

GEOLOGI e TERRITORIO

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

ISSN: 1974-1189

CARATTERIZZAZIONE TESSITURALE E COMPOSIZIONALE DELLE SABBIE DI SPIAGGIA: UN APPROCCIO SEDIMENTOLOGICO-BIOLOGICO

**Rosa Scotti, Massimo Moretti, Pasquale Acquafredda, Rossella Baldaconi, Stefania Lisco,
Giuseppe Mastronuzzi, Vincenzo Moretti, Carmela Nardò, Marcello Tropeano**

APPLICAZIONE DELLE EQUAZIONI DI NAVIER-STOKES PER STUDIARE L'INTRUSIONE MARINA IN ACQUIFERI CARSICI

Costantino Masciopinto



GEOLOGI e TERRITORIO

Periodico dell'Ordine Regionale
dei Geologi - Puglia
Anno XI - n. 2/2014

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, 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 9 febbraio 2015

SOMMARIO

2

Editoriale del Presidente dell'ORG - Puglia
Salvatore Valletta

3

CARATTERIZZAZIONE TESSITURALE
E COMPOSIZIONALE DELLE SABBIE
DI SPIAGGIA: UN APPROCCIO
SEDIMENTOLOGICO-BIOLOGICO

*Rosa Scotti, Massimo Moretti, Pasquale Acquafredda,
Rossella Baldaconi, Stefania Lisco,
Giuseppe Mastronuzzi, Vincenzo Moretti,
Carmela Nardò, Marcello Tropeano*

19

APPLICAZIONE DELLE EQUAZIONI
DI NAVIER-STOKES PER STUDIARE
L'INTRUSIONE MARINA IN ACQUIFERI
CARSICI

Costantino Masciopinto

31

RICORDO DI RUGGIERO CAPOZZA

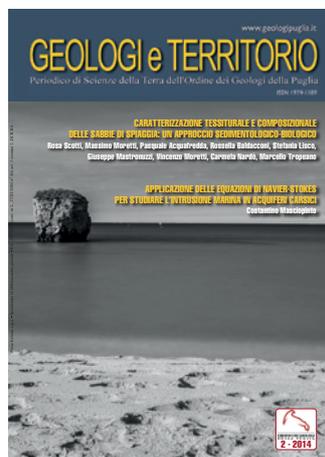


Foto copertina di Daniele Mercadante.
Concorso fotografico "Passeggiando tra
i Paesaggi Geologici della Puglia".

La sentenza n. 238/2015 del Consiglio di Stato ha respinto il ricorso del Consiglio Nazionale dei Geologi, confermando che i liberi professionisti possono essere qualificati come impresa, superando il concetto di “decoro professionale” e annullando il potere di vigilanza deontologica dell’Ordine. Tale sentenza ci pone il grande interrogativo di come garantire la qualità delle prestazioni professionali. Di fatto, con l’abolizione delle tariffe e con il mancato riconoscimento dei diversi piani di azione dell’attività intellettuale e di quella commerciale, viene minacciata la qualità del lavoro professionale, che nel campo delle attività del geologo, si riflette sulla corretta prevenzione dei rischi naturali, sulla attenta tutela del territorio e della salvaguardia delle sue risorse. La sentenza convalida, inequivocabilmente, che in questo contesto prevarrà la logica del massimo ribasso, caratteristico delle gare di servizi.

Se a questo, aggiungiamo un certo ostracismo nei confronti della geologia, diffuso in alcuni settori tecnici della pubblica amministrazione, l’assenza di adeguate figure tecniche negli uffici pubblici (non solo geologi) e, per la nostra regione, la frammentazione delle competenze nel settore geologico, non è difficile immaginare le ripercussioni sulla prevenzione e mitigazione di tanti dissesti che hanno significativamente interessato ampie aree del nostro territorio. Senza un’adeguata presenza di risorse tecniche multidisciplinari negli uffici, non è possibile sostenere un’attenta programmazione della spesa, tantomeno il controllo sui finanziamenti concessi; nel caso dei dissesti geomorfologici e idrogeologici, per esempio, non sarà possibile correggere la tanto auspicata pianificazione degli interventi che eviti il ripetersi di misure proposte in emergenza che, in molti casi, hanno contribuito ad aumentare la pericolosità e il rischio dell’area.

E’ ora che il geologo contribuisca in modo efficace, anche nella nostra regione, alla programmazione e gestione dell’uso del territorio, valorizzando le proprie competenze soprattutto nelle dinamiche evolutive del territorio, riconoscendone i potenziali dissesti e apportando un contributo “d’avanguardia” nell’ambito delle politiche di urbanistica sostenibile e di pianificazione paesaggistica.

In tale ottica, si auspica che la nuova amministrazione regionale sappia recuperare il forte ritardo nel valorizzare la figura del geologo, in modo tale da poter fornire le giuste risposte in termini di istanze di sicurezza idrogeologica, sismica, ma anche in termini di sviluppo energetico, di bonifiche e recuperi ambientali, di valorizzazione della geodiversità e di salvaguardia delle risorse naturali.

Il tema delle bonifiche e dei recuperi ambientali, a cui la Regione Puglia è particolarmente sensibile, deve e dovrà allargare adeguatamente le proprie maglie al geologo per poter garantire il reale raggiungimento dell’obiettivo del recupero di tutti gli equilibri ambientali, altrimenti sarà sempre come aver guardato in maniera parziale ad un modello ambientale da recuperare.

La nuova amministrazione si dovrà far carico anche di programmare l’istituzione del proprio Servizio Geologico Regionale (o struttura interarea) coordinando tutte le risorse tecniche disponibili, investendo sulla cartografia geologica in Puglia, ferma a pochi fogli rilevati, e destinando risorse finanziarie per favorire l’implementazione nelle pubbliche amministrazioni della presenza del “geologo di zona”.

I geologi possono contribuire a far risparmiare sulla spesa pubblica utilizzata per interventi post emergenza, puntando sulla previsione e prevenzione, e sulle misure che più efficacemente possano contribuire alla salvaguardia dei territori. A tale obiettivo si può giungere se le amministrazioni contribuiranno a superare il difetto d’identificazione del geologo come il professionista che “dice No” in maniera scomoda e se accoglieranno, invece, il suo contributo come il parere di chi difende gli equilibri del territorio contribuendo efficacemente alla corretta definizione di un modello concettuale dello stesso.

Bari, gennaio 2015

Salvatore Valletta

CARATTERIZZAZIONE TESSITURALE E COMPOSIZIONALE DELLE SABBIE DI SPIAGGIA: UN APPROCCIO SEDIMENTOLOGICO-BIOLOGICO

Rosa Scotti¹, Massimo Moretti², Pasquale Acquafredda², Rossella Baldacconi³, Stefania Lisco²,
Giuseppe Mastronuzzi², Vincenzo Moretti⁴, Carmela Nardò⁵, Marcello Tropeano²

¹ Libero professionista. Via Leonida 31, Taranto, scotti.rosa1980@gmail.com

² Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari "Aldo Moro", massimo.moretti@uniba.it, pasquale.acquafredda@uniba.it, ste.lisco@hotmail.it, gimastronuzzi@libero.it, marcello.tropeano@uniba.it

³ Libero professionista. Via Gastone Mezzetti 21, Taranto, rossella_baldacconi@msn.com

⁴ Regione Puglia - Servizio Ecologia - Ufficio V.I.A./VINC.A., v.moretti@regione.puglia.it

⁵ Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Bari "Aldo Moro", carmela.nardo@uniba.it

1. INTRODUZIONE

Lo studio delle spiagge rappresenta un campo di grande interesse nelle Scienze Geologiche (si veda Schwartz, 2005; e referenze citate) ed in particolare nei campi della Sedimentologia (Greenwood e Davies, 1984) e della Geomorfologia (Bird, 2008). La comprensione dei meccanismi che regolano l'evoluzione delle spiagge non è solo un mero esercizio scientifico, ma comporta importanti ricadute economico-sociali; un gran numero di articoli e volumi scientifici è quindi incentrato sui numerosi risvolti geologici che coinvolgono l'evoluzione delle spiagge: la dinamica litorale (Ingle, 1966; Fredsøe e Deigaard, 1994; Anthony, 2009), l'erosione costiera (Charlier e De Meyer, 1998; Uda, 2010; van Rijn, 2011), la gestione ed il monitoraggio delle aree costiere (National Research Council, 1989; Kay e Alder, 2002) e gli interventi di ripascimento (Finkl, 1981; National Research Council, 1989; Nordstrom, 2005). Le spiagge rappresentano però ambienti nei quali gli aspetti ecologici e biologici possono giocare spesso un ruolo determinante anche per l'evoluzione fisica del sistema; ciononostante sono rari in letteratura i lavori che descrivono le interazioni fra matrici biologiche e le dinamiche sedimentarie nelle aree costiere (National Research Council, 1994a;b).

In questo lavoro si presenta un approccio multidisciplinare allo studio delle spiagge, incentrato sulle interazioni fra gli organismi che popolano i fondali delle aree costiere ed i processi fisici connessi alla sedimentazione. Questi due aspetti sono intimamente interconnessi quando si considerano in particolare i processi di produzione del sedimento. Nei settori costieri, i sedimenti possono rinvenire dalla redistribuzione (operata dall'azione di onde, maree e correnti) dei materiali trasportati dai fiumi e/o dall'erosione delle rocce presenti nel settore costiero considerato (in entrambi i casi definiti materiali clastici terrigeni o extrabacinali) oppure da una produzione di particelle clastiche che avviene in ambiente marino per processi biotici e/o abiotici (materiali clastici intrabacinali). Normalmente questi ultimi sono di natura carbonatica ed è frequente che i sedimenti delle spiagge ne contengano una percentuale variabile, data da bioclasti, cioè da gusci o frammenti degli organismi che popolano

i fondali considerati. Nelle aree marine temperate, come quella mediterranea, tale frazione carbonatica bioclastica, che può costituire spesso la quasi totalità del sedimento, è rappresentata da associazioni di tipo *foramol*, così chiamate perché originariamente ritenute esclusivamente ricche in foraminiferi bentonici e molluschi (Lees and Bullet, 1972; Lees, 1975). Lungo i litorali pugliesi sono molto diffusi sedimenti costieri prevalentemente carbonatici intrabacinali in cui le associazioni di tipo *foramol*, nello specifico, sono rappresentate da facies di tipo *molechfor* (molluschi, echinidi e foraminiferi bentonici associati a balani, serpulidi e briozoi) e *rhodalgal* (alge coralline incrostanti – Rhodophyta - briozoi, foraminiferi bentonici e balani) nei settori marini prossimali passanti verso il largo a facies essenzialmente *rhodalgal* su fondali caratterizzati anche da praterie di Posidonia (Tropeano e Spalluto, 2006 e bibliografia citata).

In questo studio vengono descritte le relazioni tra sedimenti litoclastici e quelli bioclastici nella spiaggia di Rosa Marina (BR), situata lungo il litorale pugliese adriatico e che rappresenta un sito di grande interesse turistico-economico. L'esempio proposto permette di descrivere una metodologia di analisi dei sedimenti di spiaggia, tesa sia a caratterizzare le sabbie da un punto di vista tessiturale-petrografico, che a definire i caratteri dei popolamenti macrobentonici e le loro relazioni con il substrato sabbioso-roccioso. Lo studio delle complesse interazioni fra processi fisici e biologici fornisce infatti informazioni cruciali per tutti gli interventi di monitoraggio, salvaguardia e ripristino dei litorali. Ad esempio, gli interventi di ripascimento delle spiagge sabbiose (Chiocci e La Monica, 1999; van der Salm e Unal, 2003; Nicoletti *et al.*, 2006; APAT-ICRAM, 2007; Anfuso *et al.*, 2011) prevedono, accanto alla caratterizzazione fisica del sito di interesse (batimetrie, clima meteomarinico, trasporto litoraneo, analisi storica, ecc.) tesa a ricostituire il paesaggio preesistente all'erosione (pendenza, estensione, articolazione ed estetica della spiaggia ricostruita) e alla caratterizzazione chimica dei sedimenti da utilizzare (con particolare riferimento al loro inquinamento organico ed inorganico), una serie di studi biologici ed ecologici di dettaglio tesi ad evidenziare i principali popolamenti macrobentonici,

la presenza di praterie di fanerogame marine, di aree di *nursery*, o l'impatto dei ripascimenti sulle matrici biologiche (Colosio *et al.*, 2007). L'idoneità di una sabbia (litoranea o relitta) per interventi di ripascimento, dipende infine dalla sua "compatibilità" con le sabbie del litorale su cui si intende effettuare l'intervento: la definizione di "compatibilità" richiede anche una valutazione quantitativa dei parametri tessiturali e petrografico-mineralogici dei principali costituenti sia lito- che bioclastici (colore, frazioni granulometriche a $1/2 \phi$, principali caratteristiche mineralogiche, ecc.).

Va sottolineato che nel caso in oggetto gli aspetti di salvaguardia biologica sono interconnessi a quelli di salvaguardia fisica delle spiagge, dato che una frazione importante delle particelle che compongono il sedimento può derivare dalla presenza in area costiera di organismi a guscio calcareo, che potrebbero offrire un contributo volumetrico importante all'equilibrio fisico del sistema.

2. RILEVAMENTO GEOLOGICO-SEDIMENTOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO

La spiaggia di Rosa Marina (40,50 lat. N; 17,50 long. E) rappresenta una porzione del litorale posto a nord di Brindisi, lungo la costa adriatica pugliese (Fig. 1). Si tratta di una porzione di litorale di grande interesse turistico/economico: ospita due consorzi turistico-residenziali privati (per un totale di oltre 1.000 ville), un hotel-resort con ristorante, 3 piscine, ecc. Il sito è anche di grande valenza naturalistico-ambientale rientrando nel Parco Naturale Regionale delle Dune costiere tra Torre Canne e Torre San Leonardo (istituito con L.R. n.31 del 26.10.2006).

Quest'area costiera sottende piccoli bacini imbriferi solcati da corsi d'acqua (Vallone Pilone e Lama di Rosa Marina, Fig. 1) che scorrono in incisioni ("lame"), a carattere effimero ed in grado di trasportare solo moderate quantità di sedimenti verso mare, generalmente in occasione di eventi meteorologici intensi. Il clima meteomarinario dedotto dai dati della Stazione Mareografica e Ondametrica di Monopoli (40°58'30,0" Lat. N, 17°22'36,1" Long. E, distante meno di 25 km dalla spiaggia analizzata) nel periodo 1968-2008, indica che le direzioni prevalenti delle mareggiate sono da NW. Il trasporto sedimentario trattivo lungocosta dovrebbe, quindi, avvenire prevalentemente in direzione NW-SE. Questo settore della costa pugliese mostra un andamento spesso lineare con costa bassa sabbiosa con cordoni dunari attivi e ben sviluppate aree retrodunari palustri (a sud di Torre Canne). A partire dalla località Pilone e proseguendo verso sud sino alla località Monticelli (settore in cui è compresa Rosa Marina) la costa è maggiormente irregolare con tratti rocciosi che rappresentano locali promontori fra i quali si conservano strette spiagge sabbiose con caratteri simili a *pocket beach*, con cordoni dunari inattivi e/o in erosione. Secondo il Piano Regionale delle Coste (PRC, Regione Puglia, 2012), l'area costiera in esame è stata caratterizzata da una intensa urbanizzazione; gli interventi diretti sul litorale riguardano però solo un'opera trasversale all'altezza della foce della Lama di Rosa Marina ed un corto pontile frangiflutti nella medesima area. Per quanto riguarda l'erosione costiera, fenomeni di arretramento sono segnalati in Annese *et al.* (2003) in località Torre Canne (circa 7 km più a nord di Rosa Marina), mentre litorali stabili



Figura 1 - Ubicazione dell'area di studio. Rosa Marina (BR) si trova lungo il litorale adriatico, fra Bari e Brindisi ed è sede di una grande complesso turistico-residenziale. Si noti la presenza di due profonde incisioni fluviali ("lame").

sono risultati quelli in località Pilone (Fig. 1, dati POR Regione Puglia, 2006)

E' stato condotto un rilevamento geologico-sedimentologico speditivo, allo scopo di individuare le unità sedimentarie affioranti, la loro geometria, con particolare riferimento alle quote relative dei contatti stratigrafici, alle variazioni laterali di facies e di spessore e segnalando il loro eventuale stato di erosione. Lo schema delle unità sedimentarie affioranti proposto in questo lavoro (Fig. 2), sostanzialmente coincide con i dati noti in letteratura per questo settore del versante adriatico delle Murge (Ciaranfi *et al.*, 1988; Mastronuzzi *et al.*, 2001). Sulla Formazione della Calcarenita di Gravina (Pliocene superiore - Pleistocene inferiore), in erosione, si rinviene una serie di depositi di transizione e marini attribuibili a vari cicli sedimentari più recenti (Pleistocene medio-Olocene). La Calcarenita di Gravina affiora diffusamente in tutta l'area costiera analizzata e nella spiaggia sommersa, dove è sottoposta ad erosione da parte dell'azione diretta delle onde (GRA, Fig. 2a). Localmente la formazione è caratterizzata da spessi strati di calcareniti medie e grossolane intensamente bioturbate e con abbondante contenuto bioclastico (soprattutto alghe rosse). Sulla Calcarenita di

Gravina, all'incirca al livello del mare, affiorano le terre rosse (TR, Fig. 2a e b). Queste passano verso l'alto e lateralmente a depositi calcareo-marnosi (C1) a laminazione piana, costituiti da calcareniti fini con *clay chip* di terra rossa, abbondante matrice carbonatica ed elevato contenuto in ostracodi. Su TR e su C1 si rinviene un'unità calcarenitica grossolana, con fantasmi di laminazione piana (C2, Fig. 2a e b), che affiora pochi centimetri sopra il livello del mare. Il materiale bioclastico compreso in quest'ultima unità contiene numerosi frammenti di bivalvi e gasteropodi. Lateralmente questa unità passa ad una calcirudite a gasteropodi, con ciottoli di calcari micritici e calcarenitici in corrispondenza della Lama di Rosa Marina (CR - Fig. 2a e c). Sulle unità precedenti si rinviene una unità arenacea, con base posta fra 10 e 30 cm sopra il livello del mare (E1, Fig. 2a e 2c). Si tratta di un'arenaria a composizione mista (quarzo e carbonati quasi in percentuale simile), ben selezionata dal punto di vista granulometrico, con laminazione inclinata ad alto angolo. Una unità sabbiosa, con base posta da 40 cm a 2 m sul livello del mare, chiude la successione: è una unità sub-attuale eolica di duna costiera non attiva ed ora in forte erosione (E2 - Fig. 2a e 2c).

