

# **4. CARACTERÍSTIQUES I DISTRIBUCIÓ ESPACIAL DE LES FÀCIES HIDROQUÍMIQUES**

- 
- 4.1 CARACTERITZACIÓ HIDROQUÍMICA**
  - 4.2 MODEL CONCEPTUAL DE LA  
HIDRODINÀMICA LOCAL**
  - 4.3 APLICACIÓ DE LES DADES  
HIDROQUÍMIQUES A L'ESTIMACIÓ DE LA  
RECÀRREGA**
    - 4.3.1 METODOLOGIA
    - 4.3.2 ESTIMACIÓ DE LA RECÀRREGA

La descripció de les formacions hidrogeològiques, l'estudi piezomètric i l'anàlisi de les relacions entre elles han permès identificar les components principals del flux subterrani, en concret de les Gavarres cap a les conques limítrofes, i constatar el paper de les heterogeneïtats locals. En aquest sentit, s'ha emfasitzat la influència de les fractures i discontinuïtats del medi com a vies preferents de circulació, les quals poden connectar hidràulicament les diferents formacions hidrogeològiques.

L'estudi de les fàcies hidroquímiques s'emmarca en aquest àmbit descrit amb la finalitat d'identificar procedències, trajectòries i caracteritzar els sistemes de flux a diferents escales d'espai i temps. Més endavant s'aplicarà l'estudi dels isòtops per corroborar el sistema dominant descrit i establir les relacions amb sistemes a diferents nivells i avaluar la hidrodinàmica de la zona.

## 4.1 CARACTERITZACIÓ HIDROQUÍMICA

Per aquest estudi s'ha disposat de les dades hidroquímiques inicialment de 36 pous i 3 fonts que s'han anat ampliant amb el progrés de la investigació fins a sumar un total de 50 punts de mostreig. Les variables analitzades a cada punt no són les mateixes, varien en funció de la campanya, essent les mostres corresponents al Baix Ter les que presenten un registre de dades més llarg, concretament, des de 1996. El març del 2000 es realitzà la campanya hidroquímica més completa, amb els 39 punts inicials, i són aquestes dades les que s'utilitzen principalment en aquest capítol. A la Taula 4.1 es resumeixen els components majoritaris analitzats en aquesta campanya i s'hi indica també la formació hidrogeològica mostrejada, la  $PCO_2$  (calculada a 25°C segons Langmuir (1971) considerant un sistema obert respecte el  $CO_2$ ) i l'error analític associat (estimat segons la relació percentual de tots els ions). La representació piezomètrica s'ha realitzat mitjançant un sistema d'informació Geogràfica (SIG) el qual també incorpora les dades hidroquímiques permetent una visualització ràpida de la distribució dels valors de les variables a l'espai i realitzar consultes sobre els paràmetres. A la Figura 4.1 es projecten tots els punts incorporats en el SIG dels que es disposa d'alguna dada hidroquímica i que es detallen en l'Annex 3. Pot obtenir-se una millor precisió de la posició dels punts a l'Annex 2.

Taula 4.1 Contingut en elements majoritaris en les captacions i fonts mostrejades la campanya del març del 2000. S'acompanya l'anàlisi completa a l'Annex 3

|         | T                                               | pH      | C.E.  | Ca   | Mg    | Na     | K     | HCO <sub>3</sub> | Cl      | SO <sub>4</sub> | Br     | Si     | Li    | Sr   | P     | CO <sub>2</sub>     | error |      |
|---------|-------------------------------------------------|---------|-------|------|-------|--------|-------|------------------|---------|-----------------|--------|--------|-------|------|-------|---------------------|-------|------|
| Unitats | °C                                              |         | μS/cm | mg/L | mg/L  | mg/L   | mg/L  | mg/L             | mg/L    | mg/L            | mg/L   | mg/L   | mg/L  | mg/L | mg/L  | atm                 | %     |      |
| CS149   | Aigües Picants                                  | 14.4    | 6.13  | 2150 | 350.5 | 52.14  | 53.6  | 2.64             | 1503.12 | 40.6            | 6.59   | 0.99   | 25.09 | 0.12 | 0.62  | 10 <sup>0.228</sup> | -2.8  |      |
| BE1     |                                                 | 14.1    | 6.47  | 4750 | 303.5 | 133.10 | 591.4 | 5.75             | 3673.47 | 78.7            | 2.99   | 1.00   | 30.36 | 2.21 | 10.64 | 10 <sup>0.04</sup>  | -7.4  |      |
| SF56    |                                                 | 15.4    | 6.27  | 3230 | 164.3 | 49.46  | 426.8 | 7.16             | 1912.39 | 76.1            | 19.16  | 0.87   | 21.30 | 1.54 | 3.56  | 10 <sup>-0.76</sup> | -5.1  |      |
| GII21   |                                                 | 16.1    | 6.21  | 2060 | 176.8 | 90.46  | 137.8 | 17.90            | 1417.55 | 37.5            | 18.57  | 0.30   | 12.16 | 0.23 | 1.49  | 10 <sup>-0.66</sup> | -4.1  |      |
| GII20   |                                                 | 11.57   | 6.35  | 1514 | 248.6 | 27.26  | 26.8  | 1.53             | 887.98  | 36.8            | 63.18  | 0.50   | 11.27 | 0.04 | 0.49  | 10 <sup>-0.22</sup> | -5.5  |      |
| CS117A  | Formació arcèsica                               | 16.7    | 7.10  | 911  | 86.7  | 14.22  | 53.3  | 2.64             | 299.14  | 60.8            | 64.98  | 0.37   | 15.36 | 0.03 | 0.41  | 10 <sup>-1.59</sup> | -0.6  |      |
| CS117C  |                                                 | 16.5    | 6.89  | 821  | 97.0  | 12.67  | 54.2  | 1.71             | 200.91  | 65.2            | 67.37  |        | 11.44 | 0.04 | 0.31  | 10 <sup>-1.44</sup> | 11.8  |      |
| CS105   |                                                 | 15.3    | 7.17  | 850  | 89.6  | 9.36   | 57.6  | 1.17             | 273.90  | 71.6            | 51.20  | 0.44   | 13.32 | 0.03 | 0.37  | 10 <sup>-1.55</sup> | 1.3   |      |
| CS58    |                                                 | 15.9    | 7.03  | 911  | 95.7  | 15.96  | 51.0  | 1.05             | 259.51  | 94.6            | 58.09  |        | 11.57 | 0.03 | 0.43  | 10 <sup>-1.46</sup> | 1.2   |      |
| SF34    |                                                 | 17.4    | 7.12  | 1114 | 104.4 | 17.50  | 85.9  | 1.76             | 438.60  | 109             | 44.32  |        | 13.20 | 0.11 | 0.47  | 10 <sup>-1.35</sup> | -3.5  |      |
| PL21    | Ganitoids                                       | 15.7    | 7.4   | 846  | 88.2  | 20.60  | 58.0  | 3.09             | 417.58  | 47.9            | 31.74  | 0.36   | 10.25 | 0.06 | 0.49  | 10 <sup>-1.57</sup> | -0.9  |      |
| CS10    |                                                 | 16.7    | 7.48  | 493  | 45.6  | 9.340  | 47.1  | 0.84             | 214.156 | 27.6            | 31.44  |        | 12.02 | 0.02 | 0.13  | 10 <sup>-2.43</sup> | 1.7   |      |
| CS80    |                                                 | 17.1    | 7.14  | 1672 | 120.3 | 42.47  | 71.4  | 2.74             | 376.03  | 245.0           | 74.86  | 2.96   | 12.90 | 0.05 | 0.32  | 10 <sup>-1.16</sup> | -7.2  |      |
| CS118   |                                                 | 17.5    | 7.2   | 1385 | 109.1 | 29.98  | 83.8  | 2.19             | 303.60  | 247.0           | 37.43  | 2.79   | 10.58 | 0.06 | 0.55  | 10 <sup>-1.29</sup> | -4.6  |      |
| GI85    |                                                 | 14.9    | 7.29  | 626  | 82.2  | 11.54  | 34.1  | 3.29             | 225.72  | 22.0            | 52.10  | 0.13   | 10.39 | 0.02 | 0.23  | 10 <sup>-1.66</sup> | 10.1  |      |
| GI87    | R. meta-morfines                                | 15.9    | 6.89  | 804  | 85.3  | 24.56  | 41.2  | 1.16             | 348.25  | 61.5            | 7.47   | 0.39   | 4.74  | 0.04 | 0.35  | 10 <sup>-1.61</sup> | 3.2   |      |
| LB86    |                                                 | 17.8    | 7.08  | 900  | 105.6 | 20.54  | 40.0  | 1.49             | 278.35  | 77.5            | 71.87  |        | 9.99  | 0.05 | 0.69  | 10 <sup>-1.33</sup> | 2.9   |      |
| FR81    |                                                 | 17.8    | 7.29  | 1017 | 82.1  | 25.99  | 79.0  | 1.43             | 304.10  | 127.0           | 31.44  |        | 10.04 | 0.04 | 0.32  | 10 <sup>-1.66</sup> | 2.6   |      |
| ST54    |                                                 | 16.2    | 7.63  | 784  | 79.9  | 31.01  | 30.6  | 3.04             | 394.93  | 26.6            |        | 0.71   | 5.70  | 0.03 |       | 10 <sup>-1.70</sup> | -1.3  |      |
| ST80    |                                                 | 16.8    | 7.38  | 820  | 70.9  | 13.65  | 69.2  | 14.2             | 323.69  | 41.2            |        | 0.88   | 6.83  |      | 0.58  | 10 <sup>-1.85</sup> | 4.8   |      |
| GII04   | Formacions paleogènes en soredques i calcàries. | 16.5    | 7.43  | 849  | 112.2 | 26.37  | 19.3  | 2.13             | 381.00  | 28.9            | 79.65  | 0.40   | 5.75  | 0.02 | 0.35  | 10 <sup>-1.26</sup> | -0.3  |      |
| CM131   |                                                 | 16.5    | 7.14  | 1110 | 165.7 | 14.87  | 40.4  | 1.02             | 431.59  | 62.5            | 76.66  |        | 6.77  | 0.02 | 0.49  | 10 <sup>-0.75</sup> | 3.9   |      |
| CM133   |                                                 | 19.2    | 7.31  | 753  | 101.9 | 13.89  | 36.1  | 1.02             | 383.47  | 40.4            | 15.27  | 0.30   | 12.49 | 0.03 | 0.41  | 10 <sup>-1.38</sup> | 0.5   |      |
| PS41    |                                                 | 20.7    | 7.09  | 923  | 124.8 | 12.36  | 45.6  | 2.61             | 368.98  | 40.9            | 70.67  |        | 5.20  | 0.02 | 0.42  | 10 <sup>-1.12</sup> | 3.5   |      |
| FR80    |                                                 | 25.6    | 7.53  | 613  | 78.0  | 2.60   | 26.0  | <2.5             | 219.00  | 33.1            | 6.20   |        |       |      |       | 10 <sup>-1.73</sup> | 6.2   |      |
| FR83    |                                                 | 17.4    | 6.99  | 806  | 111.0 | 11.30  | 33.3  | <2.5             | 285.10  | 39.9            | 20.40  |        |       |      |       | 10 <sup>-1.27</sup> | 12.1  |      |
| LB33    |                                                 | 17.6    | 7.38  | 1403 | 155.5 | 29.39  | 86.0  | 8.19             | 426.63  | 87.5            | 137.70 |        | 7.89  | 0.06 | 1.52  | 10 <sup>-0.83</sup> | 6.8   |      |
| FN3     |                                                 | 20.0    | 7.21  | 1444 | 203.1 | 39.39  | 44.9  | 1.86             | 401.33  | 94.3            | 117.90 |        | 7.30  | 0.02 | 0.69  | 10 <sup>-0.48</sup> | -11.4 |      |
| FR60    |                                                 | 16.7    | 7.23  | 816  | 122.5 | 11.89  | 23.4  | 0.65             | 277.80  | 33.0            | 49.11  |        | 9.38  | 0    | 0.31  | 10 <sup>-1.14</sup> | 11.1  |      |
| FR84    |                                                 | 19.0    | 7.38  | 840  | 118.6 | 14.01  | 33.3  | 1.57             | 278.30  | 44.4            | 77.26  |        | 7.18  | 0.01 | 0.25  | 10 <sup>-1.18</sup> | 7.1   |      |
| GU2     | Dipòsits al·luvials i col·luvials del Baix Ter  | 20.1    | 7.32  | 1055 | 144.1 | 16.68  | 54.2  | 2.00             | 347.60  | 78.4            | 146.10 |        | 5.28  | 0    | 0.85  | 10 <sup>-0.93</sup> | 0.1   |      |
| GU15    |                                                 | 20.7    | 7.66  | 804  | 93.1  | 20.02  | 44.8  | 3.30             | 349.59  | 51.5            | 52.70  |        | 7.17  | 0.02 | 0.69  | 10 <sup>-1.50</sup> | 0.3   |      |
| SD1     |                                                 | 18.8    | 7.64  | 1099 | 137.0 | 20.24  | 38.3  | 1.06             | 381.98  | 117.0           | 40.72  |        | 6.89  | 0.01 | 0.51  | 10 <sup>-1.00</sup> | -1    |      |
| VE3     |                                                 | 17.7    | 7.9   | 1265 | 147.0 | 27.48  | 59.7  | 2.93             | 352.22  | 89.8            |        |        | 6.47  | 0.01 | 1.47  | 10 <sup>-0.90</sup> | 1.5   |      |
| SD14    |                                                 | 18.8    | 7.16  | 925  | 125.6 | 16.45  | 42.4  | 4.15             | 329.89  | 59.8            | 82.05  |        | 6.06  | 0.01 | 0.41  | 10 <sup>-1.12</sup> | 4.2   |      |
| FO11    |                                                 | 17.2    | 7.29  | 1226 | 176.4 | 23.69  | 26.0  | 1.00             | 431.59  | 55.6            | 105.10 |        | 8.48  | 0    | 0.68  | 10 <sup>-0.67</sup> | 4.7   |      |
| LB45    |                                                 | 15.4    | 7.04  | 690  | 97.2  | 10.3   | 28.7  | 3.70             | 200.90  | 36.9            | 16.80  |        |       |      |       | 10 <sup>-1.44</sup> | 20.1  |      |
| CO55    |                                                 | 16.7    | 6.89  | 1150 | 164.0 | 41.30  | 47.5  | <2.5             | 437.80  | 60.0            | 41.70  |        |       |      |       | 10 <sup>-0.76</sup> | 16.8  |      |
| GU4     |                                                 | 18.8    | 7.6   | 2040 | 135.0 | 51.90  | 194.6 | 7.12             | 486.65  | 363.0           | 140.70 |        | 7.31  | 0.02 | 1.37  | 10 <sup>-1.01</sup> | -3.7  |      |
| CL4     |                                                 | Riu Ter | 17.3  | 7.8  | 976   | 92.2   | 13.05 | 64.8             | 6.28    | 200.42          | 83.1   | 116.70 |       | 2.09 | 0.02  | 0.84                |       | -8.2 |

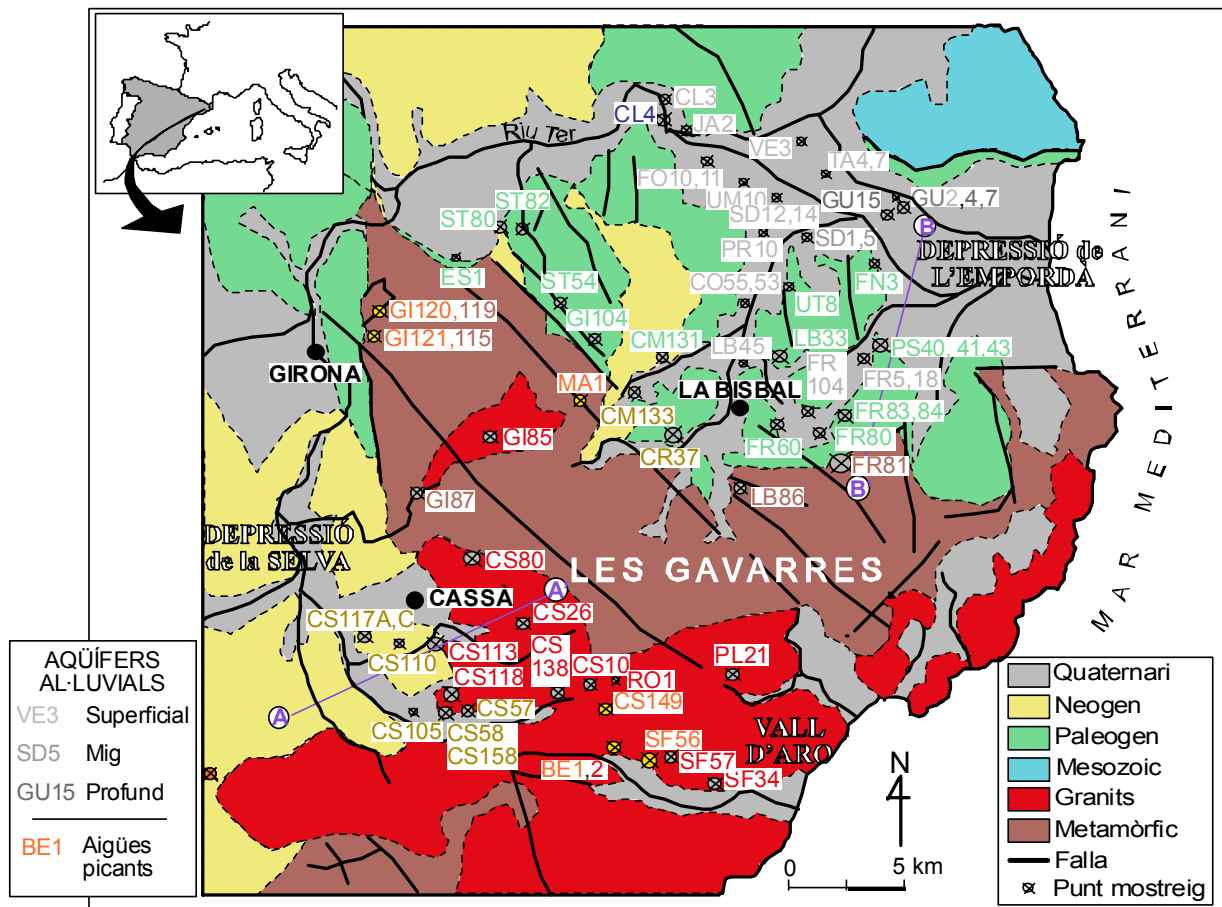


Figura 4.1 Ubicació de tots els punts de mostreig sobre el mapa geològic (ICC, 1989). La mida del punt és en funció de la profunditat de la captació.

A la zona d'estudi es localitzen una sèrie de fonts riques en  $\text{CO}_2$ , anomenades localment “picants” degut a la desgassificació del  $\text{CO}_2$  en arribar a la superfície. A aquest gas se li atribueix un origen endogen (Paris i Albert, 1976) i el quimisme de les aigües està governat per la presència d'aquest gas. Per tant, les característiques químiques d'aquestes aigües responen a processos no relacionats amb el sistema hidrogeològic local. Per aquesta raó, si bé s'han inclòs en l'anàlisi hidroquímic general per les particularitats que presenten, també són motiu d'un capítol separat per la informació més específica que aporten i per determinades consideracions especials que impliquen en el seu estudi.

La primera caracterització del quimisme de les aigües de la zona d'estudi s'ha realitzat mitjançant diagrames en caixa els quals evidencien la relació entre la composició hidroquímica i la formació hidrogeològica (Figura 4.2). Aquest tipus de gràfic mostra paràmetres estadístics: els extrems superiors i inferiors del rectangle representen els percentils 25è i 75è, la línia horitzontal

interior indica la mitjana i les línies horitzontals exteriors es corresponen amb els percentils 90è i 10è. Es comprova que en base a les característiques de les aigües poden diferenciar-se dos grups que engloben formacions amb propietats hidroquímiques semblants: per una banda els materials arcòsics, granítics i, en menor grau, dels metamòrfics i, per una altra banda, els materials sedimentaris de la depressió de l'Empordà, tant els paleògens com els quaternaris.

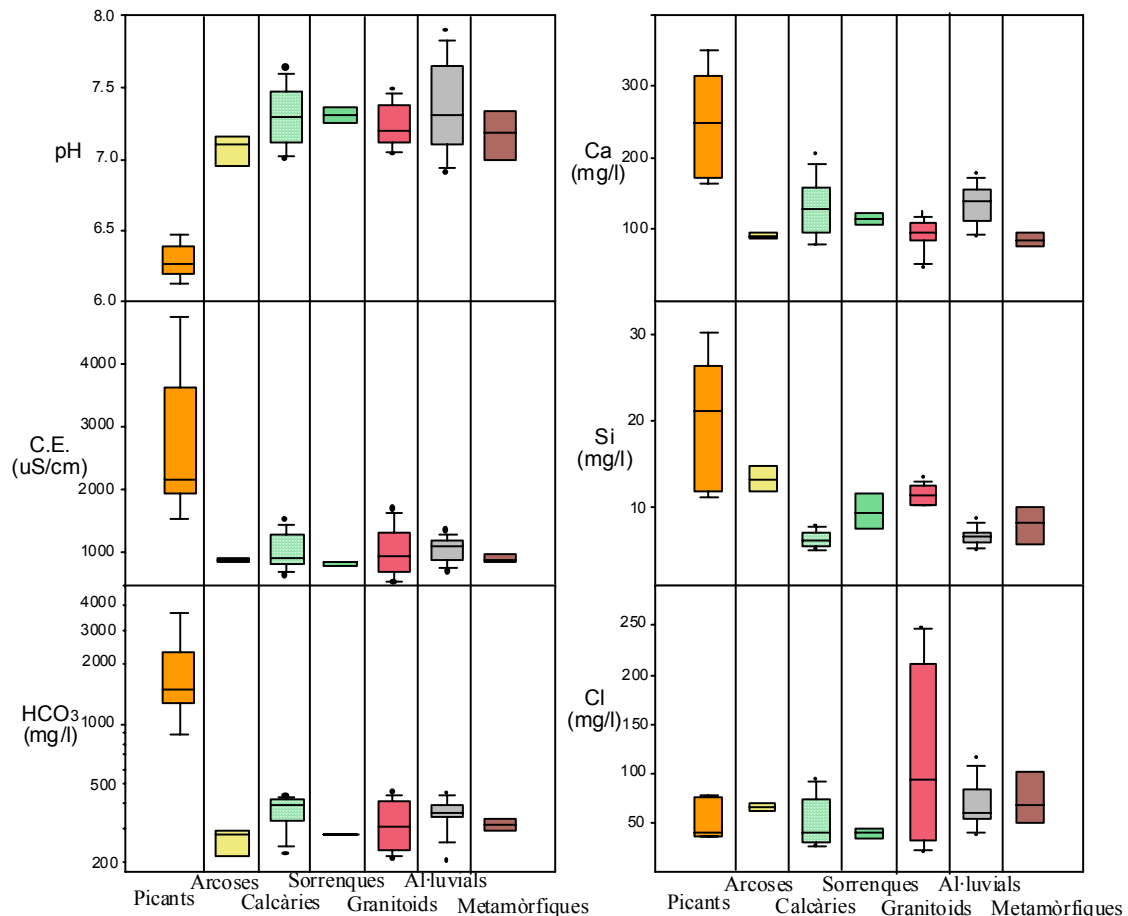


Figura 4.2 Diagrames en caixa que mostren les variables estadístiques de diferents paràmetres mesurats el març del 2000. No s'ha inclòs la mostra GU4 afectada per intrusió salina induïda.

En termes generals, en el diagrama en caixa s'observa que el pH pren valors entre 7 i 8 per a totes les mostres excepte per a les de les aigües picants, les quals són lleugerament més àcides. Les majors conductivitats també es registren en les aigües picants i els valors més baixos es localitzen en les formacions de sorrenques terciàries i a les arcoses. Els granitoids mostren una dispersió de valors més elevada. Els elements que millor permeten identificar els tipus d'aqüífers mostrejats són el calci i el silici. El primer és notablement superior, a més de en les aigües carbòniques, en les calcàries paleògenes i en els materials al·luvials empordanesos. Les mínimes

concentracions les mostren les aigües de les arcoses i dels materials metamòrfics. En canvi el silici mostra les menors concentracions en les calcàries i en els sediments d'origen al·luvial; mentre que les majors concentracions s'han registrat a les arcoses i els granits. Les aigües picants arriben a concentracions de silici de 30 mg/L; si bé presenten una àmplia varietat amb mínims semblants als valors de les arcoses i dels granits.

La classificació hidroquímica s'ha realitzat mitjançant els criteris hidroquímics d'Stiff i el diagrama de Piper. Les consideracions de la classificació d'Stiff es basen en l'abundància relativa dels cations i anions majoritaris, les quals han permès definir grups hidroquímics (Taula 4.2). El diagrama de Piper s'ha mostrat més eficient per representar la totalitat de les dades i relacionar-les amb el tipus de substrat litològic (Figura 4.3)

La fàcies hidroquímica que presenten la majoria de mostres és la bicarbonatada càlcica a excepció de dues mostres en granits que es classifiquen com clorurades-bicarbonatades càlciques (CS80 i CS118), fet que s'atribueix a la interacció amb la roca. Dos punts de mostreig d'aigües picants han mostrat hidrofàcies bicarbonatada sòdica (SF56 i BE1); així com un pou (GU4) afectat per intrusió salina induïda. Destacar també, els pous ST80 i CS10, el primer en materials paleògens i el segons en granodiorites, on el sodi presenta un contingut superior al 40% de cations, de manera que es poden classificar com a bicarbonatades càlcico-sòdiques. La representació de les dades en el diagrama de Piper (Figura 4.3), permet considerar les mostres en tres grups principals que reflecteixen la litologia de l'aqüífer.

Taula 4.2 Grups hidroquímics establerts a partir dels diagrames d'Stiff.

| GRUP | QUIMISME                                                                                                              | FORMACIÓ HIDROGEOLÒGICA                          |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| A1   | $\text{HCO}_3^- \gg \text{Cl}^- ; \text{SO}_4^{2-}$<br>$\text{Ca}^{2+} \gg \text{Na}^+ + \text{K}^+ ; \text{Mg}^{2+}$ | Quaternaris de l'Empordà<br>Neògens<br>Paleògens |
| A2   | $\text{HCO}_3^- \gg \text{Cl}^-$<br>$\text{Ca}^{2+} \approx \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$                | Paleozoics (ignis i metamòrfics)                 |
| A3   | $\text{HCO}_3^- \gg \text{Cl}^-$<br>$\text{Na}^+ + \text{K}^+ \gg \text{Ca}^{2+} \approx \text{Mg}^{2+}$              | Aigües picants en granitoids                     |
| A4   | $\text{HCO}_3^- \gg \text{Cl}^-$<br>$\text{Ca}^{2+} \approx \text{Na}^+ + \text{K}^+ \approx \text{Mg}^{2+}$          | Aigües picants en roques metamòrfiques           |
| B1   | $\text{Cl}^- \gg \text{HCO}_3^-$<br>$\text{Ca}^{2+} \gg \text{Na}^+ + \text{K}^+ / \text{Mg}^{2+}$                    | Granitoids profunds                              |
| B2   | $\text{Cl}^- \gg \text{HCO}_3^-$<br>$\text{Na}^+ + \text{K}^+ \gg \text{Ca}^{2+}$                                     | Pou GU4                                          |
| C1   | $\text{HCO}_3^- \approx \text{Cl}^-$<br>$\text{Ca}^{2+} \gg \text{Na}^+ + \text{K}^+ / \text{Mg}^{2+}$                | Riu Ter (CL4)                                    |

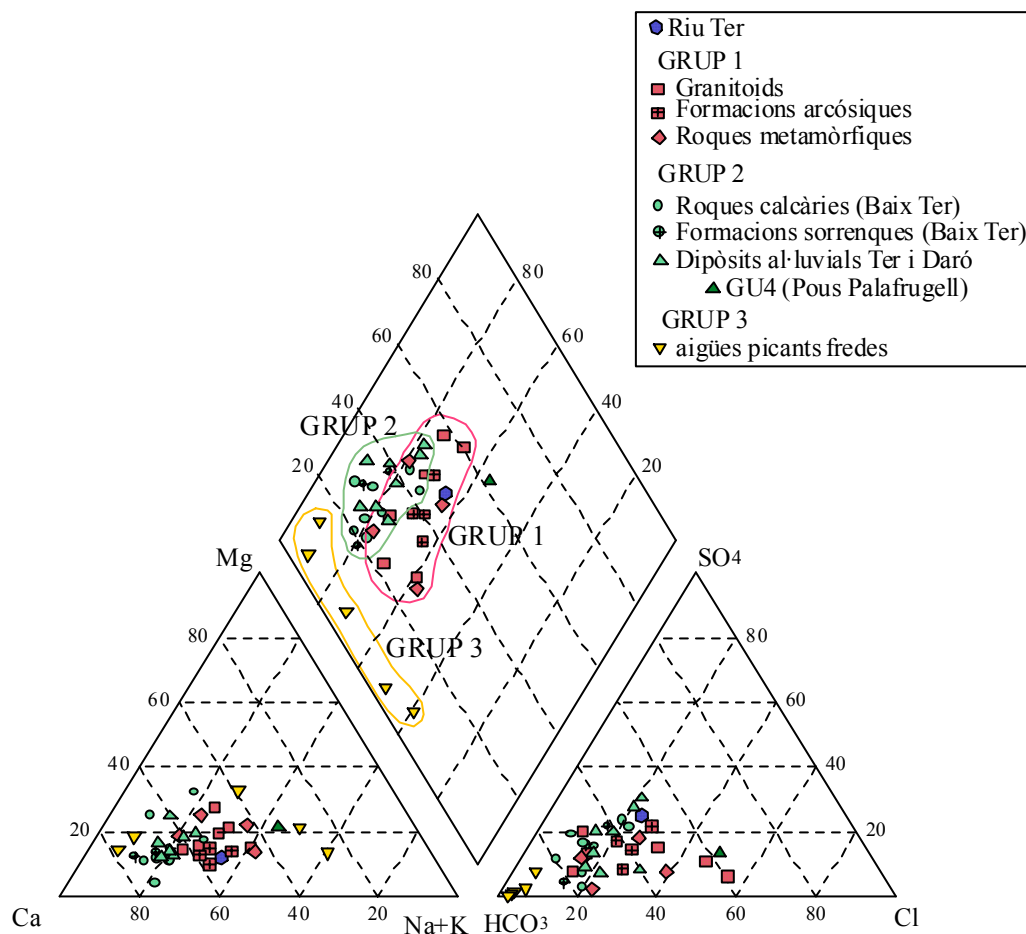


Figura 4.3 Diagrama de Piper per les mostres detallades a la Taula 4.1 (març del 2000).

- El GRUP 1 comprèn les mostres corresponents als granitoids, a les roques metamòrfiques i als sediments detrítics de natura arcòsica de la depressió de la Selva. A excepció de dues mostres de pous amb elevats continguts en clorur, CS118 i CS80, l'anió majoritari és el bicarbonat. El sulfat sol trobar-s'hi en una proporció menor al 20% del total d'anions. En la majoria de casos el calci és el catió dominant, entre el 60 i el 80% del total catiònic; no obstant, s'ha detectat una concentració notable de (Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>) a ST80 (42%) i a CS10b (40.5%).
- Al GRUP 2 s'inclouen les mostres de les formacions paleògenes, neògenes i quaternàries de la depressió de l'Empordà. També en aquestes composicions l'anió majoritari és el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, el Cl<sup>-</sup> només esdevé major al pou GU4 que arriba al 48.4% del total aniònic i cal destacar



percentatges aniònics de  $\text{SO}_4^{2-}$  importants en els pous GU2 (27.78%) i VE3 (30.29%), tot i que no hi superen el contingut en  $\text{HCO}_3^-$ . El  $\text{Ca}^{2+}$  és el catió que domina a totes les anàlisis, amb un percentatge sobre el total de cations superior al 55%, excepte a GU4 on el ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) supera al  $\text{Ca}^{2+}$  assolint una abundància del 44%. Els continguts en  $\text{Mg}^{2+}$  són baixos, inferiors al 25%, només a ST54 s'arriba al 32.1%.

- Per últim, el GRUP 3 inclou les aigües picants, les quals si bé s'emplacen en diferents materials geològics, presenten característiques molt diferents a la resta. Són totes elles són riques en  $\text{HCO}_3^-$  i presenten una composició catiònica més variable. Les seves particulars característiques seran tractades més detalladament en el capítol 7 del present treball.

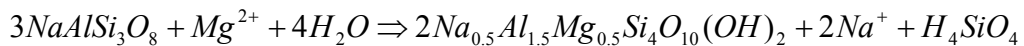
En base als criteris d'Stiff (Taula 4.2), s'han diferenciat 3 grups principals en funció dels anions i dins d'aquestes s'han tingut en compte els cations. El primer grup (A) presenta el  $\text{HCO}_3^-$  com a anió dominant i és on es localitzen la majoria de mostres, al segon (B) l'anió més abundant és el  $\text{Cl}^-$  mentre que en el darrer grup (C) aquests dos anions presenten similar concentracions.

Les classificacions presentades assenyalen la existència de determinades captacions amb continguts específics d'alguns elements que cal estudiar més detingudament. Concretament es destaquen els pous CS80 (granitoids del vessant sud-oest de les Gavarres) i CS118 (granitoids del sòcol de la depressió de la Selva), ambdós propers a fractures importants en l'estructura local, els quals presenten continguts en clorur molt elevats. També, tal i com s'ha esmentat, és notable la salinitat en les captacions GU4, són els pous d'abastament de Palafrugell que generen importants cons de depressió i afavoreixen el procés d'intrusió salina.

En base a la divisió en tres grups mostrada al diagrama de Piper, ha estat possible establir les relacions geoquímiques entre els elements químics i llur evolució al llarg de la seva trajectòria. S'ha estudiat les relacions molars entre els diferents elements amb especial atenció a les variacions enfront de l'ió clorur i s'ha pogut diferenciar dos tipus de reaccions geoquímiques. En ambdues es reconeix el paper de la reacció d'aigua amb  $\text{CO}_2$  dissolt amb diferents resultats, segons si les roques encaixants són silíciques o carbonatades.

**GRUP 1**

En les mostres incloses al grup 1 el quimisme bàsic observat s'atribueix al procés de dissolució incongruent dels minerals silicats primaris i la conseqüent formació de minerals silicatats secundaris (Paces, 1973). La principal reacció que governa el quimisme de l'aigua subterrània és la hidròlisi de les plagiòclasis, predominantment les sòdiques, les quals alliberen Na, Ca i SiO<sub>2</sub> i són responsables de l'elevada relació molar Na/Ca a les aigües (entre 0.8 i 1.8). Addicionalment, la relació molar H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>/Na i els balanços molars amb altres espècies, suggereixen que el producte de meteorització de les albites és la montmorillonita (Garrels i Mackenzie, 1967), alteració que pot descriure's segons la reacció:



Aquesta és normalment la primera argila en formar-se i els diagrames d'estabilitat que estableixen els sistemes geoquímics parcials indiquen que les mostres es representen en el camp de l'estabilitat de l'esmeclita (Figura 4.4), característica comú en climes àrids amb velocitats de flux baixes (Tardy, 1971). És comú el pas d'un tipus d'argila a un altre, fet que junt amb la baixa cinètica de dissolució de les fases neofornades fa difícil assegurar que aquestes reaccions han assolit l'estat d'equilibri atès així com establir un producte d'alteració únic.

