

LA CARTA IDROGEOLOGICA DEL MASSICCIO VULCANICO DELL'ETNA COME UTILE STRUMENTO PER LA GESTIONE RAZIONALE DELLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE

THE HYDROGEOLOGICAL MAP OF THE ETNA VOLCANIC MASSIF AS USEFUL TOOL FOR GROUNDWATER RESOURCES MANAGEMENT

VINCENZO FERRARA(*) & GIOVANNA PAPPALARDO(*)

(*) Università di Catania – Corso Italia 55 - 95129 Catania Italy - Dipartimento di Scienze Geologiche - e-mail: vferrara@unict.it

RIASSUNTO

Le ricerche condotte da diversi anni nell'area vulcanica dell'Etna, con verifiche periodiche dei livelli piezometrici, della produttività di pozzi e sorgenti e della qualità delle acque, indicano chiaramente che è in atto un progressivo degrado quantitativo e qualitativo delle importanti risorse idriche contenute nell'acquifero vulcanico. Ciò è il risultato dell'intensivo e incontrollato sfruttamento dell'acquifero, in assenza di criteri di pianificazione e di razionale gestione di tali risorse, che ha mutato in maniera significativa le quantità e qualità delle acque sotterranee.

Persistendo tali condizioni ed in previsione di un incremento della domanda d'acqua potabile, esiste il rischio reale di non poter disporre in futuro delle risorse necessarie per sopperire alle necessità di una numerosa popolazione.

Uno sfruttamento razionale delle risorse idriche dell'area etnea, da cui dipende l'approvvigionamento idropotabile di un esteso territorio densamente popolato della Sicilia orientale, necessita di adeguate conoscenze sul sistema acquifero del massiccio vulcanico che permettano di valutare le reali disponibilità di risorse sfruttabili senza indurre quelle modifiche nel regime idrodinamico e nelle caratteristiche idrochimiche dei corpi idrici.

Le conoscenze derivanti dalle ricerche condotte nell'arco di diversi anni sono state utilizzate per la redazione della "Carta idrogeologica del massiccio vulcanico dell'Etna", la quale costituisce un utile supporto per pianificare una razionale gestione delle risorse disponibili e un'adeguata protezione dal rischio di ulteriore degrado.

PAROLE CHIAVE: *M. Etna, acquifero vulcanico, gestione delle risorse idriche, qualità delle acque sotterranee.*

INTRODUZIONE

Il massiccio dell'Etna, localizzato sulla costa orientale della Sicilia, è un imponente strato-vulcano che costituisce il più importante sistema acquifero dell'isola e la principale fonte di risorse idriche di qualità pregiata, ampiamente utilizzate per scopi civili e agricoli.

Le ricerche condotte da diversi anni nell'area vulcanica (FERRARA, 1975; BARBAGALLO *et alii*, 1980; FERRARA & LI ROSI, 1985; FERRARA, 1990) indicano che è in atto un progressivo degrado

ABSTRACT

Several years of researches in the volcanic area of the Mount Etna consisting in the periodic verifications of the piezometric levels, the wells and springs yield and quality of water, clearly indicate the progressive quantitative and qualitative deterioration of the water resources of the volcanic aquifer. The absence of a rational management system of the water favoured that meaningful changed its quality.

Forecasting the drinkable water demand increment described conditions draw a scenario of imminent risk to dispose in future of the resources necessary in order to satisfy the population necessities.

The water resources of the Etna's area supply an extended densely populated territory of the Sicily. The aquifer system of the volcanic massif knowledge allow to estimate the real availabilities of exploitable resources and their suitable exploitation without inducing modifications in the hydrodynamic regimen and the hydro chemical characteristics of the water bodies.

The knowledge acquired in several years of research have been collected in the "Hydrogeological map of the Etna's volcanic massif", which constitutes a useful support for a rational management of the available resources and a suitable protection from further degradation risk.

KEY WORDS: *Mt. Etna, volcanic aquifer, groundwater resources, management, groundwater quality*

INTRODUCTION

The Etna massif, localized on the eastern coast of the Sicily, is a composed volcano that constitutes the more important aquifer system of the island and the main water resource of valuable quality for civil and agricultural uses. The research spanning over a period of 30 years in the volcanic area (FERRARA, 1975; BARBAGALLO *et alii*, 1980; FERRARA & LI ROSI, 1985; FERRARA, 1990), point out the progressive quantitative and qualitative degradation of the water resources,

quantitativo e qualitativo delle risorse idriche contenute nell'acquifero vulcanico, da imputare al loro sfruttamento intensivo che ha causato negli ultimi 40 anni un consistente abbassamento del livello delle falde, i cui effetti sono amplificati da ricorrenti periodi di insufficiente ricarica (FERRARA, 1991; 1999; FERRARA & PENNISI, 1995). Un periodo di siccità particolarmente prolungato per scarse precipitazioni meteoriche tra Ottobre 2001 e Dicembre 2003 ha prodotto una drastica riduzione della produttività dei pozzi e della portata delle sorgenti, con conseguente grave crisi dei sistemi di approvvigionamento idrico. Ciò ha determinato il razionamento dell'acqua disponibile nei settori civile e agricolo, con forti disagi per la popolazione e gravi danni per l'economia di vaste zone.

Una gestione sostenibile delle risorse di acque sotterranee dell'Etna, da cui dipende l'approvvigionamento idrico di un esteso territorio densamente popolato della Sicilia orientale, necessita di adeguate conoscenze sul sistema acquifero che permettano di valutare le reali disponibilità di risorse sfruttabili senza indurre quelle modifiche nel regime idrodinamico e nelle caratteristiche idrochimiche dei corpi idrici cui prima accennato.

Nel presente lavoro sono illustrati sinteticamente i principali aspetti idrogeologici derivanti dalle ricerche effettuate, utilizzati per la redazione della "Carta idrogeologica del massiccio vulcanico dell'Etna", alla scala 1:100.000 (FERRARA, 2001). Questa costituisce un utile supporto per pianificare le necessarie modifiche dell'attuale situazione dei prelievi, nell'ottica di un uso razionale delle risorse disponibili e di un'adeguata protezione dal rischio di ulteriore degrado.

ELEMENTI GENERALI

Il massiccio dell'Etna costituisce un rilievo isolato, delimitato a nord e ad ovest dalle valli dei fiumi Alcantara e Simeto che lo separano dalla limitrofa catena settentrionale, mentre a sud e ad est i limiti sono rappresentati rispettivamente dalla Piana di Catania e dalla costa ionica. L'area vulcanica costituisce pertanto un'unità territoriale del tutto tipica, che si differenzia dagli ambienti circostanti per caratteristiche morfologiche, geologiche e climatiche (FERRARA, 1975).

Il perimetro del territorio coperto dalle vulcaniti misura 180 km circa, 24 dei quali si sviluppano lungo la costa ionica, per una superficie complessiva di 1.100 km². Ai margini affiorano terreni sedimentari costituenti il basamento del vulcano, fatta eccezione per il lato orientale dove le vulcaniti sono a diretto contatto con il mare. Un elemento morfologico di notevole risalto è rappresentato dall'ampia depressione calderica della Valle del Bove, sul versante orientale del vulcano, con diametro di circa 5 km e quote del fondo comprese fra 1.800 m e 1.200 m, originata da fenomeni vulcano-tettonici precedentemente alla formazione dell'attuale apparato eruttivo denominato "Mongibello".

Sotto il profilo climatico, il massiccio vulcanico, che raggiunge i 3320 m di altitudine, presenta caratteristiche peculiari riguardo alle temperature ed alle precipitazioni meteoriche rispetto alle aree circostanti, non soltanto per i valori medi annui ma per la loro diversa dis-

consequent to their intensive exploitation. Overexploitation in the last 40 years caused a consisting lowering of the piezometric level, whose effects are amplify by recurrent periods of insufficient recharge (FERRARA, 1991; 1999; FERRARA & PENNISI, 1995).

A particularly extended dry period with scarce rainfall lasted from October 2001 to December 2003 producing a drastic reduction of wells yield, springs discharge and a serious crisis in the water supplying systems. These conditions determined the water rationing for civil and agricultural uses, causing strong uneasiness to the population and serious damages.

