Caratterizzazione idrogeochimica e qualità delle acque di un acquifero ospitato entro rocce metamorfiche nella Calabria nord occidentale

Carmine Apollaro¹, Andrea Bloise¹, Rosanna De Rosa¹, Luigi Marini², Domenico Miriello¹, Francesco Muto¹, Maurizio Polemio³

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università della Calabria, apollaro@unical.it; andrea.bloise@unical.it; derosa @unical.it; miriello@unical.it; mutofr@unical.it

²Laboratorio di Geochimica, Dip. Te. Ris., Università di Genoa, Imarini@dipteris.unige.it ³CNP, IPPI, Pari, m polomio@ba.imi.orr.it

³CNR-IRPI, Bari, m.polemio@ba.irpi.cnr.it

Groundwater quality and hydrogeochemical characteristics of a metamorphic aquifer in Northern Calabria

ABSTRACT: This paper illustrates the results of an hydrogeological and geochemical study of an aquifer hosted into metamorphic rocks in north-western Calabria. The characteristics of the aquifer were investigated through chemical analyses of 35 samples of spring water, 23 samples of stream water and 4 samples of rain water. On the basis of Langelier-Ludwig classification diagram, most of the analyzed samples show a Ca-HCO₃ composition; few samples fall in the Na-Cl field suggesting immature composition typical of coastal areas. This is confirmed by the salinity values ranging from 0.2-0.7 meq/l from rain waters to 12-17 meq/l from fluvial and spring waters. The knowledge of the complex hydrogeological environment, the chemical composition of waters and the interpretation of geochemical maps allow us to define flow domain, groundwater quality and degradation processes affecting the studied aquifer.

Key terms: Geochemistry, Water quality, Metamorphic aquifer, Contamination *Termini chiave:* Geochimica, Qualità delle acque, Acquifero metamorfico, Contaminanti

Riassunto

In questo lavoro vengono riportati i risultati di un'indagine idrogeologica e geochimica condotta su un acquifero ospitato entro rocce metamorfiche nella Calabria nordoccidentale.

In particolare sono stati campionati ed analizzati 35 campioni di acque di falda, 23 campioni di acque fluviali e 4 campioni di acque di pioggia. La classificazione chimica delle acque, effettuata attraverso il diagramma quadrato di Langelier-Ludwig, mostra che la maggior parte delle acque campionate appartiene alla facies bicarbonato-calcica, con qualche campione a minore salinità che risente ancora della composizione cloruro-sodica, tipica delle acque di pioggia delle regioni costiere. Questa variazione composizionale è accompagnata da una variazione di salinità da 0.2-0.7 meq/l nelle acque piovane a 12-17 meq/l nelle acque fluviali e sorgive.

Considerazioni sulla composizione chimica delle acque sorgive e fluviali, associate ad informazioni di carattere idrogeologico e alla interpretazione di carte tematiche consentono di definire i domini di flusso, lo stato qualitativo delle acque sotterranee e i processi di degradazione qualitativa.

Introduzione

Le acque sotterranee rappresentano un patrimonio natura-

le di notevole rilevanza socio-economica per l'intero territorio dell'Italia meridionale, le cui popolazioni le utilizzano sia per usi irrigui che per usi potabili.

La crescente domanda idrica, le sempre più frequenti siccità ed il degrado qualitativo subito da alcune tra le risorse tradizionalmente utilizzate (Pearce, 1994) spingono ad estendere le conoscenze anche agli acquiferi in roccia, finora non compiutamente caratterizzati o utilizzati, sia per la frequente minore entità delle portate sorgive attese, sia per l'intrinseca complessità delle condizioni geologico-strutturali, che svolgono un ruolo determinante per la circolazione idrica sotterranea entro questi corpi. In questo contesto si inserisce la presente nota, che condensa gli studi svolti al fine di validare, mediante un approccio prevalentemente geochimico, il modello idrogeologico concettuale di un area montuosa posta sul versante tirrenico della Calabria centro-occidentale, al confine tra le province di Catanzaro e Cosenza, demarcato dal corso del Fiume Savuto (Figura 1).

Inquadramento geologico ed idrogeologico

L'area oggetto del presente lavoro è costituita dal bacino idrografico del Fiume Grande, affluente di sinistra del Fiume Savuto, ed include i centri abitati di Nocera Terinese, San Mango d'Aquino e Pietrebianche.