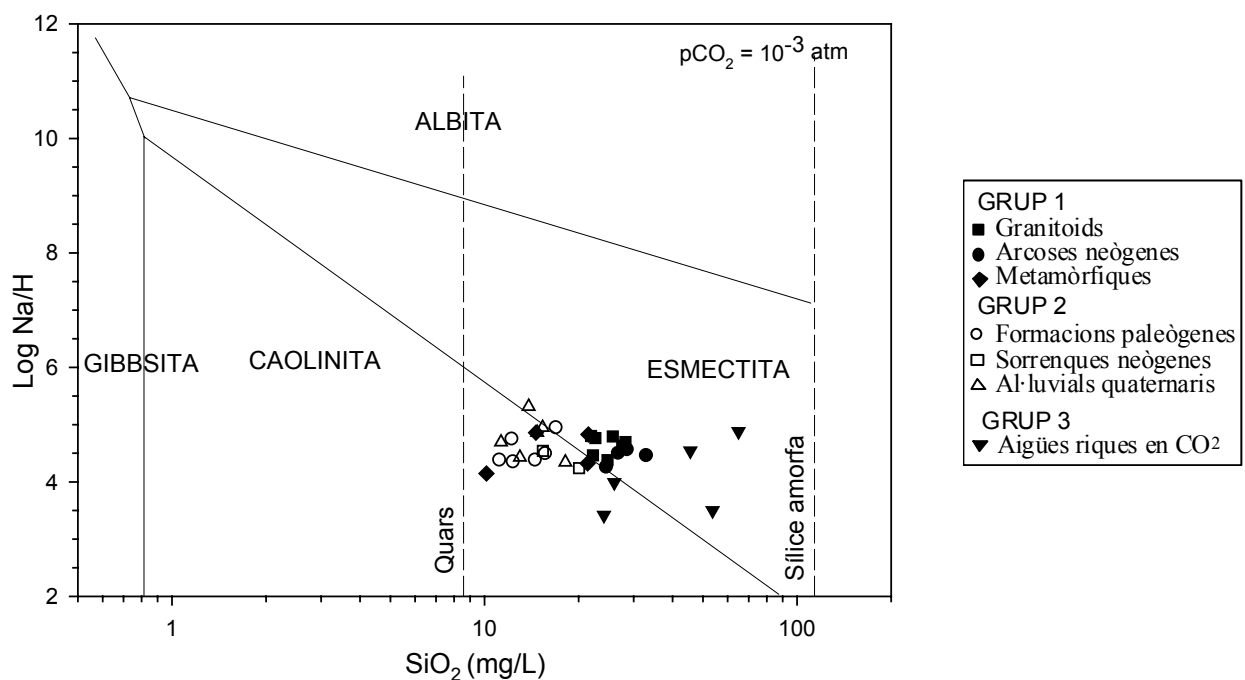


Figura 4.4 Diagrama dels camps d'estabilitat de l'albita per les mostres de l'àrea d'estudi.

El clorur pot usar-se com a indicador de la interacció aigua-roca i, conseqüentment, de temps de residència, atès que s'ha constatat un augment paral·lel d'aquest ió amb altres que reflecteixen processos d'interacció amb el medi (Li, Sr, Mg, K, Ca, Na, Br...) i amb el contingut en triti (Figures 4.5 i 4.6). S'ha descrit l'existència de dues captacions amb continguts en clorur molt notables (CS80 i CS118 amb 245 i 247 mg/L, respectivament). Aquestes presenten també concentracions elevades de Li, Mg, i K. Es tracta d'elements que s'alliberen durant la hidròlisi de la biotita (Edmunds, 1984) la qual també aportaria el Mg necessari per a la transformació de l'albita de montmorillonita. Mitjançant aquest procés, es considera la possibilitat que aquestes dues mostres, CS80 i CS118, reflecteixin l'alteració d'aquest mineral en una trajectòria de llargs temps de residència i no es descarta la influència d'alguna procés tèrmic endogen que afavoreixi aquests processos. Una altra explicació als elevats continguts en clorur pot recaure en la geologia local. Aquestes dues captacions se situen properes a fractures importants i en aquest zones es localitzen granits cataclàstics (Roqué, 1993) els quals presenten disseminacions de minerals de ferro, feldspats potàssics i les biotites totalment alterades a clorites. Aquestes característiques explicarien continguts anòmals d'alguns elements en aquestes captacions.

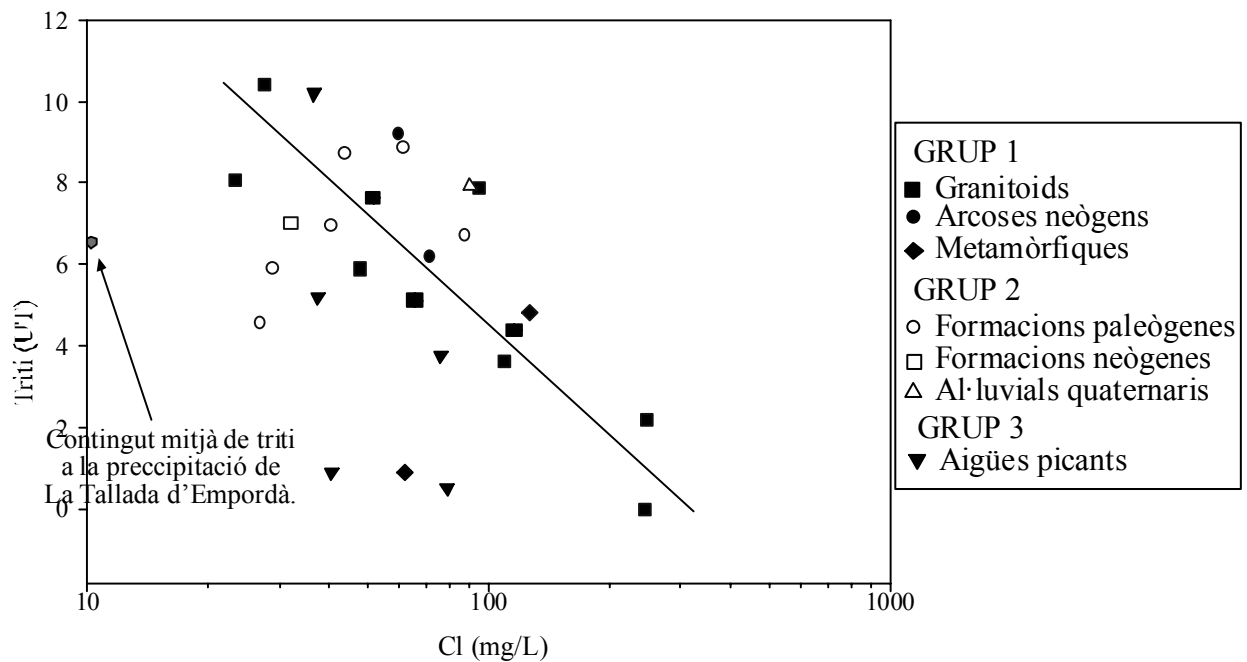


Figura 4.5. Relació entre el contingut en clorur i en triti.

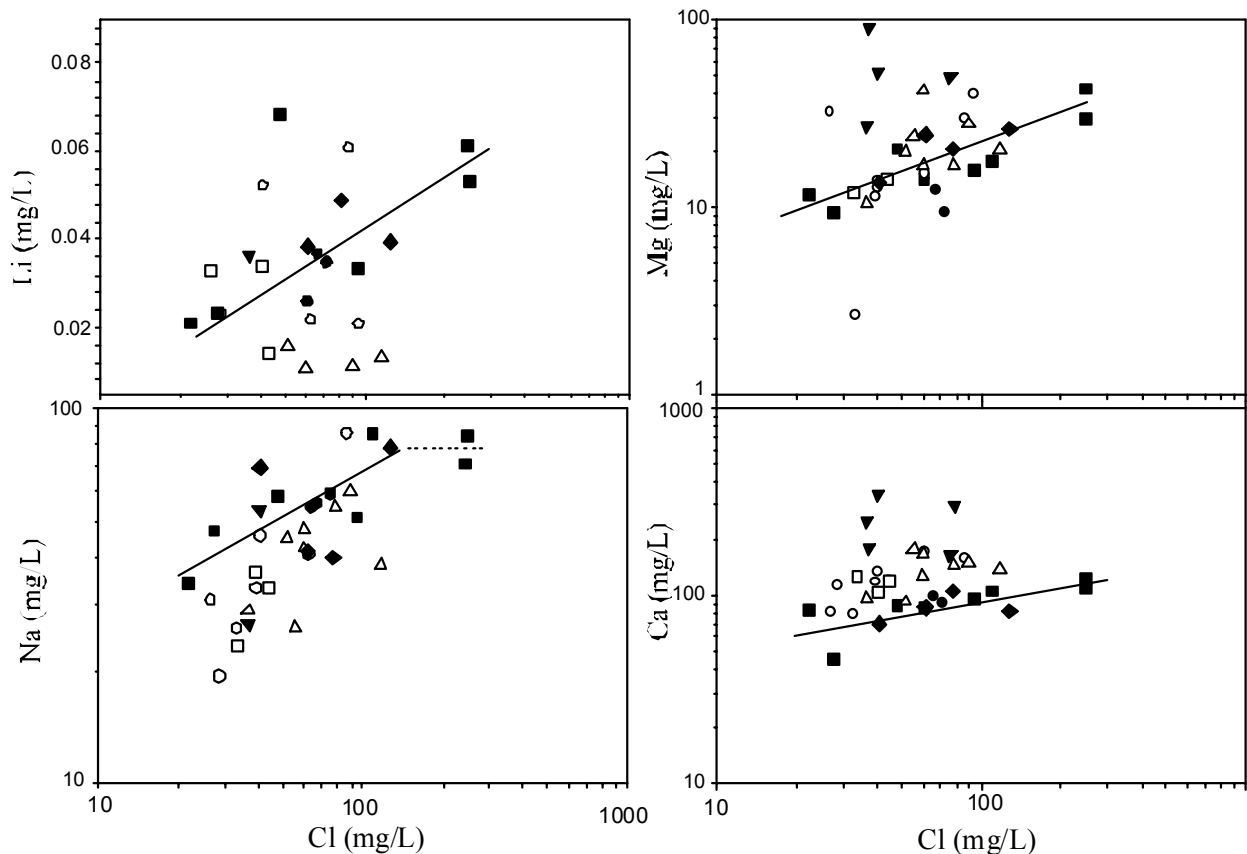


Figura 4.6 Relació entre el contingut en Cl i en Ca, Mg, Li, i Na. Les línies indiquen tendències en les mostres del grup 1. Mateixa llegenda que en la Figura 4.5.

El menor grau de mineralització de les aigües en terrenys metamòrfics s'atribueix a la baixa cinètica d'alteració dels minerals d'aquest tipus de roques (Rogers, 1989).

Senyalar finalment, que les menors mineralitzacions constatades en les aigües en sediments arcòsics respecte les de les formacions granítiques s'atribueix a la pròpia alteració física i química que caracteritza a les primeres i, consegüentment, la menor disponibilitat de minerals de cinètica d'alteració més elevada.

## **GRUP 2**

Al grup 2 el sistema carbonatat és el que domina les composicions de les mostres, tant de les ubicades en formacions paleògenes com quaternàries. En un sistema dominat per aquesta reacció, la relació molar entre  $\text{HCO}_3^-:\text{Ca}^{2+}$  ha de ser propera a 2; però s'hi observen valors lleugerament inferiors indicant un excés de calci respecte el bicarbonat que s'atribueix a la

presència de sulfat de calci (Figura 4.7). El fet que els continguts en calci mostrin correlació amb altres ions com el nitrat i el potassi no es descarta la influència d'aportacions antròpiques. Les  $P_{CO_2}$  calculades donen valors entre  $10^{-1.7}$  i  $10^{-0.5}$ , considerablement més elevats que el valor mitjà atmosfèric indicant la influència notable de la producció biòtica al sòl (Figura 4.8).

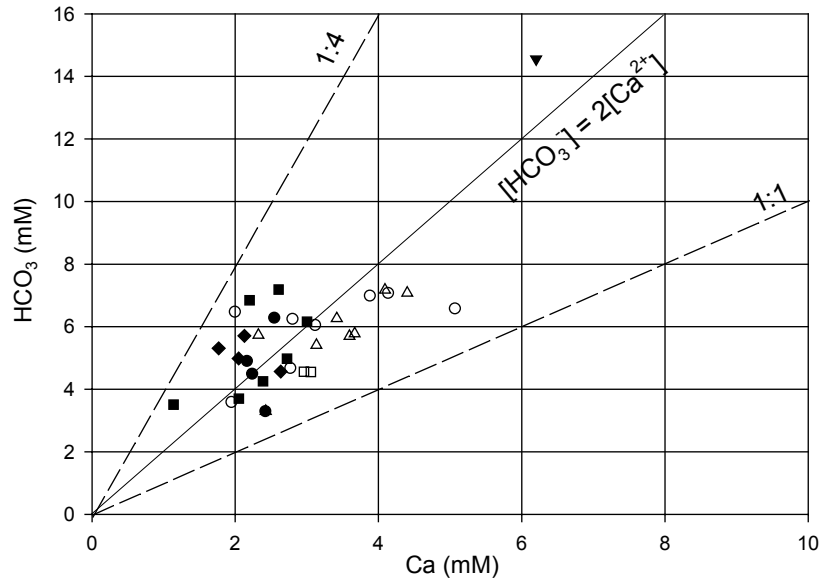


Figura 4.7. Relació molar entre el calci i el bicarbonat. Mateixa llegenda que en la Figura 4.5

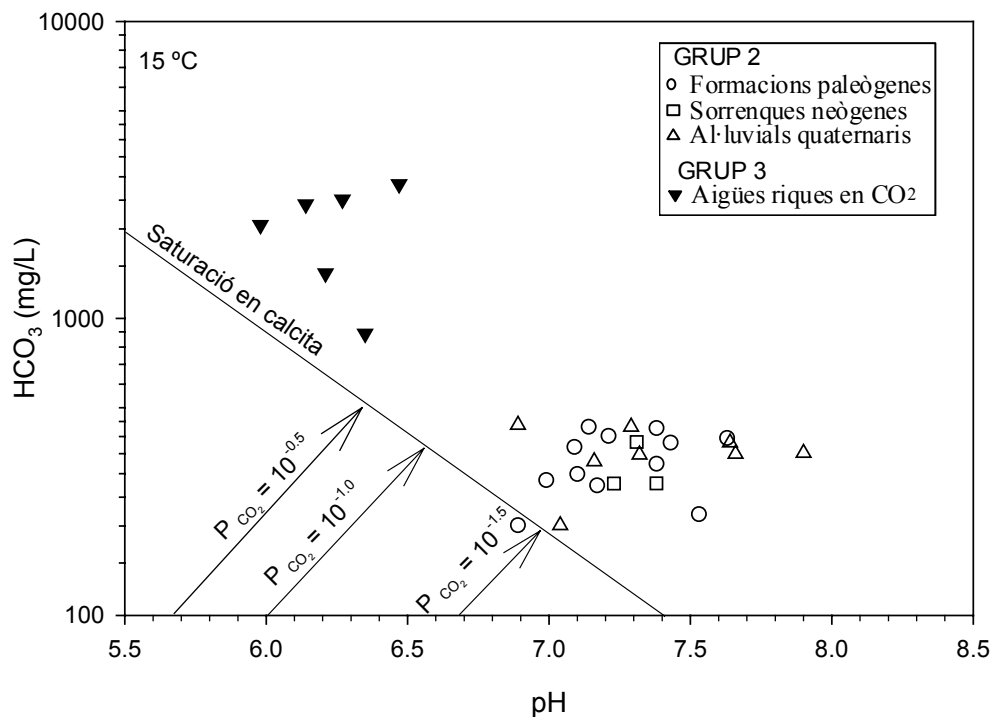


Figura 4.8 Relació entre el pH i el bicarbonat a les mostres dels grups 2 i 3.

Finalment destacar que les mostres en aqüífers sorrenes amb matriu carbonàtica (CM133, FR60 i FR84) si bé mostren composicions coherents amb la reacció dels carbonats, presenten un contingut en sílice més elevat que les mostres dels aqüífers carbonatats i al·luvials. Aquesta observació il·lustra les reaccions amb els minerals silicatats.

La disposició de mostres en el diagrama de Piper no permet establir una seqüència evolutiva per aquest grup atès que la cinètica de reacció dels minerals carbonàtics és molt ràpida i no permet establir diferències composicionals en base a temps de residència (Figura 4.9).

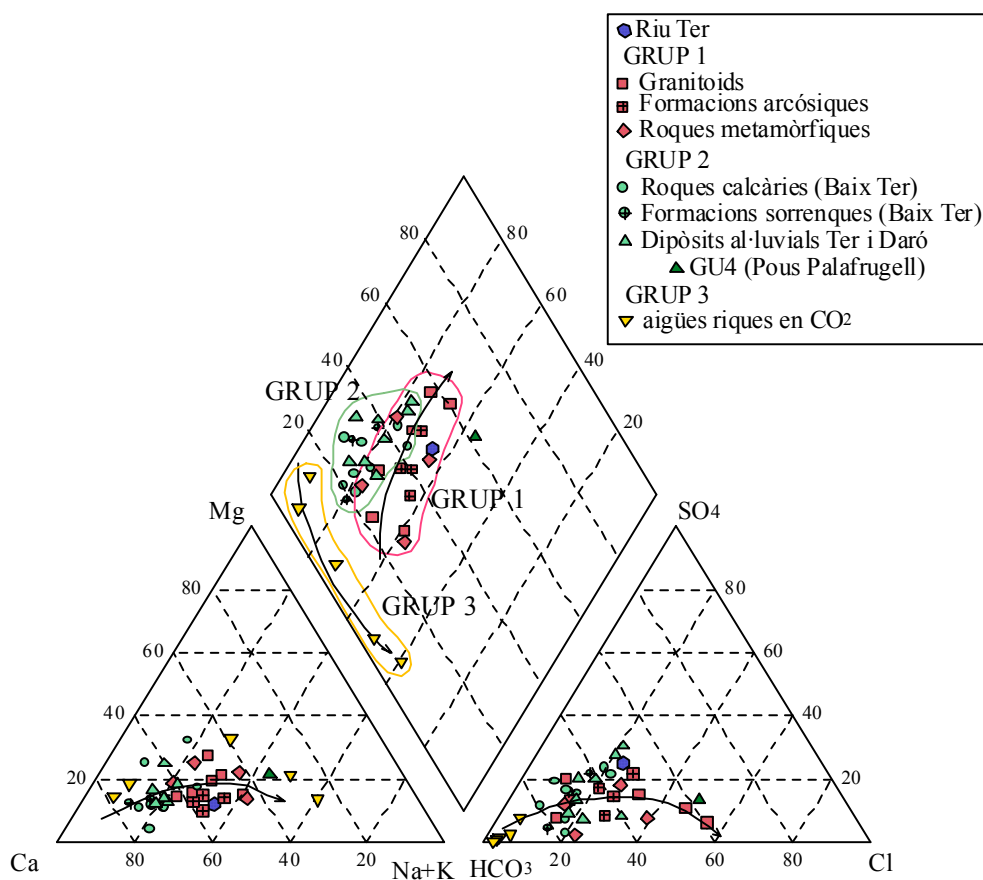


Figura 4.9 Diagrama de Piper que mostra les tendències evolutives dels diferents grups identificats.

### **GRUP 3**

A part queden les aigües picants les quals es veuen involucrades en un sistema de reaccions més complex que es descriu amb més detall en el Capítol 7. Presenten una elevada mineralització amb TDS entre 2300 i 5500, i pHs lleugerament més àcids que la resta d'aigües. El seu hidroquimisme s'atribueix a reaccions afavorides per la presència de  $\text{CO}_2$ . La seva localització

geogràfica es vincula amb les falles regionals més importants. L'elevada  $p\text{CO}_2$  (Figura 4.8) afavoreix les reaccions de dissolució i el procés d'interacció amb la roca encaixant.

Evolutivament, en les aigües picants en litologies silicatades s'observa un pas de fàcies bicarbonatades càlciques a sòdiques a mida que augmenta el temps de residència (Figura 4.9) igual que ens constata per les aigües no picants. En aquestes darreres no obstant, també s'observa una evolució cap a fàcies clorurades que no es fa palesa en les aigües picants suggerint que la variació en el quimisme d'aquestes aigües és més dependent del gas que de processos d'interacció amb la roca encaixant.

## **4.2 MODEL CONCEPTUAL DE LA HIDRODINÀMICA LOCAL**

S'ha aplicat l'estudi de les característiques hidroquímiques per establir les relacions entre les formacions hidrogeològiques i la hidrodinàmica a la zona estudi. Es considera que el massís de les Gavarres i conques adjacents configuren un sistema hidrogeològic local del qual se n'avaluen les trajectòries i components del flux.

Mitjançant l'anàlisi de les dades hidroquímiques, s'han establert les reaccions aigua-roca que es produeixen. A la vessant meridional on dominen les litologies silíciques, la composició hidroquímica dels punts responen a les característiques dels medis granítics dominats per plagiòclasis sòdiques (Garrels, 1967). La composició hidroquímica de l'aigua respon a diferents temps de residència els quals determinen l'efectivitat de la interacció amb la roca i reflecteix també particularitats de la trajectòria del sistema de flux. En aquest sentit, les composicions més clorurades en materials granítics s'han atribuït a trajectòries amb llargs períodes d'interacció amb la roca, i no es descarta que estiguin afavorides per elevades temperatures, per variacions composicionals associades a les discontinuïtats del medi o que es s'associïn a sistemes de flux que es produeixen a diferent escala. Addicionalment, la ubicació en una determinada fractura és determinant en la qualitat de l'aigua, més que la profunditat que assoleix la captació. Les aigües mostrejades en els materials neògens de la depressió de la Selva presenten característiques i relacions molars semblants a les dels granits del massís de les Gavarres (captació GI85), suggerint una prèvia circulació per aquest medi i per tant indicant una recàrrega lateral local procedent del massís, que circula preferentment a través de les fractures, vers els aquífers

semiconfinats en els sediments neògens de la depressió de la Selva. Aquestes trajectòries de flux són coherents amb les descrites en la cartografia piezomètrica pels materials superficials quaternaris i amb les relacions hidràuliques que se n'extreuen.

Als vessants septentrionals de les Gavarres (sector de les Pregavarres), el quimisme ve controlat per reaccions del sistema calcocarbonat. L'elevada cinètica de reacció d'aquestes no permet identificar reaccions d'interacció amb els materials que configuren el massís. No obstant, s'han reconegut enriquiments en determinats elements minoritaris els quals posen també de manifest el paper de les fractures en la circulació dels fluxos subterranis i la influència de minerals diferents als dels materials paleògens i quaternaris. Aquestes fractures, malgrat desplaçar els nivells aquífers més importants permeten la comunicació entre ells. S'ha descrit al Capítol 2 la diferència de nivell hidràulic entre el substrat paleogen i el recobriment al·luvial i col·luvial quaternari (el qual presenta una única superfície piezomètrica) que indica un flux dominant de sentit vertical ascendent de recàrrega des del massís. Localment, elevades extraccions en l'aquífer profund al·luvial creen cons de bombament que produeixen afeccions a la piezometria que resulten en l'ascensió de cons salins i en la participació del riu Ter.

Mitjançant aquests resultats piezomètrics i hidroquímics s'ha descrit la dinàmica local del sistema hidrogeològic de les Gavarres (Figura 4.10). Aquest massís constitueix l'àrea de recàrrega local de les formacions aquíferes de les conques adjacents. Les composicions hidroquímiques corroboren les observacions piezomètriques i introdueixen, a l'hora, addicionals consideracions que es tractaran més en detall en la present tesi. Concretament, al vessant de la Selva, es detecten composicions especials que s'atribueixen a elevats temps de residència i a reaccions més efectives amb la roca. S'apunta que aquestes reaccions poden produir-se en el marc d'un sistema de flux a diferent escala del local. En medis de baixa permeabilitat és comú trobar aigües que responen a elevats temps de residència molt elevats en profunditat i amb una notable complexitat hidroquímica en planta. Això afavoreix que pous propers mostrin característiques hidroquímiques diferents degut a la confluència de fluxos de diferents recorreguts (Carrera, 1987). S'estudiaran en els capítols següents les composicions isotòpiques i en elements menors per caracteritzar aquesta possible presència d'un altre sistema de flux.



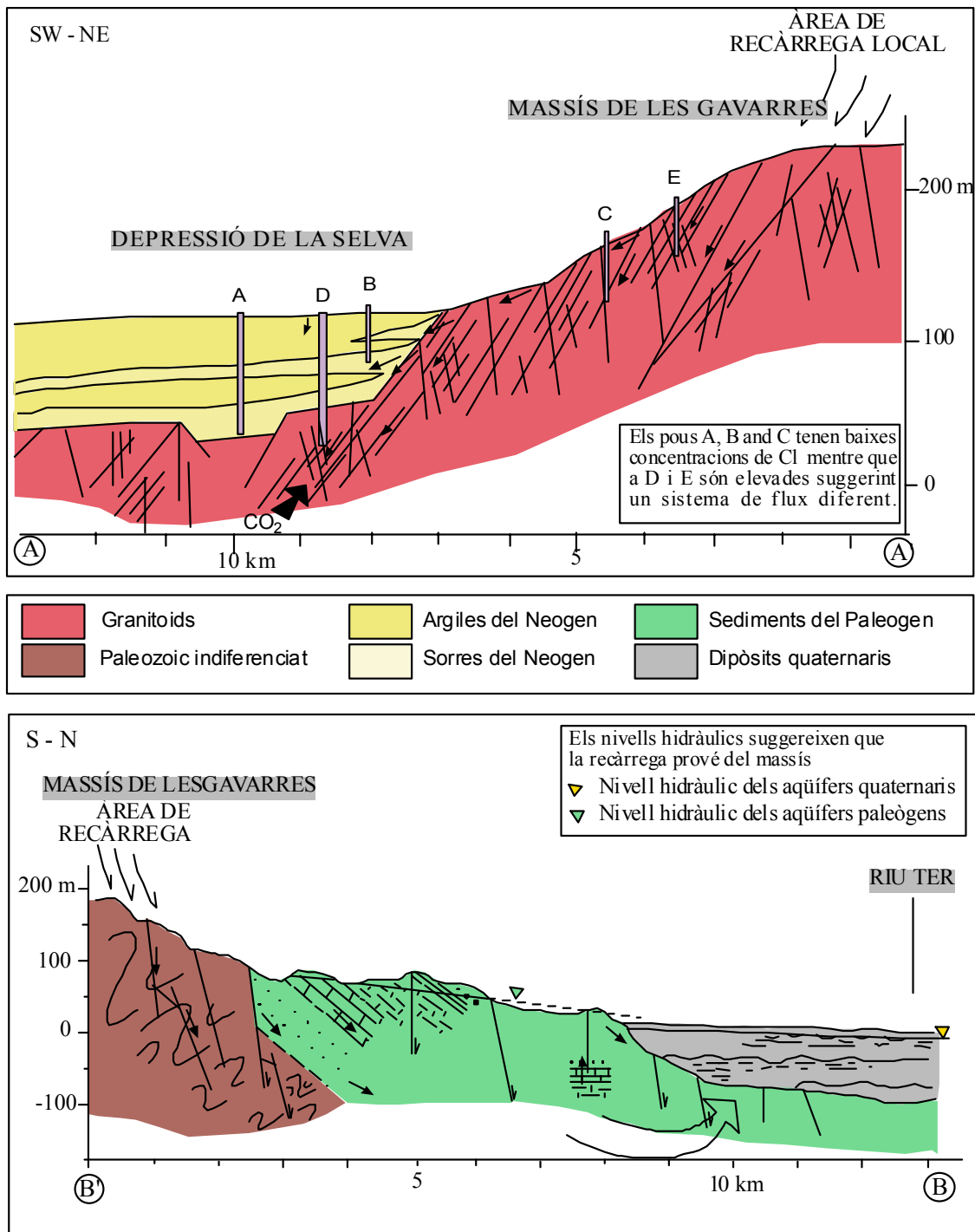


Figura 4.10 Esquema interpretatiu de la dinàmica hidrogeològica local a la depressió de la Selva i del Baix Empordà des del Massís de les Gavarres (localització dels talls a la Figura 4.1)

En termes generals, s'ha descrit en base a les dades hidroquímiques i piezomètriques, un sistema de flux dominant local en sentit divergent des del massís de les Gavarres.

A partir d'aquesta caracterització inicial del sistema hidrodinàmic, es pretén, en els propers capítols, analitzar altres característiques més particulars que permetin reconèixer i concretar la dinàmica de diferents components en el sistema de flux, i en conseqüència, establir el model de funcionament integral per a descriure les característiques que governen els sistemes de flux. En concret, s'aplicarà l'estudi dels isòtops estables de l'aigua i es realitzarà una anàlisi multivariable dels elements hidroquímics minoritaris, la variabilitat dels quals no ha permès incloure'ls en aquesta descripció general. També, s'avaluarà el paper de les aigües picants dins el sistema hidrodinàmic local.

### **4.3 APLICACIÓ DE LES DADES HIDROQUÍMIQUES A L'ESTIMACIÓ DE LA RECÀRREGA**

Anteriorment, s'han presentat i analitzat les composicions hidroquímiques de la zona d'estudi les quals, junt amb la informació piezomètrica han permès establir la hidrodinàmica general del sistema. A continuació, es pretenen utilitzar les dades hidroquímiques per avaluar la recàrrega a les formacions geològiques des de la superfície amb la finalitat de quantificar els aportos locals i el seu paper en el sistema de flux local.

#### **4.3.1 METODOLOGIA**

El mètode de càlcul usat és un balanç de clorurs on es considera cadascuna de les aportacions d'aigua amb la concentració de clorurs corresponent.

El balanç de massa es basa en la consideració que l'ió clorur, una vegada dipositat junt amb la precipitació, és sotmès a processos d'evapotranspiració els quals produeixen una concentració de l'ió proporcional a la relació entre la concentració a la precipitació i a la recàrrega atès que l'evapotranspiració no presenta clorurs. S'utilitzen dades de la precipitació local perquè la concentració d'aquest ió varia temporal i espacialment i en funció de la procedència de la massa d'aire.

L'aplicabilitat de l'ió clorur radica en el fet que aquest solut és conservatiu. Es caracteritza també per una notable solubilitat i no acostuma a formar complexos, tampoc sol involucrar-se en reaccions d'adsorció ni d'absorció, no entra en moltes reaccions d'oxidació o reducció, no forma

sals de baixa solubilitat i no entra en rols bioquímics. La seva circulació en el cicle hidrològic és bàsicament per processos físics i en la majoria de sòls es transporta amb l'aigua amb una pèrdua o retard menor bàsicament nul. És de destacar que és de fàcil mostreig i mesura analítica.

Caldrà prendre especial consideració envers l'aportació de clorur per part del terreny en zones amb presència d'evaporites i de roques ígnies. En la zona d'estudi si bé es descarta la presència del primer tipus de material, sí que és freqüent la segona litologia. Cal però dir que la concentració en que sol trobar-se aquest ió a les roques és bastant baixa, excepte en els granitoids cataclàstics. Els minerals de les granodiorites que en presenten majors continguts són el feldspatoid sodalita i l'apatita. Addicionalment, Kuroda i Saudell (1953) indiquen que el Cl pot reemplaçar l'hidròxid de la biotita i l'hornblenda. L'aportació d'aquest ió per part de les roques requereix un elevat temps d'interacció, fet per qual es considerarà negligible aquesta aportació en la zona no saturada i en la part més soma dels aqüífers que s'estudiaran. No s'han utilitzat les captacions més profundes ni aquelles en les que s'han detectat concentracions elevades d'altres elements.

El bromur presenta un comportament semblant, és també conservatiu però la seva concentració és de dos ordres de magnitud menor, no obstant, és útil per reconèixer l'origen del clorur de l'aigua subterrània.

Custodio *et al.*, (1997) descriu el mètode utilitzat en el present treball, considerant els fluxos d'aigua del balanç com continus (es tracta de valors que són funció del temps encara que no s'indiqui expressament). El balanç de massa de clorur en un interval de temps  $\Delta t$  es realitza considerant les concentracions d'aquest ió als termes:

$$\text{Precipitació} + \text{escorrentia entrant} = \text{escorrentia sortint} + \text{escorrentia lateral} + \text{recàrrega} \\ \text{vertical} + \text{variació de clorurs en el sòl.}$$

S'hi suposa que l'escorrentia és horitzontal i la recàrrega és vertical. Els terme de *la variació de clorurs al sòl* permet minimitzar l'aport i/o lixiviat freàtic de clorurs, però en un sistema sense tendència evolutiva o amb un  $\Delta t$  gran, la variació de clorurs en el perfil serà zero. Aquestes consideracions permeten treballar amb els valors mitjans de:

$$P C_p + S_i C_{si} = S_o C_{so} + SS C_{ss} + R C_r$$

Sent,

|                   |                                                                        |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------|
| P =               | Precipitació (L/T)                                                     |
| C <sub>p</sub> =  | Concentració de clorurs en la precipitació (mg/L)                      |
| S <sub>i</sub> =  | Escorrentia d'entrada (L/T)                                            |
| C <sub>si</sub> = | Concentració de clorurs en l'escorrentia d'entrada (mg/L)              |
| S <sub>o</sub> =  | Escorrentia sortint (L/T)                                              |
| C <sub>so</sub> = | Concentració de clorurs en l'escorrentia sortint (mg/L)                |
| SS =              | Escorrentia lateral subsuperficial (L/T)                               |
| C <sub>ss</sub> = | Concentració de clorurs en l'escorrentia lateral subsuperficial (mg/L) |
| R =               | Recàrrega (L/T)                                                        |
| C <sub>r</sub> =  | Concentració de clorurs en la recàrrega (mg/L)                         |

Les característiques locals del clima permeten considerar als termes d'escorrentia propers a zero durant la major part de l'any i, conseqüentment, anul·lar-los. Durant les èpoques torrencials en que l'escorrentia és important, es pot considerar que  $C_{si} = C_{so}$ , el terme  $S_i - S_o$  és proper a zero i l'escorrentia lateral subsuperficial presentarà valors de concentració assimilables als de la recàrrega ( $C_{ss} = C_r$ ) (Custodio *et al.*, 1997). Amb aquestes consideracions, l'equació anterior es redueix a:

$$P C_p = (S_i - S_o) C_{si} + (R + SS) C_r$$

I finalment a:

$$R \approx P (C_p / C_r)$$

Aquesta aproximació suposarà però una subestimació de la recàrrega que caldrà tenir en compte en interpretar les dades.

Els únics cursos superficials amb cabals anuals mesurables són els rius Ter i Onyar els quals presenten concentracions en clorurs influenciades per aportacions antròpiques però les cartografies piezomètriques indiquen que no influeixen a l'aquífer al·luvial

S'han escollit, per aquest estudi, els pous més superficials i les fonts, i així mateix, s'han descartat les zones on ha estat descrita la presència d'un flux horitzontal com els nivells aquífers de la depressió de la Selva (CS117, CS58) o les àrees on s'intueix una altra component, més o menys important, en el flux (CS118, CS80). També, per evitar la possible mescla d'aigües de diferent origen degut al bombeig per l'extracció de les mostres, s'ha escollit, d'entre els pous

més soms aquells situats en zones més homogènies i mitjançant l'estudi d'altres ions i isòtops on se'n disposava. Segons aquest criteri s'ha descartat utilitzar GI85, CS10, i GI87. També s'han descartat aquells en els que s'hi ha reconegut contaminants d'origen antròpic de diferents tipus (nitrats, metalls...) (GU15, FN3, SD1, CO55...) o en els que s'ha descrit la mescla amb intrusió salina (GU4, GU7). Finalment, també s'han eliminat els pous ubicats en zones de fractures importants atès que s'hi produeixen fluxos preferents que poden atribuir-se a diferents sistemes (CS80, GI85, CS113, CS118, CS138). Malgrat s'ha descrit la presència d'una component del flux procedent de les Gavarres en els materials paleògens, aquests s'han inclòs en aquest balanç atès que es considera que es tracta del mateix sistema local i que el medi no aporta clorurs. Els resultats però seran una sobrestimació del valor real. Les fonts utilitzades responen a un cabal relacionat amb els materials quaternaris. A la Taula 4.3 s'indiquen els pous mostrejats i l'aquífer al qual pertanyen (se n'indica la ubicació a l'Annex 2).

El valor utilitzat de  $C_p \cdot P$  correspon al valor mitjà d'aquest producte per cada un dels mesos del període 1996-2002 de les mostres recollides a Mas Badia (La Tallada d'Empordà) (Taula 4.4).