A rational management of the Etna water resources, on which water supplying of an extended densely populated territory of the eastern Sicily depends, needs of adapted knowledge on the aquifer system that they allow to estimate the real availabilities of exploitable resources without to induce those modifications in the hydrodynamic regimen and in the hydrochemical characteristics of the water bodies which before pointed out.

The paper synthetically describes the hydrogeological settings drawn in the "Hydrogeological map of Etna volcanic massif" at a scale of 1:100,000 (FERRARA, 2001). The map constitutes a useful support to plan the groundwater exploitation, a rational management of the available resources and a suitable protection from further degradation risk.

GENERAL ELEMENTS

Mount Etna is a isolated relief, northward and westward delimited by the Alcantara and Simeto river valleys that separates it from the neighbouring Northern Chain; southward and eastward it is respectively bounded by the Catania Plain and the Ionian coast. The volcanic area constitutes therefore a typical territorial unit differing from surrounding for morphologic, geologic and climatic characteristics (FERRARA, 1975).

Volcanic products cover a surface of 1,100 km² and a perimeter of about 180 km, 24 of which extended along the Ionian coastline. Along the margins outcrop the sedimentary terrains of the basement, with the exception of the easternmost side where volcanic rocks are in contact with the sea. A morphologic element of remarkable prominence on the eastern flank of the volcano, is the wide caldera depression of "Valle del Bove". Its mean diameter is about 6 km, with altitudes of the bottom between 1,800 and 1,200 m. Its origin should be connected to the violent explosive activity and tectonic collapse that preceded the actual volcano "Mongibello" formation.

The peculiar climatic characteristics of the massive volcanic, whose elevation is 3320 m, is represented by the annual mean values of rainfall and temperature respect the surroundings and their variable distribution as function of altitude and exposure.

Precipitations are concentrated in the autumn-winter and in the

tribuzione in relazione all'altimetria ed all'esposizione.

In linea generale, le precipitazioni sono concentrate nel periodo autunno-inverno e scarse nei mesi estivi, con lunghi periodi di siccità. I valori più alti si registrano generalmente nel mese di novembre, mentre i minimi si hanno sempre nel mese di luglio. Nel versante orientale, esposto al mare, si ha la maggiore concentrazione di precipitazioni a carattere piovoso, con valori che aumentano con l'altitudine sino a circa 2000 m s.l.m. (Fig. 1) (SERVIZIO IDROGRAFICO - SEZIONE DI PALERMO, 1959; CALOIERO, 1975).

Alle quote maggiori le precipitazioni sono nevose durante l'inverno e parte dell'autunno, con maggiore frequenza sul versante settentrionale dove il manto nevoso persiste maggiormente rispetto agli altri versanti per tutto il periodo invernale e talora fino a primavera inoltrata.

summery months with a long periods of drought. The higher rainfall values are generally recorded in November and the minimum in July. In the eastern sector of Mount Etna, exposed to the sea, is recordered the greater concentration of rain, whose values increases with the altitude until to approximately 2000 m (Fig. 1) (SERVIZIO IDROGRAFICO - SEZIONE DI PALERMO, 1959; CALOIERO, 1975).

At the highest altitude there are snow precipitations in winter and sometimes in autumn, its greater frequency is on the northern sector where snow persists until late spring,

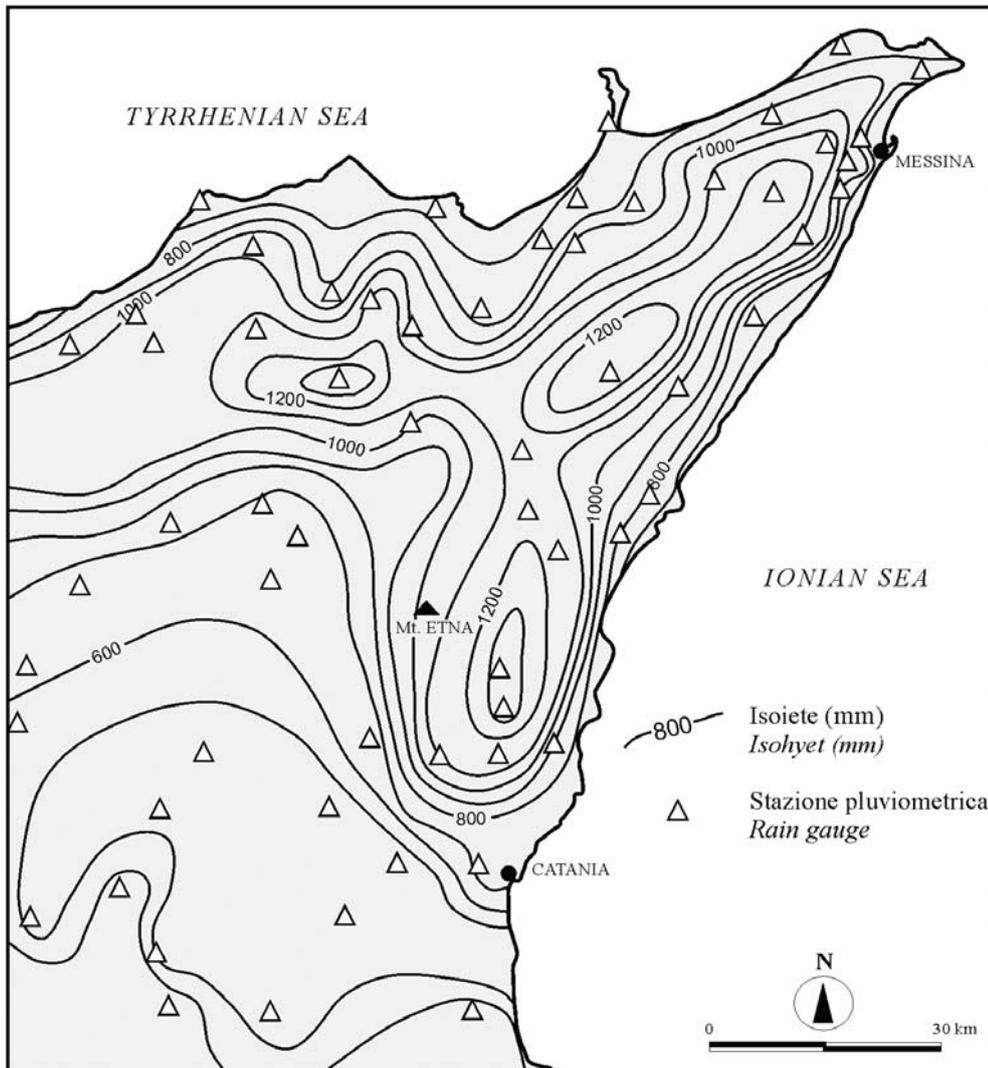


Fig. 1 - Precipitazioni medie annue (1921-1970)
 - Mean annual rainfall (1921-1970)

QUADRO GEOLOGICO

Sotto il profilo geologico l'edificio vulcanico dell'Etna è impostato sulle propaggini meridionali della catena Appenninico-Maghrebide che ricopre i terreni prevalentemente carbonatici dell'Avampese Ibleo immergenti verso Nord in relazione ad un importante sistema di faglie (LENTINI, 1982).

I più antichi prodotti eruttivi, costituiti in prevalenza da vulcaniti sub-marine ad affinità tholeiitica (pillows-lave, brecce e ialoclastiti) e datate circa 580-460 ka (CRISTOFOLINI, 1975; GILLOT *et alii.*, 1994; TANGUY *et alii.*, 1997), affiorano in lembi limitati sul fianco orientale dell'edificio vulcanico. A tali prodotti seguono cronologicamente vulcaniti subaeree costituite da colate laviche emesse da sistemi eruttivi lineari e datate circa 250-320 ka (GILLOT *et alii.*, 1994), affioranti lungo la valle del F. Simeto sul versante sud-occidentale (CHESTER & DUNCAN, 1982). In una fase successiva di evoluzione, l'attività vulcanica si è sviluppata attraverso centri eruttivi i cui prodotti vulcanici, datati circa 170-100 ka, costituiscono l'ossatura dell'edificio vulcanico. I relitti degli antichi apparati sono esposti lungo le pareti della Valle del Bove (KLERKX, 1968; MCGUIRE, 1982; GUEST *et alii.*, 1984).

L'attività eruttiva degli ultimi 15 ka ha formato il presente edificio (Mongibello Recente) (CHESTER *et al.*, 1985; KIEFFER & TANGUY, 1993) con produzione di colate laviche e di materiali piroclastici.