Il bacino del Fiume Grande ha una superficie di circa



Figura 1 – Carta geologica semplificata dell'area in esame con l'ubicazione delle acque di falda e di superficie campionate. Legenda: 1- acque meteoriche; 2- acque fluviali; 3- acque sorgive; 4- depositi marini e fluviali; 5- scisti verdi; 6- filladi; 7- superficie piezometrica superficiale: 8- superficie piezometrica profonda.

Figure 1 – Geological sketch map of the study area and location of groundwater and stream water samples. Legend: 1- meteoric waters; 2- fluvial waters; 3- spring waters; 4- fluvial and marine deposits; 5- greenstones; 6- Phyllites; 7- Superficial water table; 8- Deep water table.

37 Km², presenta una valle principale con una spiccata asimmetria; il reticolo idrografico include aste secondarie orientate all'incirca NNO-SSE, con evidente controllo strutturale, ed un'asta principale orientata NE-SO, ad andamento parallelo al Fiume Savuto. L'asimmetria è messa in evidenza da un versante settentrionale acclive in netto contrasto con quello meridionale meno acclive e che raggiunge la quota di 1000 metri s.l.m. Il reticolo idrografico ha un pattern dendritico con sottobacini che mostrano una spiccata tendenza all'approfondimento. Le sorgenti censite si dispongono quasi esclusivamente sul versante sinistro ed all'interno dei bacini minori, presentando una buona distribuzione areale ed altimetrica.

Le rocce più antiche dell'area appartengono al gruppo filladico o Unità del Frido, del Cretacico (Amodio Morelli et al., 1976; Piccarretta e Zirpoli, 1970), costituita in prevalenza da argilloscisti, filladi quarzifere e quarziti che, nella parte più elevata, passano a metareniti e metarcose conglomeratiche.

Su queste metamorfiti poggiano metabasiti, serpentiniti, filladi e metareniti afferenti all'Unità di Gimigliano di età Giurassico-Cretacico. L'acquifero metamorfico è caratterizzato dall'alternanza di rocce litoidi, quali quarziti, e filladi a grana fina. La deformazione delle metamorfiti ha portato alla sovrapposizione di ammassi rocciosi fratturati confinati e sospesi da intervalli semipermeabili o impermeabili. Tale carattere strutturale, unitamente all'originaria struttura del protolite con alternanza tra sedimenti a diversa granulometria (arenarie e peliti), provoca nell'acquifero un'accentuata disomogeneità e anisotropia. L'ammasso roccioso presenta, infatti, permeabilità relativa generalmente bassa, salvo lungo le discontinuità principali e lungo le fratture (Ippolito et al., 1979; Allocca et al., 2003). L'acquifero è riferibile ad un sistema multi-falda, il cui spessore complessivo è di qualche centinaio di metri. In tale contesto, nel bacino considerato, la circolazione idrica sotterranea, che alimenta le sorgenti censite, avviene negli intervalli relativamente superficiali dell'acquifero metamorfico. La portata di ciascuna sorgente è comunque bassa, in genere inferiore al litro al secondo.

Campionamento ed analisi

Nell'area di studio sono state campionate le acque sotterranee in 37 sorgenti e le acque fluviali in 22 punti, con una densità media di campionamento superiore a 1 campione per km²; inoltre, all'interno del bacino, sono stati raccolti 4 campioni di acqua piovana (Figura 1) (Apollaro et al., 2007). La campagna di campionamento è stata effettuata nel mese di giugno 2003 per le acque fluviali e nel mese di novembre 2003 per le sorgenti.

Per ogni campione di acqua sorgiva o fluviale sono stati misurati direttamente in campagna alcuni parametri chimico-fisici, alcuni dei quali intrinsecamente instabili: temperatura, pH, conducibilità elettrica specifica, potenziale ossido-riduttivo e portata. Inoltre, ogni giorno al ritorno dal campionamento, è stata determinata l'alcalinità totale per titolazione con HCl 0.1 N utilizzando il metilarancio come indicatore. Per ogni campione sono state raccolte due aliquote per le successive analisi di laboratorio, ossia un'aliquota filtrata per la determinazione degli anioni ed una aliquota ed acidificata con HNO₃ concentrato per la determinazione dei cationi. La filtrazione è stata eseguita direttamente in sito, utilizzando membrane di acetato di cellulosa da 0.45 µm.