Taula 4.3. Informació sobre els punts utilitzats pel càlcul de la recàrrega per balanç de clorurs.

| <b>PUNT MOSTREIG</b> | <b>PROFUNDITAT POU</b> | <b>TIPUS AQUIFER</b>   |
|----------------------|------------------------|------------------------|
| CS105                | 8.9                    | Al·luvial Gotarra      |
| PS41                 | 100                    | Calcàries Eocè         |
| ST54                 | 87                     | Calcàries Eocè         |
| GI104                | 60                     | Calcàries Eocè         |
| ES1                  | Font                   | Calcàries Eocè         |
| RO1                  | Font                   | Granitoid i quaternari |
| GI115                | Font                   | Paleozoic i col·luvial |
| BE2                  | Font                   | Sauló                  |
| CM133                | 60                     | Sorrenques Neògen      |
| VE3                  | 9.6                    | Ter superficial        |
| GU2                  | 17                     | Ter superficial        |
| FO11                 | 21                     | Ter superficial        |
| SD14                 | 9                      | Ter superficial        |

Taula 4.4. Concentració de clorurs (en mg/L) a la precipitació (en mm) de Mas Badia pel període 1996-2001.

|                 |              | 1996  | 1997   | 1998  | 1999   | 2000  | 2001   |
|-----------------|--------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| <b>Gener</b>    | Cl           |       | 5.75   | 5.49  | 4.52   | 6.76  | 23.40  |
|                 | Precipitació |       | 68.40  | 81.40 | 81.40  |       | 16.40  |
| <b>Febrer</b>   | Cl           |       |        |       |        |       | 7.68   |
|                 | Precipitació |       |        |       |        |       | 21.40  |
| <b>Març</b>     | Cl           |       |        |       | 4.52   | 14.20 |        |
|                 | Precipitació |       |        |       | 52.00  | 22.00 | 26.60  |
| <b>Abril</b>    | Cl           |       |        | 32.90 | 14.20  | 6.97  | 4.34   |
|                 | Precipitació |       |        | 32.80 | 22.00  | 68.60 | 17.80  |
| <b>Maig</b>     | Cl           | 4.61  |        | >10   | 1.77   | 11.16 | 14.30  |
|                 | Precipitació | 93.80 |        |       | 93.80  | 13.80 | 20.00  |
| <b>Juny</b>     | Cl           |       |        | 2.26  | 10.60  | 6.92  |        |
|                 | Precipitació |       |        | 30.20 | 82.80  | 6.60  |        |
| <b>Juliol</b>   | Cl           |       | 17.10  |       | 40.40  | 7.38  |        |
|                 | Precipitació |       | 34.40  |       | 32.00  | 88.80 | 42.60  |
| <b>Agost</b>    | Cl           | 11.80 | 9.98   | 10.60 |        |       |        |
|                 | Precipitació | 63.80 | 13.40  | 21.43 | 11.40  |       |        |
| <b>Setembre</b> | Cl           | 4.51  | 4.60   | 3.38  | 4.55   | 12.90 | 2.41   |
|                 | Precipitació | 16.40 | 96.60  | 96.60 | 122.60 | 49.40 | 142.40 |
| <b>Octubre</b>  | Cl           |       | 15.20  | 1.42  |        | 9.14  | 2.98   |
|                 | Precipitació |       | 94.00  | 32.60 |        | 53.20 | 37.80  |
| <b>Novembre</b> | Cl           |       | 8.21   | 2.15  | 8.41   | 4.63  | 5.05   |
|                 | Precipitació |       | 145.50 | 12.80 | 51.20  | 37.40 | 37.40  |
| <b>Desembre</b> | Cl           | 6.29  | 13.40  | 11.60 |        | 8.14  |        |
|                 | Precipitació |       | 45.50  | 51.60 |        | 10.00 |        |

### 4.3.2 ESTIMACIÓ DE LA RECÀRREGA

S'ha calculat el valor de Cp·P per un any promig que ha resultat de 5130.01 mg/m<sup>2</sup> i, considerant les suposicions anteriors, s'han calculat les tasses de recàrrega (Taula 4.5).

Aquests resultats mostren que els valors més baixos de recàrrega es localitzen als aqüífers quaternaris, els al·luvials del Ter i de la Selva i al sauló (entre 9 i 15 %). Els valors més elevats de recàrrega, en canvi, es localitzen a les calcàries eocèniques i als granitoids (entre un 20 i un 33%). Les sorrenques presenten valors mitjos entre aquests dos grups descrits (22%). En general doncs, les menors recàrregues se situen el les formacions quaternàries però ja s'ha indicat que els resultats per les calcàries eocèniques es considera sobrestimat.

Taula 4.5. Tasses de recàrrega estimades en diferents formacions hidrogeològiques (Cr = concentració de clorurs en la recàrrega, R = recàrrega estimada i % P = percentatge que representa la recàrrega sobre la mitjana anual de precipitació)

| PUNT MOSTREIG | Fm. hidrogeològica     | Cr (mg/L) | R (mm/any) | % P anual |
|---------------|------------------------|-----------|------------|-----------|
| CS105         | Al·luvial Gotarra      | 71.6      | 71.65      | 12.77     |
| PS41          | Calcàries Eocè         | 40.9      | 125.43     | 21.67     |
| ST54          | Calcàries Eocè         | 26.6      | 192.86     | 33.32     |
| GI104         | Calcàries Eocè         | 28.9      | 177.51     | 30.67     |
| ES1           | Calcàries Eocè         | 34.6      | 148.27     | 25.62     |
| RO1           | Granitoid i quaternari | 27.3      | 187.91     | 32.47     |
| GI115         | Paleozoic i col·luvial | 47.6      | 107.66     | 18.60     |
| BE2           | Sauló                  | 84.3      | 60.88      | 10.52     |
| CM133         | Sorrenques Neogen      | 40.4      | 126.98     | 21.94     |
| VE3           | Ter superficial        | 89.8      | 57.13      | 9.87      |
| GU2           | Ter superficial        | 78.4      | 65.43      | 11.30     |
| FO11          | Ter superficial        | 55.6      | 92.27      | 15.94     |
| SD14          | Ter superficial        | 59.8      | 85.79      | 14.82     |

Dins dels aquífers al·luvials destacar els valors obtinguts pels pous VE3 i GU2. En ambdós ha estat descrita la participació del riu Ter en base a isòtops estables (Mas-Pla i Vilanova, 2001 i Capítol 5) i característiques variables en el temps. S'observa que aquests dos punts són els que mostren el contingut en clorurs més elevat dels aquífers al·luvials, fet que dona una tasa de recàrrega menor. Coneixent el contingut mitjà en clorurs al riu Ter (83.1 mg/L) i a la precipitació local, es pot estimar l'aportació de cada un dels dos orígens a aquests punts assumint que la tasa de recàrrega hauria de ser similar a la dels punts FO11 i SD14. Aquest balanç xifra l'aportació del riu Ter en un 65% en aquests punts on es força la participació del riu. No obstant, aquest valor cal considerar-lo orientatiu atès que només s'ha tingut en compte el contingut en clorurs i suposant-ne sols dos orígens. En capítols posteriors es realitza una anàlisi més exhaustiva.

Aquests resultats són coherents amb els obtinguts en anteriors treballs. En el Capítol 1 s'estima un valor sobreestimat de la recàrrega xifrant la precipitació eficaç en un 22 i 26 %. L'IGME (1987) presentava valors més elevats, d'un 37% mentre que els calculats per Domènec *et al.* (1979) a Platja d'Aro voltaven el 21%.

Així doncs, es constata que el mètode dels clorurs és aplicable a l'estudi de la recàrrega en aquesta zona atès que en resulten valors coherents amb els obtinguts en anteriors treballs i addicionalment, permet valorar les aportacions de diferents procedències.



# **5. APLICACIÓ DELS ISÒTOPS AL CONEIXEMENT DEL SISTEMA**

---

---

## **5.1 DOTACIONS EN ISÒTOPS ESTABLES: $^{18}\text{O}$ I $^2\text{H}$**

### **5.1.1 DOTACIÓ ISOTÒPICA DE LA PRECIPITACIÓ**

5.1.1.1 Estimació de la recta meteòrica local

5.1.1.2 Variacions espacials i temporals

5.1.1.3 Altres línies meteòriques

### **5.1.2. DOTACIÓ ISOTÒPICA DE LES AIGÜES SUBTERRÀNIES:**

5.1.2.1 Sector del Baix Ter

5.1.2.2 Sector de la Selva

### **5.1.3 OXÍGEN-18 I DEUTERI A LES AIGÜES PICANTS**

## **5.2. ANÀLISI DEL CONTINGUT EN TRITI**

### **5.2.1 PRESENTACIÓ DE LES DADES. RELACIÓ AMB EL MEDI**

### **5.2.2- FUNCIÓ D'ENTRADA DEL TRITI**

### **5.2.3 MÈTODE D'ESTIMACIÓ DEL TEMPS DE TRÀNSIT**

### **5.2.4 RESULTATS: TEMPS DE TRÀNSIT MITJÀ**

## **5.3 ANÀLISI DELS ISÒTOPS D'ESTRONCI**

### **5.3.1 MARC CONCEPTUAL**

### **5.3.2 PRESENTACIÓ DE LES DADES**

5.3.2.1 El medi

5.3.2.2 Les aigües subterrànies

### **5.3.3 DISTRIBUCIÓ ESPACIAL**

### **5.3.4 DINÀMICA DEL SISTEMA DE FLUX**

## **5.4 AVALUACIÓ DEL PROCÉS D'INTRUSIÓ SALINA**

## **5.5 SÍNTESI**

L'aplicació de tècniques isotòpiques en l'estudi de sistemes hidrogeològics pren especial rellevància en zones muntanyoses on la disponibilitat de mesures piezomètriques és limitada; doncs permeten contrastar els resultats obtinguts amb altres mètodes i aportar i confirmar noves hipòtesis sobre la dinàmica del sistema. També permeten disposar d'una visió més àmplia del sistema i considerar, si s'escau, sistemes de flux a diferents escales.

Aquest capítol s'estructura bàsicament en tres parts, la primera estudia els isòtops estables de l'aigua, l'oxígen-18 i el deuteri, la segona el contingut en triti, i finalment, els isòtops d'estronci resultants de la interacció amb la roca. Les tres parts s'enfoquen amb objectius diferenciats, però que conjuntament permeten proposar una dinàmica del flux subterrani al final del capítol complementant els resultats dels capítols anteriors. S'ha optat per aquest estudi multiisotòpic atès que minimitza les incerteses i ambigüitats a les que estan sotmeses les interpretacions basades en isòtops individuals (Bullen et al, 2001).

Els isòtops estables de l'aigua, oxígen-18 ( $^{18}\text{O}$ ) i deuteri ( $\text{D}$  o  $^2\text{H}$ ) s'estudien amb l'objectiu de traçar el moviment, l'evolució i els processos que es produeixen a l'aigua. Concretament, s'utilitzen per determinar les condicions i característiques de la zona de recàrrega, els processos

en la zona del sòl i, finalment les reaccions d'intercanvi isotòpic amb els minerals de les roques si es produeixen temps de residència notables o elevades temperatures (IAEA, 1981).

L'àrea de recàrrega dels aqüífers es caracteritza mitjançant l'anàlisi del contingut isotòpic de la precipitació. Aquest permet definir línies meteòriques locals que s'utilitzen per identificar procedències de les trajectòries de flux i la dinàmica dels diferents sistemes caracteritzats.

El contingut en triti en les diferents formacions hidrogeològiques s'analitza amb la finalitat d'estimar-hi els temps de residència i establir les relacions entre elles.

Tanmateix, s'aplica l'anàlisi dels isòtops d'estranci a l'àrea d'estudi atès que els seus continguts no estan relacionats amb els isòtops de l'aigua sinó que estan sotmesos a processos independents. La dotació en isòtops d'estranci s'utilitza per estudiar l'origen, edat i característiques dels soluts incorporats a l'aigua durant la trajectòria del flux i els processos que els regeixen.

Finalment, s'estudia el procés d'intrusió salina en funció de les dotacions isotòpiques i composicions hidroquímiques avaluant les mescles entre les procedències suggerides per les composicions de les mostres.

## **5.1 DOTACIONS EN ISÒTOPS ESTABLES: $^{18}\text{O}$ I $^2\text{H}$**

La composició en isòtops estables de l'aigua subterrània és característica de la zona de recàrrega i, per tant, del seu origen. En aquest sentit, es pretén aplicar l'anàlisi d'aquests dos isòtops amb la finalitat de conèixer el sistema hidrogeològic proposat i per inferir possibles orígens de l'aigua extreta de les formacions hidrogeològiques. Per a tal fi, es començarà analitzant la dotació isotòpica de la precipitació, les seves característiques locals i la relació amb la dotació estudiada en altres emplaçaments. Aquesta anàlisi s'aplica posteriorment a l'aigua de les diferents formacions hidrogeològiques i se suggereix, juntament amb els resultats piezomètrics, una dinàmica hidrogeològica regional del sistema.

### **5.1.1 DOTACIÓ ISOTÒPICA DE LA PRECIPITACIÓ**

Les dotacions dels isòtops estables de la precipitació venen condicionades per la latitud, l'altitud, la continentalitat, la quantitat de precipitació i la temperatura atmosfèrica. Una diferència

d'altitud de 250 m, per exemple, produeix variacions isotòpiques mesurables (Niemeyer et al., 1997). Els processos de fraccionament més habituals per aquests dos isòtops són l'evaporació, la condensació i les reaccions geoquímiques amb el medi.

Amb la finalitat de determinar les característiques locals de la recàrrega s'ha estudiat el contingut isotòpic de la precipitació a la depressió del Baix Empordà (mostres recollides a Mas Badia, La Tallada d'Empordà, 20 m. s.n.m) pel període 1996-2000. El valor de precipitació mensual prové del mateix observatori. Les dades es representen en la Figura 5.1 i s'exposen en la Taula 5.1). Si bé la variació temporal del contingut en deuteri és major que la de la dotació en oxigen-18, cap dels dos presenta una relació clara amb la quantitat de precipitació ni amb l'excés en deuteri (d). Es procedirà a continuació a avaluar aquestes relacions per calcular la línia meteòrica local.

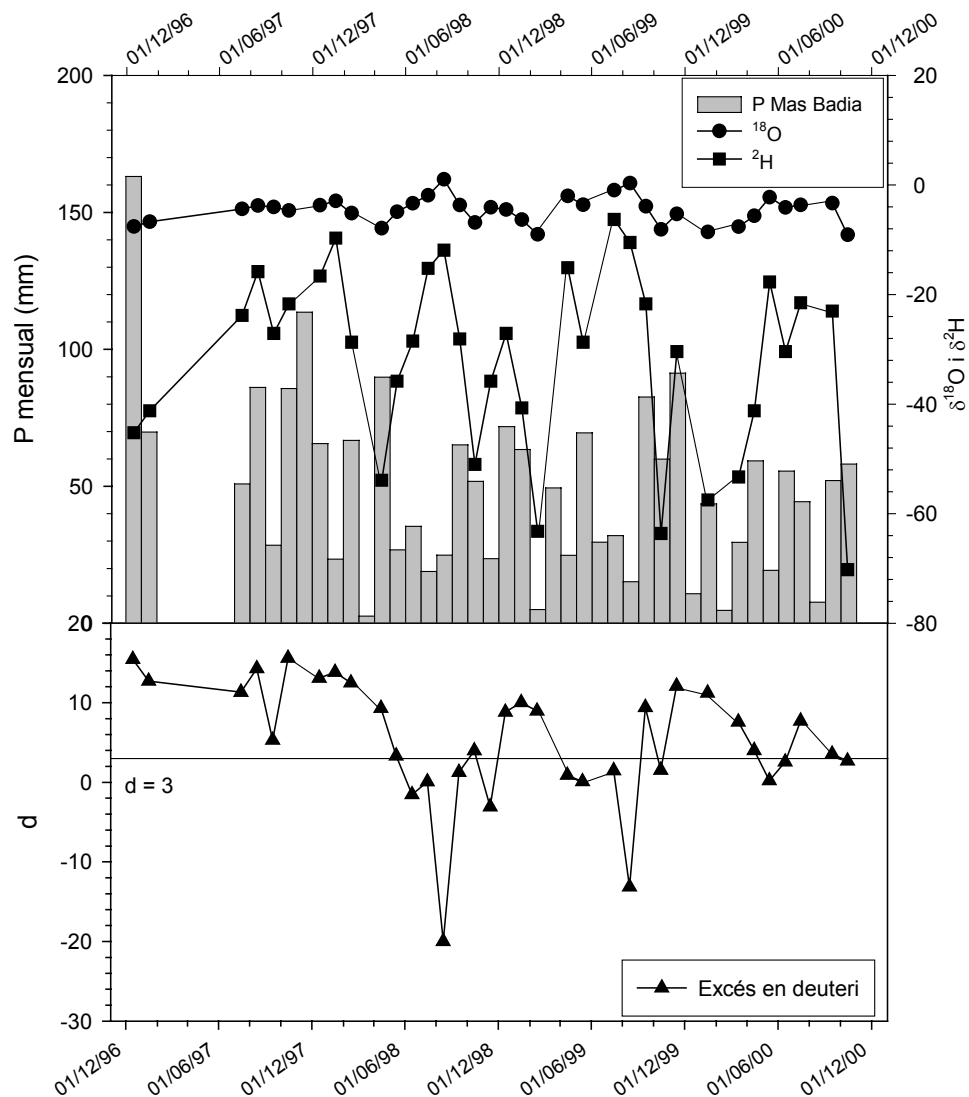


Figura 5.1 Composició isotòpica de la precipitació a la Tallada d'Empordà (Taula 5.1)

Taula 5.1 Dades isotòpiques de mostres de precipitació recollides al Mas Badia de La Tallada d'Empordà. Excés de deuteri calculat segons l'equació:  $d = \delta^2H - 8\delta^{18}O$  (Dansgaard, 1964)

|        | $\delta^{18}O$ (‰) | $\delta^2H$ (‰) | d (excés Deuteri) | Precipitació (mm) |
|--------|--------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| des-96 | -7.58              | -45.2           | 15.44             | 163.1             |
| gen-97 | -6.74              | -41.2           | 12.72             | 69.8              |
| jul-97 | -4.39              | -23.8           | 11.32             | 50.9              |
| ago-97 | -3.76              | -15.8           | 14.28             | 86.1              |
| set-97 | -4.05              | -27.1           | 5.30              | 28.5              |
| oct-97 | -4.66              | -21.7           | 15.58             | 85.7              |
| des-97 | -3.71              | -16.6           | 13.08             | 65.6              |
| gen-98 | -2.94              | -9.7            | 13.82             | 23.4              |
| feb-98 | -5.15              | -28.7           | 12.50             | 66.8              |
| abr-98 | -7.90              | -53.9           | 9.30              | 89.8              |
| mai-98 | -4.89              | -35.8           | 3.32              | 26.8              |
| jun-98 | -3.37              | -28.5           | -1.54             | 35.4              |
| jul-98 | -1.91              | -15.2           | 0.08              | 18.9              |
| ago-98 | 1.01               | -11.9           | -19.98            | 24.9              |
| set-98 | -3.67              | -28.1           | 1.26              | 65.1              |
| oct-98 | -6.87              | -51.0           | 3.96              | 51.8              |
| nov-98 | -4.09              | -35.8           | -3.08             | 23.6              |
| des-98 | -4.49              | -27.1           | 8.82              | 71.8              |
| gen-99 | -6.34              | -40.7           | 10.02             | 63.4              |
| feb-99 | -9.02              | -63.2           | 8.96              | 5.00              |
| abr-99 | -2.00              | -15.1           | 0.90              | 24.8              |
| mai-99 | -3.60              | -28.7           | 0.10              | 69.5              |
| jul-99 | -0.97              | -6.3            | 1.46              | 32.0              |
| ago-99 | 0.33               | -10.5           | -13.14            | 15.2              |
| set-99 | -3.89              | -21.7           | 9.42              | 82.6              |
| oct-99 | -8.14              | -63.6           | 1.52              | 59.9              |
| nov-99 | -5.31              | -30.4           | 12.08             | 91.3              |
| gen-00 | -8.59              | -57.5           | 11.22             | 43.6              |
| mar-00 | -7.61              | -53.3           | 7.58              | 29.5              |
| abr-00 | -5.65              | -41.2           | 4.00              | 59.3              |
| mai-00 | -2.24              | -17.7           | 0.22              | 19.3              |
| jun-00 | -4.12              | -30.4           | 2.56              | 55.5              |
| jul-00 | -3.65              | -21.5           | 7.70              | 44.4              |
| set-00 | -3.32              | -23.0           | 3.56              | 52.1              |
| oct-00 | -9.11              | -70.2           | 2.68              | 58.1              |

### 5.1.1.1 Estimació de la recta meteòrica local

La línia meteòrica local (LMWL, *Local Meteoric Water Line*) és característica de cada localitat i pot diferir significativament de la línia meteòrica global (GMWL, *Global Meteoric Water Line*), com a resultat dels diferents orígens del vapor d'aigua i les subseqüents modificacions per processos secundaris. La recta meteòrica global, definida per Craig (1961) ve donada per la relació:

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰ SMOW}$$

La línia meteòrica local (Figura 5.2) estimada en la zona d'estudi a partir de les mostres recollides és:

$$\delta^2\text{H} = -2.69 (\pm 2.32) + 6.27 (\pm 0.44)\delta^{18}\text{O}, \quad \text{amb } r^2 = 0.859$$

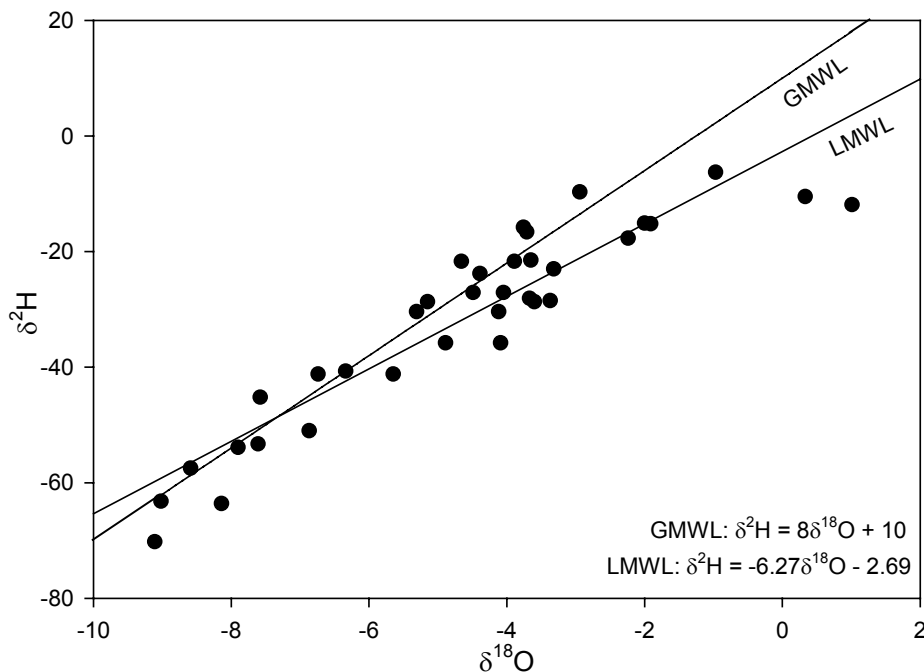


Figura 5.2 Recta meteòrica global i local

La baixa pendent de la línia meteòrica local indica de processos d'evaporació (Friedman *et al.*, 1962), els quals poden produir-se tant durant la precipitació com en el col·lector de la mostra. Així, la metodologia de mostreig d'aigua de pluja pot introduir errors a la mesura final per

processos postdeposicionals (bàsicament evaporació), o no ésser representativa la distribució anual de la precipitació si les sèries de temps no són completes.

La integritat de les dades es pot avaluar examinant el seu excés en deuteri,  $d$ , com un indicador de la potencial evaporació de la mostra (Figura 5.1 i Taula 5.1; Harvey, 2000). Aquest paràmetre es calcula segons l'equació (Dansgaard, 1964):

$$d = \delta^2 H - 8\delta^{18} O$$

En general, l'excés en deuteri de la precipitació ve definit pel procés d'interacció aire-mar sobre la superfície oceànica (Craig i Jordan, 1965; Merlivat i Jouzel, 1979; Gat, 1996). La constància d'aquest valor es veu afectada per processos d'evaporació que tornen humitat a l'aire a mida que la massa d'aire es desplaça. També pot veure's afectat per l'evaporació de la precipitació, tant mentre cau com dins del col·lector. Segons Merlivat i Jouzel (1979) per a rangs de temperatura d'entre 20-30°C i humitat relativa de 70-95% sobre l'oceà, el valor inicial de l'excés de deuteri ha de ser entre 3 i 15‰.

Amb la finalitat de minimitzar l'error que poden introduir les mostres sotmeses a evaporació en el col·lector s'han exclòs aquelles on l'excés de deuteri és inferior a 3 (Taula 5.1 i Figura 5.3).

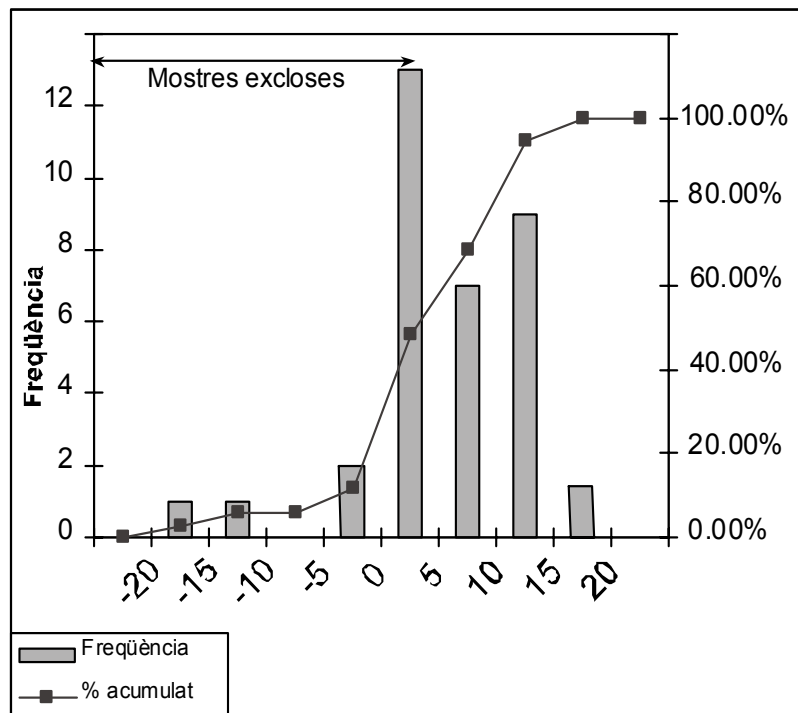


Figura 5.3 Histograma de l'excés en Deuteri usat com a referència per excloure determinades mostres.

Només s'ha considerat el límit inferior atès que el valor màxim que assoleixen les mostres és de 15.5. La recta meteòrica corregida per exclusió de les mostres senyalades que s'obté és:

$$\delta^2\text{H} = 7.98 (\pm 2.71) + 7.85 (\pm 0.47)\delta^{18}\text{O}, \quad (r^2 = 0.924)$$

la qual presenta una pendent més propera a la de la GMWL. En particular, les mostres més afectades pel procés d'evaporació postdiposicional corresponen a les recollides durant els mesos més calorosos (juny, juliol i agost), quan la recàrrega és pràcticament nul·la (Figura 5.1 i 5.4).

### 5.1.1.2 Variacions espacials i temporals

La quantitat de precipitació mensual a Mas Badia no mostra cap relació amb el contingut isotòpic de la mateixa. No obstant, es detecta que les majors quantitats de precipitació es corresponen amb notables quantitats d'excés de deuteri (Figura 5.4).

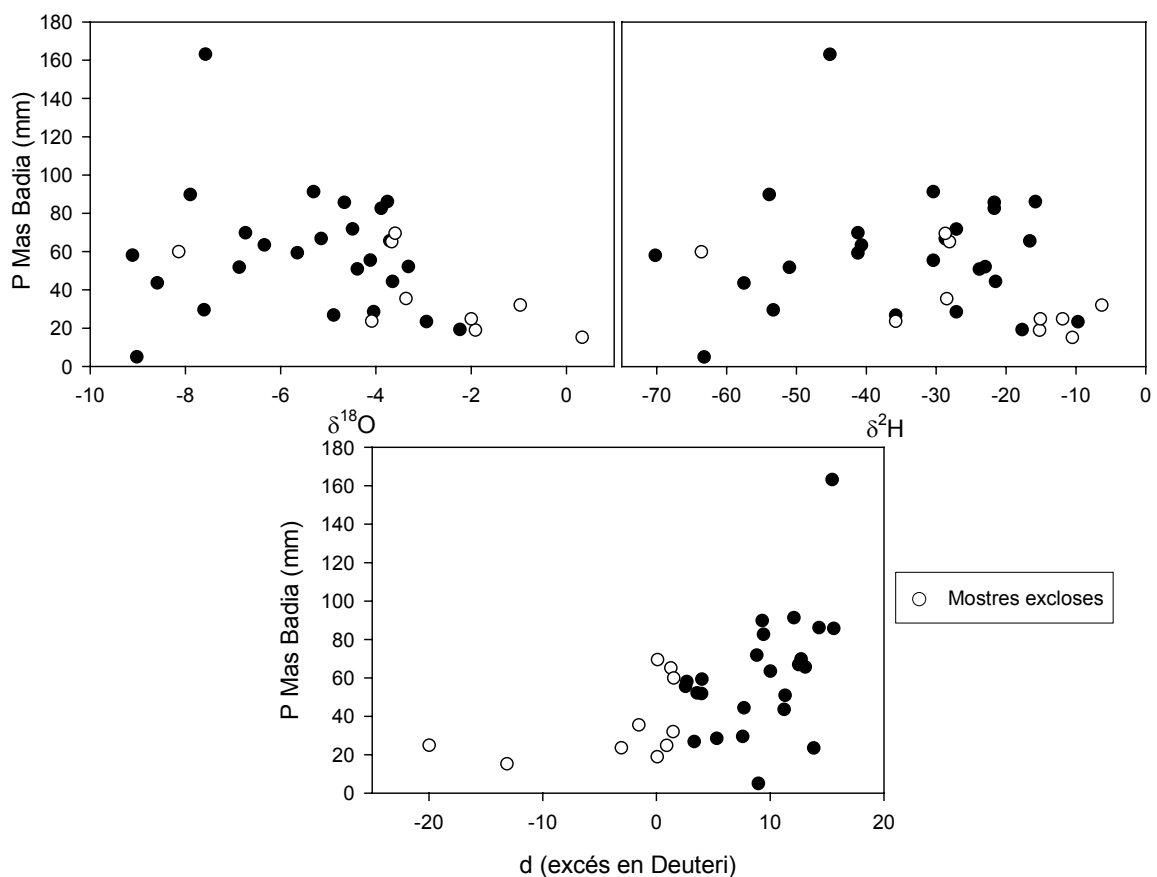


Figura 5.4 Relació entre la precipitació, l'excés en Deuteri i el contingut isotòpic



La temperatura, d'altra banda, tampoc mostra cap relació amb el contingut isotòpic. Només es constata el caràcter més pesat de les mostres recollides a l'estiu Així, el contingut mitjà dels isòtops en les mostres de juny, juliol i agost és de:  $\delta^{18}\text{O} = -2.31 (\pm 0.67)$  i  $\delta^2\text{H} = -18.21 (\pm 2.27)$ ; els quals, addicionalment, defineixen una recta de baixa pendent, indicativa de processos evaporatius. No és possible diferenciar si aquests s'han produït durant la precipitació o ja en el mateix col·lector.

La manca de relació directa entre la temperatura i l'excés en deuteri s'atribueix a la procedència de les masses d'aire, del mediterrani i de l'atlàntic. Diverses estacions situades en la costa mediterrània mostren un excés en deuteri molt elevat, normalment superior a 10 (valor mig de 19) fet que s'atribueix a l'elevat dèficit d'humitat (70%) sobre aquest mar (Plata, 1994), en canvi sobre l'oceà atlàntic la humitat relativa sol ser del 85% resultant un excés de deuteri de 11.5. Aquests fronts atlàntics són menys intensos i se n'evapora la major part, de manera que no influenciaran tant als aquífers. Els fronts mediterranis, amb excés de deuteri més elevat, de 13.4, es produeixen preferentment a l'hivern.

En aquest sentit, Plata (1994) estudia la distribució del  $^{18}\text{O}$  i D a la Península Ibèrica i descriu l'existència d'un gradient de desviació isotòpica de direcció O-E trobant-se els valors més negatius lluny de la costa Atlàntica. Aquest gradient s'explica per l'empobriment en molècules pesades que sofreixen els fronts atlàntics a mida que es desplacen cap al Mediterrani. En arribar a aquesta costa el gradient s'inverteix degut a la contribució de fronts generats en el mar Mediterrani.

Els resultats isotòpics de la precipitació a Mas Badia de La Tallada d'Empordà mostren una significant estacionalitat. A la Taula 5.2 es presenten les rectes meteòriques estimades, mitjançant totes les mostres, per les diferents estacions: hivern (desembre + gener + febrer), primavera (març + abril + maig), estiu (juny + juliol + agost) i tardor (setembre + octubre + novembre), i la recta meteòrica anual corregida amb l'exclusió de les mostres amb excés de deuteri inferior a 3. El pendent reflecteix els processos d'evaporació citats, poc importants a la tardor i hivern. El valor on tallen a l'eix d'ordenades mostra el domini dels fronts mediterranis durant l'hivern.

Taula 5.2 Rectes meteòriques locals estimades per diferents períodes climàtics.

| Dades Mas Badia              | Recta estimada                                              | n  | r <sup>2</sup> |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------|----|----------------|
| Precipitació anual corregida | $\delta^2H = 7.98(\pm 2.71) + 7.85(\pm 0.47)\delta^{18}O$   | 25 | 0.924          |
| Precipitació de tardor       | $\delta^2H = 7.37(\pm 5.44) + 8.40(\pm 0.96)\delta^{18}O$   | 10 | 0.905          |
| Precipitació d'hivern        | $\delta^2H = 13.42(\pm 2.47) + 8.26(\pm 0.39)\delta^{18}O$  | 9  | 0.985          |
| Precipitació de primavera    | $\delta^2H = -3.42(\pm 1.11) + 6.54(\pm 0.20)\delta^{18}O$  | 7  | 0.995          |
| Precipitació d'estiu         | $\delta^2H = -10.82(\pm 2.95) + 3.19(\pm 0.98)\delta^{18}O$ | 9  | 0.601          |

En base a les dades climàtiques registrades a Mas Badia (Figura 5.5) s'ha estimat la diferència entre la precipitació (P) mesurada en el període 1993-2001 i l'evapotranspiració potencial (ETP) calculada segons Thornwaite. Aquesta diferència indica que els mesos d'excedent hídric comprenen de l'octubre a l'abril; si bé per avaluar la recàrrega també cal tenir-hi en compte la variabilitat de la magnitud d'aquest valor, l'estat precedent del medi i el tipus de precipitacions.

La coincidència de la LMWL de l'hivern amb la majoria de dotacions isotòpiques (totes les de la zona del Baix Ter) suggereix que aquesta recàrrega eficaç es concentra en els mesos hivernals al sector septentrional, els quals són produïts per les masses d'aire d'origen mediterrani que donen lloc a les precipitacions més abundoses.

Així, es pot considerar que la precipitació eficaç d'hivern (desembre, gener i febrer), la qual representa un 20% de l'annual, és la que contribueix majoritàriament a la recàrrega. En aquest sentit, el mètode aplicat del balanç de clorurs (Capítol 3) estima que la recàrrega representa entre un 10 i un 30% de la precipitació, així com un simple balanç hídric (sobrestimat perquè no té en compte l'escorrentia superficial ni els pics d'avingudes) calcula una recàrrega d'entre un 22 i 26% (Vilanova, 2001) o d'un 37% (IGME, 1987). Els càlculs de la recàrrega mitjançant diferents mètodes donen valors del mateix ordre que els obtinguts mitjançant càlculs isotòpics recolzant aquesta hipòtesi presentada.