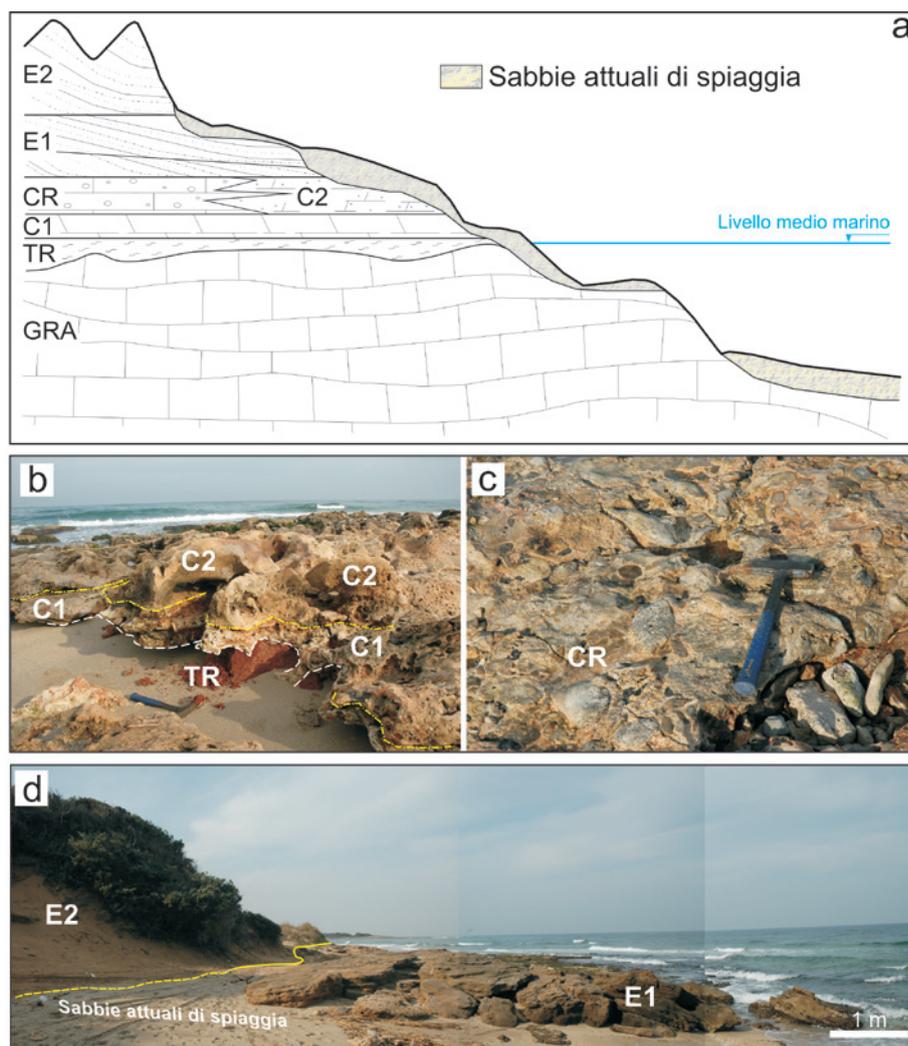


Figura 2 - a. Schema geologico dell'area analizzata. Per le sigle e le età delle unità sedimentarie, si veda il testo. b. Contatti stratigrafici fra l'unità a terra rossa (TR, in basso) e le sovrastanti calcareniti di laguna (C1) sulle quali si rinvengono delle calcareniti grossolane di ambienti marini poco profondi (C2). c. Caratteri macroscopici dell'unità calciruditica (CR) eterotipica con le calcareniti C2. d. Contatto fra l'unità eolica medio-olocenica (E1) e la sovrastante duna subattuale (E2). Si noti che in primo piano l'unità E1 è soggetta a forte erosione, con crolli localizzati e rotazione dei blocchi; sullo sfondo si nota l'unità E2 direttamente esposta all'erosione ad opera delle onde.

L'intera successione rappresenta due momenti differenti della generale regressione marina indotta dal lento sollevamento dell'Avampaese apulo. Le unità informali riconosciute (TR, C1, C2 ed E1) si sarebbero depositate sulla Calcarenite di Gravina, durante un episodio trasgressivo-regressivo, registrato da unità di laguna costiera/retrospiaggia (TR e C1) passanti verso l'alto ad un deposito trasgressivo di spiaggia sommersa (C2, lateralmente alimentato anche da carbonati "terrigeni" proveniente dalla paleolama di Rosa Marina, CR). In seguito, si sarebbe deposita l'unità eolica (E1) che rappresenta la parte regressiva della successione. Quest'ultima si sarebbe depositata in quest'area, come in molti altri settori costieri della Puglia, nell'Olocene medio (circa 6.000 anni fa, Mastronuzzi *et al.*, 2001; Mastronuzzi e Sansò, 2002). I depositi di duna costiera, invece, si sarebbero depositati in tempi più recenti (E2, Olocene superiore, Mastronuzzi *et al.*, 2001).

3. CARATTERIZZAZIONE TESSITURALE DELLE SABBIE DI SPIAGGIA

Le sabbie della spiaggia attuale sono state campionate nella spiaggia sommersa lungo un transetto perpendicolare alla costa, dalla battigia fino ad una profondità di 6 metri (base locale di azione delle onde di tempesta, Fig. 3). Nella spiaggia emersa sono state campionate le sabbie ogni 5 metri a partire dalla battigia, avendo cura di campionare le berme di tempesta ordinaria ed invernale (in aree laterali e meno frequentate) e le sabbie eoliche subattuali di *backshore*.

I campioni sono stati prelevati mediante infissione di un cilindro campionatore, che è stato chiuso ermeticamente allo scopo di evitare la perdita dei sedimenti più fini. In laboratorio, i campioni sono stati lavati con acqua distillata, seccati e pesati. Sono stati trattati con acqua ossigenata ed in seguito passati al setaccio 63 μm al fine di valutare le percentuali di materia organica e di sedimenti fini (entrambi presenti in percentuali trascurabili). Si è proceduto alla setacciatura meccanica con colonna di setacci ed agitatore meccanico. I risultati ottenuti sono stati elaborati con il software specifico Gradistat v8 (Blott e Pye, 2001) che permette di costruire sia gli istogrammi di distribuzione e le curve cumulative che un'accurata valutazione di tutti i parametri tessiturali (D50, *sorting* - σ , *skewness* - Sk e *kurtosis* - Kg).

Da un punto di vista della classificazione granulometrica i sedimenti campionati sono sabbie da medie a grossolane (Tab. 1 e Fig. 4). Il diametro delle sabbie risulta maggiore sulla battigia e sulle berme (ordinaria e di tempesta). La stessa tendenza si manifesta anche nel grafico del D50 (Fig. 5) in cui peraltro si può notare come vi siano accumuli di sedimento solo sulla spiaggia emersa (berme e battigia) mentre non sembra esserci alcuna barra alle profondità indagate.

Analizzando il *sorting*, è possibile affermare che le sabbie si presentano per lo più ben selezionate e che la cernita diminuisce nella spiaggia sommersa. La Sk (il coefficiente di asimmetria esprime lo scostamento tra mediana e media del campione) è pari a zero sulla battigia

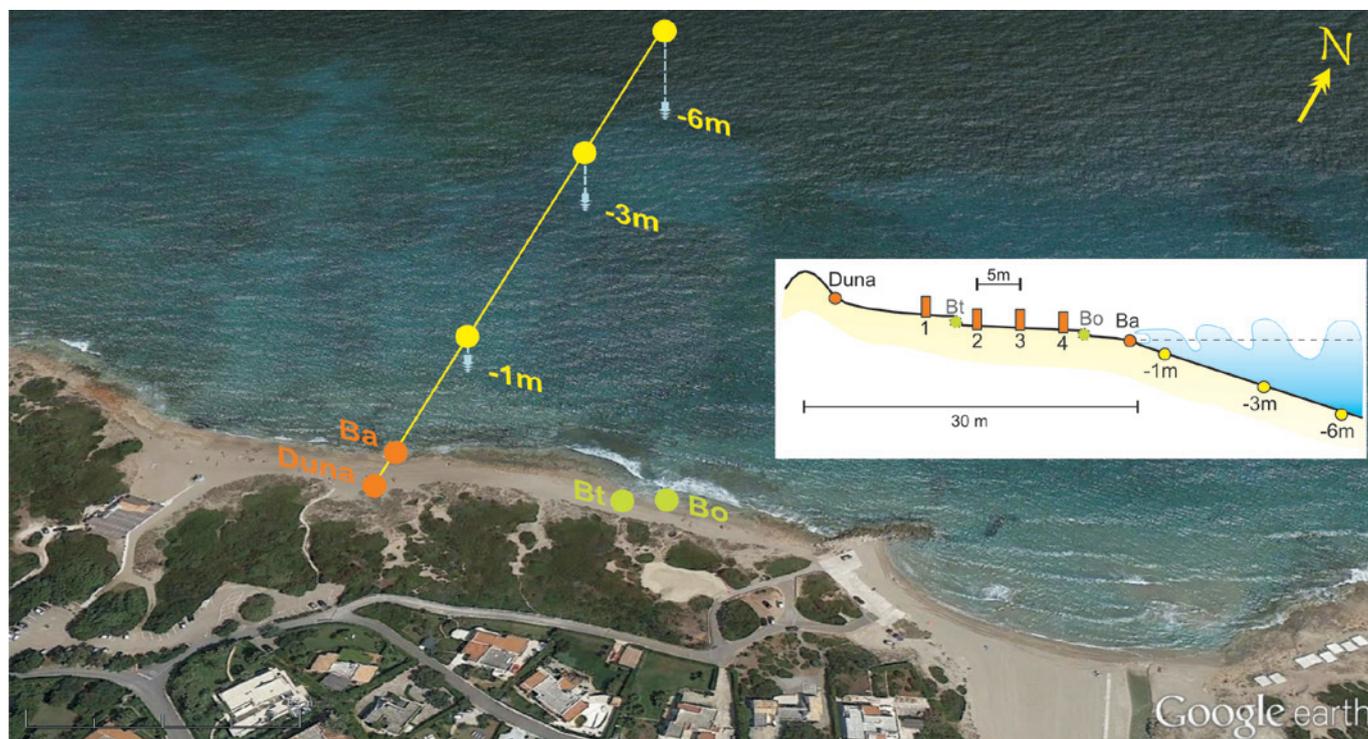


Figura 3 - Localizzazione delle stazioni di campionamento. Nella spiaggia emersa, i campioni 1-4 sono localizzati rispettivamente a 20, 15, 10 e 5 m dalla battigia (Ba). Il campione "Duna" è stato preso alla base della duna subattuale mentre i campioni Bo e Bt (la berma ordinaria e quella invernale) sono stati presi lateralmente (più a sud-est rispetto al transetto precedente) in un settore della spiaggia dove tali gradini morfosedimentari erano ancora riconoscibili.

Campione	D50 (μm)	Sorting ($\sigma\phi$)	Descrizione	Skewness ($Sk\phi$)	Forma	Kurtosis (Kg)	Forma
Duna	399,695	0,47	Sabbia media ben selezionata	0,568	coda verso il fine	1,676	molto leptocurtica
1	417,618	0,365	Sabbia media ben selezionata	0,051	simmetrica	2,482	molto leptocurtica
Bt	782,277	0,498	Sabbia grossolana ben selezionata	0,562	coda verso il fine	0,631	molto platicurtica
2	422,702	0,416	Sabbia media ben selezionata	-0,006	simmetrica	2,636	molto leptocurtica
3	433,633	0,577	Sabbia media moderatamente ben selezionata	-0,299	coda verso il grossolano	2,446	molto leptocurtica
4	429,620	0,302	Sabbia media molto ben selezionata	-0,292	coda verso il grossolano	1,77	molto leptocurtica
Bo	800,881	0,467	Sabbia grossolana ben selezionata	0,579	coda verso il fine	1,737	molto leptocurtica
Ba	838,784	0,155	Sabbia grossolana molto ben selezionata	0	simmetrica	0,738	platicurtica
-1 m	392,986	0,576	Sabbia media moderatamente ben selezionata	0,319	coda verso il molto fine	0,836	platicurtica
-3 m	397,568	0,825	Sabbia media moderatamente ben selezionata	-0,04	simmetrica	0,847	platicurtica
-6 m	249,487	0,662	Sabbia media moderatamente ben selezionata	-0,558	coda verso il molto grossolano	0,850	platicurtica

Tabella 1 - Parametri granulometrici dei campioni prelevati nella spiaggia di Rosa Marina.

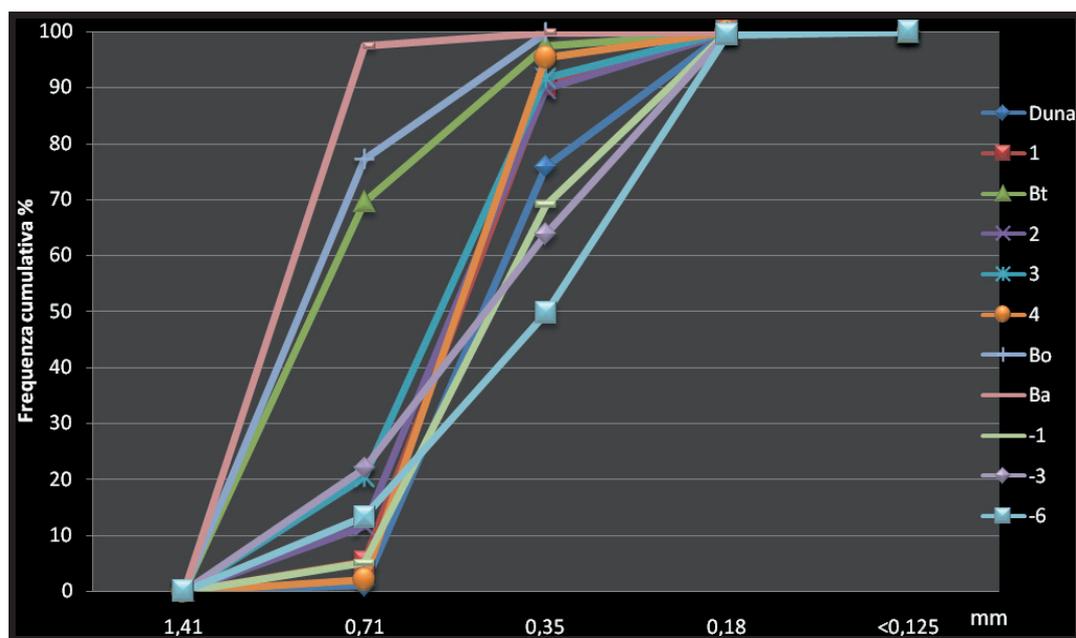


Figura 4 - Curve cumulative dei campioni di sabbia di spiaggia emersa e sommersa (per l'ubicazione dei campioni, si veda Fig. 3).

ed è negativa sul profilo di spiaggia emersa, con conseguente coda di materiali grossolani (media a sinistra della mediana); negli stessi punti, il Kg (il coefficiente di appuntimento cioè il rapporto tra l'ampiezza della parte centrale del diagramma e quella delle code) assume alti valori corrispondenti a curve di tipo leptocurtico, tranne che per il campione Bt (curva platicurtica). I parametri granulometrici possono essere utilizzati inoltre per ottenere informazioni (essenzialmente qualitative) sull'evoluzione di una spiaggia con particolare riferimento alla suscettibilità all'erosione (Dal Cin, 1969). A parità di diametro medio, le spiagge in avanzamento risultano meno classate e con curve tendenti ad una forma platicurtica (basso

kurtosis) rispetto a quelle in erosione; le prime inoltre presentano asimmetrie positive più elevate (o asimmetrie negative meno marcate) ed hanno code verso i sedimenti sottili rispetto a quelle in erosione. In altre parole, nelle spiagge in erosione, le frazioni fini sono facilmente allontanate dal moto ondoso e tale processo interessa, via via, frazioni granulometricamente più grossolane causando un generale impoverimento delle granulometrie più fini ed una classazione sempre maggiore nelle granulometrie residue (più grossolane).

I campioni provenienti dalla spiaggia di Rosa Marina hanno generalmente parametri statistici che indicano una tendenza evolutiva all'arretramento in quanto si riscontra:

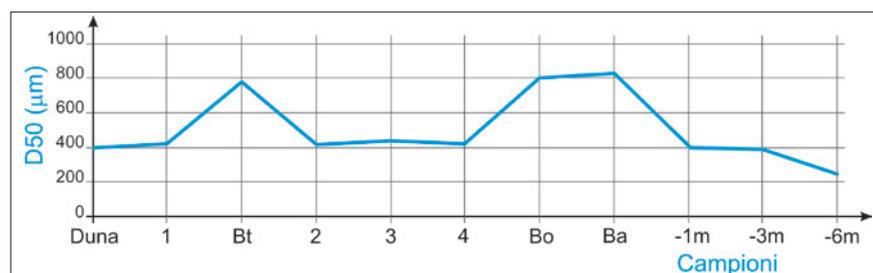


Figura 5 - Curva di variazione del D50 nella spiaggia emersa e sommersa. Si noti l'aumento della granulometria nell'area di battigia e di berma ordinaria e invernale.

Campione	Quota	D50 (Φ)	Sorting (σΦ)	Descrizione	Skewness (SkΦ)	Forma	Kurtosis (Kg)	Forma
2006 3_15_7	+1,39	1,56	0,39	Sabbia media ben selezionata	0	simmetrica	0,93	mesocurtica
2006 3_15_8	+0,58	1,85	0,48	Sabbia media ben selezionata	0,03	simmetrica	1,04	mesocurtica
2006 3_15_15	-2,90	2,08	0,43	Sabbia fine ben selezionata	-0,07	simmetrica	1,33	leptocurtica
2006 3_15_16	-4,58	2,27	0,32	Sabbia fine molto ben selezionata	0,09	simmetrica	1,54	molto leptocurtica

Tabella 2 - Parametri granulometrici delle sabbie di spiaggia in località Pilone. E' riportata anche la quota-profondità di campionamento

- una marcata classazione nei settori di spiaggia emersa rispetto a quella sommersa;
- Sk generalmente negative (è una chiara indicazione della presenza di una sensibile azione idrodinamica da parte delle onde di tempesta);
- curve di distribuzione spesso leptocurtiche o molto leptocurtiche con code spostate per lo più verso i materiali grossolani.

Naturalmente dati più affidabili potrebbero essere ottenuti effettuando campionamenti ripetuti nel corso dell'anno e in anni differenti. Dati di riferimento sono presenti in letteratura per aree limitrofe a quelle qui analizzate (spiaggia località Pilone - Fig. 1, dati POR Regione Puglia, 2006 - Tab. 2).

Si tratta pertanto di una spiaggia con sabbie da medie a fini. Il diametro delle sabbie risulta maggiore sulla parte emersa della spiaggia (Tab. 2). Analizzando gli altri parametri statistici si nota che le sabbie si presentano per lo più ben selezionate. La cernita aumenta nella spiaggia sommersa rispetto a quella emersa. La Sk, per lo più nulla per tutti i campioni, evidenzia una distribuzione simmetrica della granulometria e le curve granulometriche, negli stessi punti, variano da mesocurtiche per la parte emersa a molto leptocurtiche più in profondità. Tali dati indicano, in località Pilone, caratteri evolutivi di spiagge stabili e/o in avanzamento, confermando quindi, anche comparati-

vamente, una relativa tendenza all'arretramento nei parametri calcolati nell'adiacente settore di Rosa Marina.

4. CARATTERIZZAZIONE PETROGRAFICO-MINERALOGICA

Le sabbie della spiaggia emersa e sommersa sono state studiate al microscopio allo scopo di classificarle anche da un punto di vista composizionale. Inoltre tutte le unità sedimentarie riconosciute nel rilevamento geologico sono state campionate e studiate da un punto di vista petrografico allo scopo di ottenere maggiori informazioni sul ruolo dei processi di erosione del locale substrato nella formazione delle sabbie attuali di spiaggia.

4.a Le sabbie di spiaggia

La caratterizzazione petrografica delle sabbie di spiaggia è stata effettuata in prima istanza sulle singole frazioni granulometriche al fine di evidenziare le percentuali di sedimento bioclastico ed eventuali variazioni e/o concentrazioni di alcuni minerali nelle differenti classi granulometriche. Al microscopio ottico binoculare, sono stati separati tutti i bioclasti, formati da gusci interi o frammenti di gusci di organismi attuali, che sono stati in seguito posti in apposite piastre di Petri; il materiale bioclastico è stato pesato ed il peso ottenuto è stato riferito al campione totale (Tab. 3). Il solo peso dei bioclasti può in realtà for-

Campione	% Bioclasti (P)	% Litoclasti (P)	% Bioclasti (Vmax)	% Litoclasti (Vmin)
Duna	0,74	99,26	1	99
1 (20 m dalla battigia)	1,98	98,02	2,67	97,33
2 (15 m dalla battigia)	4,71	95,29	6,35	93,65
3 (10 m dalla battigia)	3,05	96,95	4,11	95,89
4 (5 m dalla battigia)	3,04	96,96	4,1	95,9
Berma ordinaria (Bo)	16,84	83,16	22,73	77,27
Battigia (Ba)	54,58	45,42	73,68	26,32
- 1 m	1,06	98,94	1,43	98,57
- 3 m	2,42	97,58	3,27	96,73
- 6 m	11,36	88,64	15,34	84,66

Tabella 3 - Percentuali di bioclasti e litoclasti nei campioni della sabbia di spiaggia emersa e sommersa, misurate in peso (P) e calcolate in volume (rispettivamente, Vmax e Vmin).