Le vulcaniti poggiano su terreni sedimentari di età diversa, costituiti da unità terziarie della Catena Appenninico-Maghrebide e da argille marine del Pleistocene medio-superiore, i quali affiorano alla periferia dell'edificio etneo, lungo le valli dei fiumi Simeto e Alcantara (AA. VV., 1979; LENTINI, 1982).

Il basso versante orientale del vulcano è attraversato da un sistema di faglie orientato NNW-SSE (LO GIUDICE *et alii.*, 1982; AZZARO, 1999), che rappresenta l'estremità settentrionale della Scarpata Ibleo-Maltese. Queste faglie normali controllano la morfologia del fianco orientale con presenza di alte scarpate ("Timpe") (FERRARA, 1975).

IDROGEOLOGIA

Complessi litologici e parametri idrogeologici

I prodotti dell'attività dei diversi centri eruttivi succedutisi nel tempo presentano una notevole variabilità litologica e strutturale che condiziona la permeabilità delle vulcaniti, determinando una circolazione idrica sotterranea notevolmente complessa (FERRARA, 1975). La loro distribuzione in affioramento è rappresentata dai seguenti complessi litologici (Fig. 2), caratterizzati da diverso tipo e grado di permeabilità:

- Depositi alluvionali
Ciottoli e ghiaie in matrice sabbioso-limosa. Permeabilità relativa da alta a media per porosità
- Colate laviche storiche e piroclastiti
Lave compatte e scoriacee, sabbie vulcaniche, lapilli e blocchi.
Permeabilità relativa elevata per fratturazione e per porosità
- Colate laviche recenti
Lave compatte e prodotti vulcanoclastici con coperture di altera-

GEOLOGICAL SETTING

Mt. Etna set up at the front of the Appennine-Maghrebide Chain that covers the carbonate succession of the Iblean Foreland dipping towards North in relation to an important system of NE-SW trending faults (LENTINI, 1982).

The oldest eruptive products, consisting of submarine volcanics with tholeiitic affinity (pillow lavas and hyaloclastites) dating about 600 ka (CRISTOFOLINI, 1975; GILLOT *et alii.*, 1994; TANGUY *et alii.*, 1997), outcrops in narrow strips along the eastern and western flanks of the volcano.

Such products are chronologically subsequent to sub-aerial lava flows emitted from fissural eruptive systems and dated about 300 ka (GILLOT *et alii.*, 1994) and outcrop along Simeto River valley on south-western edge of volcano edifice (CHESTER & DUNCAN, 1982).

The volcano evolved through the eruptive activity of central systems whose products (170-100 ka) constitute the skeleton of the polygenic edifice. Relicts of old volcanic structures are exposed in the flanks of the "Valle del Bove" (KLERKX, 1968; MCGUIRE, 1982; GUEST *et alii.*, 1984). The eruptive activity of the last 15 ka has formed the present edifice (Recent Mongibello) (CHESTER *et alii.*, 1985; KIEFFER & TANGUY, 1993) with lava flows and pyroclastic materials production.

The volcanics rest on sedimentary terrains of different ages, consisting of Tertiary units of the Appennine-Maghrebide Chain and Early-Middle Pleistocene marine clays, outcropping at the periphery of the volcanic cover, along the Simeto and the Alcantara river valleys (AA. VV., 1979; LENTINI, 1982).

The lower eastern flank of the volcano is dissected by the NNW-SSE trending fault system (LO GIUDICE *et alii.*, 1982; AZZARO, 1999), which represent the northern termination of the Malta Escarpment. This normal faults control the morphology of the eastern flank with the presence of the steep escarpments ("Timpe") (FERRARA, 1975).

HYDROGEOLOGY

Lithological complexes and hydrogeological parameters

Volcanic rocks produced by the various eruptive centres in the time show a remarkable lithologic and structural variability that conditions the permeability, determining a very complicated groundwater circulation (FERRARA, 1975). The lithological complex outcropping are characterized by different type and degree of permeability (Fig. 2):

- Alluvial deposits
Pebbles, gravels, sands and silt. Porous high-medium permeability
- Historic lava flows and pyroclastics.
Compact lavas and scoriae, volcanic sands, lapilli and blocks.
High permeability for fracture and porosity.
- Recent lava flows
Compact lavas and volcanoclastic products with weathering cover. High-medium permeability for fracture and porosity.

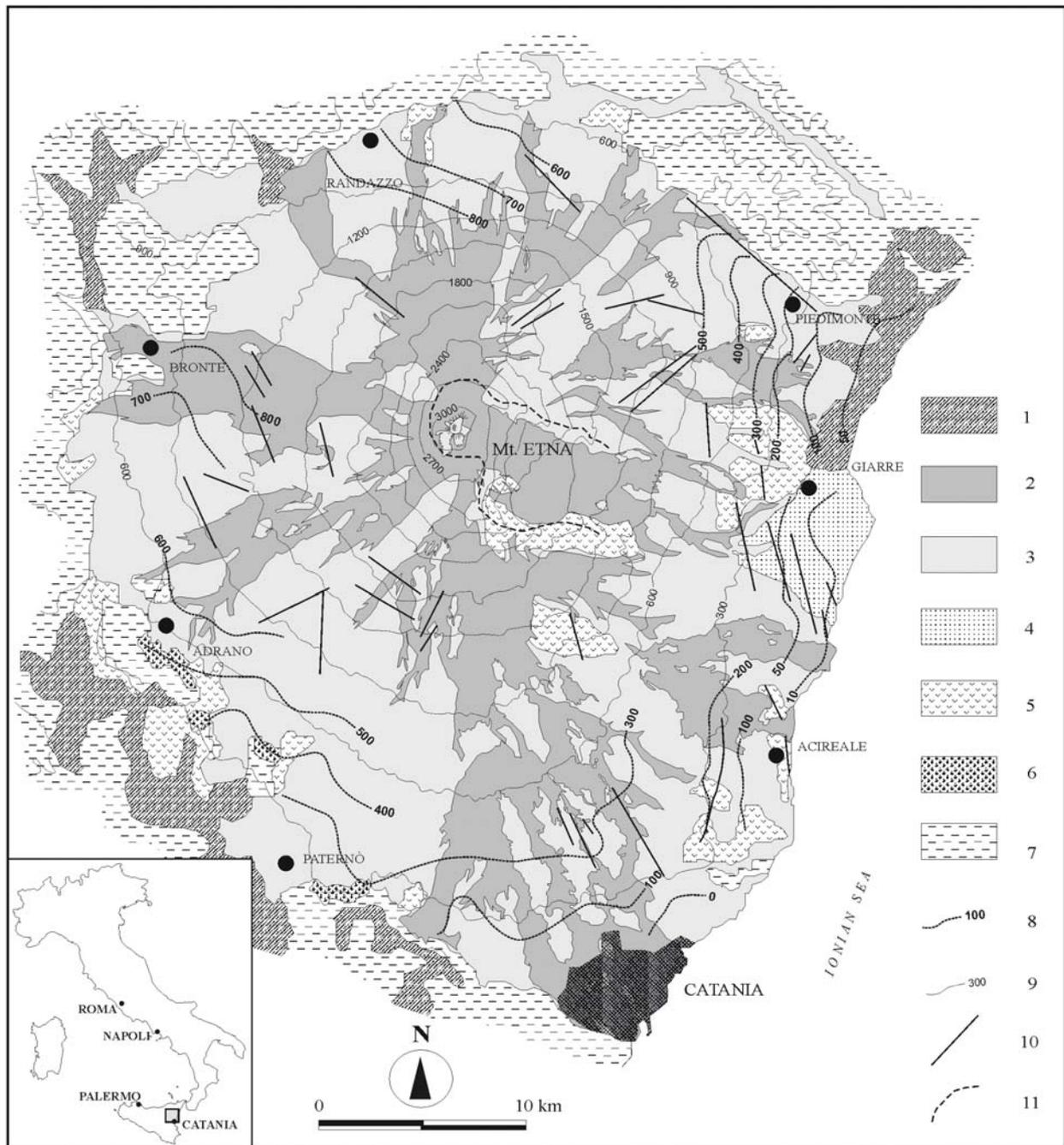


Fig. 2 - Carta idrogeologica schematica

- 1) Depositi alluvionali; 2) Colate laviche storiche e piroclastiti; 3) Colate laviche recenti; 4) Conglomerati sabbiosi alluvionali ("Chiancone"); 5) Prodotti vulcanici antichi (lave, tufi, lahars e tuffiti); 6) Vulcaniti basali; 7) Terreni sedimentari del basamento; 8) Isopezometriche (m s.l.m.); 9) Isoipse (m s.l.m.); 10) Faglie principali; 11) Orlo di caldera