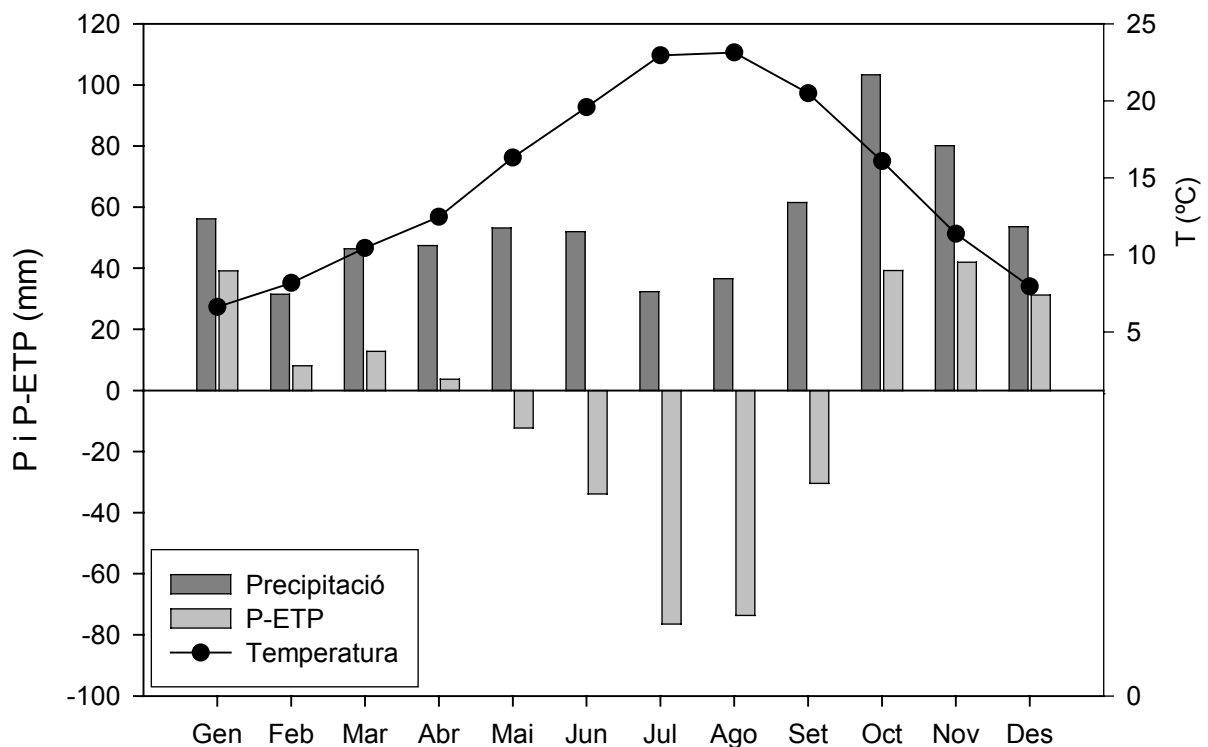


Figura 5.5 Valors mitjans de precipitació, temperatura i aigua disponible (diferència P-ETP) per a la recàrrega, a Mas Badia

Finalment, destacar que s'ha treballat amb valors mitjans ( $\delta^{18}\text{O}=-5.44$  i  $\delta^2\text{H}=-34.73$ ) atès que no difereixen significativament de les concentracions mitjanes ponderades ( $\delta^{18}\text{O}=-5.57$  i  $\delta^2\text{H}=-34.57$ ), característica comuna en les zones semiàrides (Yurtsever i Gat, 1981).

### **5.1.1.3 Altres línies meteòriques**

Complementàriament, s'han considerat les línies meteòriques locals presentades en cinc indrets distints de Catalunya (Taula 5.3). Aquestes presenten pendents semblants; no obstant, mostren diferències notables en el terme constant, és a dir, el punt d'intersecció a l'eix d'ordenades. D'aquestes rectes, tres han estat estimades mitjançant les dades de precipitació, la del Montseny i Prades (Neal *et al.*, 1992) i la de Barcelona (IAEA, 2001); mentre que les altres dues s'han calculat a partir del contingut isotòpic de fonts amb zona de recàrrega coneguda, una al Montseny (Carmona *et al.*, 2000) i l'altra a les Guillerries (ACA i UB, 2002). Tant les tres primeres com la calculada a la zona d'estudi presenten un valor d'intersecció a l'eix d'ordenades

similar, amb petites diferències atribuïbles a la variabilitat espacial del règim pluviomètric. En canvi, les rectes estimades a partir del contingut isotòpic de fonts presenten valors d'aquest paràmetre notablement més elevats.

Taula 5.3 Rectes meteòriques locals calculades a diferents indrets Catalunya

| Localitat                              | Recta meteòrica                                                       | Referència          |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Montseny i Prades (precipitació)       | $\delta^2\text{H} = 9.8 + 7.9\delta^{18}\text{O}$ ( $r^2 = 0.952$ )   | Neal et al, 1992    |
| Barcelona (precipitació a 65 m.s.n.m)  | $\delta^2\text{H} = 6.07 + 7.09\delta^{18}\text{O}$ ( $r^2 = 0.883$ ) | IAEA, 1984-1997     |
| Montseny (càlcul mitjançant fonts)     | $\delta^2\text{H} = 15.41 + 8.11\delta^{18}\text{O}$                  | Carmona et al, 2000 |
| Guilleries (càlcul mitjançant fonts)   | $\delta^2\text{H} = 14.97 + 8\delta^{18}\text{O}$                     | ACA i UB, 2002      |
| Mas Badia (precipitació a 20 m.s.n.m.) | $\delta^2\text{H} = 7.98 + 7.85\delta^{18}\text{O}$                   | Aquesta tesi        |

D'aquestes rectes, només es coneixen les dotacions isotòpiques dels episodis plujosos mensuals a la de Barcelona; on s'ha observat que les mostres més lleugeres corresponen als períodes hivernals mentre que les més pesades pertanyen a l'estiu. No obstant, a diferència de les mostres de Mas Badia, la recta de regressió per a cada estació és molt semblant i no s'hi observen destacades diferències, només la corresponent a l'estiu, la qual presenta un pendent proper a 6 que reflecteix els esmentats processos evaporatius.

### 5.1.2. DOTACIÓ ISOTÒPICA DE LES AIGÜES SUBTERRÀNIES:

#### ESTUDI DE LA HIDRODINÀMICA DEL SISTEMA

La dinàmica del sistema hidrogeològic s'avalua mitjançant les dades isotòpiques de les aigües subterrànies corresponents a les diferents formacions hidrogeològiques descrites als capítols precedents (Figura 5.6). Les dades piezomètriques presentades al capítol 3 indiquen una component de recàrrega dominant procedent del massís de les Gavarres, tant al Baix Empordà, a través dels materials paleògens i de l'al·luvial del Daró fins al del Ter, com a la depressió de la Selva, a través de les fractures del massís, dels nivells alterats del granit i, horitzontalment, al llarg dels nivells més sorrencs del Neogen. Amb l'estudi isotòpic de l'aigua subterrània es pretén

corroborar les àrees de recàrrega de les diferents formacions hidrogeològiques, les relacions entre elles i les trajectòries del flux subterrani.

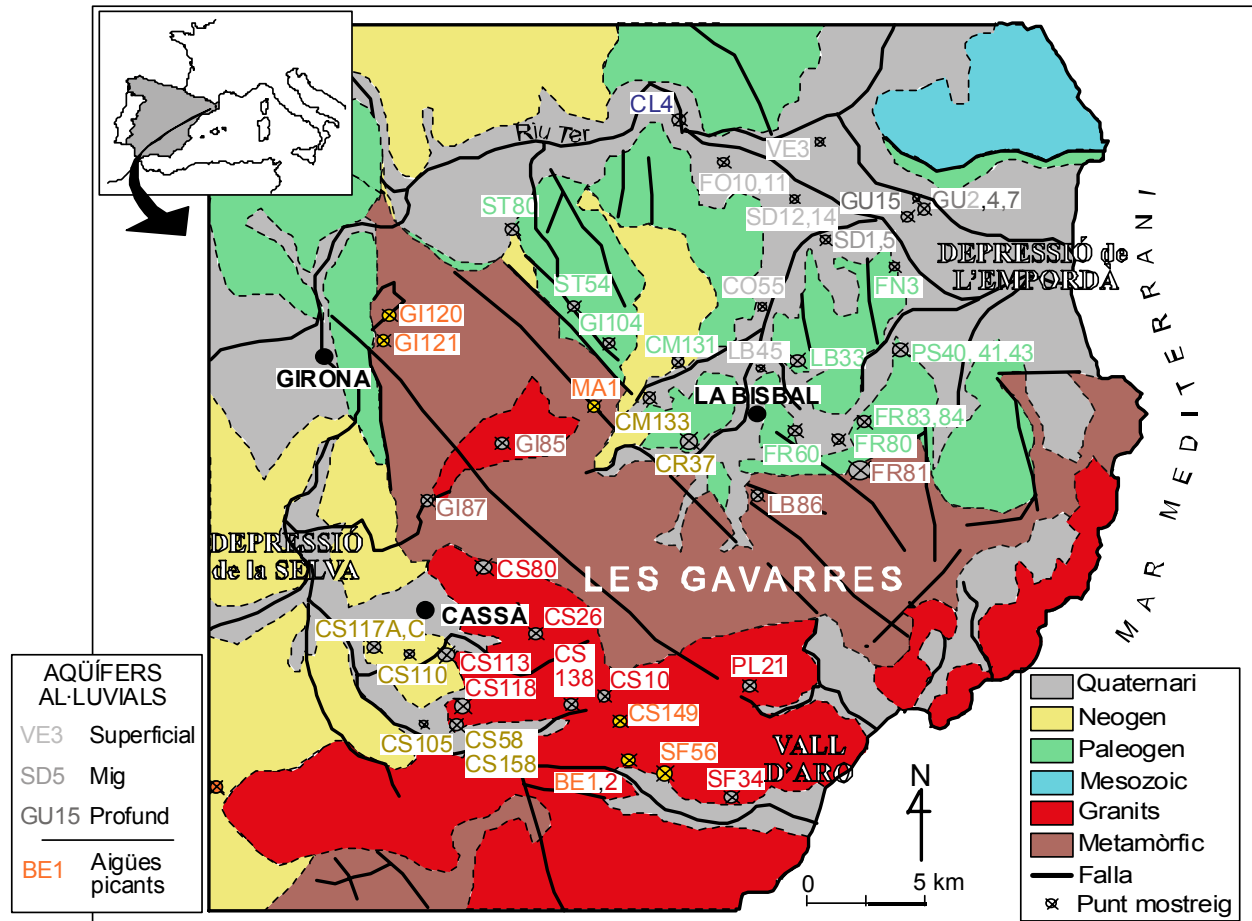


Figura 5.6 Aqüífers mostrejats en l'estudi isotòpic (mida del punt en funció de la profunditat del pou).

Tanmateix, la cartografia piezomètrica i l'estudi hidroquímic han permès reconèixer els punts d'aigua més representatius del sistema en els quals s'ha procedit a l'anàlisi de la dotació isotòpica. En aquests, es realitzà una campanya general el desembre del 2000 (Capítol 1) (Mas-Pla i Vilanova, 2001) i es completà amb dades d'anteriors campanyes a la zona del Baix Ter, del juny del 1996 i del 1997 i del setembre del 1997 (Mas-Pla i Oliveras, 1997), les quals es presenten en la Taula 5.4.

Taula 5.4 Resultats de les anàlisis isotòpiques a l'aigua subterrània  
(S: Vessant Selva, BT: Baix Ter).

|        | Vessant | juny 1996                 |                        | juny 1997                 |                        | setembre 1997             |                        | març 2000                 |                        | desembre 00               |                        |
|--------|---------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
|        |         | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) |
| BE1    | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.87                     | -40.9                  | -6.73                     | -39.8                  |
| BE1    | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.68                     | -40.3                  |
| CA1    | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.67                     | -44.6                  |
| CL4    | BT      | -7.09                     | -45.3                  | -7.31                     | -45.9                  | -7.74                     | -49.3                  | -7.00                     | -44.3                  |                           |                        |
| CM131  | BT      |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.77                     | -35.2                  |                           |                        |
| CM133  | BT      |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.95                     | -34.9                  |                           |                        |
| CR37   | BT      | -6.12                     | -37.7                  | -6.33                     | -36.6                  | -6.34                     | -37.7                  |                           |                        |                           |                        |
| CS105  | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.65                     | -34.0                  |                           |                        |
| CS10   | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.15                     | -36.6                  |                           |                        |
| CS113  | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.25                     | -34.6                  |
| CS117A | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.71                     | -40.8                  |                           |                        |
| CS117C | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.74                     | -40.2                  |                           |                        |
| CS118  | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.62                     | -38.5                  |                           |                        |
| CS138  | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.09                     | -33.1                  |
| CS149  | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.13                     | -35.8                  |                           |                        |
| CS158  | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.26                     | -35.7                  |
| CS58   | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.60                     | -33.8                  |                           |                        |
| CS80   | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.49                     | -43.7                  |                           |                        |
| FN3    | BT      | -5.65                     | -34.7                  | -5.76                     | -33.9                  |                           |                        | -5.72                     | -33.9                  |                           |                        |
| FO10   | BT      | -5.54                     | -32.1                  | -5.68                     | -33.0                  |                           |                        |                           |                        |                           |                        |
| FO11   | BT      |                           |                        |                           |                        | -5.94                     | -34.1                  | -5.80                     | -34.9                  |                           |                        |
| FR60   | BT      | -6.11                     | -37.3                  |                           |                        | -6.36                     | -35.9                  | -6.12                     | -35.4                  |                           |                        |
| FR81   | BT      | -6.17                     | -37.5                  | -6.36                     | -35.6                  | -6.50                     | -37.8                  | -6.22                     | -36.6                  |                           |                        |
| FR83   | BT      | -6.13                     | -37.3                  | -6.37                     | -36.5                  |                           |                        |                           |                        |                           |                        |
| FR84   | BT      | -6.14                     | -37.5                  | -6.33                     | -35.6                  | -6.42                     | -37.7                  | -6.04                     | -36.0                  |                           |                        |
| GI104  | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.09                     | -35.5                  |                           |                        |
| GI120  | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.24                     | -36.5                  |                           |                        |
| GI121  | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.14                     | -35.7                  |                           |                        |
| GI85   | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.60                     | -44.9                  |                           |                        |
| GI87   | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.58                     | -43.6                  |                           |                        |
| GU15   | BT      |                           |                        | -6.24                     | -35.4                  | -6.21                     | -35.5                  | -5.98                     | -35.1                  |                           |                        |
| GU2    | BT      |                           |                        | -6.57                     | -37.8                  |                           |                        | -6.66                     | -42.8                  |                           |                        |
| GU4    | BT      | -6.38                     | -39.7                  | -6.42                     | -37.6                  | -6.64                     | -40.2                  | -6.50                     | -41.8                  |                           |                        |
| GU7    | BT      |                           |                        |                           |                        | -5.84                     | -32.8                  |                           |                        |                           |                        |
| LB33   | BT      | -5.73                     | -34.0                  | -6.01                     | -33.7                  |                           |                        | -5.88                     | -35.6                  |                           |                        |
| LB45   | BT      |                           |                        | -6.16                     | -35.0                  |                           |                        |                           |                        |                           |                        |
| LB86   | BT      |                           |                        | -6.35                     | -36.2                  | -6.39                     | -37.3                  | -6.13                     | -36.8                  |                           |                        |
| MA1    | BT      |                           |                        |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.32                     | -37.9                  |
| MA1    | BT      |                           |                        |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.37                     | -38.1                  |
| PA12   | BT      |                           |                        | -5.94                     | -33.7                  |                           |                        |                           |                        |                           |                        |
| PL21   | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.05                     | -36.6                  |                           |                        |
| PS40   | BT      | -6.12                     | -36.9                  | -6.35                     | -37.1                  |                           |                        |                           |                        |                           |                        |

|       | Vessant | juny 1996                 |                        | juny 1997                 |                        | setembre 1997             |                        | març 2000                 |                        | desembre 00               |                        |
|-------|---------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
|       |         | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) |
| PS41  | BT      | -6.10                     | -37.2                  | -6.34                     | -36.9                  |                           |                        | -6.15                     | -36.4                  |                           |                        |
| PS43  | BT      | -6.04                     | -36.8                  |                           |                        |                           |                        |                           |                        |                           |                        |
| SD1   | BT      | -5.81                     | -33.9                  | -5.99                     | -34.2                  | -6.10                     | -36.0                  | -5.82                     | -34.1                  |                           |                        |
| SD12  | BT      | -5.96                     | -34.4                  |                           |                        |                           |                        |                           |                        |                           |                        |
| SD14  | BT      |                           |                        |                           |                        | -6.21                     | -37.4                  | -5.77                     | -34.4                  |                           |                        |
| SD5   | BT      |                           |                        | -6.28                     | -34.1                  |                           |                        |                           |                        |                           |                        |
| SF34A | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -5.93                     | -35.6                  |                           |                        |
| SF56  | S       |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.36                     | -36.2                  |                           |                        |
| ST54  | BT      |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.32                     | -36.1                  |                           |                        |
| ST80  | BT      |                           |                        |                           |                        |                           |                        | -6.32                     | -37.1                  |                           |                        |
| TA7   | BT      |                           |                        | -6.38                     | -36.8                  |                           |                        |                           |                        |                           |                        |
| VE3   | BT      | -6.87                     | -44.0                  | -7.12                     | -43.9                  | -7.10                     | -45.4                  | -6.57                     | -41.2                  |                           |                        |

Gràficament, la majoria de les aigües subterrànies (Figura 5.7) es troben a l'esquerra de la línia meteòrica local corregida (LMWL) i de la línia meteòrica global (GMWL). No obstant, la tendència que descriuen la majoria de les mostres d'aigües subterrànies coincideix amb la recta meteòrica corresponent a les precipitacions d'hivern. Contràriament, les mostres corresponents a la depressió de la Selva es diferencien majoritàriament del grup anterior i de les tendències mostrades (Figura 5.7).

Per assolir els objectius proposats, s'ha procedit a la interpretació isotòpica diferenciant les dues conques hidrogeològiques principals: la plana del Baix Ter i la depressió de la Selva. Les dades isotòpiques registrades a les fonts carbòniques fredes i termals s'analitzen a part, i s'integren a posteriori en el model de flux regional.

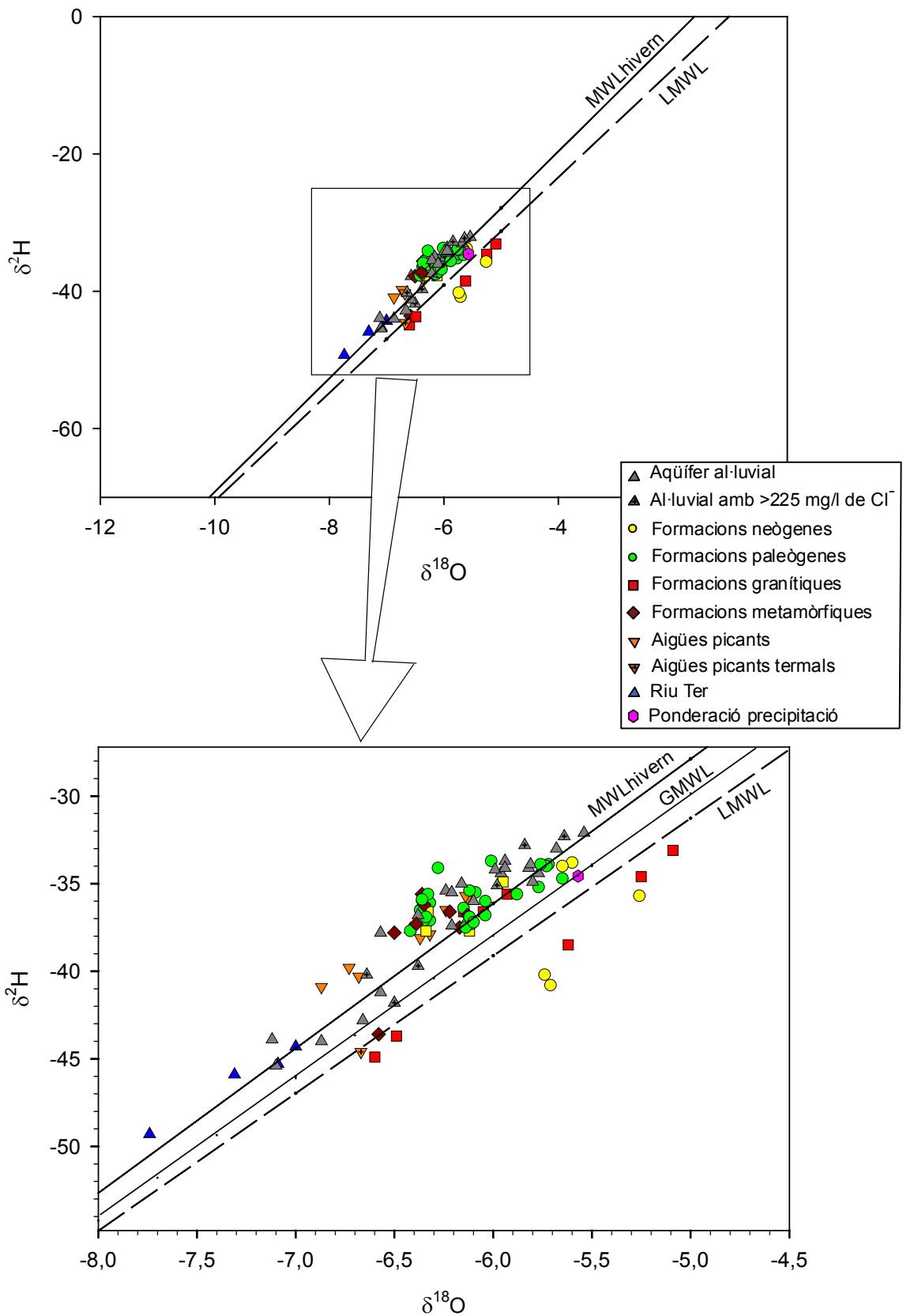


Figura 5.7 Contingut isotòpic de totes les mostres de diferents campanyes en la zona d'estudi.



### 5.1.2.1 Sector del Baix Ter

El contingut isotòpic corresponent a diferents períodes de mostreig presenta una notable semblança, (Taula 5.5 i la Figura 5.8). Atesa la variabilitat de composició de la precipitació, aquesta constància suggereix una dinàmica general uniforme i un període suficient d'homogeneïtzació. L'excés de deuteri és també molt constant en les diferents campanyes:  $11.71 \pm 0.16$ ,  $13.98 \pm 0.21$ ,  $13.32 \pm 0.26$  i  $11.96 \pm 0.22$ , per ordre cronològic. Al setembre no obstant, s'observa que la recta de regressió està més desplaçada cap a la dreta, fet que s'atribueix a la influència dels elevats cabals d'extracció de l'estiu.

Al vessant septentrional de les Gavarres, les dotacions isotòpiques de les aigües subterrànies se situen properes a la línia meteòrica d'hivern, lleugerament per sobre i amb un pendent sensiblement menor, probablement per efectes evaporatius.

Taula 5.5 Línies meteòriques i rectes de regressió estimades per les aigües subterrànies del Baix Ter de diferents campanyes.

| Dades                              | Rectes al Baix Ter                                            | n  | r <sup>2</sup> |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----|----------------|
| Precipitació Mas Badia (corregida) | $\delta D = 7.986(\pm 2.718) + 7.854(\pm 0.470)\delta^{18}O$  | 25 | 0.924          |
| Precipitació Mas Badia (hivern)    | $\delta D = 13.415(\pm 2.471) + 8.259(\pm 0.387)\delta^{18}O$ | 9  | 0.984          |
| Aigües subterrànies, juny 1996     | $\delta D = 14.793(\pm 2.489) + 8.503(\pm 0.406)\delta^{18}O$ | 16 | 0.969          |
| Aigües subterrànies, juny 1997     | $\delta D = 10.038(\pm 3.883) + 7.360(\pm 0.621)\delta^{18}O$ | 21 | 0.886          |
| Aigües subterrànies, setembre 1997 | $\delta D = 18.727(\pm 3.300) + 8.838(\pm 0.511)\delta^{18}O$ | 13 | 0.965          |
| Aigües subterrànies, març 2000     | $\delta D = 14.570(\pm 4.576) + 8.383(\pm 0.744)\delta^{18}O$ | 20 | 0.876          |
| Conjunt de les aigües subterrànies | $\delta D = 11.857(\pm 2.377) + 7.843(\pm 0.38)\delta^{18}O$  | 70 | 0.862          |

Malgrat que les diferències detectades en les diferents campanyes siguin mínimes, per establir la caracterització isotòpica de les diferents formacions hidrogeològiques és més adequat estudiar els valors de les campanyes individualment (Figures 5.8a,b,c,d).

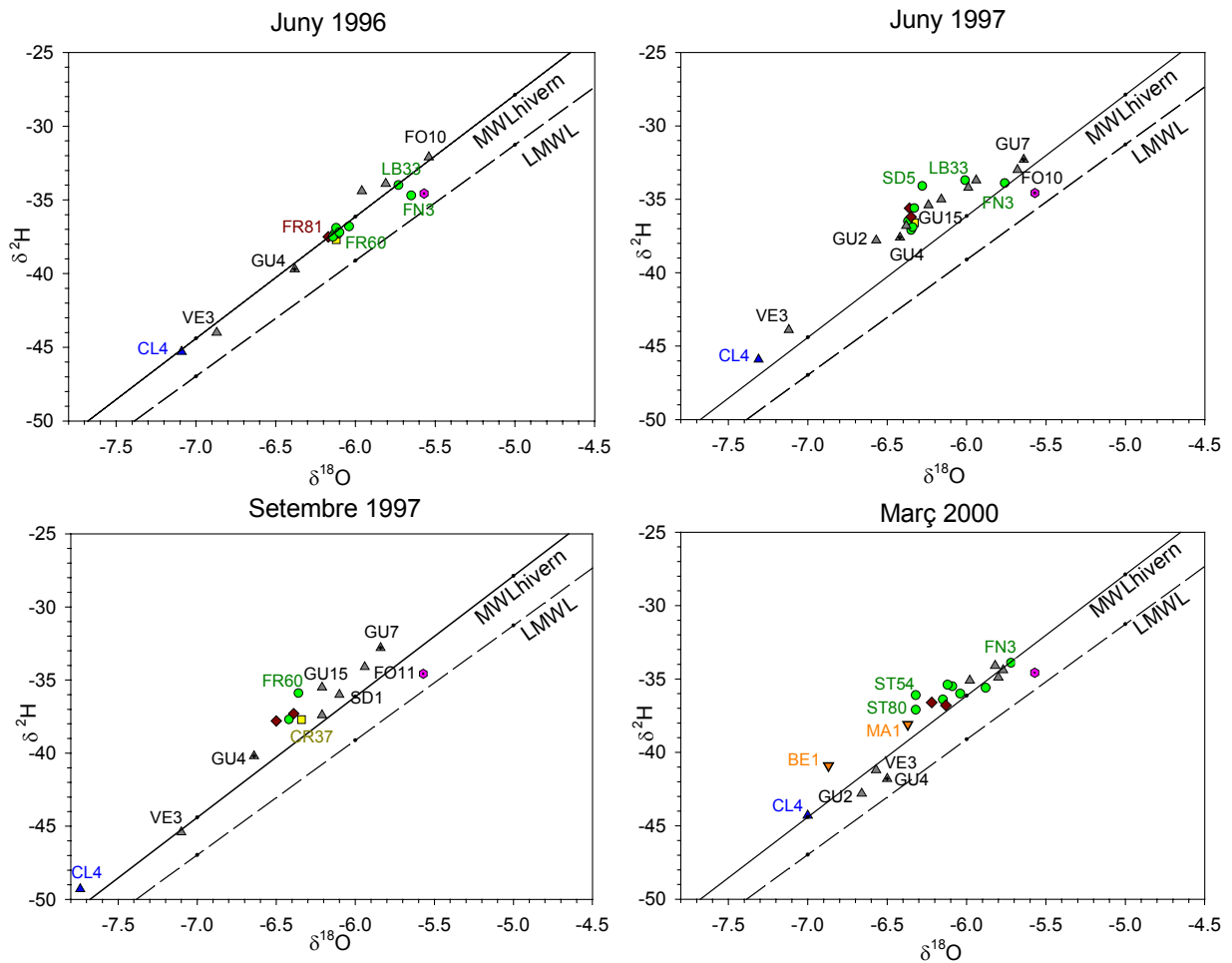


Figura 5.8 a,b,c,d Continguts isotòpics de les diferents campanyes. S'hi ressalten les mostres més característiques (la mateixa llegenda que en la Figura 5.7)

La distribució de les dotacions isotòpiques de les aigües subterrànies del Baix Ter presentada en la Figura 5.8 permet constatar que:

- Els continguts més lleugers del sistema els presenten les aigües superficials del riu Ter (CL4), a la entrada de la plana de l'Empordà. Aquests també són inferiors als de la precipitació local i s'interpreten considerant la influència de tota la conca del Ter, amb una àrea de recàrrega gran i amb alçades molt variables, així com a la presència d'embassaments que regulen el seu cabal en el tram mig.
- Les mostres ubicades en formacions metamòrfiques presenten dotacions isotòpiques notablement lleugeres (més que la mitjana ponderada de la composició isotòpica de la precipitació) que s'atribueixen a l'alçada de l'àrea de recàrrega: el massís de les Gavarres.

- Amb poques excepcions, les mostres dels aquífers en materials paleògens i neògens es presenten agrupades en valors molt semblants, sobretot a les campanyes dutes a terme el 1996 i 1997. Aquests continguts són molts semblants al del grup anterior (mostres en materials metamòrfics del massís) o lleugerament més pesants i se situen també en una posició més lleugera que la precipitació local. Això suggereix una àrea de recàrrega comú per a tots ells, les Gavarres; i, per tant, a major alçada que la cota topogràfica on es troben ubicades. En canvi, les mostres FN3, FR60 i LB33, per una banda, mostren valors lleugerament superiors als descrits els quals s'atribueixen a la mescla amb aigua de recàrrega directa de la pluviometria sobre la zona. No obstant, atès que no es coneixen totes les característiques dels pous no es descarta que aquests puguin introduir un cert error en la interpretació si, per exemple, tenen el tram superior ranurat. Per una altra banda, les mostres ST54 i ST80 presenten una composició més lleugera. Aquestes corresponen a la campanya del 2000 i se situen, en la zona més nordoccidental de la depressió, prop del contacte amb el paleozoic del massís de les Gavarres on es destaca la presència d'importantes fractures NW-SE. La seva composició s'atribueix a una dinàmica controlada per peculiaritats locals relacionades amb fluxos preferents a través de les fractures.
- El punts mostrejats dels aquífers al·luvials es distribueixen, en general, segons dos grups. El que inclou la major part de les mostres es caracteritza per presentar els continguts isotòpics més pesats del sistema i en canvi, l'altre grup mostra dotacions intermèdies entre les del riu i les de les mostres en materials paleògens. Una observació més detallada aporta els següents resultats:
  - o Els pous ubicats al nivell al·luvial superior i mig del marge dret del riu Ter i de la conca del Daró, ofereixen valors isotòpics enriquits respecte als corresponents a la zona de les Gavarres i de les Pregavarres, suggerint una mescla amb aigua de pluja i una quasi nul·la participació de recàrrega per aigües superficials procedents del riu Ter.
  - o L'únic pou situat al marge esquerre del riu Ter i que explota el nivell al·luvial superior (VE3) és el punt que en totes les campanyes presenta el valor més proper al riu Ter denotant una probable influència d'aquest i/o del retorn de reg procedent del canal nord del Ter. En el punt GU2, situat al marge dret del riu a uns 200 m d'aquest, també s'hi considera la influència del riu Ter afavorida pel

con de depressió detectat en la cartografia piezomètrica (Capítol 3). Si bé aquest con es produeix bàsicament a l'aquífer inferior també afecta al superior. Això provoca que la modificació del flux es manifesti també en la cartografia piezomètrica de l'aquífer superior i s'hi indueixi també, localment, la participació d'aigua del riu Ter.

- o En l'aquífer inferior del riu Ter s'ha observat diversos nivells de salinitat entre els tres pous que l'exploten, indicant la presència d'intrusió salina a causa, bàsicament, del bombament efectuat en els pous corresponents a la Mancomunitat de Palafrugell (GU4). El procés de contaminació salina s'analitza més endavant en el present capítol. Per a la interpretació de les dades isotòpiques es considera que el pou GU15 és el més representatiu de l'aquífer al·luvial profund, atès que la seva conductivitat ( $\sim 800 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) no mostra influència d'aigua salina.
  - Així, les dades isotòpiques a GU15, amb valors similars al del conjunt de mostres corresponents al sector de les Gavarres (materials metamòrfics) i Pregavarres (materials d'edat paleògena), suggereixen una recàrrega efectiva des dels materials paleògens subjacents causada d'una banda, per la distribució piezomètrica i, per l'altra, per la pròpia influència de la captació.
  - El pou GU4, pertanyent al conjunt de captacions responsables del con de depressió a l'aquífer del Baix Ter (Annex 2), mostra una dotació isotòpica situada entre els valors corresponents a l'aigua de les formacions paleògenes i el riu Ter. S'entén que, aquesta captació, a semblança de GU15, rep uns aports importants del substrat paleogen, a través d'una recàrrega vertical ascendent plenament afavorida per la magnitud del cabal extret, alhora que una recàrrega de les aigües superficials del riu Ter induïda pel con de depressió. La salinitat detectada i la composició isotòpica també indiquen la presència d'aigües salines. Aquesta observació no és directa en la Figura 5.8 pel fet que les tres procedències se situen en una línia de mescla de pendent semblant a la LMWL. S'entén que, de no participar-hi la component salina, la composició isotòpica de la mostra se situaria en una posició més propera a la del riu Ter. S'avaluen

les diferents procedències en la darrera part d'aquest capítol considerant diferents paràmetres i es quantifiquen en el capítol 6 mitjançant un anàlisi de mescla amb membres extrems.

- Finalment, el pou GU7, pràcticament fora d'ús i sota la influència del con de depressió generat pel conjunt de captacions de la Mancomunitat de Palafrugell, presenta valors més pesats que les aigües de les formacions paleògenes, indicant una mescla amb aigua marina com suggereix la seva elevada salinitat (7700-9300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Els valors isotòpics estimen no obstant, una participació marina inferior que el que suggereix el contingut salí. A l'apartat 5.4 s'analitza més detalladament aquest procés considerant diferents paràmetres.

En síntesi, es conclou que els materials paleògens de les Pregavarres reben la recàrrega des del massís de les Gavarres, la qual cosa és coherent amb les cartografies piezomètriques. L'aquífer superficial i intermedi de la plana del Baix Ter presenta una continuïtat hidràulica en l'àrea estudiada amb una direcció de flux cap al riu Ter. La recàrrega a aquests nivells prové principalment de les Gavarres i de la precipitació sobre la plana. Des del massís s'estableixen fluxos preferents al llarg de les discontinuïtats i de les fractures, a través als materials paleògens, produint-se una recàrrega vertical cap als al·luvials soprajacents. La influència del riu Ter només es nota, mitjançant els isòtops, en dos punts de l'al·luvial superior que, influenciats per importants cons de depressió, forcen la recàrrega des del riu o des dels canals artificials de reg. A l'aquífer inferior, les dotacions isotòpiques confirmen que el flux procedeix, en gran part, dels materials paleògens sotajacents a través d'un flux vertical d'ascendent. També, localment s'han reconegut pous salinitzats amb un contingut isotòpic més pesant indicatiu de participació d'aigua marina.