Figura 6 - Caratteri delle sabbie analizzate al microscopio ottico binoculare. a. Trattenuto ai 500 µm, si riconoscono numerosi clasti calcarei (litoclasti provenienti da rocce più antiche) e numerosi granuli di quarzo. b. Un frammento levigato di metallo proveniente da un oggetto di bigiotteria (orecchino, collana). c. Un grande frammento di vetro trasparente (proveniente da una bottiglia).

nire un dato fuorviante rispetto al volume effettivamente occupato. Infatti, nelle spiagge, i materiali terrigeni più diffusi hanno più o meno la stessa densità: i granuli di quarzo hanno densità pari a 2.66 g/cm³ e quelli carbonatici circa di 2.70 g/cm³. I bioclasti carbonatici inoltre possono avere densità differente (Schlager, 2005) a seconda della loro composizione (2.94 g/cm³ – aragonite; 2.72 g/cm³ – calcite; 2.89 g/cm³ - dolomite), ma normalmente la struttura dei gusci e di altri frammenti di organismi marini può presentare una porosità più o meno elevata (*intraparticle porosity* di Choquette e Pray, 1970) determinando un peso di volume variabile fra un massimo di circa 2,7 g/cm³ ed un minimo di 2.0 g/cm³ (Jackson and Richardson, 2007). I valori delle percentuali dei bioclasti in volume (Tab. 3) sono stati calcolati considerando i valori minimi di peso di volume corrispondenti ai materiali scheletrici più porosi (privi di riempimento di micrite e/o sparite, gusci *unfilled* di Choquette e Pray, 1970) allo scopo di avere una valutazione del volume massimo che la frazione bioclastica può occupare.

Il contenuto bioclastico nella spiaggia emersa è basso ed aumenta linearmente dalla duna alla battigia dove diventa predominante (Tab. 3). Nella spiaggia sommersa è generalmente basso anche se sembra aumentare con la profondità. Per quanto riguarda il contenuto bioclastico nelle differenti classi granulometriche, le analisi condotte mostrano che gusci e frammenti di gusci caratterizzano le frazioni >500 µm, e la percentuale dei bioclasti diminuisce rapidamente nelle classi via via più fini. I clasti, osservati al microscopio ottico binoculare (Fig. 6), sono soprattutto rappresentati da carbonati, quarzo ed altri minerali presenti in percentuali trascurabili quali pirosseno e feldspati; sono presenti anche rari frammenti di rocce silicoclastiche e materiale antropico (Fig. 6b e c).

Allo scopo di ottenere una classificazione composizionale delle sabbie analizzate, si è deciso di osservarle anche in sezione sottile. I campioni di sabbia relativi sia alla spiaggia emersa che a quella sommersa sono stati cementati con resina epossidica ed in seguito si sono ottenute 5 sezioni sottili. Tali sezioni sottili sono state utilizzate per meglio descrivere i caratteri petrografici delle principali specie mineralogiche riconosciute.

sociata con altri minerali. La seconda specie mineralogica più rappresentata nei sedimenti analizzati è rappresentata dal quarzo. Si tratta di quarzo cristallino e solo raramente è stato possibile riconoscere elementi ascrivibili a selce o calcedonio. I granuli di quarzo si presentano sempre ben arrotondati (Fig. 7b). I feldspati sono rappresentati sia da

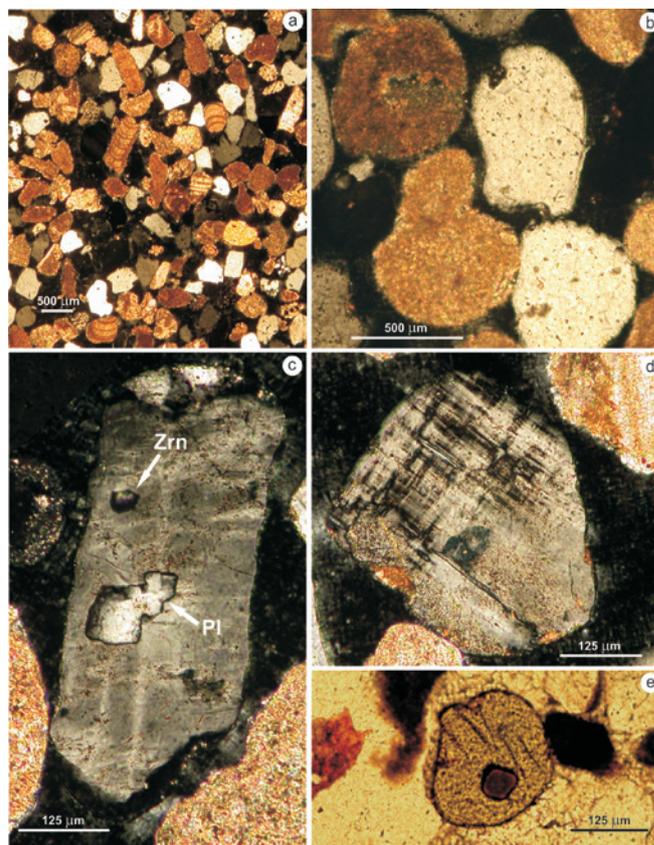


Fig. 7. Caratteri petrografici delle sabbie analizzate in sezione sottile. a. Nicol incrociati. Sabbie di spiaggia, si nota la composizione mista (essenzialmente carbonati e quarzo). Nella frazione carbonatica è ben evidente la presenza di grandi frammenti di alghe rosse. b. Nicol incrociati. Granuli di calcite e di quarzo ben arrotondati; alcuni granuli di quarzo, con anse magmatiche, sono riferibili a vulcaniti. c. Nicol incrociati. Granulo di microclino (K-feldspato) con inclusioni di zirconio (Zrn) e plagioclasio (Pl). d. Nicol incrociati. Microclino geminato albite pericline. e. Solo polarizzatore. Un pirosseno di colore giallo-verdastro con una inclusione di vetro vulcanico.

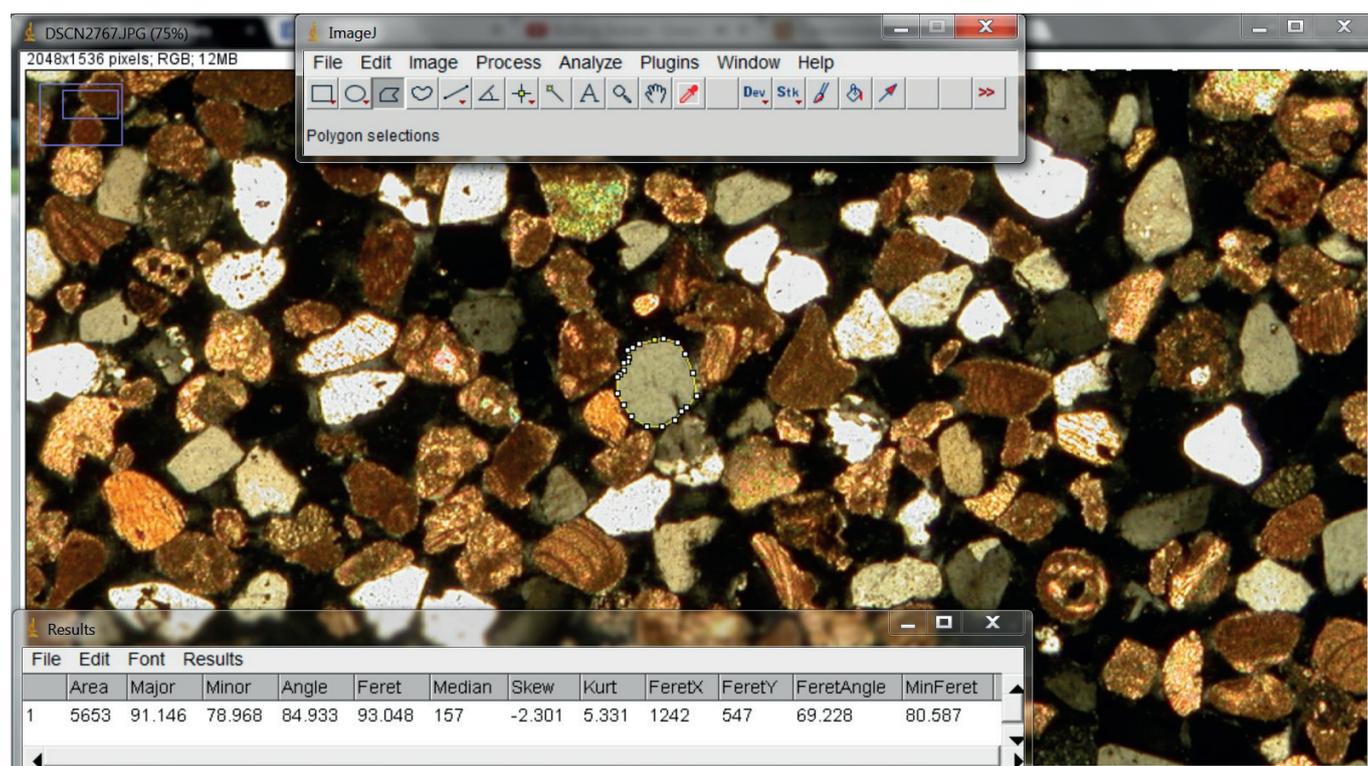


Figura 8 - Schermata del software di analisi d'immagine ImageJ. Contiene pochi intuitivi, ma potenti strumenti (in alto) che permettono la selezione o il disegno di singoli granuli per i quali il software calcola vari parametri d'area e di forma (Tabella 4).

	Carbonati %	Quarzo %	Altro %
1	59,33	36,42	4,25
2	62,06	32,73	5,21
3	63,24	33,41	3,35
4	63,43	35,35	1,22
5	62,91	32,21	4,88
6	58,05	37,34	4,61
7	62,43	33,26	4,31
8	61,78	34,86	3,36
9	60,73	35,29	3,98
10	64,67	33,91	1,42
Valore medio	61,86%	34,48%	3,66%

Tabella 4 - Composizione percentuale delle sabbie analizzate. Nella classe "Altro" ricadono frammenti litici, feldspati, pirosseni, opachi ed altri minerali presenti sempre in percentuali trascurabili.

I carbonati rappresentano la frazione predominante nei litoclasti. Sono rappresentati da litoclasti calcarei monomineralici provenienti da frammenti di rocce più antiche (si riconoscono calcari micritici e più raramente calcareniti) e litoclasti polimineralici nei quali la calcite è as-

feldspati di potassio che plagioclasti. I feldspati di potassio (soprattutto il microclino) presentano numerosi inclusi (zircono e plagioclasio – Fig. 7c) o evidenti bordi di alterazione in minerali argillosi (Fig. 7d). I minerali colorati sono rappresentati essenzialmente da pirosseni (Fig. 7e) di colore verde tenue tendente al giallognolo al solo polarizzatore; si presentano spesso ben arrotondati e possono contenere inclusi di vetro vulcanico (Fig. 7e).

In seguito, sulle 5 sezioni sottili, sono state scattate foto ad alta risoluzione, a basso ingrandimento (x1 e x2). Le immagini in formato *raster* sono state importate in un *freeware* di analisi d'immagine (ImageJ, versione 1.49, Fig. 8) nel quale è possibile riconoscere, selezionare e, a volte, ridisegnare (Fig. 8) ogni singolo granulo ed assegnarlo ad una delle 3 principali classi presenti nelle sabbie analizzate. I valori ottenuti utilizzando un numero totale di 10 differenti foto sono mostrate in Tab. 4, dai quali si ricava una composizione approssimata delle sabbie di Rosa Marina: carbonati (62%), quarzo (34%) altri minerali (4%).

In letteratura, una classificazione delle sabbie ibride (con granuli silicoclastici e carbonati lito- e bioclastici, *miscellaneous sand* di Pettijohn, 1975), è stata operata da Zuffa (1980; 1985) che prevede il riconoscimento di: carbonati litoclastici (provenienti da rocce più antiche, CE - *carbonate extrarenite* – corrispondono a *calclithite* di Folk, 1959), carbonati bioclastici (provenienti dagli ambienti attuali, CI - *carbonate intrarenite* – *calcarenite* di Folk, 1959), granuli terrigeni non carbonatici (NCE - *non-carbonate extrarenite*) e granuli intrabacinali non

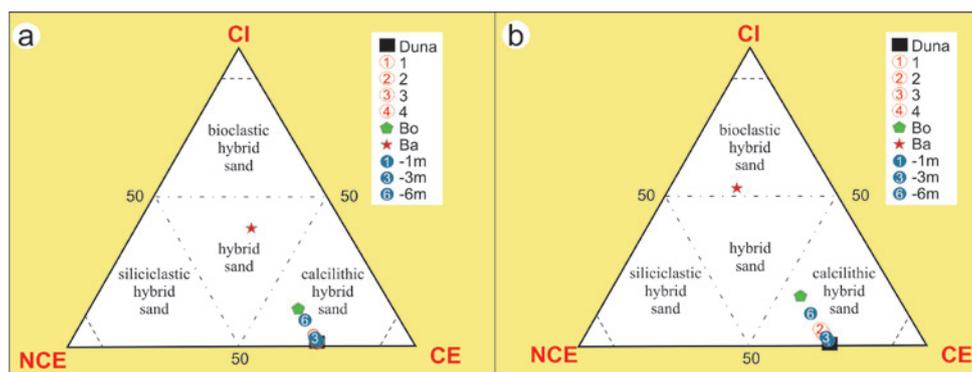


Figura 9 - Classificazione delle sabbie di Rosa Marina con il diagramma triangolare proposto da Zuffa (1980; 1985) per sabbie ed arenarie ibride. NCE - granuli terrigeni non carbonatici, CE - litoclasti carbonatici, CI - bioclasti carbonatici. a. Percentuali in peso valutate in laboratorio. b. Percentuali in volume utilizzando il minimo peso di volume per i granuli bioclastici. Si noti che considerando pesi o volumi, la classificazione dei campioni analizzati non varia sensibilmente.

carbonatici (NCI - *non-carbonate intrarenite*). L'ultima classe non è presente nelle sabbie di Rosa Marina per cui è possibile classificarle utilizzando un semplice diagramma triangolare (CE-CI-NCE - Flügel, 2004). In figura 9 è riportata la classificazione delle sabbie analizzate in funzione delle percentuali valutate in peso (fig. 9a) ed in volume (Fig. 9a) allo scopo di rendere confrontabili i dati ottenuti pesando la frazione bioclastica ed i dati volumetrici ottenuti dall'analisi d'immagine: si tratta generalmente di **sabbie ibride litoclastiche** (*calcilithic hybrid sand* - Flügel, 2004); due campioni (Bo - berma ordinaria ed il campione preso a 6 m di profondità) si trovano al passaggio con le **sabbie ibride** (*hybrid sand* - Flügel, 2004); il solo campione preso sulla battigia (Ba) ha un contenuto in bioclasti che lo classifica come una **sabbia ibrida** se si considera la percentuale in peso e come una **sabbia ibrida bioclastica** (*bioclastic hybrid sand* - Flügel, 2004) utilizzando le percentuali in volume.

4.b Le unità sedimentarie in erosione

Poiché da un punto di vista morfologico/sedimentologico, le unità sedimentarie riconosciute nel rilevamento geologico dell'area, appaiono in forte erosione (seppure con entità ed in località differenti), si è provveduto a campionarle al fine di stabilire il loro apporto nella formazione delle sabbie di spiaggia attuale. In particolare, le unità più spesse ed in evidente erosione lungo il litorale investigato (Fig. 2) sono rappresentate dalla Calcarenite di Gravina (GRA), dall'unità eolica cementata (E1 - Olocene medio) e dall'unità eolica subattuale (E2). Quest'ultima è stata campionata insieme alle sabbie di spiaggia attuale e caratterizzata in precedenza anche dal punto di vista petrografico (presenta la medesima composizione). La Calcarenite di Gravina è localmente rappresentata da una biocalcarenite massiva a tessitura *packstone* (Fig. 10a) costituita quasi integralmente da alghe rosse (con rari litoclasti, frammenti di lamellibranchi e foraminiferi bentonici). L'unità eolica medio olocenica (E1, Fig. 10b) presenta i medesimi caratteri petrografici delle sabbie attuali eccezion fatta per una evidente cementazione. E' infatti possibile riconoscere i clasti carbonatici (che formano oltre il 60% della roccia), il quarzo ed alcuni pirosseni con caratteri petrografici molto simili a quelli riconosciuti

nelle sabbie attuali. Le sabbie attuali presentano affinità composizionali con le sabbie di *backshore* subattuali e dell'Olocene medio e forse alcuni dei numerosi clasti di alghe rosse potrebbero provenire anche dalla Calcarenite

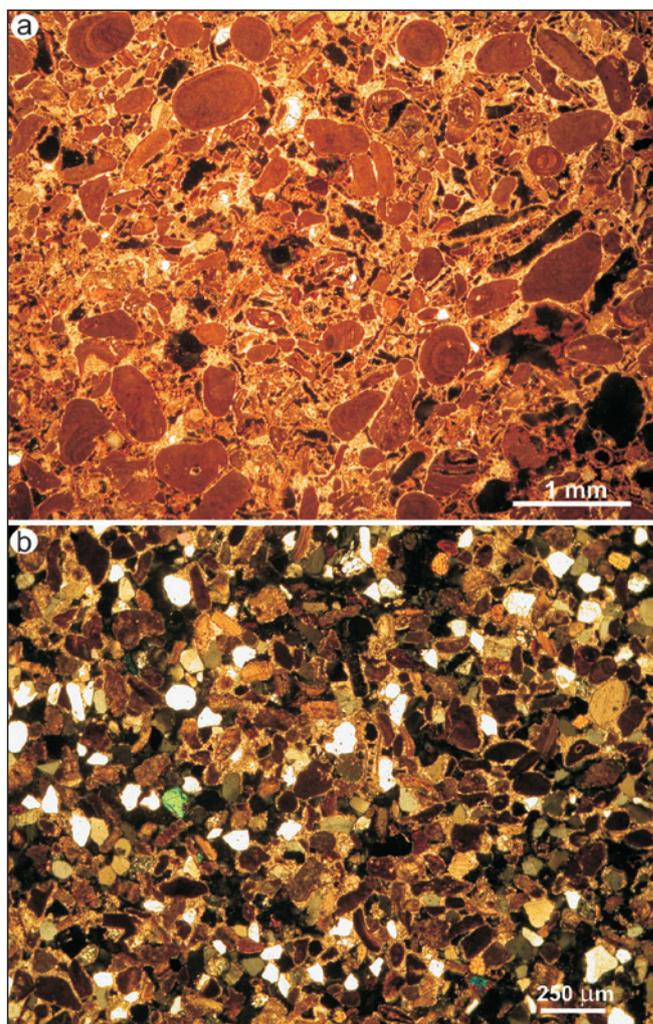


Figura 10 - Caratteri petrografici delle unità sedimentarie in erosione. a. Nicol incrociati. La Calcarenite di Gravina è localmente formata prevalentemente da grandi clasti di alghe rosse. b. Nicol incrociati. L'unità E1 presenta una composizione petrografica simile alle sabbie attuali di spiaggia. Si riconoscono i carbonati, il quarzo ed alcuni pirosseni (con colori di interferenza vivaci). Fra un granulo e l'altro è ben visibile il cemento sparitico.

di Gravina, cioè dalle unità sedimentarie più spesse presenti in questo tratto di litorale.

5. LO STUDIO BIOLOGICO DELLA SPIAGGIA

L'area di interesse è stata analizzata anche dal punto di vista biologico allo scopo di ottenere un quadro chiaro della distribuzione delle principali biocenosi sia nei settori sabbiosi che in quelli a substrato duro. All'interno delle sabbie di spiaggia sono stati analizzati i bioclasti allo scopo di ottenere una classificazione (generalmente a livello di genere) degli organismi che contribuiscono con i loro resti alla formazione di particelle sedimentarie. Il confronto fra il contenuto bioclastico e le distribuzioni degli organismi permetterà infine utili considerazioni sugli ambienti di alimentazione per la frazione bioclastica della spiaggia analizzata in termini di zone batimetriche ed ecologiche.

