

GEOLOGI e TERRITORIO

Periodico di Scienze della Terra dell'Ordine dei Geologi della Puglia

ISSN: 1974-1189

Poste Italiane s.p.a. - Spedizione in abbonamento postale - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1 comma 1, DCB BA



PROPOSTA DI REVISIONE DEL METODO RHRS PER LA VALUTAZIONE E ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI PERCORRENZA VEICOLARE DELLE STRADE IN CASO DI FRANE: IL CASO DI STUDIO DELLA SP n. 76 PRESICCE-SPECCHIA (PUGLIA)

Giovanni Bruno

LE ACQUE SULFUREE DELLE SORGENTI TERMALI DI SANTA CESAREA TERME

**Francesca Santaloia, Livia Emanuela Zuffianò, Pier Paolo Limoni,
Giuseppe Palladino, Domenico Liotta, Maurizio Polemio**



GEOLOGI e TERRITORIO

Periodico dell'Ordine Regionale
dei Geologi - Puglia
Anno XIV - n. 1/2017

Direttore editoriale:
Valletta Salvatore

Direttore responsabile:
Alfarano Espedito

Comitato di redazione:
Dibenedetto Michele, Di Fazio Antonio,
De Razza Tiziana, Corvasce Maddalena A.,
Bonora Davide, d'Amico Nicola A.,
D'Amico Vincenzo, Ieva Maria Costantina,
Impagnatiello Domenico P.,
Quarta Giovanni, Valletta Salvatore

Comitato scientifico:
Antonicelli Antonello, Assennato Giorgio,
Baldassarre Giuseppe, Blonda Massimo,
Borri Dino, Bruno Giovanni,
Capolongo Domenico, Cotecchia Federica,
Del Gaudio Vincenzo, Dellino Pierfrancesco,
Di Fazio Antonio, Di Santo Antonio R.,
Fornelli Annamaria, Gallicchio Salvatore,
Leucci Giovanni, Monterisi Luigi, Negri Sergio,
Pagliarulo Rosa, Polemio Maurizio,
Ricchetti Giustino, Sabato Luisa, Sansò Paolo,
Santaloia Francesca, Simeone Vincenzo,
Spilotro Giuseppe, Walsh Nicola

Coordinamento scientifico:
Di Fazio Antonio, Quarta Giovanni,
Valletta Salvatore

Segreteria di redazione:
De Razza Tiziana, Spizzico Silvio

Redazione, Amministrazione e Pubblicità:
Ordine dei Geologi - Puglia
Via Junipero Serra, 19 - 70125 Bari
www.geologipuglia.it - info@geologipuglia.it

Stampa:
Sagraf Srl - Z.I. Capurso (BA)

Autorizzazione del Tribunale di Bari:
n. 29 del 16.06.2004

Chiuso in tipografia il 22 maggio 2017

SOMMARIO

2

Editoriale del Presidente dell'ORG - Puglia
Salvatore Valletta

3

**PROPOSTA DI REVISIONE DEL METODO RHRS
PER LA VALUTAZIONE E ZONAZIONE DELLA
PERICOLOSITÀ DI PERCORRENZA VEICOLARE
DELLE STRADE IN CASO DI FRANE:
IL CASO DI STUDIO DELLA SP n. 76
PRESICCE-SPECCHIA (PUGLIA)**

Giovanni Bruno

17

**LE ACQUE SOLFUREE DELLE SORGENTI
TERMALI DI SANTA CESAREA TERME**
*Francesca Santaloia, Livia Emanuela Zuffianò,
Pier Paolo Limoni, Giuseppe Palladino,
Domenico Liotta, Maurizio Polemio*



Foto di copertina: archivio IRPI CNR.
Santa Cesarea Terme

Questo editoriale coincide con la conclusione del mandato 2013-2017 e l'imminente rinnovo del Consiglio dell'Ordine dei Geologi della Puglia; è tempo quindi di bilanci. Non intendo fare un resoconto puntuale di quanto è stato fatto in questi quattro anni, per questo invito i colleghi a passare in rassegna le attività pubblicate sul sito dell'Ordine, per percepire l'entità del lavoro sviluppato, forse non sempre adeguatamente divulgato all'esterno.

A proposito di bilanci, credo sia opportuno evidenziare la gestione economica del nostro Ordine, sempre attenta nelle spese, essenzialmente rappresentate dalle quote degli iscritti, rimaste invariate, nonostante il saldo negativo tra nuove iscrizioni e cancellazioni (dato comune anche per le altre professioni tecniche). L'impegno costante e la responsabilità dell'intero Consiglio ha consentito, attraverso il contenimento delle spese, di chiudere i bilanci e programmare un costante accantonamento per la ricostituzione del TFR del dipendente, senza penalizzare gli interventi legali attivati per la tutela della professione, volti prevalentemente a contrastare i bandi di gara lesivi della dignità professionale del geologo. Non è stata cosa facile, e per questo devo ringraziare la collaborazione di tutto il Consiglio e dei consulenti dell'Ordine che si sono dimostrati sempre disponibili a rispondere con celerità e professionalità alle numerose richieste poste all'attenzione dell'Ordine.

In questi anni non è stata mai trascurata l'interlocuzione con le istituzioni ai vari livelli, con gli uffici regionali, con gli Enti locali (verso i quali si sono intraprese anche azioni legali importanti e note ai ministeri vigilanti), con le Università ed in particolare con il Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali di Bari con il quale è stato intrapreso un percorso di seminari rivolto agli studenti per un avvicinamento al mondo della professione. Non è stato trascurato il rapporto con il territorio in generale, finalizzato ad affermare l'importanza del contributo professionale dei geologi, nelle sue differenti specificità, nel campo sociale ed in particolare in tema di prevenzione e gestione dei rischi.

Questo Consiglio ha avviato le sue attività, all'indomani del suo insediamento, contribuendo alle operazioni di rilievo post evento alluvionale di Ginosa del 2013, consolidando la collaborazione con la Protezione Civile anche nel corso dell'evento che ha interessato il Gargano nel 2014 e proseguendo con le attività anche nel subappennino dauno. Nell'ambito di tale attività di collaborazione sono stati avviati percorsi formativi gratuiti per gli iscritti puntando al coinvolgimento dei geologi professionisti negli studi di microzonazione sismica.

Una questione delicata che interessa la nostra regione è la mancanza di geologi negli uffici delle pubbliche amministrazioni, con ripercussioni negative sull'attività esterna dei liberi professionisti; sempre più spesso, bandi pubblici vengono emanati senza la giusta consapevolezza della necessità di accompagnare le progettazioni con approfonditi studi geologici ed appropriate indagini geognostiche. Impegnativa è stata, in questi anni, l'azione di controllo, anche con diffide, dei bandi anomali per le attività professionali di tipo geologico. Su questo tema è bene che il nuovo Consiglio continui ad intensificare gli sforzi per valorizzare le competenze professionali dei geologi favorendo anche l'inserimento dei giovani nell'attività professionale.

Non posso dimenticare la grande mole di lavoro svolto dalla commissione APC sia nell'organizzazione di eventi formativi decentrati e a basso costo, sia nelle verifiche di assolvimento dell'obbligo di aggiornamento professionale.

Un importante lavoro che va perseguito al nostro interno è quello di favorire la qualità dell'attività professionale, elevando gli standard, puntando sul decoro professionale (minato dalla sentenza n. 238/2015 del Consiglio di Stato) e al contrasto ai ribassi indecenti che investe tutte le professioni tecniche. Questo tema è stato all'attenzione costante del Consiglio che ha sollecitato la valutazione degli studi da parte degli organismi istruttori ed ha intrapreso un percorso delle verifiche presso gli enti per il rispetto delle norme a tutela della qualità della progettazione geologica e della sicurezza pubblica degli interventi. Rilevante è stata l'azione di sensibilizzazione degli enti e dell'ANCI Puglia, finalizzata soprattutto al rispetto del divieto di subappalto della relazione geologica (di esclusiva competenza del geologo), all'applicazione delle tariffe previste dal decreto parametri.

Il Consiglio non ha condiviso l'iniziativa promossa dalla Fondazione del CNG sulla certificazione di qualità dello "studio geologico di eccellenza" ed ha formalizzato con specifica delibera la posizione dell'Ordine, dopo aver ascoltato gli iscritti nelle assemblee territoriali di dicembre scorso.

Infine, intendo ricordare la nostra funzione attiva nell'evidenziare l'illegittimità della Legge regionale n. 28/2016 sulla composizione delle Commissioni locali per il Paesaggio che prevede l'obbligo di "includere una figura professionale priva di titolo universitario" nelle commissioni composte da più di tre membri. Lo stesso Ufficio legislativo del Ministro dei Beni Culturali con una nota ha espresso serie perplessità sulla compatibilità della norma con il Codice del Paesaggio. Su tale base abbiamo chiesto al CNG di sostenere l'Ordine in un ricorso amministrativo con l'obiettivo di sollevare presso il Tar la questione di legittimità costituzionale.

Per ultimo è da evidenziare l'importante contributo dell'Ordine all'aggiornamento del prezzario delle Opere pubbliche della Regione Puglia, di prossima pubblicazione, con l'inserimento delle voci specifiche relative alla geotermia.

Certamente vanno migliorate, e rese più incisive, le azioni rivolte agli enti e, soprattutto, all'organismo regionale per l'istituzione di una specifica Sezione Geologica Regionale. Lo abbiamo sollecitato più volte. La nostra Regione deve dotarsi di una adeguata struttura tecnica ad indirizzo geologico finalizzata agli opportuni interventi a difesa del territorio dai rischi geologici, a tutela dell'ambiente e per l'aggiornamento della cartografia geologica. Non possiamo più accettare la giustificazione della mancanza di risorse finanziarie.

Rinnovo il mio ringraziamento a tutto il Consiglio e ringrazio il Consiglio di Disciplina per il lavoro svolto e i tanti colleghi che in questi anni hanno stimolato l'azione dell'Ordine con contributi e idee per l'affermazione della geologia professionale.

Bari, maggio 2017

Salvatore Valletta

PROPOSTA DI REVISIONE DEL METODO RHRS PER LA VALUTAZIONE E ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI PERCORRENZA VEICOLARE DELLE STRADE IN CASO DI FRANE: IL CASO DI STUDIO DELLA SP n. 76 PRESICCE-SPECCHIA (PUGLIA)

Giovanni Bruno

DICATECh - Politecnico di Bari E-mail: giovanni.bruno@poliba.it
Iscritto ORG Puglia n. 181ES

ABSTRACT

The definition of traveling vehicle hazard rating along the communication roads, due to rock fall, is often difficult because of the several factors that govern the mechanisms of slopes stability and the interference of them with the constructive characteristics of the road.

For this purpose, the use of the Rock fall Hazard Rating System (RHRS), which is a method of indexed zoning of the driving hazard developed by the Federal Transport Department of the United States, is very useful. Recently, a modified RHRS has been proposed to adapt the use of this method to Italian roads.

The present case-study concerns twelve road sections, along a 1.3 km stretch of the provincial road No. 76 Presicce-Specchia, located in the Salento peninsula (Southern Italy), which has been affected by rock falls in the road sections No. 8.

Preliminarily a geomechanical survey has been done, executed in three stations (geomechanical stations 1, 2 and 3), followed by a rock masses classification and graphical stability analysis of rock mass slopes. The rock masses classifications, and particularly the Romana SMR (Slope Mass Rating) index, are commonly used to assess the rock slopes stability and the choice of support measures. Then, since the value of SMR is one of the necessary parameters for the modified RHRS definition, for each of the twelve road sections analysed the SMR index has been calculated, including considerations and suggestions proposed for the slope stabilization. Moreover, as the SMR index does not account for the height of the slope as the CSMR index is doing, the last index is calculated for each of the sections, in order to decide which of the two is more performant for the RHRS index calculation.

The RHRS values obtained in the twelve road sections of the case study, as function of the SMR and CSMR indexes, shows that the maximum value of the driving hazard degree has been obtained for Section No. 8, in the Specchia→Presicce traffic direction. In this section, where rock landslide has been really occurred, the $RHRS_{max} = 332.83$, for both the input parameter SMR or CSMR, corresponds to a "medium priority of intervention area". All the other sections show a substantial stability of the slopes and RHRS values corresponding to a "low intervention priority".

Finally, by means a correspondence matrix, it has been checked the congruence between the RHRS classes

of traveling vehicle hazard, the slope stability conditions suggested by the SMR and CSMR indexes and the really slope stability conditions observed in situ.

The obtained results show clearly how the CSMR index is more appropriate than the SMR to evaluate the stability conditions of slopes with heights appreciably different from $H = 80$ m; for this reason it is suggested to use the CSMR instead of SMR for the calculation of the RHRS index.

Key words: *Review of RHRS (Rock fall Hazard Rating System), SMR and CSMR, Slopes stability*

INTRODUZIONE

La definizione della pericolosità di percorrenza di una strada, in seguito all'improvviso verificarsi di un evento franoso che invadendo la carreggiata coinvolga direttamente o indirettamente uno o più veicoli in transito, è un'operazione di complessa realizzazione (Bunce C. M. 1994; Bunce C. M. *et al.* 1997). Tale complessità scaturisce dai meccanismi d'interferenza che occorrono fra le caratteristiche costruttive della strada, il suo stato di uso e manutenzione e gli aspetti geologici legati alla probabilità di accadimento ed estensione dell'evento franoso. Per quanto riguarda gli aspetti geologici, specialmente nei casi in cui la strada presenti tratti a mezzacosta, prospicienti fronti di scavo o versanti naturali costituiti da ammassi rocciosi, le difficoltà sono aggravate dall'elevato numero di fattori che governano la stabilità del versante e dalla complessità dei meccanismi di frana che si possono innescare (Romana M. 1991, 1993).

In questi casi può essere utile l'uso di un metodo numerico, per la stima e la zonazione della pericolosità di percorrenza veicolare di una strada, come il Rock fall Hazard Rating System "RHRS".

Il metodo RHRS è basato sulla parametrizzazione dei principali fattori che governano la pericolosità del sistema, eseguita in modo oggettivo in corrispondenza di sezioni trasversali all'asse stradale e nei due sensi di marcia dei veicoli. Tuttavia, la zonazione del grado di pericolosità, finalizzata alla pianificazione degli interventi di rimozione e/o mitigazione del rischio da frana, soggiace spesso a limitazioni e condizionamenti di varia natura: tecnici, economici, paesaggistici, etc., soprattutto per quelle strade che si sviluppano in territori ad elevata valenza naturalistica e paesaggistica (Whiteside P. G. D. 1986).

L'RHRS, sviluppato dal Dipartimento Federale dei

Trasporti degli Stati Uniti intorno agli anni novanta del secolo scorso (Pierson L. A. *et al.* 1990; National Highway Institute 1993), è stato recentemente testato in alcune strade italiane riscontrando la necessità di adottare alcune modifiche al metodo originale (Scesi L. *et al.* 2001; Budetta P., Panico M. 2002; Budetta P. 2004).

Il caso di studio in esame riguarda dodici sezioni stradali distribuite lungo un tratto di circa 1,3 km della strada provinciale n. 76 Presicce-Specchia (Fig. 1).

La strada si trova nella penisola salentina (Sud Italia) e in alcuni punti si sviluppa a mezzacosta, fiancheggiata da versanti naturali e/o fronti di scavo in ammassi rocciosi calcarei. Nel tratto di strada in corrispondenza della sezione stradale n. 8 il versante ha manifestato problemi di instabilità per frana; ciò ha costretto l'Amministrazione della Provincia di Lecce a chiudere al traffico il tratto di strada ed eseguire lavori di stabilizzazione del fronte per ripristinare la necessaria sicurezza per il traffico veicolare.

Nella presente ricerca, inoltre, si propone una revisione del metodo RHRS modificato per valutare, attraverso l'uso dell'indice CSMR (Zuyy C. H. 1995) al posto dell'SMR (Romana M. 1991, 1993), l'influenza che può avere l'altezza del versante sul parametro che tiene conto delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso roccioso, nel calcolo dell'indice RHRS (Pierson L. A. *et al.* 1990; National Highway Institute 1993).

INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA E CARATTERIZZAZIONE FISICO-MECCANICA DELLA ROCCIA CALCAREA INTATTA E DELL'AMMASO ROCCIOSO

Il tratto di strada in esame è ubicato sul lato Ovest della cosiddetta "Serra di Cianci", un rilievo strutturale (horst) bordato verso Nord-Est da una faglia diretta, il cui piano non è sempre ben visibile, che in quest'area ha un'estensione lineare di 750 m e un rigetto verticale di circa 30 m (Fig. 2).

La successione stratigrafica in affioramento è costituita da un substrato calcareo di epoca mesozoica sul quale giacciono, con contatto trasgressivo o per faglia, delle rocce calcarenitiche di epoca Plio-pleistocenica.

Nel dettaglio le rocce del substrato appartengono alla Formazione del Calcare di Altamura (Cretaceo sup.). Si tratta di calcari biancastri, microcristallini e molto tenaci alternati a orizzonti dolomitici dal colore grigio-bruno. I litotipi si presentano ben stratificati, con spessore degli strati variabile da 20 a 50 cm (Pieri P. *et al.* 2011), e interessati da discontinuità ad assetto sub-verticale che dividono l'ammasso roccioso in blocchi elementari (VRU) di diverse forme e dimensioni. L'ammasso presenta in qualche caso fratture alterate e/o riempite da limi argillosi residuali "terre rosse" e, localmente, piccole cavità carsiche come quella rilevata immediatamente a NW

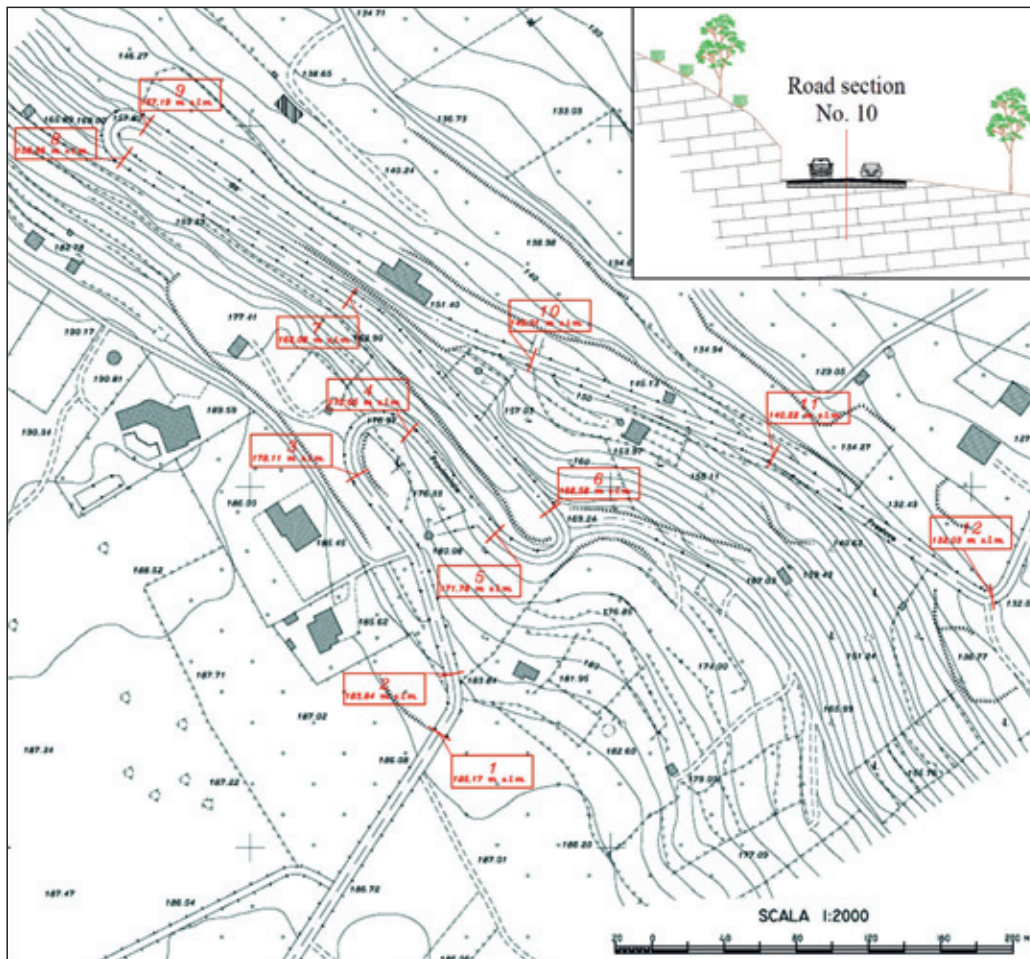


Figura 1 - Ubicazione delle 12 sezioni lungo il tratto di SP n. 76 studiato e schematizzazione della sezione stradale n. 10.