#### **5.1.2.2 Sector de la Selva**

Aquesta depressió està constituïda per materials sedimentaris sobre un sòcol granític els quals, en la zona d'estudi es disposen segons nivells de diferents permeabilitats i hi domina la composició granítica com a resultat de l'erosió del vessant meridional del massís. En aquest tipus de contextos geològics, on la recàrrega acostuma ésser-hi molt selectiva i estacionalment variable, s'hi poden constatar espacialment notables diferències hidroquímiques i isotòpiques

(Saxena, 1984). Aquesta característica queda palesa a la depressió de la Selva on les mostres s'agrupen seguint diferents tendències (Figura 5.9). Concretament, s'ha observat que:

- Les mostres analitzades reflecteixen una notable variabilitat hidroquímica: s'hi ha diferenciat fàcies bicarbonatades càlciques i clorurades-bicarbonatades càlciques (Capítol 4)
- La Figura 5.9 reflecteix una variabilitat que no té correspondència directa amb les fàcies hidroquímiques. No obstant les mostres es poden agrupar en funció de criteris espacials, profunditat de mostreig i formació hidrogeològica, responent a les variacions inherents a tot sistema hidrogeològic fracturat. La relació amb la geologia i el context estructurals es pot comprovar en la Figura 5.10 on es constata que poden agrupar-se espacialment (les mostres de la Vall d'Aro i les del sector nord-oest) o en funció de fractures importants (paral·lelament als límits de la depressió).

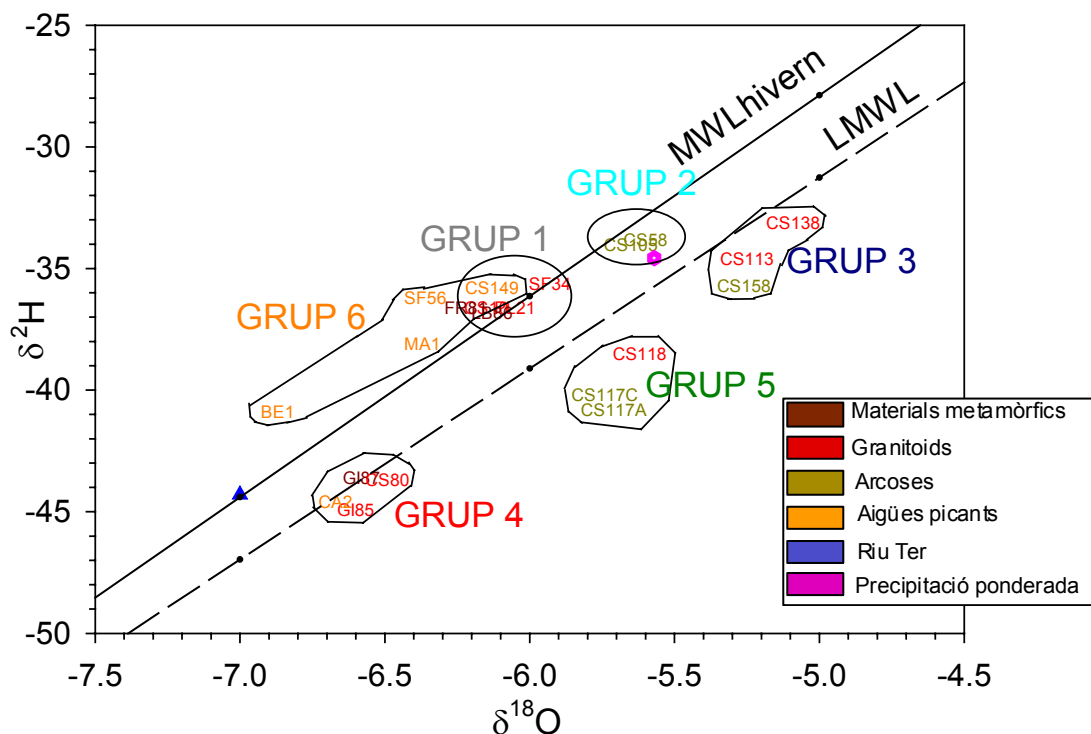


Figura 5.9 Continguts isotòpics de mostres de la depressió de la Selva i del massís de les Gavarres (març del 2000). El valor de la precipitació ponderada correspon a l'estació de Mas Badia (Baix Ter).

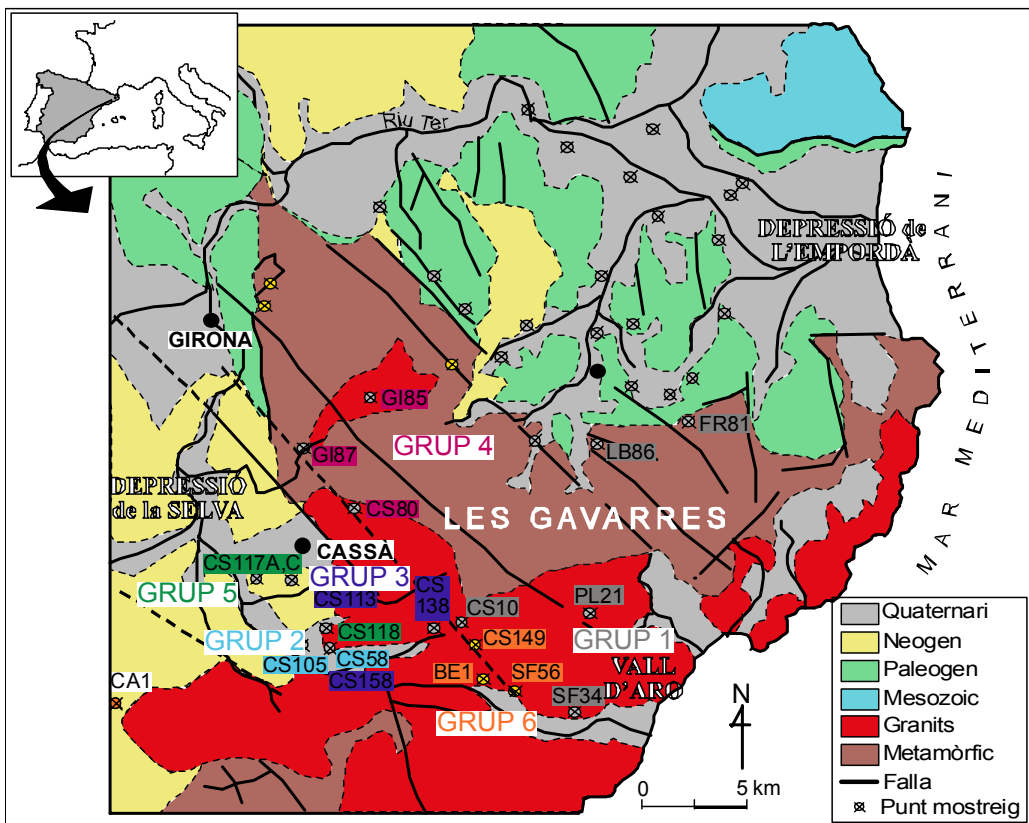


Figura 5.10 Ubicació dels punts analitzats a la depressió de la Selva i al massís de les Gavarres (projectats a la Figura 5.9).

Així, al sector meridional de l'àrea d'estudi, algunes mostres s'ajusten a la línia meteòrica local anual (LMWL) (Figura 5.9) mentre que d'altres s'ajusten més a la línia meteòrica local de l'hivern, constatant-se una notable variabilitat en la dotació isotòpica. En concret, s'han diferenciat 6 grups diferents en base a la composició isotòpica:

- GRUP 1: Aquest grup inclou els dos pous corresponents a les formacions granítiques del sector de la vall d'Aro (SF34 i PL21, de 62.5 i 60 metres de profunditat, respectivament), els quals registren continguts isotòpics molt semblants als de l'Empordà, i s'interpreta, per tant, que la principal zona de recàrrega se situa a les Gavarres. Aquest grup també engloba el pou CS10, ubicat al vessant granític sudoriental de les Gavarres, prop de Romanyà, el qual tingué molts problemes de construcció i s'ha observat que el seu nivell varia paral·lelament al d'un torrent veí, fets que fan suposar que estigui relacionat amb aigües de precipitació recent a les Gavarres i nivells superficials.

- GRUP 2: Aquest grup està constituït per dues mostres, CS58 i CS105, les quals corresponen a pous somers (uns 10 i 30 metres respectivament) de la depressió de la Selva, molt propers un de l'altre, que exploten els nivells arenosos superficials i mig dels sediments arcòsics que reomplen la depressió. Aquests presenten una dotació isotòpica més pesada i semblant al contingut mitjà dels valors isotòpics de la precipitació local. S'hi considera per tant, un domini d'una component procedent de la precipitació.
- GRUP 3: Està constituït per mostres ubicades en diferents terrenys i a diferents profunditats. Concretament, la captació CS139 arriba a 105 m de profunditat en els granits propers a Romanyà, la CS113 la qual extreu elevats volums d'aigua dels granits del sòcol de la depressió, a uns 120 m de profunditat, prop de la falla que delimita la depressió, i la CS158 correspon a un pou somer, de 9 m, ubicat en la formació de naturalesa arcòsica del neogen prop de les mostres del Grup 1. Aquestes tres mostres són les que presenten el contingut isotòpic més pesat de les que s'ajusten a la recta meteòrica local anual que pot atribuir-se a un sistema de flux local diferent. Aquestes mostres provenen d'una campanya de mostreig posterior a les anteriors (3 mesos de diferència); però no es considera que pugui induir errors significatius atesa la constància de dotacions isotòpiques constatades a la zona del Baix Ter.
- GRUP 4: està format per les mostres GI87 (que correspon a una captació de 110 metres en els materials metamòrfics a Quart), GI85 (captació de 150 m en la intrusió granítica de Montnegre i proper a una de les falles que compartimenten el massís) i la CS80 (pou de 90 m en els granits de la vora de la depressió). Aquests tres punts són els que presenten la dotació isotòpica més lleugera del sistema, i s'atribueixen a fluxos governats per l'estructura del medi (Figura 5.10), concretament del sistema de falles principal d'orientació NW-SE.
- GRUP 5: aquest és constituït per les mostres CS117A, CS117C (que pertanyen a diferents nivells sorrencs del neogen de la depressió a 35 i 65 metres de profunditat, respectivament) i la CS118 (en el sòcol granític de la depressió, a 105 m. de profunditat). Els seus continguts isotòpics són intermedis entre els dos grups anteriors. El pou CS118 pertany a un granja on els cabals d'extracció són molt elevats i creuen una afecció a la piezometria local. En aquest sentit, s'ha constatat l'esgotament



dels recursos de pous somers propers i d'alguns de 60 metres durant els èpoques de màxim dèficit hídric del període 1999-2002.

- GRUP 6: El constitueixen les aigües carbòniques de la depressió de la Selva (BE1, CS149, SF56) i del vessant nord (MA1). Per interpretar el contingut isotòpic d'aquestes mostres cal considerar la dinàmica pròpia d'aquestes i es consideraran en el capítol 7 més detalladament.

Les mostres LB86 i FR81, situades al paleozoic del vessant nord de les Gavarres, s'han inclòs en aquesta part de l'estudi per a poder establir la comparació entre la dotació isotòpica de determinades mostres del vessant més meridional (PL21 i SF34) amb la de la dinàmica que regeix el vessant del Baix Ter.

El més significatiu de la relació isotòpica presentada és el fet que les dotacions isotòpiques es disposen segons dues alineacions diferents:

- Els grups 1, 2 i 6 concorden amb la LMWL definida per a l'hivern. D'aquests, el grup 1 s'ha relacionat amb les dotacions isotòpiques de les Gavarres i el grup 2 amb mostres influenciades per la precipitació. El grup 6 el constitueixen les aigües picants, sotmeses a processos diferents i, a priori, no es relacionen amb la LMWL, tal i com es detalla en el Capítol 7.
- Els grups 3, 4 i 5 s'alineen també i queden ubicats a la dreta de la LMWL i inclouen un rang de composicions més gran que els grups que coincideixen amb la MWL de l'hivern.

A continuació es discuteixen diverses possibilitats per explicar la distribució observada de les mostres i es detallen les peculiaritats locals; atès que aquestes juguen un paper important en la caracterització hidrogeològica del sistema estudiat:

1. Es descarta que les mostres dels grups 3, 4 i 5 hagin sofert una important evaporació, principalment perquè també hauria afectat a les altres mostres de la zona. En cas que es produís aquest procés, la projecció de les mostres cap a la MWL-hivern segons una recta de pendent d'entre 4 i 6 (Friedman *et al.*, 1962) les situaria en una composició isotòpica original extremadament lleugera (Figura 5.11) i sense relació amb els valors de recàrrega.

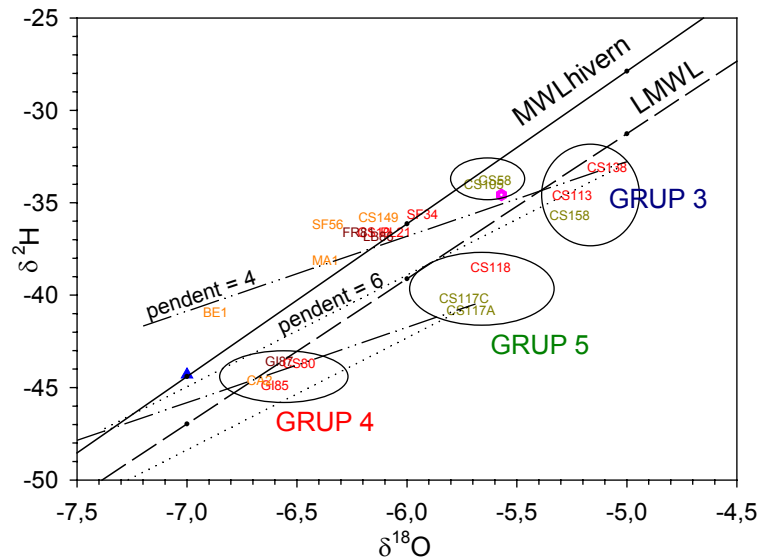


Figura 5.11 Projecció dels grups 3, 4 i 5 cap a la MWL-hivern, segons rectes de pendent 4 i 6.

- Una altra possibilitat és la influència als tres grups d'un paleoclima amb composicions isotòpiques no coincidents amb la recta meteòrica actual (Moser *et al.*, 1989). Això es produeix quan l'aigua mostrejada ha entrat al medi en una època de condicions molt diferents a les actuals. Aquesta situació no és coherent amb el fet de trobar grups de mostres (grups 4 i 5) amb variables continguts en triti (entre 0.8 i 11 UT). Aquesta consideració pot ésser vàlida, no obstant, en casos puntuals els quals convindrà analitzar mitjançant tècniques que permetin establir llargues datacions.
- Els processos d'intercanvi isotòpic amb l'oxigen de les roques durant elevats temps de residència produeixen un augment en  $^{18}\text{O}$  de l'aigua sense variar el deuteri (Craig, 1963). En la zona d'estudi només les mostres CS118 i CS80, ambdues amb contingut en triti propers a zero, presenten un hidroquimisme que suggereix un elevat temps de residència i, possiblement un intercanvi efectiu amb la roca encaixant (Capítol 4), però les composicions químiques de les altres mostres no indiquen aquest procés. A més, es tracta d'un tipus de reaccions, que es produeixen amb més facilitat i rapidesa a elevades temperatures (Montgomery i Perry, 1980) i els geotermòmetres químics aplicats en el Capítol 7 indiquen que no s'han assolit temperatures suficients per justificar aquestes reaccions.

4. Es desestima també la influència d'aigua atrapada en els sediments durant la seva formació, la qual acostuma a tenir uns continguts isotòpics pesats (Fritz i Frape, 1980). La mateixa observació és vàlida per l'aigua alliberada pels minerals de l'argila, en aquest cas, l'elevada relació mineral/aigua descarta aquesta possible aportació d'isòtops pesats.
5. Finalment, es considera que els grups 3, 4 i 5 s'ajusten a una recta diferent, desplaçada de la MWL-hivern perquè respon a una diferent distribució espacial i dinàmica de la recàrrega. En aquest sentit,
  - a. el període de recàrrega eficaç no es limitaria als mesos hivernals i suggereix una recàrrega més ràpida i continuada a través de fractures, intervenint-hi precipitacions al llarg de l'any i una posterior mescla i homogeneïtzació de les aigües més efectiva.
  - b. les característiques de les fractures jugarien un paper important en la circulació del flux a un àmbit regional. Recordar en aquest sentit que la cartografia piezomètrica indica un flux vertical localment limitat que s'estableix a través de fractures i que les fàcies hidroquímiques assenyalen la importància de les característiques d'aquestes vies de circulació. El fet de considerar el paper de les fractures i que la dotació isotòpica no correspongui amb la identificada a les Gavarres implica augmentar l'escala del sistema hidrogeològic i suggereix que aquest es produeix en un àmbit regional molt més ampli i que estableix comunicació amb zones espacialment distants; i es proposa, concretament, les Guillerries i la Serralada Transversal.

La composició isotòpica de cada un dels grups descrits vindrà determinada, doncs, per un o més dels factors descrits. Com a resultat de la discussió anterior es considera finalment que:

- L'àrea de recàrrega dels grups 1 i 2 és bàsicament el massís de les Gavarres i localment, es produeix una infiltració directa de la precipitació en el cas de les mostres del grup 2. El pou CS10 també es relaciona amb aigües superficials però s'hi considera la mescla amb altres de més lleugeres. El flux té lloc a través de les fractures locals als massís i és coherent amb la descripció piezomètrica.

- Les mostres del grup 3, les de contingut isotòpic més pesat de tot el sistema, s'ajusten a la LMWL i la seva composició és propera a la de la mitjana ponderada de la precipitació local. Els elevats cabals d'extracció d'aquestes captacions poden forçar la participació d'aigües superficials a través de vies preferencials.
- Les tres mostres del grup 4 s'agrupen en relació al sistema de falles principal d'orientació NW-SE el qual constitueix possiblement, una via preferent de circulació. El contingut en triti varia entre 0.5 i 10.6 sent les dues mostres alineades més al sud i relacionades amb una mateixa falla (GI87 i CS80) les de menor contingut en triti. Aquesta observació i el fet que les tres mostres presentin diferents hidrofàcies (Capítol 4) suggereix que la mescla entre diferents fractures, a aquesta escala, és limitada. També es considera que les mostres GI87 i CS80 poden correspondre a una mateixa trajectòria al llarg d'un mateix sistema de fractures; presenten hidroquimisme diferent que s'atribueix a una interacció amb el medi més efectiva en augmentar el temps de residència (el mínim contingut en triti a CS80 és de 0.5 UT). Es comprova també que les aigües picants de Bell-lloc coincideixen, a grans trets, amb la mateixa alineació estructural palesant encara més la importància de la fracturació del massís. El fet que es tracti un grup de contingut isotòpic notablement lleuger suggereix una component del flux procedent d'una àrea de recàrrega diferent, amb alçades majors de les que s'assoleixen a les Gavarres.
- Les dotacions isotòpiques del grup 5 són intermèdies entre els dos grups anteriors podent-se atribuir el seu contingut tant a una mescla entre el grup 3 i 4, com a les heterogeneïtats del medi ja que també s'alineen segons una direcció NW-SE. La semblança isotòpica entre les diferents profunditats de mostreig de cada pou apunta l'existència d'un flux vertical ascendent induït des del sòcol granític i cap a les formacions neògenes de caràcter natural i forçat a més, pels elevats cabals d'extracció constatats (Capítol 3). Aquesta component de flux es relaciona amb un sistema hidrogeològic de caire regional, el qual pot comptar amb una àrea de recàrrega diferent. Es detecta addicionalment, una segona component de flux en aquesta àrea, bàsicament horitzontal, procedent de les Gavarres i/o de sistemes superficials a través dels nivells més sorrencs de la depressió. En aquest sentit, la distribució de temperatures recolza aquesta hipòtesi ja que el pou ubicat en les fractures del sòcol (CS118) i que es considera alimentat majoritàriament per la component profunda, presenta

temperatures més elevades (entre 1.5 i 2 °C) que els pous situats en els nivells sorrencs de la Selva, tot i trobar-se a profunditats semblants (Figura 5.12).

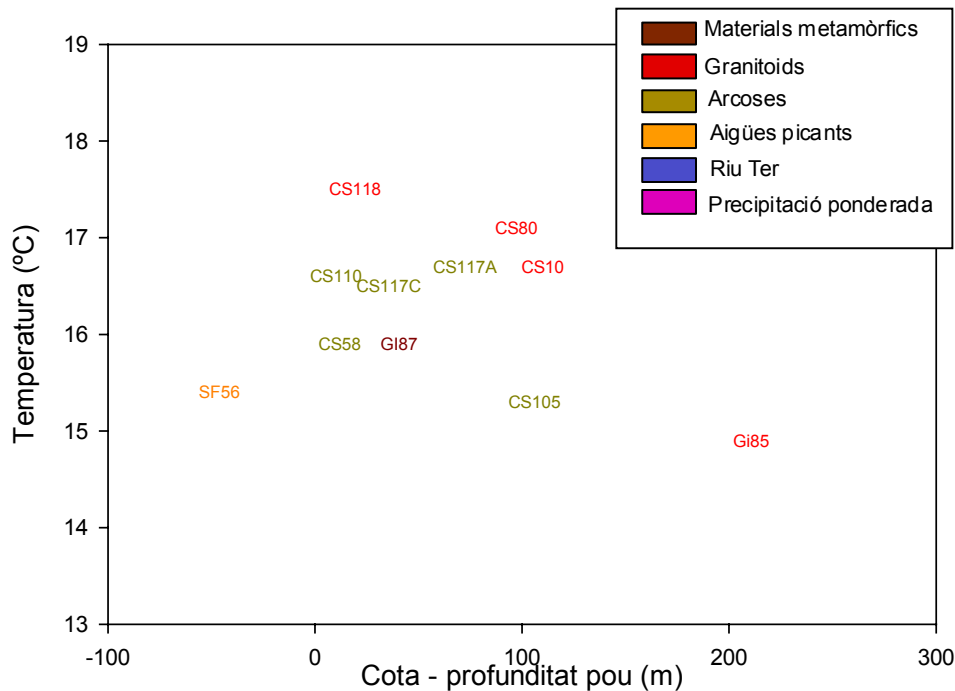


Figura 5.12 Relació entre la cota de mostreig i la temperatura de les aigües.

Finalment destacar que no ha estat possible, amb la disponibilitat de dades del present treball, explicar l'origen de les diferències isotòpiques entre els grups 3, 4 i 5. S'atribueix a l'existència de diversos sistemes de flux, que es produeixen a diferent escala, local, intermèdia i regional, i es proposa per tant, augmentar l'àrea d'investigació. Serà necessari un estudi isotòpic més complet per descriure i caracteritzar cada un d'aquests fluxos.

Com s'ha indicat, el sistema de flux de la depressió de la Selva és complex, a través de les fractures i discontinuïtats del medi. Si bé s'hi reconeix un sistema de flux local relacionat amb la recàrrega procedent de les Gavarres, aquest no pot explicar per si sol les dotacions isotòpiques observades. Cal doncs considerar la participació d'altres sistemes de flux, de caire regional (segons la definició de Tóth, 1995, Figura 5.13) que s'estableixen preferentment a través de les grans estructures tectòniques de distensió que han donat lloc a la formació de les depressions i que permeten la comunicació hidràulica amb zones més llunyanes com la Serralada Transversal i possiblement el massís de les Guilleries. Aquest sistema de flux compta amb llargs temps de

residència i pot assolir importants profunditats que, en manifestar-se en l'àmbit de la depressió, s'establiran en una component vertical ascendent. Les particularitats de la depressió de la Selva com manifestacions termals, carbòniques o hidroquímiques particulars també poden relacionar-se amb aquest sistema de flux regional.

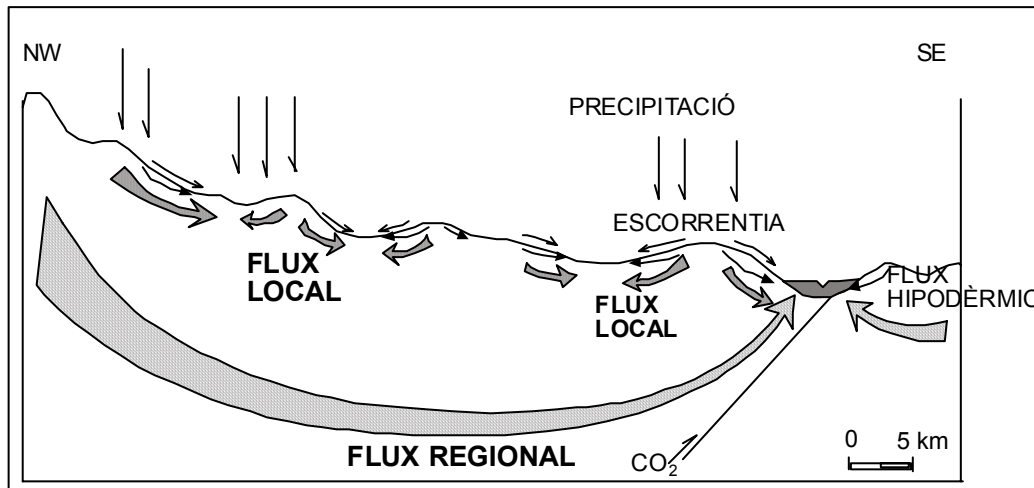


Figura 5.13 Diferents sistemes de flux subterrani en funció de l'escala (modificat de Tóth, 1995)

### 5.1.3 OXÍGEN-18 I DEUTERI A LES AIGÜES PICANTS

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, l'existència d'aigües carbòniques s'ha relacionat amb la presència d'importantes fractures, que donaren lloc a la individualització en blocs del massís i la formació de les depressions circumdants. Aquestes fractures constitueixen les vies d'ascens del  $\text{CO}_2$  d'origen endogen. Amb la finalitat d'integrar la dinàmica d'aquestes surgències al model hidrogeològic general proposat mitjançant les dades piezomètriques, hidroquímiques i isotòpiques de les captacions, es discuteix a continuació el contingut en isòtops estables de quatre fonts (BE1, CS149, MA1 i GI120) i dos pous (SF56 i GI121) d'aigua freda picant i d'una font d'aigua termal també picant (CA1). La seva distribució espacial es presenta a les Figures 5.7 i 5.10 juntament amb el medi geològic on es troben emplaçades.

En el cas d'aquestes mostres, cal contemplar que la concentració dels isòtops d'oxigen-18 i deuteri i la relació entre ambdós, pot variar com a conseqüència de modificacions secundàries com evaporació, importants interaccions aigua/roca o intercanvi isotòpic aigua/gas.

Les interaccions aigua-roca es basen en la inestabilitat termodinàmica dels minerals, fins i tot dels menys solubles, en presència d'aigua i gas i sota unes condicions de pressió i temperatura canviant. En els sistemes geotermals, la temperatura és el factor dominant en la interacció aigua-roca provocant que els isòtops estables de l'aigua normalment difereixin de la línia meteòrica (Craig, 1963). En concret, acostumen a situar-se a la dreta de la línia meteòrica local com a resultat d'un intercanvi amb l'oxigen-18 dels minerals de les roques. S'ha registrat augments del  $^{18}\text{O}$  de fins un 15‰ (Hoefs, 1987) (Figura 5.14). En canvi, el fet que la fraccionació del deuteri entre el líquid i el vapor d'aigua disminueix ràpidament en augmentar la temperatura (Horita i Welolowsky, 1994) i degut a que les roques quasi no tenen minerals amb  $\text{H}_2$ , no s'observen pràcticament canvis en els isòtops de l'hidrogen, només si hi ha mescles amb altres fluids (Giggenbach, 1992).

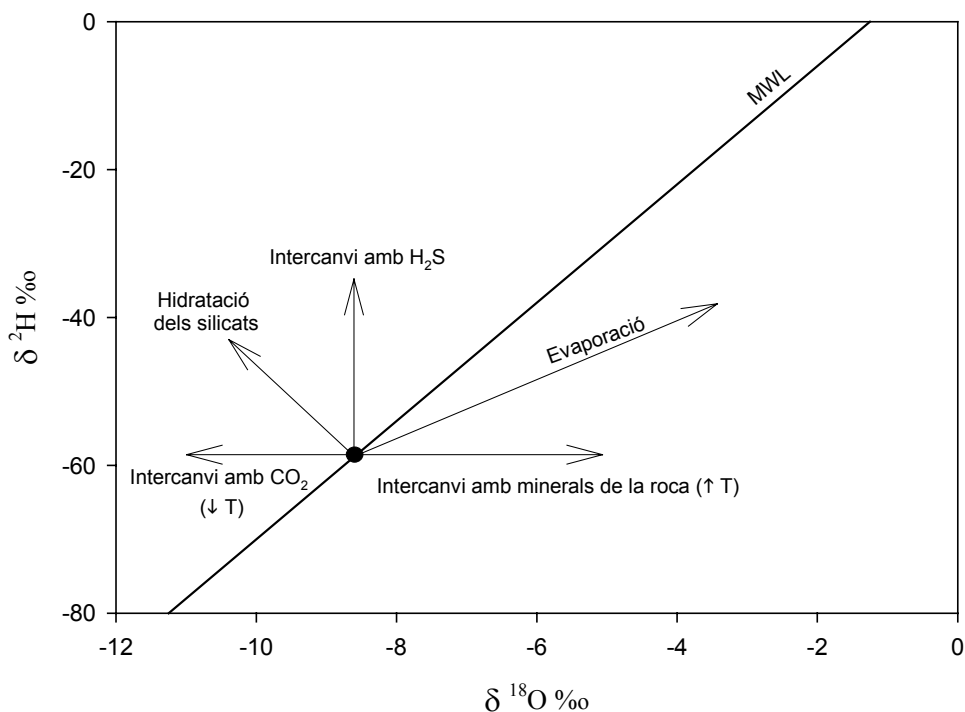


Figura 5.14 Processos responsables de modificacions isotòpiques de la composició inicial (Fritz i Frapé, 1980).

En els sistemes freds dominats pel  $\text{CO}_2$ , la solubilitat d'aquest gas a l'aigua augmenta en disminuir la temperatura afavorint també la interacció aigua-roca a baixes temperatures (Greber, 1994). Segons aquest procés, esperarem trobar isòtops d'oxigen més pesats atès que el gas afavoreix els processos d'intercanvi amb la roca sense la necessitat de temps de residència elevats que es reflectiran amb un desplaçament horitzontal de les mostres cap a la dreta de la LMWL (Figura 5.14).

A les aigües picants, el desplaçament cap a la dreta de la LMWL és difícil d'observar perquè l'intercanvi isotòpic entre l'oxigen de l'aigua i el del  $\text{CO}_2$  emmascara els efectes de la interacció aigua-roca (IGME, 1984). A  $25^\circ\text{C}$  el factor de fraccionació  $\alpha^{18}\text{O}_{\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}}$  és de 1.0412 (Friedman and O'Neil, 1977) i l'equilibri isotòpic s'assoleix en poques hores. Aquests processos però no tenen un resultat únic i cal introduir-hi diverses consideracions:

1. Normalment la relació en el contingut d'oxigen entre  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  és bastant petita, essent més probable que el valor del  $\delta^{18}\text{O}$  del  $\text{CO}_2$  vingui determinat pel valor del de l'aigua i, conseqüentment, no es registraran diferències en el contingut isotòpic de l'aigua. Només en circumstàncies excepcionals, com les zones amb elevada producció de  $\text{CO}_2$ , la relació entre els continguts de gas/aigua és prou elevada per permetre que el  $\text{CO}_2$  afecti al fluid (Clark i Fritz, 1997).
2. Quan les aigües entren en contacte amb grans quantitats de  $\text{CO}_2$  (relació  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  elevada) esdevenen empobrides en  $^{18}\text{O}$  (Ferrara *et al.*, 1965; Fontes, 1976) i per tant es desplacen cap a l'esquerra de la línia meteòrica local. Amb tot, aquest canvi en la dotació en  $^{18}\text{O}$  en sistemes amb elevats continguts en  $\text{CO}_2$  no és molt comú, tant perquè es necessiten volums molt elevats de  $\text{CO}_2$  com perquè dependrà de l'origen del  $\text{CO}_2$ : En aquest sentit, la naturalesa del  $\text{CO}_2$  també és important tenir-la en compte a l'hora d'estimar aquests intercanvis, tal i com es detalla en les següents consideracions.
3. El procés de descarbonatació de  $\text{CaCO}_3$  (metamorfisme de contacte) produeix  $\text{CO}_2$  que està enriquit en  $^{18}\text{O}$  (Shieh and Taylor, 1969; Valley, 1986) i per tant s'observarien aigües amb uns isòtops més pesats. De totes maneres, Bottinga (1968) calculà que a  $600^\circ\text{C}$  que l'enriquiment seria inferior al 5% i, per tant, també molt difícil de mesurar.



4. El factor de fraccionació de l'oxigen entre magmes bàsics i el  $\text{CO}_2$  és petit. El  $\text{CO}_2$  que prové d'un magma bàsic té un valor de  $\delta^{18}\text{O}$  proper a 5.6‰. La dissolució d'aquest  $\text{CO}_2$  en les aigües minerals els hi hauria de fer augmentar el contingut isotòpic en  $^{18}\text{O}$ .
5. A les observacions anteriors cal afegir que el procés d'alliberament del  $\text{CO}_2$ , en arribar a la superfície (exsolució), provoca una disminució del valor de  $^{18}\text{O}$  de l'aigua, resultant en un desplaçament d'aquestes aigües cap a l'esquerra de la línia meteòrica local (Cartwright et al, 2000).

Les aigües picants fredes de la zona d'estudi es troben situades a l'esquerra de la LMWL anual i de la LMWL de l'hivern (Figura 5.15), si bé es són més properes a la segona. Atenent al fet que la dinàmica de flux ha de ser semblant a les dels pous profunds en ambients granítics (GI85, CS80, CS118 i CS113), els quals presenten dotació isotòpica propera a la LMWL anual, es considera que el procés d'exsolució del  $\text{CO}_2$  pot haver conduït a aquest desplaçament negatiu del contingut isotòpic en  $\delta^{18}\text{O}$ , sense poder-se constatar si s'ha produït prèviament un intercanvi amb el contingut isotòpic de les roques encaixants.

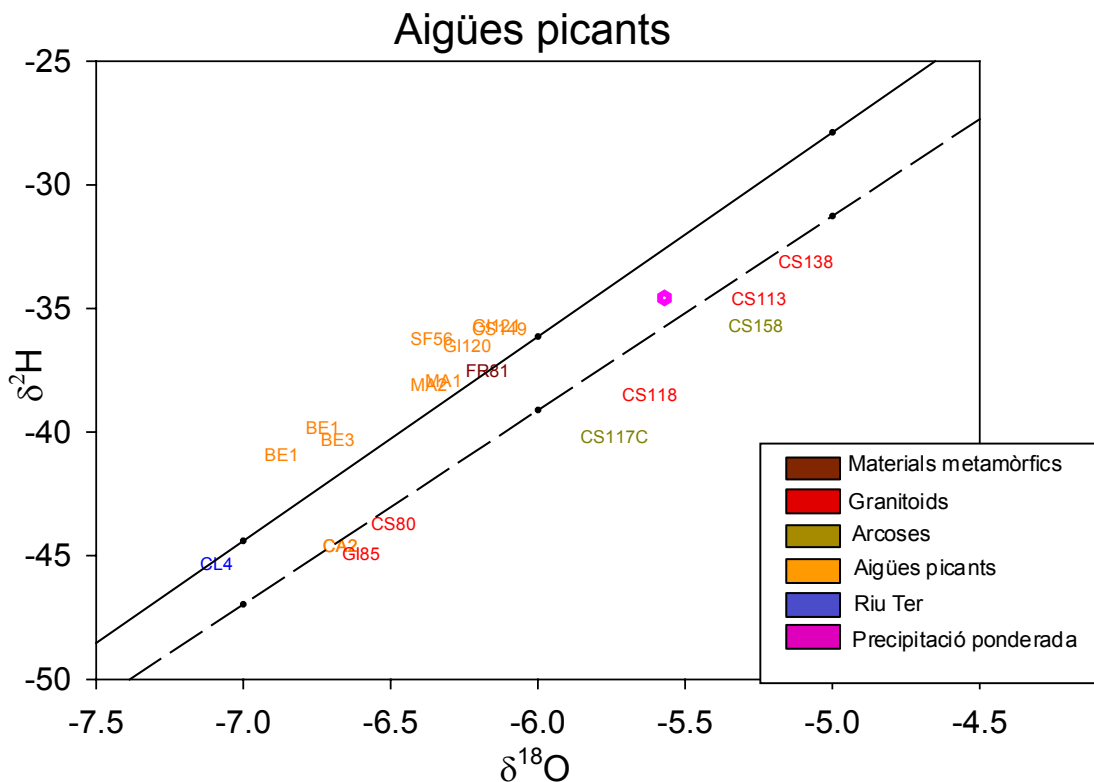


Figura 5.15 Contingut isotòpic de les aigües picants i de mostres de la depressió de la Selva.