- Simplified hydrogeological map

- 1) Alluvial deposits; 2) Historic lava flows and pyroclastic deposits; 3) Recent lava flows and volcanoclastic deposits; 4) Sandy alluvial conglomerates ("Chiancone"); 5) Ancient volcanic products (lavas, tephra, mudflows and tuffaceous sediments); 6) Basal volcanic products; 7) Sedimentary basement; 8) Water table contour lines (m asl); 9) Topographic contour lines (m asl); 10) Main faults; 11) Caldera rims

- zione. Permeabilità relativa medio-alta per fratturazione e porosità
- Conglomerati sabbiosi alluvionali ("Chiancone")
Ciottoli e blocchi in matrice limoso-sabbiosa, in parte cementati.
Permeabilità relativa media per porosità e per fratturazione
 - Prodotti vulcanici antichi
Lave compatte in grossi banchi, in parte degradate, tufi litoidi e lahars. Permeabilità relativa da alta a bassa prevalentemente per fratturazione
 - Vulcaniti basali
Lave a pillows in matrice ialoclastica e lave compatte colonnari.
Permeabilità relativa da bassa a molto bassa.
 - Terreni sedimentari del basamento
Argille marnose, marne, alternanze arenaceo-argillose.
Permeabilità relativa molto bassa.
Si hanno pertanto litotipi permeabili per porosità, per fratturazione e con permeabilità di tipo misto.

Come dimostrano i numerosi dati di perforazioni geognostiche e di pozzi, i prodotti che costituiscono la successione stratigrafica dei diversi settori dell'area vulcanica sono rappresentati sia da rocce laviche compatte, generalmente fratturate, sia da prodotti scoriacei e piroclastici, con livelli di paleosuoli e di materiali detritici intercalati fra le varie colate.

In relazione alla frequenza, allo spessore ed alle caratteristiche litostrutturali, i parametri idrogeologici dell'acquifero variano notevolmente. I valori di trasmissività, ottenuti mediante prove di emungimento in pozzi sia perforati sia scavati a largo diametro, sono compresi tra $1,68 \times 10^{-3}$ e $5,30 \times 10^{-1}$ m²/s e mediamente sull'ordine di $3,50 \times 10^{-2}$ m²/s; la conducibilità idraulica è valutabile sull'ordine di $2,4 \times 10^{-4}$ m/s (FERRARA, 1999). Le rocce laviche, costituenti la parte predominante delle colate, contribuiscono maggiormente alla trasmissione delle acque, in relazione alla diffusa fratturazione causata sia da contrazione per raffreddamento del magma sia da stress tettonico. Queste condizioni incrementano la produttività dell'acquifero, sfruttato da molti pozzi con elevata portata di esercizio.

Idrostrutture e deflussi sotterranei

Nei tre settori dell'area etnea, rappresentati dai versanti settentrionale, orientale e occidentale, si individuano diverse idrostrutture (Fig. 3) (FERRARA, 1994), dalle quali vengono prelevati consistenti volumi di risorse idriche utilizzate per i fabbisogni di numerosi centri abitati e di attività produttive. Queste idrostrutture si estendono dalla sommità del vulcano alla sua periferia e sono state definite geometricamente mediante rilievi di superficie e dati di prospezioni geofisiche (Sondaggi Elettrici Verticali), di pozzi a stratigrafia nota e di perforazioni geognostiche.

A tale scopo sono stati reinterpretati 420 S.E.V., eseguiti in precedenza nell'ambito di studi per ricerche di acque sotterranee a fini potabili (CASMEZ, 1983). I terreni sedimentari conduttivi sono caratterizzati da valori di resistività compresi tra 5 e 50 Ωm, quelli vulcanici da

- Alluvial sandy conglomerates ("Chiancone")
Volcanic pebbles and blocs in a silt-sandy matrix, partially cemented. Medium permeability for porosity and fracture.
- Old volcanic products
Compact lavas in thick banks, partially weathered, tuffs and lahars well cemented. High to low prevailingly for fracture.
- Basal volcanics
Pillow lavas in hyaloclastic matrix and columnar lavas. Low to very low permeability.
- Sedimentary basement
Marly clays, marls, clayey-arenaceous alternance. Very low permeability.
Permeability is given by primary porosity, rocks fracturing or mixed type. Boreholes and wells data confirm that the stratigraphic succession of the volcanic area is constituted by generally fractured compact lavas and scoriaceous pyroclastic products, with interbedded paleosols and detritus among the several lava flows.

The hydrogeologic parameters of the aquifer vary greatly according to frequency, thickness and litho-structural conditions. The transmissivity values, obtained by pumping tests in drilled and large-diameter wells, are comprised between 1.68×10^{-3} and 5.30×10^{-1} m²/s an average of 3.50×10^{-2} m²/s; the hydraulic conductivity is about 2.4×10^{-4} m/s (FERRARA, 1999). The lavas mainly contribute to the transmission of water as a consequence of the diffuse fracturing caused by cooling contraction and tectonic stress. These conditions increased the aquifer productivity that is exploited by several wells.

Hydro-structures and groundwater flow

Various hydro-structures (Fig. 3) (FERRARA, 1994) have been recognized in the three sectors of the Etna's edifice, constituted from the northern, eastern and western flanks. Conspicuous volumes of water are withdrawn from them to satisfy numerous towns and productive activities. The hydro-structures extend from the top of the volcano to its periphery they have been geometrically defined by land surveys and geophysical data (Electrical Surveys) wells and borehole data.

To this purpose have been reinterpreted 420 S.E.V. previously executed for drinkable water researches (CASMEZ, P.S. 30, 1983). Resistivity of the sedimentary terrains varies between 5 and 50 Ωm, the volcanic products are extremely variable from 200 to beyond 15,000 Ωm. Lower values characterize the tuffs and fine

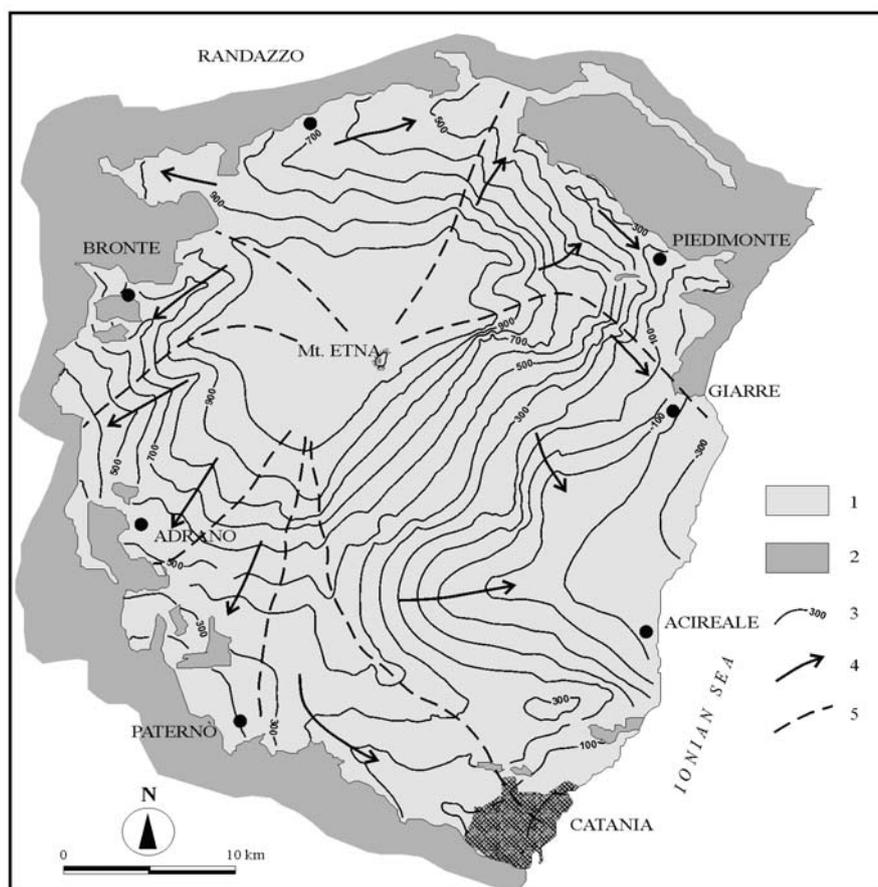


Fig. 3 - Carta schematica delle principali idrostrutture

- 1) Prodotti vulcanici; 2) Terreni sedimentari; 3) Isoinee del tetto del basamento impermeabile (m s.l.m.); 4) Principali assi di drenaggio delle acque sotterranee; 5) Limiti delle idrostrutture
- Simplified map of main hydrogeological structures
- 1) Volcanic products; 2) Sedimentary terrains; 3) Contour lines of the top of the low-permeable basement (m asl.); 4) Groundwater drainage axes; 5) Boundary of hydrogeological structure

una gamma di valori molto più ampia, da 200 ad oltre 15.000 Ωm. Valori più bassi sono riferibili a tufi e piroclastiti fini, a lave antiche alterate, a lahars più o meno cementati ed a paleosuoli, mentre quelli più elevati caratterizzano generalmente le colate laviche più recenti

