

Risultati preliminari delle indagini isotopiche svolte sulle acque delle falde profonde della Bassa Pianura Friulana*

Grazia Martelli¹, Cristina Granati¹, Lorenzo Toscani², Paola Iacumin², Enrico Selmo²

¹ Università degli Studi di Udine – Dipartimento di Georisorse e Territorio – Via Cotonificio, 114 – 33100 Udine

² Università degli Studi di Parma – Dipartimento di Scienze della Terra – Viale Usberti, 157/A – 43100 Parma

Isotopic analyses in deep aquifers of Friuli Plain (NE Italy): preliminary results

ABSTRACT: The following paper reports the preliminary results of isotopic analyses that have been carried out on the basis of 55 water-wells of the alluvial Friuli Plain. Most wells are located in the Low Plain between the spring and the coast lines, where a multistrata aquifer system characterizes the underground environment. One well is located in the High Plain, bounded by the Tagliamento moraines to the N and the spring line to the S; it reaches the unconfined aquifer system continuously developing in the highly pervious alluvial sediments of the sector. Hydrogen and oxygen isotopic composition of the waters (sampled in April 2003 – April 2006 – July 2006 – October 2006 – March 2007) are shown and compared to the ones coming from 17 sampling points of surfacing spring waters and to the weighted mean composition of the precipitations registered in some stations of the area (Trieste, Basovizza, Udine and Rivo). The outcoming distribution of the above-mentioned isotopes related with the Northern Italy Meteoric Water Line (MWL_S) and the Global Meteoric Water Line (GMWL) supports the meteoric origin of the studied groundwaters. The involvement of precipitations occurring at higher altitude and/or at lower temperature in past ages is pointed out. Radiocarbon data, related to three water samples of the deepest Aquifer H (more than -300 m b.s.l.), are also reported and discussed.

Key terms: Alluvial plain, Deep confined aquifers, Oxygen and hydrogen isotopes, Radiocarbon.

Termini chiave: Pianura alluvionale, Acquiferi confinati profondi, Isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno, Radiocarbonio.

Riassunto

Vengono di seguito esposti i risultati preliminari di analisi isotopiche effettuate su campioni di acqua raccolti, nel corso di 5 campagne di misura condotte tra aprile 2003 e marzo 2007, in pozzi attingenti, a varie profondità, dal sistema acquifero confinato multifalda della Bassa Pianura Friulana (BPF) e dal sistema indifferenziato di tipo freatico dell'Alta Pianura Friulana (APF). Il confronto con dati analoghi di campioni prelevati in 17 polle di risorgiva, e con la composizione isotopica media pesata delle precipitazioni raccolte da 4 pluviometri regionali ha permesso non solo di evidenziare l'origine meteorica delle acque analizzate, ma anche di avanzare l'ipotesi, per i livelli più profondi, di potenziali apporti provenienti da quote prealpine/alpine o riferibili a condizioni climatiche più fredde rispetto alle attuali. Mescolamenti tra acque con diverso grado di evoluzione, ascrivibili al massimo glaciale wurmiano, al successivo periodo post-glaciale e all'inizio dell'Olocene, vengono ipotizzate sulla base dei risultati di datazioni mediante radiocarbonio di alcuni campioni di acqua prelevati nella Falda H più profonda (oltre -300 m s.l.m.).

Premesse

L'area interessata dallo studio è la porzione della bassa pianura friulana che si estende, in sinistra Tagliamento, su di una superficie di circa 800 km² compresa tra la fascia delle risorgive a N, il fiume Isonzo ad E ed il mare Adriatico a S.

La bassa pianura friulana è caratterizzata dalla presenza di depositi neogenici e quaternari prevalentemente clastici, aventi uno spessore che localmente supera 1000 m; tali sedimenti ricoprono formazioni flyschoidi paleogeniche a loro volta sovrapposte ad una serie mesozoica carbonatica.

Durante il Pleistocene superiore le variazioni eustatiche produssero un abbassamento del livello marino globale di circa 120 m rispetto al livello attuale, con la conseguente formazione nell'Adriatico di una pianura emersa fino alla fossa del Medio Adriatico (Antonioli & Vai, 2004; Correggiari *et alii*, 1996); la risalita del livello del mare è avvenuta nell'arco di un tempo breve con velocità che hanno raggiunto alcuni metri al secolo.

Durante la fase cataglaciale di arretramento del ghiacciaio tilaventino (18.000-14.500 anni BP), la fine delle

* Il presente lavoro espone alcuni dei risultati ottenuti nell'ambito del PRIN 2005 "Gli acquiferi profondi dei grandi bacini sedimentari come risorse: acquitardi nella idrodinamica, generatrici di acque chimicamente e termicamente anomale, luogo idoneo per l'intrappolamento della CO₂ atmosferica".

condizioni di marcato alluvionamento e le successive azioni di reincisione, mobilitazione e rimaneggiamento dei vecchi depositi da parte dei corsi d'acqua hanno originato una fase di terrazzamento che non ha interessato in modo omogeneo tutta la pianura friulana. I primi accenni, infatti, appaiono più evidenti nella Bassa Pianura (settore più sensibile alle diminuzioni di portata essendo più lontano dalle aree sorgentizie), ove le correnti fluvio-glaciali hanno inciso i depositi argillosi e prodotto fasce di sedimenti ghiaiosi, a decorso parallelo, orientate prevalentemente in direzione NNE – SSW. Le alluvioni ghiaiose, sempre più frequentemente intercalate a sabbie e di spessore decrescente procedendo verso meridione, si trovano attualmente disposte entro solchi ed occupano zone visibilmente depresse rispetto ai banchi argillosi che le limitano lateralmente. Il sistema più esteso di terrazzi è quello situato in destra orografica del sistema fluviale Taglio – Stella (Boschian, 1993; Cavallin *et alii*, 1987), le cui scarpate delimitano aree a prevalente sedimentazione grossolana.