In particolare, i contenuti in fluoro, cloro, nitrati e solfati sono stati determinati tramite cromatografia ionica. Il grado di alcalinità è stato ottenuto per titolazione acidimetrica, mentre il contenuto in Ca, Mg, Na, K e Si in spettrometria di emissione atomica con sorgente di plasma ad accoppiamento induttivo.

Le analisi sono state eseguite presso i laboratori del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università della Calabria, generalmente entro pochi giorni dal prelievo.

La precisione è stata valutata sulla base di tre repliche di ciascun dato analitico, utilizzando la relazione RSD = s/x, dove s è la deviazione standard e x la media delle misure (Shaw, 1969). L'accuratezza è stata determinata, per ciascuna seduta analitica, attraverso l'analisi di uno standard certificato (SRM1643d). La precisione e l'accuratezza per la maggior parte degli elementi minori e in traccia sono risultate minori o uguali al 10%. Come quantità più bassa significativamente misurabile si è scelto il limite di determinazione quantitativa (LOQ, Limit Of Quantitation) pari a 10 volte il valore della deviazione standard ricavata dalle analisi del bianco, analizzato più volte durante le sedute analitiche. Per ogni campione di acqua, infine, è stato calcolato il bilancio delle cariche, che è sempre risultato inferiore a $\pm 10\%$ (Biddau et al., 2005).

Confronto fra caratteristiche chimiche delle acque campionate e quelle delle precipitazioni

Per effettuare il confronto tra acque di precipitazione meteorica, di sorgente e del deflusso fluviale sono stati utilizzati diagrammi di correlazione fra le varie specie chimiche ed il cloruro (Marini e Ottonello, 1997). Il cloruro è stato scelto come variabile di riferimento non tanto perché rappresenta il tipico tracciante degli aerosol marini, quanto perché viene acquisito in misura trascurabile dalle acque di origine meteorica nel corso della interazione acqua-roccia, soprattutto durante le prime fasi, a meno che non siano implicate rocce particolari quali le evaporiti, peraltro totalmente assenti nell'area investigata. I diagrammi di correlazione sono tracciati in scala logaritmica perché i contenuti di alcune specie chimiche variano di diversi ordini di grandezza passando dalle precipitazioni atmosferiche alle acque fluviali e sorgive.

Dall'analisi dei diagrammi di Figura 2 si osserva come le concentrazioni di alcune delle principali specie chimiche disciolte nelle acque fluviali e sorgive sono ben maggiori di quelle delle piogge e non sono pertanto spiegabili in base all'apporto degli aerosol marini ed agli altri processi, sia naturali che antropici, che controllano le caratteristiche chimiche delle precipitazioni atmosferiche.

In particolare, si osserva che il solfato disciolto nelle piogge è confrontabile o a volte superiore a quello atteso per dissoluzione del sale marino trasportato in atmosfera. Le acque sorgive presentano contenuti di solfato variabili da alcuni ppm ad alcune decine di ppm. Queste alte concentrazioni sono probabilmente riconducibili a dissoluzione ossidativa della pirite, nel corso dell'interazione acqua-roccia in presenza di ossigeno.

La concentrazione di nitrato presente nelle acque sorgive/fluviali è, rispetto a quella misurata nelle acque di pioggia, da simile, in ordine di grandezza, a decisamente maggiore, fino a 1-2 ordini di grandezza. In entrambi i tipi di acque "interne", le concentrazioni di nitrato sono decisamente superiori ai valori attesi per dissoluzione del sale marino trasportato in atmosfera. Fra le possibili fonti di questo nitrato vi sono: processi di nitrificazione, coltivazioni che fissano l'N₂ atmosferico e lo assimilano come azoto organico, uso di fertilizzanti nelle attività agricole nonchè percolazione in falda di acque di scarico ricche di nitrato.

Classificazione chimica delle acque

La classificazione chimica delle acque, effettuata attraverso il diagramma quadrato di Langelier-Ludwig, mostra che la maggior parte delle acque campionate appartiene alla facies bicarbonato-calcica, con qualche campione a minore salinità che risente ancora della composizione cloruro-sodica, tipica delle acque di pioggia delle regioni costiere (Figura 3). Questa variazione composizionale è accompagnata da una variazione di salinità da 0.2-0.7 meq/l nelle acque piovane a 12-17 meq/l nelle acque fluviali e sorgive (Apollaro et al., 2007).

