

## Tavola 6.2 Isotopi nel ciclo dell'acqua

### Introduzione

La maggior parte degli elementi costitutivi della materia elementare si compongono di una amalgama di isotopi stabili o radioattivi differenziabili tra loro grazie al numero di neutroni di cui è composto il nucleo dell'atomo. Nel corso di processi fisico-chimici, un frazionamento isotopico ha luogo a causa della differenza di massa atomica, gli isotopi leggeri essendo globalmente più mobilizzabili rispetto agli isotopi pesanti. I rapporti isotopici tra l'ossigeno-18 e l'ossigeno-16 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , ossigeno con 10 rispettivamente 8 neutroni nel nucleo) da un lato e tra il deuterio e l'idrogeno dall'altro ( $^2\text{H}/^1\text{H}$ , idrogeno con 1 rispettivamente 0 neutroni nel nucleo), rivestono un interesse particolare per lo studio dei processi di frazionamento isotopico nel ciclo naturale dell'acqua. Le informazioni sull'età delle acque sono ricavate dal rapporto isotopico tra il trizio e l'idrogeno ( $^3\text{H}/^1\text{H}$ , idrogeno con 2 rispettivamente 0 neutroni nel nucleo). Detti isotopi si ritrovano in ogni tipo di acqua e sono quindi da considerarsi come i traccianti naturali ideali dei processi idrologici.

### Gli isotopi stabili della molecola acqua

Per ogni milione di molecole d'acqua (ovverossia l'equivalente in atomi di ossigeno ed il doppio in atomi di idrogeno), si osservano in media circa 2000 atomi di ossigeno-18 e 300 di deuterio. Detta composizione varia tuttavia in seguito a cambiamenti di fase per frazionamento isotopico. Durante l'evaporazione per esempio, le molecole costituite da isotopi leggeri saranno tendenzialmente più portate verso la fase gassosa. L'acqua residuale sarà quindi arricchita in isotopi pesanti. Viceversa durante il processo di condensazione di vapore, saranno piuttosto le molecole pesanti a passare ad uno stato di condensato che non le leggere. La fase di vapore sarà dunque impoverita in isotopi pesanti. Il rapporto tra i coefficienti di frazionamento dell'ossigeno-18 e del deuterio è responsabile della relazione lineare della figura 7. I valori si allineano lungo una retta meteorica, caratteristica della regione in esame. Gli scarti a questa retta dei valori corrispondenti alle acque naturali, possono essere indice di processi quali evaporazioni prima dell'infiltrazione o di scambi con acquiferi rocciosi (per esempio le acque termali).

Delle pur minime variazioni nel tenore in isotopi stabili sono misurabili tramite spettrometria di massa. I rapporti isotopici sono espressi in  $\delta$  [‰], scarto relativo tra il campione e lo standard di riferimento (VSMOW) rappresentativo dell'acqua oceanica (cfr. didascalia della cartina). La maggior parte delle acque presenti alla superficie della terra provengono da questo serbatoio oceanico per evaporazione, onde per cui sono impoverite in isotopi pesanti rispetto al valore di riferimento ( $\delta$  negativo).

### Variazioni climatiche

I rapporti isotopici nelle precipitazioni sono fortemente influenzati dalle stagioni, in quanto che il frazionamento isotopico durante i cambiamenti di fase è funzione della temperatura (fig. 3): in estate, le precipitazioni sono arricchite in ossigeno-18, allorché in inverno, con temperature medie basse, ne sono impoverite. Questo fenomeno si stempera per aggiunta di nuovi apporti sia nelle acque di superficie come pure in quelle sotterranee (c.f. cartina). La distribuzione annua dei rapporti isotopici nel corso degli ultimi tre decenni, seppur differente da un anno all'altro (fig.2), mostra comunque una tendenza all'arricchimento in isotopi pesanti (fig. 1). Questo andamento potrebbe essere in relazione al riscaldamento globale del clima o ad un cambiamento dell'origine delle precipitazioni. La figura 6 mostra come queste variazioni nei rapporti isotopici si osservino anche nell'intervallo di tempo di un rovescio, nel quale caso il fenomeno è da mettere in relazione all'impoverimento progressivo di alcune parti dell'ammasso nuvoloso, durante l'avanzarsi del fronte caldo o freddo. Dietro questi fronti le precipitazioni sono tipicamente impoverite in corrispondenza del centro di massa dell'accumulo nuvoloso. I rapporti isotopici medi alla stazione di Locarno-Monti (fig.1), mostrano altresì la dipendenza alle condizioni climatiche regionali, in effetti i valori vicini allo zero sono indice d'una componente di acque arricchite d'origine mediterranea e di un clima mite.