Nel postglaciale della Bassa Pianura friulana, ebbero inoltre particolare sviluppo i fenomeni di terrazzamento ad opera dei corsi di risorgiva (Feruglio, 1925; Fontana, 2006); tali terrazzi di fatto incidono attualmente sia i banchi argillosi che i depositi ghiaiosi attribuibili alle fasi di ritiro del ghiacciaio wurmiano.

I materiali di origine fluvio-glaciale ed alluvionale, depositi durante il Quaternario con spessori variabili tra i 350 e 475 m (Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, 2004), hanno dato origine a megaconoidi, sistemi sedimentari caratterizzati in pianta da una tipica morfologia a ventaglio ed internamente da una differenziazione dei sedimenti in senso sia longitudinale (a seguito della riduzione della capacità di trasporto dei corsi d'acqua conseguente alla diminuzione della pendenza topografica e all'aumento della sezione di deflusso allo sbocco in pianura delle valli alpine) che trasversale (imputabile alla variazione delle dinamiche evolutive dei corsi d'acqua). Tali differenziazioni consentono di suddividere la pianura friulana nei due domini, contraddistinti da diversa struttura idrogeologica ma contemporanea continuità idraulica, dell'*Alta pianura*, sede di un acquifero indifferenziato di tipo freatico, e della *Bassa pianura*, sede di un complesso acquifero multifalda. APF e BPF risultano separate dalla *fascia delle risorgive*, elemento strutturale riconosciuto in tutte le pianure alluvionali dell'alto Adriatico (Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP, 1998; Regione Lombardia & ENI-AGIP, 2002).

Una valutazione della ricarica del sistema acquifero della BPF (Martelli & Granati, 2007) ha stimato in circa 26 m³/s, pari a 820 milioni di m³/anno, la portata in ingresso, per deflusso sotterraneo, proveniente dal sistema freatico dell'APF.

Le falde del sistema confinato hanno direzione di deflusso preferenziale NNW-SSE, con l'eccezione della falda più profonda, probabilmente alimentata da circuiti

idrogeologici differenti rispetto ai circuiti di alimentazione delle sovrastanti falde confinate.

Le analisi isotopiche dell'idrogeno e dell'ossigeno

Allo scopo di approfondire le conoscenze relative alla definizione dei principali circuiti idrici sotterranei e all'individuazione delle aree di alimentazione delle falde più profonde, la cui rappresentazione piezometrica (Martelli & Granati, 2007) risulta inevitabilmente condizionata dal limitato numero di dati disponibili, sono stati analizzati i campioni di acque di 36 pozzi artesiani della BPF, attingenti dalle falde E-F-G-H localizzate a profondità superiori a -180 m s.l.m. (Tabella 1).

Tabella 1 – Sintesi dei principali dati (spessore, profondità) dei livelli acquiferi profondi del sistema confinato della Bassa pianura friulana.

Main depth and thickness data of the Low Plain deep confined aquifer levels.

FALDA	Spessore (m)		Profondità (- m s.l.m.)	
	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>
E	3,7	32,0	181,5	215,8
E ₁	4,0	15,0	181,5	190,9
E ₂	4,0	16,0	193,3	206,6
E ₃	3,7	13,2	211,2	215,8
F	1,5	40,3	219,5	261,8
F ₁	4,3	20,9	219,5	230,5
F ₂	1,5	11,0	232,2	241,1
F ₃	4,0	11,0	244,8	255,1
F ₄	7,7	11,0	258,2	261,8
G	9,0	12,7	267,3	276,4
H	2,7	62,0	303,3	553,0

Vengono di seguito esposti i risultati delle analisi della composizione isotopica dell'idrogeno (δD) e dell'ossigeno ($\delta^{18}O$) della molecola d'acqua dei citati campioni d'acqua di falda e di campioni prelevati in corrispondenza di 17 affioramenti di risorgiva, di 4 punti di misura interessanti i principali corsi d'acqua della pianura (Tagliamento, Isonzo, Torre, Natisone) e di un pozzo, profondo 100 m, attingente dalla falda freatica dell'Alta pianura in Comune di Campoformido (Figura 1). I dati derivanti dai 4 campionamenti (Aprile, Luglio, Ottobre 2006 e Marzo 2007) effettuati sui pozzi artesiani della Bassa pianura sono stati inoltre integrati con i risultati di analoghe misure eseguite nel 2003 su 20 pozzi appartenenti ad una rete sperimentale di monitoraggio quantitativo organizzata sul territorio della BPF (Martelli *et alii*, 2006). Un pozzo (1AQL) è risultato oggetto di campionamento in entrambe le campagne condotte.

Le composizioni degli isotopi stabili di idrogeno e ossigeno sono state analizzate presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Parma, mediante

l'utilizzo di uno spettrometro di massa Delta Plus Finnigan interfacciato ad una linea di equilibrizzazione automatica (Finnigan GLF 1086). Lo stesso campione è stato equilibrato prima con gas idrogeno e successivamente con gas CO₂ (entrambi ultrapuri) a 18°C (Epstein & Mayeda, 1953) per la misura rispettivamente della composizione dell'idrogeno (δD) e dell'ossigeno ($\delta^{18}O$). Gli errori di cui

risultano affetti i dati, riferiti allo standard V-SMOW, sono $\pm 1,0\%$ per δD e $\pm 0,05\%$ per $\delta^{18}O$.

I risultati ottenuti sono sintetizzati in Tabella 2 per quanto concerne i prelievi da falda ed in Tabella 3 per quanto riguarda i campioni di acqua superficiale e di risorgiva. Il codice letterale che completa l'identificativo numerico dei punti di prelievo si riferisce al Comune amministrativo all'interno del quale ciascun punto ricade.

Tabella 2 – Sintesi dei campionamenti isotopici effettuati su acque di falda dell'Alta e della Bassa Pianura friulana.
Isotopic data of High and Low Plain's groundwaters.

