettonico che risulta meglio evidente nella "struttura embriata della Ciceria", dove tra l'altro le gallerie

167. Placer L. (1981): *Geološka zgradba jugozabodne Slovenije (Geologic structure of southwestern Slovenia)*, "Geologija", Ljubljana, 24(1):27-60.

168. Forti F. (1998): *Condizionamenti idrogeologici tra calcare e flysch*, "Sopra e sotto il Carso", Centro Ricerche Carsiche C. Seppenhofer, Gorizia, 4:30-35.

Nella pagina a fronte: il complesso dolomitico superiore (fascia più estesa) sembra effettivamente rappresentare un elemento di separazione idrogeologica fra la zona meridionale (corso sotterraneo del Timavo) e quella settentrionale dell'acquifero carsico. Questo settore contiene acqua di fondo di migliore qualità, originata dai sostanziali contributi dell'infiltrazione primaria (meteorica), che sono ben distribuiti attraverso l'ampia area carsica. Prima di raggiungere le risorgive, queste acque si mescolano con quelle di cattiva qualità circolanti nel drenaggio principale del Timavo sotterraneo, migliorandone in tal modo le caratteristiche soprattutto durante i periodi di magra. Si veda: Civita M. et al. (15); per una sintesi geologica: Cucchi F., Pugliese N., Ulcigrai F. (1990): Il Carso Triestino, note geologiche e stratigrafiche, "International Journal of Speleology", 18/1989(1-2):49-64; per vari approfondimenti, conoscitivi e bibliografici: Proceedings of the International Symposium on Evolution of the Karstic Carbonate Platform, Trieste 1987, "Memorie della Società Geologica Italiana", Roma, 1989.



Il rapporto flysch-calcareo al margine sud-occidentale del Carso nelle diverse interpretazioni.

Sopra: fessura con scivolamento gravitativo; da: D'Ambrosi C. (1959): Sul colamento per gravità del Flysch lungo la riviera di Trieste, "Bollettino della Società Adriatica di Scienze Naturali", Trieste, 49/1958-59:102-136. Legenda: 0. livello del mare; 1a. depositi recenti e attuali; 2. flysch interessato dal fenomeno di colamento gravitativo; 3. calcareo a nummuliti e alveoline; 4. calcareo a milioliti; 5. formazione spilecciana; 6. serie dei calcari a rudiste; S. superficie di slittamento del flysch sul calcareo; s. superficie di spianamento senoniana; s1. superficie di spianamento cattiano-langhiana; s2. superficie del suolo intorno alla metà del Pliocene; s3. superficie del suolo attuale.

Sotto: sovrascorrimento; da: Eraso A. et al. (28). Sezione geologica semplificata del Carso triestino, che ne evidenzia le caratteristiche strutturali. In grigio scuro il flysch, in grigio medio i calcari e in grigio chiaro le dolomie e i calcari dolomitici.

della grotta di Ospò, incise nel flysch e con il tetto di calcare, sono sviluppate appunto lungo il piano di scorrimento inclinato¹⁶⁹. Lungo la costa, dove il tamponamento arenaceo-marnoso s'interrompe sul fianco del Carso e scende quasi al livello del mare, risulta evidente — sia pure in settori molto circoscritti — la sovrapposizione sul flysch delle rocce calcaree¹⁷⁰. Altrove i piani di scorrimento sono di individuazione molto difficile, in quanto non mettono a contatto il calcare con il flysch, bensì il flysch con sé medesimo ed attraversano le pendici estremamente antropizzate delle colline addossate all'altopiano; la parte stratigraficamente superiore della formazione marnoso-arenacea della piattaforma di Capodistria e del golfo risulta in tal modo sovrastata dalle arenarie stratigraficamente inferiori ("Untere Flyschsandsteine" di Guido Stache), sospinte e corrugate, pertinenti alla piattaforma sovrascorsa del Carso (3).

Come sarebbe confermato dalle persistenti sospensioni argillose nelle sorgenti di Aurisina — di cui si è detto — questo piano di contatto arginerebbe verso il mare il deflusso delle acque carsiche orientato lungo l'asse strutturale dell'altopiano; le sorgenti costiere sarebbero da mettere in relazione con i sistemi di fratture sub-verticali ad andamento antidinarico (con direzione NE-SW), che intersecano l'asse strutturale dell'altopiano e le direttrici del drenaggio sotterraneo¹⁷¹. Ancora nel 1985 Fabio Forti ha segnalato l'esistenza di una faglia a piano subverticale, però "con direzione SE-NW, leggermente divergente rispetto alla linea di costa, in corrispondenza delle sorgenti di Aurisina", ipotizzando "la risalita delle acque del Timavo sotterraneo lungo tale piano"¹⁷². Ulteriori studi hanno però chiarito, confermando le vecchie ipotesi, che in regime normale e di magra fuoriesce da queste sorgenti l'acqua proveniente in prevalenza da una falda carsica locale; soltanto nelle forti piene sono accertate "risalite" di acqua dalle condotte profonde del corso sotterraneo del Timavo.

169. Malečkar F., Morel S. (1987): *Osapska jama v Bržaniji*, "Naše Jame", Ljubljana, 29:47-49.

170. Carulli G.B., Cucchi F. (1991): *Proposta di interpretazione strutturale del Carso Triestino*, "Atti Ticinesi di Scienze della Terra", Pavia, 34:161-166

171. Cucchi F., Forti F. (1983) citato nella nota 164; Cucchi F. (1994) citato nella nota 211.

172. Forti F. (1985): *Fenomeni di carsismo marino (studi sul Carso Triestino)*, "Atti e Memorie della Commissione Grotte E. Boegan", Trieste, 23:47-60.