I dati stratigrafici di 65 pozzi completi distribuiti nei tre versanti del vulcano e quelli di 45 sondaggi geognostici a carotaggio continuo spinti fino al basamento sedimentario sono stati utilizzati per verifica dei termini litologici e per taratura dei S.E.V. Il quadro risultante dall'interpolazione di questi elementi (Fig. 3) delinea una morfologia sepolta costituita da rilievi e da depressioni in cui si concentra il deflusso delle acque sotterranee.

Mediante le misure dei livelli d'acqua effettuate nell'anno idrologico 2000-2001 in 160 pozzi ubicati alle quote medio-basse, sono state costruite le curve isopiezometriche, dalle quali si evidenziano le direzioni di deflusso delle acque sotterranee. Queste hanno andamento radiale rispetto all'asse del cono vulcanico e sono orientate verso la sua periferia.

In particolare, nel settore orientale i deflussi sono diretti verso est e nord-est ed hanno recapito al litorale ionico tra Fiumefreddo e Catania, differenziandosi secondo assi di drenaggio preferenziale coincidenti

pyroclastic deposits, the old weathered lavas, lahars more or less cement and paleo-sols, while that more high generally characterize recent lava flows.

The stratigraphic data of 65 complete wells localised in the three sectors of the volcano and those of 45 boreholes drilled until the sedimentary basement, have been used to reconstruct the stratigraphic succession and calibrate the S.E.V. Obtained data draw (Fig. 3) a buried morphology alternating local high and depressions, in which the flow of groundwater is concentrated.

Water levels measurement of 160 wells located in the lower-middle flanks carried out in hydrologic year 2000-2001 permit to draw the potentiometric contour lines and the groundwater flow directions. These have radial direction regarding the axis of the volcanic cone and are oriented towards its periphery.

In particular, in the eastern flank flows is directed towards East and Northeast, it reach the Ionic coast between Fiumefreddo and Catania, through different preferential groundwater drainages axes, coinciding with the greater depressions of the low-permeable base-

con le maggiori depressioni del basamento impermeabile (FERRARA, 1994). Qui l'acquifero presenta maggiore potenzialità e si riscontra la più alta produttività dei pozzi e l'esistenza di importanti sorgenti. Nel settore occidentale i deflussi sono diretti verso la valle del Fiume Simeto, dove danno origine a gruppi di sorgenti, un tempo di notevole portata, localizzate al contatto tra vulcaniti e terreni sedimentari.

Nel settore settentrionale i deflussi sotterranei sono diretti verso la valle del Fiume Alcantara, dove si ha il limite tra le vulcaniti e gli affioramenti dei terreni sedimentari. Lungo l'alveo del corso d'acqua si avevano un tempo sorgenti di consistente portata, oggi scomparse o con portate notevolmente ridotte per effetto dei prelievi a monte da parte di pozzi.

SFRUTTAMENTO DELL'ACQUIFERO

Le opere di captazione presentano una densità elevata (fino ad oltre 6 per km²) lungo la fascia pedemontana, con progressiva attenuazione all'aumentare della quota (FERRARA, 1991). Si tratta di pozzi sia scavati a largo diametro sia perforati, di profondità variabile da poche decine di metri fino ad oltre 200 m. Gallerie drenanti di oltre 1000 m di lunghezza, sono localizzate a quote diverse e le portate sono variabili da pochi l/s ad alcune centinaia di l/s.

A causa dell'incremento dei prelievi in tutti i versanti dell'Etna si è così verificato un sensibile abbassamento dei livelli piezometrici, come risulta dal confronto fra le condizioni rilevate nel 1970 (BARBAGALLO *et alii*, 1980) e le misure più recenti.

Nel settore orientale, dove si ha la maggiore concentrazione di opere di captazione utilizzate a scopo idropotabile con esercizio continuo, l'abbassamento dei livelli negli ultimi trent'anni è stato mediamente di 70 m, a fronte di un incremento dei prelievi da 52 x 10⁶ m³/a a 300 x 10⁶ m³/a.

Nell'intera area vulcanica il volume dei prelievi è valutabile mediamente in 500 x 10⁶ m³/a, con valori variabili da 1 a più di 15 x 10⁶ m³/anno per chilometro quadrato di superficie (Fig. 4).

Le acque sotterranee prelevate dall'acquifero per scopi potabili mediante opere di captazione irregolarmente distribuite nel territorio sono canalizzate mediante una fitta rete acquedottistica verso i punti di utilizzazione. Questi vecchi acquedotti, realizzati senza una razionale pianificazione, interferiscono fra loro ed hanno spesso perdite di oltre il 40%.

QUALITÀ DELLE ACQUE

Dal punto di vista qualitativo le acque sotterranee dell'Etna sono state sempre considerate come risorse pregiate da utilizzare principalmente per scopi civili. Il loro chimismo mostra una stretta relazione con la composizione delle rocce vulcaniche, rappresentate principalmente da prodotti a tendenza alcalina, ma con l'influenza di altri fattori che intervengono nell'interazione acqua-roccia.

Il contenuto di bicarbonati, ben correlabile con quello di Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ e Na⁺, indica infatti un processo di mineralizzazione princi-

ment (FERRARA, 1994). Here the aquifer yield is greater, the wells have the highest discharge and important springs are localized. In the western flank the flow move towards the Simeto River valley, where it origins groups of springs, a time of remarkable discharge, localized along the contact with sedimentary terrains.

In the northern flank the groundwater flow is directed towards the Alcantara River valley, that marks the limit between vulcanites and the sedimentary terrains. Along this stratigraphic contact there were springs with consisting discharge, actually they disappeared or have been sensibly reduced.

AQUIFER EXPLOITATION

The waterworks are numerous (beyond 6 for km²) at the low-medium altitudes and progressively reduce increasing the altitude (FERRARA, 1991). The wells are both drilled and large-diameter, their depth vary from few tens meters until to beyond 200 m. Drainage galleries beyond 1000 m length are localized at variable altitude and discharge from few l/s to some hundreds of l/s.

The aquifer exploitation is progressively increased in time with the fast water consumption increasing mainly for civil use. Water demand increasing induced the waterworks proliferation in all the sectors of the volcanic area: in 1960 there were 700 waterworks that became 1100 at the beginning of years '90, with a greater increment in the eastern sector. At the same time increased the wells depth, both for the new and for existing wells, that has been deepened to restore their productivity.

Water withdraw caused a notable lowering of the groundwater levels, as comparison between the conditions found in 1970 (BARBAGALLO *et alii*, 1980) and the more recent measures point out. In the eastern sector the greater well concentrations exist and in the last 30 years has been measuring a medium lowering of 70 m and an associated extraction increment from 52 x 10⁶ m³/year to 300 x 10⁶ m³/year.

Actually in the whole volcanic area the valued medium volume of withdrawals is 500 x 10⁶ m³/year, with variable quantity from 1 to more than 15 x 10⁶ m³/year for square kilometre of surface (Fig. 4).

The groundwater drawing for drinkable uses are from caption point through a close piping network. These old aqueducts have been realized without a rational planning, they interfere each other and often have losses beyond 40%.