Entre les mostres d'aigua picant s'observen també diferències. Els continguts més lleugers els registra la font picant de Bell-lloc (BE1) que és també la que presenta major grau de mineralització, alcalinitat, cabal més constant i menor contingut en triti (veure Capítol 7). Les dotacions isotòpiques més pesades es registren a la font de Penedes (CS149).

Atès que les dotacions isotòpiques d'aquestes aigües es disposen segons una mateixa pendent, no es poden atribuir les variacions entre elles a una diferent participació del CO<sub>2</sub> doncs aquest produiria diferències només en els isòtops de l'oxigen. S'interpreten mitjançant mescles de masses d'aigua de diferents procedències i, per tant, d'alçades de recàrrega distintes, edats i en diferents percentatges, tal i com es detalla en el Capítol 7.

Respecte la cota a la que brollen no es constata cap relació amb el contingut isotòpic (Figura 5.16) i el contingut en isòtops estables no presenta tampoc cap relació amb el contingut en triti. Tal i com s'apuntava per les mostres d'ambients granítics de la depressió de la Selva, es considera la presència d'una component de recarrega procedent d'altituds majors a les de les Gavarres.

Finalment, pel que respecta a les aigües carbòniques termals, la font de la Mina de Caldes, CA1, s'observa que isotòpicament concorda amb les localitzades en les formacions granítiques i per tant a la dreta de les aigües carbòniques fredes. Es considera que l'aigua termal rica en CO<sub>2</sub> també es veu afectada pel procés d'exsolució que desplaça les fonts picants cap a l'esquerra (Fouillac *et al.*, 1983 i 1991); i atès que presenten temperatures elevades, s'interpreta que el seu enriquiment en <sup>18</sup>O respecte les aigües picants fredes és produït per una interacció efectiva amb la roca encaixant. En aquest sentit IGME (1982) apunta aquest intercanvi amb la roca i estima una temperatura d'equilibri de 120-130 °C, la qual és suficient per produir un desplaçament cap a la dreta de la línia meteòrica local. Per una altra banda, la baixa dotació en deuteri es relaciona amb una elevada alçada de recàrrega.

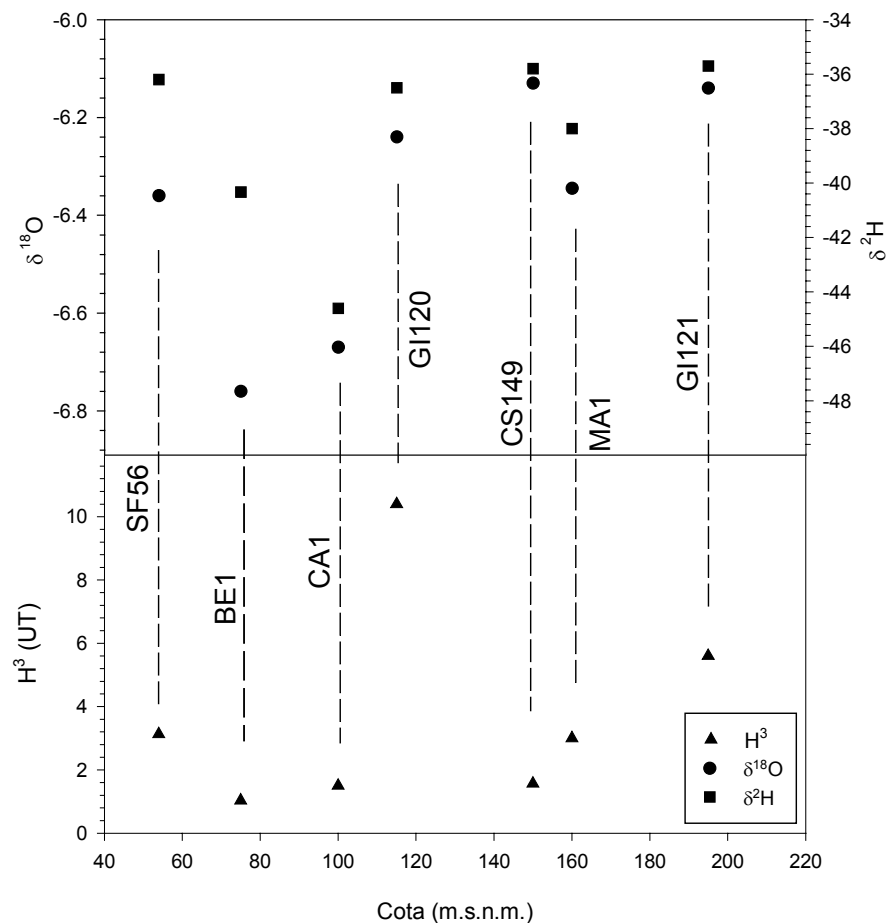


Figura 5.16 Contingut en  $H^3$ ,  $^{18}O$  i  $^2H$  en funció de la cota topogràfica del punt de mostreig.

## 5.2. ANÀLISI DEL CONTINGUT EN TRITI

El triti ( $^3H$ ) és un isòtop radioactiu de l'hidrogen que té una vida mitjana de 12.43 anys i es forma a l'atmosfera per processos naturals. La seva utilitat com a datador radica en el fet de que assolí elevades concentracions en l'atmosfera durant els anys 50 i 60 degut a proves nuclears. La primera entrada antropogènica a l'atmosfera tingué lloc el 1952 i el pic de concentració màxim s'assolí el 1963 (Clark i Fritz, 1997). A partir d'aquest any, la concentració atmosfèrica ha anat disminuint constantment. El triti és aportat a la superfície de la terra mitjançant la precipitació i

no sofreix alteracions per interacció amb les roques ni reaccions químiques. El contingut en triti de la precipitació registra variacions estacionals que caldrà tenir en compte.

Es pot usar el triti amb diferents propòsits:

- datació directa del temps de trànsit de l'aigua
- estimar paràmetres hidrològics com el ritme de recàrrega o la dispersió a partir de la distribució de triti a l'aquífer.
- Per entendre els processos de flux en medis amb fractures i interpretar la susceptibilitat enfront contaminacions antròpiques.

A continuació s'utilitzarà aquest isòtop per estimar el temps de residència de l'aigua i per interpretar les característiques del flux en un medi fracturat com el massís de les Gavarres i àrees limítrofes.

### **5.2.1 PRESENTACIÓ DE LES DADES. RELACIÓ AMB EL MEDI**

S'ha analitzat el contingut en triti de les aigües subterrànies en diferents campanyes, com s'ha detallat en el Capítol 3. En la Figura 5.17 i les Taules 5.6 i 5.7 es presenten les dades obtingudes diferenciant les formacions hidrogeològiques a les que pertany cada mostra. Les fonts picants, per les seves peculiars característiques, es consideren en un capítol a part però, també se n'inclou una descripció general a continuació (Figura 5.17 i Taula 5.7), atès que en aquest apartat es pretén inferir sobre la totalitat dels sistema hidrogeològic, i amb la finalitat d'establir comparacions i avaluar-ne les relacions.

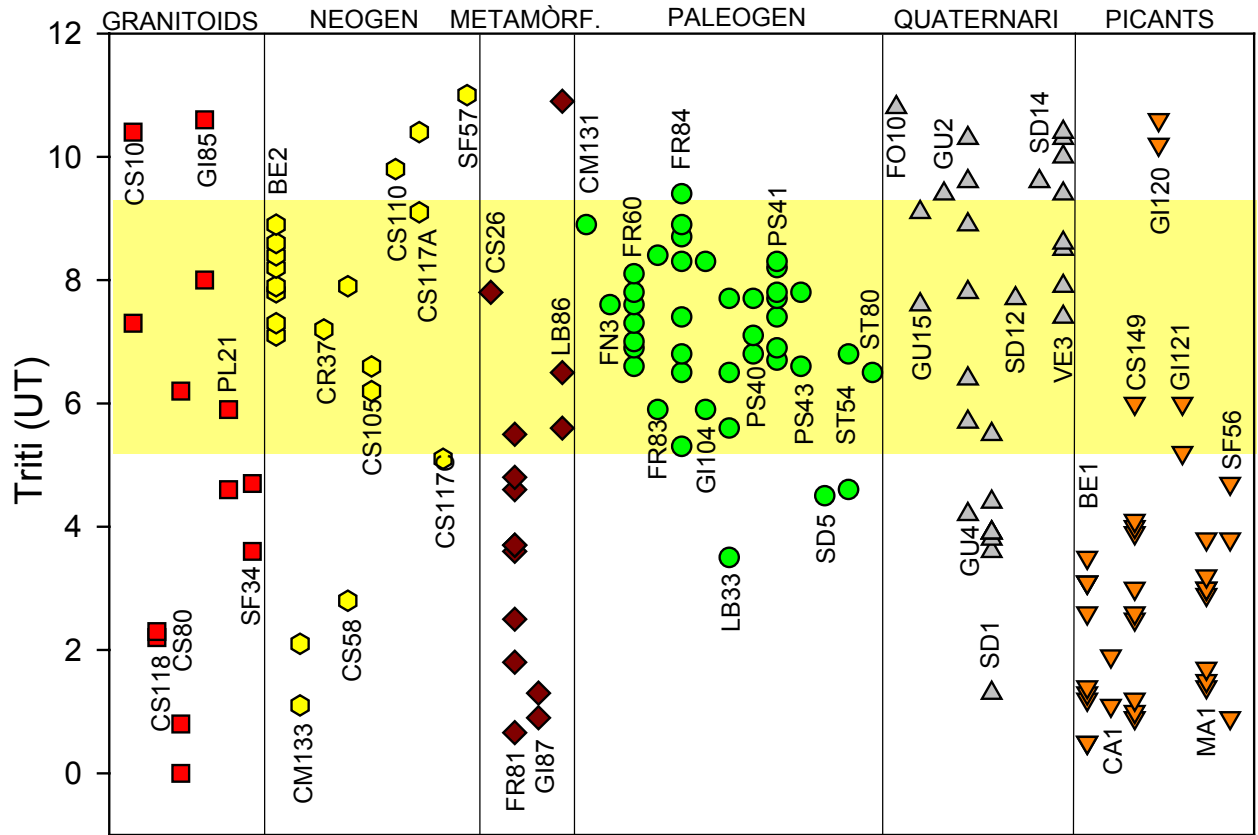


Figura 5.17 Continguts en triti de les diferents campanyes

Taula 5.6 Contingut en triti en les diferents formacions hidrogeològiques de l'àrea d'estudi.  
L'error analític és d'entre 0.3 i 0.7 UT (Vessant: S.- Depressió de la Selva, BT.- Baix Ter)

|                       | Vessant | PROF | mitjana | Feb-96 | Jun-96 | Feb-97 | Jun-97 | Set-97 | Des-97 | Abr-98 | Jul-98 | Mar-00 | Jun-00 | Nov-00 |
|-----------------------|---------|------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                       |         | (m)  | triti   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Granitoid             | CS10    | S    | 60      | 8.85   |        |        |        |        |        |        |        | 10.4   | 7.3    |        |
|                       | CS118   | S    | 100     | 2.25   |        |        |        |        |        |        |        | 2.2    | 2.3    |        |
|                       | CS80    | S    | 90      | 3.10   |        |        |        |        |        |        |        | 0      | 6.2    | 0.8    |
|                       | Gi85    | S    | 150     | 9.30   |        |        |        |        |        |        |        | 8      | 10.6   |        |
|                       | PL21    | S    | 60      | 5.25   |        |        |        |        |        |        |        | 5.9    | 4.6    |        |
|                       | SF34    | S    | 62.5    | 4.15   |        |        |        |        |        |        |        | 3.6    | 4.7    |        |
| Formacions neògenes   | BE2     | S    | Font    | 8.90   |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 8.9    |
|                       | CM133   | BT   | 60      | 1.60   |        |        |        |        |        |        |        | 2.1    | 1.1    |        |
|                       | CR37    | BT   | 151     | 7.20   | 7.2    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | CS 58   | S    | 100     | 5.35   |        |        |        |        |        |        |        | 7.9    | 2.8    |        |
|                       | CS105   | S    | 8.9     | 6.40   |        |        |        |        |        |        |        | 6.2    | 6.6    |        |
|                       | CS110   | S    | 104     | 9.80   |        |        |        |        |        |        |        | 9.8    |        |        |
|                       | CS117A  | S    | 34      | 9.75   |        |        |        |        |        |        |        | 9.1    | 10.4   |        |
|                       | CS117C  | S    | 65      | 5.10   |        |        |        |        |        |        |        | 5.1    |        |        |
| SF57                  | S       | 98   | 11.00   |        |        |        |        |        |        |        | 11     |        |        |        |
| Metamòrf.             | CS26    | S    | 30      | 7.80   |        |        |        |        |        |        |        | 7.8    |        |        |
|                       | FR81    | BT   | 210     | 3.43   | 0.7    | 1.8    | 3.7    | 2.5    | 4.6    | 3.6    | 5.5    | 4.8    | 3.7    |        |
|                       | GI87    | S    | 110     | 1.10   |        |        |        |        |        |        |        | 0.9    | 1.3    |        |
|                       | LB86    | BT   | 60      | 7.67   | 6.5    | 5.6    |        |        |        |        | 10.9   |        |        |        |
| Formacions paleògenes | CM131   | BT   | 50      | 8.90   |        |        |        |        |        |        |        | 8.9    |        |        |
|                       | FN3     | BT   | 44      | 7.60   | 7.6    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | FR60    | BT   | 69      | 7.28   | 7.3    | 7      | 6.6    | 7.8    | 6.9    | 7.6    |        | 6.9    | 8.1    |        |
|                       | FR83    | BT   | Font    | 7.15   | 8.4    | 5.9    |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | FR84    | BT   | 63      | 7.66   | 6.5    | 7.4    | 5.3    | 8.3    | 6.8    | 9.4    | 8.9    | 8.7    |        |        |
|                       | GI104   | BT   | 60      | 7.10   |        |        |        |        |        |        |        | 5.9    | 8.3    |        |
|                       | LB33    | BT   | 113     | 5.83   | 5.6    | 7.7    | 3.5    |        |        |        |        | 6.5    |        |        |
|                       | PS40    | BT   | Font    | 7.20   | 7.1    | 7.7    | 6.8    |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | PS41    | BT   | 100     | 7.57   | 6.7    | 8.3    |        | 7.7    | 7.8    | 8.2    |        | 6.9    | 7.4    |        |
|                       | PS43    | BT   | Font    | 7.20   | 6.6    | 7.8    |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | SD5     | BT   | Font    | 4.50   | 4.5    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | ST54    | BT   | 87      | 5.70   |        |        |        |        |        |        |        | 4.6    | 6.8    |        |
|                       | ST80    | BT   | 100     | 6.50   |        |        |        |        |        |        |        |        | 6.5    |        |
| FO10                  | BT      | 15   | 10.80   |        |        |        |        |        |        |        |        | 10.8   |        |        |
| Al.luvial quaternari  | GU15    | BT   | 47      | 8.35   |        |        |        |        |        |        |        | 7.6    | 9.1    |        |
|                       | GU2     | BT   | 17      | 9.40   |        |        |        |        |        |        |        |        | 9.4    |        |
|                       | GU4     | BT   | 60      | 7.56   | 6.4    | 7.8    | 4.2    | 5.7    | 10.3   | 8.9    | 9.6    |        |        |        |
|                       | SD1     | BT   | 28.7    | 3.79   |        | 3.6    | 1.3    | 3.9    | 3.9    | 3.9    | 3.8    | 4.4    | 5.5    |        |
|                       | SD12    | BT   | 18      | 7.70   | 7.7    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | SD14    | BT   | 9       | 9.60   |        |        |        |        |        |        |        |        | 9.6    |        |
|                       | VE3     | BT   | 9.6     | 9.06   |        | 7.4    | 8.5    | 9.4    | 8.6    | 10.3   | 10.4   | 7.9    | 10     |        |

Taula 5.7 Contingut en triti i error analític a les fonts picants (\*dades extretes de Clotet, 1989)

|           | BE1 Error | BE2 error | CS149 error | MA1 error | CA1 error | SF56 error | GI120 error | GI121 error |
|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|
| 30/12/87* | 0.4 2.0   | 19.4 2.0  | 5.2 2.0     |           |           |            |             |             |
| 13/01/88* | 2.5 2.0   | 24.2 3.0  | 8.8 2.0     |           |           |            |             |             |
| 30/01/88* | 15.2 4.0  | 21.0 3.0  |             |           |           |            |             |             |
| 02/03/88* | 9.0 1.0   |           |             |           |           |            |             |             |
| 25/03/88* | 12.0 1.0  |           |             |           |           |            |             |             |
| 13/05/88* | 8.0 1.0   |           |             |           |           |            |             |             |
| 30/06/88* | 9.0 1.0   | 21.0 1.0  |             |           |           |            |             |             |
| 29/07/88* | 12.0 1.0  | 23.0 1.0  |             |           |           |            |             |             |
| 05/09/88* | 10.0 1.0  | 20.0 1.0  |             |           |           |            |             |             |
| 14/02/00  |           |           |             |           |           |            |             |             |
| 06/03/00  | 0.5 0.5   |           | 0.9 0.5     |           | 1.9 0.6   | 3.8 0.5    | 10.2 0.5    | 5.2 0.4     |
| 01/07/00  | 1.4 0.6   |           | 2.6 0.6     |           |           | 4.7 0.6    | 10.6 0.5    | 6 0.6       |
| 15/11/00  | 1.2 0.5   | 8.9 0.5   | 1.2 0.5     | 3.0 0.5   | 1.1 0.5   |            |             |             |
| 12/12/00  |           |           |             |           |           |            |             |             |
| 18/01/01  | 0.5 0.6   | 7.3 0.6   | 1.0 0.6     | 3.2 0.7   |           |            |             |             |
| 06/03/01  | 3.1 0.6   | 7.9 0.6   | 4.0 0.6     | 3.0 0.7   |           |            |             |             |
| 22/04/01  | 2.6 0.6   | 8.4 0.6   | 6.0 0.6     | 1.4 0.7   |           |            |             |             |
| 23/05/01  | 3.1 0.6   |           |             |           |           |            |             |             |
| 25/05/01  |           | 7.1 0.6   | 3.0 0.6     | 1.7 0.7   |           |            |             |             |
| 30/07/01  | 1.3 0.6   | 8.2 0.6   | 4.1 0.6     | 3.8 0.7   |           |            |             |             |
| 09/10/01  | 3.5 0.6   | 8.6 0.6   | 3.9 0.6     |           |           |            |             |             |
| 30/10/01  |           |           |             | 2.9 0.7   |           |            |             |             |
| 09/01/02  | 3.1 0.6   | 7.8 0.6   | 2.5 0.6     | 1.5 0.7   |           |            |             |             |

El contingut en triti de les formacions hidrogeològiques registra una notable variabilitat en profunditat, espacialment i en un mateix punt al llarg del temps, a diferència del que mostraven els isòtops estables. No obstant això, es poden destacar diferents observacions:

1. La variabilitat de registres és menor en les mostres corresponents a les formacions paleògenes del Baix Ter (bàsicament entre 5 i 9 UT), suggerint-hi una dinàmica de flux notablement constant.
2. Els continguts mitjans en triti més elevats es produeixen en els aqüífers al·luvials del Baix Ter, sobretot als nivells superficials. En aquests darrers, excepte GU4 i SD1, presenten continguts superiors a 5 UT i fins a 11 UT. Aquests valors són també més elevats que la mitjana de triti a la precipitació dels darrers 5 anys. Com a conseqüència, el temps de residència en aquestes formacions i a les paleògenes no pot estimar-se només establint

comparacions quantitatives i caldrà tenir-hi en compte la funció d'entrada del triti i els processos de desintegració.

3. En els materials granítics i metamòrfics del massís de les Gavarres i els sediments arcòsics del Neogen de la depressió de la Selva, el contingut en triti és molt heterogeni i requereix una anàlisi de caire més particular considerant les característiques de cada punt de mostreig. Aquesta dispersió de valors s'atribueix a la presència de fractures, les quals condicionen el tipus de flux i les relacions entre elles. Poden establir-se diferències en cada una de les formacions:

- 3.1 Als materials metamòrfics del vessant de la Selva, el pou GI87 presenta baixa concentració en triti ( $<3$  UT) i que, addicionalment, és semblant als valors obtinguts pels pous CS80 i CS118. S'ha indicat, mitjançant l'aplicació dels isòtops estables, que CS80 i GI87 poden correspondre a una mateixa trajectòria dins un sistema de flux i amb diferents processos d'interacció amb la roca en funció del temps de residència. En aquest sentit, el triti recolza aquesta hipòtesi assenyalant que s'hi produeixen temps de residència elevats. En els materials metamòrfics del nord del massís es disposa d'un llarg registre del contingut en triti del pou FR81.

- 3.2 A les formacions neògenes de la Selva, les quals formen un aquífer multicapa, no es constata una relació entre la profunditat de mostreig i el contingut en triti; indicant per tant una homogeneïtzació entre els continguts de diferents nivells permeables. En general presenten continguts majors que les dels punts en formacions granítics, excepte el pou som CS58. En aquest el mínim valor correspon a l'estiu, quan els cabals d'extracció són prou elevats per induir fluxos procedents de zones amb menor contingut en triti. S'evidencia la variabilitat atribuïda a la recàrrega a través de diferents sistemes de fractures, amb distintes eficàcies de flux.

- 3.3 Als granitoids s'hi observa que els menors continguts en triti (inferiors a 5 UT) es registren en els dos pous més profunds i de major mineralització, CS80 i CS118. S'hi considera doncs un elevat temps de residència i una interacció efectiva amb la roca encaixant, característiques que es relacionen amb un sistema de flux a través de fractures de llarg recorregut, és a dir, a escala regional. No obstant, la variació en el contingut en triti a CS80 indica mescles puntuals amb masses d'aigua més recents.



En els diferents punts del Baix Ter on es disposa d'una llarga sèrie de dades que descriuen la variació temporal del contingut de triti als aqüífers (FR60, PS41, FR84, VE3, GU4, SD1 i FR81) no s'observa una tendència única per a tots, i la baixa freqüència de mostreig tampoc permet establir una correlació amb el contingut en triti de la precipitació recollida a Mas Badia de la Tallada d'Empordà.

### 5.2.2- FUNCIO D'ENTRADA DEL TRITI

L'estimació del temps de residència de l'aigua d'un aqüífer és un procés complex i sotmès a molts incerteses. Si es disposa de la funció d'entrada del triti, aquest isòtop esdevé un mètode útil de càlcul del temps de trànsit de les aigües. L'entrada a un aqüífer només es pot mesurar indirectament mitjançant la concentració de triti de la precipitació sobre l'àrea de recàrrega de l'aqüífer, mesures que per aplicar-les a l'aigua subterrània, cal corregir.

Els baixos nivells de triti en la precipitació actual representen l'equilibri anual entre:

- la producció natural la qual fluctua al llarg de l'any,
- la desintegració a l'atmosfera del triti produït actualment i el romanent,
- la pèrdua cap a la hidrosfera i oceans (en funció de la latitud).

A grans trets, la presència de triti mesurable a les aigües subterrànies s'atribueix a una recàrrega moderna. Si es registren valors superiors a les 30UT, implica una recàrrega durant els anys 60 i si els nivells de triti són propers als límits de detecció (<1UT) es relacionen amb aigües submodernes o aigües fòssils mesclades amb aigües modernes superficials (s'estima que abans del 1951 el triti de la pluja era entre 3.4 i 6.6 UT). Actualment, i concretament al Baix Ter (Mas Badia), la mitjana de triti del període 1998-2001 és de 6.43 UT (Figura 5.18).

Per a quantificar més el temps de trànsit s'ha disposat de tres funcions d'entrada, la corresponent a Mas Badia pel període 1996-2002, la de Terrassa-UAB (UAB, 2003) que inclou del 1968-2000 i la de Barcelona (IAEA, 2001) que incorpora dades del 1971 al 1992 i el 1997 i 1998. Es compara amb la funció que descriuen les mostres a Marsella, França (IAEA, 2001) atès que registra valors del pic assolit després dels assajos nuclears (Figura 5.19 i Annex 4).

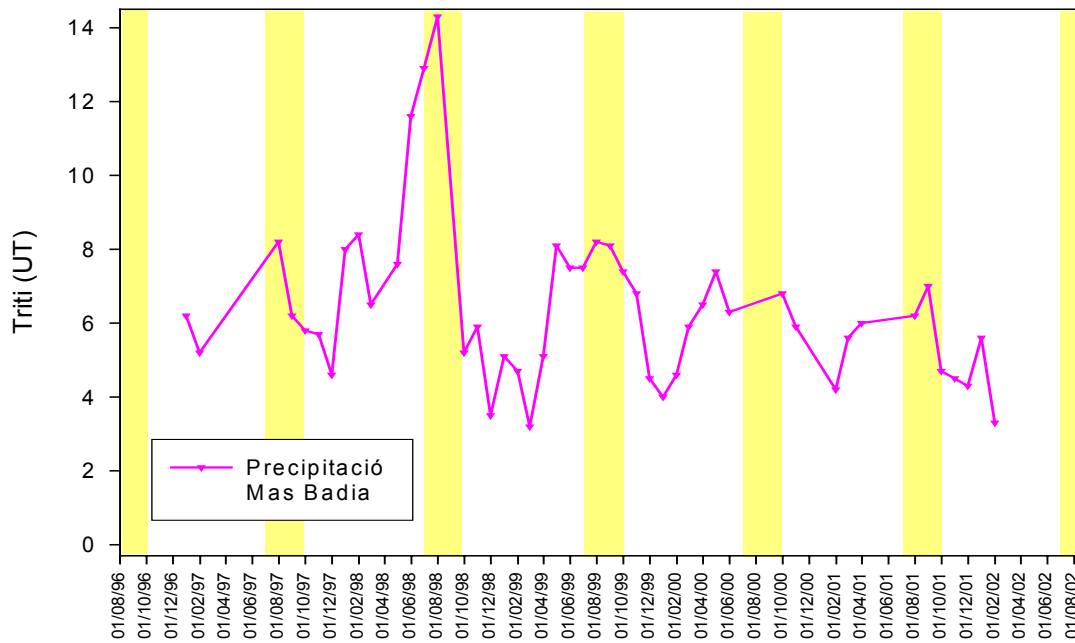


Figura 5.18 Contingut en triti a la precipitació recollida a Mas Badia (La Tallada d'Empordà).

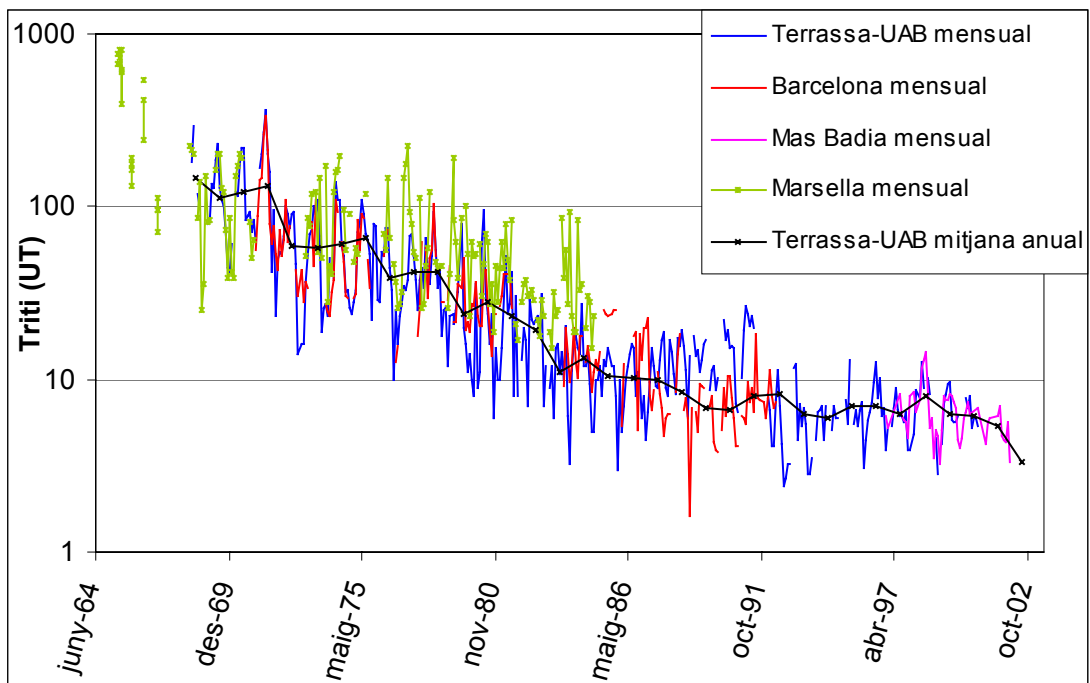


Figura 5.19 Concentració en triti mensual i anual a la precipitació en diferents estacions.

### 5.2.3 MÈTODE D'ESTIMACIÓ DEL TEMPS DE TRÀNSIT

L'estimació del el temps de trànsit s'ha realitzat aplicant el del model exponencial de la funció d'entrada (Clark i Fritz, 1997) on es determina l'atenuació de la recàrrega dels nivells de triti per un determinat sistema de flux subterrani i mitjançant l'aplicació de l'equació de desintegració.

El contingut en triti mesurat en un aquífer respon a una integració de diferents temps de trànsit o residència (termes sinònims en aquest cas) de diferents molècules d'aigua. El càlcul d'aquest paràmetre es realitza considerant el procés de desintegració natural del triti:

$$t = (-17.93 \ln \frac{N}{N_0})$$

on  $N_0$  és l'activitat o concentració inicial de triti (en UT),  $N$  és l'activitat residual mesurada actualment a la mostra després d'un temps  $t$  des de la seva infiltració i el terme constant,  $\lambda$ , deriva del període de semidesintegració ( $t_{1/2}$ ):

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = 17.93 \text{ , amb } t_{1/2} = 12.43 \text{ anys}$$

El càlcul del temps de residència mitjà comporta realitzar determinades suposicions. Concretament, a la zona d'estudi:

- El contingut en triti a la precipitació presenta notables variacions estacionals i anuals que resulta en una complexa funció d'entrada al sistema. S'ha simplificat aplicant dues consideracions per separat. Per una banda, s'ha estimat el temps de trànsit a partir de mitjanes anuals ponderades de triti doncs es considera que el temps a l'àrea de recàrrega és suficient per atenuar les variacions. Per una altra banda, també s'ha calculat el temps de trànsit a partir de mitjanes anuals sense els valors corresponents al mesos estivals. Es basa en conclusions presentades en aquest treball les quals, mitjançant un balanç hídric i les dotacions en isòtops estables, indiquen que la recàrrega durant els mesos estivals és pràcticament nul·la.

- Pel que fa al sistema de flux, aquest es considera de tipus pistó en base a les dades hidroquímiques i isotòpiques presentades. S'assumeix que no es produeixen mescles dins de cada trajectòria ni tampoc dispersió al llarg del recorregut.

El valor en triti actual a la mostra es pot extrapolar enrera en el temps segons una funció descrita pel procés de desintegració fins a intersectar-se amb la línia que descriu la funció del triti a la precipitació, funció d'entrada al sistema. Aquest punt d'intersecció indicarà l'any en que es produí la infiltració si a la mostra només hi ha contribuït la precipitació d'un any. Això implica però una simplificació poc realista, atès que el contingut en triti a un aquífer sol ser una mitjana de varis anys i és més acurat doncs, treballar amb un model que tingui en compte també la mescla i la desintegració en l'ambient de recàrrega.

Concretament, aquesta complexitat s'ha contemplat en el mètode exposat per Fritz i Clark (1997) el qual considera una parcel·la d'aigua a l'aquífer on hi intervé precipitació de diferents anys i diferents zones. La concentració de triti en aquesta parcel·la serà funció del temps de residència a la zona de recàrrega i del temps de trànsit mitjà des de que s'aïllà de l'atmosfera. La mescla de diferents anys a l'àrea de recàrrega dóna una funció d'entrada multianual del triti que es pot aproximar considerant una contribució ponderada del triti de cada any més una correcció per la desintegració de cada any de precipitació durant l'emmagatzematge en l'àrea de recàrrega. La ponderació de cada any s'aproxima a una distribució normal que dóna el pes més gran a la precipitació dels anys centrals, amb més baixa concentració en el primer i darrers anys. Ateses les característiques del medi de la zona d'estudi, el càlcul s'ha realitzat considerant diferents períodes de residència en l'àrea de recàrrega (h), concretament:

- $h = 5$  anys, essent el tercer any el que hi contribueix majoritàriament, concretament en un 33% segons una distribució normal i s'aplica posterior a cada any la corresponent desintegració,
- $h = 3$  anys, considerant el segon any el més important (50% de la recàrrega) i la desintegració pertinent.

Finalment, s'aplica la funció de desintegració a aquestes mescles de 5 i 3 anys. El model assumeix que cada component de l'aigua subterrània en el sistema de flux, ha rebut la mateixa contribució ponderada multianual de la precipitació.

### 5.2.4 RESULTATS: TEMPS DE TRÀNSIT MITJÀ

Emprant la metodologia descrita, el valor de la funció d'entrada resulta de considerar la mescla de la precipitació durant 5 i 3 anys a la zona de recàrrega amb major pes a l'any del mig i corregir la desintegració per la quantitat corresponent a cada any. Els valors de triti de referència corresponen a l'estació meteorològica de Terrassa-UAB fins al 1996, doncs és l'estació que compta amb un major nombre de dades. A partir del 1996 s'han utilitzat les dades de les mostres recollides a Mas Badia. En la funció d'entrada que es presenta a la Taula 5.8, la data que correspon a cada valor es refereix al cinquè (columnes 3a i 5ena) i al tercer any d'acumulació (columna 7ena). En la mateixa taula es presenta el resultat d'aplicar la funció de desintegració al resultat de la mescla funció d'entrada corresponent a l'any 2001, que fou l'any en el que es recolliren les mostres.

Els resultats de les dues estimacions, amb contribucions de 3 i 5 anys de residència, són semblants però en considerar un major nombre d'anys s'atenuen les variacions (Figura 5.20, requadre inferior). En eliminar-hi les mostres corresponents a les precipitacions d'estiu, les mitjanes anuals disminueixen sensiblement i, per tant, també la funció anual d'entrada al sistema i els resultats de la seva desintegració. Les majors diferències s'observen per les aigües infiltrades amb anterioritat al 1980. De totes maneres s'han representat les tres funcions de desintegració en el requadre inferior de la Figura 5.20 en la qual es representa el contingut en triti que correspondria a unes aigües que quedaren aïllades de l'atmosfera l'any que s'indica en l'eix horitzontal. En la mateixa figura s'han sobreposat, a la part inferior, els punts amb el contingut actual mitjà en triti a cada una de les mostres, agrupades en funció de les diferents formacions hidrogeològiques. En la part superior es presenten els mateixos continguts en triti en una diagrama en caixa. Aquest tipus de diagrama estadístic representa els percentils 25è i 75è amb els límits de les caixes (quan es disposa de més de tres valors), la mediana amb la línia horitzontal interior i els percentils 90è i 10è amb les línies verticals en la part superior i inferior de la caixa (si es representen més de 5 mesures) i els valors extrems mitjançant punts.