Pozzo n°	Aprile 2003			Aprile 2006		Luglio 2006		Ottobre 2006		Marzo 2007	
	$\delta^{18}O$	δD	T.U.	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD
Falda freatica APF											
37CMPF										-7.44	-48.41
Falda A											
84AQL	-7.95	-52.99									
85FMC	-7.38	-48.56									
152MZZ	-8.30	-56.12									
Falda B											
74SNG	-7.92	-53.87	13.1								
130TRZ	-7.26	-48.41									
150MZZ	-8.42	-56.35									
Falda C											
72TRZ	-7.56	-49.48									
96CRV	-7.34	-48.55									
131CRV	-7.58	-50.33									
146CMN	-9.22	-61.76									
151MZZ	-8.50	-58.91									
Falda D											
58AQL	-7.62	-49.12									
127TRE	-8.87	-59.83									
138BRT	-9.20	-62.60	11.8								
159RVG	-9.35	-63.21									
162VRM	-9.40	-66.10									
Falda E											
25PRC				-8.48	-56.88	-8.55	-56.37	-8.40	-57.68	-8.51	-56.66
29GRD						-10.14	-69.37	-10.17	-70.19	-9.24	-62.49
33GRD										-8.83	-59.71
34GRD										-8.56	-56.92
35GRD										-8.72	-59.03
36GRD										-8.23	-54.43
Falda F											
2AQL				-8.27	-54.98	-8.21	-55.32	-8.19	-54.39	-8.23	-55.51
9RNC				-8.50	-56.10			-8.38	-56.19	-8.40	-56.27
10AQL				-7.74	-51.68						
14CRL				-9.82	-67.12	-9.78	-67.64	-9.84	-68.67	-9.80	-67.69
26MZZ				-8.75	-58.94	-8.74	-58.41	-8.74	-58.89	-8.78	-58.15
27BRT						-8.85	-59.04	-8.83	-60.78	-8.89	-59.51
31GRD						-9.52	-63.84	-9.42	-65.12	-9.68	-66.46
111PCN	-8.84	-59.74									
126TRE	-9.16	-63.08									
Falda G											
4RNC				-8.38	-55.86	-8.38	-55.33	-8.22	-55.73		
6RNC				-8.69	-58.08	-8.61	-58.30	-8.60	-56.72	-8.66	-58.58
7RNC				-8.18	-54.12	-8.14	-52.44	-8.17	-53.28	-8.13	-54.06
23LTS				-9.48	-64.43			-9.52	-64.42	-9.41	-64.99
30GRD								-9.14	-63.27		
Falda H											
1AQL	-9.49	-64.01	1.1	-9.50	-65.93	-9.53	-63.33	-9.40	-63.58	-9.47	-64.51
3RNC				-8.44	-55.27	-8.34	-55.90	-8.33	-54.72	-8.31	-56.30
5RNC				-8.34	-54.83	-8.36	-55.39	-8.27	-54.49	-8.29	-56.04

8RNC				-8.34	-55.69	-8.29	-56.13	-8.21	-56.39	-8.31	-56.32
11PLZ				-8.78	-58.35	-8.71	-58.46	-8.72	-59.34	-8.76	-58.99
12PLZ				-8.33	-56.97	-8.28	-56.68	-8.35	-57.36	-8.26	-55.25
13CRL				-8.79	-60.07	-8.74	-58.95	-8.69	-60.01	-8.76	-59.87
15MRN				-9.98	-70.93	-9.89	-68.60	-9.83	-67.61	-9.89	-69.38
16MRN				-9.91	-67.52	-9.89	-68.12	-9.84	-67.80	-9.89	-68.87
17MRN				-8.93	-61.13	-8.86	-60.06	-8.88	-59.00	-8.84	-60.66
18MRN				-9.18	-61.68	-9.12	-60.85	-9.21	-60.60	-9.13	-63.09
19MRN				-9.05	-62.01	-8.99	-63.27	-9.00	-59.91		
20LTS				-8.21	-55.56	-8.21	-56.98	-8.23	-56.75	-8.28	-54.84
21LGN				-9.58	-66.01	-9.46	-65.45	-9.40	-65.56	-9.58	-64.19
22LTS				-9.61	-65.09	-8.27	-56.15	-8.12	-55.46		
24LTS				-9.68	-66.60	-9.63	-67.40	-9.60	-66.73	-9.72	-66.05
28PLZ						-9.26	-61.80	-9.09	-63.60	-8.24	-62.49
32LTS								-8.32	-57.64	-8.14	-56.09
124AQL	-10.34	-69.98	0.8								

Le composizioni isotopiche delle acque studiate sono in sostanziale accordo con i dati della letteratura (Dal Prà & Stella, 1978; Della Vedova *et alii*, 1987; Grassi, 1994).

La Tabella 2 evidenzia come i valori isotopici meno negativi appartengano al pozzo 130TRZ (Falda B), mentre i massimi negativi di $\delta^{18}\text{O}$ e δD caratterizzano rispettivamente i campioni relativi ai pozzi 124AQL e 15MRN (Falda H).

Tabella 3 – Sintesi dei campionamenti isotopici effettuati su acque superficiali e di risorgiva della Pianura friulana.

Isotopic data of Friuli Plain's superficial and spring waters.

Campione n°	Gennaio 2007		Luglio 2007	
	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD
Acque di risorgiva				
1CMN	-8,52	-56,52		
2CDR	-8,10	-53,78		
3CDR	-7,86	-51,55		
4BRT	-7,67	-50,90		
5BRT	-7,85	-51,85		
6TLM	-7,33	-49,25		
7TLM	-7,74	-52,00		
8TLM	-7,53	-50,42		
9RVG	-7,51	-50,47		
10PCN	-8,26	-54,87		
11CST	-7,80	-52,76		
12GNR	-6,85	-45,21		
13PRP	-7,16	-47,76		
14TRV	-6,91	-45,98		
15ALL	-6,66	-45,34		
16RDU	-6,95	-44,45		
17RDU	-6,86	-45,13		
Acque superficiali				
Tagliamento			-8.83	-60.72
Torre			-7.81	-51.05
Natisone			-7.36	-47.94
Isonzo			-8.41	-56.25

Ad eccezione delle Falde A-B-C-D, per le quali la disponibilità dei soli dati corrispondenti al campionamento eseguito nell'aprile 2003 non consente raffronti temporali, la maggioranza delle acque sotterranee non manifesta variazioni stagionali significative del contenuto di $\delta^{18}\text{O}$ e

δD , ad indicare, per i relativi acquiferi, condizioni di sviluppo spaziale, di permeabilità e di circolazione tali da consentire una omogeneizzazione dei contenuti isotopici degli *inputs* di alimentazione.