5.1 Le principali biocenosi

Un rilevamento biologico è stato effettuato attraverso immersioni fino alle profondità investigate (- 6m) ed attraverso un piano di campionamento sia per gli organismi del substrato sabbioso che per quelli del substrato duro. L'area analizzata è compresa tra il piano sopralitorale e l'infralitorale superiore, (*sensu* Peres e Picard, 1964), e può essere così suddivisa:

- La spiaggia emersa corrispondente al piano sopralitorale;
- La porzione di spiaggia compresa tra il limite superiore e quello inferiore di marea corrispondente al piano mesolitorale, sottoposta alla frequente azione delle onde e a periodici eventi di emersione dovuti alle variazioni di marea;
- La porzione di spiaggia sommersa fino al limite d'azione del moto ondoso (- 6m), corrispondente al piano infralitorale superiore.



Figura 11 - Porzione di substrato duro campionato alla profondità di 6 m. La specie *Chondrilla nucula* (Schmidt, 1862) ricopre quasi l'intero campione. Ben visibile anche l'alga verde *Halimeda tuna* ((Ellis e Solander) Lamoroux, 1816).

In tutte le porzioni analizzate il substrato incoerente si alterna al substrato duro (Fig. 11). Nel piano sopralitorale, la Biocenosi delle sabbie sopralitorali, caratterizzata dalla presenza di materiale esogeno spiaggiato (alghe, fanerogame, resti di vegetali terrestri, resti di organismi marini o terrestri, rifiuti antropici) si alterna alla Biocenosi delle rocce sopralitorali colonizzata da pochi organismi tra cui i gasteropodi del genere *Melaraphe*. Nel piano mesolitorale, è presente la Biocenosi della roccia mesolitorale superiore, caratterizzata da incrostazioni di cianobatteri, dai crostacei cirripedi del genere *Chthamalus* e dai gasteropodi del genere *Patella*. Degna di nota nella Biocenosi della roccia mesolitorale inferiore è la Facies a vermeti, *habitat* prioritario di salvaguardia per il proto-

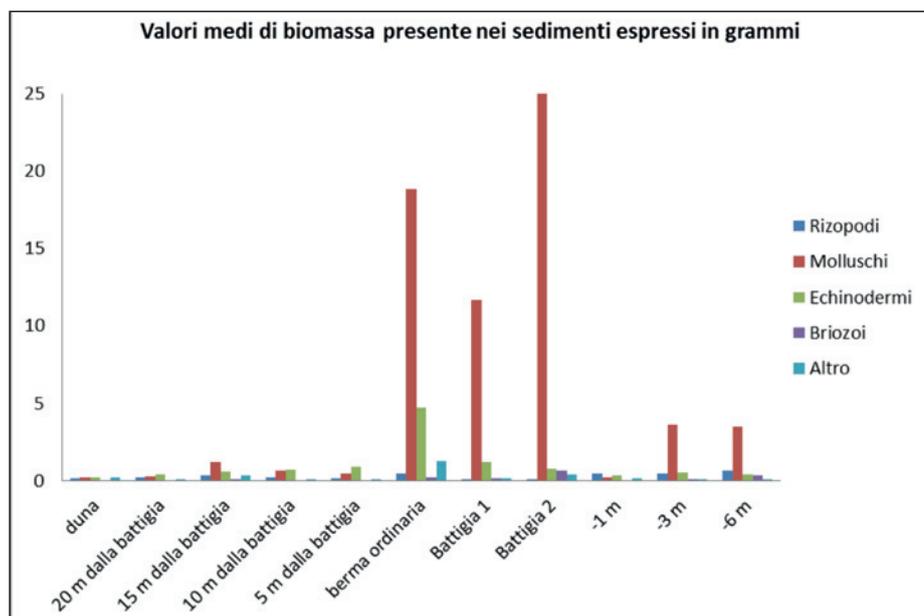


Figura 12 - Valori medi di biomassa (in grammi) misurati all'interno dei sedimenti nei differenti settori della spiaggia emersa e sommersa.

	Duna	Da 20 a 5 m dalla battigia	Berma ordinaria	Battigia	- 1 m	- 3 m	- 6 m
Gasteropodi							
Emarginula				1			
Patella				1		1	
Melarhaphe				1			
Epitonium				1			
Pisania				1			
Pollia				1			
Tricolia		1	1	1		1	1
Clanculus			1	1			
Gibbula			1	1			
Jujubinus			1	1			1
Rissoa			1	1		1	1
Alvania		1	1	1		1	1
Rissoina			1	1			
Hydrobia			1				
Bittium	1	1	1	1	1	1	1
Cerithium				1			1
Caecum			1	1		1	1
Vermetidae				1			
Triphoridae		1	1	1		1	1
Melanella				1			
Muricopsis				1			
Ocinebrina			1	1			
Hexaplex				1			
Columbella		1		1			1
Nassarius			1	1			1
Fusinus				1			
Neverita							1
Gibberula			1	1			
Mitra				1			
Vexillum				1			
Mangelia				1			
Conus			1	1			
Bela				1			
Raphitoma				1			
Omalogyra				1			
Odostomia				1			1
Cylichna			1	1			
Fossarus			1	1			
Cerithiopsis			1				
Bivalvi							
Arca				1			
Barbatia				1			
Striarca		1		1		1	1
Glycymeris				1			
Mytilaster				1			1
Loripes				1			
Cardita				1			
Glans				1			
Venericardia				1		1	1
Chamidae				1		1	1
Parvicadium				1		1	1
Tellina				1			
Chamelea				1			
Irus				1			
Venerupis				1			1
Hiatella				1			

Tabella 5 - Taxa individuati nella componente bioclastica delle sabbie di spiaggia a Rosa Marina.

collo SPA/BIO (*Specially Protected Areas and Biological Diversity in the Mediterranean*) della convenzione di Barcellona. La Facies a vermeti è caratterizzata dalle biocostruzioni del gasteropode sessile *Dendropoma petraeum*

che crea complesse formazioni sede di una notevole biodiversità animale (in particolar modo anellidi, molluschi, crostacei, echinodermi, piccoli pesci bentonici) e vegetale (alghe a tallo calcareo, feltri algali e alghe frondose). Il



Figura 13 - Bioclasti meglio conservati all'interno delle sabbie di Rosa Marina. a. *Bittium* è il taxa rinvenuto in tutti i campioni di sabbia della spiaggia emersa e sommersa. b. I gasteropodi del genere *Tricolia* sono tipici della prateria a fanerogame. c. *Clanculus* è un gasteropode tipico di ambienti rocciosi generalmente situati al di sotto dei 10 m di profondità. d. I gasteropodi del genere *Columbella* caratterizzano ambienti rocciosi poco profondi e ricchi di vegetazione. e. *Fossarus* è un gasteropode che si rinviene generalmente in ambienti rocciosi mesolitorali. f. *Melaraphe* è un gasteropode di ambienti rocciosi sopralitorali. g. I gasteropodi del genere *Hydrobia* vivono in ambienti salmastri di transizione. h. *Striarca* rappresenta un bivalve molto comune nei bioclasti delle sabbie di Rosa Marina ed è tipico di ambienti rocciosi.

variegato habitat è particolarmente sensibile all'inquinamento da idrocarburi e tensioattivi oltre che al calpestio e alla distruzione operata dai pescatori di datteri. Nel piano infralitorale, il substrato sabbioso si alterna al substrato duro caratterizzato localmente dalle Biocenosi delle alghe infralitorali. In particolare, alla profondità di 3 m, il substrato roccioso risulta scarsamente colonizza-

to probabilmente a causa dell'azione erosiva delle onde. Alla profondità di 6 m, la biocenosi è più diversificata e caratterizzata da alghe incrostanti e frondose, poriferi (in particolar modo dalla specie fotofila *Chondrilla nucula* che ricopre cospicue porzioni di substrato - Fig. 11), policheti serpulidi, molluschi vermetidi e crostacei decapodi (in particolar modo paguri).

5.2 Riconoscimento dei bioclasti

Con le analisi petrografico/sedimentologiche è stata valutata quantitativamente e conservata la percentuale relativa alla componente bioclastica osservando una variazione della stessa nei differenti subambienti (Tab. 3). In seguito tale componente è stata oggetto di una più accurata valutazione: i resti degli organismi sono stati classificati, per quanto possibile, da un punto di vista tassonomico. La componente bioclastica della sabbia è costituita da rizopodi, conchiglie di molluschi, spine o frammenti di esoscheletri di echinodermi, frammenti di briozoi e da una quinta categoria, denominata "Altro", che comprende resti di alghe, spicole di poriferi, frammenti di tubi di serpulidi e frammenti di cirripedi e altri crostacei. L'apporto maggiore è fornito dai molluschi, in particolare da gasteropodi e bivalvi, anche se le percentuali relative sono fortemente variabili nei differenti subambienti analizzati (Fig. 12).

Sono stati individuati in totale 55 taxa di molluschi (Tab. 5, Fig. 13), 39 taxa di gasteropodi (37 identificati a livello di genere e 2 a livello di famiglia) e 16 taxa di bivalvi (15 identificati a livello di genere e 1 a livello di famiglia).

Il numero dei taxa (Fig. 14) tende ad aumentare gradualmente dalla duna (un solo taxa) alla battigia (52 taxa), per poi diminuire e aumentare nuovamente nella stazione di campionamento posizionata a 6 m di profondità (18 taxa).

I taxa di molluschi presenti nel sedimento analizzato non sono tipici di un unico ambiente, ma provengono da differenti zone batimetriche ed ecologiche (Fig. 15).

Una parte cospicua di molluschi (pari al 36,4 % del totale) è tipica di fondi rocciosi (taxa più frequenti, trovati in almeno 3 stazioni di campionamento: generi *Columbella* (Fig. 13d) e *Striarca* (Fig. 13h, famiglia Chamidae). Un'altra parte (pari al 23,6 % del totale) è caratteristica di fondi sabbiosi (taxa più frequenti, trovati in almeno 3 stazioni di campionamento: generi *Caecum*, *Nassarius*, *Venericardia*, *Parvicardium*), un'altra ancora (pari al 10,9 % del totale) è costituita da molluschi che possono vivere sia su fondi rocciosi che sabbiosi.

Sono presenti, inoltre, 7 taxa di gasteropodi (pari al 12,7 % del totale) che prediligono vivere nelle praterie di fanerogame o di alghe (taxa più frequenti, trovati in almeno 3 stazioni di campionamento: generi *Tricolia* - Fig. 13b, *Jujubinus*, *Rissoa* e *Alvania*).

Un solo taxa, il genere *Bittium* (Fig. 13a), è praticamente ubiquitario e può vivere su fondi rocciosi poco profondi coperti da vegetazione, nelle praterie di pian-

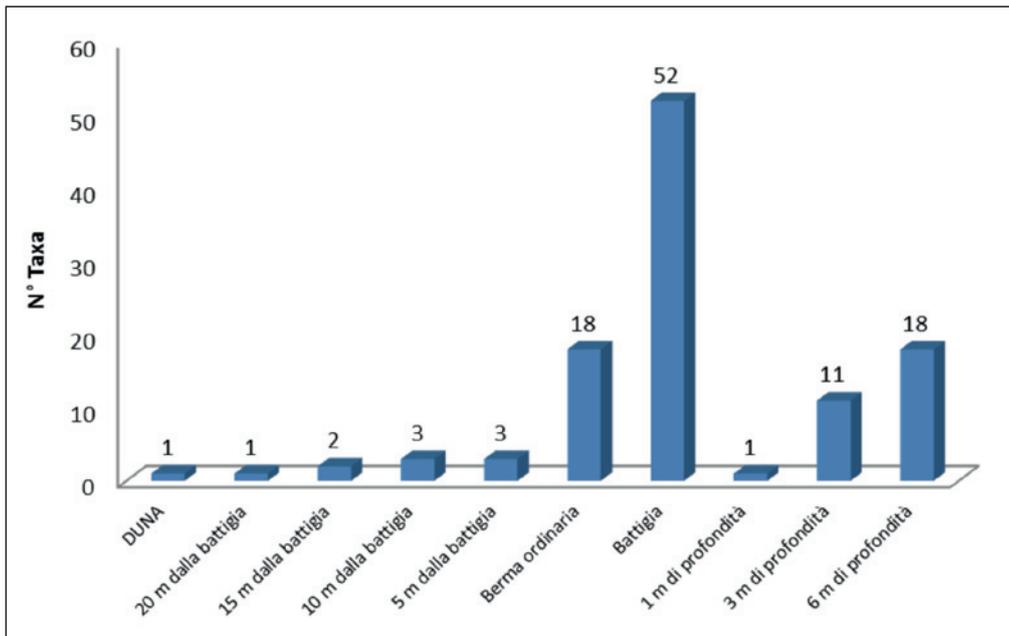


Figura 14 - Numero di taxa nei differenti subambienti di spiaggia analizzati.

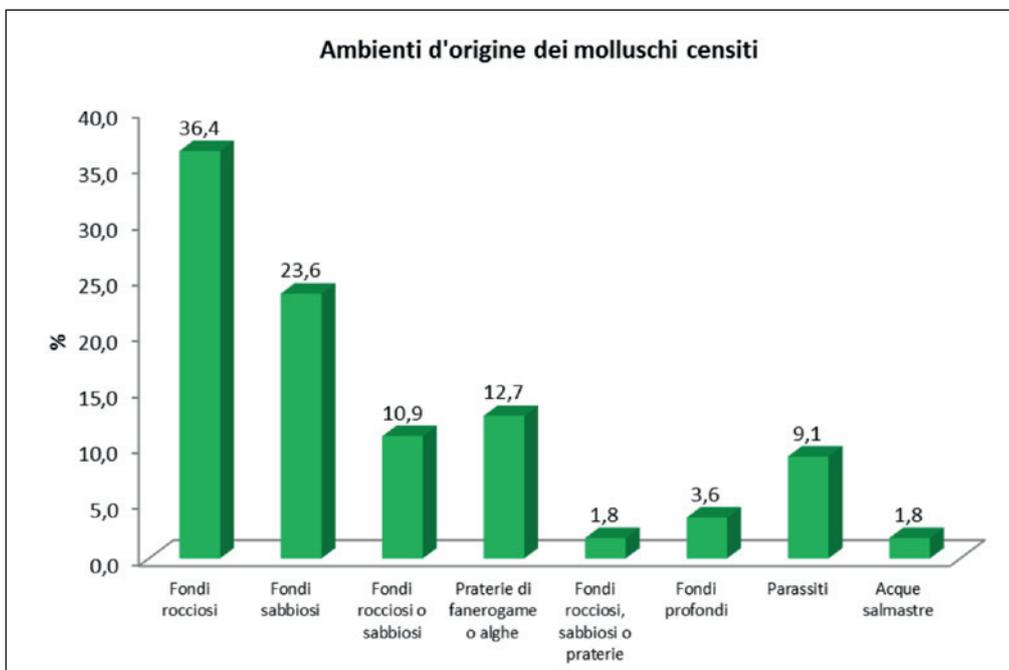


Figura 15 - Ambienti di provenienza dei molluschi riconosciuti nella frazione bioclastica delle sabbie della spiaggia di Rosa Marina.

te marine e anche su substrati incoerenti. Le conchiglie del genere *Bittium* sono risultate essere le più comuni. In particolare, sono costantemente presenti a partire dal sedimento dunare fino alla profondità di - 6m.

Solo 2 taxa (pari al 3,6 % del totale) sono, invece, tipici di ambienti più profondi (generi *Clanculus* – Fig. 13c e *Irus*). 5 taxa (pari al 9,1 % del totale) sono gasteropodi parassiti di altri organismi: il genere *Epitonium* è parassita di attinie, la famiglia *Triphoridae* vive prevalentemente sui poriferi, il genere *Melanella* è parassita di echinodermi, il genere *Odostomia* è parassita di policheti e altri molluschi, il genere *Cerithiopsis* si nutre prevalentemente di spugne sulle quali staziona. Infine, un solo taxa (genere *Hydrobia* – Fig. 13g) è tipico di ambienti salmastri.

6. CONCLUSIONI

In questo studio si sono analizzate le sabbie di spiaggia lungo il litorale di Rosa Marina (Brindisi) allo scopo di caratterizzarne in dettaglio le componenti litoclastiche e bioclastiche. A tal fine, la spiaggia è stata analizzata da un punto di vista fisico (geomorfologico e sedimentologico) e da un punto di vista biologico. L'approccio proposto è di particolare interesse perché le spiagge rappresentano il risultato di una serie di processi fisici (erosione, trasporto e sedimentazione) e biologici che interagiscono a varie scale e su periodi variabili. Le sabbie sono state analizzate da un punto di vista sedimentologico attraverso lo studio della distribuzione granulometrica di campioni provenienti sia dalla spiaggia emersa che da quella sommersa.

Da un punto di vista granulometrico, si tratta di sabbie medie ben selezionate, mentre i parametri granulometrici calcolati indicano per la spiaggia analizzata una tendenza all'arretramento. Le sabbie sono state anche caratterizzate da un punto di vista "compositiva" attraverso fasi differenti di analisi. Al microscopio, una prima classificazione è stata fatta attraverso la separazione dei bioclasti rappresentati da gusci o frammenti di organismi marini. Le percentuali ottenute, pesando tale frazione, indicano che i campioni analizzati presentano un basso contenuto in bioclasti che varia da un minimo dell'1% ad un massimo di oltre il 50% (in volume si potrebbero raggiungere percentuali massime del 70%). Anche in spiagge con basso contenuto bioclastico, come è il caso qui investigato, la sola diminuzione degli apporti bioclastici comporterebbe negli anni, un sensibile arretramento costiero. Per comprendere quindi i processi di produzione della frazione bioclastica, sono stati analizzati in dettaglio i bioclasti allo scopo di riconoscere e classificare i gusci ed i frammenti di gusci da un punto di vista tassonomico. La maggior parte dei bioclasti è costituita da conchiglie e frammenti di molluschi gasteropodi e bivalvi. In particolare, 40 taxa (pari al 72,7 % del totale) provengono da ambienti sommersi poco profondi e limitrofi alla spiaggia, sia sabbiosi che rocciosi, in particolare dalla biocenosi delle alghe infralitorali e dalla facies a vermeti. Un numero più esiguo di taxa (pari al 16,4 % del totale) proviene invece da ambienti più distanti e posti ad una profondità maggiore, in particolar modo dalle praterie di fanerogame marine e dal coralligeno. Probabilmente questi ambienti più profondi, non direttamente interessati dalle onde di tempesta, possono essere soggetti a correnti lungocosta e a trasporto sia verso terra che verso il largo. Infine, un gruppo di conchiglie appartiene a molluschi parassiti non facilmente localizzabili, mentre un solo taxa è tipico di ambienti salmastri. Questo ultimo contingente proviene da un piccolo corso d'acqua dolce che si trova a poche centinaia di metri dalla zona campionata. Appare evidente come gli ambienti di provenienza dei bioclasti che alimentano la spiaggia di Rosa Marina siano molteplici e caratterizzati da differenti parametri ecologici (salinità, profondità, luminosità, tipo di substrato, presenza di copertura vegetale, presenza di biocostruttori), ma tutti posti o all'interno della spiaggia analizzata o in ambienti più profondi contigui. Il naturale apporto di bioclasti alla spiaggia dipende quindi dallo stato di salute degli ambienti suddetti e dalla loro capacità di ospitare, ovvero di fornire alimento, costituire riparo e rappresentare un sito di riproduzione per i taxa che si trasformeranno in bioclasti.

La caratterizzazione petrografica dei sedimenti indica che la gran parte dei litoclasti è costituito da carbonati (frammenti di rocce più antiche) e da quarzo. Altre componenti (la cui somma raramente eccede il 5%) sono rappresentate da frammenti litici, feldspati, pirosseni, opachi ed altri minerali. L'insieme dei dati raccolti consente la classificazione dei sedimenti analizzati: il calcolo del contenuto in carbonati (con le percentuali relative di

lito- e bioclasti) e quello delle componenti silicoclastiche permette di classificare le sabbie analizzate come sabbie ibride litoclastiche, tranne un campione (quello della battigia) che può essere classificato come sabbia ibrida o sabbia ibrida bioclastica a seconda che si consideri il peso od il volume delle varie componenti. Il rilevamento geologico speditivo condotto nell'area di interesse non ha avuto solo lo scopo di fornire un quadro stratigrafico di riferimento; infatti, l'individuazione delle superfici di contatto fra le unità riconosciute, la posizione di tali superfici rispetto al livello del mare, il rilievo dello stato di erosione delle differenti unità affioranti sia sopra che sotto il livello del mare, il campionamento di tali unità e lo studio delle stesse in sezione sottile hanno permesso di ipotizzare che una buona percentuale dei litoclasti sembra provenire direttamente dall'erosione delle rocce presenti lungo il settore costiero considerato, evidenziando l'importanza dei processi di cannibalizzazione delle unità sedimentarie più antiche nella formazione delle spiagge attuali. Le sabbie attuali inoltre hanno composizione simile ai depositi marini e di transizione più recenti e tale conclusione appare ovvia alla luce dell'immutata o simile situazione paleogeografica.