Mappe di distribuzione territoriale

Per ottenere una semplice rappresentazione cartografica di alcune caratteristiche chimico-fisiche delle acque campionate, sono state realizzate in ambiente GIS alcune carte tematiche che rappresentano ciascun parametro mediante classi di variabilità. Le carte sono state ottenute studiando prima i variogrammi sperimentali nelle varie direzioni e controllando la presenza di eventuali anisotropie.

Il variogramma sperimentale è stato poi riprodotto mediante un opportuno modello teorico, necessario per la

successiva mappatura dei dati, effettuata mediante l'Ordinary Kriging. La scelta del modello è stata fatta verificando quale offrisse il miglior risultato attraverso la procedura di validazione incrociata (Isaaks & Srivastava, 1989).



Figura 2 – Diagrammi di correlazione fra Cl e Ca, Na, Mg, K, SO₄ e NO₃. Figure 2 - Diagrams of correlation between Cl and Ca, Na, Mg, K, SO₄ and NO₃.



Figura 3 – Diagramma quadrato di Langelier-Ludwig. I triangoli indicano le sorgenti, le croci i campioni di acque fluviali e i quadrati le acque di pioggia.



I valori assunti da ciascun parametro sono stati estrapolati, mediante Kriging applicato a griglia regolare di punti, a partire dai dati che riguardano le sole acque di falda. Su ciascuna mappa è stato infine riportato il valore misurato per le acque fluviali utilizzando come base della rappresentazione il modello digitale del terreno.

L'analisi dei valori del pH (Figura 4) permette di valutare l'apporto di sostanze acide alla soluzione acquosa. In generale, l'acidità della soluzione acquosa dipende dalla quantità di CO_2 disciolta, CO_2 che viene acquisita dall'acqua già in atmosfera, per poi aumentare di almeno 1-2 ordini di grandezza, per azione prevalentemente biologica, una volta che l'acqua entra in contatto con il suolo. Gli acidi apportati alla soluzione acquosa vengono progressivamente neutralizzati, principalmente per interazione delle acque con le rocce.

Nell'area in studio, il valore medio del pH delle acque sorgive è di 7.15 con un minimo di 5.57, un massimo di 8.34 ed una deviazione standard di 0.73. Nelle acque fluviali, invece, il valore medio è di 7.76 con un minimo di 6.54, un massimo di 8.37 ed una deviazione standard di 0.41. I valori massimi delle acque sorgive sono ubicati nella fascia centrale del bacino, in corrispondenza degli scisti verdi, mentre per le acque fluviali i valori più alti si trovano a valle, sui depositi alluvionali (Figura 4).



Figura 4 – Carta di distribuzione del pH. Legenda: I- acque fluviali. Figure 4 – Distribution maps of pH. Legend: I- fluvial waters.

I valori più bassi, per entrambi i tipi di acque, si riscontrano invece nel settore orientale del bacino, in acque a bassa conducibilità che non hanno ancora neutralizzato la loro carica acida acquisita per interazione con i suoli.

Nelle acque naturali sono generalmente presenti varie coppie di ossido-riduzione (Eh), l'una in disequilibrio rispetto all'altra, fatto che complica l'uso dei valori di Eh misurati per valutazioni quantitative (Lindberg e Runnels, 1984; Nordstrom, 2002). L'Eh rappresenta comunque un parametro molto utile per considerazioni semiquantitative o qualitative.

Tutte le acque investigate si avvicinano al buffer redox NH_4^+/NO_3^- e presentano un valore medio di +234 mV per le acque sorgive e di +203 mV per le acque fluviali. I valori variano tra +121 mV e +334 mV nelle sorgenti, mentre nelle acque fluviali il minimo è di +118 mV e il massimo è di +302 mV. Geograficamente i valori massimi (Figura 5), sia nelle acque sorgive che in quelle fluviali, sono localizzati nella porzione orientale del bacino mentre i valori più bassi sono localizzati nel settore occidentale.