Le maggiori oscillazioni nel contenuto di $\delta^{18}\text{O}$ e δD (Tabella 4) sono riscontrabili in Falda H nel pozzo 22LTS, (aprile 2006 – luglio 2006). Analogamente, le minime variazioni di composizione isotopica caratterizzano rispettivamente il pozzo 26MZZ e 9RNC (Falda F). In media, le oscillazioni isotopiche manifestate dai campioni raccolti nel periodo considerato risultano più contenute nelle Falde F e G.

L'analisi delle mappe che illustrano la variabilità spaziale dei contenuti isotopici di $\delta^{18}\text{O}$, ricostruite con tecniche geostatistiche per ciascuno dei livelli acquiferi del sistema confinato della BPF, consente di evidenziare, per le Falde più superficiali A-B-C-D (Figura 2), una comune tendenza all'aumento della negatività dei campioni procedendo verso il settore nord-occidentale dell'area di studio. Tale settore risulta infatti interessato da meccanismi complessi di interazione tra la falda freatica dell'APF, il sistema acquifero di transizione localmente sovrapposto al sistema confinato multifalda della BPF (Martelli *et alii*, 2004) e il F.Tagliamento, convogliante in falda apporti idrici provenienti dal settore alpino carnico e giuliano.

Andamento inverso (Figura 3), con massimo negativo localizzato in corrispondenza del settore costiero orientale, è invece manifestato dai campioni appartenenti alla Falda E. Anche le acque delle Falde F-G risultano isotopicamente più leggere procedendo verso la costa: i massimi negativi sono localizzabili rispettivamente presso l'area litoranea maranese ed in sinistra idrografica del F.Tagliamento in Comune di Latisana. Sostanzialmente più articolata e complessa appare la distribuzione del medesimo isotopo stabile nei punti d'acqua associati alla Falda H più profonda. Oltre -180 m s.l.m., la maggior negatività evidenziata dalla composizione isotopica dei campioni idrici più meridionali può essere ricondotta a maggiori profondità di circolazione e a quote più elevate delle corrispondenti aree di alimentazione.



Figura 1 – Ubicazione dei punti di campionamento isotopico. *Isotopic sampling sites.*

Tabella 4 - Massime e minime oscillazioni nel contenuto di isotopi stabili di idrogeno e ossigeno deducibili dai campionamenti effettuati in corrispondenza delle falde più profonde della BPF.

Maximum seasonal variations of isotopic content in water samples referred to deep aquifers of BPF.

FALDA	$ \Delta(\delta^{18}\text{O})_{\text{max}} $ (‰)	Pozzo	$ \Delta(\delta^{18}\text{O})_{\text{min}} $ (‰)	Pozzo	$ \Delta(\delta\text{D})_{\text{max}} $ (‰)	Pozzo	$ \Delta(\delta\text{D})_{\text{min}} $ (‰)	Pozzo
E	0.93	29GRD	0.15	25PRC	7.70	29GRD	1.31	25PRC
F	0.26	31GRD	0.04	26MZZ	2.62	31GRD	0.17	9RNC
G	0.16	4RNC	0.05	7RNC	1.86	6RNC	0.53	4RNC
H	1.49	22LTS	0.06	19MRN	9.63	22LTS	0.70	8RNC

Una analoga ricostruzione cartografica, condotta per le acque sorgive a partire dai dati isotopici di Tabella 3, evidenzia una variazione spaziale di $\delta^{18}\text{O}$ conforme al comportamento manifestato dalle acque delle falde confinate più superficiali, con massimo negativo associato al settore più occidentale prossimo al F. Tagliamento (Figura 4). Il campione isotopicamente più negativo si riferisce infatti al sito ICMN, mentre i minimi negativi di $\delta^{18}\text{O}$ e δD

caratterizzano rispettivamente i campioni relativi ai siti 15ALL e 16RDU. Anche i contenuti isotopici delle acque superficiali raccolte presso i principali corsi d'acqua del settore (Tabella 3) non si discostano dalla tendenza ad una minore negatività del settore orientale (Natisone) rispetto a quello occidentale (Tagliamento), come presumibile conseguenza delle diverse quote di sviluppo dei bacini montani di tali corsi d'acqua.