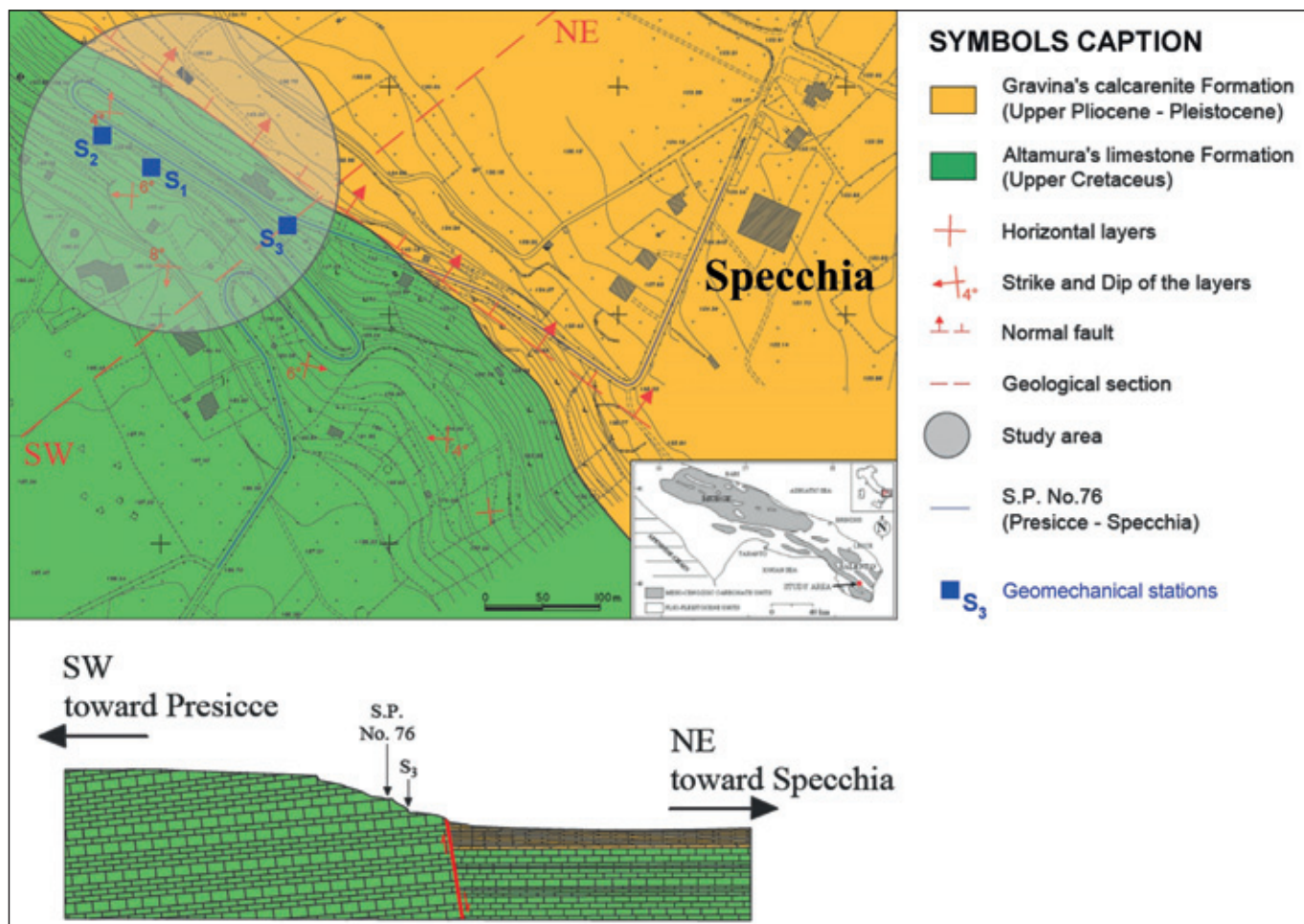


Figura 2 - Carta e sezione geologiche con indicazione dell'area di studio.

della stazione geomeccanica S_3 . Le rocce calcarenitiche, che giacciono sul substrato mesozoico, appartengono alla Formazione delle Carcareniti di Gravina (Pliocene sup. - Pleistocene inf.). Si tratta di rocce carbonatiche organogene di colore giallastro, dall'assetto prevalentemente massivo o solo blandamente stratificato, che dal punto di vista del comportamento geomeccanico possono essere ascritte alle "rocce tenere", cioè a rocce caratterizzate da resistenza a compressione semplice inferiore a 20 MPa (Bruno G. 2012).

Allo scopo di caratterizzare, da un punto di vista fisico-meccanico, la roccia intatta e l'ammasso calcareo dei versanti naturali/fronti di scavo che costeggiano in diversi punti la strada in esame, sono state eseguite delle prove di laboratorio (Tab. 1) e tre stazioni di misure geomeccaniche rappresentative delle condizioni dell'ammasso roccioso dei versanti, lungo il tratto di strada studiato (Fig. 2).

Due delle tre stazioni di misure (S_1 e S_2), sono state ubicate in prossimità della sezione stradale n. 8; tale scelta, come già accennato, è stata dettata dal fatto che in corrispondenza di questa sezione stradale il versante roccioso ha manifestato problemi di instabilità per frana.

I risultati dei rilievi geomeccanici, eseguiti con il metodo della scanline generalizzato (Bruno G. 2012), hanno consentito di definire il numero di famiglie di discontinuità che interessano l'ammasso roccioso e di ricavarne i parametri geomeccanici caratteristici (Tabb. 2 e 3).

Per la determinazione dei valori caratteristici dei parametri geomeccanici, di ognuna delle famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso, si è scelto di accorpate i dati rilevati nelle stazioni S_1 e S_2 (Tab. 2), data la vicinanza spaziale fra le due stazioni di misura e la corrispondenza riscontrata sia nel numero di famiglie di discontinuità che nella loro giacitura caratteristica, tenendo distinti i dati rilevati nella stazione S_3 (Tab. 3).

Unit weight γ_n (Kg/m ³)	Unconfined compressive strength σ_c (MPa)	Tensile strength σ_t (MPa)	Modulus of elasticity $E_{50\%}$ (MPa)	Poisson modulus ν	Friction angle ϕ (°)
2350	140	5.0	37000	0.3	45

Tabella 1 - Valori caratteristici dei parametri fisico-meccanici dei Calcari di Altamura.

	K₁ (Joint)	K₂ (Joint)	K₃ (Joint)	K₄ (Joint)	K₅ (Joint)	Ks (Layer)
Strike (°)	113	173	214	292	19	276
Dip (°)	48	76	73	84	75	7
Dip direction (°)	203	263	304	22	109	6
Length (m)	0.8	0.7	0.7	2.0	1.4	40
Aperture (cm)	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Spacing (cm)	46	52	100	30	99	39
JRC	5	6	11	8	9	3
JCS (MPa)	46	52	100	30	99	39
Friction angle φ (°)	35					
Elementary block dimension (m³)	0.06 (K ₂ -K ₄ -K _s) ÷ 0.51 (K ₂ -K ₃ -K ₅)					

Tabella 2 - Valori caratteristici dei parametri geomeccanici rilevati nelle stazioni S₁ e S₂.

	K₁ (Joint)	K₂ (Joint)	K₃ (Joint)	Ks (Layer)
Strike (°)	217	314	19	274
Dip (°)	68	83	78	5
Dip direction (°)	307	44	109	4
Length (m)	1.3	0.8	2.3	6.4
Aperture (cm)	0.0	0.0	0.1	0.1
Spacing (cm)	58	15	18	25
JRC	6	6	5	3
JCS (MPa)	70	64	61	31
Friction angle φ (°)	35			
Elementary block dimension (m³)	2.42 (K ₁ -K ₂ -K ₃)			

Tabella 3 - Valori caratteristici dei parametri geomeccanici rilevati nella stazione S₃.

CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO, ANALISI CINEMATICHE DI STABILITÀ DEI VERSANTI E METODI PER LA LORO STABILIZZAZIONE DESUNTI DALLA CLASSIFICAZIONE SRM

Le condizioni geologiche e strutturali dell'ammasso roccioso che costituisce i versanti prospicienti una strada costituiscono uno dei parametri necessari per il calcolo dell'indice RHRS. La versione modificata dell'indice, adattata per le strade italiane, tiene conto di tale parametro attraverso l'indice di classificazione SMR (Romana M. 1991; 1993) il quale, com'è noto, deriva direttamente dall'indice di classificazione RMR di Bieniawski a meno di quattro fattori correttivi (F₁, F₂, F₃, F₄) e si ottiene dalla seguente relazione:

$$SMR = RMR + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4$$

dove:

F₁ = 0.15 ÷ 1 (dipende dal parallelismo tra l'inclinazione del versante e quella delle discontinuità, nel caso di scivolamento planare, o della loro linea d'intersezione, nel caso di scivolamento di cunei di roccia)

F₂ = 0.15 ÷ 1 (si riferisce all'angolo d'inclinazione delle discontinuità, nel caso di scivolamento planare, o della loro linea d'intersezione, nel caso di scivolamento di cunei di roc-

cia. Nel caso di frane per ribaltamento F₂ assume sempre un valore pari a 1)

F₃ = - 60 ÷ 0 (riguarda la relazione fra l'inclinazione del versante e quella delle discontinuità, nel caso di scivolamento planare, o della loro linea d'intersezione, nel caso di scivolamento di cunei di roccia)

F₄ = - 8 ÷ +15 (tiene conto, nel caso di fronti di scavo, del metodo di scavo utilizzato)

Sulla base dei valori dell'indice SMR l'autore di tale classificazione ha stabilito cinque classi di qualità dell'ammasso roccioso (Tab. 4), cui fa corrispondere altrettante classi e tipi di stabilità del versante oltre che le tipologie d'intervento consigliate per la sua stabilizzazione (Romana M. 1995; 1996).

Si è proceduto, quindi, ad una preliminare classificazione dell'ammasso roccioso mediante l'indice Q (Barton N. 2002); i valori di Q ottenuti (Tab. 5), sono riferibili ad un ammasso di qualità scadenti (poor), in corrispondenza delle stazioni geomeccaniche S₁ ed S₂ (considerati validi per le sezioni stradali nn. 1 ÷ 8), e ad un ammasso di qualità discrete (fair) in corrispondenza della stazione geomeccanica S₃ (considerati validi per le sezioni stradali nn. 9 ÷ 12).

Dai valori dell'indice Q di Barton è stato possibile ottenere i valori dell'indice RMR (Bieniawski Z. T. 1979)

Classe	V	IV	III	II	I
SMR	0 – 20	21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Description	very bad	bad	normal	good	very good
Stability	completely unstable	unstable	partially stable	stable	completely stable
Failures	Big planar or soil - like	Planar or big wedge	Some joints or many wedges	Some blocks	None
Support	Reexcavation	Important/Corrective	Sistematic	Occasional	None

Tabella 4 - Classi di qualità dell'ammasso roccioso in funzione dell'indice SMR, grado di stabilità del versante e relative tipologie di stabilizzazione consigliate.

Station No.	Jv joints/m	RQD %	Jn (0.5 ÷ 20)	Jr (0.5 ÷ 4)	Ja (0.75 ÷ 20)	Jw (0.1 ÷ 1)	SRF (0.5 ÷ 20)	Q (Barton)	RMR (Bieniawski)
1-2	12.07	75.17	7.00	1.50	0.87	1.00	5.00	3.70 Poor	50.67 Fair
3	3.15	100.00	7.00	1.67	0.75	1.00	5.00	6.36 Fair	53.85 Fair

Tabella 5 - Parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso e indici "Q" ed "RMR", in corrispondenza delle stazioni geomeccaniche S₁ ÷ S₂ (considerati validi per le sezioni stradali nn. 1 ÷ 8) e S₃ (considerati validi per le sezioni stradali nn. 9 ÷ 12).

mediante la seguente relazione proposta da Rutledge T. C., Preston R. (1981):

$$RMR = 13.5 \cdot \log Q + 43$$

Come si evince dalla Tab. 5, in tutte e tre le stazioni geomeccaniche l'ammasso roccioso presenta valori dell'indice RMR riferibili ad una discreta qualità geomeccanica (fair) corrispondente alla classe III.

A questo punto, poiché in corrispondenza della stazione geomeccanica S₂ (sezione stradale n. 8) si sono verificati distacchi di blocchi di roccia che hanno invaso la carreggiata stradale, si è deciso di eseguire una verifica preliminare delle condizioni di stabilità dei versanti, nelle tre stazioni geomeccaniche, al fine di definire le eventuali tipologie di frana possibili. In tal senso, sono state eseguite delle analisi cinematiche di stabilità, condotte con metodi grafici mediante l'ausilio dei reticoli stereografici e con le metodiche proposte da Goodman R. E. (1980). I risultati ottenuti sono congruenti con il dissesto pregresso e confermano che lungo i versanti analizzati sono possibili sia cinematismi di scivolamento planare e/o di cunei rocciosi sia di ribaltamento di blocchi di roccia di forma allungata (Fig. 3).

Nel dettaglio, i cinematismi di scivolamento sono possibili nei versanti di tutte e tre le stazioni geomeccaniche, mentre quelli per ribaltamento sono possibili solo in corrispondenza dei versanti delle stazioni S₁ ed S₂ (Tab. 6).

Verificata, quindi, la possibilità di frane di singoli o gruppi di blocchi di roccia sono state ricostruite le tra-

Station No.	Sliding on plane	Sliding intersection line	along Toppling
1 - 2	K ₃ , K ₄ , K ₅ , K _S	I _{K2-K3} , I _{K2-K4} , I _{K3-K4} , I _{K4-K5}	K ₁
3	K ₁ , K ₂	I _{K1-K2}	-

Tabella 6 - Stazioni geomeccaniche 1 - 2 e 3: tipologie di cinematismi possibili e famiglie o intersezioni di famiglie di discontinuità che possono determinarle.

iettorie che tali blocchi possono percorrere, constatando che sostanzialmente tutte le possibili traiettorie intercettano la sede stradale in esame (freccie in arancio in figura 3).

Considerato che il valore dell'indice SMR è uno dei parametri necessari per la definizione dell'RHRS modificato, si è proceduto al calcolo del valore minimo (quello cioè che massimizza la pericolosità per frana), che tale indice presenta in ciascuna delle dodici sezioni stradali considerate (Fig. 1), secondo lo schema di calcolo (Tab. 7) che si riferisce alla sezione stradale n. 10.

Studi condotti in Cina da Zuyu C. H. (1995), hanno evidenziato come l'indice di stabilità dei versanti in roccia SMR sia influenzato dalle condizioni in cui si trovano le discontinuità dell'ammasso e, soprattutto, dall'altezza del versante se diversa da H = 80 m. L'autore, quindi, ha proposto una versione revisionata CSMR dell'indice SMR che tiene conto di questi due fattori e può essere calcolato con la seguente relazione:

$$CSRM = E \cdot SMR \cdot L$$

dove:

$$E = (0.57 \div 0.43) \cdot \frac{80}{H}$$

H (H: altezza del pendio in metri)

$$L = 1.0$$

(per discontinuità: giunti e piani di strato chiusi o poco aperti)

$$L = 0.8 \div 0.9$$

(per discontinuità: piani di strato o giunti estesi e con riempimento)

$$L = 0.7$$

(per discontinuità: faglie, filoni con riempimento)

Le altezze dei versanti, nelle dodici sezioni stradali considerate, variano da un minimo di H = 0.83 m (sezione n. 1) a un massimo di H = 11.64 m (sezione n. 8). Quindi, poiché esse sono sensibilmente inferiori all'altezza standard di H = 80 m per la quale è stato messo a punto l'indice SMR, si è deciso di calcolare, per ognuna delle sezioni stradali, entrambi i valori minimi degli indici SMR e CSMR in modo da poterne raffrontare i risultati

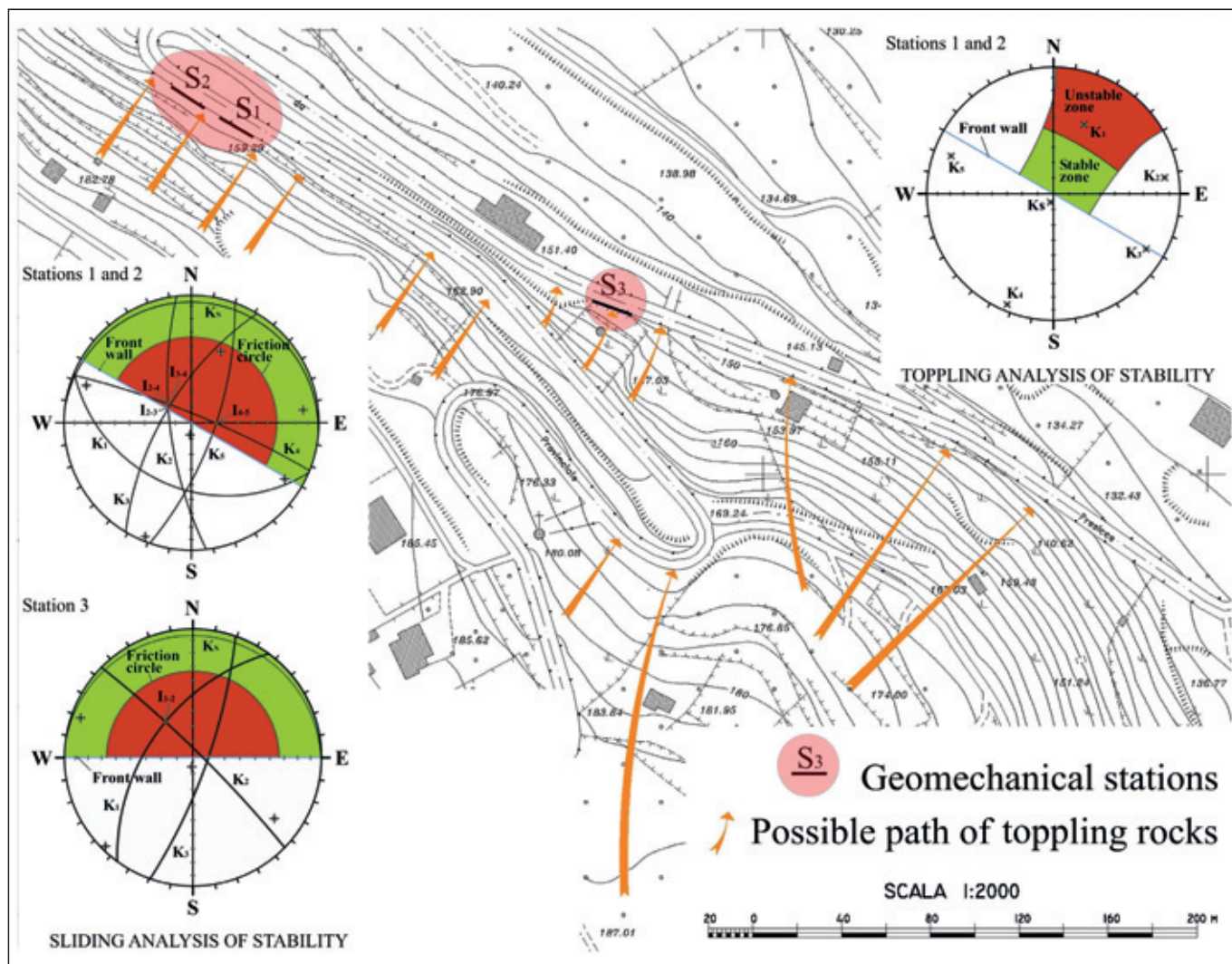


Figura 3 - Analisi cinematiche di stabilità dei versanti in corrispondenza delle stazioni geomeccaniche ($S_1 \div S_3$) e possibili traiettorie di espansione dei blocchi di roccia in caso di frane di crollo.

SMR calculation in to road section n° 10	Wedges sliding on I_{K1-K2} joints sets intersection		Planar sliding on K_1 joints set	
I_j (dip direction of joint)	323°		307°	
I_s (dip direction of slope)	0°		0°	
i_j (dip of joint)	60°		68°	
i_s (dip of slope)	90°		90°	
$(I_j - I_s)$	323	$F_1 = 0.15$	307	$F_1 = 0.15$
i_j	60	$F_2 = 1$	68	$F_2 = 1$
$i_j - i_s$	-30	$F_3 = -60$	-22	$F_3 = -60$
Digging method	Natural slope	$F_4 = 12$	Natural slope	$F_4 = 12$
RMR	53.85		53.85	
$SMR = RMR + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4$	56.85 → Classe III			

Tabella 7 - Sezione stradale n. 10 (in prossimità della stazione geomeccanica S_3): esempio di calcolo dell'indice SMR nel caso di scivolamenti planari lungo le discontinuità della famiglia K_1 e i cunei formati dalla discontinuità delle famiglie K_1-K_2 .

alla luce del grado di stabilità e degli eventuali interventi per la stabilizzazione suggeriti nella classificazione SMR da Romana M. (1996).

È necessario precisare che ai versanti i cui ammassi rocciosi hanno restituito un valore di CSMR ≥ 100 è stata attribuita la classe massima prevista dall'SMR e cioè la classe I.

L'analisi dei valori minimi di SMR (Tab. 8), ottenuti per le dodici sezioni stradali, mostra una scarsa variabilità dell'indice che risulta pari a $SMR = 12.67$ nel tratto di strada compreso fra le sezioni ($S_1 \div S_8$); nel tratto di strada compreso fra le sezioni ($S_9 \div S_{12}$), invece, l'indice assume un valore minimo pari a $SMR = 30.85$ (in corrispondenza della sezione stradale S_9) e un valore costante di $SMR = 56.85$ nelle tre stazioni da ($S_{10} \div S_{12}$). Secondo le indicazioni della classificazione SMR, quindi, l'ammasso in corrispondenza delle sezioni ($S_1 \div S_8$) appartiene alla V classe, i versanti sono da considerare completamente instabili e necessitano di interventi di sistemazione mediante muri a gravità da realizzare al piede. L'ammasso nella sezione stradale S_9 è di classe IV, il versante quindi è instabile e necessiterebbe anch'esso di interventi di stabilizzazione, ad esempio con muri di sostegno. Nel tratto di strada compreso fra le sezioni $S_9 \div S_{12}$, le condizioni geomeccaniche dell'ammasso sono migliori (III classe), tanto che i versanti risultano parzialmente stabili e gli eventuali interventi di stabilizzazione potrebbero consistere nell'applicazione puntuale di calcestruzzo proiettato.