Lo studio presentato inoltre ha permesso di sottolineare l'enorme potenziale degli approcci multidisciplinari geo-biologici nello studio delle spiagge per: la caratterizzazione dell'ambiente fisico-biologico-ecologico; l'analisi e il monitoraggio dei fenomeni di arretramento costiero; la ricerca e la caratterizzazione dei materiali utili per i ripascimenti; l'analisi degli impatti ecologici l.s. in ogni fase degli interventi di ripascimento (ricognizione, prelievo, messa in opera, monitoraggio dei risultati, ecc.).

BIBLIOGRAFIA

ANFUSO G., PRANZINI E. & VITALE G. (2011) - *An integrated approach to coastal erosion problems in Northern Tuscany (Italy)*. Littoral morphological evolution and cell distribution. *Geomorphology*, 129, 204-214.

ANNESE R., DE MARCO A., GIANFREDA F., MASTRONUZZI G. & SANSÒ P. (2003) - *Caratteri morfo-sedimentologici della Baia di Torre Canne (Brindisi, Puglia)*. Studi costieri, 7, 3-19.

ANTHONY E. J. (2009) - *Shore processes and their paleoenvironmental applications*. Developments in Marine Geology, 4, 519 pp.

APAT-ICRAM (2007) - *Manuale di movimentazione dei sedimenti marini*, 77 pp. <http://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00006700/6770-manuale-apat-icram-2007.pdf/view>.

BADALAMENTI F., CHEMELLO R., D'ANNA G. & RIGGIO S. (1998) - *Diversity of the Polychaete assemblage in the hard bottom mediolittoral along the north-western Sicilian coast: the role played by the vermetid bioconstruction*. 1^o Conv. Naz. Sci. Mar., "Diversità e Cambiamento", Abstr. 14.

BIRD E., 2008 - *Coastal Geomorphology. An Introduction*. II Edition. J. Wiley and Sons, 411 pp.

BLOTT, S.J. & PYE, K. (2001) - GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.

CALVO M., TEMPLADO J. & PENCHASZADEH P.E. (1998) - *Reproductive biology of the Gregarious Mediterranean vermetid gastropod Dendropoma petraeum*. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, 78, 525-549.

CE – Parlamento Europeo (2001) - Decisione del Parlamento Europeo e del Consiglio n. 2455/2001 relativa all'istituzione di un elenco di sostanze prioritarie in materia di acque e che modifica la Direttiva 2000/60/CE – Allegato X.

CE – Parlamento Europeo (2000) - Direttiva del 23 ottobre 2000 n. 60, che stabilisce un quadro d'azione comunitario in materia di acque.

CHARLIER R.H. & DE MEYER C. P. (1989) - *Coastal erosion*. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 70, Springer, 343 pp.

CHEMELLO R., TIELI T. & ANTONIOLI F. (2000) - *Il ruolo dei "reef" a molluschi vermetidi nella valutazione della biodiversità*. Da: Mare e cambiamenti globali - ICRAM, 105-118.

CHIOCCI F.L. & LA MONICA G.B. (1999) - *Individuazione e caratterizzazione dei depositi sabbiosi presenti sulla piattaforma continentale della Regione Lazio e valutazione di un loro utilizzo ai fini del ripascimento dei litorali in erosione*. Rapporto Finale della I Fase. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dip.to Sc. della Terra – Assessorato Opere e Reti di Servizio e Mobilità.

CHOQUETTE P. W., & PRAY L. C. (1970) - *Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates*. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 54, p. 207-250.

CIARANFI N., PIERI P. & RICCHETTI G. (1988) - *Note alla Carta Geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 41, 449-460.

COGNETTI G., SARÀ M. & MAGAZZÙ G. (2004) - *Biologia Marina-Calderini*, 279-296.

COLOSIO F., ABBIATI M. & AIROLDI L. (2011) - *Effects of beach nourishment on sediments and benthic assemblages*. *Marine Pollution Bulletin*, 54, 1197-1206.

CONSIGLIO CEE (1992) - Direttiva del 21 maggio 1992 n. 43, relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali e della flora e della fauna selvatiche.

CONVENZIONE DI BARCELONA (Protocollo ASPIM) - "Specie in pericolo o minacciate"- Allegato II: Zone particolarmente protette e Diversità Biologica del Mediterraneo. – UNEP- 10-06-1995.

CONVENZIONE RELATIVA ALLA CONSERVAZIONE DELLA VITA SELVATICA E DELL'AMBIENTE NATURALE IN Europa - Berna 16-09-1979, Allegato II.

DAL CIN R. (1969) - *Distinzione tra spiagge in erosione ed in avanzamento mediante metodo granulometrico*. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 4, 227-233.

DAL CIN R. & SIMEONI U. (1987) - *Processi erosivi e trasporto dei sedimenti nelle spiagge pugliesi tra Santa*

Maria di Leuca e Taranto (Mare Ionio). Possibili strategie di intervento. *Boll. Soc. Geol. It.*, 106, 767-783.

FINKL C.W. (1981) - *Beach nourishment, a practical method of erosion control*. *Geo-Marine Letters*, 1, 155-161.

FLÜGEL E. (2004) - *Microfacies of carbonate rocks*. Springer, 976 pp.

FOLK R.L. (1959) - *Practical petrographic classification of limestones*. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 43, 1-38.

Fredsøe J. And Deigaard R. (1994) - *Mechanics of coastal sediment transport*. *Advanced series on Ocean Engineering*, 3, 369 pp.

GREENWOOD B. & DAVIS R. A. JR (1984) - *Hydrodynamics and sedimentation in wave-dominated coastal environments*. *Developments in Sedimentology*, 39, Elsevier, 473 pp.

HUSTON M.A. (1994) - *Biological Diversity. The coexistence of species in changing landscapes*. Cambridge University Press, 681.

INGLE J. C. JR. (1966) - *The movement of beach sand*. *Developments in Sedimentology*, 5, Elsevier, 221 pp.

JACKSON D.R. & RICHARDSON M.D. (2007) - *High-Frequency Seafloor Acoustics*. Springer, 616 pp.

KAY R. & ALDER J. (2002) - *Coastal Planning and Management*, Taylor & Francis, 387 pp.

LEES A. (1975) - *Possible influence of salinity and temperature on modern shelf carbonate sedimentation*. *Marine Geology*, 19, 159-198.

LEES A. & BULLET A.T. (1972) - *Modern temperate-water and warm-water shelf carbonate sediments contrasted*. *Marine Geology*, 13, M67-M73.

MASTRONUZZI G., PALMENTOLA G. & SANSÒ P. (2001) - *Evoluzione morfologica della fascia costiera di Torre Canne (Puglia adriatica)*. *Studi costieri*, 4, 19-31.

MASTRONUZZI G. & SANSÒ P. (2002). *Holocene coastal dune development and environmental changes in Apulia (Southern Italy)*. *Sedimentary Geology*, 150, 139-152.

MOUNT J. (1985) - *Mixed siliciclastic and carbonate sediments: a proposed first-order textural and compositional classification*. *Sedimentology*, 32, 435-442.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1989) - *Measuring and Understanding Coastal Processes*. National Academies Press. <http://www.nap.edu/catalog/1445.html>.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1994a) - *Environmental Science in the Coastal Zone*. *Issues for Further Research*. <http://www.nap.edu/catalog/2249.html>.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1994b) - *Priorities for Coastal Ecosystem Science*. <http://www.nap.edu/catalog/4932.html>.

NICOLETTI L., PAGANELLI D. & GABELLINI M. (2006) - *Aspetti ambientali del dragaggio di sabbie relitte a fini di ripascimento: proposta di un protocollo di monitoraggio*. *Quaderno ICRAM*, 5, 150 pp.

NORDSTROM K.F. (2005) - *Beach nourishment and coastal habitats: research needs to improve compatibility*.

Restoration Ecology, 13/1, 215–222.

PANDOLFO A., CHEMELLO R., CIUNA I., LO VALVO M. & RIGGIO S. (1996) - *Analisi della distribuzione dei molluschi nella zona di transizione tra mesolitorale ed infralitorale superiore lungo le coste della Sicilia*. Biol. Mar. Medit. 3 (1), 78-87;

PÉRÈS J.M. & PICARD J. (1964) - *Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée*. Recl. Trav. Stn. Mar. Endoume, 47 (31), 1-37 pp.

PETTIJOHN F.J. (1975) - *Sedimentary rocks* (3rd ed.). Harper and Row, 628 pp.

REGIONE PUGLIA (2006) - P.O.R. 2000–2006. Misura 1.3. Area d'azione 2 e 4. Miglioramento delle conoscenze di base, adeguamento e ampliamento del sistema di monitoraggio del suolo, dei corpi idrici superficiali, sotterranei e costieri.

REGIONE PUGLIA (2012) - *Attività finalizzate alla redazione del Piano Regionale delle Coste (P.R.C.) della Regione Puglia*. All. n. 7.1.2 “L'erosione costiera in Europa, in Italia e in Puglia”. Boll. Uff. Regione Puglia n. 31 del 29/02/2012, Vol. I, 6123-6142; <http://www.regione.puglia.it/index.php?page=documenti&opz=getdoc&id=229>.

RELINI G. & GIACCONE G. (2009) - *Gli habitat prioritari del protocollo SPA/BIO (Convenzione di Barcellona) presenti in Italia, Schede descrittive per l'identificazione*.

Biol. Mar. Medit., 16 (Suppl. 1), 1-372.

SCHLAGER W. (2005) - *Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy*. Concepts in Sedimentology and Paleontology, SEPM 8, 200 pp.

SCHWARTZ M. L. (2005) - *Encyclopedia of Coastal Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, 1211 pp.

TROPEANO M. & SPALLUTO L. (2006) - *Present-day temperate-type carbonate sedimentation on Apulia shelves (southern Italy)*. GeoActa, 5, 129-142.

UDA T. (2010) - *Japan's beach erosion. Reality and Future Measures*. Advanced Series on Ocean Engineering, 31, 418 pp.

VAN DER SALM J. & UNAL O. (2003) - *Towards a common Mediterranean framework for beach nourishment projects*. Journal of Coastal Conservation, 9, 35-42.

VAN RIJN L. C. (2011) - *Coastal erosion and control*. Ocean and Coastal Management, 54, 867-887.

ZUFFA G. G. (1980) - *Hybrid arenites: their composition and classification*. Journal of Sedimentary Petrology, 50, 21-29.

ZUFFA G. G. (1985) - *Optical analysis of arenites: influence of methodology on compositional results*. In: Zuffa, G. G. (ed.): *Provenance of arenites*, Dordrecht (Reidel), 165-189.

APPLICAZIONE DELLE EQUAZIONI DI NAVIER-STOKES PER STUDIARE L'INTRUSIONE MARINA IN ACQUIFERI CARSICI

Costantino Masciopinto

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ricerca sulle Acque - Reparto di Chimica e Tecnologia delle Acque
via Francesco De Blasio, 5, 70132 Bari, Italy - costantino.masciopinto@ba.irsra.cnr.it

ABSTRACT

Sono state utilizzate le equazioni Navier-Stokes (N-S) per la risoluzione di un problema pratico ricorrente in acquiferi carsici costieri, vale a dire lo studio dello spostamento dell'interfaccia acqua salata/acqua dolce nelle fessure, conseguente a un sovra utilizzo della risorsa idrica sotterranea. La soluzione numerica di N-S determinata per l'acquifero costiero di Villanova di Ostuni (Brindisi) suggerisce una progressione nel tempo dell'interfaccia acqua salata/acqua dolce interpolabile con una funzione esponenziale. Le equazioni di N-S sono state risolte con un metodo convenzionale alle differenze finite, mostratosi più efficiente, per l'applicazione di questo articolo, del più sofisticato *smoothed particle hydrodynamics (meshless method)*. Si è verificato che N-S è in grado di definire i valori transitori del flusso idrico nelle fessure, nonché il relativo profilo dei carichi piezometrici e delle velocità lungo la stessa fessura, ad ogni istante della simulazione.

Keywords: Idrologia e idrodinamica delle acque sotterranee; Modelli matematici; Soluzioni numeriche.

1. INTRODUZIONE

La rilevanza delle soluzioni di Navier-Stokes (N-S) è dovuta alla rimarchevole ampiezza del loro campo scientifico di applicazione. Esse possono essere applicate alla fluidodinamica computazionale (CFD) o alla modellistica idrodinamica di fenomeni astrofisici, e perfino al *digital image processing*. Contrariamente a quanto sopra, nella fluidodinamica delle acque sotterranee è utilizzata solo una soluzione semplificata delle equazioni di N-S. Questa viene definita in modelli concettuali molto semplificati (Cihan *et al.*, 2009; Papanastasiou *et al.*, 2000), sotto flussi stazionari e laminari. Una nuova sfida alla modellizzazione del flusso in acquiferi carsici fratturati è rappresentata dalla risoluzione di N-S per problemi di flusso in regime transitorio e non laminare in fessure. La soluzione di N-S potrebbe consentire il superamento delle attuali imprecisioni dei modelli di flusso semplificati e che usualmente si riscontrano in acquiferi fratturati, dove gli allargamenti delle fessure dovuti a fenomeni carsici sono frequenti e il numero di Reynolds raggiunge valori elevati. Infatti sia la nota legge di Darcy, sia la legge cubica delle aperture non considerano le forze inerziali; queste equazioni sono approssimazioni dalla soluzione analitica delle equazioni di N-S nota come Hagen-Poiseuille e ricavata per moti di fluidi in tubi orizzontali a sezione cilindrica. Pertanto nei modelli matematici convenzionali

le resistenze al moto durante il flusso non laminare sono ignorate sia per i flussi stazionari, sia per regimi transitori o turbolenti. Questo causa errori nel calcolo delle velocità reali. Inoltre effetti connessi con le tortuosità dei percorsi fluidi attraverso le fratture del sottosuolo e la variazione delle sezioni di flusso (cioè dovute alla geometria) reale del flusso idrico, sono comunemente ignorati. Al contrario, appropriate resistenze al flusso nelle fessure possono direttamente essere prese in considerazione mediante le equazioni di N-S, le quali sono in grado di calcolare correttamente le velocità nelle fessure, considerando sia le resistenze dovute agli sforzi viscosi, sia quelle prodotte dalle forze inerziali.

Per problemi di fluidodinamica complessa che richiedono la soluzione completa delle equazioni di N-S, molti sono i software basati sul metodo computazionale delle *smoothed particle hydrodynamics* o SPH, sebbene il metodo dei volumi finiti (finite volume method, FVM) e del reticolo di Boltzmann, sono anche tecniche numeriche molto popolari. In entrambi gli ambienti industriali e accademici il metodo FVM (e la sua successiva derivazione del metodo combinato con Elementi Finiti, o FE-FVM) è attualmente il metodo più popolare. ANSYS Inc. (www.ansys.com) ha una suite di software (come pure FLUENT, anche acquistata da ANSYS) che produce pacchetti software tra i più utilizzati al mondo, come ad esempio StarCD associato con progetti per l'ingegneria, come anche Open Foam fra gli altri noti. Questi codici utilizzano il metodo computazionale ai Volumi Finiti (FVM). SPH è invece preferito in molte interessanti animazioni, perfino nella cinematografia (Tuzun & Cleary, 2006) e nelle simulazioni di flussi di particelle. L'accuratezza di questo metodo, particolarmente rispetto a problemi di posizionamento dell'interfaccia acqua-dolce/acqua-salata, o di calcoli di turbolenza, sono ancora da migliorare per raggiungere la precisione dei modelli basati su metodi computazionali di discretizzazione o meshed models (vale a dire FVM o FE-FVM). Alcune specifiche applicazioni condotte con il metodo SPH (meshless) da Tartakovsky *et al.* (2007a; 2007b) incoraggiano ulteriori studi per verificare l'applicabilità di tale metodo per risolvere problemi di flussi non laminari con miscelamenti di acqua dolce e salata in acquiferi costieri. Il metodo SPH è stato anche applicato per risolvere problemi di flussi transitori turbolenti (Lee *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2004). In ogni caso, quando il software gira su un PC con processore singolo (seriale) come una work station standard, la notevole richiesta di CPU (*central processing unit*) può limita-

re l'applicabilità del metodo SPH per risolvere problemi di flussi in falda, a scala di campo. Inoltre, per risolvere problemi di flussi non stazionari di fluidi incomprimibili come l'acqua, possono apparire severe fluttuazioni numeriche quando il passo di discretizzazione temporale non è selezionato accuratamente (Lee *et al.* 2008). Infatti Cleary *et al.* (2007: p. 88) suggerisce che i vantaggi numerici del metodo SPH non sono sempre tali, e che i metodi convenzionali basati sulle discretizzazioni con grid/mesh sono capaci di risolvere molti problemi connessi con flussi di fluidi nei processi industriali più facilmente e con più efficienza rispetto ai codici basati sul metodo SPH. Al contrario, nei metodi convenzionali o *meshed models*, quando il volume elementare rappresentativo (o REV) è applicato a larga scala, le equazioni del flusso di falda non possono essere rappresentative dei flussi preferenziali che invece caratterizzano gli acquiferi carsici fratturati; in tal caso occorrono specifiche sofisticazioni dei modelli, come per esempio accade per il *multiple-interacting continua (MINC) method* (Xu & Pruess, 2001) o con l'approccio stocastico (Masciopinto, 2006). Per queste ragioni, modelli 3D convenzionali di flusso e trasporto di fluidi con densità dipendente dal tempo, come ad esempio SUTRA (Voss, 1984), SEAWAT-2000 (Simpson, 2004) o FEFLOW (Diersch, 2009) che sono basati sulla concettualizzazione del mezzo poroso equivalente, non possono normalmente essere applicati in acquiferi carsici fratturati.

Il metodo del reticolo di Boltzmann fornisce una valida alternativa per le simulazioni idrodinamiche di sistemi governati dalle equazioni di flusso di N-S (Anwar & Sukop, 2009), ma il metodo computazionale diventa troppo intensivo quando si vuole studiare un acquifero in scala di campo o quando i tempi di simulazione sono molto lunghi (maggiori di 200-300 s). Questa è la ragione per cui in molti articoli si assume la lunghezza del dominio come un multiplo della scala del problema, la quale rimane indefinita. Nel presente lavoro, la soluzione numerica di N-S è stata calcolata per tempi di simulazioni superiori ai 20 minuti e ad una scala locale di 5-10 m, applicando un codice di discretizzazione alla differenze finite o FDM. Il codice è stato calibrato e verificato con comparazioni dei risultati di simulazioni numeriche di altri codici noti in letteratura (Masciopinto & Palmiotta, 2013). Nel presente lavoro il codice FDM è stato applicato per il calcolo dello spostamento dell'interfaccia (50%) acqua dolce/acqua salata nelle fessure di un acquifero costiero a Villanova di Ostuni, (BR).

2. EQUAZIONI DI GOVERNO

Nel presente articolo sono stati applicati metodi sia Lagrangiani, sia Euleriani per determinare le soluzioni del problema di flusso. L'essenza della fluidodinamica Lagrangiana è la particella fluida, che agisce come una variabile indipendente (Bennett, 2006). La particella fluida può non essere realmente rilasciata nel flusso a un preciso tempo di simulazione, ma può semplicemente essere identificata con la sua posizione a quel tempo. La succes-

siva posizione della particella è una variabile dipendente, anche quando coincide con una posizione indipendentemente scelta da un osservatore Euleriano a un istante successivo. Un osservatore Euleriano impiega spesso il tempo (oltre alla posizione) dopo alcuni convenienti istanti iniziali, come seconda variabile indipendente. Ovviamente la traiettoria di una particella può essere calcolata in un quadro computazionale Euleriano attraverso l'integrazione nel tempo delle velocità lungo la traiettoria. Infatti, alla base della relativamente semplice formulazione Euleriana c'è l'assunzione che i singoli dettagli (geometria) della traiettoria della particella siano implicitamente noti. D'altro canto nella formulazione Lagrangiana la velocità del fluido è prontamente calcolata dalla differenziazione (nel tempo) basata sulla posizione locale della particella ai due istanti assegnati; quindi l'identificazione della particella è fondamentale nell'approccio Lagrangiano, mentre non è di primaria importanza in quello Euleriano.