La media della conducibilità elettrica specifica delle acque sorgive risulta di 282 μ S/cm a 20 °C, con un minimo di 50 μ S/cm, un massimo di 755 μ S/cm ed una deviazione standard di 167 μ S/cm. Il valore medio delle acque fluviali è di 273 μ S/cm a 20 °C, con un minimo di 95 μ S/cm, un massimo di 485 μ S/cm ed una deviazione standard di 116 μ S/cm. La cartografia (Figura 6) evidenzia che i valori più bassi di conducibilità elettrica si trovano ad est del bacino, alle quote più alte, mentre i valori più elevati sono situati nella zona centrale del bacino, sugli scisti filladici ad epidoto e sui depositi alluvionali.



Figura 5 – Carta di distribuzione dell' Eh (mV). Legenda: I- acque fluviali. Figure 5 – Distribution map of Eh (mV). Legend: I- fluvial waters.



Figura 6 – Carta di distribuzione della conducibilità elettrica specifica (μ S/cm a 20 °C). Legenda: I- acque fluviali. *Figure 6 – Distribution map of electrical conductivity* (μ S/cm at 20 °C). *Legend: I- fluvial waters*.

Figura 7 – Carta di distribuzione del nitrato (ppm). Legenda: I- acque fluviali. Figure 7 – Distribution map of nitrate (ppm). Legend: I- fluvial waters.

Come già accennato, il nitrato disciolto nelle acque deriva in parte dalle precipitazioni meteoriche, in parte da processi naturali di nitrificazione ed in parte da contaminazioni antropiche.

Il contenuto medio di nitrato nelle sorgenti è di 7 mg/l, con un minimo di 0,1 mg/l, un massimo di 32 mg/l e una deviazione standard di 7 mg/l. Nelle acque fluviali la media è di 4 mg/l, con un minimo di 0.6 mg/l, un massimo di 14 mg/l e una deviazione standard di 3 mg/l. Tutte le acque hanno contenuti di nitrato inferiori alla concentrazione massima ammissibile di 50 mg/l. Le concentrazioni più elevate (Figura 7) sono geograficamente localizzate nelle aree a valle e sono probabilmente imputabili a contaminazioni antropiche, come l'uso di fertilizzanti e la percolazione in falda di acque di scarico.

Risultati e conclusioni

L'indagine svolta nell'area di studio ha permesso di caratterizzare l'acquifero metamorfico nel suo complesso. Nel suo insieme l'acquifero può essere considerato un sistema multi-falda, in cui la circolazione idrica si sviluppa principalmente negli intervalli relativamente superficiali (Figura 1).

La composizione bicarbonato-calcica e la bassa salinità che contraddistinguono la maggior parte delle acque campionate ed analizzate sono riferibili ad una moderata interazione delle acque meteoriche con rocce silicatiche, contenenti minerali carbonatici, come calcite e dolomite, anche in piccole quantità. Infatti diversi autori (White et al., 1999a, 1999b; Apollaro et al., 2007, 2009), evidenziano come anche in rocce cristalline come graniti o filladi, la composizione delle acque evolve verso la facies bicarbonato-calcica grazie alla presenza di minerali carbonatici presenti anche in piccolissime quantità, difficilmente rilevabili dal punto di vista petrografico.

Basandoci su queste caratteristiche idrogeochimiche, le acque sorgive possono essere riferite al circuito superficiale e ad una circolazione idrica che avviene prevalentemente entro le rocce filladiche, che rappresentano appunto la litologia prevalente nell'area.

Gli studi chimici condotti evidenziano la disponibilità nell'area investigata di acque sorgive idonee all'uso idropotabile. Infatti, in nessuna di queste sorgenti viene superato il limite di legge imposto dal decreto legge del 2 febbraio 2001 n°31 (G.U.R.I., 2001, Table 2) per quanto riguarda Cl, F, Na, NO₃, SO₄, Al, As, B, Ba, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, U, V e Zn.

Tuttavia la mappa di distribuzione del nitrato disciolto evidenzia effetti derivanti da contaminazioni antropiche, probabilmente determinati dall'uso di fertilizzanti e dalla percolazione in falda di acque di scarico, analogamente a quanto osservato altrove (Onorati et al., 2006). Questi processi causano, localmente, situazioni di degrado della qualità delle acque, che devono essere evitati, mediante l'adozione di opportuni provvedimenti, per la salvaguardia delle risorse idriche in oggetto.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Walter Dragoni e un referee anonimo per l'attenta revisione e per i preziosi suggerimenti formulati.