## Effetti dovuti all'altitudine

Quando una nuvola s'innalza in prossimità dei rilievi montuosi, l'acqua ch'essa contiene s'impoverisce vieppiù in isotopi pesanti (fig. 1, Meiringen–Guttannen–Grimsel). Questo fenomeno è dovuto alla diminuzione della temperatura di condensazione a seguito della diminuzione della pressione atmosferica e d'altri fattori di minore importanza, quali l'evaporazione delle goccioline di pioggia durante la loro caduta al suolo. Nonostante il contributo di svariati altri parametri, si può definire una relazione più o meno lineare tra gli isotopi stabili e l'altitudine (fig. 4). Gli isotopi stabili sono quindi particolarmente adatti alla determinazione dell'altitudine media di un bacino imbrifero (quota di ricarica) per le regioni montane (fig. 12), pur considerando la periodicità stagionale delle variazioni isotopiche nelle piogge, come pure della variazione spaziale e temporale dell'effetto d'altitudine (fig. 4,5). In genere delle analisi isotopiche su un campione cumulativo mensile sono sufficienti, ma si presterà attenzione ad adattare la frequenza dei prelievi e la localizzazione dei pluviometri al problema in esame, come pure ai fondi stanziati per lo studio. I contrasti di rapporto isotopico permettono altresì di identificare le differenti parti di una piena con contributi d'acque fluviali, impoverite in isotopi pesanti, a causa dell'elevata altitudine della loro quota di ricarica, di piogge locali e di apporti provenienti dalle acque di falda (fig. 11).

## L'isotopo radioattivo della molecola acqua

Il trizio è l'unico isotopo radioattivo dell'idrogeno. Instabile, si disintegra, con un tempo di dimezzamento di 12.43 anni, emettendo un elettrone. È proprio questa radiazione  $\beta^-$  che permette di identificare, tramite contatori a scintillazione, la presenza di seppur minime quantità di trizio nelle acque naturali. Per comodità si è introdotta una unità di misura specifica per la quantificazione del trizio nelle acque: l'unità di trizio (TU, cfr. didascalia della cartina).

Il trizio è naturalmente prodotto tramite l'azione di raggi cosmici sull'azoto atmosferico. Ma la maggior parte del trizio attuale è d'origine antropica. In effetti tra il 1952 ed il 1963, all'apice della corsa agli armamenti atomici, la radioattività in trizio delle precipitazioni si è vista moltiplicare di un fattore mille, a causa degli esperimenti nucleari di superficie. Dal 1963, data della firma dei trattati per la moratoria sugli esperimenti nucleari di superficie, i valori di trizio vanno diminuendo regolarmente (fig. 8).

Dall'uso a carattere militare, si è passati l'impiego del trizio a scopo pacifico per fini industriali (fig. 8). Alcune regioni industriali della Svizzera si caratterizzano per un alto grado di emissioni; è il caso del Giura (industria orologiera) come pure di Berna e di Teufen, nel cantone di Appenzello (fabbrica di lampadine luminescenti). Le centrali nucleari di Gösgen, Leibstadt, Beznau e Mühleberg, come pure la sede dell'Istituto Paul Scherrer (PSI, Villigen, Argovia) sono fonte di immissione antropica di trizio nel ciclo dell'acqua. L'insieme di queste attività porta a dei valori di concentrazione elevati di trizio negli elementi del ciclo dell'acqua nelle immediate vicinanze dei siti precipitati [14]. A valle di scariche di rifiuti domestici o industriali si può utilizzare il trizio, del quale sono spesso ricche (prima dell'entrata in vigore dell'Ordinanza sulla radioprotezione ORaP del 22.6.1994), come tracciante dell'inquinamento delle falde acquifere (fig.10).

## Determinazione del tempo di residenza delle acque sotterranee

Per uno sviluppo sostenibile delle risorse d'acqua sotterranea è necessario conoscere e poter misurare l'età dell'acqua. La radioattività del trizio ne fa un mezzo particolarmente adatto alla datazione di acque datanti tutt'al più di alcune decine di anni. L'effetto del sistema idrogeologico sulla concentrazione in trizio è simulabile numericamente grazie a dei modelli di mescolamento. La figura 9 illustra l'approccio utilizzato per la determinazione del tempo di residenza delle acque sotterranee.

## La rete federale d'osservazione degli isotopi

Il Servizio idrologico e geologico nazionale (SIGN) in collaborazione con l'Università di Berna (Istituto di fisica) e l'Università di Losanna (Istituto di mineralogia e petrografia), si occupa dal 1992 di valorizzare una rete di osservazione finalizzata alla messa a disposizione degli utenti delle serie di misurazioni utilizzabili come riferimento per l'interpretazione dei dati isotopici [10,11]. Le analisi isotopiche vengono realizzate dai due istituti universitari precitati. Le stazioni svizzere della rete mondiale dell'Agenzia internazionale per l'energia atomica (AIEA) e dell'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM), alcune delle quali in funzione già dal 1966, sono ora parte integrante della rete federale svizzera. Essa comprende 18 stazioni: 11 per le precipitazioni, 6 per le acque fluviali ed una, recentemente integrata, per quanto riguarda le acque sotterranee (sorgente Lutry, molassa burdigaliana del Jorat, stazione del GEOLEP). L'insieme dei dati è trasmesso al SIGN dove è messo a disposizione degli interessati. Un gruppo di esperti («Isotopi e ambiente»), sotto l'egida del SIGN, presiede al funzionamento della rete. Un censimento delle principali stazioni svizzere d'osservazione degli isotopi della molecola dell'acqua è stato realizzato sul periodo tra il 1986 ed il 1998 da parte del SIGN in collaborazione con il Politecnico federale di Losanna (GEOLEP) (cfr. cartine, tabella). Questo inventario informatizzato è consultabile tramite il SIGN (CDS, Catalogue of Data Sources).