GROUNDWATER QUALITY

From a qualitative point of view, the Etna groundwater have been considered valuable resources mainly for drinking use. Their chemical composition shows a strict relation with the composition of alkaline volcanic rocks and with the influence of factors that act in the interaction water-rock. The bicarbonate content, coherent with Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ and Na⁺ one, indicates in fact a process of mineralization mainly linked to the solution of the more abundant minerals constituting the volcanic rocks (CARAPEZZA *et alii*, 1977; ANZÀ *et alii*,

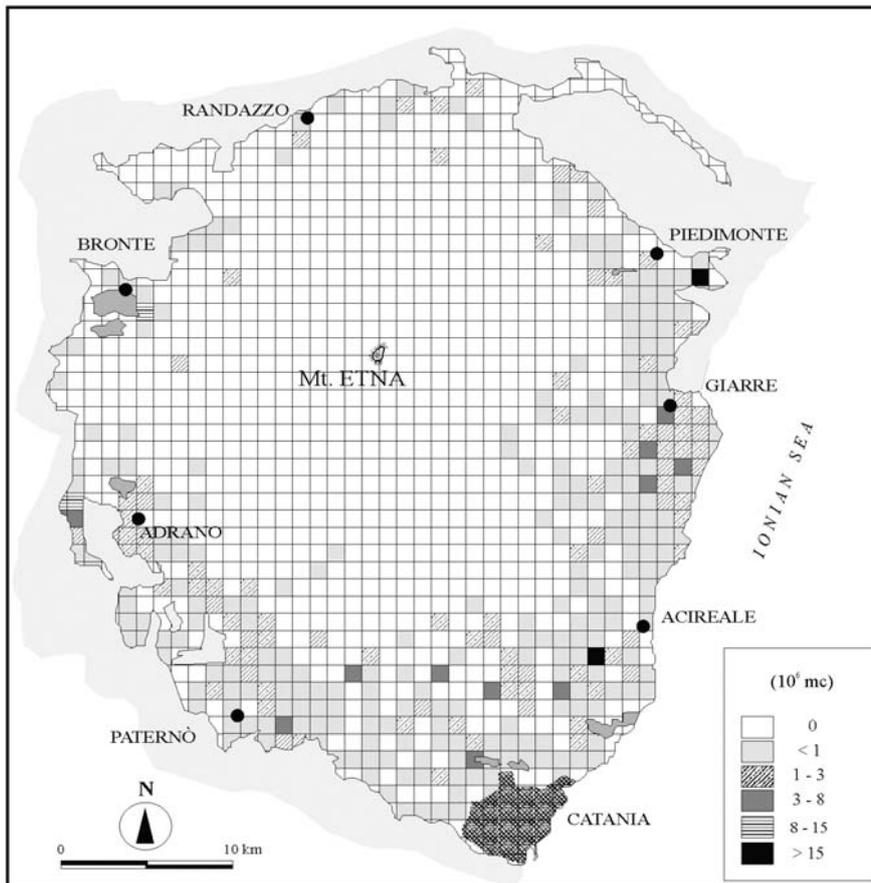


Fig. 4 - Prelievi annui dall'acquifero vulcanico per unità di superficie (chilometro quadrato)
 - Annually groundwater extraction from volcanic aquifer for surface unit (square kilometre)

palmente legato alla soluzione dei più abbondanti minerali che costituiscono le rocce vulcaniche (CARAPEZZA *et alii*, 1977; ANZÀ *et alii*, 1989). In tale processo riveste un'importante funzione la presenza di CO₂ disciolta, derivante dalle emanazioni gassose tipiche dell'ambiente vulcanico (FERRARA & LI ROSI, 1985). Le acque mostrano quindi una tipica facies bicarbonato alcalino terrosa, con locali variazioni determinate dall'apporto di altri elementi contenuti nei fluidi profondi risalenti lungo le frequenti discontinuità tettoniche (Fig. 5).

Caratteristiche peculiari di queste acque sono i valori della durezza, talora molto alti, ed il contenuto in magnesio spesso maggiore di quello del calcio, con una distribuzione variabile nei diversi settori dell'area vulcanica. Tali condizioni si riscontrano principalmente nel settore occidentale, dove il chimismo delle acque è nettamente dominato dai bicarbonato, i cui valori raggiungono localmente 20 meq/l.

Nelle acque sotterranee dell'Etna si rilevano da alcuni decenni variazioni di composizione rispetto al passato che indicano un peggioramento qualitativo, ricollegabile al progressivo approfondimento dei pozzi con prelievo delle acque da zone sempre più profonde dell'acquifero, dove la circolazione idrica è più lenta ed il ricambio meno attivo (FERRARA, 1991). Il contenuto di Mg⁺⁺ e Na⁺ è notevol-

1989). In such process, the CO₂ deriving from the gaseous emanations play an important role (FERRARA & LI ROSI, 1985). The waters show therefore one typical facies bicarbonate-earth alkaline, with local variations determined by elements contained in deep fluid ascending along the tectonic discontinuities (Fig. 5).

These waters have characteristic values of the hardness, sometimes much high, and the magnesium content is often greater than calcium, they show variable distribution in the different sectors of the volcanic area. Such conditions are found mainly in the western sector, where the chemical composition of water is clearly dominated from bicarbonate, whose values locally reach 20 meq/l.

In the last decades the groundwater show a composition variation toward a qualitative worsening, that can to be connected to the progressive deepening of the wells and water withdrawal from more and more deep zones of the aquifer, where the water circulation is slower and the replacement less active (FERRARA, 1991). The Mg⁺⁺, Na⁺ with Mn⁺⁺, Cl⁻, Fe⁺⁺ content is remarkably increased, with consequent increase of the hardness and the total salinity.

These variations, caused from the excessive exploitation of the

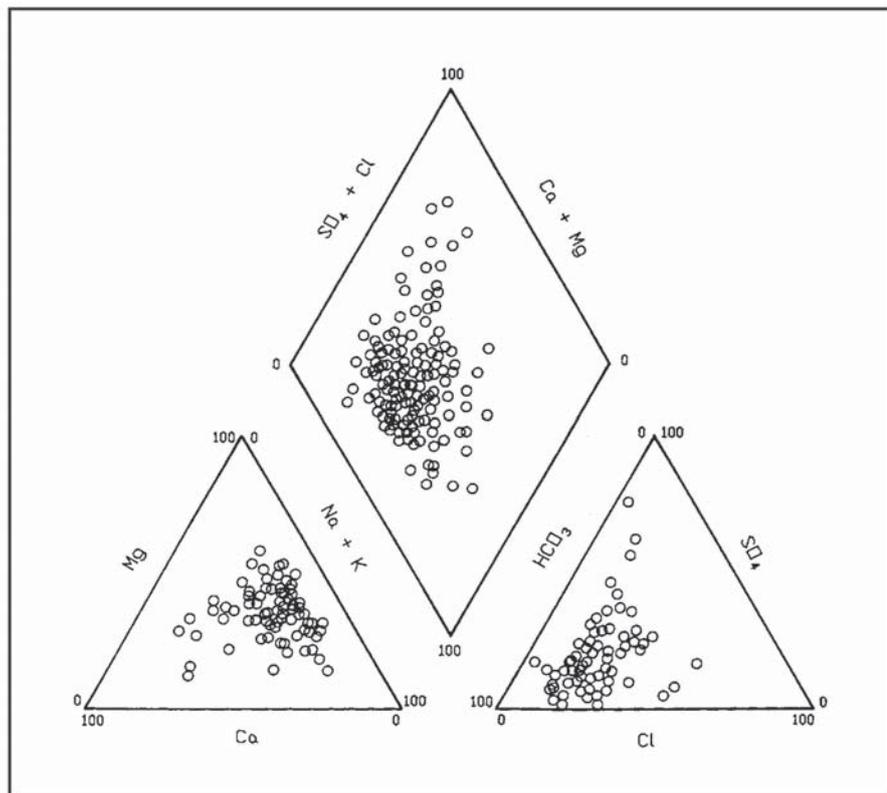


Fig. 5 - Diagramma di Piper delle acque sotterranee
- Piper diagram of groundwater

mente aumentato, con conseguente aumento della durezza e della salinità totale, assieme a ioni Mn^{++} , Cl^- e Fe^{++} .

Queste variazioni, causate dall'eccessivo sfruttamento delle risorse idriche, rendono le acque talora non idonee al consumo umano.