In una formulazione Lagrangiana, le equazioni di governo di un flusso fluido applicato alla particella elementare di fluido possono essere scritte tramite il principio di conservazione della massa (Liu & Liu, 2010)

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha} = 0 \quad (1)$$

quindi dell'energia interna (cinetica e potenziale)

$$\frac{De}{Dt} = \frac{\sigma_{\alpha\beta}}{\rho} \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} \quad (2)$$

e di conservazione del momento

$$\rho \frac{Du_\alpha}{Dt} = -\frac{\partial \sigma_{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} + \rho g_\alpha \quad (3)$$

dove $\frac{D}{Dt}$ rappresenta la derivata totale rispetto al tempo (t) (detta anche derivata sostanziale o materiale) della densità ρ (M/L^3) del fluido, dell'energia specifica (cioè per unità di massa) e (L^2/t^2), e della velocità della particella fluida u_α (L/t); x_α (L) e x_β (L) sono due posizioni della particella nello spazio identificate tramite coordinate scritte secondo il simbolismo di Einstein; g_α (L/t^2) è la componente del vettore della gravità. Le componenti Newtoniane del tensore di stress $\sigma_{\alpha\beta}$ ($M/t^2/L$) applicato alla particella elementare soggetta alla pressione $p\delta_{\alpha\beta}$ ($M/t^2/L$) possono essere definite come

$$\sigma_{\alpha\beta} = p\delta_{\alpha\beta} - \tau_{\alpha\beta} \quad (4)$$

Lo sforzo viscoso (laminare e turbolento) τ ($M/t^2/L$) è definito con la seguente espressione (Chanotis *et al.*, 2003; Gesteira *et al.*, 2010):

$$\tau_{\alpha\beta} = \left\{ \mu \times \left[\left(\frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} \right) - \frac{2}{3} \delta_{\alpha\beta} \nabla \cdot \mathbf{u} \right] \right\} + \bar{\tau}_{\alpha\beta} \quad (5)$$

dove \mathbf{u} è il vettore di velocità; $\delta_{\alpha\beta}$ (-) è il delta di Kroneker (che ci assicura che le componenti del vettore siano lungo la direzione degli assi principali); μ ($M/L/t$) è la viscosità dinamica del fluido considerato; e $\bar{\tau}_{\alpha\beta}$ è il valore medio del tensore di stress apparente (o *sub-grid stress*)

che tiene conto del contributo di calcolo prodotto dalle fluttuazioni delle velocità causate dalla cambio del valore medio delle stesse durante il flusso turbolento. Similmente allo stress viscoso, lo stress di Reynolds (o turbolento) può essere determinato usando la teoria dei vortici viscosi o *eddy viscosity assumption* (Boussinesq's *hypothesis*) tramite la costante di Smagorinsky (Meyers et al., 2005).

Per le equazioni (1-3), le incognite sono quattro: velocità, energia, pressione e densità a ogni posizione della particella. Pertanto una quarta equazione, nota come equazione di stato (EoS) $p = p(\rho)$, è necessaria per la soluzione del sistema. Per l'acqua è spesso usata l'equazione di stato di Tait (Becker & Teschner, 2007)

$$p = p_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (6)$$

Dove il coefficiente adimensionale γ può essere posto pari a 7 (Becker & Teschner, 2007) mentre p_0 è la massima pressione applicata che può produrre una variazione di densità dell'acqua prossima all'1% del suo valore iniziale (cioè fluido quasi incompressibile). Essa è definita come

$$p_0 = \frac{(c/10)^\gamma \rho_0}{\gamma} \quad (7)$$

dove c (L/t) ($= \sqrt{\partial p / \partial \rho}$) è la velocità del suono, oppure un valore 10 volte superiore alla massima velocità che può avere il fluido nella simulazione può essere sufficiente per ridurre al minimo (sotto all'1%) le fluttuazioni numeriche (Lee et al., 2008; Monagan, 1994), e ρ_0 è il valore della densità iniziale del fluido (i.e., 1 g/cm³, per l'acqua). Senza l'equazione di Tait sia la pressione, sia la velocità resterebbero incognite dell'equazione (3).

Infine, la soluzione dell'equazione dell'energia (2) è importante quando sono imposte le temperature al bordo del dominio di calcolo, oppure quando sono presenti flussi di calore attraverso i bordi. Poiché in questo lavoro non sono studiati flussi termici, l'equazione (2) non è stata considerata.

3. LA SOLUZIONE DEL CODICE FDM ALLE DIFFERENZE FINITE PER FLUIDI INCOMPRESSIBILI

In questo articolo la formulazione Euleriana è stata anche applicata insieme a quella Lagrangiana (SPH) per risolvere le equazioni di N-S mediante un metodo di discretizzazione convenzionale. Le equazioni (1 e 3) della conservazione della massa e del momento sono state discretizzate e risolte utilizzando un metodo alle differenze finite (Lee et al., 2008). La correzione delle pressioni utilizza l'equazione di Poisson (o il metodo di proiezione) (Wesseling, 2001; Boersma, 2011) per imporre la conservazione della massa per un fluido incompressibile, per il quale l'equazione (1) degenera in una forma indeterminata del tipo $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$. In questo modo l'equazione di Tait che è applicabile solo con l'approssimazione che l'acqua possa essere considerato un liquido debolmente comprimibile, può essere rimossa dal set di equazioni di N-S. Il codice FDM considera un flusso transitorio orizzontale

in una fessura carsica, fatta di celle solide (roccia, definite con "0") e fluide (acqua, definite con "1") che possono scambiare flussi, quando la roccia è considerata permeabile. Questo implica che in generale la condizione di "nessun-flusso" è imposta nelle celle solide e che quando invece si vuole imporre un flusso di scambio attraverso le pareti rocciose, questo flusso è simulato imponendo uno scambio di portate al contorno delle celle di fluido. Il dominio è discretizzato in maglie rettangolari con larghezza fissa o variabile. Nel secondo caso devono essere specificate le coordinate degli estremi di ogni cella. La soluzione del sistema computazionale è ottenuta con schema completamente implicito del primo ordine. Quindi la geometria del dominio di calcolo deve essere nota a priori, come ad esempio le aperture e forma delle fessure, il loro numero, la loro lunghezza, etc. Per un assegnato tempo massimo di simulazione viene determinato dal codice in modo automatico un passo temporale dinamico generalmente variabile tra 10⁻³ e 10⁻¹ s (o maggiore). Il codice FDM, pur risolvendo N-S per un fluido incompressibile, non presenta problemi d'instabilità numerica e le limitazioni invece presenti in altri metodi come quella imposta dal numero di Courant nei metodi come l'SPH che considerano l'acqua come un fluido debolmente comprimibile. L'equazione del momento (3) è quindi risolta, ad ogni passo temporale, per calcolare la velocità, tenendo conto della pressione, viscosità e turbolenza. Successivamente, a causa dell'incompressibilità dell'acqua l'equazione (1) si riduce a $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ e non può essere utilizzata per calcolare la pressione, producendo indeterminazione nella soluzione (cioè divisione per zero). Allora l'equazione di Poisson,

$$\nabla \cdot \mathbf{u}^* = \frac{\Delta t}{\rho} \nabla \cdot (\nabla p) \quad (7a)$$

dove \mathbf{u}^* è una velocità intermedia ottenuta dall'equazione (3) di N-S, è utilizzata al posto della (1) per ricalcolare la pressione e per ridefinire il valore di velocità (Marra, 2014). In particolare FDM determina il valore corretto della pressione usando un secondo ciclo numerico supplementare, definito passo di conservazione. La pressione dell'acqua è corretta a ogni istante mediante la tecnica numerica del gradiente coniugato, forzando la divergenza della velocità a zero ($\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$). Una volta ottenuto il valore corretto della pressione si ricalcola la velocità, correggendo \mathbf{u}^* con l'equazione di Poisson, in modo da ottenere una velocità \mathbf{u} (di proiezione) a divergenza nulla. In seguito, l'equazione (3) di N-S è risolta nuovamente per calcolare la velocità intermedia al successivo passo temporale, utilizzando la pressione del passo temporale precedente per il calcolo dello stress viscoso e turbolento. Il metodo di proiezione è considerato appropriato per flussi incompressibili, sebbene la velocità "corretta" non soddisfa l'equazione del momento allo stesso passo temporale in cui si impone l'annullamento della divergenza, determinando errori computazionali. Tali errori sono comunque inferiori a quelli che si ottengono con metodi che considerano l'acqua debolmente comprimibile, come ad esempio nel caso del metodo SPH (Lee et al., 2008).

Quando ci sono variazioni della densità del fluido, come nel caso d'intrusione salina, la velocità calcolata con l'equazione di Poisson è aggiornata in FDM in accordo con la nuova distribuzione di densità definite dalle concentrazioni di sale in ogni cella. Queste sono calcolate ad ogni passo temporale mediante la soluzione dell'equazione di advezione/dispersione del sale nell'acqua (Boersma, 2011). Nel calcolo non sono comprese sorgenti o dissipazioni locali di sale. Il sale è considerato come un traccian-te non reattivo ed un calcolo separato è eseguito ad ogni passo temporale per calcolare il cambio di concentrazione (e di densità) in ogni cella fluida dello stesso dominio, determinando la divergenza del flusso di massa del sale nelle direzioni orizzontale (x) e verticale (z).

4. IL CASO DI STUDIO: SIMULAZIONI DI N-S UTILIZZANDO FDM E IL METODO SPH

Simulazioni di flusso combinate sono state condotte nell'acquifero carbonatico costiero di Villanova di Ostuni (Brindisi), dove durante il 2004 la ricarica artificiale della falda è stata bruscamente interrotta in seguito ad un'ordinanza del governo che ha vietato l'immissione diretta di scarichi nel sottosuolo (D.lgs. 152/2004). In questo acquifero fratturato, l'autorità regionale ha proibito l'immissione di 63 L/s di effluente trattato dall'impianto municipale di Ostuni, in applicazione alla legge europea (Water Framework Directive 60, 2000). Lo scarico è stato convogliato in un canale (lama d'Antelmi) che scarica lungo la costa. In questo caso è stato studiato lo spostamento dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata causata da un brusco cambio della portata di falda da 398 L/d/m (corrispondente a un efflusso totale di 9.40 m³/d) a 348 L/d/m (o un deflusso totale di 8.47 m³/d). Lo spostamento è stato simulato utilizzando le soluzioni numeriche dell'equazioni di N-S. La regione studiata (Murgia) è caratterizzata da una formazione geologica del Cretaceo nota come *Calcarea di Altamura*. La formazione Mesozoica è localmente ricoperta da depositi Plio-quadernari (calcareniti) in facies litorali. La sequenza stratigrafica osservata durante la trivellazione di pozzi (Di Fazio *et al.*, 1998) è la seguente (dal basso verso l'alto): Dolomiti del Giurassico (con uno spessore maggiore di 20 m), calcarea del Cretaceo (con uno spessore di 30 m) e calcarenite del Pleistocene (con uno spessore di 5 m). Il flusso di falda defluisce secondo percorsi preferenziali orizzontali nelle fessure e fratture del calcarea. Le proprietà idrauliche dell'acquifero sono principalmente attribuibili alla porosità secondaria che dipende dalla presenza di giunti e canali carsici. In scala regionale la portata di falda, i carichi piezometrici e le velocità di filtrazione sono state determinate mediante simulazioni di flusso con un modello matematico convenzionale (Masciopinto, 2006). I parametri idrogeologici macroscopici o globali, come la trasmissività idraulica della falda T (L²/t) e la conduttività K (L/t), sono stati calcolati tramite l'inversione della soluzione semi analitica del flusso stazionario radiale da (o verso) un pozzo, nota come l'equazione di Thiem (Masciopinto *et al.*, 2008).

Questa è stata applicata ai risultati sperimentali di 58 test di pompaggio su pozzi dello stesso acquifero. Il flusso sotterraneo nel modello convenzionale è stato indirizzato in set di fratture orizzontali parallele con pareti rocciose impermeabili e con apertura variabile nel piano di frattura. Il modello utilizza la legge cubica delle aperture per determinare la conducibilità idraulica del set, ponendo $K = nb^2/3 \gamma_w/\mu$, dove n (-) è la porosità effettiva dell'acquifero, γ_w è il peso specifico e μ è la viscosità dell'acqua, e quindi 2b è l'apertura media delle fratture del set ad una assegnata posizione. Il variogramma sperimentale della covarianza delle aperture determinate nei 58 pozzi è stato interpolato con un modello esponenziale utilizzato per produrre la generazione stocastica di tutte le aperture di ciascuna frattura del set (Masciopinto, 2006) nel dominio di calcolo di 2500m x 2000 m x 30 m. L'equazione di base del modello convenzionale adoperato spiega la relazione fra portata/apertura/carico piezometrico a ogni nodo della maglia di discretizzazione

$$(\phi_i - \phi_j) = Q_{ij}^2 \left[\frac{f}{2g\Delta y} \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{1}{(2b_i)^3} + \frac{1}{(2b_j)^3} \right) \right] \quad (8)$$

Nella (8) il fattore di frizione f è calcolato tramite il numero di Reynolds (Masciopinto *et al.*, 2010), Q_{ij} (L³/t) è il valore della portata fra i nodi i e j, e Δx (L) e Δy (L) sono i passi di discretizzazione spaziali. I risultati delle simulazioni di flusso sono riportati in Fig. 1 e sono riferiti al periodo invernale del 1998, quando la ricarica artificiale era operativa e durante il periodo invernale del 2008, senza immissioni (in quanto cessate durante 2004). Durante tali periodi sono state eseguite delle indagini dall'IRSA con misure di salinità in alcuni pozzi dell'acquifero costiero. Il posizionamento dell'interfaccia al 50% di acqua dolce/acqua salata è stata determinata con lo stesso modello tramite l'equazione di Ghyben-Herzberg applicata al set di fratture parallele (Fig. 2). In particolare per la determinazione della posizione della punta d'intrusione salina lunga la costa, le portate di efflusso a mare determinate dal modello sono state rielaborate con Microsoft Excel per calcolare in ogni piano vertical perpendicolare alla linea di costa, la distanza di intrusione L-L_d con la

$$L - L_d = K \frac{B^2 - H_s^2}{2\delta_\gamma \times Q_0} - L_d = n \frac{b_i^2 \gamma_w}{3 \mu} \frac{(\delta_\gamma \times \phi_0)^2 - H_s^2}{2\delta_\gamma \times Q_0^i} - L_d \quad (9)$$

dove L_d (L) è la distanza di un assegnato livello piezometrico di riferimento ϕ_0 dalla linea di costa; H_s (L) è la profondità della faccia di filtrazione all'efflusso; Q_0^i (L³/t/L) è la portata di efflusso per unità di lunghezza della costa in corrispondenza del nodo i, calcolato dal modello; B (L) è la profondità massima dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata (cioè lo spessore saturo dell'acquifero, dove $\phi = \phi_0$); e $\delta_\gamma = \gamma_w / (\gamma_s - \gamma_w)$ (-) è il rapporto dei pesi specifici fra acqua dolce e acqua salata meno quella dolce.

Poiché la lunghezza d'intrusione è una funzione della portata di falda, la riduzione di quest'ultima del 12% causato dall'arresto della ricarica artificiale ha comporta-

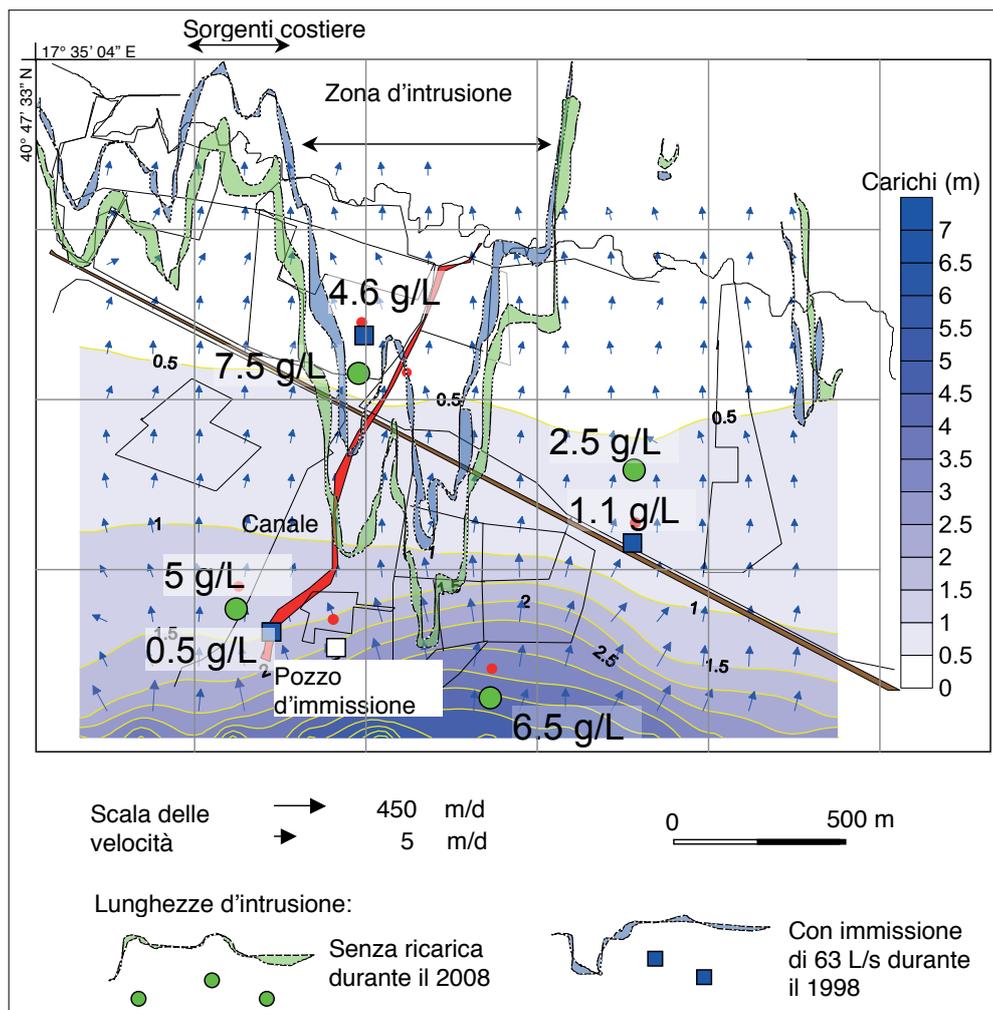


Figura 1 - Velocità e carichi piezometrici modellizzati a Villanova di Ostuni e calcolo dell'intrusione secondo la teoria di Ghyben-Herzberg. La salinità della falda è stata misurata in pozzi (quadrati) sia durante il 1998 quando la ricarica era operativa, sia durante il 2008 (cerchi) quando la ricarica è stata bloccata, convogliando gli effluenti in un canale (in rosso) che scarica direttamente in mare.