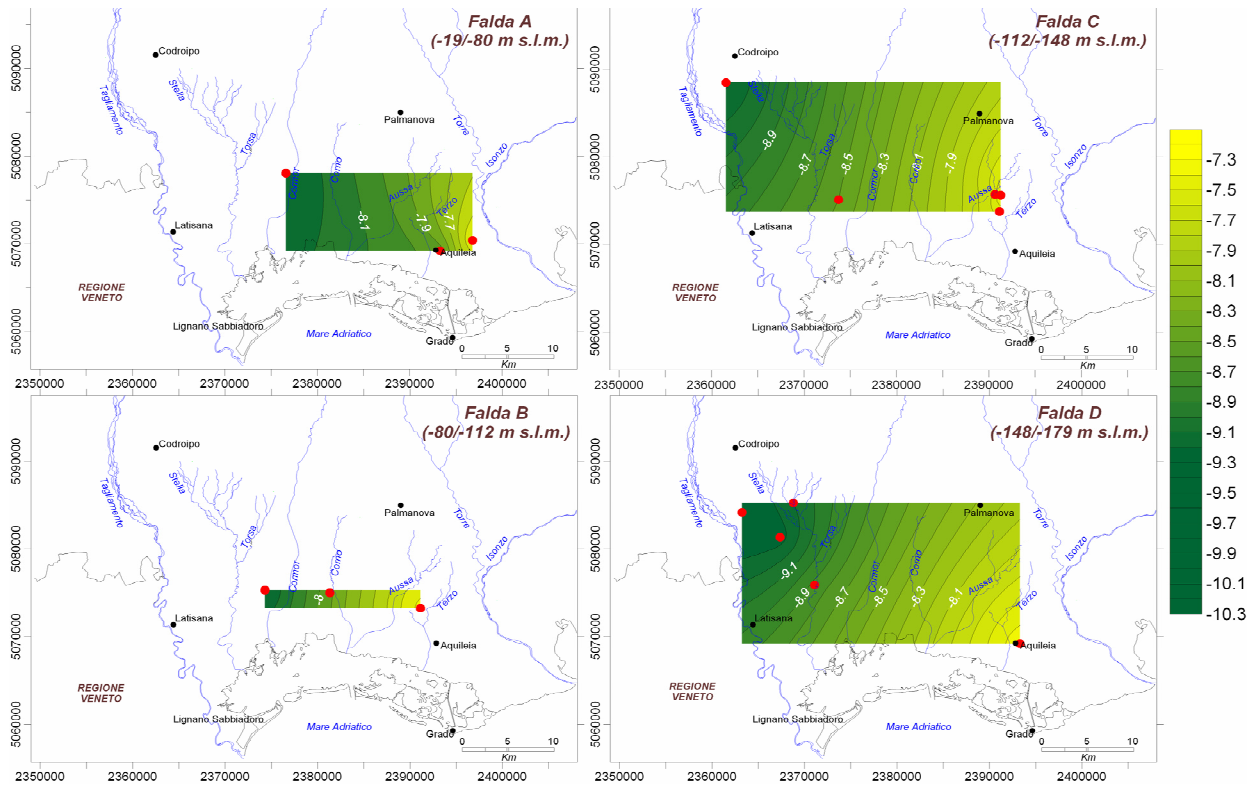


Figura 2 – Variabilità spaziale del contenuto di $\delta^{18}O$ manifestato dai campioni idrici in relazione alle Falde A-B-C-D della BPF. *Spatial variability of $\delta^{18}O$ content in Aquifers A-B-C-D.*

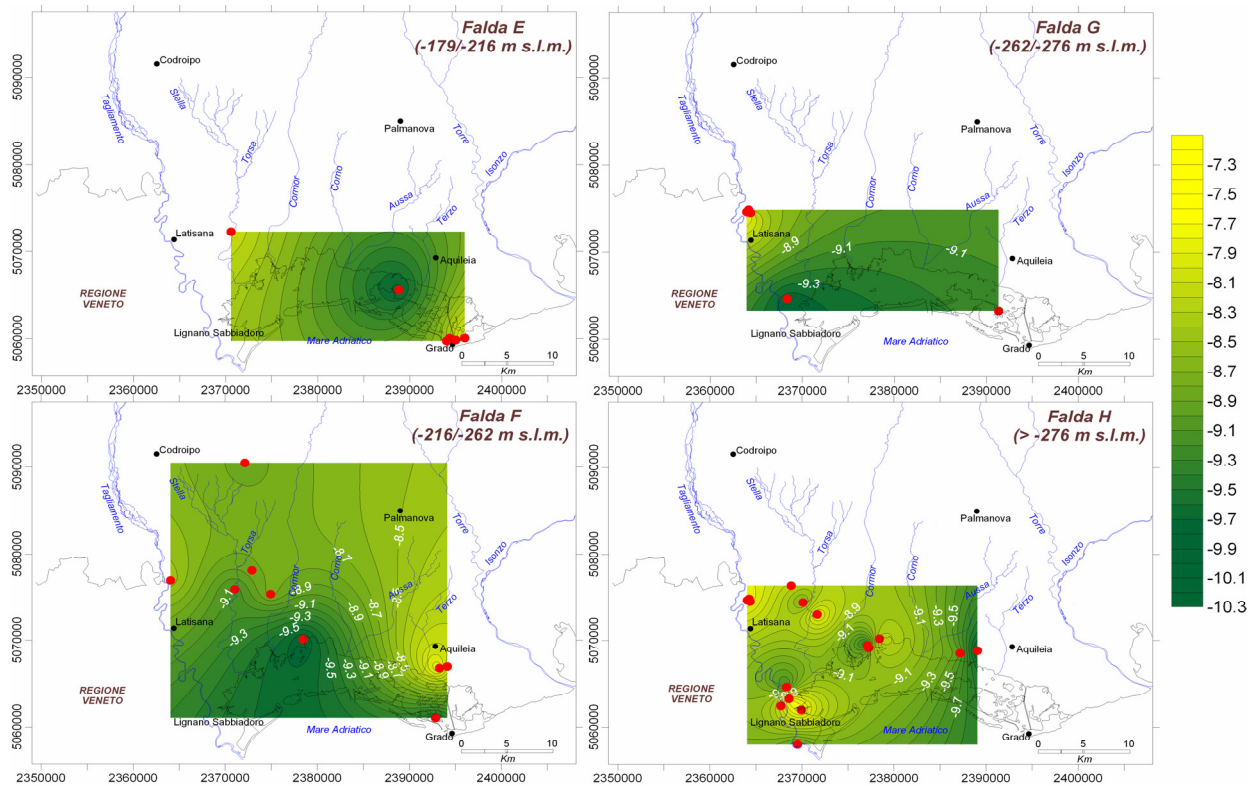


Figura 3 – Variabilità spaziale del contenuto di $\delta^{18}O$ manifestato dai campioni idrici in relazione alle Falde E-F-G-H della BPF. *Spatial variability of $\delta^{18}O$ content in Aquifers E-F-G-H.*