Se consideriamo adesso i valori minimi ottenuti per l'indice CSMR (Tab. 8), il quale a differenza dell'SMR considera anche il contributo dell'altezza del versante nella valutazione della sua stabilità, si osserva che le condizioni dei versanti nelle dodici sezioni stradali variano notevolmente. Nel dettaglio il valore minimo, pari a $CSMR = 15.99$, si registra ancora una volta per la sezione stradale S_8 dove l'ammasso di classe V è completamente instabile (come confermato dalla frana pregressa) e necessita di interventi di stabilizzazione mediante muri di sostegno a gravità. In tutte le altre sezioni stradali, ad

eccezione delle S_{11} e S_{12} non si ha corrispondenza fra le classi dell'ammasso roccioso e, conseguentemente, fra le condizioni di stabilità del versante e gli interventi di stabilizzazione suggeriti, ottenuti con i due indici SMR e CSMR. Le discrepanze fra i due metodi di classificazione sono in qualche caso notevoli; ad esempio i versanti delle sezioni stradali S_1, S_2, S_4, S_6 se classificati con l'indice SMR risultano completamente instabili e bisognosi di pesanti interventi di stabilizzazione, mentre se classificati con l'indice CSMR risultano completamente stabili.

Dai dati esposti è evidente che l'introduzione dell'altezza del versante, mediante l'indice CSMR, modifica sensibilmente la classe di appartenenza dell'ammasso nel sistema di classificazione SMR. D'altronde, un riscontro sul campo fra i valori ottenuti per i due indici di classificazione e le reali condizioni di stabilità dei versanti, nelle diverse sezioni stradali, fa propendere per una maggiore correttezza e sensibilità dell'indice CSMR piuttosto che SMR.

VALUTAZIONE E ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI PERCORRENZA VEICOLARE MEDIANTE IL METODO RHRS REVISIONATO

Al fine di valutare la pericolosità per la percorrenza veicolare in seguito ad un improvviso evento franoso, che invadendo la sede stradale coinvolga gli eventuali veicoli in transito, il Dipartimento dei Trasporti dell'Oregon (USA) ha messo a punto nei primi anni '90 una metodologia, nota come RHRS o Rock fall Hazard Rating System (Pierson *et al.* 1990; Istituto Nazionale Highway 1993).

La metodologia consente di effettuare una zonazione di tipo comparativo delle priorità d'intervento volte

Road Section	SMR _{min}	Stability rank	Support measures	CSMR _{min}	Stability rank	Support measures
1	12.67 (V Class)	completely unstable	gravity wall	633.50 (I Class)	completely stable	none
2	12.67 (V Class)	completely unstable	gravity wall	230.36 (I Class)	completely stable	none
3	12.67 (V Class)	completely unstable	gravity wall	64.15 (II Class)	stable	nets bolting
4	12.67 (V Class)	completely unstable	gravity wall	202.72 (I Class)	completely stable	none
5	12.67 (V Class)	completely unstable	gravity wall	61.80 (II Class)	stable	nets bolting
6	12.67 (V Class)	completely unstable	gravity wall	149.06 (I Class)	completely stable	none
7	12.67 (V Class)	completely unstable	gravity wall	31.68 (IV Class)	unstable	wall shotcrete
8	12.67 (V Class)	completely unstable	gravity wall	15.99 (V Class)	completely unstable	gravity wall
9	30.85 (IV Class)	unstable	wall	226.43 (I Class)	completely stable	none
10	56.85 (III Class)	partially stable	spot shotcrete	142.13 (I Class)	completely stable	none
11	56.85 (III Class)	partially stable	spot shotcrete	49.65 (III Class)	partially stable	spot shotcrete
12	56.85 (III Class)	partially stable	spot shotcrete	42.11 (III Class)	partially stable	spot shotcrete

Tabella 8 - Valori minimi degli indici SMR, CSMR ottenuti per ogni sezione stradale con relativa classe del versante, indicazione del grado di stabilità del versante e degli eventuali interventi di stabilizzazione suggeriti in Romana M. (1996).

a rimuovere o ridurre la pericolosità lungo la strada considerata. Il metodo implementa una parametrizzazione numerica dei principali fattori che sovrintendono la pericolosità (P) per frana di un versante roccioso (altezza, caratteristiche geomeccaniche, volume di frana/dimensione del blocco, clima e presenza di acqua nel versante, frequenza degli eventi franosi) e la vulnerabilità (V) dei veicoli in transito (efficacia del vallo paramassi al piede del versante, rischio medio per veicolo, distanza di visibilità per l'arresto del veicolo e larghezza della carreggiata). È evidente, quindi, che l'indice RHRS, ove si stimi anche l'entità economica del costo (C) (connesso dall'evento franoso, in termini di vite umane o danni materiali, potrebbe essere utilizzato per quantizzare il rischio (R) lungo le strade mediante la nota relazione (González de Vallejo L. I. *et al.* 2005):

$$R = RHRS \cdot C$$

dove:

$$RHRS = P \cdot V$$

Il valore dell'indice RHRS, secondo l'originaria metodologia proposta da Pierson *et al.* (1990), può essere ottenuto dalla somma dei punteggi assegnati alle nove categorie di parametri che compongono la classifica (Tab. 9).

È di fondamentale importanza precisare che l'indice deve essere calcolato, in corrispondenza di ogni sezione stradale prescelta, per entrambi i sensi di marcia dei veicoli. Ciò in quanto i parametri connessi alle caratteristiche geometriche della strada e cioè alla vulnerabilità dei veicoli in transito, possono variare in relazione al senso di marcia dei veicoli, fornendo così un valore finale di RHRS che può differire sensibilmente a parità di sezione stradale considerata.

I valori di RHRS possono essere raggruppati in tre classi (Tab. 10) e consentono di effettuare una zonazione della pericolosità di percorrenza e di definire quali siano le sezioni stradali nelle quali vi è una priorità d'intervento, orientando altresì la scelta delle opere da realizzare sui versanti (attraverso le indicazioni suggerite dall'SMR) e/o le modifiche da apportare al tracciato stradale per ridurre

CATEGORY		RATING CRITERIA BY SCORE				
		Points 3	Points 9	Points 27	Points 81	
Slope height		7.5 m	15 m	22.5 m	> 30 m	
Ditch effectiveness		Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment	
Average vehicle risk (% of time)		25%	50%	75%	100%	
Decision sight distance (% design value)		Adequate (100%)	Moderate (80%)	Limited (60%)	Very limited (40%)	
Roadway width (including paved shoulders)		13.2 m	10.8 m	8.4 m	6 m	
Geologic characteristics	Case 1	Structural condition	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
		Friction	Rough, irregular	Undulating	Planar	Clay infilling or slickensided
	Case 2	Structural condition	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features	Major erosion features
		Difference in erosion rates	Small	Moderate	Large	Extreme
	Block size		0.3 cm	0.6 m	0.9 m	1.2 m
	Volume of rock fall per event		2.3 m ³	4.6 m ³	6.9 m ³	9.2 m ³
	Climate and presence of water on slope		Low to moderate precipitation; no freezing periods; no water on slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope	High precipitation and long freezing periods
	Rock fall history		Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls

Tabella 9 - Categorie di parametri e relativi punteggi per il calcolo dell'indice RHRS secondo l'originaria metodologia proposta da Pierson L. A. *et al.* (1990).

	RHRS < 300	300 ≤ RHRS ≤ 500	RHRS > 500
PRIORITÀ D'INTERVENTO	Low priority intervention area	Medium priority intervention area	High priority intervention area

Tabella 10 - Valore di RHRS e relative priorità d'intervento nelle sezioni stradali (da: Pierson L. A. *et al.* 1990).

o eliminare tale pericolosità.

L'applicabilità della metodica RHRS è stata testata in alcune strade italiane (Scesi L. *et al.* 2001; Budetta P., Panico M. 2002; Budetta P. 2004; Budetta P. *et al.* 2005), riscontrando la necessità di apportare delle modifiche nelle modalità di calcolo di alcuni parametri dell'originaria metodica. Nella versione modificata dell'RHRS, proposta dai ricercatori italiani, i parametri: efficacia del vallo paramassi al piede del versante, larghezza della strada, caratteristiche geologiche del versante, clima e presenza di acqua nel versante, frequenza degli eventi franosi che nell'originario metodo venivano stimati qualitativamente, vengono adesso stimati con metodiche più oggettive (confrontare Tab. 9 e Tab. 11).

Fra tutte le correzioni apportate dai ricercatori italiani nella versione RHRS modificato, quella di maggior rilievo riguarda l'introduzione dell'indice di classificazione SMR di Romana per stimare il punteggio da attribuire al parametro che tiene conto delle caratteristiche geologiche dei versanti prospicienti le strade. Importanti modifiche sono state anche l'adeguamento del parametro larghezza della strada alle norme tecniche italiane (D.M. n° 6792 - 05/11/2001) e la valutazione dell'efficacia del vallo paramassi mediante l'abaco di Ritchie (Ritchie A. M. 1963).

Nel paragrafo precedente si è confermata, anche per il caso di studio in esame, la significativa influenza determinata dall'altezza del versante sul valore del parametro SMR che, nell'indice RHRS modificato (Tab. 11) esprime

le condizioni geologiche dei versanti o, più precisamente, le loro condizioni di stabilità.

In questa sede si propone l'adozione di un indice RHRS revisionato che anziché utilizzare l'SMR di Romana per descrivere la stabilità dei versanti, utilizzi il CSMR di Zuyu lasciando inalterati i punteggi da attribuire ai parametri per il calcolo del nuovo RHRS revisionato (Tab. 12).

Un esempio di calcolo dell'RHRS revisionato per la sezione stradale n. 9 del caso di studio è riportato in Tab. 13 dove i calcoli tengono conto di un'altezza fissa del versante di $H = 2.80$ m e di due possibili valori del traffico veicolare medio pari a $Rmv_1 = 208$ veicoli/ora e $Rmv_2 = 416$ veicoli/ora. La necessità di considerare due valori di Rmv è scaturita dal fatto che per questa strada provinciale non esistono dati ufficiali di rilevazione dell'entità del traffico veicolare.

Dai dati in tabella si evince come il valore dell'indice RHRS, ottenuto nelle due opposte direzioni di marcia e per tutte le combinazioni dei parametri considerati, presenti valori diversi per ognuna delle due direzioni di marcia considerate. Nel dettaglio in direzione Specchia ($RHRS_{min} = RHRS_{max} = 172.81$) mentre in direzione Presicce ($RHRS_{min} = 157.68$ e $RHRS_{max} = 163.68$). Ovviamente, per tutte le sezioni stradali considerate nel caso in esame, si è scelto di utilizzare, a vantaggio della sicurezza, il valore di RHRS massimo fra tutti quelli ottenuti ai fini della zonazione delle priorità d'intervento.

CATEGORY	RATING CRITERIA BY SCORE			
	Points 3	Points 9	Points 27	Points 81
Slope height (Hs)	7.5 m	15 m	22.5 m	> 30 m
Ditch effectiveness (Ev)	Good catchment: properly designed according to updates of Ritchie's ditch design chart + barriers	Moderate catchment: properly designed according to updates of Ritchie's ditch design chart	Limited catchment: wrongly designed	No catchment
Average vehicle risk (Rmv) (% of time)	25%	50%	75%	100%
Decision sight distance (Dap) (% design value)	Adequate (100%)	Moderate (80%)	Limited (60%)	Very limited (40%)
Roadway width (Ls)	21.5 m	15.5 m	9.5 m	3.5 m
Slope Mass Rating (SMR)	≥ 80	40	27	≤ 20
Block size (D)	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm
Boulder volume (VRU)	26 dm ³	0.21 m ³	0.73 m ³	1.74 m ³
Volume of rock fall per event (Vcr)	2.3 m ³	4.6 m ³	6.9 m ³	9.2 m ³
Annual rainfall and freezing periods (Hp)	Hp = 300 mm no freezing periods	Hp = 600 mm or short freezing periods	Hp = 900 mm or long freezing periods	Hp = 1200 mm or long freezing periods
Rock fall frequency (Fc)	1 per years	3 per years	6 per years	9 per years

Tabella 11 - Categorie di parametri per il calcolo dell'RHRS modificato e loro punteggi (da: Budetta e Panico 2002).

CATEGORY	RATING CRITERIA BY SCORE			
	Points 3	Points 9	Points 27	Points 81
Slope height (Hs)	7.5 m	15 m	22.5 m	> 30 m
Ditch effectiveness (Ev)	Good catchment: properly designed according to updates of Ritchie's ditch design chart + barriers	Moderate catchment: properly designed according to updates of Ritchie's ditch design chart	Limited catchment: wrongly designed	No catchment
Average vehicle risk (Rmv) (% of time)	25%	50%	75%	100%
Decision sight distance (Dap) (% design value)	Adequate (100%)	Moderate (80%)	Limited (60%)	Very limited (40%)
Roadway width (Ls)	21.5 m	15.5 m	9.5 m	3.5 m
Chinese Slope Mass Rating (CSMR)	≥ 80	40	27	≤ 20
Block size (D)	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm
Boulder volume (VRU)	26 dm ³	0.21 m ³	0.73 m ³	1.74 m ³
Volume of rock fall per event (Vcr)	2.3 m ³	4.6 m ³	6.9 m ³	9.2 m ³
Annual rainfall and freezing periods (Hp)	Hp = 300 mm no freezing periods	Hp = 600 mm or short freezing periods	Hp = 900 mm or long freezing periods	Hp = 1200 mm or long freezing periods
Rock fall frequency (Fc)	1 per years	3 per years	6 per years	9 per years

Tabella 12 - Categorie di parametri per il calcolo dell'RHRS revisionato e loro punteggi: in rosso il parametro oggetto di revisione.

Rock fall Hazard Rating System "RHRS"				
Road Section n° 9 (Km 4 + 188 - Altitude: 157.20 m a.s.l.)				
Parameters	towards Specchia		towards Presicce	
	VALUE	SCORE	VALUE	SCORE
Slope height	Hs ₁ = 2.80 m Hs ₂ = 2.80 m	3.00 3.00	Hs ₁ = 2.80 m Hs ₂ = 2.80 m	3.00 3.00
Ditch effectiveness	Ev = not present	81.00	Ev = not present	81.00
Average vehicle risk 208 vehicle/hour (Rmv ₁) 416 vehicle/hour (Rmv ₂)	Rmv ₁ = 25.00% Rmv ₂ = 50.00%	3.00 9.00	Rmv ₁ = 25.00% Rmv ₂ = 50.00%	3.00 9.00
Decision sight distance (% of design value)	Dap = 67.35 %	18.03	Dap = 100%	3.00
Roadway width	Ls = 7 m	42.67	Ls = 7 m	42.67
CSMR	CSMR = 226.43	3.00	CSMR = 226.43	3.00
Volume of rock fall for event	Vcr = 2.39 m ³	3.13	Vcr = 2.39 m ³	3.13
Annual rainfall	Hp = 755.12 mm	15.88	Hp = 755.12 mm	15.88
Rock fall frequency	Fc = 1 to 10 years	3.00	Fc = 1 to 10 years	3.00
RHRS_n = ∑ (Ev + Dap + Ls + Cgs + Vcr + Hp + Fc) + Hs_n + Rmv_n				
towards Specchia		towards Presicce		
RHRS _{min} = ∑ (...+...) + Hs ₁ + Rmv ₁ = 172.71		RHRS _{min} = ∑ (...+...) + Hs ₁ + Rmv ₁ = 157.68		
RHRS _{max} = ∑ (...+...) + Hs ₂ + Rmv ₂ = 178.71		RHRS _{max} = ∑ (...+...) + Hs ₂ + Rmv ₂ = 163.68		
RHRS_{max} = 178.71				

Tabella 13 - Esempio di calcolo dell'RHRS per la sezione stradale n. 9: il valore di massima pericolosità di percorrenza (RHRS_{max} = 178.71) si è ottenuto per i veicoli che transitano dalla sezione in direzione Specchia.

I valori massimi degli indici $RHRS_{max}$ (Tab. 14), calcolati in funzione dell'indice di Romana ($RHRS_{max}$ (SMR)), sono compresi entro il range 192.27 (sezione stradale n. 10 in entrambi i sensi di marcia) e 332.83 (sezione stradale n. 8 in direzione Specchia → Presicce); quelli calcolati in funzione dell'indice di Zuyu ($RHRS_{max}$ (CSMR)), sono compresi entro il range 178.71 (sezione stradale n. 9 in direzione Presicce → Specchia) e 332.83 (sezione stradale n. 8 in direzione Specchia → Presicce).

Per quanto riguarda la zonazione delle priorità di intervento, si osserva come i valori massimi di RHRS ottenuti per ogni sezione, con i due metodi di calcolo, siano leggermente differenti fatta eccezione per la sezione stradale n. 8 dove i valori sono identici e presentano il valore di RHRS massimo assoluto. La differenza riscontrata nei valori delle diverse sezioni, tuttavia, riguarda solamente il valore massimo che assume l'indice RHRS a seconda del metodo utilizzato per il calcolo e non il senso di marcia nel quale tale valore si ottiene.

Classificando le dodici sezioni stradali in base alle tre classi di priorità di intervento della Tab. 10, si osserva che solo la sezione n. 8 presenta un livello di priorità d'intervento medio mentre tutte le altre presentano un livello di priorità basso. Questa circostanza indurrebbe a pensare che l'uso dell'indice RHRS modificato (in funzione del parametro SMR) o quello proposto in questa sede, dell'RHRS revisionato (in funzione del parametro CSMR) sia equivalente in quanto conduce ad una medesima zonazione della pericolosità di percorrenza della strada.

Al fine di fugare l'apparente inutilità della proposta, qui avanzata, di usare l'indice CSMR al posto dell'SMR

per calcolare l'indice RHRS revisionato, è stata approntata una matrice di congruenza, nella quale sono state messe a confronto, per ogni sezione stradale, la classe di priorità di intervento secondo l'RHRS di Pearson's, le condizioni di stabilità del versante secondo le classificazioni SMR e CSMR e, infine, le reali condizioni di stabilità osservate in situ (Tab. 15).

Dai dati riportati in tabella si evince che esiste una forte congruenza (scritte in verde) fra le priorità di intervento scaturite dalla classificazione mediante l'indice RHRS revisionato, le condizioni di stabilità desunte dall'indice CSMR, e le reali condizioni di stabilità osservate in situ. Le condizioni di stabilità valutate mediante l'indice SMR sono incongruenti (in rosso) con le reali condizioni in situ per tutte le sezioni stradali eccezion fatta per la n. 8.

CONCLUSIONI

Il metodo Rock fall Hazard Rating System (RHRS) è uno strumento ideato per un primo livello di zonazione della pericolosità di percorrenza veicolare delle strade in caso di eventi franosi che invadano la sede stradale. Tale metodo, messo a punto ed utilizzato negli Stati Uniti, è stato testato da alcuni ricercatori italiani, in alcune strade del Nord e Sud Italia, riscontrando la necessità di introdurre delle modifiche al metodo originale.

Nel presente studio, si è applicato il metodo RHRS ad un tratto della SP n. 76 Presicce-Specchia, che aveva manifestato instabilità per frana, con l'intento di verificare la rispondenza del metodo ai fini della zonazione della pericolosità di percorrenza veicolare. Nello stesso tempo, si è provato a stimare il punteggio di uno dei parametri

Road section	$RHRS_{max}$ (SMR)	Pierson's priority Classification	$RHRS_{max}$ (CSMR)	Pierson's priority Classification
1	262.04 (towards Presicce)	Low intervention priority area	184.04 (towards Presicce)	Low intervention priority area
2	256.83 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area	178.83 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area
3	258.01 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area	182.39 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area
4	257.83 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area	179.83 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area
5	296.90 (towards Presicce)	Low intervention priority area	221.63 (towards Presicce)	Low intervention priority area
6	265.62 (towards Specchia)	Low intervention priority area	187.62 (towards Specchia)	Low intervention priority area
7	266.25 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area	205.77 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area
8	332.83 (towards Presicce)	Medium intervention priority area	332.83 (towards Presicce)	Medium intervention priority area
9	197.38 (towards Specchia)	Low intervention priority area	178.71 (towards Specchia)	Low intervention priority area
10	192.27 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area	188.80 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area
11	262.85 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area	263.93 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area
12	262.85 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area	265.06 (entrambi i sensi)	Low intervention priority area

Tabella 14 - Valori massimi di pericolosità di percorrenza e classi di priorità d'intervento per ognuna delle dodici sezioni stradali: calcolati tenendo conto della direzione di transito e in funzione degli indici di classificazione di Romana $RHRS_{max}$ (SMR) e di Zuyu $RHRS_{max}$ (CSMR).

Tabella 15 - Matrice di congruenza fra le priorità d'intervento desunte dall'indice RHRS_{max} revisionato, le condizioni di stabilità dei versanti valutate con le diverse metodologie adottate e le reali condizioni osservate in situ (in verde le sezioni stradali con giudizi di stabilità congruenti con le reali condizioni in situ).