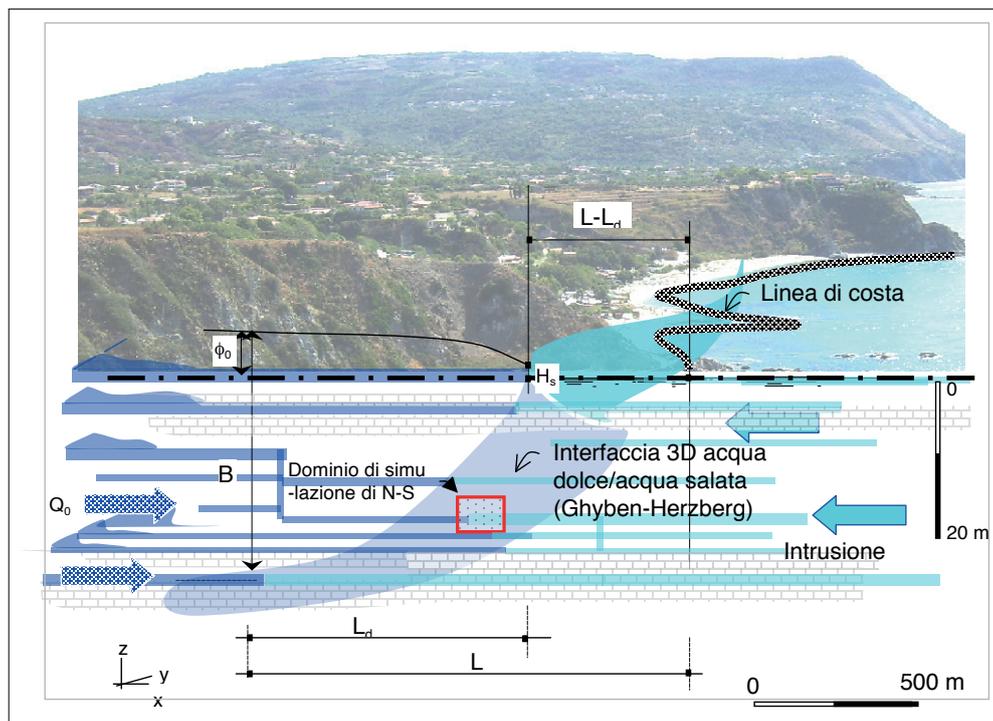


Figura 2 - Ricostruzione in 3D dell'interfaccia (50%) acqua dolce/acqua salata derivante dall'equazione di Ghyben-Herzberg a Villanova. Il rettangolo al centro rappresenta il dominio simulato applicando N-S con il codice FDM per determinare l'avanzamento dell'intrusione marina nelle fessure come conseguenza della riduzione della portata di falda Q_0 da 398 a 348 L/d/m.

to un incremento medio del 12% dell'intrusione marina: vale a dire da 1300m a 1500m dalla costa. Inoltre con N-S è stato possibile determinare la velocità dell'avanzamento dell'intrusione marina con un modello di flusso transitorio di avanzamento di acqua salta in ogni frattura del set. In questo modo è stato possibile determinare il tempo richiesto dall'acqua salata per raggiungere la nuova configurazione di equilibrio determinata da Ghyben-Herzberg.

In una fessura orizzontale lunga 5 m è stato calcolato il flusso transitorio di avanzamento dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata a $Re > 260$ (in media) risolvendo le equazioni di N-S (1-3) usando entrambi i metodi SPH e FDM. Il flusso transitorio è stato simulato imponendo una contaminazione salina a 35 g/L entrante al bordo destro della fessura. La portata del flusso entrante, fissato pari alla riduzione del 12% della portata totale di falda, è stata considerata come condizione iniziale al contorno della simulazione. Inoltre il flusso entrante nella fessura dell'acquifero costiero di Ostuni di apertura $2b = 0.028$ m, è stato considerato imposto da un momento (per unità di volume) di $333 \text{ kg/m}^2/\text{d}$ ($= 50 \text{ L} \times \text{d}^{-1} \text{m}^{-1} / 0.15 \text{ m}^2$), assumendo una sezione effettiva trasversale al flusso 0.15 m^2 (cioè $30 \times 1 \text{ m}^2 \times 0.005$, con una porosità di 0.005). Le simulazioni di flusso con il metodo SPH sono state condotte con il software (open source) SPHysics (versione 2.0, <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>). Questa versione di SPHysics non comprende l'equazione di advezione/dispersione del sale. I dati per l'input di questo codice sono descritti in Tabella 1. Il codice ha simulato la perturbazione nel tempo della pressione idrica determinata dal cambio di densità dell'acqua a causa dell'avanzamento dell'acqua salata in una fessura (da destra verso sinistra). L'output di SPHysics fornisce una sequenza temporale di mappe di pressioni (Fig. 3) corrispondenti ai cambi di distribuzione di salinità (o densità) a ogni istante di simulazione trascurando fenomeni di diffusione. Una distribuzione iniziale (a $t = t_0 = 0$) di acqua dolce/acqua salata è stata imposta come condizione iniziale al contorno. Il codice FDM invece risolve l'advezione dispersione del sale a ogni istante per aggiornare la distribuzione della densità dell'acqua nella fessura ad ogni istante. Il coefficiente di dispersione del sale è stato considerato di $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (Fig. 4). I dati utilizzati per l'input del codice FDM sono in Tabella 2. I numeri di Reynolds durante il flusso transitorio nella fessura sono indicati in Fig. 5. Le pronunciate irregolarità delle soluzioni del modello FDM (Figg. 4 e 5) non sono causate da problemi numerici o eterogeneità, ma sono dovute alla divergenza del flusso convettivo/diffusivo di massa del sale, il quale è soggetto a bruschi cambi per la variazione di densità e, conseguentemente, del gradiente di pressione e della velocità (e di numeri di Reynolds). Inoltre, avendo utilizzato un PC con un processore singolo Intel Pentium(R) D CPU 3.40 GHz con 2 GB di RAM (a 32 bit) in tutte le simulazioni, il computer ha richiesto più di 20 minuti di CPU run-time con SPHysics per simulare un periodo di flusso

lungo appena 2 secondi. Questo spiega la ragione per cui molti ricercatori (Liu & Liu, 2010) hanno studiato nuove tecniche numeriche per migliorare l'accuratezza, la stabilità, convergenza ed efficienza del metodo SPH. Ad ogni modo il codice FDM ha richiesto solo 15 minuti di CPU o run-time per simulare un periodo di flusso lungo più di 21.2 min, con lo stesso PC. SPHysics richiederebbe un run-time di circa 9 d per simulare un flusso transitorio di 20 minuti con lo stesso computer. La ragione di questa differenza è nella possibilità di FDM di usare un passo temporale dinamico, cosa che non è possibile per problemi di stabilità numerica nel metodo SPH (il passo temporale deve essere inferiore a 10^{-4} s). Questo consente una maggiore applicabilità del codice FDM per domini più estesi e tempi più lunghi. Ad ogni modo entrambi i codici utilizzati forniscono informazioni sull'avanzamento progressivo dell'interfaccia acqua-dolce/acqua salata nella fessura. Le soluzioni di FDM e SPHysics sono ben interpolate (coefficiente di correlazione 0.98) dalla seguente equazione esponenziale

$$x/L_x = C_s \left[1 - \exp\left(-\frac{t/\Delta t}{B_s}\right) \right] \quad (10)$$

che è una funzione del tempo e presenta due costanti di interpolazione adimensionali: $C_s = 0.924$ and $B_s = 10219$ in SPHysics, e $C_s = 3.79$ e $B_s = 234924$ in FDM. Il confronto dei risultati (Fig. 6) è stato condotto adimensionizzando le lunghezze e i tempi. Aumentando il numero di soluzioni di N-S si può ottenere una maggiore precisione nell'interpolazione eseguita con la (10). Le funzioni esponenziali ottenute mostrano significative differenze tra il metodo SPH e FDM, sebbene minimizzate dalla scala logaritmica della rappresentazione in Figura 6. La dinamica dell'interfaccia fornita dall'equazione (10) è in accordo con il trend temporale delle simulazioni della punta d'intrusione simulata da altri autori (Watson *et al.* 2010). La velocità di propagazione della perturbazione salina data dal codice FDM (327 m/d) è prossima al valore atteso, il quale dipende dal momento imposto. Pertanto utilizzando questa velocità, il tempo necessario per il raggiungimento delle nuove condizioni di equilibrio definite da Ghyben-Herzberg a Ostuni è di 0.6 d ($= 200 \text{ m} / 327 \text{ m d}^{-1}$), in media. Tale tempo è funzione del quadrato dell'apertura della fessura considerata e aumenta congruentemente se l'apertura equivalente dell'acquifero considerato è inferiore a quella considerata (cioè 3 cm). Le informazioni sul progresso dell'intrusione salina sono molto utili per la verifica della gestione della domanda idrica in acquiferi costieri (Yechieli *et al.*, 2010; Zlotnik *et al.*, 2010; Watson *et al.*, 2010). In questi lavori gli autori hanno utilizzato FEFLOW o SUTRA, che sono modelli basati sulla concettualizzazione del mezzo poroso equivalente. In acquiferi fratturati e carsificati, flussi transitori dipendenti dalla densità possono essere meglio affrontati con il supporto delle soluzioni di N-S, magari con un codice FDM, piuttosto che utilizzando modelli basati sull'approssimazione del mezzo continuo equivalente.

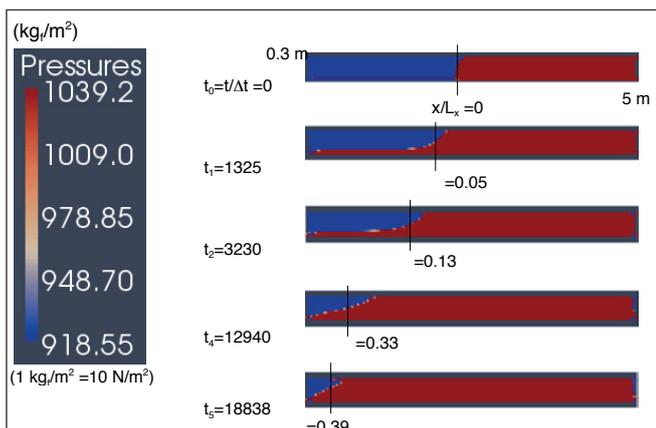


Figura 3 - Avanzamento dell'interfaccia calcolata con SPHysics in una fessura sotto un gradiente iniziale di pressione (5·10⁻² m/m) per valori del numero di Reynolds pari a 1. Dimensione del dominio (x-z): 5.3×0.3 m²; Δx=Δz=0.03 m; hp= 0.039 m; interpolazione con funzioni (kernel) del 5^o ordine.

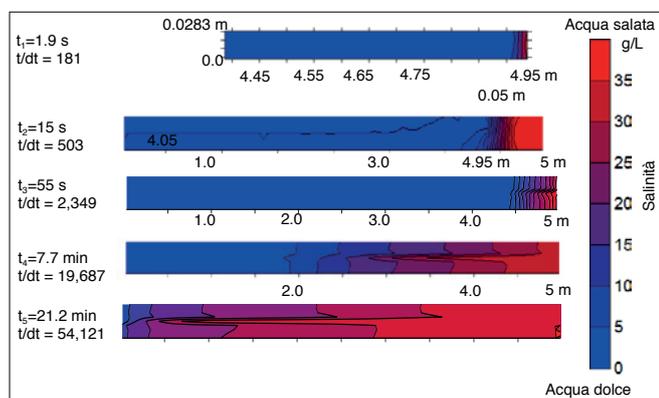


Figura 4 - Mappa della salinità nell'acqua fornita dal codice FDM in una fessura, al variare del tempo. Grid (x-z): 100×10; passo di discretizzazione: 0.05×0.00283 m². La posizione dell'interfaccia corrisponde a quella della isolina a 20 mg/L, al cento della fessura.

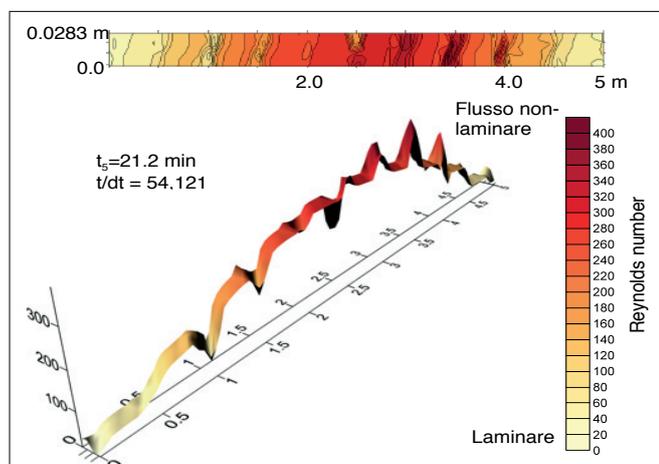


Figura 5 - Mappa dei numeri Reynolds calcolati da FDM all'interno della fessura di Villanova di Ostuni al tempo di simulazione di 21.2 min.

5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Le soluzioni di N-S consentono la determinazione degli effettivi profili di velocità e pressione nelle fessure, molto utili per comprendere il meccanismo del trasporto idrodinamico nel sottosuolo carsico. Questo migliora la nostra comprensione della fluidodinamica applicata al flusso sotterraneo, poiché gli stessi profili di velocità non possono essere determinati applicando modelli standard, secondo l'approccio convenzionale. I profili di velocità (trasversali e longitudinali) sono, ad esempio, importanti per spiegare i meccanismi di base che regolano il deposito o il distacco di patogeni dalle pareti delle fessure (James & Chrysikopoulos, 2011). Come anche, in campo medico, nel progetto e dimensionamento di nuovi materiali idonei al flusso sanguigno nel corpo umano, da utilizzare come protesi per interventi chirurgici di ricostruzione di tratti venosi o arteriosi. In acquiferi fratturati le soluzioni di N-S ci suggeriscono valori di trasmissività delle singole fratture che sono molto più elevati dei valori macroscopici globali che possono essere derivati utilizzando l'inversione della legge cubica tramite la soluzione di Thiem. La corretta valutazione della trasmissività (e della permeabilità) è determinante nella soluzione di problemi di flusso e trasporto di falda. Infine le soluzioni di N-S hanno consentito di determinare una nuova equazione per il calcolo dello spostamento transitorio dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata in acquiferi costieri. Questi nuovi risultati non possono essere determinati con modelli convenzionali, perché il flusso transitorio nelle fessure è frequentemente non-laminare con numeri di Reynolds (sopra 260) al di fuori del range di validità dell'equazione di Darcy.

Comunque, ad una scala regionale, esistono consistenti limitazioni nell'applicazione di N-S. E' invece conveniente applicare N-S ad una scala di campo o locale, ottenendo parametri idraulici e velocità nelle fessure come supporto per la modellistica convenzionale da applicare ad un scala regionale, o larga scala. In tal modo il flus-

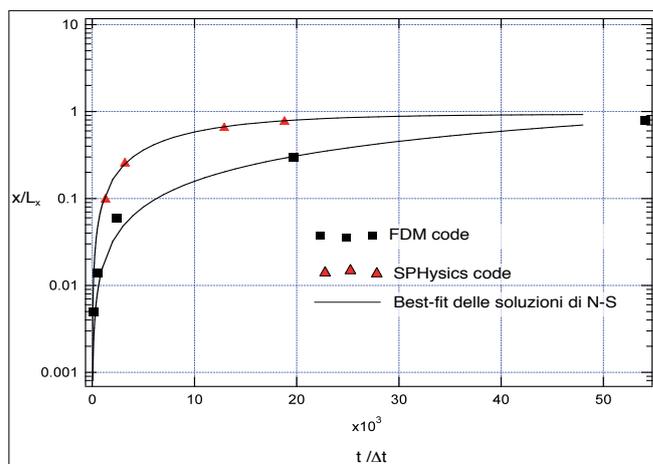


Figura 6 - Trend temporale dello spostamento della punta dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata calcolata con N-S utilizzando il metodo SPH e il codice FDM, per un tempo di simulazione (run time o CPU) di 10-20 min. Le soluzioni sono state interpolate con l'equazione (10).

0	Start del nuovo RUN
5	Tipo di kernel (1= Gaussian, ..., 5= quintic Wendland)
3	Tipo di algoritmo : 1= Predictor-corrector; 2= Verlet; 3= Beeman
2	Filtro di Densità (0= Nessuno, 1= Shepard filter, 2= Moving Least Squares)
3	1= Artificiale; 2= Laminare; 3= Laminare viscosità più turbolenza a scala di sub particella
1.00E-06	Viscosità cinematica del fluido (10^{-6} m ² /s); Densità $\rho_0=1000$ kg/m ³ (default in INDAT)
1	Fluidi debolmente comprimibile (EoS): 1= Tait's eq.; 2= Ideal gas; 3= Poisson eq.
5	Livello idrico H_{max} (m) per calcolare p_0 in EoS
10	Coefficiente di velocità del suono: raccomandato (da 10 a 40)
2	Condizioni al contorno: 1=Monaghan repulsive forces; 2= Dynamic boundaries
1	Geometria della zona: (1) BOX
2	Tipo di correzione delle forze repulsive sulla particella fluida al contorno (1, 2)
0.3,5.3	Box dimensioni L_x, L_z (m)
0.03, 0.03	Spaziamento Iniziale inter-particella dx, dz (m)
0	Inclinazione della base in x
0	Parete impermeabile
0	Aggiungi un nuovo ostacolo (1= Yes)
0	Aggiungi una perturbazione ondosa (1= Yes)
0	Aggiungi un gate (1= Yes)
2	Condizione iniziale delle particelle: 1) senza grid; 2) particelle su un grid prestabilito; 3) grid parzialmente riempito; 4) Particelle di forma tonda
0	Correzione idrostatica ai bordi (1= Yes)
0.03, 0.27	X_{min}, X_{max} (m)
0.03, 5.0	Z_{min}, Z_{max} (m)
0	0= No ulteriore zone di fluidi; 1= Una nuova zona di fluidi è definita
0.9, 0.02	Inserire tempo iniziale e finale: t_{max} e t_{out} (s)
0	Tempo iniziale per mostrare i risultati
0.0005, 1.0, -1.0	Tempo di memorizzazione dei dati durante il RUN: out_detail, start, end
0.0001, 1	Input dt, i_var_dt (s)
0.2	Coefficiente per il controllo del time-step usando il criterio di stabilità: (0.1, 0.5)
0.92	$h_p = coefficient * \sqrt{dx*dx+dz*dz}$: coefficiente di smoothing
3	Selezione del compilatore FORTRAN desiderato (1= GFortran, 2= IFort, 3=Compaq Visual Fortran)

Tabella 1 - Dati di input per la fase iniziale di simulazione con SPHysics gen2D preliminare per l'applicazione del modello SPHysics2D (Gesteira *et al.*, 2010).

so nelle fratture a larga scala potrà essere adeguatamente indirizzato grazie al supporto delle soluzioni di N-S applicate in scala locale. In pratica, le equazioni di N-S possono essere applicate in prossimità dei pozzi di pompaggio o immissione per determinare il valore corretto della trasmissività delle fratture da inserire nel modello a scala regionale. Infatti, durante i test, le forze inerziali e i vortici viscosi causati dagli alti numeri di Reynolds (che possono facilmente superare 190) e dalle reali geometrie (allargamenti di sezioni, ostruzioni, restringimenti, tortuosità, etc.) del flusso reale che si può separare in caso di ostacoli che attraversano le fessure, possono essere presi in considerazione utilizzando un codice FDM per la soluzione di N-S. Questo codice può fornire soluzioni per domini computazionali anche di 10m×10 m, con un ap-

prezzabile precisione nel calcolo delle velocità. Valutazioni accurate delle velocità sono determinanti nello studio del trasporto di patogeni in acquiferi carsici.

In questo articolo la soluzione numerica di N-S è stata efficace nel predire l'avanzamento dell'acqua salata in fessure a causa di una brusca riduzione della portata di falda di 63 L/s in un acquifero costiero di Villanova di Ostuni (Brindisi). L'output (i.e., velocità) ottenuto con le simulazioni di flusso eseguite con FDM, a una scala locale, è stato imposto come condizione al contorno per le simulazioni di larga scala con lo scopo di studiare la dinamica con cui è avvenuto lo spostamento dell'interfaccia lungo la fascia costiera. Entrambi i codici SPHysics FDM suggeriscono un trend esponenziale dell'avanzamento dell'interfaccia in tale regione. La velocità di que-

superiori a 260, non possono essere modellizzati in modo esaustivo usando una semplice equazione come quella di the Darcy (o Poiseuille), ma è necessaria un'equazione del momento più complessa. Darcy o Poiseuille non considerano in modo adeguato sforzi inerziali e viscosi del flusso reale nelle fessure. Infatti tali formule trascurano completamente gli sforzi causati da vortici, tortuosità, allargamenti e restringimenti che normalmente agiscono sulla velocità dell'acqua nelle fessure, perfino per moderati valori del numero di Reynolds (< 100). Conseguentemente sovrastime della velocità dell'acqua possono usualmente riscontrarsi quando si opera con modelli convenzionali.