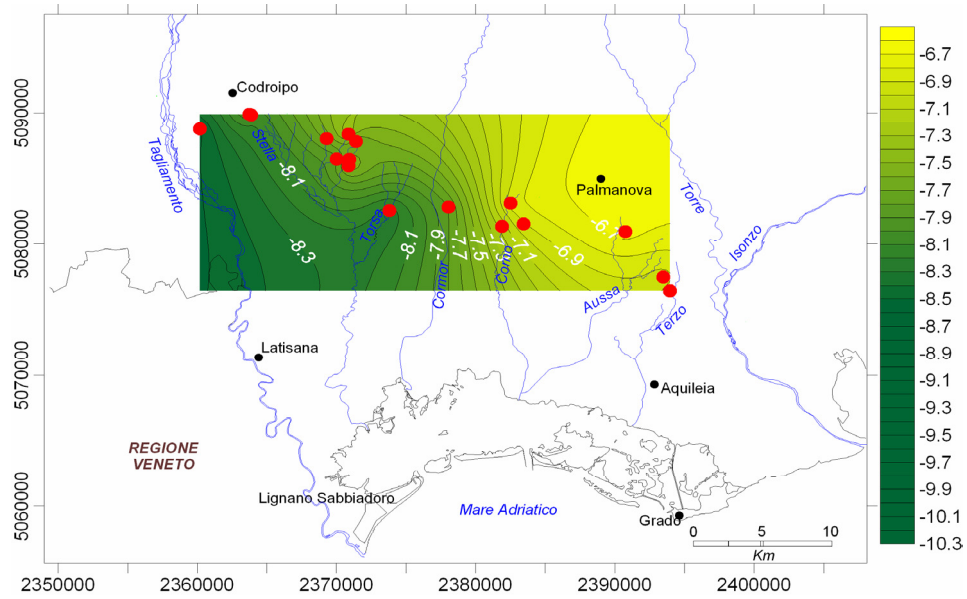
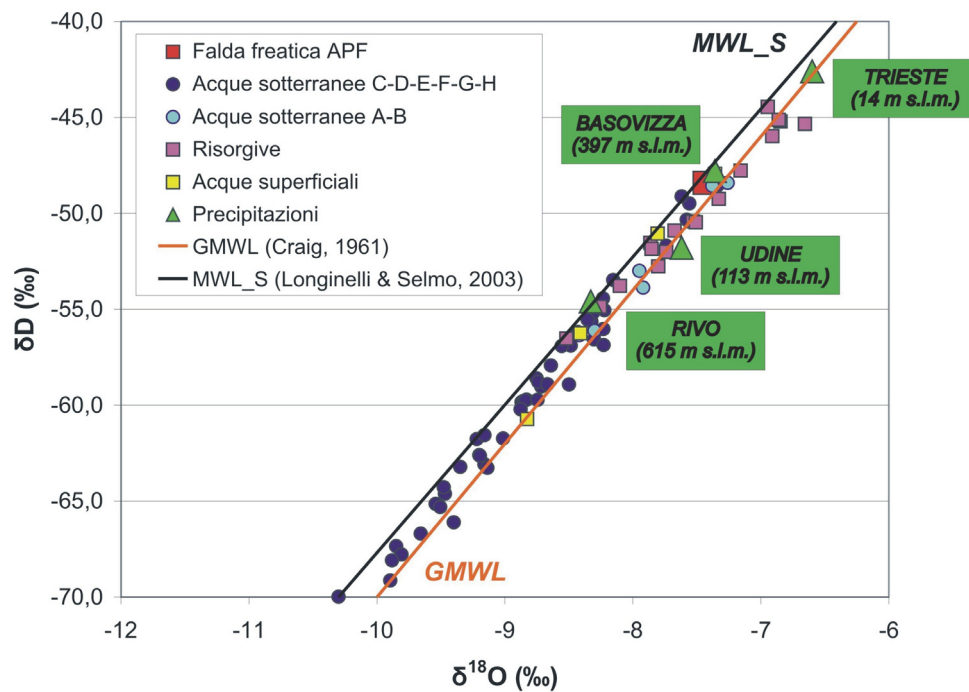


Figura 4 – Variabilità spaziale del contenuto di $\delta^{18}\text{O}$ manifestato dai campioni di acque di risorgiva.
Spatial variability of $\delta^{18}\text{O}$ content in spring water samples.



<i>Acque sotterranee:</i>	$\delta D = 7,71 \delta^{18}\text{O} + 8,23$	$(R^2 = 0,98)$
<i>Acque superficiali:</i>	$\delta D = 8,68 \delta^{18}\text{O} + 16,29$	$(R^2 = 0,99)$
<i>Risorgive:</i>	$\delta D = 6,69 \delta^{18}\text{O} + 0,27$	$(R^2 = 0,97)$
<i>Precipitazioni:</i>	$\delta D = 7,14 \delta^{18}\text{O} + 4,19$	$(R^2 = 0,96)$

Figura 5 – Relazione tra $\delta^{18}\text{O}$ e δD per acque sotterranee, superficiali, di risorgiva e di precipitazione.
Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD of groundwaters, surface waters, spring waters and precipitations.

La Figura 5 pone a diretto raffronto le caratteristiche isotopiche dei campioni idrici sotterranei, superficiali e di risorgiva raccolti con i dati isotopici medi pesati relativi alle precipitazioni monitorate, nel periodo 1994-99, dai pluviometri di Trieste, Basovizza, Udine e Rivo (Longinelli & Selmo, 2003; Longinelli *et alii*, 2006).

Per ciascun livello acquifero riconosciuto nel sottosuolo della BPF, la composizione isotopica di idrogeno e ossigeno della molecola d'acqua dei campioni analizzati evidenzia una distribuzione compresa tra la retta delle precipitazioni dell'Italia settentrionale (MWL_S: $\delta D = 7,7094 \delta^{18}O + 9,4034$; Longinelli & Selmo, 2003) e quella delle precipitazioni a livello globale (GMWL: $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$; Craig, 1961), a chiara indicazione dell'origine meteorica delle acque campionate.