VULNERABILITA' ALL'INQUINAMENTO

La prevalenza di rocce laviche fessurate e spesso intensamente fratturate per tettonizzazione, a cui si associano prodotti scoriaei e piroclastici porosi, favorisce l'infiltrazione nel sottosuolo di un'alta percentuale di acque meteoriche. La presenza inoltre di cavità e tunnel di svuotamento lavico determina una rapida circolazione idrica all'interno dell'ammasso vulcanico, con velocità a tratti notevolmente elevata. La presenza di tufi argillificati, di depositi vulcanoclastici con granulometria fine e di paleosuoli limoso-sabbiosi a vari livelli della successione stratigrafica agisce in senso opposto, limitando localmente e solo in parte la circolazione.

Tali condizioni comportano un'elevata vulnerabilità dell'acquifero nei confronti dei fluidi potenzialmente inquinanti prodotti e smaltiti in superficie senza il loro preventivo trattamento. Il rapido aumento della profondità della superficie piezometrica dal piano di campagna procedendo dalle zone periferiche agli alti versanti del vulcano (Fig. 6) determina tuttavia la diminuzione del grado di vulnerabilità secondo aree concentriche più o meno regolari. Il grado di

water resources, render sometime water not suitable for drinkable use.

VULNERABILITY TO POLLUTION

Fissured lavas prevalence, often intensely fractured for tectonization, associated to scoriaeous and pyroclastic porous products, favour the rainfall. Moreover the presence of cavity and lava tubes, determines the water circulation fastening into the aquifer reaching elevated velocity. Weathered tuffs, volcanoclastic deposits with fine grain size and silt-sandy paleosols interbedded in the stratigraphic succession limit locally and only in part the circulation.

Such conditions involve a high vulnerability to pollution load dispersed in surface without any treatment. The rapid depth increasing of the potentiometric surface proceeding from the peripheral zones to the high flanks of the volcano (Fig.6) determines however a decrease of the vulnerability degree in more or less regular concentric areas. The vulnerability degree, determined with the basic GNDCI-CNR method (AA.VV., 1988) varies on the average from extremely high for one depth of the piezometric surface lower to 50 m to lower middle for depth above 150 m (FERRARA,

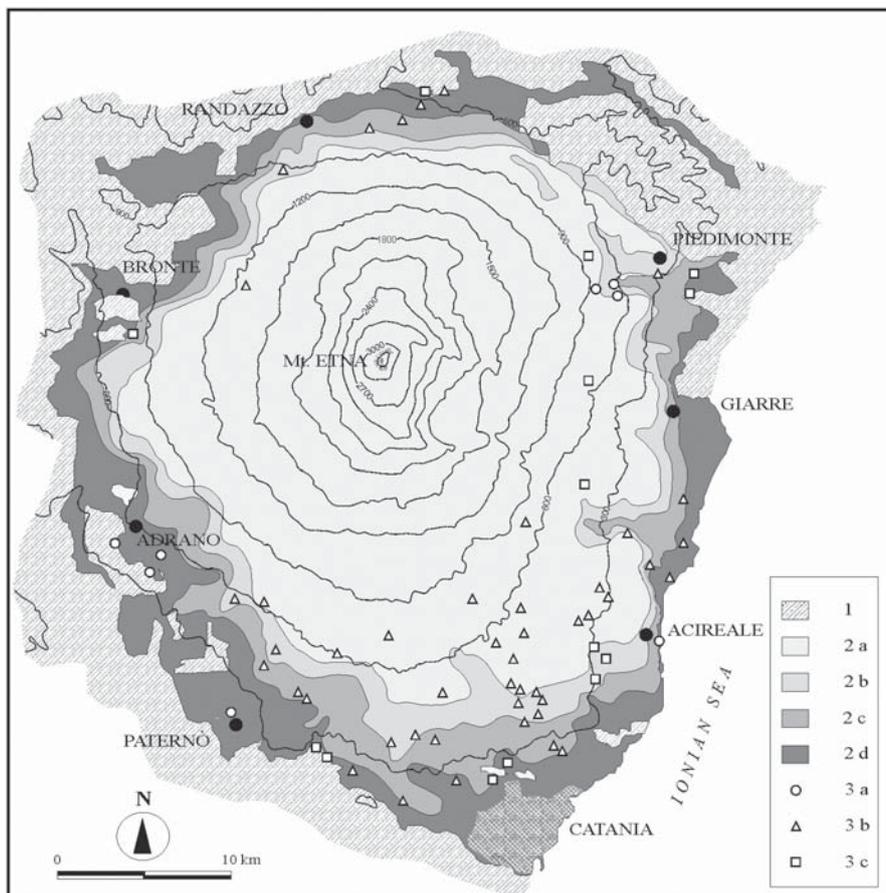


Fig. 6 - Carta schematica della vulnerabilità all'inquinamento
 1) Terreni sedimentari; 2) Prodotti vulcanici con profondità media della superficie piezometrica: >150 m (a), 150÷100 m (b), 100÷50 m (c), <50 m (d); 3) Sorgente (a); Pozzo (b); Galleria drenante (c), utilizzati per approvvigionamento idropotabile
 - Schematic map. of the vulnerability to pollution
 1) Sedimentary terrains; 2) Volcanic products with mean depth of water table: >150 m (a), 150÷100 m (b), 100÷50 m (c), <50 m (d); 3) Spring (a) Well (b), Infiltration gallery (c), utilized for drinking water supply

vulnerabilità, determinato con il metodo base GNDCI-CNR (AA.VV., 1988) varia mediamente da estremamente elevato per una profondità della superficie piezometrica inferiore a 50 m a medio-basso per profondità superiore a 150 m (FERRARA, 1990).

In relazione allo stato di antropizzazione del territorio e ai consistenti volumi di rifiuti liquidi e solidi prodotti, alle quote più basse il rischio di inquinamento risulta alto, mentre questo si attenua oltre gli 800 m, fino ad annullarsi a quote maggiori dove peraltro si ha l'area protetta del Parco dell'Etna (FERRARA, 1994; FERRARA & PENNISI, 1993; 1995).

CONCLUSIONI

Il massiccio vulcanico dell'Etna costituisce il maggiore serbatoio naturale di acque sotterranee della Sicilia e pertanto è stato oggetto nel tempo di molti studi e indagini che hanno permesso di acquisire una notevole mole di dati sull'assetto strutturale del vulcano e sulla capacità produttiva dell'acquifero e la sua vulnerabilità all'inquinamento. Le condizioni che caratterizzano i diversi settori dell'area vulcanica sono stati definiti evidenziando situazioni di degrado qualitativo e quantitativo delle acque sotterranee. Le principali cause di tale

1990).

To the lower altitude, where the antropic presence is greater and large volumes of solid and liquid wastes are produced, the groundwater contamination risk is higher. This is attenuated beyond 800 m, until disappear to the greater quotas, where moreover the protected area of the Park of Etna exists (FERRARA, 1994; FERRARA & PENNISI, 1995).

CONCLUSIONS

The Etna volcanic massif constitutes the greater groundwater natural reservoir of Sicily and therefore it has been object in the time of many studies and surveys acquiring a remarkable amount of data on the structural setting of the hydrogeologic system, the hydrodynamic characteristics of groundwater, the aquifer yield and its vulnerability to pollution. The conditions characterizing the different sectors of the volcanic area have been defined pointing out a degradation of

degrado sono state individuate nell'eccessivo e irrazionale sfruttamento in assenza di un'adeguata valutazione delle risorse disponibili e di una loro corretta gestione.

Sulla base di queste conoscenze e dei risultati delle ricerche effettuate negli ultimi anni è stata realizzata la "Carta idrogeologica del massiccio vulcanico dell'Etna", che riporta gli elementi utili per attuare un piano di sfruttamento razionale delle risorse idriche contenute nell'acquifero (FERRARA & SCIACCA, 1993).

Le conoscenze acquisite in precedenza sulle acque sotterranee dell'intera area vulcanica sono state analizzate, elaborate ed integrate con nuovi dati riguardanti la geometria dell'acquifero, i livelli idrici misurati in pozzi e piezometri e la qualità delle acque sotterranee che hanno permesso di aggiornare le conoscenze sulle condizioni dell'acquifero e delle risorse idriche in esso contenute.