## Conclusioni

Seppure gli isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno non siano i soli utili per gli studi idrologici (gli isotopi del carbonio, dello zolfo, dell'azoto, del piombo, dell'uranio, del torio, dello stronzio, dell'argon, del radon e del cripto sono altresì utilizzati), essendo parte della molecola dell'acqua, sono pertanto da considerarsi come i soli traccianti veramente conservativi in idrologia. Grazie ai metodi isotopici, idrologi ed idrogeologi dispongono di un mezzo efficace e polivalente, le cui possibili applicazioni vanno ben aldilà dei pochi esempi illustrati prima [1,2]. Questo lavoro è stato realizzato su mandato del SIGN. J.-P. Tripet, P. Buttet, D.A. Grasso, T. Herold e R. Kozel hanno seguito il progetto da parte di quest'organo. Il gruppo d'esperti «Isotopi e ambiente» ha fatto un'attenta analisi della tavola; con numerosi consigli ha contribuito alla sua definizione.

## Bibliografia

- [1] **Clark, I., Fritz, P. (1997):** Environmental isotopes in hydrogeology. New York.
- [2] **Etcheverry, D. (1997):** Valorisation des méthodes isotopiques dans la pratique de l'hydrogéologie (oxygène-18, deutérium, tritium). Rapport interne du GEOLEP (EPF de Lausanne) pour le Service hydrologique et géologique national, Berne.
- [3] **Etcheverry, D., Parriaux, A. (1998):** Les méthodes isotopiques dans la pratique de l'hydrogéologie. In: Gas–Wasser–Abwasser 1/98:10–17, Zürich.
- [4] **Etcheverry, D., Perrochet, P. (1999):** Reservoir theory groundwater transit-time distributions and lumped parameter models. In: International Atomic Energy Agency (Ed.): Proc. Int. Symp. Isotope Techniques in Water Resources Development and Management, 10–14 May, Vienna (CD-ROM), Wien.
- [5] **Etcheverry, D., Perrochet, P. (2000):** Direct simulation of transit-time distributions using the reservoir theory. In: Hydrogeology Journal 8:200–208, Berlin, Heidelberg.
- [6] **Iorgulescu, I. (1997):** Analyse du comportement hydrologique par une approche intégrée à l'échelle du bassin versant. Application au bassin versant de la Haute-Mentue, Thèse no. 1613 de l'EPFL, Lausanne.
- [7] **Kissling, O. (1998):** Anwendung und Evaluation verschiedener Methoden im Rahmen der Voruntersuchungen belasteter Standorte am Beispiel zweier ehemaliger Deponien im Aaregäu (SO). Dissertation Nr. 12754 der ETHZ, Zürich.
- [8] **Maréchal, J.-C. (1998):** Les circulations d'eau dans les massifs cristallins alpins et leurs relations avec les ouvrages souterrains. Thèse no. 1769 de l'EPFL, Lausanne.
- [9] **Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R. (1993):** Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart, P.K. et al. (Eds.): Climate Change in Continental Isotopic Records, Geophysical Monograph Series 78/1993:1–36, Washington.
- [10] **Schotterer, U. et al. (1995):** Isotope im Wasserkreislauf. Ein neues eidgenössisches Messnetz. In: Gas–Wasser–Abwasser 9/95:714–720, Zürich.
- [11] **Schotterer, U. et al. (2000):** Das Schweizer Isotopen-Messnetz: Trends 1992–1999. In: Gas–Wasser–Abwasser 10/2000:733–741, Zürich.
- [12] **Stichler, W., Schotterer, U. (2000):** From accumulation to discharge: modification of stable isotopes during glacial and post-glacial processes. In: Gibson, J.J., Prowse, T.D. (Eds.): Hydrological Processes Special Issue: Isobalance, Vol. 14/8:1423–1438, New York.
- [13] **Vitvar, T. (1998):** Water residence times and runoff generation in a small prealpine catchment (Rietholzbach, Northeastern Switzerland). Dissertation Nr. 12298 der ETHZ, Zürich.
- [14] **Völkle, H., Neu, A., Weimer, S. (1995):** Altlast Tritium? Tritium aus industriellen Anwendungen in der Umwelt: Messungen in Süddeutschland und in der Schweiz. In: Strahlenschutzpraxis 3/95:30–35, Köln.