Bibliografia

Allocca, V., Celico, F., Celico, P., De Vita, P., Fabbrocino, S., Mattia, C., Musilli, I., Piscopo, V., Summa, G. (2003). Carta idrogeologica dell'Italia meridionale continentale. Amodio Morelli, L., Bonardi, G., Colonna, V., Dietrich, D., Giunta, G., Ippolito, F., Liguori, V., Lorenzoni, S., Paglionico, A., Perrone, V., Piccarreta, G., Russo, M., Scandone, P., Zanettin-Lorenzoni, E., and Zuppetta, A. (1976). L'arco Calabro - Peloritano nell'orogene Appenninico-Maghrebide: Società Geologica Italiana Bollettino, v. 17, p. 1-60. Apollaro, C., Accornero, M., Marini, L., Barca, D., De Rosa, R. (2009). The impact of dolomite and plagioclase weathering on the chemistry of shallow groundwaters circulating in a granodiorite-dominated catchment of the Sila Massif (Calabria, Southern Italy). Applied Geochemistry, 24, 957-979.

Apollaro, C., Marini, L., De Rosa, R. (2007). Use of reaction path modeling to predict the chemistry of stream water and groundwater: a case study from the Fiume Grande valley (Calabria, Italy). Env. Geol., 51, 1133-1145.

G.U.R.I., Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana (2001). Decreto Legislativo 2 febbraio 2001, n. 31. In: Supplemento n. 52, 3 marzo 2001. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma, Italy.

Grenon, M. & Batisse, M. (1989). The futures of the Mediterranean basin. Oxford University Press, Oxford.

Ippolito, F., Nicotera, P., Lucini P., Civita M., De Riso, R. (1979).Geologia Tecnica, Isedi, Milano.

Isaak, E. H. & , R. M. (1989). An introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York. Lindberg, R. D., Runnells, D. D. (1984). Ground water redox reactions: An analysis of equilibrium state applied to Eh measurements and geochemical modeling. Science, 225, 925-927.

Marini, L. & Ottonello, G. (1997). Atlante degli acquiferi del comune di Genova. Volume 1: Alta Val Bisogno ed Alta Val Polcevera, Pacini Editore, 42 pp. (52 tav.), Pisa.

Nordstrom, D. K. (2002) Aqueous Redox Chemistry and the Behavior of Iron in Acid Mine Waters. Workshop on Monitoring Oxidation-Reduction Processes for Ground-water Restoration. Dallas, Texas - April 25-27, 2000, Rapporto EPA/600/R-02/002, 43-47.

Onorati, G., di Meo, T., Fabiani, C., Farrace, M. G., Fava, A., Ferronato, A., Mion, F., Marchetti, G., Martinelli A., Mazzoni M. (2006). Groundwater Quality Monitoring in Italy for the Implementation of the EU Water Framework Directive. Physics and Chemistry of the Earth, Volume 31, Issue 17, 1004-1014.

Pearce, D (1994). Integrated management of water resource in the context of sustainable management. Presentation to the course in integrated water resources management, April 11

1994. University of Malta.

Piccarretta, G., Zirpoli, G. (1970). Contributo alla conoscenza delle metamorfiti comprese fra Martirano e Falerna (Calabria). Boll. Soc. Geol. It., 89, 113-144.

Biddau, R. & Cidu, R. (2005). Hydrogeochemical baseline studies prior to gold mining: A case study in Sardinia (Italy). Journal of Geochemical Exploration, 86, 61-85.

Shaw, D. M. (1969). Evaluation of data. Handbook of Geochemistry (Ed. Wedephol). Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Italy, 324-375.

White, A. F., Blum, A. E., Bullen, T. D., Vivit, D. V., Schulz, M., Fitzpatrick, J. (1999a). The effect of temperature on experimental and natural chemical weathering rates of granitoid rocks. Geochim. Cosmochim. Acta, 63, 3277–3291.

White, A. F., Bullen, T. D., Vivit, D. V., Schulz, M., Clow, D. W. (1999b). The role of disseminated calcite in the chemical weathering of granitoid rocks. Geochim. Cosmochim. Acta, 63, 1939–1953.