Mentre una sostanziale similitudine caratterizza i rapporti isotopici di acque superficiali, freatiche di alta pianura, di risorgiva e di precipitazione (a conferma della presenza, all'interno dell'acquifero indifferenziato dell'APF, di acque sotterranee direttamente alimentate da apporti meteorici recenti e/o attuali e da dispersioni laterali e di sub-alveo dei maggiori corsi d'acqua del settore), le acque associate ai livelli acquiferi confinati più profondi della BPF presentano contenuti in isotopi stabili indicativi di circolazioni idriche sotterranee incompatibili con il contributo derivante dalle precipitazioni dirette sull'area in esame: ciò avvalorava l'ipotesi di potenziali apporti idrici provenienti da quote maggiori (associati a precipitazioni a temperature inferiori e/o allo scioglimento di neve o ghiaccio) o riferibili a condizioni climatiche fredde del passato geologico. In base ai gradienti isotopici verticali regionali calcolati (-0,3 ‰/100 m per $\delta^{18}O$; -1,53 ‰/100 m per δD), la semplice correlazione della composizione isotopica media pesata delle precipitazioni con l'altitudine individua, per livelli acquiferi progressivamente più profondi, quote medie delle aree di ricarica ascrivibili alla fascia prealpina e successivamente alpina, a confermare circolazioni idriche sotterranee a sviluppo regionale (Calore *et alii*, 1995; Grassi, 1994). In base alle caratteristiche orografiche del settore, i dati ottenuti suggeriscono mescolamenti tra acque di precipitazione di differenti quote e/o con diverso grado di evoluzione, soprattutto per quanto concerne le Falde E, F e G.

A riprova di tali considerazioni, determinazioni del contenuto di tritio, effettuate a campione per diversi livelli acquiferi nell'ambito della campagna di misura dell'aprile 2003 (Tabella 2), evidenziano come le acque erogate dai pozzi 74SNG (Falda B) e 138BRT (Falda D) presentino contenuti di tale radioisotopo dell'idrogeno di poco superiori a 10 TU (indici di apporti idrici "moderni" o di possibili mescolamenti tra acque di differente età); i campioni raccolti in corrispondenza dei pozzi 1AQL e 124AQL (Falda H) risultano invece caratterizzati da tenori di tritio pari rispettivamente a 0,8 e 1,1 TU, ad indicare acque più datate contraddistinte da prolungati tempi di residenza (superiori a 50 anni) nel sottosuolo. I valori di

tritio derivanti dal campionamento condotto sono affini alle limitate indicazioni di carattere isotopico derivabili dalla letteratura (Della Vedova *et alii*, 1987; Grassi, 1994).

L'assenza di *shift* isotopico nel $\delta^{18}O$ delle acque sotterranee di diversa profondità rispetto alle precipitazioni consente di escludere la presenza di significativi processi di evaporazione (che invece incidono in parte sulle acque di risorgiva) e di scambi isotopici con rocce serbatoio profonde ad alta temperatura; l'esistenza di mescolamenti con acque fossili e/o salamoie potrà essere meglio chiarita sulla base di analisi di Iodio e Boro delle quali si attendono i risultati.

Le analisi isotopiche del radiocarbonio

Il contenuto in ^{14}C e ^{13}C è stato valutato con riferimento ai campioni provenienti dai pozzi 15MRN-21LGN-24LTS, attingenti dal livello acquifero H più profondo (oltre -300 m s.l.m.) in corrispondenza del settore litoraneo centro-occidentale. La determinazione del contenuto in isotopi di carbonio di tali campioni sono state eseguite dall'equipe del laboratorio "Hydroisotop GmbH" (ref. Dr. Lorenz Eichinger), Schweitenkirchen (D).

I risultati delle analisi (Tabella 5) suggeriscono la presenza di acque evolute riferibili indicativamente al massimo glaciale wurmiano (22±2 kA BP; Antonioli & Vai, 2004). A differenza del campione 21LGN, apparentemente contraddistinto, sulla base delle caratteristiche chimiche (Martelli *et alii*, 2007), dalle migliori condizioni di purezza, le acque dei campioni 15MRN e 24LTS possono derivare dalla diluizione di acque riferibili al periodo glaciale da parte di acque più attuali o essere l'espressione di apporti idrici cronologicamente più recenti (periodo post-glaciale e inizio dell'Olocene), nelle ipotesi, rispettivamente, di corpi idrici profondi reciprocamente interagenti o contraddistinti da significative condizioni di confinamento relativo. I risultati prodotti dai modelli di calcolo utilizzati (Ingerson & Pearson, 1964; Mook, 1980) sottolineano ulteriormente la complessità dei caratteri idrogeologici e geochimici degli acquiferi profondi regionali, condizionati presumibilmente anche dalla presenza di CO_2 prodotta dalla degradazione di materia organica (come confermerebbe il segnale isotopico che contraddistingue i pozzi 24LTS e 15MRN).

Conclusioni

Le analisi isotopiche hanno contribuito ad avvalorare l'ipotesi della esistenza di schemi di circolazione profondi all'interno dei principali sistemi idrogeologici della Bassa Pianura Friulana, fornendo una prima indicazione sulla profondità, estensione e ricarica dei circuiti idrogeologici e sui tempi di residenza delle acque nel sottosuolo.

Lo studio evidenzia l'esigenza di ulteriori indagini su:

a) rapporti di connessione idraulica (presumibilmente attraverso orizzonti semi-confinanti) tra livelli acquiferi profondi della coltre quaternaria, con particolare riferimento a potenziali distinzioni esistenti nell'ambito della Falda H

(Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, 2007);

b) integrazione di fattori morfologici, fisiografici, climatici e pluviometrici locali nell'ambito dell'affinamento della stima delle quote medie di ricarica degli acquiferi;

c) analisi isotopiche con radiocarbonio sulle acque circolanti in livelli acquiferi confinati della BPF sovrastanti la Falda H.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano i revisori per la lettura critica del manoscritto e per il contributo al suo miglioramento.