Road section	RHRS _{max} Pierson's priority Classification	SMR Stability conditions	CSMR Stability conditions	Observed stability conditions
1	Low intervention priority area	completely unstable	completely stable	stable
2	Low intervention priority area	completely unstable	completely stable	stable
3	Low intervention priority area	completely unstable	stable	stable
4	Low intervention priority area	completely unstable	completely stable	stable
5	Low intervention priority area	completely unstable	stable	stable
6	Low intervention priority area	completely unstable	completely stable	stable
7	Low intervention priority area	completely unstable	unstable	stable
8	Medium intervention priority area	completely unstable	completely unstable	completely unstable
9	Low intervention priority area	unstable	completely stable	stable
10	Low intervention priority area	partially stable	completely stable	stable
11	Low intervention priority area	partially stable	partially stable	stable
12	Low intervention priority area	partially stable	partially stable	stable

che concorrono alla definizione dell'indice RHRS, cioè quello che tiene conto delle caratteristiche geologiche e strutturali dei versanti prospicienti la sede stradale, non mediante l'indice SMR di Romana (proposto con l'RHRS modificato dai ricercatori italiani) bensì mediante l'indice CSMR di Zuyu.

I risultati ottenuti adottando l'indice CSMR anziché SMR per il calcolo dell'indice di pericolosità RHRS revisionato, sono molto confortanti. Infatti, si è constatata una forte congruenza fra la classe di pericolosità attribuita alle dodici sezioni stradali studiate tramite l'indice RHRS calcolato in funzione del CSMR, le condizioni di stabilità del versante desunte dalla classificazione CSMR e le reali condizioni di stabilità osservate in situ.

Solo in corrispondenza della sezione stradale n. 8, dove in realtà si è verificata una frana che ha invaso la sede stradale costringendo l'Amministrazione della Provincia di Lecce a chiudere la strada e a fare dei lavori di messa in sicurezza del versante (Fig. 4), l'SMR di Romana indica condizioni di instabilità del versante congruenti con quelle riscontrate nella realtà.

Per i versanti di tutte le altre sezioni stradali l'indice SMR, non tenendo conto dell'altezza del versante, tende a sottostimare le reali condizioni di stabilità. Alla luce di ciò, si suggerisce l'uso dell'indice CSMR anziché SMR

per valutare il punteggio da attribuire al parametro che tiene conto delle condizioni geologico-strutturali del versante nel calcolo dell'RHRS revisionato.

BIBLIOGRAFIA

BARTON N. (2002) - Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. Int. J. Rock Mech. Min. Scie. 39:185-216

BIENIAWSKI Z. T. (1979) -The Geomechanics Classification in rock engineering applications. In: Proceedings of 4th Int. Congr. on Rock Mech. 2: 51-58, Balkema (ed), Rotterdam

BRUNO G. (2012) - Caratterizzazione geomeccanica per la progettazione ingegneristica. Dario Flaccovio Editore, Italy, ISBN 978-88-579-0150-3

BUDETTA P., PANICO M. (2002) - Il metodo Rockfall Hazard Rating System modificato per la valutazione del rischio da caduta massi sulle vie di comunicazione. Geologia tecnica & ambientale 2/2002: 37-46

BUDETTA P. (2004) - Assessment of rockfall risk along roads. Natural Hazards and Earth System Sciences (2004): 71-81

BUDETTA P., DE RISO R., SANTO A. (2005) - Landslide hazard and risk along the campanian roads (Italy) - GEO-LINE 2005, 23-25 May, Lion (France), 1-13

BUNCE C. M. (1994) - Risk analysis for rock fall on



Figura 4 - Condizioni del pendio, in prossimità della sezione stradale n. 8 (stazioni geomeccaniche S₁ e S₂) dopo i lavori di stabilizzazione eseguiti dall'Amministrazione Provinciale di Lecce: a) muro di sostegno a gravità (foto a sinistra); b) rete metallica di contenimento (foto a destra).

high-ways. M. Sc. thesis, University of Alberta, Canada

BUNCE C. M., CRUDEN D. M. and MORGENSTERN N. R. (1997) - Assessment of the hazard from rockfall on a highway. *Can. Geotech. J.* 34: 344-356

D.M. n° 6792 (05/11/2001) - Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade. Italy

GONZÁLEZ DE VALLEJO L. I., FERRER M., ORTUÑO L., OTEO C. (2005) - *Geoingegneria*. Ed. Pearson Ed. Italia S.r.l., ISBN 88-7192-094-5

GOODMAN R. E. (1980) - *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons (ed.), New York

NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE (1993) - *Rockfall Hazard Rating System participant's manual*. NHI Course No. 130220, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA SA-93-057

PIERI P., SABATO L., SPALLUTO L., TROPEANO M. (2011) - Note illustrative della Carta geologica d'Italia in scala 1:50.000 Foglio 438 "Bari". ISPRA, Servizio Geologico d'Italia, Litografia Artistica Cartografica, Firenze

PIERSON L. A., DAVIS S.A., VAN VICKLER R. (1990) - *Rock fall Hazard Rating System Implementation Manual*. Federal Highway Administration (FHWA). Report FHWA - OR-EG-90-01. FHWA, U.S. Department of Transportation

RITCHIE A. M. (1963) - *Evaluation of rock fall and its control*. U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, and the Washington State Highway Commission

ROMANA M. (1991) - SMR classification. *Proceedings of 7th Int. Cong. Rock Mech.* 955-960, Balkema (ed), Rotterdam

ROMANA M. (1993) - A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating. In "Comprehensive Rock Engineering", J. Hudson (ed) 3: 575-600 Pergamon

ROMANA M. (1995) - The geomechanical classification SMR for slope correction. *Proceedings of 8th Int. ISRM Congress*, Fujii (ed)

ROMANA M. (1996) - The SMR geomechanical classification for slopes: A critical ten-years review. *Proceedings of 8th Int. Conf. on Landslides*, Spain

RUTLEDGE T. C. and PRESTON R. (1981) - Experience with engineering classification of rock for prediction of tunnel support. *Proc. Int. Tunnel Symp.* A3, Tokio

SCESI L., SENO S., GIOIA U. and MAZZUCHELLI A. (2001) - Pareti rocciose instabili e strade: un sistema di valutazione delle priorità di intervento. *Associazione Georisorse ed Ambiente (GEAM)*, 102, n. 1 Marzo, Torino

WHITESIDE P. G. D. (1986) - Discussion on rock fall protection measures. *Conf. on. Rock Eng. and Excavation in an Urban Env.*, Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong 490-498

ZUYU C. H. (1995) - Recent developments in slope stability analysis Keynote lecture. *Proceedings of 8th Int. ISRM Congress*, Fujii (ed)



Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA)
Sezione Puglia



ORDINE DEI GEOLOGI
DELLA PUGLIA

con il patrocinio



Regione Puglia

organizzano il

CONCORSO FOTOGRAFICO

“Passeggiando tra i Paesaggi Geologici della Puglia”

8^a edizione 2017



La SIGEA Sezione Puglia e l'Ordine dei Geologi della Puglia, al fine di promuovere la conoscenza e la valorizzazione dei siti di interesse geologico (geositi) e i paesaggi geologici della Regione Puglia, bandiscono l'ottava edizione del concorso fotografico come di seguito specificato.

Il concorso prevede le seguenti **Sezioni**:

- A. “Paesaggi geologici o geositi”**
- B. “La geologia prima e dopo l'Uomo”**
- C. “Una occhiata al micromondo della geologia”**

La sezione A sarà dedicata ad immagini di luoghi, paesaggi, siti a valenza geologica dove gli elementi geologici o i singoli affioramenti hanno sviluppato forme di qualsiasi tipo e genere.

La sezione B sarà dedicata ad immagini di opere antropiche che si integrano nel contesto geologico o geomorfologico.

La sezione C sarà dedicata ad immagini di elementi paleontologici, sedimentologici e petrografici ripresi a dimensioni naturali o al microscopio.

La partecipazione al concorso è **TOTALMENTE GRATUITA**. Possono partecipare tutti coloro che sono interessati a condividere le emozioni ricevute attraverso la rappresentazione di uno degli aspetti dei “paesaggi geologici” della Puglia.

Le foto dovranno essere inviate entro il **30 settembre 2017**, seguendo le istruzioni disponibili sui siti web degli organizzatori. Info: foto.paesaggi.puglia@gmail.com

La premiazione, la cui data sarà comunicata sui siti web degli organizzatori, avverrà durante una manifestazione appositamente organizzata ed associata ad una iniziativa pubblica da tenersi in Bari.

Con il sostegno di



Apogeo S.r.l.

Via Caduti di Nassiriya, 170 - 70022 Altamura (Ba) - Tel. 080.3143324 - www.apogeo.biz

REGOLAMENTO, MODALITÀ DI PARTECIPAZIONE E SCHEDA AUTORE:

<http://puglia.sigeaweb.it> e www.geologipuglia.it

Info:

Segreteria organizzativa del concorso:

Silvio Spizzico (Ordine dei Geologi della Puglia) • *Antonello Fiore* (SIGEA Sezione Puglia)

Ordine dei Geologi della Puglia

Via Junipero Serra, 19 - 70125 BARI

LE ACQUE SULFUREE DELLE SORGENTI TERMALI DI SANTA CESAREA TERME

Francesca Santaloia^{1,2} - Livia Emanuela Zuffianò^{1,3} - Pier Paolo Limoni^{1,4}
Giuseppe Palladino^{5,1} - Domenico Liotta^{6,7} - Maurizio Polemio¹

¹CNR - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, Bari

²Iscritta all'ORG Puglia n. 99ES - ³Iscritta all'ORG Puglia n. 742 - ⁴Iscritto all'ORG Puglia n. 97ES

⁵Dipartimento di Geologia e Geologia Petrolifera - Università di Aberdeen

⁶Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali - Università degli Studi di Bari Aldo Moro

⁷CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse - Via G. Moruzzi, 7, Pisa

RIASSUNTO

Le sorgenti termali di Santa Cesarea Terme sgorgano in quattro grotte carsico-marine (Fetida, Solfurea, Gattulla e Solfatara) ubicate alla base di un tratto, lungo circa 500 m, di una falesia. Le loro acque, caratterizzate da temperature, in superficie, intorno ai 22-33°C sono attualmente utilizzate per la cura di alcune patologie, quali quelle respiratorie o dell'apparato locomotore.

Sulla terraferma, l'area dell'anomalia termica è circoscritta, estendendosi al massimo per un Km lungo costa e per meno di due Km nell'entroterra. Essa ricade nella porzione di un alto strutturale maggiormente dislocato dalle faglie NO-SE, subverticali e transtensive, che si estendono verso mare. Nel suo sottosuolo sono presenti tre tipi di acqua, tra loro interagenti: acqua dolce di falda, acqua salmastra o salina di intrusione marina e acqua termale. Considerando i caratteri geologici ed idrogeologici del territorio, insieme a quelli geochemici delle acque sotterranee circolanti nel suo sottosuolo, si ritiene che le sorgenti delle acque sulfuree di Santa Cesarea derivino da una circolazione profonda nel sottosuolo del Mare Adriatico.

INTRODUZIONE

La ricerca e l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile sono diventate una priorità mondiale, principalmente per l'insostenibilità di un sistema energetico basato sull'utilizzo di combustibili fossili, i quali tendono sia ad esaurirsi che a produrre riscaldamento globale tramite emissione di anidride carbonica. Il fotovoltaico, l'eolico e il geotermico sono alcune delle fonti energetiche rinnovabili utilizzate per soddisfare il crescente fabbisogno energetico nel rispetto dell'ambiente e della salute umana. In particolare, l'energia geotermica è l'energia terrestre presente sotto forma di calore nel Pianeta. Tale calore deriva dal processo di formazione primordiale dell'universo e quindi dal decadimento degli isotopi radioattivi dell'uranio (U^{238} , U^{235}), del torio (Th^{232}) e del potassio (K^{40}), presenti nella crosta e nel mantello terrestre.

Al di sotto della zona di omotermia, quindi a profondità maggiori di 15-20 metri, il calore è fornito unicamente dal flusso proveniente dall'interno della Terra con un aumento medio progressivo della temperatura di 1°C ogni 33 metri di profondità. Laddove si osservano anomalie geotermiche positive, il gradiente geotermico può

essere fino a 10-15 volte maggiore di quello medio (fascia tirrenica della penisola appenninica; Della Vedova *et al.*, 2001).

Queste anomalie si riscontrano in determinati contesti geologico-strutturali, quali quelli vulcanici, aree con assottigliamento crostale e/o presenza di intrusioni magmatiche in profondità. Nella penisola italiana, aree con elevato flusso di calore ($> 80 \text{ mW/m}^2$) si collocano sul lato tirrenico mentre le aree con valori inferiori, ($< 70 \text{ mW/m}^2$) ricadono sul lato adriatico della penisola (Della Vedova *et al.*, 2001).

Con riferimento al territorio pugliese, maggiori valori del flusso termico sono stati registrati in aree limitate (ad es. 80 mW/m^2 nel Tavoliere; Fig. 1), che in alcuni casi hanno dato luogo a manifestazioni sorgive termali (Maggiore e Pagliarulo, 2004). Tra queste annoveriamo le sorgenti di Santa Cesarea Terme presenti lungo un tratto della costa orientale salentina (Fig. 1c). Queste, note sin dai tempi di Aristotele (III secolo a.C.), sgorgano in quattro grotte carsico-marine (Fetida, Solfurea, Gattulla e Solfatara in Fig. 1c) ubicate alla base di una falesia rocciosa, per un tratto lungo circa 500 m. Le loro acque si presentano ricche in solfuro di idrogeno (H_2S), caratterizzate da temperature, in superficie, intorno ai 20-30°C e da conducibilità elettrica pari a $70000 \mu S/cm$ a 20 °C (Calò 1993). Esse sono utilizzate per la cura di alcune patologie respiratorie e dell'apparato locomotore (Nappi *et al.*, 2005).

Sulla loro origine sono state proposte diverse ipotesi, da quella vulcanica (Milani, 1815) a quella connessa alla risalita di fluidi caldi connati presenti nel substrato pre-neogenico in subduzione nell'Adriatico (Maggiore e Pagliarulo, 2004). Inoltre, l'elevato contenuto in zolfo di queste acque è stato interpretato come dovuto alla formazione di solfuro d'idrogeno derivante da attività batterica (Biginelli, 1899) sulla sostanza organica presente nelle successioni sedimentarie mioceniche e pre-mioceniche (Zezza, 1980; Calò e Tinelli, 1995).

Nell'ambito del progetto VIGOR (Valutazione del potenziale Geotermico delle Regioni della convergenza, www.vigor-geotermia.it), un progetto di esplorazione geotermica finalizzato all'identificazione e caratterizzazione delle risorse geotermiche nelle Regioni della Convergenza (Calabria, Puglia, Sicilia e Campania), al fine di contribuire alla conoscenza del sistema geotermico di Santa

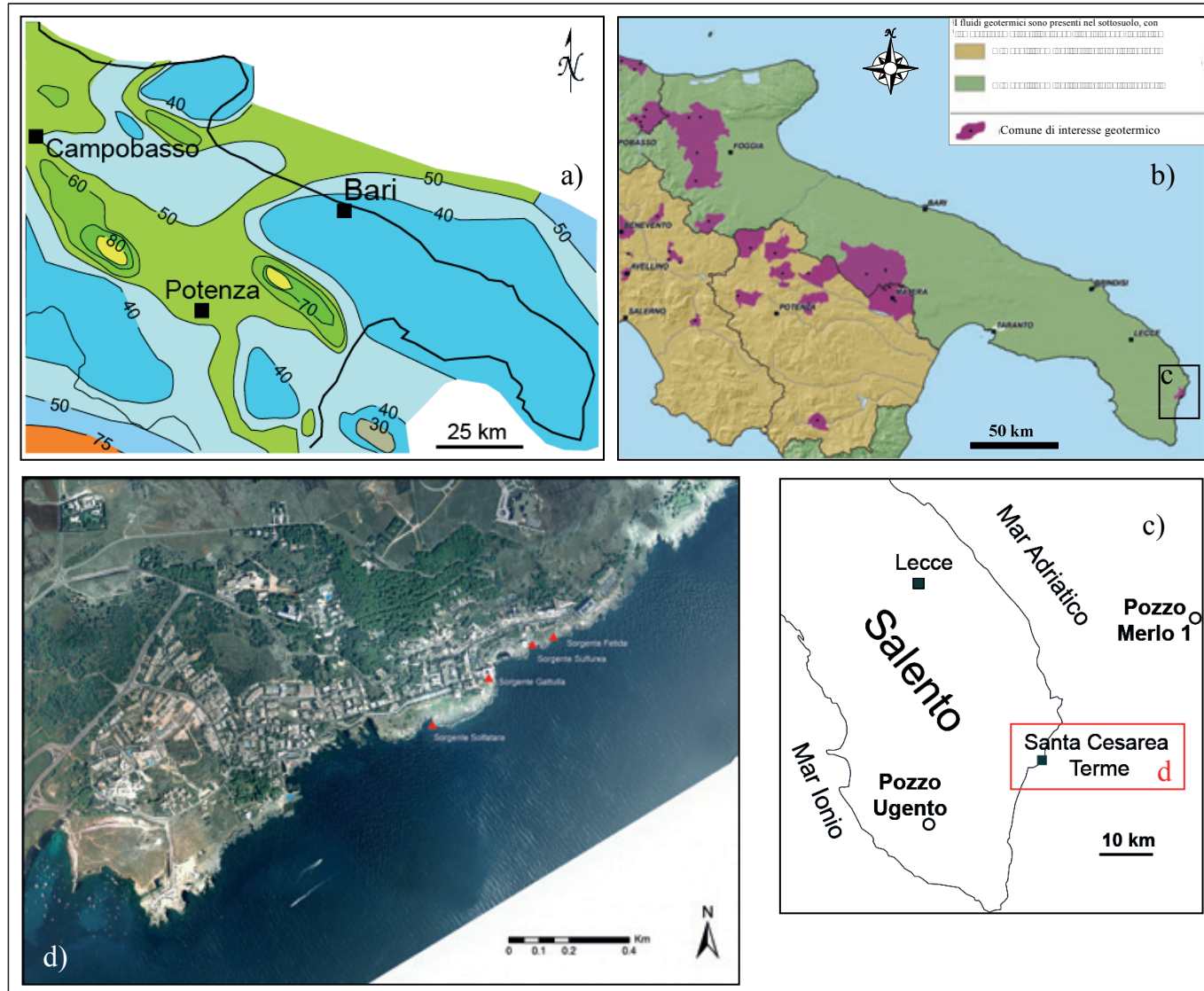


Figura 1 – Stralcio della carta del flusso di calore (da Mongelli *et al.*, 1986, modificato); b) aree di interesse geotermico prioritario e percentuale dei territori con fluidi geotermici presenti nel territorio (La Geotermia in Italia, CNG & UGI, 2008), c) dettaglio della zona del Salento con ubicazione dei pozzi petroliferi; d) ortofoto del tratto costiero con ubicazione delle sorgenti termali di Santa Cesarea Terme.

Cesarea Terme, è stato svolto uno studio multidisciplinare integrando dati strutturali, idrogeologici e geochimici.

I principali risultati sono qui di seguito descritti.

METODOLOGIA DI ANALISI

La Fig. 2 mostra l'organigramma dei principali passi procedurali e delle attività svolte per la caratterizzazione e valutazione della risorsa geotermica di Santa Cesarea Terme (denominata SCT nel seguito), e quindi per la definizione del bacino di alimentazione delle sorgenti termali, dell'assetto geometrico e cinematico delle strutture tettoniche condizionanti la circolazione idrica sotterranea, dei caratteri litologici ed idrogeologici del settore costiero in esame e delle peculiarità fisico chimiche delle acque circolanti.

L'esplorazione geotermica, svolta su di un'area di circa 50 km² (Figure 2 e 3) ha contemplato principalmente rilievi geologico-strutturali ed idrogeologici, analisi chimiche delle acque, oltre a rilievi topografici e speleologici

delle cavità termali e prospezioni geofisiche, attività in diversi casi condotti in stretta sinergia con i ricercatori di altri istituti di ricerca del CNR e del Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università degli Studi di Bari, partecipanti al progetto VIGOR (Fig. 2; Arduzzione *et al.*, 2012).

Non esistendo planimetrie delle grotte carsico-marine (Fetida, Solfurea, Gattula e Solfatara) in cui le sorgenti termali sgorgano, per prima cosa sono stati effettuati rilievi topografici di dettaglio. In particolare, la configurazione topografica dei tratti accessibili da terra di Fetida e di Gattula è stata definita mediante il rilevamento con tecniche a scansione laser terrestre, mentre quella delle altre grotte (tratto marino di Fetida, grotte Solfurea e Solfatara) è stata ottenuta da rilievi topografico-speleologici svolti da esperti della Federazione Speleologica Pugliese (Arduzzione *et al.*, 2012).