Il presente lavoro costituisce un ulteriore contributo all'interpretazione del quadro idrogeologico riportato nella predetta carta ed alla conoscenza delle attuali condizioni dell'acquifero vulcanico, fornendo ulteriori utili elementi per programmare un'adeguata politica di gestione e di protezione delle risorse idriche sotterranee.

groundwater quality and quantity. The main causes of degradation are the irrational overexploitation of the groundwater, without a proper evaluation of the available resources and of their right management.

On the base of the data resulting from these studies carried out in the last decades the "Hydrogeological map of the Etna volcanic massif" has been realized; it shows the useful elements to plan a rational management of groundwater.

Previously acquired data about the whole volcanic area have been analyzed, elaborated and integrated with new data regarding the aquifer geometry, the groundwater levels measured in wells and piezometers and the quality of groundwater leading to the upgrading of the knowledge about the aquifer conditions and the stored resources.

This paper gives a further contribution to explain the hydrogeologic sketch outlined in the quoted map and to the actual state knowledge of the volcanic aquifer, supplying further useful elements to plan a suitable management and protection policy of the groundwater resources.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AA.VV. (1979) – *Carta geologica del Monte Etna alla scala 1:50.000 (Coordinamento R. Romano)*. C.N.R. – Prog. Fin. Geodinamica – Ist. Int. di Vulcanologia, Catania.
- AA.VV. (1988) – *Proposta di normativa per l'istituzione delle fasce di rispetto delle opere di captazione di acque sotterranee*. GNDCI-CNR, Pubbl. 75 (V.Francani & M.Civita Ed.), GeoGraph Segrate-Milano, 277 pp.
- ANZÀ S., DONGARRÀ G., GIAMMANCO S., GOTTINI V., HAUSER S. & VALENZA M. (1989) – *Geochimica dei fluidi dell'Etna. Le acque sotterranee*. Miner. Petrog. Acta, **32**: 231-251.
- AZZARO R. (1999) – *Earthquake surface faulting at Mount Etna volcano (Sicily) and implications for active tectonics*. J. Geodyn., **28**: 193-213.
- BARBAGALLO M., CALTABIANO S., FERRARA V. & SCANDURA A. (1980) – *Contributo alla conoscenza dell'acquifero vulcanico interessato dalle opere di captazione che alimentano la città di Catania*. Atti 4° Conv. Int. sulle Acque Sotterranee, **2**: 99-125.
- CALOIERO D. (1975) – *Le precipitazioni in Sicilia nel cinquantennio 1921-1970*. C.N.R.I. – IRPI. Cosenza
- CARAPEZZA M., CUSIMANO G., LIGUORI V., ALAIMO R., DONGARRA' G. & HAUSER S. (1977) – *Nota introduttiva allo studio delle sorgenti termali dell'Isola di Sicilia*. Boll. Soc. Geol. It., **96**: 813-836.
- CASSA PER IL MEZZOGIORNO (CASMEZ) (1983) – *Indagini idrogeologiche e geofisiche per il reperimento di acque sotterranee per l'approvvigionamento idrico del sistema V, zona centro orientale della Sicilia (Catanesa)*. Prog. Spec. N° 30. Unpublished technical report.
- CHESTER D.K. & DUNCAN A.M. (1982) – *The interaction of volcano activity in Quaternary times upon the evolution of the Alcantara and Simeto rivers, Mount Etna, Sicily*. Catena, **9**: 319-342.
- CHESTER D.K., DUNCAN A.M., GUEST J.E. & KILBURN C.R.J. (1985) – *Mount Etna the anatomy of a volcano*. Chapman and Hall, 404 pp., London.
- CRISTOFOLINI R. (1975) – *La massa subvulcanica di Acitrezza (Etna)*. Rend. Soc. Ital. Min. e Petr., **30**.
- FERRARA V. (1975) – *Idrogeologia del versante orientale dell'Etna*. Atti 3° Conv. Int. sulle Acque Sotterranee, 91-144. Palermo.
- FERRARA V. (1990) – *Carta della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero vulcanico dell'Etna alla scala 1:50.000*. C.N.R. – GNDCI. S.EL.CA., Firenze.
- FERRARA V. (1991) – *Modificazioni indotte dallo sfruttamento delle acque sotterranee nell'equilibrio idrodinamico e idrochimico dell'acquifero vulcanico dell'Etna*. Mem. Soc. Geol. It., **47**: 619-630.
- FERRARA V. (1994) – *Note illustrative della Carta della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero vulcanico dell'Etna*. CNR – GNDCI, Pubbl. n° 266 bis, 33 pp.
- FERRARA V. (1999) – *Strategie di gestione delle risorse idriche sotterranee a fini integrativi, sostitutivi e di emergenza nel settore nord-orientale dell'Etna*. Atti 3° Conv. Naz. sulla protezione e gestione delle acque sotterranee per il III Millennio, **2**: 4.3-4.12.
- FERRARA V. (2001) – *Carta idrogeologica del massiccio vulcanico dell'Etna*. C.N.R. – GNDCI, S.EL.CA., Firenze.
- FERRARA V. & LI ROSI G. (1985) – *Caratteristiche chimico-fisiche delle acque sotterranee del versante sud-occidentale dell'Etna*. Atti 5° Conv. Int. sulle Acque Sotterranee, 17-21, Taormina.

THE HYDROGEOLOGICAL MAP OF THE ETNA VOLCANIC MASSIF AS USEFUL TOOL FOR GROUNDWATER RESOURCES MANAGEMENT

- FERRARA V. & PENNISI A. (1993) – *Elementi di valutazione del pericolo di inquinamento delle acque sotterranee da discariche di R.S.U. nell'area etnea*. Atti 2° Conv. Int. di Geoidrologia, in Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, **49**: 513-524, Pitagora Ed. Bologna.
- FERRARA V. & PENNISI A. (1995) – *Lo sviluppo urbano nell'area metropolitana di Catania ed i conseguenti problemi di protezione delle acque sotterranee*. 2° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: metodologie, tecnologie e obiettivi, in Quaderni di Geologia Applicata **1** (1): 193-198, Suppl. 1 dei Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Pitagora Ed. Bologna.
- FERRARA V. & SCIACCA A.S. (1993) – *Progetto pilota di sbarramento sotterraneo in ambiente vulcanico per la captazione e la gestione razionale di risorse idriche a fini strategici*. Atti 2° Conv. Int. di Geoidrologia, in Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, **49**: 513-524, Pitagora Ed. Bologna.
- GILLOT P.Y., KIEFFER G. & ROMANO R. (1984) – *The evolution of Mount Etna in the light of potassium-argon dating*. Acta Volcanol., **5**: 81-87.
- GUEST L.E., CHESTER D.R. & DUNCAN A.M. (1994) – *The Valle del Bove, Mount Etna: its origin and relation to the stratigraphy and structure of the volcano*. J. Volcan. Geother. Res., **21**: 1-23.
- KIEFFER G. & TANGUY J.C. (1993) – *Evolution structurale, magmatique et dynamique d'un volcan «polygenique»*. Mem. Soc. Geol. France, **163**: 253-271.
- KLERKX J. (1968) – *Etude géologique et pétrologique de la Valle del Bove (Etna)*. Ph.D. Thesis, Université de Liège, France.
- LENTINI F. (1982) – *The geology of the Mt. Etna basement*. Mem. Soc. Geol. It., **23**: 7-26
- LO GIUDICE E.G., PATANÈ R., RASÀ R. & ROMANO R. (1982) – *The structural framework of Mount Etna*. Mem. Soc. Geol. It., **45**: 726-737.
- MC GUIRE J. (1982) – *Evolution of the Etna volcano: information from the southern wall of the Valle del Bove caldera*. J. Volcan. Geother. Res., **13**: 241-271.
- OGNIBEN L. (1966) – *Lineamenti idrogeologici dell'Etna*. Riv. Min. Sicil., **100-102**, Palermo.
- SERVIZIO IDROGRAFICO, SEZIONE DI PALERMO (1959) – *Precipitazioni medie mensili ed annue e numero dei giorni piovosi per i trentennio 1921-50*. Ist. Poligrafico dello Stato, Roma.
- TANGUY J.C., CONDOMINES M. & KIEFFER G. (1997) – *Evolution of the Mount Etna magma: Constrains on the present feeding system and eruptive mechanism*. J. Volcan. Geother. Res., **75**: 221-250.

Received March 2006 - Accepted January 2008