Taula 5.8 Resultats de càlcul del contingut en triti que tindria una massa d'aigua infiltrada durant els anys indicats. S'han eliminat les dades de juny, juliol i agost en la mitjana de la funció d'entrada que exclou l'estiu.

| Data | Mitjana anual H <sup>3</sup> | Funció d'entrada | Resultat desintegració | Funció d'entrada | Resultat desintegració | Funció d'entrada | Resultat desintegració |
|------|------------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|
|      |                              |                  |                        |                  |                        |                  |                        |
| 1968 | 147.33                       |                  |                        |                  |                        |                  |                        |
| 1969 | 111.25                       |                  |                        |                  |                        |                  |                        |
| 1970 | 120.64                       |                  |                        |                  |                        | 109.44           | 19.43                  |
| 1971 | 130.07                       |                  |                        |                  |                        | 108.23           | 20.31                  |
| 1972 | 59.5                         | 98.28            | 19.50                  | 83.07            | 16.49                  | 97.75            | 19.40                  |
| 1973 | 58.08                        | 85.40            | 17.92                  | 72.60            | 15.24                  | 67.85            | 14.24                  |
| 1974 | 61.27                        | 68.02            | 15.09                  | 58.05            | 12.88                  | 53.05            | 11.77                  |
| 1975 | 65.00                        | 56.90            | 13.351                 | 49.57            | 11.63                  | 55.06            | 12.92                  |
| 1976 | 38.75                        | 49.59            | 12.30                  | 44.62            | 11.07                  | 51.19            | 12.70                  |
| 1977 | 41.64                        | 46.18            | 12.11                  | 42.35            | 11.11                  | 40.92            | 10.73                  |
| 1978 | 41.92                        | 40.31            | 11.18                  | 37.38            | 10.37                  | 36.73            | 10.19                  |
| 1979 | 23.67                        | 34.91            | 10.24                  | 32.19            | 9.44                   | 33.15            | 9.72                   |
| 1980 | 28.20                        | 30.14            | 9.35                   | 28.11            | 8.71                   | 26.12            | 8.10                   |
| 1981 | 23.45                        | 25.69            | 8.42                   | 24.06            | 7.89                   | 23.16            | 7.59                   |
| 1982 | 19.08                        | 22.35            | 7.75                   | 21.56            | 7.47                   | 20.97            | 7.27                   |
| 1983 | 11.16                        | 18.58            | 6.81                   | 17.90            | 6.56                   | 16.13            | 5.91                   |
| 1984 | 13.23                        | 15.53            | 6.02                   | 14.91            | 5.78                   | 12.16            | 4.71                   |
| 1985 | 10.42                        | 12.23            | 5.01                   | 11.38            | 4.66                   | 10.74            | 4.40                   |
| 1986 | 10.17                        | 10.46            | 4.53                   | 9.58             | 4.15                   | 9.86             | 4.27                   |
| 1987 | 9.92                         | 9.29             | 4.25                   | 8.56             | 3.92                   | 9.09             | 4.17                   |
| 1988 | 8.43                         | 8.69             | 4.21                   | 8.18             | 3.96                   | 8.58             | 4.16                   |
| 1989 | 6.90                         | 7.88             | 4.04                   | 7.64             | 3.91                   | 7.50             | 3.84                   |
| 1990 | 6.69                         | 7.07             | 3.83                   | 6.82             | 3.69                   | 6.45             | 3.49                   |
| 1991 | 8.08                         | 6.46             | 3.70                   | 6.03             | 3.45                   | 6.36             | 3.64                   |
| 1992 | 8.30                         | 6.30             | 3.81                   | 5.69             | 3.45                   | 6.99             | 4.23                   |
| 1993 | 6.25                         | 6.35             | 4.07                   | 5.83             | 3.73                   | 6.90             | 4.42                   |
| 1994 | 6.03                         | 6.21             | 4.21                   | 5.94             | 4.02                   | 5.98             | 4.04                   |
| 1995 | 7.00                         | 5.85             | 4.19                   | 5.71             | 4.09                   | 5.67             | 4.06                   |
| 1996 | 7.03                         | 5.64             | 4.27                   | 5.43             | 4.11                   | 6.07             | 4.59                   |
| 1997 | 6.24                         | 5.62             | 4.50                   | 5.30             | 4.24                   | 6.10             | 4.88                   |
| 1998 | 8.10                         | 5.82             | 4.93                   | 5.38             | 4.55                   | 6.19             | 5.24                   |
| 1999 | 6.26                         | 5.86             | 5.256                  | 5.41             | 4.84                   | 6.42             | 5.74                   |
| 2000 | 6.20                         | 5.88             | 5.56                   | 5.39             | 5.09                   | 5.98             | 5.65                   |
| 2001 | 5.34                         | 5.52             | 5.52                   | 5.12             | 5.12                   | 5.36             | 5.36                   |
| 2002 | 3.30                         |                  |                        |                  |                        |                  |                        |

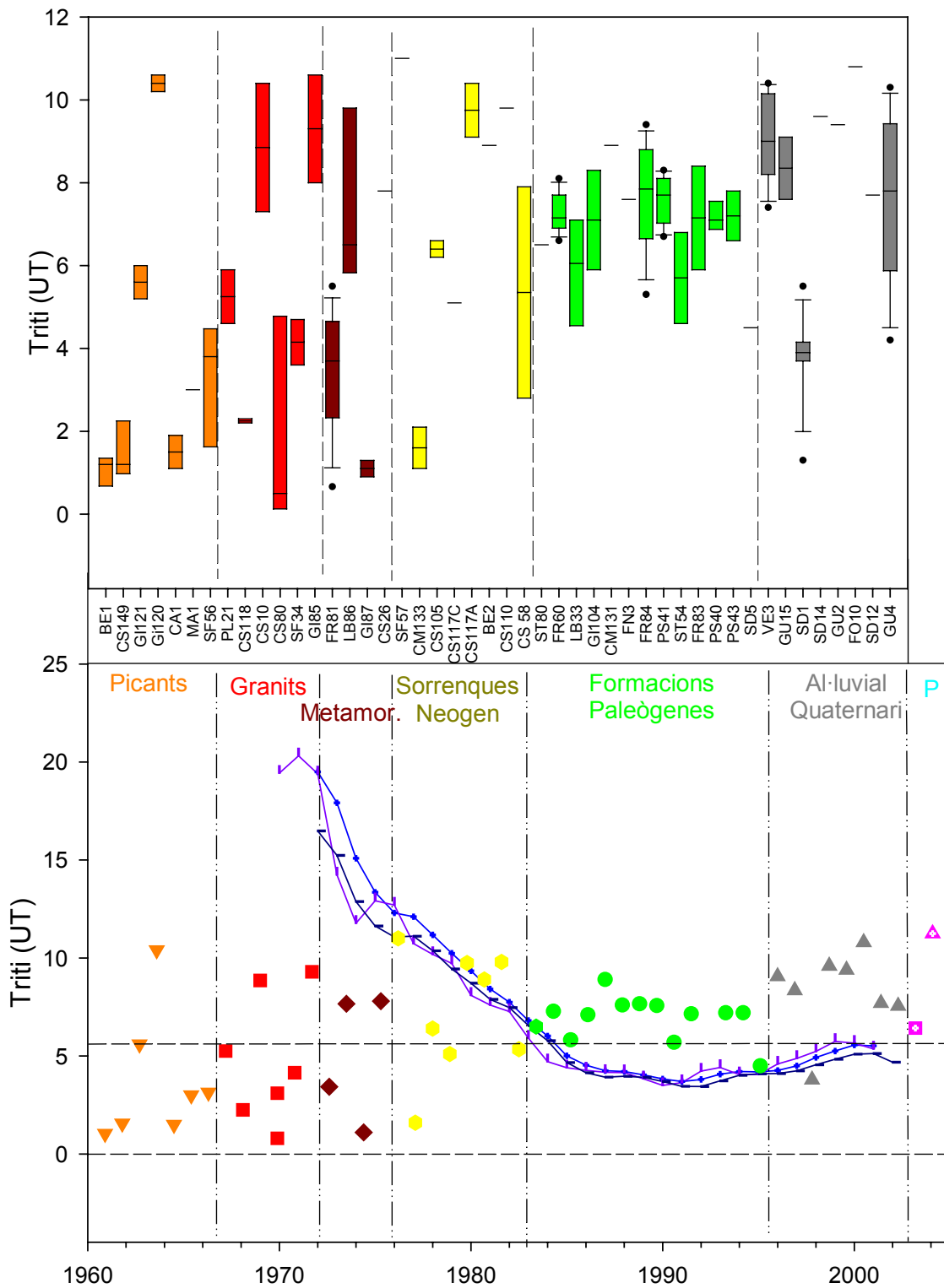


Figura 5.20a En la part superior, diagrames en caixa (veure text) del contingut en triti de les mostres en les diferents formacions. En la part inferior, funcions de desintegració de la precipitació considerant 5 i 3 anys de mescla i recàrrega nul·la a l'estiu, i s'hi sobreposen valors mitjans del contingut en triti de les mostres indicades en la part superior. Llegenda a la Figura 5.20b

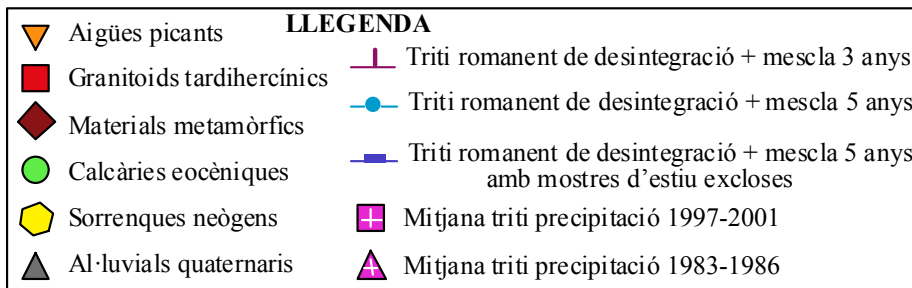


Figura 5.20b- Llegenda de la Figura 5.20a

Concretament, la comparació dels resultats del model de desintegració i mescla amb els valors mitjans de triti (Figura 5.20) permet constatar que:

- Els pous profunds en els granit i en les roques metamòrfiques del vessant de la depressió de la Selva del massís de les Gavarres presenten continguts inferiors als que resulten de l'aplicació del model de desintegració a la precipitació de recàrrega posterior al 1971 ( $\leq 3.4$ ). S'interpreta com a aigua infiltrada bàsicament amb anterioritat a les proves termonuclears i, per tant, amb un temps de trànsit superior als 50 anys.
- No obstant, dos dels pous en granit, CS10 i GI85, presenten continguts en triti més elevats que els altres en la mateixa litologia. Addicionalment, els isòtops estables suggereixen a CS10 una relació amb aigües d'infiltració recent. El valor del contingut en triti en aquests punts coincideix amb l'interval de concentracions registrades en les mostres del Baix Ter, concretament a l'aqüífer al·luvial (entre 5 i 11 UT). Aquesta observació corrobora la presència d'aigües d'infiltració més recent a CS10 i suggereix una possible relació de GI85 amb el sistema hidrodinàmic del Baix Ter, o sigui, amb el sistema hidrogeològic local; si bé la dotació en isòtops estables l'associa també amb un sistema regional. Es considera, com a conseqüència, que la ubicació hidrogràfica d'aquesta captació, en la divisòria entre les dues depressions, li condiona una notable variabilitat temporal.
- Als materials neògens de la Depressió de la Selva la variació és notable. La recàrrega d'aquesta formació es produeix des de dos pols diferents; un pol d'àmbit regional amb temps de residència més llarg i baix contingut en triti ( $<5$  UT) i un altre de procedència més local amb contingut en triti relacionat amb períodes de trànsit més curts. El domini d'un dels dos sistemes de flux és el que condiona finalment el contingut total. En aquest sentit, els isòtops estables indiquen una notable participació de l'aigua de precipitació



recent en els pous soms CS58 i CS105 i el contingut en triti, proper al de la precipitació actual, corrobora aquesta hipòtesi.

- La menor variació en el rang de contingut en triti es constata en el aqüífers en les formacions paleògenes. El contingut isotòpic mitjà en els materials paleògens (entre 5 i 8 UT) reflecteix un temps de residència d'uns 20 anys. El sistema de flux d'aquests nivells es relaciona, consegüentment, amb el sistema hidrogeològic local, amb àrea font al massís de les Gavarres. El temps de trànsit estimat, no obstant, pot estar subestimat atès que els isòtops estables indiquen que també cal tenir-hi en compte una certa influència de la pluviometria (FN3, FR60 i LB33). Segons això, un balanç permet estimar que la component local ha de ser anterior al 1980 però no es pot aproximar més atesa la variabilitat constatada en el massís.
- Els continguts en triti dels aqüífers en materials al·luvials del Baix Ter són notablement elevats i superiors al contingut de triti mitjà en la precipitació actual (5.14 UT). Són lleugerament superiors als continguts de les formacions paleògenes i no permeten diferenciar els pous en els que s'ha descrit la participació induïda d'aigua del riu Ter o de la precipitació recent en base als isòtops estables. Aquestes observacions suggereixen que la dinàmica de recàrrega d'aquestes formacions és similar a la de les formacions paleògenes. Considerant el procés de desintegració segons el model descrit, la composició de la mostra reflecteix un temps de trànsit a superior a 20 anys, a través dels materials del massís de les Gavarres, de formacions superficials i de les formacions paleògenes profundes sotjacentes. Considerant la influència de la precipitació recent, s'estimen temps de residència per a aquesta component, considerablement superiors als 20 anys. El fet que es registrin temps de trànsit superiors als de les formacions paleògenes es relaciona amb el tipus de flux i un major recorregut des de l'àrea de recàrrega. Finalment, assenyalar la variabilitat constatada en la mostra GU4, la qual es relaciona amb aportacions induïdes, per elevats cabals d'extracció, d'una component salina i una procedent del riu Ter. Per una altra banda, la captació VE3, en la qual s'hi ha descrit influència antròpica, no presenta continguts en triti molt diferents. Una possibilitat és que l'aigua que hi s'hi indueix, des de canals de rec, hagi estat prèviament extreta del mateix aqüífer.

### 5.3 ANÀLISI DELS ISÒTOPS D'ESTRONCI

La composició isotòpica de l'estronci de l'aigua s'adquireix durant la interacció amb la roca i consegüentment, és indicativa de les trajectòries del flux i independent dels processos a l'àrea de recàrrega. Suposa, per tant, una nova aportació al coneixement de la dinàmica hidrogeològica en el marc del present estudi.

#### 5.3.1 MARC CONCEPTUAL

Els isòtops d'estronci tenen diferents aplicacions en la investigació hidrogeològica (Stettler, 1977). Poden utilitzar-se per: 1) identificar els orígens de l'estronci, 2) seguir la història geoquímica de les aigües 3) avaluar la interacció aigua-roca) o 4) determinar mescles entre diferents masses (Albarède i Michard, 1987; Blum *et al.*, 1984; Collerson *et al.*, 1988; Krishnaswami *et al.*, 1992; entre d'altres).

L'estronci té quatre isòtops estables ( $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$  i  $^{88}\text{Sr}$ ) i un de radiogènic, el  $^{87}\text{Sr}$ , que prové de la desintegració del  $^{87}\text{Rb}$ . Així, el contingut en estronci pot provenir tant de la formació del mineral com de la desintegració del  $^{87}\text{Rb}$ , el qual té un període de semidesintegració notablement elevat, de 48.8 milions d'anys.

El paràmetre utilitzat en hidrogeologia és la relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  la qual, a diferència dels isòtops d'oxigen i deuteri, ve controlada per les interaccions de l'aigua amb la roca i no es veu interferida per variacions d'origen atmosfèric ni per processos de fraccionació, minimitzats pels elevats pesos atòmics de l'estronci. La relació isotòpica actual d'aquests isòtops en un mineral amb estronci és funció de: 1) la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  inicial, 2) de la relació  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  i 3) de l'edat del mineral.

Atès que el rubidi acostuma a substituir el potassi dels minerals, les roques riques en potassi tindran elevats continguts en  $^{87}\text{Rb}$  i  $^{87}\text{Sr}$ . També, cal tenir en compte que la semblança entre el radi atòmic del  $\text{Ca}^{2+}$  i l' $\text{Sr}^{2+}$  fa que aquest darrer el pugui substituir fàcilment. Conseqüentment, la relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en l'aigua dona informació sobre els orígens de l'estronci i l'existència dels processos de mescla d'aigües. Les diferències entre aquesta relació isotòpica en aigües de diferents conques s'atribueixen a diferents mineralogies travessades per les trajectòries

o a diferències entre les quantitats relatives d'estrónci provinents de la meteorització de cada un dels diferents minerals d'una mateixa associació. Aquesta última situació es pot assolir de diferents maneres:

- Atès que les aigües arriben a la saturació respecte els diferents minerals a diferents ritmes, canvis de composició hidroquímica progressius al llarg de la trajectòria aniran causant variacions en les velocitats de dissolució relatives i, finalment, en la quantitat d'estrónci derivada del mineral (Plummer *et al.*, 1999). Les diferències, per exemple, entre la  $p\text{CO}_2$  i l'acidesa de l'aigua afectaran als processos de dissolució i poden donar relacions  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  diferents a les esperades.
- El moviment relatiu de l'aigua a diferents escales, des del moviment intergranular al moviment a nivell de conca, també condiciona el contingut en estrónci. Per exemple, en aigües pràcticament immòbils, de llargs temps de residència tindran una relació isotòpica que reflectirà els minerals amb els que està en contacte, els quals poden ser minoritaris en el total de la roca (Bullen *et al.*, 1996).

Si bé atènyer l'equilibri respecte certs minerals amb estrónci requereix elevats temps de residència, l'aportació d'estrónci a l'aigua pot produir-se molt ràpidament (Bullen *et al.*, 1996). Com a norma general, els carbonats i les plagiòclasis contenen poc  $^{87}\text{Sr}$ , en tant que els feldspats potàssics i les miques contenen elevades quantitats d'aquest isòtop radiogènic i les hornblendes en presenten valors intermedis.

En els oceans actuals la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  és de 0.70916 (Faure, 1991), la qual és un valor intermedi entre el dels basalts oceànics, empobrits en  $^{87}\text{Sr}$  ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.703$ ), i les roques continentals riques en  $^{87}\text{Sr}$  (de 0.710 a 0.740). La relació isotòpica de l'estrónci dels carbonats al llarg del Fanerozoic i les seves variacions en l'aigua marina ha estat presentada per Veizer (1989).

### 5.3.2 PRESENTACIÓ DE LES DADES

### 5.3.2.1 El medi

La relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  és indicativa de les roques en contacte amb l'aigua, tal i com s'ha indicat en l'apartat precedent. Per procedir a la interpretació del contingut isotòpic de l'aigua és necessari partir d'algun valor de la relació en les roques de l'àrea de treball. Per al present estudi no s'han analitzat les relacions isotòpiques en els diferents tipus de roques aflorants però s'ha disposat de resultats d'altres treballs (Taula 5.9) ja que les granodiorites, tonalites i granits que configuren el sistema Mediterrani català comparteixen nombroses característiques físiques i químiques (del Moro i Enrique, 1996). En concret, s'han comparat les dades corresponents a les aigües subterrànies de la zona d'estudi amb:

- Les anàlisis realitzades al batòlit tardihercinià del massís del Montnegre, concretament en les tonalites biotítico-hornblèndiques i en les biotites, feldspats potàssics i plagiòclasis que les formen (del Moro i Enrique, 1996).
- Les dades procedents de la granodiorita biotítica de La Garriga-Samalús i de minerals precipitats en les seves fractures (Canals i Cardellach, 1996).
- La relació isotòpica a les barites i fluorites de la Cadena Costanera Catalana (Canals i Cardellach, 1993)

Taula 5.9 Relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en roques i minerals (extret de Canals i Cardellach, 1993 i 1996; del Moro i Enrique, 1996).

| Localitat                                     | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ |
|-----------------------------------------------|---------------------------------|
| Plagioclàsis de Montnegre                     | 0.71048                         |
| Granodiorita de La Garriga-Samalús            | 0.71068                         |
| Barita de Rigros (20 km al NW de Barcelona)   | 0.71240                         |
| Fluorita de Rigros (20 km al NW de Barcelona) | 0.71230                         |
| Calcita de la Garriga-Samalús                 | 0.71430                         |
| Tonalita de Montnegre                         | 0.71601                         |
| Fluorita de La Garriga-Samalús                | 0.71990                         |
| Feldspat Potàssic de Montnegre                | 0.72165                         |
| Biotita del massís del Montnegre              | 0.75059                         |

En la Taula 5.9 si bé s'hi ha introduït la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en certs minerals precipitats en fractures de determinats ambients cal tenir en compte que aquests responen a la circulació de fluids en diferents èpoques (bàsicament Juràssic-Triàssic) i estan relacionats amb fenòmens de caire més local i per tant variables espacialment. Per exemple, els minerals de la mina Berta presenten les relacions més radiogèniques de totes les mesurades en la Serralada Litoral Catalana (Canals i Cardellach, 1996).

### **5.3.2.2 Les aigües subterrànies**

La relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  permet discernir les mostres en funció de la formació hidrogeològica a la que pertanyen (Figura 5.21). Una anàlisi més detallada permet identificar procedències mitjançant influències de mineralogies que no es troben en l'aquífer mostrejat. L'ús dels isòtops d'estranci en la interpretació de les trajectòries en el medi es basa en tres suposicions:

- que l' $\text{Sr}^{2+}$  és alliberat congruentment durant la meteorització,
- que hi ha aportacions d' $\text{Sr}^{2+}$  per part de tots els minerals i
- que els minerals traça no silicatats dels granitoids no aporten quantitats significatives d' $\text{Sr}^{2+}$  durant la seva alteració

No obstant, experiments recents en laboratoris han mostrat evidències que l'estranci pot no ser alliberat congruentment des de les plagiòclasis (Brantley *et al*, 1998) o les biotites (Taylor *et al.*, 2000). En ambdós casos, l'estranci radiogènic va ser preferentment alliberat enfront l'estable. També, quan les plagiòclasis i biotites són els principals minerals meteoritzats altres factors com la temperatura poden tenir efectes significatius en els ritmes de meteorització dels dos minerals. En general, una disminució de la temperatura, de 34 a 5°C fa disminuir el ritme de meteorització de les plagiòclasis per una factor de 12 mentre que el de la biotita només es redueix a la meitat (White *et al.*, 1999). També cal tenir-hi en compte que la presència de calcita precipitada pot afectar a les interpretacions. Aquestes interferències no han pogut ésser identificades en el present treball. Les dades recollides en la zona d'estudi (Taula 5.10) es presenten amb 6 decimals

i l'error estàndard analític afecta als dos últims, de manera que els quatre primers dígits són sense error.

Taula 5.10 Relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  i contingut en  $\text{Sr}^{2+}$  de les mostres indicades. L'error estàndard afecta als dos últims dígits significatius de la relació isotòpica.

| <b>Mostra</b> | <b><math>^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}</math></b> | <b>Sr (mg/L)</b> | <b>Formació hidrogeològica</b> |
|---------------|---------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| SD-1          | 0.709747                                          | 0.526            | Al·luvial mig Ter              |
| GU-15         | 0.709553                                          | 0.667            | Al·luvial profund Ter          |
| SD-14         | 0.710953                                          | 0.427            | Al·luvial superficial Ter      |
| CS-105        | 0.710985                                          | 0.560            | Arcoses del neogen             |
| CS-117C       | 0.711012                                          | 0.310            | Arcoses del neogen             |
| FN-3          | 0.709388                                          | 0.757            | Calcàries eocèniques           |
| FR-60         | 0.710099                                          | 0.274            | Calcàries eocèniques           |
| FR-80         | 0.710245                                          | 0.211            | Calcàries eocèniques           |
| GI-104        | 0.710319                                          | 0.349            | Calcàries eocèniques           |
| PS-41         | 0.709555                                          | 0.425            | Calcàries eocèniques           |
| ST-80         | 0.710315                                          | 0.409            | Calcàries eocèniques           |
| BE-1          | 0.713320                                          | 10.640           | Font picant                    |
| CS-118        | 0.710947                                          | 0.515            | Granitoids                     |
| CS-80         | 0.713544                                          | 0.366            | Granodiorita                   |
| GI-85         | 0.712239                                          | 0.230            | Granodiorita Gavarres          |
| FR-81         | 0.714065                                          | 0.404            | Metasediments del Paleozoic    |

A la Figura 5.21 es representa la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de tots els pous mostrejats i la de les roques i minerals esmentats. S'hi ha considerat també la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de carbonats (Veizer, 1989) que reflecteixin la composició isotòpica del mar paleogen. S'hi observa que el valor més elevat correspon a FR81, la única mostra ubicada en els materials metamòrfics (al SE de la Bisbal), concretament en el conjunt lutític dels Àngels i el carbonàtic de Begur del cambroordovicà (Roqué, 1993). Els pous del massís en granodiorites tardihercinians (CS80 i GI85) mostren relacions isotòpiques lleugerament inferiors. Amb tot, les relacions isotòpiques més baixes es localitzen en les formacions hidrogeològiques de les conques circumdants. Concretament, les relacions menys radiogèniques es registren en la depressió del Baix Empordà, en les aigües de les formacions paleògenes i en les al·luvials quaternàries. Les mostres en materials arcòsics i les zones alterades dels granitoids del sòcol de la depressió de la Selva presenten valors intermedis (C118, CS117 i CS105).

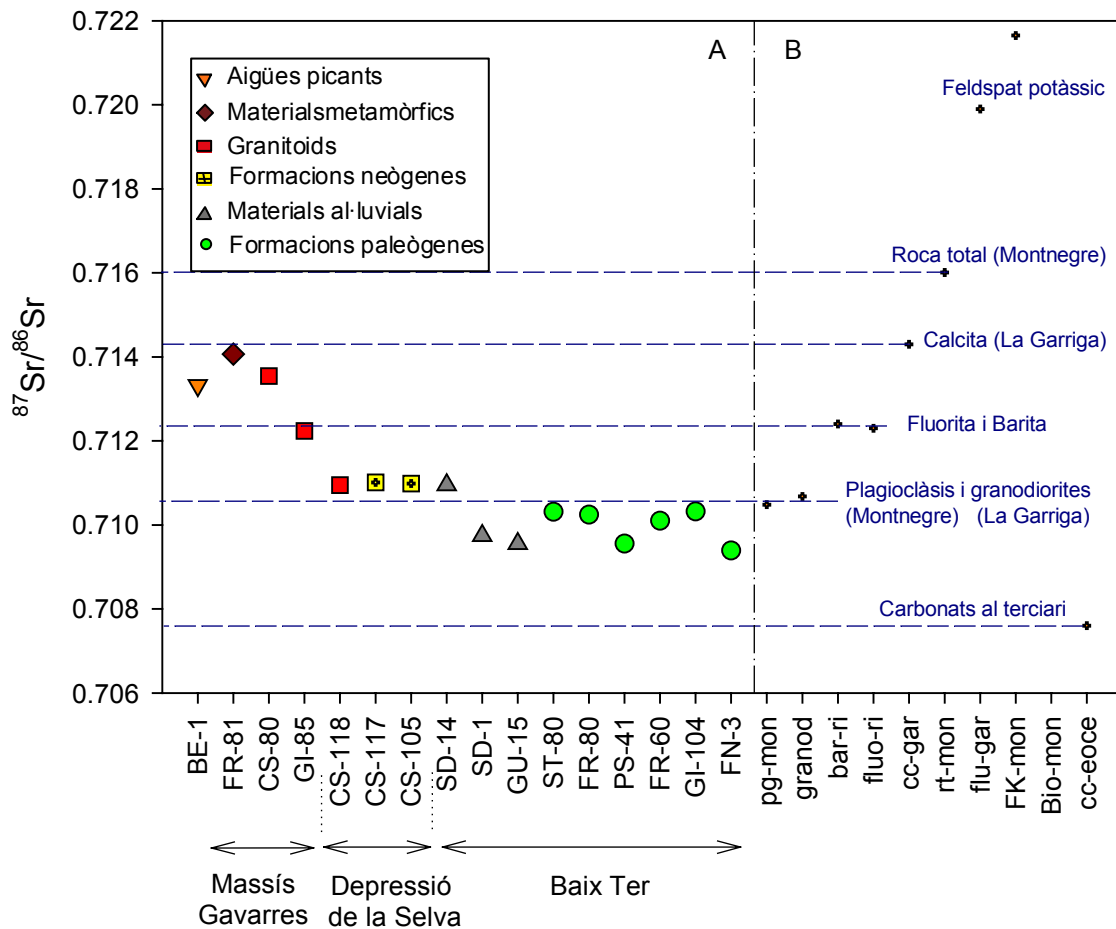


Figura 5.21 Relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en aigües de la zona d'estudi (A) i roques (B) de referència.

### 5.3.3 DISTRIBUCIÓ ESPACIAL

La representació gràfica de la distribució de la relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mostra una gradació des del massís de les Gavarres cap a les conques adjacents (Figura 5.22), fet que permet identificar una distribució en el mateix sentit que indicava la piezometria (Capítol 3).

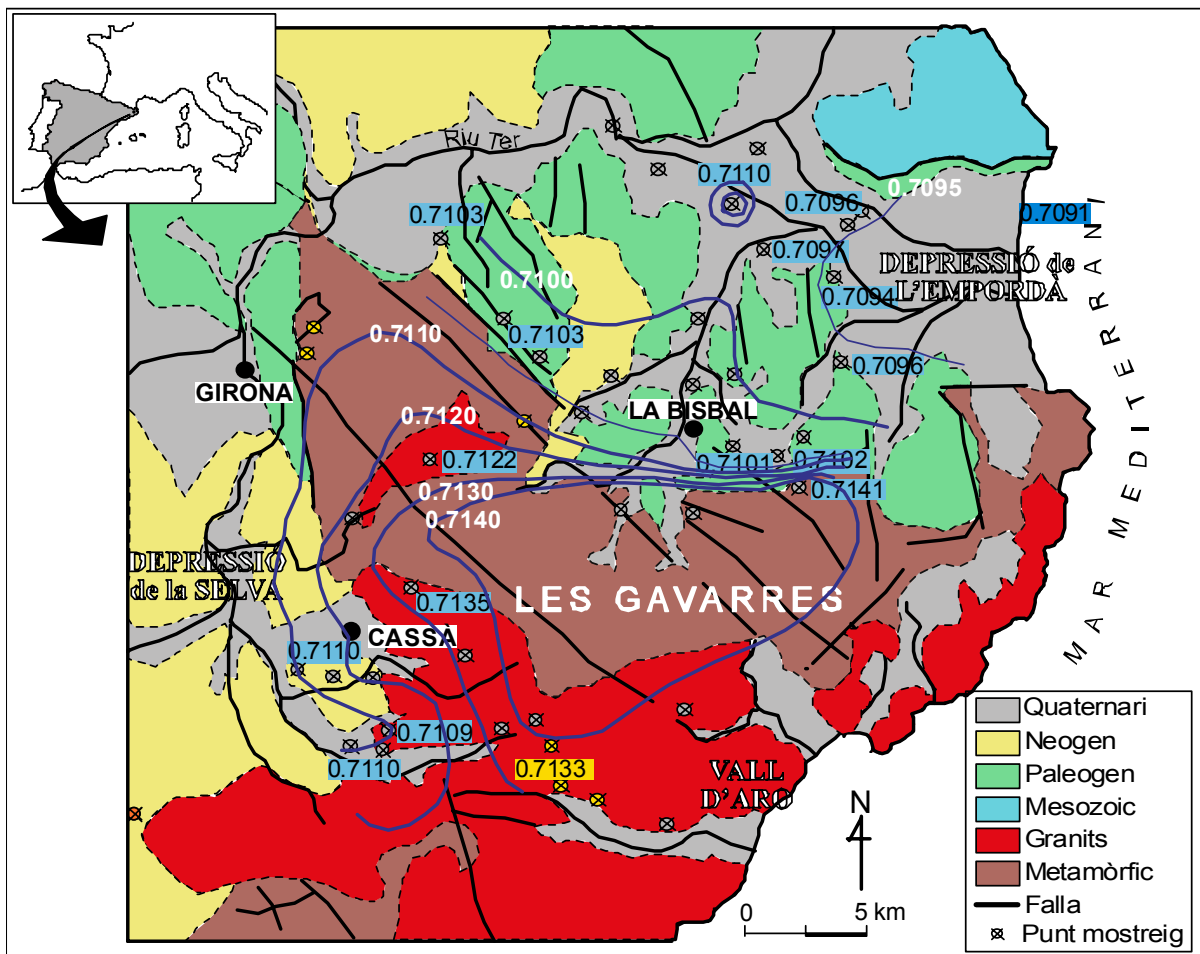


Figura 5.22 Distribució de la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en l'àmbit del massís de les Gavarres i zones adjacents. S'hi representen, en blau, les isolínies de la relació isotòpica.

- Els materials metamòrfics són els que deixen una empremta més radiogènica a les aigües (FR81), presentant una relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  més elevada que la detectada en les plagiòclasis del Montnegre (Figura 5.20) i lleugerament inferior a la de la roca total en aquell massís i propera a la de la calcita precipitada a les fractures de La Garriga-Samalús. S'atribueix doncs als materials del grup carbonàtic de Begur el domini del contingut isotòpic d'aquesta mostra i a elements traça presents.
- Les captacions en les granodiorites del massís (GI85 i CS80) presenten valors de la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  superiors als de les plagiòclasis i inferiors als de les biotites i feldspats potàssics, més propers al primer mineral senyalant per tant o una contribució d'Sr coherent amb l'abundància d'aquests minerals a la roca. Les biotites, per exemple, poden representar un 15% del total de la roca mentre que les plagiòclasis poden suposar quasi el 50% (Roqué, 1993).



- A la depressió de la Selva, tant en les formacions neògenes com en els granitoids del sòcol, (CS105, CS117 i CS118), les relacions  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  són del rang inferior a les de les granodiorites del massís si bé és també superior a la de les plagiòclasis del Montnegre. Aquestes formacions hidrogeològiques les constitueixen granitoids meteoritzats, les plagiòclasis hi estan molt alterades i es poden haver produït processos d'intercanvi catiònic, i per tant la seva contribució al contingut isotòpic pot ser major. Aquestes alteracions també es constaten en la part superior del sòcol i en algunes fractures importants.
- Els pous ubicats en les formacions sedimentàries del Baix Ter, tant paleògenes com al·luvials quaternàries són els que presenten la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  més baixa que s'atribueix a la mineralogia de l'aqüífer. L'elevat gradient de les isolínies de la relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en la Figura 5.22 reflecteixen el canvi de litologia: les roques carbonatades són normalment les de menor contingut en  $^{87}\text{Sr}$ . No obstant, de la Figura 5.21 s'extreu que les aigües tenen un contingut en aquest isòtop notablement major que els de les formacions on s'ubiquen. Aquest fet s'atribueix a que la trajectòria de flux d'aquestes aigües s'ha produït, en part, per materials més radiogènics, com els que configuren el massís de les Gavarres. El contingut en  $^{87}\text{Sr}$  disminueix en augmentar la distància al massís com a conseqüència d'una major interacció amb el medi i/o la contribució d'algun altre flux de diferent procedència tal i com indiquen les dotacions en isòtops estables i el contingut en triti.

### 5.3.4 DINÀMICA DEL SISTEMA DE FLUX

Per interpretar la distribució dels isòtops d'estronci s'ha tingut en compte la relació entre aquests isòtops i altres paràmetres. Concretament, s'ha definit tres grups en funció de la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  i el contingut en estronci (Figura 5.23), en oxígen-18 i en deuteri (Figura 5.24), en triti (Figura 5.25) i en elements majoritaris (Capítol 3). La manca d'una relació linear implica no obstant, l'existència de més de dos membres extrems (Négrel *et al.*, 2001) i caldrà considerar diferents sistemes de flux:

- Per una banda, es reconeixen les mostres corresponents a diferents pous ubicats en els granits i metasediments del massís de les Gavarres (Grup A). És en aquest grup on la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  és major i esdevé més radiogènica en augmentar la concentració en estronci, fins assolir el valor màxim en el pou FR81, tal i com s'ha descrit. Són a més, les

mostres amb dotacions isotòpiques de  $^{18}\text{O}$  i  $^2\text{D}$  més lleugeres i poc contingut en triti (a excepció del pou GI85). El fet que les mostres més radiogèniques en  $^{87}\text{Sr}$  presentin majors concentracions en Na, Sr, Cl i Mg s'atribueix a una interacció més llarga amb roques que contenen minerals amb relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  elevada.