Grazie ai rilievi topografici, è stato possibile ricostruire la geometria tridimensionale dei diversi ambienti in-

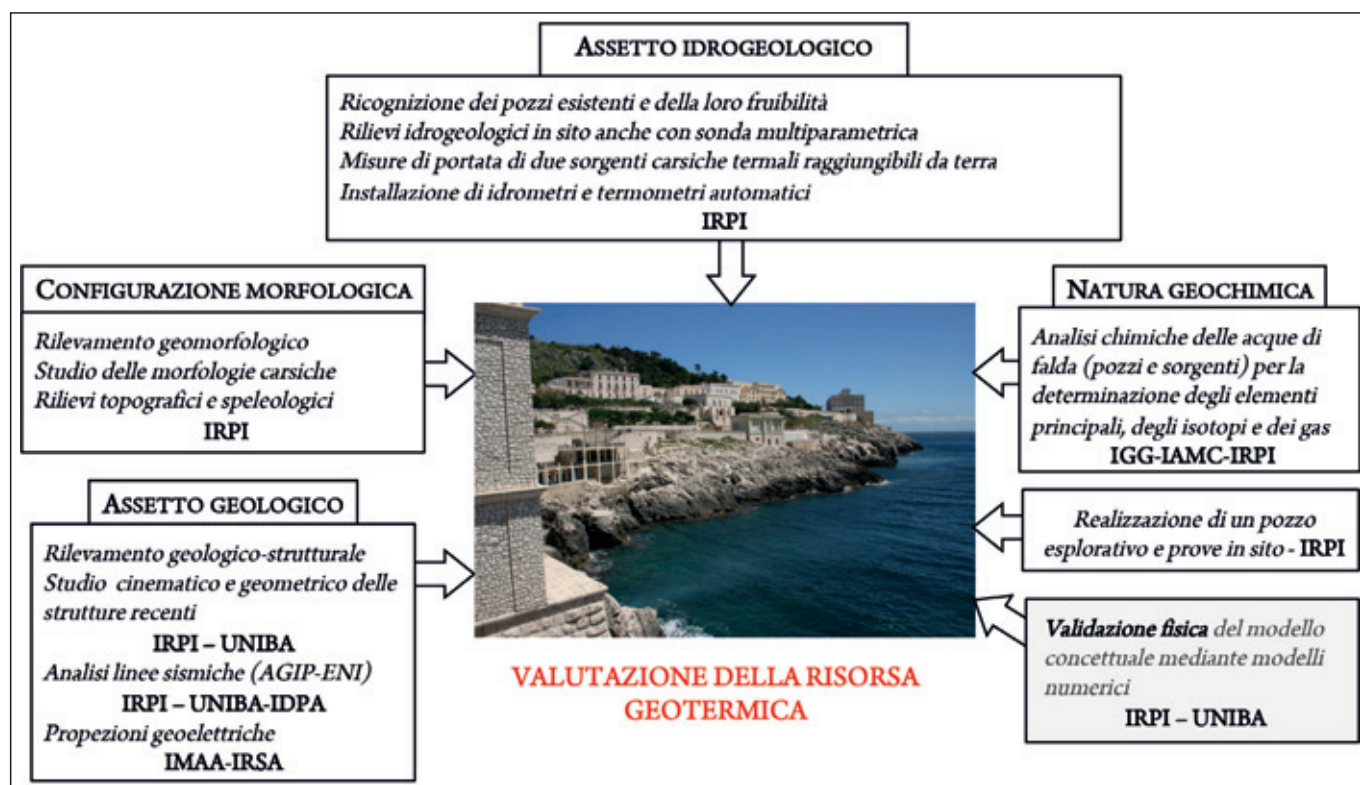


Figura 2 – Programmazione delle attività (*svolte*: riquadri con sfondo bianco; *da svolgere*: riquadri con sfondo grigio) per la valutazione della risorsa geotermica caratterizzante il territorio di Santa Cesarea Terme (da Ardizzone *et al.*, 2012, modificato).

vestigati, determinando anche, nel caso dei tratti rilevati con il laser terrestre, le quote assolute dei battenti idraulici rispetto al livello medio del mare.

Con riferimento all'assetto geologico del territorio in questione, è stato svolto un rilievo geologico-strutturale alla scala 1:5.000, poi restituita alla scala idonea per la stampa (Fig. 3). L'attribuzione formazionale di alcune successioni sedimentarie si è basata sui risultati di analisi micropaleontologiche. Oltre al rilievo geologico, sono state analizzate foto aeree ed immagini Lidar (risoluzione di 8 metri e di 1 metro, quest'ultime riferite solo al settore costiero dell'area). In corrispondenza di affioramenti ben esposti, sono stati svolti rilievi strutturali di dettaglio (Figure 4-5), incluse le grotte carsico-marine accessibili da terra (Fetida e Gattulla). I rilievi strutturali di dettaglio sono stati realizzati tramite la metodologia della "scanline".

Inoltre sono state effettuate tomografie geoelettriche ad alta risoluzione (Rizzo *et al.*, 2012) allo scopo di ottenere informazioni sulla distribuzione della resistività apparente ($\text{Ohm}\cdot\text{m}$) in profondità, e quindi, indirettamente, di avere informazioni sugli assetti geometrici dei corpi geologici e sulla eventuale presenza di fluidi. I risultati conseguiti da quest'attività sono a tutt'oggi in corso di approfondimento.

La configurazione geologico-strutturale del fondale marino, antistante il tratto costiero salentino compreso tra Santa Cesarea Terme e Santa Maria di Leuca, è stata ricostruita tramite l'analisi delle linee sismiche (ViDEPI,

2009), acquisite negli anni. Infine è stato svolto uno studio bibliografico sui terremoti avvenuti nei dintorni del territorio in esame, così da ottenere informazioni sulla attività delle principali strutture regionale dell'area (Fig. 6).

Per lo studio idrogeologico e geochimico, sono stati esaminati 16 punti di misura (Ardizzone *et al.*, 2012): considerando come acqua termale quella con una temperatura maggiore di 20°C , sono state analizzate 6 sorgenti (4 termali e 2 fredde), 4 pozzi termali, 5 pozzi freddi. E' stato inoltre esaminato un campione di acqua marina. I risultati sono mostrati nelle Tabelle 1-3 e la carta dei complessi idrogeologici è riportata in Fig. 7.

La direzione di flusso della falda freatica (Fig. 8) è stata ricostruita mediante l'individuazione del gradiente idraulico, determinato attraverso la misurazione del carico idraulico in pozzi freddi, liberi dall'installazione dell'impianto di sollevamento. Le variazioni del livello idrico e della temperatura nel tempo (da Dicembre 2011 a Gennaio 2012) sono state misurate nelle sorgenti termali accessibili da terra (Fetida e Gattulla) grazie all'installazione di sonde idrometriche e termometriche. Le portate delle stesse sorgenti sono state stimate con misure di velocità puntuali, eseguite al guado, mediante sensore acustico Doppler (Gennaio e Novembre 2012). Le variazioni della conducibilità elettrica e della temperatura dell'acqua con la profondità sono state misurate con una sonda multiparametrica per i pozzi 1 e 4, mentre è stato misurato anche il potenziale redox per il pozzo 1 (Fig. 9).

Il campionamento delle acque per le analisi chimiche

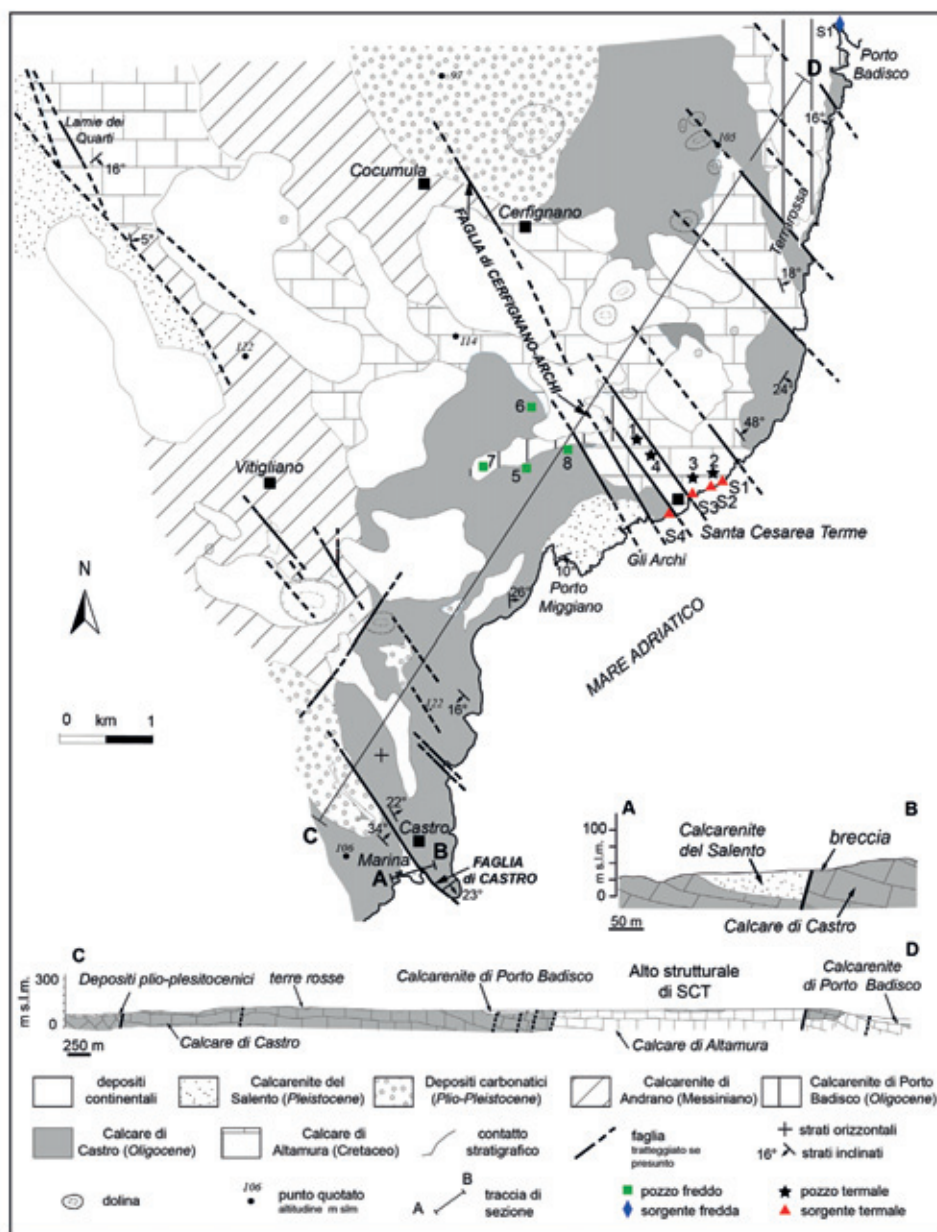


Figura 3 – Carta geologica dell’area di studio con sezioni geologiche (da Santaloia et al., 2016 modificata).



Figura 4 – Faglia a componente verticale che borda l’alto strutturale S. Cesarea-Cerignano.

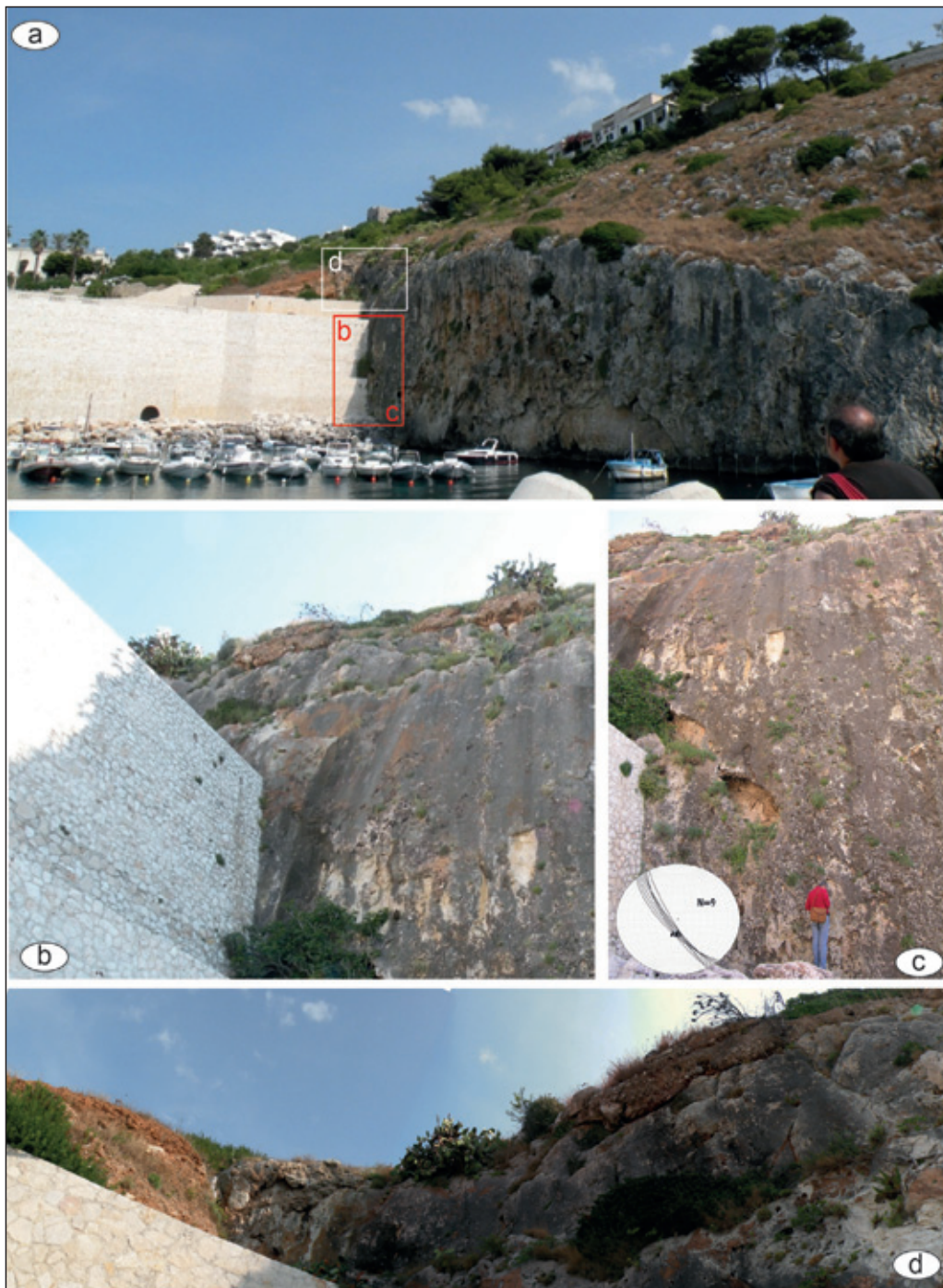


Figura 5 – Faglia di Castro affiorante nel porto di Marina di Castro (a) con dettagli del piano di faglia principale (b, c) e relativa proiezione stereografica (proiezione equiareale, emisfero inferiore); d) breccie rossastre quaternarie dislocate dalla faglia di Castro.

ed isotopiche è stato svolto sia per le sorgenti che per i pozzi. In particolare, le acque delle sorgenti sono state campionate in grotta mentre nei pozzi (campioni 1-2 e 5-9 nelle Tab. 1-3) il campionamento è stato realizzato in condizioni dinamiche, utilizzando l'impianto di sollevamento, dopo un adeguato ricambio del volume d'acqua. Diversamente il campionamento nel pozzo 3 (due campioni; Tab. 1-3) è stato effettuato in condizioni statiche. Infine il campionamento nel pozzo 4 è stato svolto durante la perforazione del sondaggio, dopo aver effettuato un'opportuna pulizia del foro (tre campioni; Tab. 1-3). Tutti i campioni d'acqua sono stati conservati in bottiglie

di polietilene (250 ml) con chiusura ermetica. Per la determinazione dei cationi, i campioni d'acqua sono stati acidificati (acido nitrico al 65% fino a valori di $\text{pH} \leq 2$); per la determinazione dei metalli, i campioni sono stati prima filtrati (membrana in acetato di cellulosa, diametro dei pori 0.2 mm) e dopo acidificati (acido nitrico al 65% fino a valori di $\text{pH} \leq 2$).

La temperatura (T), la conducibilità elettrica (CE), il pH, l'ossigeno disciolto (O_2) ed il potenziale di ossidazione (Eh) delle acque campionate sono state misurate in sito mediante l'uso di un'apposita sonda multiparametrica (Tab. 1; Fig. 8b-d). Le analisi chimiche ed isotopiche

	Campione	Tipo d'acqua-Nome	Z (m s.l.m.)	PP (m)	T (°C)	C.E. (mS/cm)	pH (-)	Eh (mV)	δD (‰ SMOV)	δ ¹⁸ O (‰ SMOV)	³ H (U.T.)	δ ¹³ C (PDB)	¹⁴ C (BP)	¹⁴ C (pcm)	³⁴ S/ ³² S (V-CDT)
Sorgenti	S1	Termale-Fetida	-	-	27.0	53.4	7.10	-337	0.60	0.05	1.03	-4.59	n d	n d	19.7
	S2	Termale-Sulfurea	-	-	21.1	59.3	7.69	-85	-13.8	-2.74	1.40	-1.41	n d	n d	19.4
	S3	Termale-Gattulla	-	-	24.5	41.4	6.20	-265	-0.40	0.37	1.56	-8.35	n d	n d	19.6
	S4	Termale-Solfatarata	-	-	25.7	40.1	7.54	-220	-6.70	-1.47	n d	n d	n d	n d	n d
	S5	Fredda-Porto Badisco	-	-	21.0	7.60	7.80	169	n d	n d	n d	n d	n d	n d	n d
	S6	Fredda-Acquaviva	-	-	17.8	27.2	7.53	210	n d	n d	n d	n d	n d	n d	n d
Pozzi	1	Termale	115.4	205.0	27.5	62.1	6.88	-263	5.9	1.78	0.46	-1.55	19849	8.45	20.0
	2	Termale	33.57	50.0	32.7	64.2	6.71	-268	5.9	1.57	0.33	-1.95	21050	7.54	19.9
	3-45 m	Termale	41.76	200.0	21.4	7.09	7.57	-237	n d	n d	n d	n d	n d	n d	n d
	3-52 m				-	-	-	-	-21.7	-3.39	n d	n d	n d	n d	n d
	4-125 m	Termale (Vigor)	115.0	300.0	22.0	4.21	6.99	-136	n d	n d	n d	n d	n d	n d	n d
	4-151 m				24.0	52.5	7.80	-399	n d	n d	n d	n d	n d	n d	n d
	4-300 m				27.0	52.2	7.99	-296	n d	n d	n d	n d	n d	n d	n d
	5	Fredda	121.0	-	19.2	0.44	8.70	-21	-34.2	-5.47	4.60	-12.81	n d	n d	n d
	6	Fredda	117.0	-	19.3	3.88	8.21	80	-30.3	-5.39	n d	n d	4268	58.5	n d
	7	Fredda	123.0	130.0	20.1	2.29	8.27	-39	-30.2	-5.57	n d	-12.83	n d	n d	n d
8	Fredda	112.0	-	19.8	0.95	8.08	74	-33.3	-5.64	n d	-13.48	n d	n d	n d	
9	Fredda	108.6	116.4	16.0	0.87	7.05	75	-33.2	-5.78	2.80	-10.58	n d	n d	n d	
Mare	10	Marina	-	-	19.1	60.3	8.20	169	7.1	1.48	n d	n d	n d	n d	

Tabella 1 - Composizione chimica ed isotopica delle acque. Z) Quota del boccaforno, PP) profondità del pozzo, CE) conducibilità elettrica a 25°C. n d = non determinata.

Sample	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺	F ⁻	Γ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	S ²⁻
S1	0.42	9219	347	1.41	959	908	12.7	118	0.29	17304	228.8	82.6	41.5	2878	3.12
S2	0.05	12130	383	0.00	1358	784	10.4	9.14	n d	20212	202.8	83.7	50.7	3322	0.61
S3	0.27	5415	224	0.79	5766	574	7.59	76.4	0.28	9035	309.9	39.7	30.6	1833	2.51
S4	0.34	10258	264	49.1	768	672	15.9	18.8	n d	16429	244.0	76.3	0.00	1926	n d
S5	0.03	1351	72.8	0.95	164	165	1.47	10.9	4.40	2189	311.1	7.98	25.6	424	n.p
S6	0.05	2210	152	0.00	514	154	0.00	0.38	19.2	4538	299.0	15.2	8.98	802	n.p
1	0.55	13477	509	0.00	1385	1311	18.7	36.1	0.33	23923	195.2	113	29.5	3813	21.7
2	0.45	13484	506	1.63	1339	1553	20.9	54.8	0.31	24369	187.0	123	62.9	3848	31.6
3-45 m	0.02	628	38.2	0.00	55.6	75.4	0.00	0.54	1.46	1109	354.0	5.83	0.9	128	n.p
3-52 m	0.14	4630	245	0.00	685	485	0.01	0.60	0.27	9220	213.0	25.6	0.55	1167	7.50
4-125 m	0.02	643	25.5	0.00	72.0	118	0.25	0.37	n d	1260	311.0	4.00	22.0	156	n.p
4-151 m	0.25	12269	378	0.00	1005	492	13.0	1.60	n d	22681	189.1	74.0	11.9	2640	0.33
4-300 m	0.45	10180	438	0.00	991	1218	19.1	1.88	n d	17858	213.5	77.0	0.00	2087	0.74
5	0.00	15.4	0.24	0.24	2.99	64.9	0.36	1.26	n d	26.5	170.9	0.13	12.8	6.60	n.p
6	0.01	544	26.3	4.29	63.2	132	0.00	2.58	0.28	1118	274.6	4.42	47.5	140	n.p
7	0.01	319	11.4	0.00	38.8	102	0.26	2.55	3.53	645	268.5	2.51	7.72	83.0	n.p
8	0.00	60.1	30.6	0.00	13.1	90.5	0.47	0.93	0.63	137	241.0	0.49	74.9	35.2	n.p
9	0.00	66.5	36.9	5.84	32.2	110	0.34	6.38	0.57	138	392.8	0.32	23.1	67.5	n.p
10	0.18	11617	417	0.00	1489	520	14.2	10.6	n d	23371	189.1	94.2	0.00	2859	n.p

Tabella 2 - Composizione chimica (in mg/L) delle acque. n d = non determinata n p = non presente.