Tabella 5 - Datazione con radiocarbonio delle acque dei campioni 15MRN-21LGN-24LTS appartenenti alla Falda H (profondità superiore a -300 m s.l.m.).

¹⁴C dating results concerning samples 15MRN-21LGN-24LTS related to Aquifer H, more than 300 meters deep below sea level.

Pozzi	Profondità (m dal pc)	Analisi			Età grezze (anni)	Età derivanti dall'applicazione di diversi modelli di correzione dell'attività iniziale A ₀ (anni)	
		A ¹⁴ C (pcm)	Errore	d ¹³ C (‰)		Ingerson & Pearson (1964)	Mook (1880)
15MRN	360	70	0.6	10,75	19373	14000	18000
21LGN	500	45	1.5	5,90	31553	23000	28000
24LTS	525	70	0.6	10,75	15629	10000	14000

Bibliografia

- Antonoli F., Vai G.B. (2004). *Climex Maps Italy*. Explanatory notes. 32nd International Geological Congress Florence Italy, Bologna, 80 pp.
- Boschian G. (1993). Paleoidrografia della bassa pianura friulana tra i fiumi Tagliamento e Stella. *Il Quaternario*, 6 (1): 49-58.
- Calore C., Della Vedova B., Grassi S., Marson I., Nicolich R., Squarci P. (1995). A hydrothermal system along the coastal area of Friuli-Venezia Giulia region (NE Italy). *Transactions of "Geothermal Resources Council - World Geothermal Congress"*, May 1995, Firenze, 2: 1269-1274.
- Cavallin A., Lauzi S., Marchetti M., Padovan N. (1987). Carta geomorfologica della Pianura Friulana ad est del F.Tagliamento e a sud dell'anfiteatro morenico. *Proceeding of "Riun.Ricercatori Geologia"*, Milano.
- Correggiari A., Roveri M., Trincardi F. (1996). Late Pleistocene and Holocene evolution of the North Adriatic Sea. *Il Quaternario*, 9 (2): 697-704.
- Craig H. (1961). Isotopic variation in meteoric waters. *Science*, 133: 1702-1703.
- Dal Prà A., Stella L. (1978). Primo contributo alla conoscenza del termalismo idrico del sottosuolo della Bassa Pianura Veneto-Friulana alle foci del fiume Tagliamento. *Quaderni IRSA*, 34 (16): 388-401.
- Della Vedova B., Longinelli A., Marson I., Palmieri F. (1987). Il termalismo artesiano della fascia litorale veneto-friulana: stato di avanzamento. *Atti VI Congr.Naz.Ord.Geol.*, VE: 391-395.
- Epstein S., Mayeda T. (1953). Variations of 18O/16O ratio in natural waters. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 4: 213-224.
- Feruglio E. (1925). La zona delle risorgive del basso Friuli fra il Tagliamento e la Torre. *Ann. Staz.Chim.Agr.Sperim.Udine*, ser.3, 1, 346 pp.
- Fontana A. (2006). Evoluzione geomorfologica della bassa pianura friulana e sue relazioni con le dinamiche insediative antiche. *Ed.Museo Friulano Storia Naturale, Comune di Udine*, 47, 287pp.
- Grassi S. (1994). Alcune osservazioni sulle caratteristiche geochemiche delle acque sotterranee della Bassa Pianura Friulana. *Atti Soc.Tosc.Sci.Nat., Memorie, Serie A*, 101: 1-15.
- Ingerson E., Pearson F.J. (1964). Estimation of age and rate of motion of groundwater by the 14C method. In: Miyake Y., Koyama T., "Recent researches in the field of hydrosphere, atmosphere and nuclear geochemistry". Tokyo, Maruzen: 263-283.
- Longinelli A., Selmo E. (2003). Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. *Journal of Hydrogeology*, 270: 75-88.
- Longinelli A., Anglesio B., Flora O., Iacumin P., Selmo E. (2006). Isotopic composition of precipitation in Northern Italy: reverse effect of anomalous climatic events. *Jour.Hidrology*, 329: 471-476.
- Martelli G., Granati C., Rossi S. (2004). The multistrata aquifer system in the Low Friuli Plain (NE Italy). In: *Proceedings of ISES 2004*, 8-10 Settembre 2004, Istanbul, Turkey: 267-274.
- Martelli G., Granati C., Roda C. (2006). Criteri per la realizzazione di una rete di monitoraggio quantitative e sperimentazione. In: APAT, "Progetto per il monitoraggio degli acquiferi della bassa pianura friulana in Provincia di Udine", in printing.
- Martelli G., Granati C. (2007). Valutazione della ricarica del sistema acquifero della bassa pianura friulana. *Giornale di Geologia Applicata*, 5: 89-114.
- Martelli G., Granati C., Dolza G. (2007). Chemical characterisation of the Friuli Plain deep aquifers. *Epitome*, 2, 179.
- Mook W.G. (1980). In Fritz P., Fontes J.Ch.: *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry: the terrestrial environment*. Elsevier Scientific Publishing Company, vol.1, New York.
- Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia (2004). *Carta del sottosuolo della Pianura Friulana*. Note illustrative, Tav.1 (Carta delle isopache del Quaternario), Tav.2 (Carta del tetto dei carbonati). A cura di: Nicolich R., Della Vedova B., Giustiniani M., Litografia Artistica Cartografica, Firenze.
- Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Centrale Ambiente e Lavori Pubblici (2007). *Le acque calde della Pianura Friulana*. Realizzazione della Carta Geologico-Tecnica della Risorsa Geotermica Regionale e definizione delle Linee Guida per il suo utilizzo. 27 pp.
- Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di: Di Dio G., S.EL.CA, 120 pp., Firenze.
- Regione Lombardia, ENI Divisione AGIP (2002). *Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia*. Geology of the Po plain aquifers in the Lombardy region. In: Carcano C., Piccin A., S.EL.CA., Firenze.