- Per una altra banda, Grup B, es localitzen les mostres del vessant del Baix Ter:
  - Les corresponents a les formacions paleògenes presenten un baix contingut en estronci i una baixa relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .
  - Les aigües dels aquífers al·luvials, en canvi, tenen majors continguts en estronci, però una semblant relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

Mentre que a les formacions paleògenes els isòtops estables de l'aigua són semblants als del paleozoic del vessant sud de les Gavarres, (FR81) (Figura 5.24) les mostres de l'al·luvial a les que s'ha analitzat la relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  són més pesants en isòtops estables. Aquesta observació situa l'àrea de recàrrega de les formacions paleògenes a les Gavarres i suggereix una mescla entre aquesta mateixa procedència i una component de dotació isotòpica més pesada en les formacions al·luvials. Addicionalment, en aquestes mostres, el contingut en triti (Figura 5.25) indica que la component procedent de les Gavarres respon a temps de trànsit més elevats que en les formacions paleògenes com a conseqüència de l'establiment del flux a través de recorreguts més llargs. Els menors continguts en estronci en les aigües de les formacions sedimentàries paleògenes es relaciona amb aquests menors temps de residència i un intercanvi amb el  $\text{Ca}^{2+}$  de les roques. La relació isotòpica en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  als materials quaternaris, no obstant, és similar al de les formacions paleògenes, fet pel qual no es constaten importants diferències en la relació isotòpica de les dues formacions. Tanmateix, la mostra SD14, no s'ajusta a les descripcions presentades i es relaciona amb fluxos induïts per influències antròpiques.

- Finalment, es diferencia un tercer grup (Grup C) constituït pels pous ubicats en la depressió de la Selva, tant en la zona d'alteració dels granits del sòcol com en la de les arcoses de reompliment. Aquests presenten una relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  molt constant independentment del contingut en estronci, tot i tractar-se de pous de profunditats molt diferents i pels quals s'ha descrit una dinàmica diferent (en concret, al pou CS105 se l'ha relacionat amb un sistema de flux més superficial i recent). El contingut en triti

disminueix en augmentar la profunditat de mostreig mentre que la concentració en sodi i clorur hi augmenta. La dotació isotòpica en oxigen-18, no obstant, és pesant i molt constant en totes les mostres analitzades. Tot això suggereix una dinàmica diferenciada a la depressió, relacionada amb sistemes de regionals i influenciada per característiques puntuals de caire local, en funció de la fractura a la que es relacionin i les mescles que s'hi produeixin.

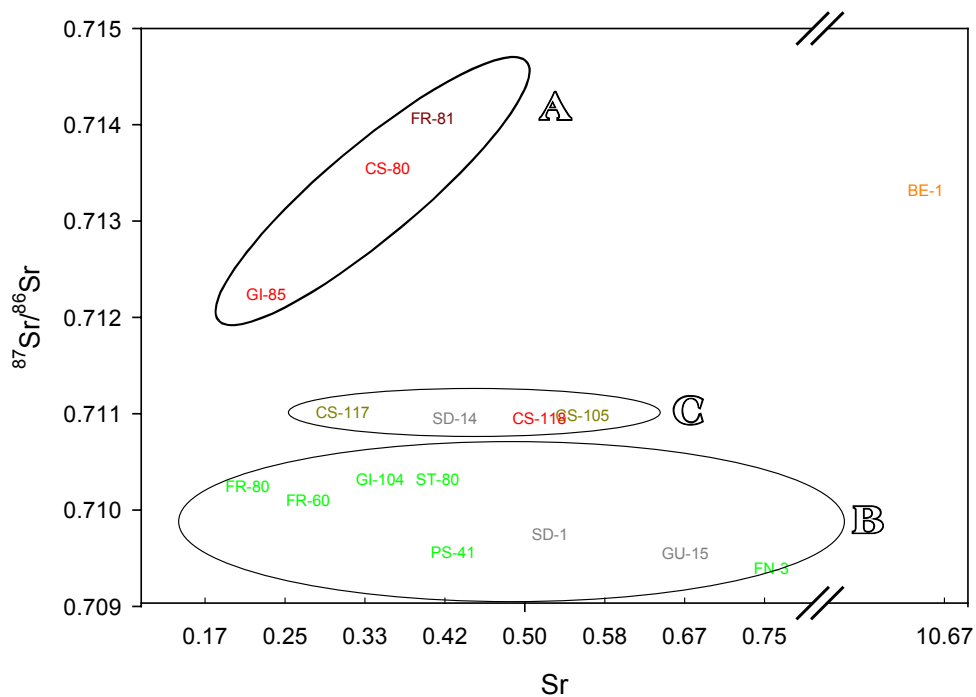


Figura 5.23 Relació entre la relació isotòpica i la concentració d'Sr.

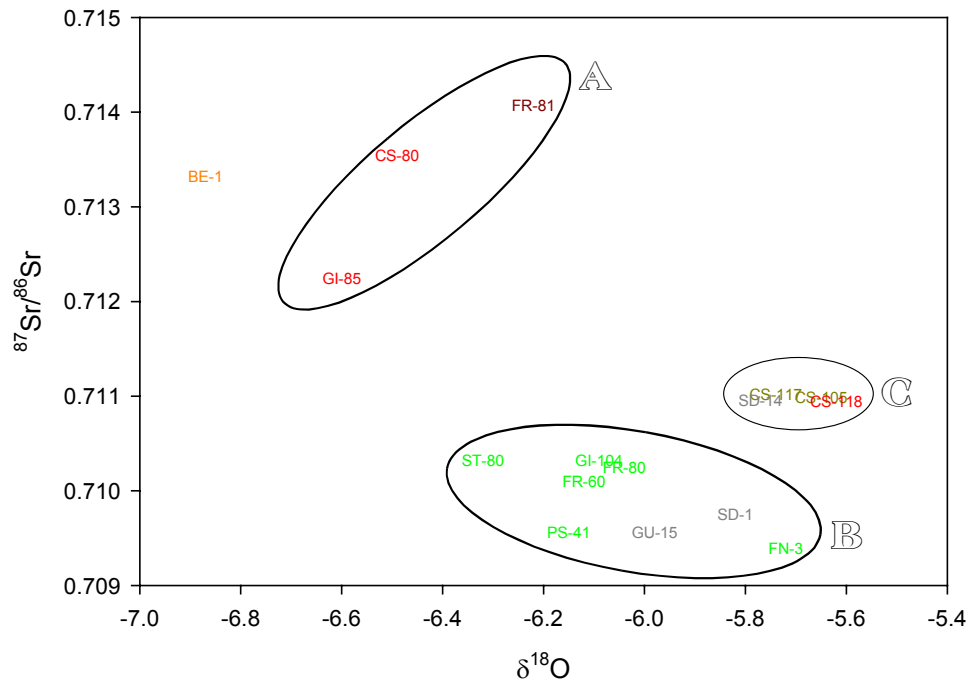


Figura 5.24 Relació entre el contingut isotòpic en  $^{18}\text{O}$  i en Sr.

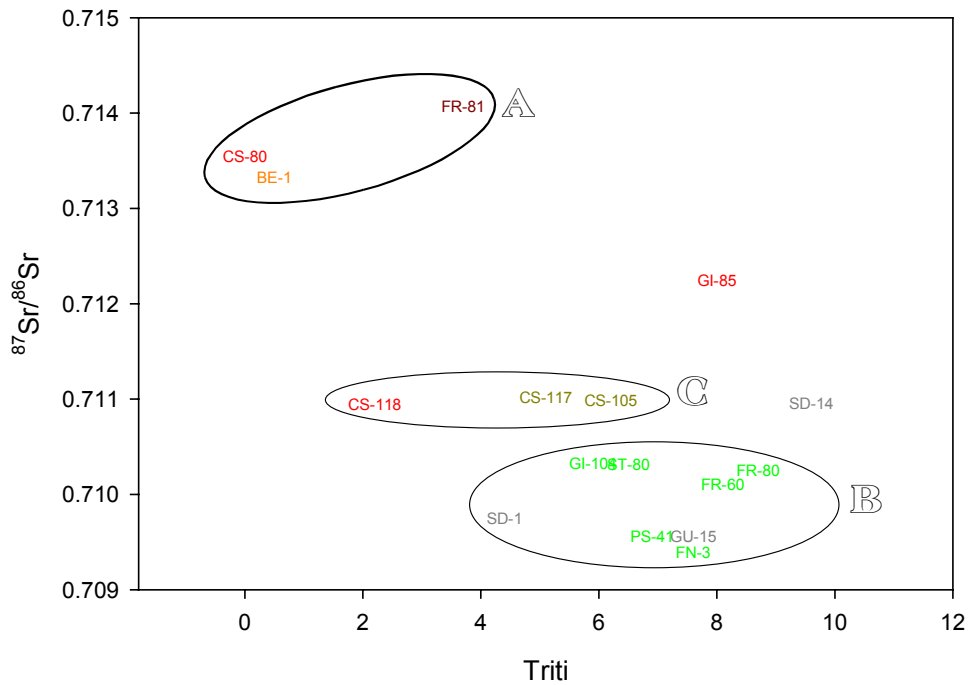


Figura 5.25 Relació entre el contingut en triti i la relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Amb els resultats presentats és possible definir l'existència, a grans trets, de diferents sistemes de flux:

1. Dins del massís de les Gavarres s'observen petites diferències (tant hidroquímiques com isotòpiques) que s'atribueixen a fluxos preferents a través de les fractures, les quals no mostren mescles entre elles a l'escala d'observació. Les característiques i dimensions de les fractures controlaran el flux des del massís.
2. La relació isotòpica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (i el  $^{18}\text{O}$ ) és molt semblant en pous de característiques químiques i isotòpiques molt diferents suggerint que malgrat l'edat i les peculiaritats locals, el flux dominant ha circulat per litologies semblants. Considerant la ubicació dels pous i les característiques isotòpiques de les roques del medi es descriuen, com a mínim, dos sistemes de flux (Figura 5.26) que es mesclen induïts pels elevats cabals d'extracció a que es troba sotmesa la depressió a l'estiu:
  - 2.1. un de profund, sense triti, amb relació  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  notablement radiogènica i composició química i isotòpica lleugera constant. Es considera de caire regional, amb majors temps de residència i que s'estableix en sentit vertical a la zona de descàrrega (Toth, 1995),
  - 2.2. i un altre de més superficial, amb triti, que arriba a la depressió a través de les fractures del massís o del front del mateix i que s'estableix horitzontalment a la depressió a través dels nivells més permeables.
3. Al sector del Baix Ter, en base al contingut en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  es reconeix una component del sistema de flux procedent de les Gavarres. Segons aquesta relació isotòpica i considerant una mescla entre una component originada en la precipitació i una procedent del massís, aquesta segona pot suposar més del 50% del flux total, fins al 90%. Altres components en aquesta àrea poden procedir d'una recàrrega directa de la precipitació o a un flux induït per elevats cabals d'extracció procedent de nivells superiors, ambdós casos presenten baixes relacions en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  i, per tant, coherents amb les observacions.

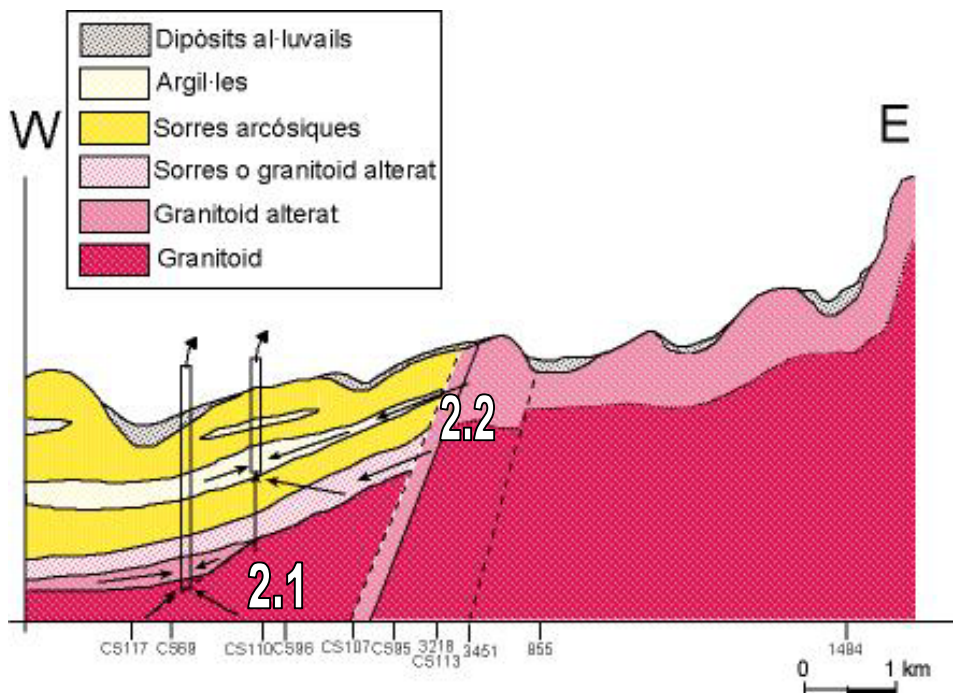


Figura 5.26 Tall geològic interpretatiu de la dinàmica hidrogeològica a la depressió de la Selva (informació geològica procedent de sondejos i captacions, Vilanova, 2001)

#### 5.4 AVALUACIÓ DEL PROCÉS D'INTRUSIÓ SALINA

Com s'ha indicat anteriorment, a la plana del Baix Ter, s'ha detectat la presència de determinats pous amb salinitat elevada a les proximitats de Gualta, a 5.3 km de la costa (Figura 5.27). Concretament es tracta del pou GU4, una de les captacions d'abastament de Mancomunitat de Palafrugell (entre 480 i 250 mg/L de clorur) i GU7 el qual ha hagut de deixar d'explotar-se per l'elevada salinitat (concentració en clorur entre 1610 i 2650 mg/L). L'origen de la salinitat en un pou no és únic, pot relacionar-se amb diferents orígens i processos de contaminació (Custodio i Llamas, 1983): amb la intrusió d'aigua marina recent, la formació de cons o doms d'aigua salada verticals, amb un procés de digitització en zones amb permeabilitats molt diferents, amb concentracions de sals prop de la superfície, per infiltració d'aigua des d'altres formacions... en la majoria dels casos es produeixen com a conseqüència de bombaments intensius o drenatges locals.

A continuació s'estudien diferents relacions hidroquímiques i isotòpiques per avaluar la procedència de la salinitat i es relacionen amb les propietats del medi per inferir sobre el procés

d'intrusió. Es pren especial èmfasi a aquesta problemàtica atesa la seva repercussió social doncs la mescla d'aigua dolça amb només un 6% d'aigua marina ja la fa pràcticament inútil per a qualsevol ús (Custodio, 1994).

El procés d'intrusió salina és habitual en les zones costaneres on elevats cabals d'extracció provoquen la incorporació a aqüífer de fluxos subterranis d'aigua salada procedent del litoral. A la zona de les captacions de la Mancomunitat de Palafrugell, les quals exploten l'aqüífer al·luvial profund, s'han constatat notables afeccions a la piezometria local (Annex 2) que es manifesten en les captacions properes. Amb la finalitat d'avaluar el paper de les extraccions, s'ha analitzat la distribució de la salinitat a la zona del Baix Ter. Concretament, s'han utilitzat les dades recollides en captacions inventariades en la present tesi (Annex 1) i dades de la xarxa de qualitat de l'ACA ([www.gencat.net/aca](http://www.gencat.net/aca)) (Annex 3 i Figura 5.27).

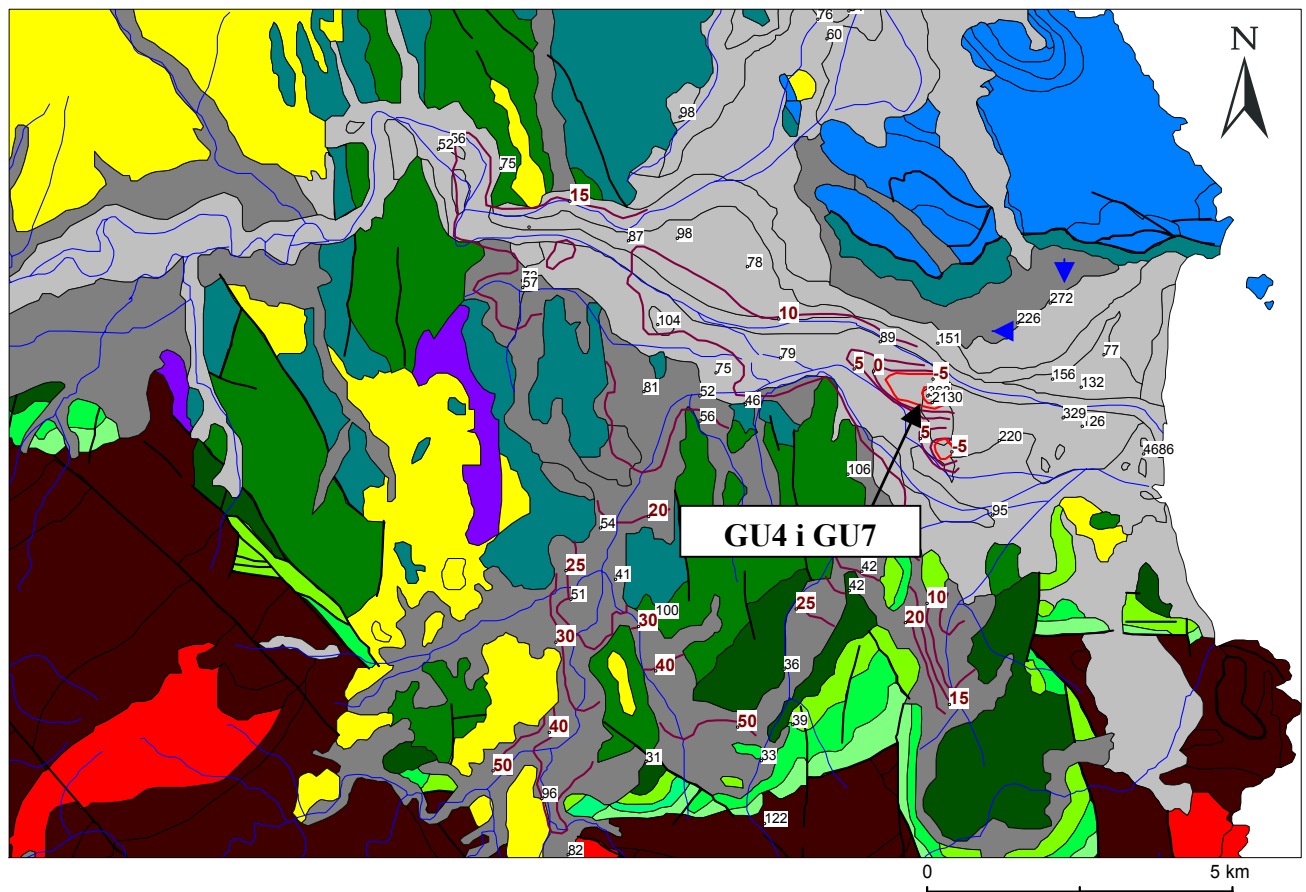


Figura 5.27 Concentracions de clorur en mg/L de diferents punts del Baix Ter (dades de l'ACA ([www.gencat.net/aca](http://www.gencat.net/aca)) i Annex 3) i cartografia piezomètrica corresponent al setembre de 1997 (en vermell isopieques corresponents a l'aqüífer inferior i triangles blaus els punts de mostreig d'aquest).

Com s'ha citat anteriorment i s'observa en la Figura 5.27, la cartografia piezomètrica indica importants afeccions a la distribució del nivell piezomètric a la zona dels pous on la concentració de clorur és elevada. No obstant, la distribució de la salinitat, no és homogènia arreu de la plana. Alguns pous propers a GU7, però en l'aquífer superior, presenten concentracions en clorur notablement menors i en l'àrea compresa entre GU7 i la desembocadura registra variables concentracions d'aquest anió si bé són, de mitjana, més elevades que a la resta de la plana i corresponen també a l'aquífer superior.

La salinitat pot tenir un origen natural o antropogènic. Determinades, activitats humanes produeixen fluids de baixa qualitat que poden entrar a aquífer (depuradores, reg, retorns de reg...). Aquesta possible influència humana s'ha tingut en compte en considerar la influència de l'aigua del riu Ter.

Per avaluar la intrusió salina es representen les concentracions de clorur i bromur atès que aquestes no estan directament controlades per l'equilibri amb cap espècie mineral, són estables en solució aquosa i necessiten concentracions molt elevades per precipitar (Figures 5.28 i 5.30). S'utilitza la relació molar Cl/Br per ressaltar diferències doncs l'origen dels dos ions a les aigües continentals és relacionable. Es comparen amb les concentracions mesurades al mar Mediterrani (Custodio i Llamas, 1983)

La relació Br/Cl s'ha utilitzat per diferenciar entre salinitat d'origen marí i no marí (Andreasen i Fleck, 1997). Normalment, les aigües continentals dolces mostren una relació entre 100 i 600 i el valor marí és de  $655 \pm 4$  (Custodio i Herrera, 2000). Els valors que s'allunyen d'aquest rang acostumen a indicar aportacions antropogèniques, a excepció de les salmorres (Kim *et al.*, 2003). Segons això, la Figura 5.28 mostra la presència de contaminació antròpica en el riu Ter i aquesta característica serà útil per diferenciar les aportacions dels diferents membres. S'observa que la composició de les dues mostres amb elevada salinitat, GU4 i GU7 queden encerclades pel triangle que descriuen la composició del riu Ter, del mar Mediterrani i GU15 (que es considera característica de l'aquífer al·luvial). La composició isotòpica (Figures 5.29 i 5.30) també mostra aquesta disposició. Conseqüentment, se suggereixen diferents línies de mescla i es constata que una simple mescla entre la composició del riu i la del mar no és suficient per explicar el quimisme de les mostres amb salinitat més elevada (GU4 i GU7) corroborant la dinàmica



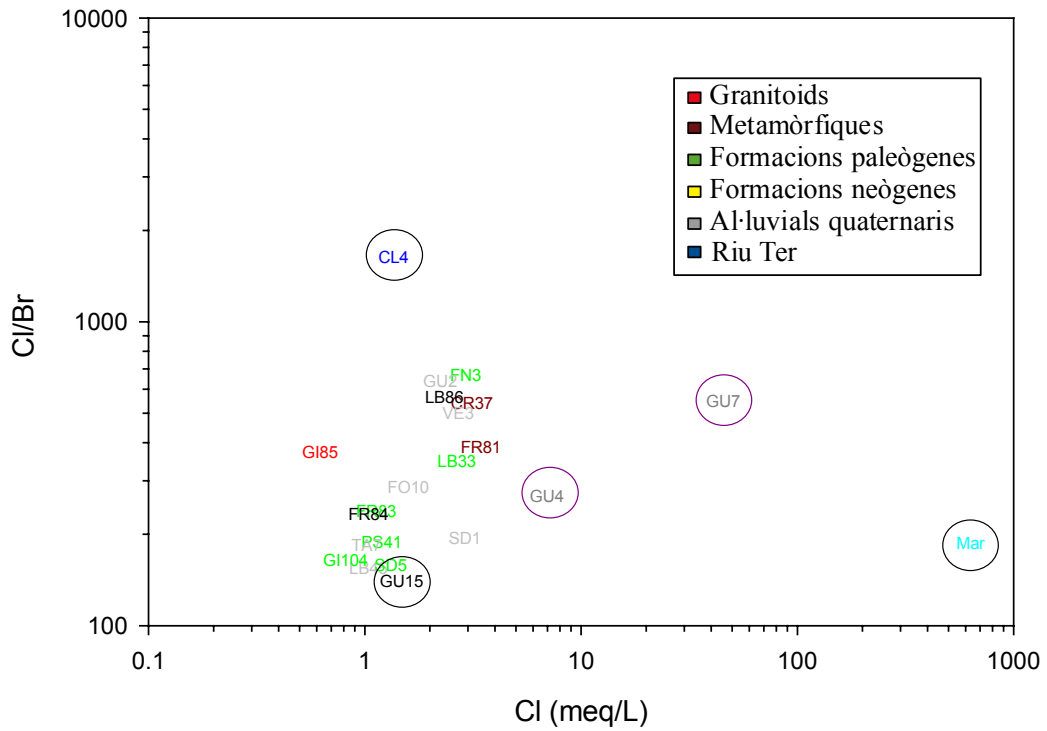


Figura 5.28. Relació molar Br/Cl en captacions del Baix Ter, el mateix riu Ter (CL4) i el mar Mediterrani (s'encerclen en negre aquests tres components extrems)

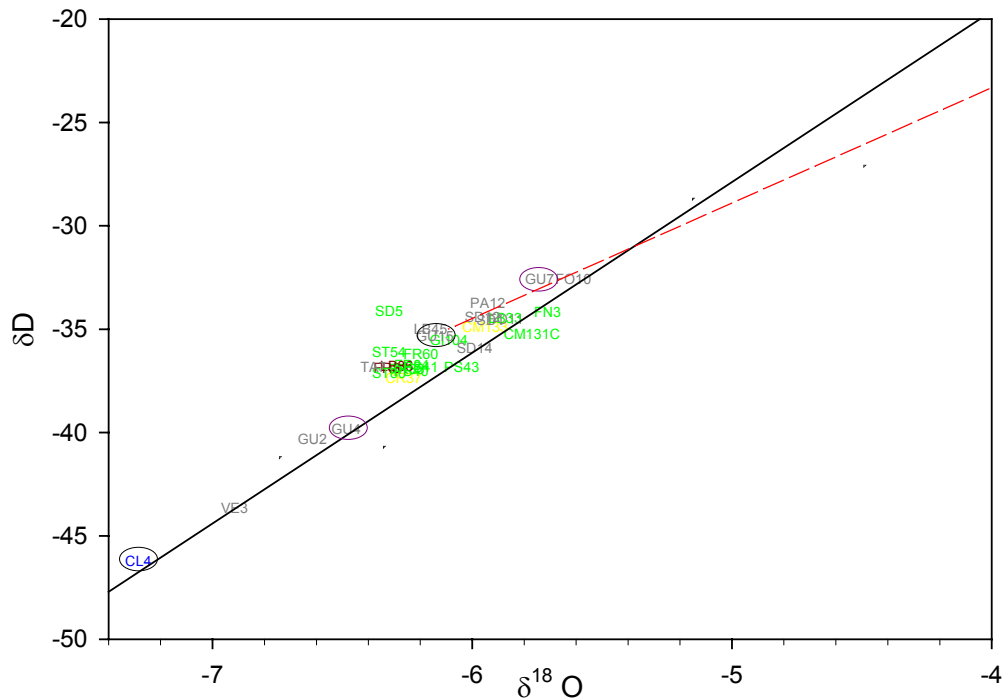


Figura 5.29 Relacions isotòpiques mitjanes en captacions del Baix Ter i en el riu Ter. La línia vermella mostra la mescla amb aigua marina (llegenda en Figura 5.28)

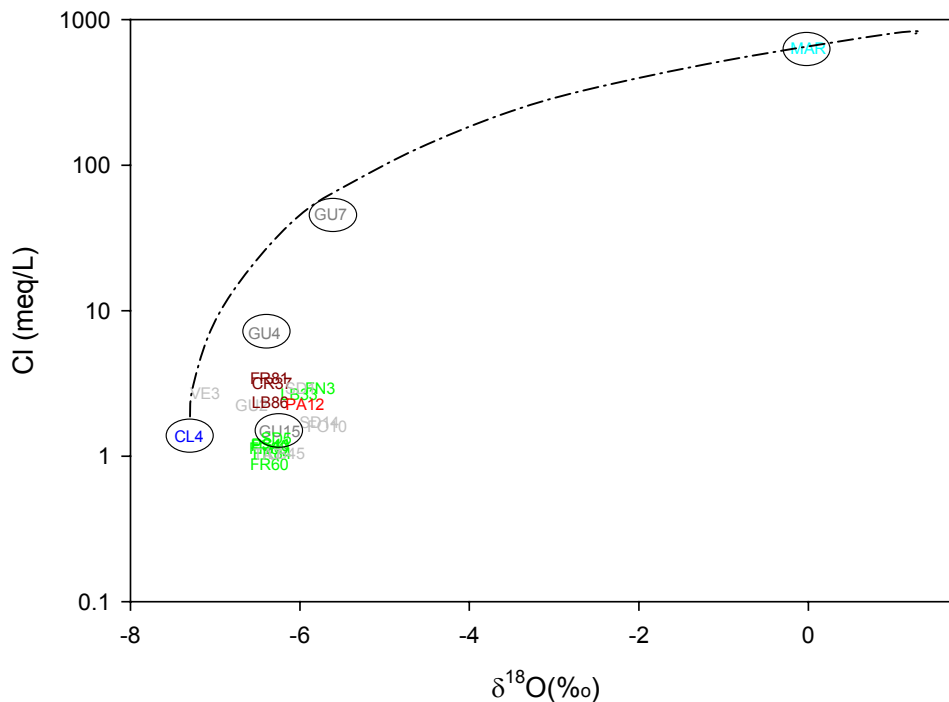


Figura 5.30. Contingut en clorurs vs. dotació isotòpica en oxigen-18 a les mostres de la zona, al riu Ter (CL4) i al mar Mediterrani (Ilegenda en Figura 5.28).

descrita en analitzar els isòtops estables (Apartat 5.1.2.1). Es descarta la recirculació d'aigua de reg atès que, en aquest cas, els isòtops mostrarien l'efecte de l'evaporació i se situarien segons una recta de pendent menor. Tampoc es considera la presència de salinitats residuals doncs aquestes acostumen a caracteritzar-se per composicions isotòpiques enriquides especialment en deuteri (Frape i Fritz, 1982).

En síntesi, les tres components identificades, el riu Ter, el mar Mediterrani i les formacions paleògenes (GU15) es mesclen en diferents proporcions en les dues mostres considerades:

- GU7 mostra una composició que reflecteix, bàsicament, la mescla entre només dues components: el mar Mediterrani i el riu Ter. Aquesta captació es troba ubicada dins del radi d'influència del con de bombament generat per GU4, concretament en la banda més propera a la costa. L'elevada salinitat indica la importància de la component marina i es constata la influència del con de depressió.
- GU4 respon a una mescla de tres components, el riu Ter, el mar Mediterrani i l'aquífer.

El fet que dues captacions tan properes mostrin diferent participació salina i que aquesta component no mostri un augment gradual en direcció a la costa, s'atribueix a la formació de cons ascendents salins en les àrees més permeables els quals s'estableixen mitjançant fluxos verticals ascendents induïts. D'aquesta manera, la captació afectada pel dom generat per GU4 capta una major proporció d'aigua del con ascendent.

## 5.5 SÍNTESI

S'han estudiat les dotacions isotòpiques de l'aigua amb la finalitat de descriure la dinàmica hidrogeològica del sistema. Es realitza a continuació una síntesi mult isotòpica integrant les informacions aportades per les diferents tècniques descrites.

1) Per una banda, s'ha analitzat el contingut isotòpic de la precipitació:

- S'ha estimat diferents rectes meteòriques locals i s'ha observat un marcat caràcter estacional en el procés de recàrrega de les formacions hidrogeològiques del Baix Ter, de la Vall d'Aro i alguns dels pous més somers de la depressió de la Selva.
- Les precipitacions que majoritàriament contribueixen a la recàrrega són les que es produeixen durant els mesos hivernals, de procedència mediterrània.
- L'estacionalitat detectada és coherent amb la taxa de recàrrega estimada en capítols precedents la qual equival, aproximadament, a un 20% de la precipitació.

2) D'altra banda, les dades isotòpiques corroboren el sistema de flux divergent des del massís de les Gavarres observat amb la cartografia piezomètrica:

- Concretament, a la depressió del Baix Empordà s'han diferenciat diferents components en el flux:
  - o En base a la semblança en la dotació isotòpica, es considera que l'àrea de recàrrega dels aqüífers en formacions paleògenes es localitza clarament al massís de les Gavarres.

- o Els aquífers al·luvials reben una component de recàrrega procedent dels materials paleògens subjacents a través d'un flux vertical ascendent, afavorit per la sequera registrada els anys d'estudi.
  - o Localment, importants ritmes d'extracció produeixen cons de depressió que forcen la introducció d'aigua salina i incrementen fluxos verticals ascendents. Puntualment, també poden causar l'aportació d'aigua superficial procedent del riu Ter o canals de reg.
- En la zona de la depressió de la Selva s'interpreten els continguts isotòpics a partir de peculiaritats locals. En aquest sentit, s'atribueixen a la variabilitat geològica del medi local i a un flux preferent de caire regional a través de fractures (Figura 5.27). Concretament,:
  - o L'ajustament a una altra recta meteòrica desplaçada respecte la local, permet considerar l'existència d'una dinàmica de recàrrega diferent que no es concentra als períodes hivernals.
  - o A la depressió es reconeixen tres components de flux principals. Per una banda, la influència de la precipitació i aigües recents, sobretot en els pous del massís de les Gavarres i en els més somers de la depressió. Per una altra banda, a més profunditat se'n reconeix un de sentit horitzontal que prové del massís de les Gavarres i és, per tant, d'àmbit local. L'altra component identificada, de caire més profund i de sentit vertical ascendent, és afavorida pels elevats cabals d'extracció. Aquesta, presenta una composició isotòpica més lleugera i es relaciona amb un sistema de flux de caire regional amb una àrea de recàrrega ubicada a més alçada de la que assoleix el massís de les Gavarres, es proposa concretament, la Serralada Transversal i el massís de les Guillerries. S'hi consideren temps de residència elevats.
- Finalment, les aigües picants han sofert un empobriment en  $\delta^{18}\text{O}$  a causa del procés d'exsolució del  $\text{CO}_2$  i, a partir del contingut en deuteri, també s'apunta la participació d'una component en el flux procedent d'una àrea de recàrrega més elevada que el massís de les Gavarres i consegüentment, d'àmbit regional. En la font termal de la mina de

Caldes (CA1), a més d'aplicar-s'hi les mateixes consideracions que per les fonts fredes picants, el seu contingut isotòpic més pesat s'explica per un intercanvi, a elevades temperatures, amb l'oxigen-18 de les roques.

3) En base a les conclusions anteriors, el contingut en triti ha permès establir datacions pels diferents sistemes de flux. S'han diferenciar dos rangs de valors que es relacionen amb sistemes de flux a diferent escala:

- A la zona del massís, l'aigua que s'extreu en les captacions és bàsicament anterior al 1952 i per tant, es produeix a escala regional. També es calcula aquest temps de trànsit pel sistema de flux que alimenta els pous més profunds en el sòcol de la depressió de la Selva. El triti no permet acotar més el temps de trànsit ni, consegüentment, avaluar la possible relació, per exemple, d'aquest sistema amb un paleoclima.
- En els materials neògens que reomplen la depressió de la Selva, els diferents continguts en triti reflecteixen variables proporcions en la mescla del flux profund d'àmbit regional, de més de 50 anys, i un altre de més recent, de procedència local.
- Segons el contingut en triti als aqüífers paleògens de les Pregavarres, aquests indiquen una recàrrega aproximadament 20 anys enrera, però considerant la participació directa de la precipitació recent, s'estima que flux procedent del massís, i com a tal, de caire local, és d'infiltració anterior al 1980.
- Al Baix Ter, la component de flux local no relacionada amb les precipitacions recents presenta temps de residència majors que els observats en les formacions paleògenes. Aquesta procedeix de les Gavarres, a través de les fractures dels materials paleògens i amb llargs recorreguts.

4) Els isòtops d'estronci, finalment, per la seva banda, indiquen que:

- Les captacions en els materials endògens del massís presenten masses d'aigua sotmeses a llargs períodes d'interacció amb la roca a través de materials de els mateixes característiques on s'ubiquen actualment. Es relacionen amb un sistema de flux d'àmbit regional.

- A la depressió de la Selva es constaten variacions que s'atribueixen a peculiaritats locals i a la fractura per la es produeix el flux preferent, la qual controlarà les característiques d'aquest flux. No es produeix mescla, a escala de l'estudi, entre diferents fractures, però sí que es poden constatar evolucions geoquímiques a través d'una fractura i per tant relacions genètiques entre diferents pous. En concret a la depressió es diferencien dos sistemes de flux, un procedeix de fractures profundes, de sentit vertical ascendent i origen regional, afavorit per els elevats cabals d'extracció. L'altre és de sentit horitzontal procedent del massís i, per tant, àmbit local, a través de fractures més superficials o del front muntanyós.
- Al Baix Ter s'identifica una component del flux procedent de les Gavarres que pot suposar entre el 50 i el 90% del flux total. Afeccions puntuals per elevades extraccions són possibles, però sempre es detecta que part del recorregut procedeix del massís de les Gavarres.