Sample	Ag	Al	As	Au	B	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Hg	Ho	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Se	Si	U	V	W	Zn
S1	<5	<100	64.0	<5	6057	50.0	<5	<5	<5	<2	<50	1.00	24.0	<1000	<10	<1	<5	<10	<20	1740	111	<5	158	4405	<2	139	<2	<50
S2	<5	<100	258	<5	5208	40.0	<5	<5	5	6	<50	2.00	11.0	<1000	<10	<1	12	<10	<20	5722	116	6.00	206	4353	<2	89.0	<2	500
S3	<5	<100	<50	<5	3327	37.0	<5	<5	<5	<2	<50	1.00	<10	<1000	<10	<1	5	<10	<20	1132	71.0	<5	111	<4000	<2	23.0	<2	<50
S5	<0.5	<10	8.0	<0.5	527	39.1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.2	<5	<0.1	2.00	<100	<1	<0.1	<0.5	2	<2	341	13.9	<0.5	20.0	4067	1.6	16.0	<0.2	<5
S6	<0.5	2.87	14.5	<0.5	1.56	28.0	<0.5	<0.5	<0.5	<0.2	<5	0.20	-	4.58	<1	<0.1	0.11	-	<2	-	31.8	0.12	-	-	-	-	<0.2	<5
1	<5	<100	67.0	<5	8906	51.0	<5	<5	<5	<2	<50	2.00	<10	<1000	<10	<1	9.00	<10	<20	3375	159	<5	226	4152	<2	68.0	<2	<50
2	<5	<100	59.0	<5	10590	57.0	<5	<5	<5	<2	<50	2.00	<10	<1000	<10	<1	24.0	<10	572	4137	165	<5	270	4973	<2	<20	<2	<50
3-45 m	<5	4.89	2.14	<5	1.66	24.3	<5	<5	<5	<2	<50	0.15	<10	115	<10	<1	37.6	<10	<20	-	21.7	0.08	-	-	<2	<20	<2	<50
3-52 m	<5	3.70	16.4	<5	3.06	31.0	<5	<5	<5	<2	<50	0.40	<10	88.6	<10	<1	25.0	<10	<20	-	46.4	0.14	-	-	<2	<20	<2	<50
5	<0.05	0.20	0.13	<0.05	0.01	2.45	<0.05	<0.05	-	-	<5	0.10	-	35.4	<1	<0.1	26.1	-	-	-	0.12	0.06	-	-	-	-	<0.2	-
6	<0.05	3.44	1.53	<0.05	0.18	7.47	<0.05	<0.05	-	-	<5	0.10	-	66.1	<1	<0.1	3.03	-	-	-	4.00	0.04	-	-	-	-	<0.2	-
7	<0.05	0.27	0.26	<0.05	0.04	2.39	<0.05	<0.05	-	-	<5	0.10	-	354	<1	<0.1	44.6	-	-	-	0.60	0.03	-	-	-	-	<0.2	-
8	<0.05	6.23	0.80	<0.05	0.04	3.44	<0.05	<0.05	-	-	<5	0.10	-	9.27	<1	<0.1	2.10	-	-	-	14.4	0.05	-	-	-	-	<0.2	-
9	<0.05	6.00	1.00	<0.05	38.0	47.8	<0.05	<0.05	0.11	0.02	7.20	0.01	7.70	47.0	<1	<0.1	5.61	0.60	0.30	26.20	1.20	0.10	1.20	3815	1.92	4.10	<0.2	10.7

Tabella 3 - Composizione chimica (in µg/L) delle acque. n d = non determinata.

delle acque sono state svolte presso i laboratori del CNR-IGG, seguendo le procedure standard: (a) cromatografia ionica per la determinazione dei cationi e degli anioni, (b) titolazione volumetrica per la stima dello ione bicarbonato, (c) spettrometria di massa con sorgente al plasma per la determinazione dei metalli, degli elementi in traccia e degli isotopi.

L'accuratezza delle analisi chimiche è stata verificata attraverso le condizioni di elettroneutralità (EN), risul-

tante dalla somma algebrica delle cariche positive e negative degli ioni contenuti in soluzione.

Per definire le potenziali aree di ricarica sono state condotte analisi isotopiche (δD, δ¹⁸O e trizio) sui campioni di acqua ed i cui risultati sono riportati in Tab. 3.

Le attività del trizio (³H) e ¹⁴C del carbonio inorganico disciolto nell'acqua sono state utilizzate per stimare l'età delle acque. La concentrazione di ³H è stata determinata mediante spettrometria di massa a plasma accoppiato

induttivamente (Tab. 1); diversamente, la concentrazione di ^{14}C è stata determinata mediante spettrometria di massa con acceleratore presso il Centro di Datazione e Diagnostica (CEDAD) dell'Università del Salento (Italia). I risultati sono riportati nella Tab. 3, espressi sia come età apparente non corretta BP sia come carbonio moderno di percentuale (pmc).

Per definire l'origine del solfuro di idrogeno è stato determinato l'isotopo ^{34}S (acque termali campionate nei pozzi 2 e 4) nel solfato disciolto e nel solfuro. Questa analisi è stata effettuata mediante spettrometria di massa presso il laboratorio Earth & Environmental Sciences Department (Università di Waterloo, Canada). Infine, l'arricchimento isotopico – pari a $\delta^{34}\text{S}_{\text{solfato}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{solfuro}}$, è stato definito seguendo la metodologia proposta da Wynn *et al.* (2010).

ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

La Fig. 3 mostra la carta geologica redatta per l'area di studio, dove affiorano successioni carbonatiche mesozoiche di piattaforma, localmente ricoperte in discordanza da successioni carbonatiche paleogenico-mioceniche. Queste ultime sono a loro volta coperte da sedimenti pliocenici.

La successione mesozoica (Formazione del Calcare di Altamura riferita al Cretaceo superiore; Ricchetti *et al.*, 1988), spesso intorno a 600 m (Ricchetti *et al.*, 1988) è costituita da calcari bianchi compatti con livelli fossiliferi talora associati a calcari dolomitici. Questa formazione geologica rappresenta la parte affiorante del substrato carbonatico dell'avampese apulo, perforato fino alla profondità di circa 4500 m, (pozzo Ugento 1, VIDEPI Project, 2009) a circa 35 km a Sud-Ovest dell'abitato di Santa Cesarea Terme (Fig. 1).

Le successioni oligoceniche sono rappresentate dai Calcari di Castro (calcari bioclastici stratificati e calcari organogeni in corpi massicci con facies di scogliera; Pomar *et al.*, 2014) e dalle Calcareni di Porto Badisco (calcareni, calciruditi bioclastiche poco cementate e calcari organogeni; Bosellini *et al.*, 1999; Pomar *et al.*, 2014). I depositi miocenici (Calcareni di Andrano) sono associabili a calcari detritici, calcari bioclastici e calcilutiti (Bosellini *et al.*, 1999; Pomar *et al.*, 2014). Infine le formazioni plio-pleistoceniche (Bossio *et al.*, 2005) sono costituite da calcareniti e calcisiltiti fossilifere, a diagenesi incompleta (Sabbie di Uggiano) e dalle calcareniti grossolane avana-giallastre e calcari detritico-organogeni compatti (Calcareni del Salento). Le Calcareni del Salento si sarebbero depositate in un ambiente tettonicamente attivo come testimoniano gli slumps e le strutture tettoniche sinsedimentarie rilevate all'interno dei loro depositi (Santaloia *et al.*, 2016).

L'area di studio mostra caratteri strutturali sostanzialmente riconducibili alla formazione delle Serre Salentine: s'individuano infatti una serie di alti (ad es. alti di Cerfignano-Santa Cesarea Terme e di Castro Marina in Fig. 3) e bassi strutturali (ad es. depressioni di Vitigliano,

Porto Miggiano e Porto Badisco in Fig. 3) disposti secondo una geometria a gradinata, e delimitati da importanti faglie, orientate NO-SE (Fig. 3). Queste faglie, a giacitura subverticale, presentano cinematica diretta o transtensiva sinistra (Santaloia *et al.*, 2016). Tra queste faglie annoveriamo la Faglia degli Archi (Fig. 4) e quella del Porto di Castro Marina (Fig. 5) e che delimitano, rispettivamente, i bordi sud-occidentali degli altri strutturali di Cerfignano-Santa Cesarea Terme (definito come Alto SCT) e del Porto di Castro Marina (denominato come Alto di Castro), come mostrato in Fig. 3. In particolare, la Faglia del Porto di Castro Marina disloca sia le successioni carbonatiche oligo-pleistoceniche (Calcari di Castro e Calcareni del Salento in Fig. 3) che le breccie quaternarie (Fig. 3 e 5). La zona di danneggiamento di questa faglia è spesso all'incirca 8 m e presenta sia fratture coalescenti tra loro, con giaciture coerenti con la geometria ed il cinematismo della faglia, che una breccia cataclastica (Fig. 5), costituita da elementi carbonatici in cemento calcareo (Santaloia *et al.*, 2016). I principali indicatori cinematici sono costituiti da solchi e strie oblique sia lungo il piano di faglia principale che su superfici secondarie all'interno della cataclaste (Santaloia *et al.*, 2016). L'Alto SCT è fittamente disseccato da una serie di faglie alla mesoscala (Fig. 3), disposte parallelamente alle faglie bordiere.

Faglie ad orientazione N-S, e subordinatamente E-O, dislocano le Calcareni del Salento affioranti nell'area costiera di Porto Miggiano (Fig. 3). Sono faglie subverticali, con vene di calcite e fasce cataclastiche cementate, caratterizzate da cinematica trascorrente o transtensiva sinistra (Santaloia *et al.*, 2016).

Considerando i cinematismi, i rapporti geometrici tra i sistemi di faglia NO-SE e N-S e l'età delle strutture (es. la Faglia di Castro Marina disloca le breccie continentali quaternarie), si può ritenere che il sistema di faglie sia stato contemporaneamente attivo dopo il Pleistocene.

Con riferimento al fondale marino antistante all'area d'interesse, le linee sismiche (ViDEPI Project, 2009) evidenziano la dislocazione della piattaforma carbonatica mesozoico-terziaria secondo faglie con una importante componente verticale di movimento (Mocnik, 2008; Roveri *et al.*, 2014; Del Ben *et al.*, 2015), in accordo con quanto osservato sulla terraferma. Diversi terremoti sono stati registrati a 60-120 km a largo della costa di Santa Cesarea Terme (Fig. 6), tra cui quello del 1743 (Favali *et al.*, 1990) e quelli più recenti del 1974 e del 2008 con magnitudo rispettivamente pari a 4.9 e 2.9 e meccanismi focali trascorrenti (INGV, 2006; Mocnik, 2008; Di Bucci *et al.*, 2011), ad indicare, pertanto, l'attività di queste strutture e quindi la presenza di processi cinematici che mantengono efficiente la permeabilità.

CARATTERI IDROGEOLOGICI

Uno specifico studio idrogeologico ha permesso di realizzare la carta dei complessi idrogeologici sulla base dalle caratteristiche di permeabilità dei litotipi affioranti (Fig. 7). Inoltre alcune informazioni idrogeologiche sono

state ricavate anche dalle schede tecniche dei pozzi censiti nel territorio. Come mostrato in Fig. 7, le successioni calcaree pre-neogeniche afferiscono allo stesso complesso idrogeologico (elevato grado di permeabilità per carsismo e fratturazione).

I depositi miocenici sono caratterizzati da un piccolo grado di permeabilità, a cui seguono le calcareniti plio-pleistoceniche con un elevato grado di permeabilità e quelle pleistoceniche caratterizzate da un grado medio di permeabilità (Zuffianò *et al.*, 2013; Polemio *et al.*, 2014).

Il processo carsico, la cui evoluzione spaziale è spesso condizionata dai sistemi di faglie (Ardizzone *et al.*, 2012; Pepe e Parise, 2013), avrebbe determinato un aumento rilevante della permeabilità secondaria negli ammassi carbonatici presenti nell'area creando zone preferenziali per l'infiltrazione e circolazione in profondità dell'acqua piovana, nonché definendo vie preferenziali per la risalita di fluidi profondi caldi e più salini rispetto all'acqua meteorica. In profondità ad esempio in corrispondenza della successione carbonatica pre-neogenica, caverne, orizzonti fessurati e carsificati si alternano quindi a strati maggiormente compatti (Cotecchia *et al.*, 2005; Romanazzi *et al.*, 2015), come rilevato anche durante la perforazione del pozzo 4 (Pozzo VIGOR in Tab. 1).

La circolazione idrica sotterranea del territorio salentino può essere schematizzata considerando la presenza di due distinte tipologie di falde idriche sotterranee, una superficiale ed una profonda. La falda superficiale, freatica, si rinviene soltanto a luoghi, a piccola profondità dal piano campagna, frazionata in più livelli nella successione neogenico-quadernaria. Essa è per lo più localizzata in corrispondenza delle aree topograficamente più depresse, laddove sedimenti permeabili poggiano su depositi poco permeabili. La falda idrica profonda, circolante nelle rocce carbonatiche del substrato oligo-mesozoico, fluisce in condizioni freatiche in prossimità della costa; lontano dalla costa essa può essere a luoghi in pressione all'interno della medesima formazione carbonatica, per effetto del carico derivante dai litotipi quadernari posti a tetto (Zuffianò *et al.*, 2013). La quota del livello statico della falda profonda corrisponde per lo più a quella del mare in prossimità dell'area costiera mentre tende ad approfondirsi verso l'interno (pozzo 14: 42,06 m dal boccapozzo pari a -0,15 m sul livello medio del mare).

Di seguito si tratterà unicamente della falda profonda, intercettata dai pozzi perforati nell'area di studio e di prevalente interesse per lo studio geotermico delle sorgenti ipotermali di Santa Cesarea Terme.

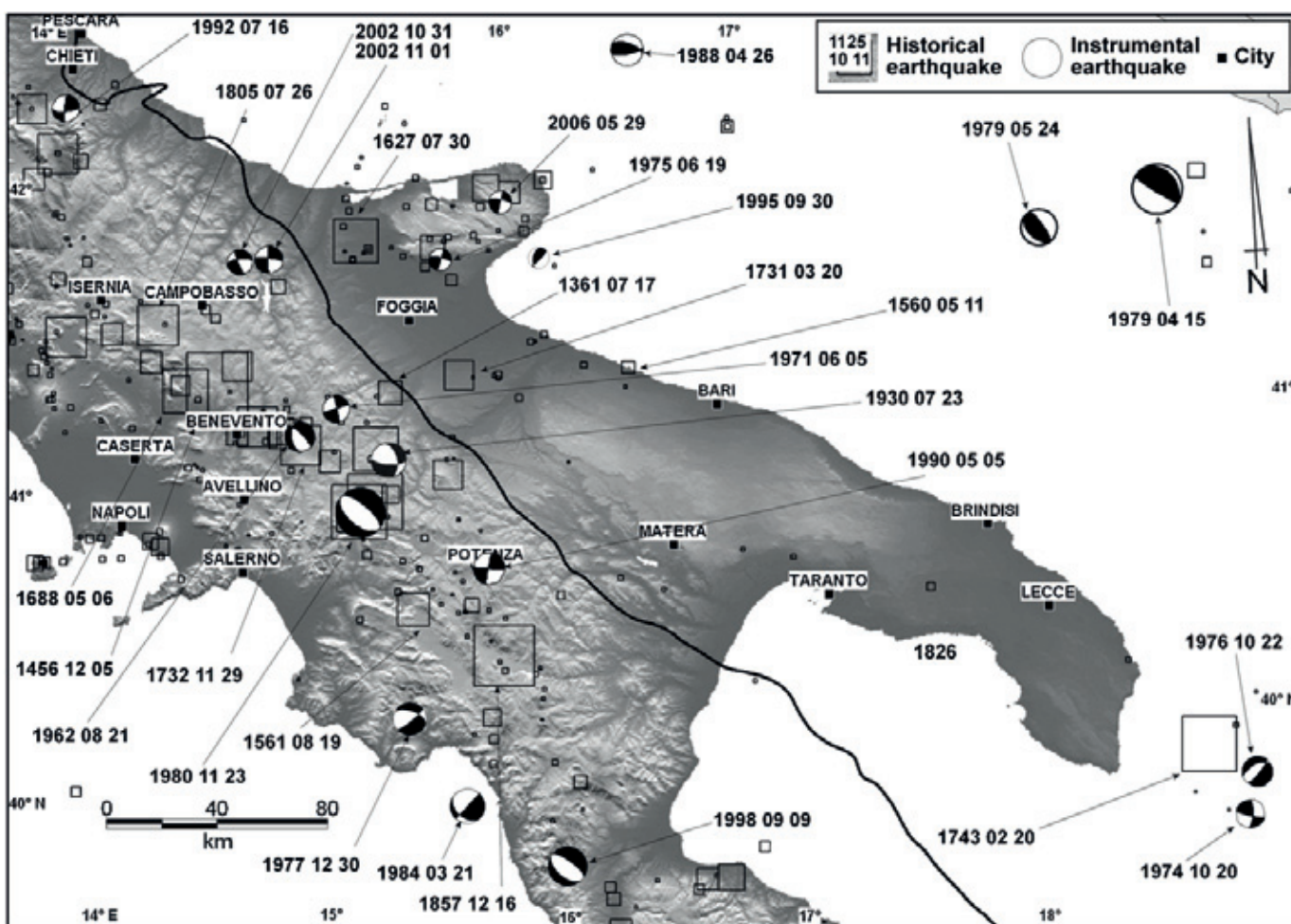


Figura 6 – Terremoti storici e strumentali avvenuti nell'Appennino centro-meridionale ($M > 4$); la dimensione dei quadrati e proporzionale alla magnitudo derivata dai dati di intensità (da Di Bucci *et al.*, 2011).

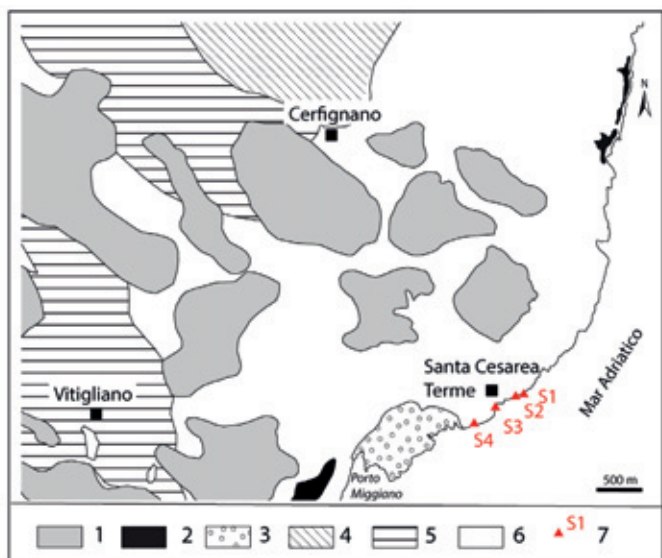


Figura 7 - Carta dei complessi idrogeologici schematica. Legenda: 1) limi argillosi a basso grado di permeabilità, 2) breccie carbonatiche oloceniche di medio-alto grado di permeabilità, 3) calcari detrito-organogeni pleistocenici di medio grado di permeabilità, 4) calcareniti plio-pleistoceniche ad elevato grado di permeabilità, 5) calcilutiti mioceniche a basso grado di permeabilità, 6) calcari pre-neogenici permeabili per carsismo e fratturazione, 7) sorgenti termali (S1-Fetida, S2-Solfurea, S3-Gattulla, S4-Solfataria; da Polemio *et al.*, 2012, modificato).

Come avviene nelle aree costiere, l'acqua della falda profonda, dolce, fluisce su quella di intrusione marina, salina e quindi più densa. Il passaggio tra i due corpi idrici, a diversa densità, avviene gradualmente attraverso una zona di transizione a salinità crescente dall'alto verso il basso. Nell'area in esame, la salinità (residuo fisso indicato come TDS nel seguito), passa quindi da meno di 0,5 g/L, per l'acqua di falda, a 40 g/L, per l'acqua marina (Cotecchia, 1977; Cotecchia *et al.*, 2005; Polemio *et al.*, 2009). Il passaggio avverrebbe intorno ai 150 m sotto il livello del mare (Cotecchia *et al.*, 2005; Romanazzi *et al.*, 2015).

La Fig. 8a riporta la distribuzione del carico potenziometrico della falda profonda determinata per l'area di studio. Essa evidenzia la diminuzione del carico, pari a circa 2 m, in direzione Sud-Est, verso la costa. Come per l'intero acquifero salentino, la falda profonda fluisce dalle zone interne, dove la ricarica è maggiore verso le zone costiere (Cotecchia *et al.*, 2005; Romanazzi *et al.*, 2015).

Con riferimento alle acque fredde campionate nell'area intorno alle sorgenti termali (area di dettaglio nella Fig. 8a; Tab. 1), le temperature variano tra 16°C e 20°C (Fig. 8b), la conducibilità elettrica, misurata a 25°C, è minore di 3.6 mS/cm (Fig. 8c), il TDS è generalmente inferiore a 500 mg/L mentre Eh varia da 80 a -39 mV (Fig. 8d). Le acque termali invece mostrano temperatu-

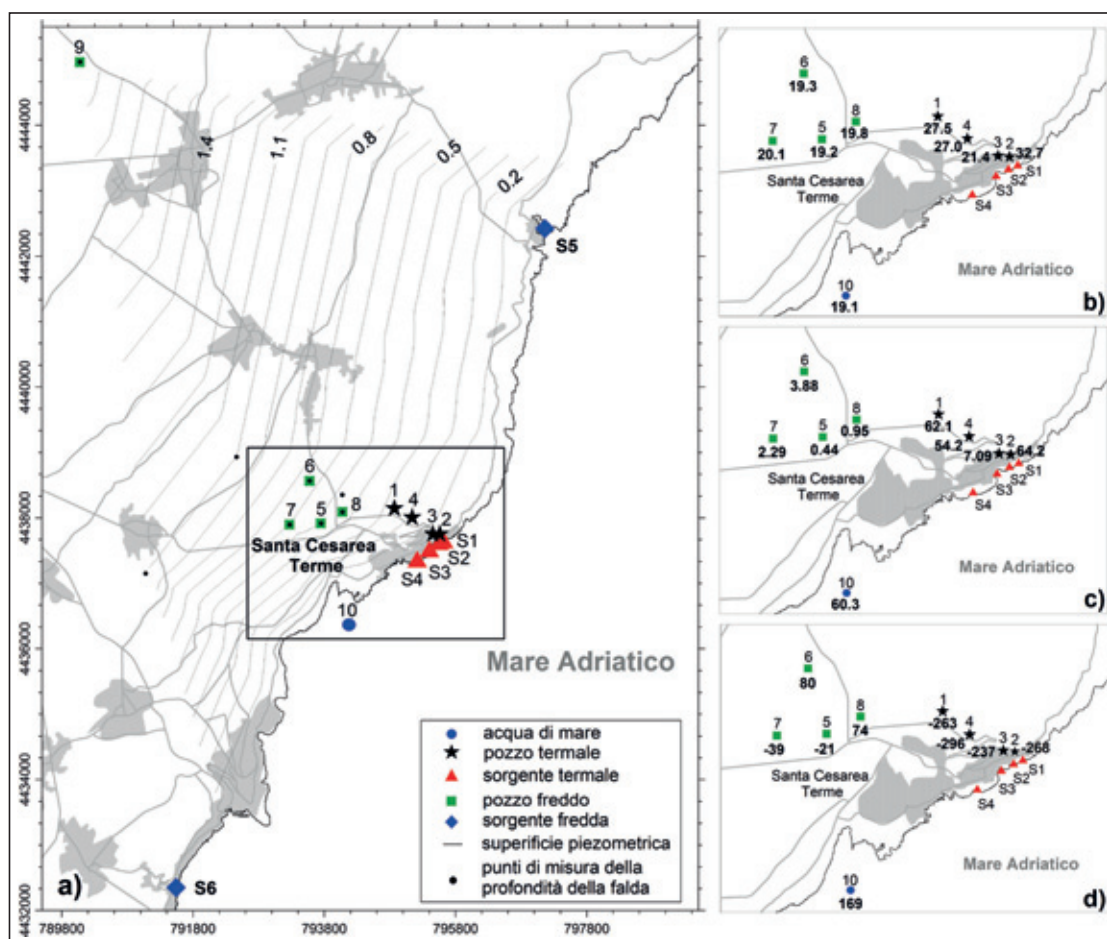


Figura 8 - Attività di monitoraggio realizzata in Giugno 2012 e in Giugno 2014 solo per il pozzo 4 (da Santaloia *et al.*, 2016 modificata): mappa della superficie piezometrica (acquifero carbonatico, m slm; a); distribuzione della temperatura (°C, b), della conducibilità elettrica (mS/cm a 25 °C, c) e del potenziale redox (mV, c).

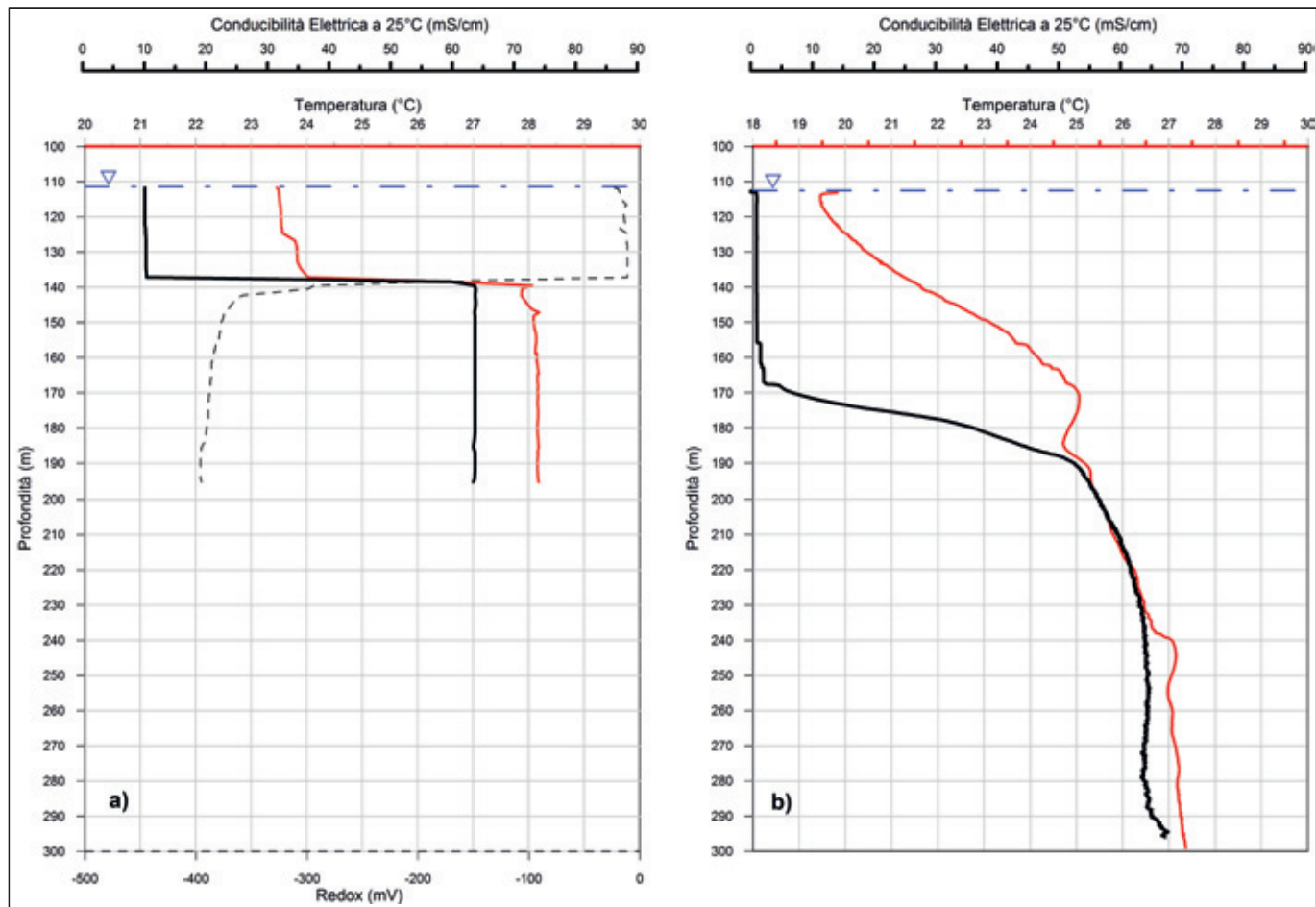


Figura 9 - Profili multiparametrici nei pozzi termali 1 (a) e 4 (b), dati da Santaloia *et al.* (2016).

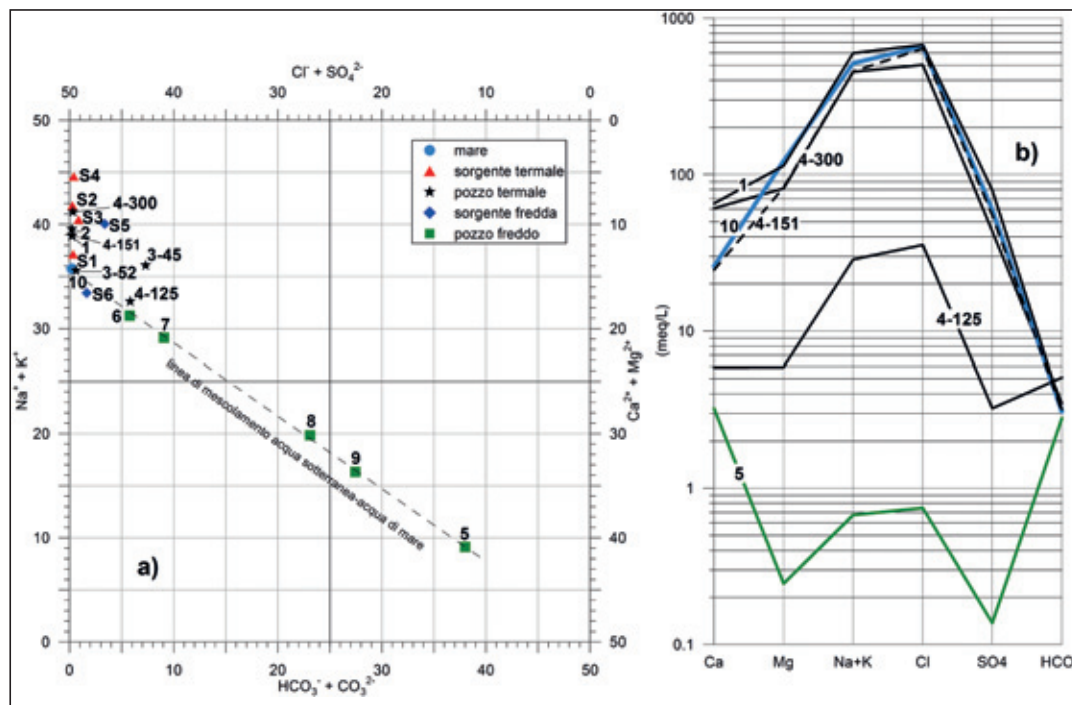


Figura 10 - Diagrammi di Langelier-Ludwig (a) e Schoeller (b); dati da Zuffianò *et al.* (2013) e da Santaloia *et al.* (2016).

re maggiori (22°-33°C) con TDS fino a 5 mg/L, e carichi potenziometrici lievemente maggiori rispetto a quelli dei pozzi freddi limitrofi (1 m per pozzo 4 e 0.6 m per pozzo 7, entrambi rispetto al livello medio del mare).

La temperatura, il livello idrico e la portata delle sorgenti termali della Gattulla e della Fetida variano con il tempo. Il livello idrico aumenta al diminuire della temperatura per entrambi le sorgenti (Santaloia *et al.*, 2016)

mentre le portate sono state pari a 0.283-0.312 m³/s per la Fetida e a 0.0014-0.0097 m³/s per la Gattulla. Queste variazioni sono probabilmente legate al fenomeno di marea, come avevano già rilevato Visintin (1944) e Calò e Tinelli (1995).

Infine, i profili multiparametrici (Fig. 9) mostrano come i diversi parametri riportati nei grafici variano con la profondità. Alla profondità di 138 m dal piano campagna all'interno del pozzo 1, la temperatura e la conducibilità elettrica aumentano repentinamente mentre il redox diminuisce velocemente (Fig. 9a). Le variazioni dei parametri sembrano essere meno repentine nel pozzo 4 (Fig. 9b).

COMPOSIZIONE GEOCHIMICA DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Nelle acque termali gli ioni alcalini (Na⁺ e K⁺) prevalgono rispetto agli ioni alcalino-terrosi (Ca²⁺ e Mg²⁺) mentre tra gli anioni lo ione cloruro è maggiore sia dello ione solfato che di quello bicarbonato (Tab. 2).

Dal diagramma di Langelier-Ludwing (Fig. 10a), si rivela come la composizione delle acque sotterranee fredde, rappresentata dal campione 5, ricada nel campo delle acque bicarbonato-calciche mentre quella delle acque termali (campioni 1 e 2) si colloca in quello delle clorurato-alcaline. I restanti campioni di acqua presentano un grado di mescolamento differente tra le acque fredde, quelle termali e quella del mare (campione 10 in Fig. 10a). Detti processi di mescolamento sono particolarmente evidenti per le acque campionate a diverse profondità nel pozzo 4 (Fig. 10b): il campione più superficiale (4-125) ha il trac-

ciato geochimico di un'acqua dolce debolmente mescolata con acqua di mare mentre la composizione geochimica del campione più profondo (4-300) è quella di un'acqua termale, simile al campione 1 (Fig. 10b). Il campione intermedio (4-151 in Fig. 10b) è caratterizzato da un elevato grado di mescolamento con acqua di mare.

Con riferimento ai costituenti secondari, le acque termali registrano elevate concentrazioni di ione Li⁺, Sr²⁺, B³⁺ e Br (Tab. 3). Il valore di riferimento del boro nell'acqua di mare (pressoché costante) è di 4.6 mg/L (White, 1957; Kharaka e Hanor, 2003), il rapporto B/Br calcolato per i campioni d'acqua termale (78.81 µg/L e 86.10 µg/L per i campioni 1 e 2, rispettivamente) risulta maggiore dello stesso rapporto che caratterizza l'acqua di mare (campione 10: 48.83 µg/L) e dell'acqua dolce (campione 5: 0.08 µg/L). Diversamente, il rapporto Cl/Br per le acque termali è pari a 211.71-198.12 mg/L, risulta quindi inferiore al valore dell'acqua di mare (248.10 mg/L) e paragonabile a quello dell'acqua dolce (203.45 mg/L). Le acque termali mostrano inoltre valori più elevati dei rapporti Sr/Ca+Mg e Li/Cl rispetto alle acque fredde (Santaloia *et al.*, 2016).

I contenuti degli isotopi dell'idrogeno (δD) e dell'ossigeno (δ¹⁸O) calcolati per i diversi campioni di acqua sono riportati nel grafico di Fig. 12a, insieme alla retta d'interpolazione (nota come linea locale, corrispondente alla linea tratteggiata nel diagramma δD-δ¹⁸O) e alle rette di riferimento delle precipitazioni meteoriche (retta GMWL, quella mondiale, con δD = 8 * δ¹⁸O + 10, Craig, 1961; retta MMWL, valida per il Mediterraneo, con δD = 8 * δ¹⁸O + 20, Gatt and Carmi, 1970). In base al

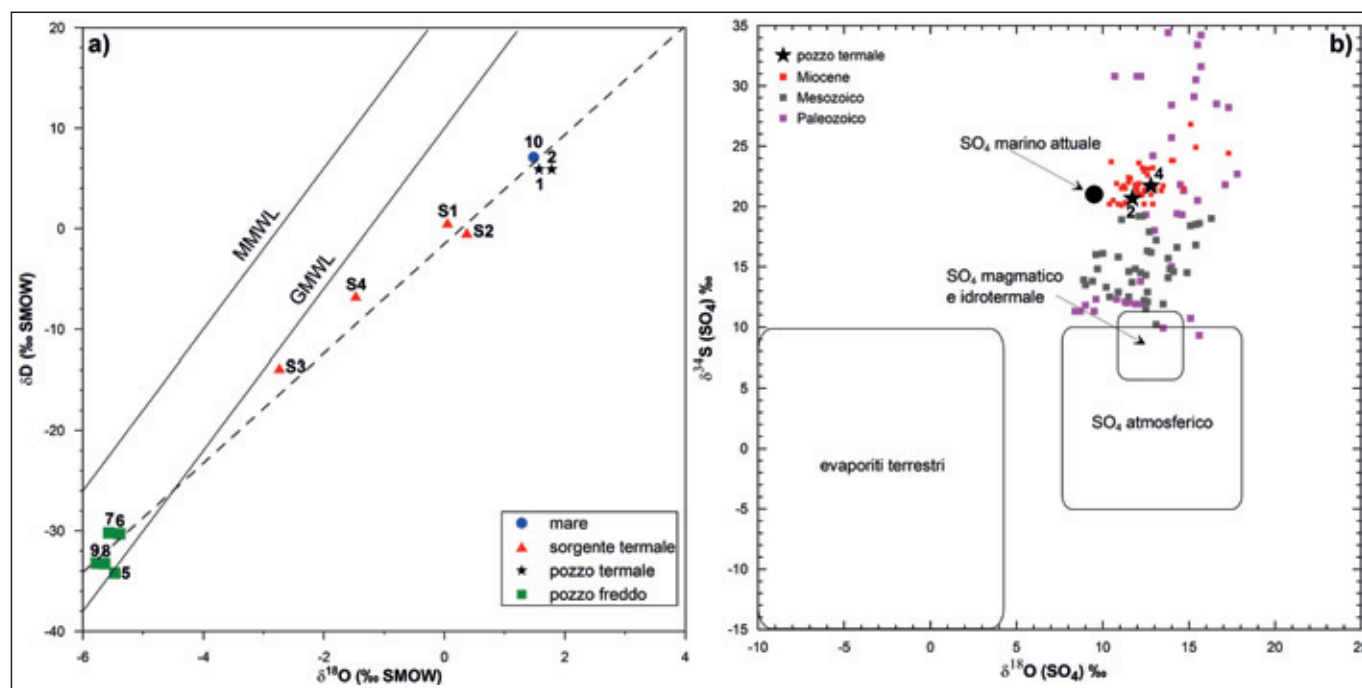


Figura 11 – a) Diagramma Binario δD - δ¹⁸O (dati da Zuffianò *et al.*, 2013 e da Santaloia *et al.*, 2016); b) Intervalli dei valori di δ³⁴S e δ¹⁸O dei solfati di varia provenienza disciolti nelle acque sotterranee confrontati con i campioni di acqua termale di Santa Cesarea Terme (Santaloia *et al.*, 2016; Claypool *et al.*, 1980; Utrilla *et al.*, 1992; Clark e Fritz, 1997; Palmer *et al.*, 2004; Gunn *et al.*, 2006).

contenuto isotopico, s'individuano quindi tre gruppi di campioni d'acqua (Fig. 11). Il primo gruppo comprende i campioni di acqua fredda (campioni 5-9) rappresentativi dell'acquifero salentino; essi registrano modesti contenuti isotopici, interposti tra le due rette meteoriche (GMWL e MMWL), i quali indicano quote di alimentazione delle acque molto basse, inferiore ai 500 m s.l.m. (Minissale & Vaselli, 2011). Il secondo gruppo include i campioni d'acqua termale (campioni 1 e 2) situati a destra della linea locale, contraddistinti da elevati valori di δD e di $\delta^{18}O$, simili a quelli dell'acqua di mare di Santa Cesarea (campione 10), con un debole arricchimento in ^{18}O rispetto al campione d'acqua marina. Tale arricchimento è probabilmente dovuto ad un processo di evaporazione a cui le acque termali sono sottoposte (Santaloia *et al.*, 2016). Infine, le acque delle sorgenti termali (campioni S1, S2, S3 e S4 in Fig. 11a) mostrano valori di δD e $\delta^{18}O$ intermedi fra il valore tipico meteorico (campioni 5-9) e quello marino, suggerendo quindi il verificarsi di un processo di mescolamento tra acque sotterranee dolci, acque termali e acque marine (Santaloia *et al.*, 2016).

Come si evince dalla Tab. 1, le acque termali hanno contenuti in trizio meno elevati delle acque marine attuali (2.2 TU; Sivan *et al.*, 2005), testimoniando quindi un apporto di questo isotopo da parte di acque circolanti in profondità ed aventi un'età superiore a 50 anni (acqua sotterranea pre-moderna in accordo con Clark *et al.*, 1997). Per i campioni di acqua fredda si rilevano contenuti in trizio fino a 5 TU (Tab. 1), suggerendo così una loro ricarica recente (Santaloia *et al.*, 2016). Analoghe considerazioni scaturiscono dai risultati ottenuti dalle datazioni radiometriche dei campioni d'acqua: le acque termali sono risultate essere più antiche delle acque fredde (Tab. 1).

Infine, la Fig. 11b riporta i valori dei rapporti isotopici $\delta^{34}S$ e $\delta^{18}O$ nei solfati disciolti e misurati nei campioni delle acque termali insieme agli stessi rapporti isotopici misurati nelle acque sotterranee di diversi ambienti (Claypool *et al.*, 1980; Utrilla *et al.*, 1992; Clark e Fritz, 1997; Gunn *et al.*, 2006). Questo grafico indica che i solfati di Santa Cesarea Terme sono compatibili con acque che abbiano interagito con sedimenti evaporitici del Miocene e che, nel nostro caso, possono essere collegati alla successione messiniana riconosciuta nel fondale marino antistante l'area in esame (Santaloia *et al.*, 2016). Inoltre il fattore di arricchimento dell'isotopo, pari a 46,12 ‰, indica una successiva riduzione batterica del solfato disciolto (BSR; Wynn *et al.*, 2010). Questo dato suggerisce una temperatura del reservoir geotermico di 80-110°C (Machel, 2001; Santaloia *et al.*, 2016).

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Alla luce dei dati idrogeologici ed idrogeochimici ottenuti nel corso delle attività svolte durante il progetto VIGOR, è possibile evidenziare come l'anomalia termica nel territorio costiero di Santa Cesarea Terme, sia circoscritta (Fig. 8). Essa si estende al massimo per un Km lun-

go costa e per meno di due Km nell'entroterra. Questa zona ricade nella porzione dell'alto di SCT maggiormente dislocata dalle faglie NO-SE (Fig. 3), subverticali e transtensive. Tali faglie si estendono verso mare (Del Ben *et al.*, 2015) e alcune di esse sono considerate sismicamente attive (INGV, 2006; Fig. 7).

Nel sottosuolo di quest'area costiera sono presenti tre tipi di acqua, tra loro interagenti (Figure 8-11a): acqua dolce di falda, acqua salmastra o salina di intrusione marina e acqua termale (Zuffianò *et al.*, 2016). La prima è l'acqua della falda acquifera profonda presente nei carbonati oligo-mesozoici, alimentata dalle piogge ed intercettata dal pozzo 5. La seconda è un'acqua di falda che ha subito un mescolamento con l'acqua marina di intrusione continentale (campioni 9, 8, 7, 6, 4-125, 4-151 in Fig. 10 e 11a). L'ultimo tipo d'acqua corrisponde al fluido geotermico, il mezzo che trasporta il calore dalla profondità fino in superficie ed intercettato dai pozzi 1, 2 e 4 (campione 4-300). Le acque delle sorgenti termali costituiscono il prodotto ultimo dell'interazione tra l'acqua termale con gli altri due tipi di acque (Fig. 10 e 11a).

Le acque dolci di falda (meno dense) sono pertanto sostenute alla base da acque salate di origine marina (più dense), penetrate nell'entroterra. La miscibilità tra loro è tale che esiste una zona di mescolamento tra le due acque (zona di transizione). Se il bacino di alimentazione delle sorgenti termali fosse nell'entroterra, l'acqua piovana dovrebbe infiltrarsi a notevoli profondità per potersi "riscaldare" e quindi dovrebbe attraversare le zone con acqua salmastra e/o salata. Questo fenomeno sembra irrealistico tenendo presente che le acque dolci hanno una densità minore rispetto a quella delle acque salate.

Considerando i caratteri geologici ed idrogeologici del territorio, insieme a quelli geochemici delle acque sotterranee circolanti nel suo sottosuolo, si ritiene che le sorgenti delle acque sulfuree di Santa Cesarea derivino da una circolazione profonda nel sottosuolo del Mare Adriatico. La Fig. 12 mostra uno schema geologico-idrogeologico concettuale del sistema geotermico di Santa Cesarea Terme desunto dai dati fino ad oggi conseguiti. Esso mostra uno dei possibili percorsi del fluido geotermico dall'area di ricarica (fondale marino) fino alla zona di emergenza in corrispondenza delle grotte carsiche costiere, che avverrebbe in un intervallo temporale all'incirca di 20000 anni come dedotto dai dati geocronologici. Le acque marine s'infiltrerebbero quindi in profondità lungo fasce a maggiore permeabilità, corrispondenti alle zone di deformazione di faglie transtensive. Penetrando in profondità esse si riscaldano grazie al gradiente geotermico (sorgente di calore del sistema geotermico). Durante il loro percorso, le acque marine hanno interagito con i sedimenti olocenico-pliocenico, i depositi messiniani ed i sottostanti carbonati oligo-mesozoici, arricchendosi, per esempio, in calcio, solfato, boro, litio e solfuro (Santaloia *et al.*, 2016). Infatti, il fluido geotermico ha attraversato depositi argillosi, ricchi in sostanza organica come indicato dai contenuti in Br e B (Martin *et al.*, 1993; Kharaka &

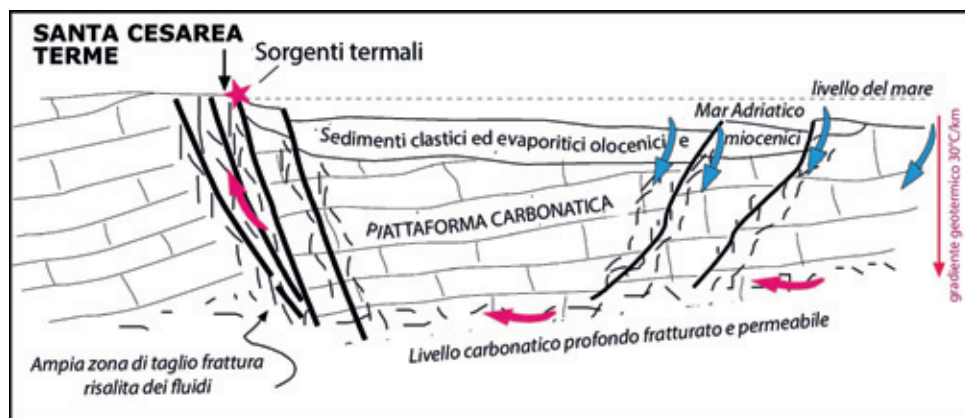


Fig. 12 – Modello concettuale (non in scala) delle relazioni tra strutture e circolazione del fluido nella zona di Santa Cesarea Terme. L'acqua di mare è canalizzata in profondità (freccie blu) attraverso le zone di faglia che interessano il fondo marino fino alla piattaforma carbonatica, interagendo principalmente con le evaporiti del Messiniano e i calcari del Mesozoico-Oligocene (da Santalòia *et al.*, 2016).

Hanor, 2003). L'interazione con depositi ricchi di minerali argillosi sarebbe stata efficace dato l'elevato contenuto in Li^+ misurato nei campioni di acqua termale (White, 1957; You *et al.*, 1333; Edmunds & Smedley, 2000).

Considerando il gradiente geotermico della zona in esame, ed una temperatura di circa 80-85° per l'acqua, le profondità a cui si può collocare il serbatoio potenziale è di 2-3 km (Fig. 12). Una volta infiltratasi, aumentando la temperatura per conduzione ed interagendo con le rocce, l'acqua marina diviene un fluido geotermico che, per le sue caratteristiche termiche, ha una densità minore e quindi tende a generare moti convettivi. I fluidi caldi in rapida risalita, in corrispondenza delle discontinuità tettoniche che dislocano l'alto strutturale di SCT, raggiungono la superficie mantenendo sostanzialmente elevata la loro temperatura.

Secondo lo schema geologico ed idrogeologico proposto, l'energia termica del sistema geotermico di SCT è considerata rinnovabile nel quadro di uno sfruttamento che tenga conto della potenzialità del sistema. Questa energia potrebbe quindi essere utilizzata non solo per potenziare le attività termali già presenti nel territorio ma anche per l'installazione d'impianti per il riscaldamento di edifici (pubblici e privati) o impianti, ad esempio, per l'essiccazione della pasta. In quest'ottica, sempre all'interno del Progetto VIGOR, sono stati svolti studi di fattibilità tecnico/economica per lo sviluppo di un progetto impiantistico per la realizzazione di due impianti a pompa di calore geotermica in grado di alimentare due distinti processi di essiccazione della pasta: uno artigianale a bassa temperatura ($T = 60^\circ\text{C}$) ed uno industriale ad alta temperatura ($T=120^\circ\text{C}$; AA.VV., 2014; Bruno *et al.*, 2016).

Tale potenziamento potrebbe scaturire solo da una validazione fisica del modello concettuale proposto, mediante una modellazione numerica del sistema geotermico (ricarica-circolazione-emergenza), e che permetterebbe di definire anche la concreta rinnovabilità e la sostenibilità della risorsa geotermica.

RINGRAZIAMENTI

L'attività è stata realizzata nell'ambito del progetto VIGOR (Valutazione del potenziale Geotermico delle regioni convergenza), all'interno del Programma Ope-

rativo Interregionale "Energie Rinnovabili e risparmio energetico" finalizzato alla valutazione del potenziale geotermico in quattro regioni del sud Italia.

Gli autori ringraziano: Il Dr. Piezzo del MiSE-DGNERE (Direttore generale del Dipartimento per l'energia nucleare, le energie rinnovabili e l'efficienza energetica del Ministero dello Sviluppo Economico), il Dr. Brugnoli, ex direttore del CNR-DTA (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Dipartimento di Scienze del Sistema Terra e Tecnologie per l'Ambiente) ed il coordinatore del progetto VIGOR, Dr.ssa Manzella del CNR-IGG (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Geoscienze e Georisorse).

Un particolare ringraziamento va al Direttore generale delle Terme di Santa Cesarea Dr. Luigi Guida per aver dato la disponibilità ad effettuare la serie di rilievi necessari a realizzare lo studio geologico e idrogeologico, all'Ing. Mario Cursano per la sua disponibilità e agli operai delle Terme per il costante sostegno mostrato.

Un ringraziamento va inoltre fatto ai cittadini per aver messo a disposizione i pozzi per il campionamento delle acque.

BIBLIOGRAFIA

ARDIZZONE F., BARNABA F., BASSO A., CASARANO D., DRAGONE D., GIORNETTI L., LIMONI P.P., LIOTTA D., LOLLINO P., PAGLIARULO R., PALLADINO G., PARISE M., POLEMIO M., ROMANAZZI A., TRIZZINO R., WASOWSKI J., ZUFFIANÒ L.E., RIZZO E., MINISSALE A., MONTANARI D., MONTEGROSSI G., MUSSI M., CARDELLICCHIO N., ALDIGHIERI B., DE FRANCO R. (2012) – *Rapporto Di Fattibilità Tecnica 1: Area Di Studio Santa Cesarea Terme*. Progetto Vigor, All, 3, 37 pp.

BIGINELLI F. (1899) – *Acque e fanghi delle Grotte di S. Cesaria*. Ann. Fram. Chim. Bio.

BOSELLINI A., BOSELLINI F.R., COLALONGO M.L., PARENTE M., RUSS A., VESCOGNI, A. (1999) – *Stratigraphic architecture of the Salento coast from Capo d'Otranto to Santa Maria di Leuca (Apulia, southern Italy)*. Rivista Italiana Paleontologia Stratigrafica 105 (3), 397-416.

BOSSIO A., MAZZEI R., MONTEFORTI B., SALVATORINI G. (2005) – *Stratigrafia del Neogene e Quaternario del Salento sud-orientale (con rilevamento geologico alla scala 1:25.000)*. Geologica Romana 38, 31-60.

DI BUCCI D., CAPUTO R., MASTRONUZZI G., FRACASSI U.,

- SELLERI G., SANSÒ P. (2011) – *Quantitative analysis of extensional joints in the southern adriatic foreland (Italy), and the active tectonics of the apulia region*. J. Geodyn. 1–2, 141–155.
- CALÒ G. (1993) – *Accertamenti Idrogeologici relative al nuovo pozzo Terme ed al nuovo pozzo di monitoraggio*. Comune di S.ta Cesarea Terme Lecce, (Rapporto Inter-no).
- CALÒ G., TINELLI R. (1995) – *Systematic hydrogeological study of a hypothermal spring (S. Cesarea Terme, Apulia), Italy*. Journal of Hydrology 165, 185–205.
- CLARK I.D., FRITZ P. (1997) – *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- CLARK W.B., JENKINS W.J., TOP Z. (1997) – *Determination of tritium by mass spectrometric measurements*. Journal of Applied Radioactive Isotopes 27, 515–522.
- CLAYPOOL G.E., HOLSER W.T., KAPLAN I.R. (1980) – *The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation*. Chem. Geol. 28, 199–260.
- CNG (CONSIGLIO NAZIONALE GEOLOGI) E UGI (UNIONE GEOTERMICA ITALIANA) (2008) - Aree di interesse geotermico prioritario e percentuale dei territori con fluidi geotermici presenti nel territorio. La Geotermia in Italia.
- COTECCHIA V. (1977) – *Studi e ricerche sulle acque sotterranee e sull'intrusione marina in Puglia (Penisola Salentina)*. Quaderni dell'Istituto di ricerca sulle acque, Consiglio nazionale delle ricerche, pp. 345.
- COTECCHIA V., GRASSI D., POLEMIO M. (2005) – *Carbonate aquifers in Apulia and seawater intrusion: Giornale di Geologia Applicata*, v. 1, no. Some Engineering Geology case histories in Italy, Special Issue for 32nd IGC, Florence, 2004, 219–231.
- CRAIG H. (1961) – *Isotopic variations in meteoric waters*. Science 133, 1702–1703.
- DEL BEN A., MOCNIK A., VOLPI V., KARVELISCA P. (2015) – *Old domains in the South Adria plate and their relationship with the West Hellenic*. Journal of Geodynamics 89, 15–28.
- BRUNO D.E., LOMBARDO G., DI SIIPIO E., GALGARO A., D'ARPA S., DESTRO E., PASSARELLA G., BARCA E., URICCHIO V.F., MANZELLA A. (2016) – *Mo.nalis.a: a methodological approach to identify how to meet thermal industrial needs using already available geothermal resources*. Energy Efficiency. DOI 10.1007/s12053-016-9481-4.
- DELLA VEDOVA B., BELLANI S., PELLIS G. SQUARCI P. (2001) – *Deep temperatures and surface heat flow distribution*. In: Vai G.B. and Martini L.P. (Ed.), Anatomy of an orogen: the Apennines and adjacent Mediterranean basins. Kluwer Academic Publishers, pp 65–76.
- DI BUCCI D., CAPUTO R., MASTRONUZZI G., FRACASSI U., SELLERI G., SANSÒ P. (2011) – *Quantitative Analysis of Extensional Joints in the Southern Adriatic Foreland (Italy), and the Active Tectonics of the Apulia Region*. Journal of Geodynamics 51, (1-2), 141–155.
- EDMUNDS W.M., SMEDLEY P.L. (2000) – *Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer*. Applied Geochemistry 15, 737–752.
- FAVALI P., MELE G., MATTIETTI G. (1990) – *Contribution to the study of the Apulian microplate geodynamics*. Memorie della Società Geologica Italiana 44, 71–80.
- GATT J.R., CARMÍ I. (1970) – *Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area*. Journal of Geophysical Research 75, 3032–3048.
- Gunn J, Bottrell S.H., Lowe D.J., Worthington S.R.H. 2006. Deep groundwater flow and geochemical processes in limestone aquifers: evidence from thermal waters in Derbyshire, England, UK. Hydrogeological Journal 14, 868–881.
- INGV (2006) – *Mappa di pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale*. In: OPCM 28 aprile 2006, n. 3519, Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone, All. 1b, G.U. n. 108 del 11 maggio 2006, Roma.
- KHARAKA Y.K., HANOR J.S. (2003) – *Deep Fluids in the Continents: I. Sedimentary Basins*. Treatise on Geochemistry 5 (9), 1–48.
- MACHEL H.G. (2001) – *Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings - old and new insights*. Sedimentary Geology 140, 143–175.
- MAGGIORE M., PAGLIARULO P. (2004) – *Circolazione idrica ed equilibri idrogeologici negli acquiferi della Puglia*. Geologi e territorio 1, 13–35.
- MARTIN J.B., GIESKES J.M., TORRES M., KASTNER M. (1993) – *Bromine and iodine in Peru margin sediments and pore fluids: implications for fluid origins*. Geochimica Cosmochimica Acta 57, 4377–4389.
- MILANI M. (1815) – *Cenni geologici sulla Provincia di Terra d'Otranto*, Napoli.
- MINISSALE A., VASELLI O. (2011) – *Karst springs as natural pluviometers: constraints on the isotopic composition of rainfall in the Apennines of central Italy*. Appl. Geochem. 26, 838–852.
- MOCNIK A. (2008) – *Metodologie geofisiche integrate per la correlazione tra strutture superficiali e profonde nel Canale di Otranto*. Degree Thesis, University of Trieste, 1–141.
- Mongelli F., Zito G., Tramacere A., Ciaranfi N., Giaculli A. (1986) – *Contributo alla mappa del flusso geotermico in Italia: nuove misure in Italia meridionale*. 5° Convegno Annuale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Roma.
- NAPPI G., DE LUCA S., VITTO E., BLEVE R., PISPICO A. (2005) – *Evaluation of short-term efficacy of the sulphorous-sodium chloride-bromide-iodide water of the Santa Cesarea Terme in patients with secretory otitis media*. Medicina Clinica e Termale, 18(57), pp. 73–83.
- PEPE M., PARISE M. (2013) – *Structural control on development of karst landscape in the Salento Peninsula (Apulia, SE Italy)*. Acta Carsologica 43 (1), 101–114.
- POLEMIO M., LIMONI P.P., LIOTTA D., PALLADINO G., ZUFFIANÒ L.E., SANTALOAIA F. (2014) – *A peculiar case of coastal springs and geogenic saline groundwater*. Atti del

Convegno “23rd Salt Water Intrusion Meeting”, Husum 2014. ISBN: 978-3-00-046061-6.

POLEMIO M., LIMONI P. P., ZUFFIANO L.E., SANTALOAIA F. (2012) – *Santa Cesarea coastal thermal springs (southern Italy)*. In Proceedings 22nd SWIM, Armacao dos Buzios (Brazil), 17-22/06/2012 2012, p. 101-104.

POLEMIO M., DRAGONE V., LIMONI P.P. (2009) – *Monitoring and methods to analyse the groundwater quality degradation risk in coastal karstic aquifers (Apulia, Southern Italy)*. Environmental Earth Sciences (formerly Environmental Geology) 58 (2), 299–312.

POMAR L., MATEU-VICENS G., MORSILLI M., BRANDANO M. (2014) – *Carbonate ramevolution during the Late Oligocene (Chattian), Salento Peninsula, southern Italy*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 404, 109–132.

RICCHETTI G., CIARANFI N., LUPERTO SINNI E., MONGELLI F., PIERI P. (1988) – *Geodinamica ed evoluzione sedimentaria e tettonica dell'Avampese Apulo*. Memorie della Società Geologica Italiana 41, 57–82.

ROMANAZZI A., POLEMIO M., GENTILE F. (2015) – *Modelling and management of a Mediterranean karstic coastal aquifer under the effects of seawater intrusion and climate change*. Environmental Earth Science 74, 115–128.

RIZZO E., CAPUTI A., GIOCOLI A., ROMANO G. PISCITELLI S., PERRONE A., VOTTA M., DE CARLO L. (2012) – *Tomografie geoelettriche ad alta risoluzione (ERT): Sito di Santa Cesarea Terme*. Rapporto Interno, IMAA-CNR, Progetto VIGOR, 1-14.

ROVERI M., FLECKER R., KRIJGSMAN W., LOFI J., LUGLI S., MANZI V., SIERRO F.J., BERTINI A., CAMERLENGHI A., DE LANGE G., GOVERS R., HILGEN FRITS J., HÜBSCHER C., MEIJER P.T.H., STOICA M. (2014) – *The Messinian Salinity Crisis: Past and future of a great challenge for marine sciences*. Marine Geology 352, 25–58.

SANTALOAIA F., ZUFFIANÒ L.E., PALLADINO G., LIMONI P.P., LIOTTA D., MINISSALE A., BROGI A., POLEMIO M. (2016) – *Coastal thermal springs in a foreland setting: The Santa Cesarea Terme system (Italy)*. Geothermics, 64, 344-361.

SIVAN O., YECHIELI Y., HERUT B., LAZAR B. (2005) – *Geochemical evolution and timescale of seawater intru-*

sion into the coastal aquifer of Israel. Geochimica et Cosmochimica Acta 69 (3), 579–592.

UTRILLA R., PIERRE C., ORTI F., PUEYO J.J. (1992) – *Oxygen and sulphur isotope composition as indicators of the origin of Mesozoic and Cenozoic evaporites from Spain*. Chem. Geol. 102, 229–244.

ViDEPI Project (Visibility of Petroleum Exploration Data in Italy) (2009) – Visibility of petroleum exploration data in Italy. <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/videpi/en/default.htm>.

VISINTIN B. (1944) – *Studio sull'acqua della Grotta Gattulla delle Terme demaniali di S. Cesarea*. Rendiconti Istituto Superiore Sanità 7 (2).

WHITE D.E. (1957) – *Magmatic, Connate, and Metamorphic waters*. Bulletin of Geological Society of America 68, 1659–1682.

WYNN J.G., SUMRALL J.B., ONAC B.P. (2010) – *Sulfur isotopic composition and the source of dissolved sulfur species in thermo-mineral springs of the Cerna valley, Romania*. Chemical Geology 271, 31–43.

YOU C.F., GIESKES J.M., CHEN R.F., SPIVACK A.J., GAMO T. (1993) – *Iodide, bromide, manganese, boron, and dissolved organic carbon in interstitial of organic carbon-rich marine sediments: Observations in Nankai accretionary prism*. Proc. ODP, Init. Reports, 131, 165-174.

ZEZZA F. (1980) – *Le sorgenti ipotermali solfuree di Santa Cesarea Terme*. Salentum, Azienda di cura, soggiorno e turismo, Santa Cesarea Terme, anno III, n. 1-2, pp. 37.

ZUFFIANÒ L.E., POLEMIO M., LIMONI P.P., SANTALOAIA F. (2016) – *Geochemistry of groundwater at the seawater/freshwater interface of the Santa Cesarea thermal springs (south Italy)*. Rendiconti online della Società Geologica Italiana, v. 41, p. 103-106.

ZUFFIANÒ L.E., PALLADINO G., SANTALOAIA F., POLEMIO M., LIOTTA D., LIMONI P.P., PARISE M., PEPE M., CASARANO D., RIZZO E., MINISSALE A., DE FRANCO R. (2013) – *Geothermal resource in a foreland environment: the Santa Cesarea Terme thermal springs (Southern Italy)*. In: European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italia, 3-7/06/2013, p. 101-104, ISBN: 978-2-8052-0226-1.