In questo lavoro le simulazioni di flusso mediante le soluzioni delle equazioni di N-S sono state eseguite utilizzando due codici numerici differenti, applicandoli ad una scala locale di 6 m di lunghezza. Il codice FDM, che usa una maglia discreta e grossolana rispetto a quella normalmente utilizzata in letteratura, fornisce risultati (i.e., mappa di isolinee di velocità, pressioni e coefficienti di perdita di carico) che sono confrontabili con i valori proposti da altri autori. FDM operando sul passo di discretizzazione spaziale, permette di incrementare la dimensione del dominio di studio, fino ad una scala quasi di campo. Quando invece sono richieste simulazioni di dettaglio che possono catturare vortici e turbolenze, con geometrie complesse, FDM deve essere applicato con un passo discretizzazione molto più piccolo. Questo implica simulazioni alla micro scala, con elevato run-time (CPU). Il codice FDM usa l'equazione di Poisson per correggere le velocità derivate dall'equazione del momento ad ogni passo temporale, fornendo una soluzione che è solo parzialmente a divergenza nulla. Invece il metodo SPH applicato con il codice SPHysics, considera l'acqua come un fluido debolmente comprimibile. Quest'assunzione può considerarsi non fisicamente appropriata per un flusso idrico sotterraneo, ma essa consente una facile soluzione delle equazioni di N-S, senza le complicazioni numeriche che sorgerebbero a causa del passo temporale troppo piccolo necessario quando un fluido è incomprimibile. Pertanto permangono ancora oggi, le limitazioni sull'utilizzo dei codici SPH e anche FDM in scala regionale (> 1000 m). I tempi di simulazione (CPU) o *run-time*, quando si utilizza un processore singolo standard Intel Pentium (3.40 GHz with 2 GB of RAM) dimostrano che le applicazioni del metodo SPH per risolvere problemi usuali di idrogeologia, sono ancora lontani dal raggiungimento di una vera procedura computazionale applicabile a scala di campo. Le limitazioni sono causate principalmente da: i) l'elevato numero di particelle (più di 3.000.000) necessarie per discretizzare una fessura in campo; ii) il piccolo passo temporale (inferiore a 10^{-4} s) necessario per la stabilità numerica del calcolo. Questo spiega perché molti ricercatori hanno condotto numerose ricerche per migliorare i metodi Lagrangiani, ottenendo codici molto meno restrittivi del metodo SPH, come nel caso dell'SPH correttivo o delle particelle idrodinamiche mobili ai minimi quadrati (*moving least-squares particle hydrodynamics*), principalmen-

te utilizzato nella meccanica dei solidi.

Il risultato principale di questo lavoro evidenzia che sebbene il metodo SPH sia un potente codice numerico alternativo per risolvere alcuni tipi di problemi, esso perde molti dei suoi vantaggi quando è applicato a sistemi carsici fratturati, ad una scala spaziale e temporale realistica. I risultati delle simulazioni hanno evidenziato l'inapplicabilità del metodo SPH a problemi di flusso sotterraneo ad una scala di campo (10 m) a causa del numero delle particelle richieste per discretizzare il dominio e per il piccolo passo temporale. Sarebbe necessario un run-time di 1-2 mesi per simulare un flusso transitorio della durata di solo 6 minuti, se gira un processore singolo (seriale) su una workstation standard. Oggi, apprezzabili applicazioni del metodo SPH su una larga scala sono comunemente condotte per problemi di flusso in cui è importante visualizzare la dinamica della superficie libera del flusso idrico in risposta a forti perturbazioni. Qui, una specifica EoS lega la densità al cambio di pressione causato da forti perturbazioni esterne come terremoti, tsunami o maree. Queste perturbazioni esterne producono effetti di pressione dominanti che modificano la forma della superficie libera dell'acqua. Quindi le equazioni di N-S possono essere efficientemente risolte con il metodo SPH assumendo che il flusso idrico possa considerarsi debolmente comprimibile. Diversamente, per le simulazioni di flusso incomprimibile in acquiferi, dove è importante studiare sia le basse variazioni di pressione, sia la conservazione locale della massa del fluido, i metodi SPH non sono ancora completamente sviluppati; i codici SPH richiedono tecniche numeriche molto complicate e *time consuming*.

In conclusione, modelli come FDM possono essere applicati facilmente ad una scala locale per definire la pressione e la velocità di filtrazione, anche con una maglia grossolana. Questo può fornire utili informazioni da utilizzare per indirizzare le simulazioni con modelli convenzionali, da eseguirsi su una scala regionale, tramite appropriate velocità, permeabilità e trasmissività. Inoltre il codice sviluppato rende più semplice modellizzare il flusso transitorio in una fessura, poiché FDM può simulare una varietà di fenomeni che includono il flusso laminare in film con superficie libera, rivoli stabili, flussi con formazioni di zone stagnanti di acqua intrappolata in seguito alle variazioni dell'apertura e anche flussi vorticosi separati da un ostacolo trasversale.

NOTAZIONI

B	spessore saturo dell'acquifero, m
2b	aperture di una fessura liscia, m
B_s	costante di best fit (-)
c	velocità del suono, m/s
C_s	costante di best fit (-)
e	energia specifica meccanica (cinetica e potenziale), $kg \cdot m^2/s^2$
f	fattore di frizione di Fanning (-)
g	accelerazione di gravità, m/s^2

g_a	componente dell'accelerazione di gravità, m/s^2
h_p	lunghezza spaziale di smoothing, m
H_s	profondità (sotto la superficie del mare) dell'interfaccia all'efflusso (faccia di filtrazione), m
K	conduttività idraulica, m/s
L	punta di intrusione definita da Ghyben-Herzberg, m
L_d	lunghezza disponibile per l'efflusso di falda lungo la costa, m
L_x	lunghezza della fessura, m
n	porosità effettiva dell'acquifero (-)
N_f	numero di fessure parallele (-)
N_p	numero totale di particelle lisce (-)
p	pressione idrica, N/m^2 or Pa
p_0	pressione di riferimento applicata, N/m^2 or Pa
Q_{ij}	portata locale in una fessura tra i nodi i e j della maglia, m^3/d
Q_0	portata di efflusso di falda per unità di lunghezza della costa, m^2/d
S	coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero (-)
t	tempo di simulazione, s
t_0	tempo iniziale di simulazione, s
T	trasmissività dell'acquifero, m/s^2
$u_{\alpha, \beta}$	generica component della velocità dell'acqua in direzione x , y or z , m/s
u_x, u_z	component di velocità dell'acqua in una fessura, m/s
\underline{u}	vettore di velocità, m/s
\bar{u}	velocità media orizzontale in una fessura, m/s
u^*	velocità apparente dell'acqua imposta nell'equazione di Poisson, m/s
W	funzione di smoothing nel metodo SPH, $1/m^3$
x, y, z	coordinate spaziali della particella, m
x_α, x_β	coordinate della particella in una generica direzione x , y e z , m
$x_{\alpha, i}$	posizione della particella liscia ad un generico istante, m

LETTERE GRECHE

α, β	direzione spaziale in x , y or z (-)
δ_γ	rappporto dei pesi specifici fra acqua dolce e salata (-)
$\delta_{\alpha\beta}$	delta di Kroneker (-)
$\Delta\xi, \Delta\psi$	passo di discretizzazione della maglia, m
γ	esponente della EoS (-)
γ_σ	peso specifico acqua salata, N/m^3
γ_w	peso specifico acqua dolce, N/m^3
ϕ, ϕ_t, ϕ_ϕ	carichi piezometrici di falda, m
ϕ_0	carico piezometrico di falda in corrispondenza della punta di intrusione, m
μ	viscosità fluidodinamica dell'acqua, Poise or $N/m^2 \times s$ or $Pa \times s$
ν_0	viscosità cinematica dell'acqua, cm^2/s
ρ	densità del fluido, g/cm^3
ρ_0	iniziale densità del fluido, g/cm^3
$\sigma_{\alpha\beta}$	componente del generico tensore di stress do-

vuto alle forze applicate alla particella, cioè pressione e viscosità, N/m^2 or $kg/m/s^2$

τ sforzo viscoso, N/m^2 or $kg/m/s^2$

$\tau_{\alpha\beta}$ componente dello sforzo viscoso (laminare e turbulento), N/m^2 or $kg/m/s^2$

$\tau_{\alpha\beta}$ sforzo viscoso medio causato dalla turbolenza, N/m^2 or $kg/m/s^2$

ABBREVIAZIONI

CPU	central processing unit
CFD	computational fluid-dynamics
EoS	equation of state
FDM	finite difference method
FVM	finite volume method
MINC	multiple-interacting continua method
N-S	Navier-Stokes
REV	representative elementary volume
SPH	smoothed particle hydrodynamics

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata finanziata dal progetto PRIMAC: EU INTERREG IIIA Greece-Italy 2000-2006. L'Autore è molto grato al compianto Leonardo Castellano (MATEC, Milano) per l'assistenza fornita nello sviluppo degli algoritmi di CFD inseriti in FDM per calcolare la soluzione delle equazioni di N-S.

BIBLIOGRAFIA

- ANWAR S. & SUKOP M. C. (2009) - *Lattice Boltzmann models for flow and transport in saturated karst*. Ground Water, 47(3), 401-413.
- BECKER M., TESCHNER M. (2007) - *Weakly compressible SPH for free surface flows*. Euro graphics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 1-8.
- Bennett, A.F., 2006. *Lagrangian Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, New York, 5-66.
- BOERSMA B. J. (2011) - *A 6th order staggered compact finite difference method for the incompressible Navier-Stokes and scalar transport equations*. Journal of Computational Physics, available online: doi:10.1016/j.jcp.2011.03.014.
- CHANIOTIS A.K., FROUZAKIS C.E., LEE J.C., TOMBOULIDES A.G., POULIKAKOS D., BOULOUCHOS K. (2003) - *Remeshed smoothed particle hydrodynamics for the simulation of laminar chemically reactive flows*. Journal of Computational Physics, 191, 1-17.
- CIHAN A., SUKOP M. C., TYNER J. S., PERFECT E. & HUANG H. (2009) - *Analytical Predictions and Lattice Boltzmann Simulations of Intrinsic Permeability for Mass Fractal Porous Media*, Vadose Zone Journal, 8 (1), 187-196. doi: 10.2136/vzj2008.0003
- CLEARY P.W., PRAKASH M. HA J., STOKES N. & SCOTT C. (2007) - *Smooth particle hydrodynamics: status and future potential*. Progress in Computational Fluid Dynamics, 7, Nos. 2/3/4, 70-90.
- DIERSCH H.J.G. (2009) - FEFLOW, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System. Reference Manual. DHI-WASY software. GmbH, Berlin, Ger-

many, 1–292.

DI FAZIO A., MASCIOPINTO C., TROISI S. (1998) - *Prova di Tracciamento con NaCl: misura dei parametri idrogeologici e influenza della diffusione molecolare*, Ingegneria e Geologia degli Acquiferi, N. 10, 19-25.

GESTEIRA M.G., ROGERS B.D., DALRYMPLE R.A., CRESPO A.J.C. & NARAYANASWAMY M. (2010) - SPHysics v2.0 January 2010: *Open-Source smoothed particle hydrodynamics code*: <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics/index.php>. Accessed: October 12, 2012.

JAMES S. & C. CHRYSIKOPOULOS V. (2011) - *Monodisperse and polydisperse colloid transport in water-saturated fractures with various orientations: Gravity effects*. Advances in Water Resources, 34, 1249–1255, doi:10.1016/j.advwatres.2011.06.001.

KIM D-H YANG, K-S, SENDA M. (2004) - *Large eddy simulation of turbulent flow past a square cylinder confined in a channel*. Computers & Fluids, 33, 81–96.

LEE E.S., MOULINEC C., XU R., VIOLEAU D., LAURENCE D., STANSBY P. (2008) - *Comparison of weakly compressible and truly incompressible algorithms for SPH mesh free particle method*. Journal of Computational Physics, 227, 8417-8436.

LIU M. B., LIU G. R. (2010) - *Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments*. Archives of Computational Methods in Engineering, 17, 25–76. doi 10.1007/s11831-010-9040-7.

MARRA, V. (2014) - *Metodi numerici per le equazioni di Navier-Stokes*. ADEPRON, <http://www.ingegneriaindustriale.net/> (Visualizzato: 6 ottobre 2014)

MASCIOPINTO C. & PALMIOTTA D. (2013) - *Relevance of solutions to the Navier-Stokes equations for explaining groundwater flow in fractured karst aquifers*, Water Resources Research, 49, doi:10.1002/wrcr.20279

MASCIOPINTO C. (2006) - *Simulation of coastal groundwater remediation: the case of Nardò fractured aquifer in Southern Italy*. Environmental Modelling & Software, 21 (1), 85-97.

MASCIOPINTO C., VOLPE A., PALMIOTTA D. & CHERUBINI C. (2010) - *A combined PHREEQC-2/parallel fracture model for the simulation of laminar/non-laminar flow and contaminant transport with reactions*. Journal of Contaminant Hydrology, 117, 94-108.

MASCIOPINTO C., LA MANTIA R. & CHRYSIKOPOULOS C.V. (2008) - *Fate and transport of pathogens in a fractured aquifer in the Salento area, Italy*. Water Resources Research, 44, W01404, doi:10.1029/2006WR005643.

MEYERS J., GEURTS B. J. BAELEMANS M. (2005) - *Optimality of the dynamic procedure for large-eddy simulations*. American Institute of Physics, PHYSICS OF FLUIDS, 17, 045108, doi:10.1063/1.1879054.

MONAGAN J.J. (1994) - *Simulating free surface flows with SPH*. Journal of Computational Physics, 110, 399–406

PAPANASTASIOU T. C., GEORGIU G. C., ALEXANDROU, A. N. (2000) - *Viscous Fluid Flow*. CRC Press, Washington, D.C., p. 221.

SIMPSON M. J. (2004) - *Software Spotlight/SEA-WAT-2000: Variable-Density Flow Processes and Integrated MT3DMS Transport Processes: Ground Water*, 42 (5), 642-645.

TARTAKOVSKY A.M., MEAKIN P., SCHEIBE T.D. & WOOD B.D. (2007a) - *A smoothed particle hydrodynamics model for reactive transport and mineral precipitation in porous and fractured porous media*. Water Resources Research, 43, W05437, doi:10.1029/2005WR004770.

TARTAKOVSKY A. M., MEAKIN P., SCHEIBE T. D. & WEST R. M. E. (2007b) - *Simulations of reactive transport and precipitation with smoothed particle hydrodynamics*. Journal of Computational Physics, 222, 654–672.

TUZUN U. & CLEARY P. (2006) - *Discrete element modeling tutorial*. The 5th World Congress of Particle Technology, April 2006, Florida, USA.

VOSS C. I. (1984) - SUTRA. Finite-element simulation model for saturated/unsaturated, Fluid-density-dependent groundwater flow with energy transport or chemically reactive single-species solute transport, U.S. Geol. Survey, Water Res. Invest. Rep., 84-4369, 429.

WATER FRAMEWORK DIRECTIVE 60 (2000) - The European Union Water Framework Directive (WFD).

WATSON T.A., WERNER A.D. & SIMMONS C. T. (2010) - *Transience of sea water intrusion in response to sea level rise*, Water Resources Research, 46, W12533, doi:10.1029/2010WR009564

Wesseling P. (2001) - *Principles of Computational Fluid Dynamics*, Springer, New York.

YECHELI Y., SHALEV E., WOLLMAN S., KIRO Y. & KAFRI U. (2010) - *Response of the Mediterranean and Dead Sea coastal aquifers to sea level variations*. Water Resources Research, 46, W12550, doi:10.1029/2009WR008708.

Zlotnik V. A., Robinson N. I., & Simmons C. T. (2010) - *Salinity dynamics of discharge lakes in dune environments: Conceptual model*, Water Resources Research, 46, W11548, doi:10.1029/2009WR008999.



RICORDO DI RUGGIERO CAPOZZA

Ruggiero Capozza nostro collega Geologo, iscritto all'Albo dei Geologi della Puglia dall'anno 1976 con n. 64, non è più tra noi dal 19 agosto 2014. Pur colpito da una grave patologia ha saputo convivere con le difficoltà

che incontra ogni ammalato mantenendo intatto il suo stile gioviale ed amichevole, affrontando con dignità le sue responsabilità di professionista, educatore e fedele compagno della moglie Pasqua.

Ruggiero Capozza è stato non solo amico e compagno di avventura dei molti geologi negli anni in cui i giovani laureati non avevano avuto ancora il riconoscimento ed il ruolo in un ordine professionale ma che faticosamente, anche dopo l'istituzione ordinistica nazionale, tentavano di costruire una rappresentanza regionale indicata come Consiglio Consultivo dell'Ordine dei Geologi di cui, consigliere, dal 1998 al 2001, diventava lo stesso Ruggiero.

Ruggiero Capozza ha svolto per circa 40 anni la professione di geologo occupandosi di temi riferibili alla geologia applicata, alla geologia ambientale e, quale precursore anche della geologia territoriale informatica. Fu infatti tra i primi ad utilizzare, negli anni 80, sistemi informatici con restituzione grafica computerizzata, sviluppare tentativi di editing geologico, provando software specifici, all'epoca complessi, per la determinazione dei parametri geotecnici e geofisici.

Specializzatosi nelle indagini e nelle prove geotecniche, in sito e laboratorio, ha per primo introdotto sistemi di caratterizzazione speditiva dei terreni fondali collaborando, già dal 1985, con il Centro Studi Rizzoli di Bologna per la sperimentazione, con attrezzature di nuova concezione costruttiva, prodotti dalla Sunda Srl di Piacenza, di prove penetrometriche dinamiche e statiche effettuate sui terreni della fascia costiera nord barese e nelle fasce di affioramento dei depositi sciolti della media Murgia.

È stato il primo geologo in Puglia ad utilizzare il Georadar per l'esplorazione del sottosuolo promuovendo l'applicazione della nuova metodologia d'indagine nel campo delle cavità artificiali presenti nel sottosuolo degli abitati pugliesi. Dopo aver frequentato un corso di specializzazione nell'anno 1988 in Applying Subsurface Interface Georadar Technology in Engineering and Geophysical Investigations, presso Geophysical Survey nell'Università di Boston negli Stati Uniti, ha programmato e sviluppato una lunga, metodica e diligente campagna di rilevamento delle cavità sotterranee presenti nel sottosuolo di Canosa pervenendo a significativi risultati in ordine alla individuazione dei sistemi cavernosi ed alle condizioni di pericolosità e di rischio dell'abitato (edifici ed infrastrutture).

La sua specifica e rilevante esperienza nel campo dei rischi naturali è stata positivamente valutata allorché associato allo staff tecnico del Commissario Straordinario della Protezione Civile, in qualità di Geologo, per partecipare alle operazioni di primo intervento ed alle successive attività di rilevazione dei danni, nonché nelle iniziative di soccorso verso le popolazioni delle zone terremotate, poste all'intorno del "cratere", nei Comuni di Laviano e Santomena, in occasione del sisma dell'Irpinia del novembre 1980.

Ruggiero Capozza nella sua attività professionale ha sempre dimostrato grande disponibilità a sostenere l'inserimento di giovani leve professionali che trovavano nel suo studio di P.zza Stazione un sicuro "rifugio", particolarmente accogliente, sempre aperto a coloro che si accingevano ad affrontare nuove responsabilità ed impegni gravosi nelle discipline geologiche che andavano via via assumendo nuova rilevanza e dignità.

Oltre a numerose osservazioni e descrizioni inedite complessivamente riferibili a studi morfologici, geologici e petrografici sugli insediamenti Paleolitici e Neolitici del territorio di Barletta e Canne della Battaglia, Ruggiero Capozza è stato anche autore di importanti pubblicazioni come quella che può essere considerata una sintesi fondamentale del lavoro svolto sul territorio urbano di Canosa dal titolo "RILEVAMENTO CAVITÀ SOTTERRANEE DELLA CITTÀ DI CANOSA DI PUGLIA" edito nel 1991 da "SEPI" di Canosa, nonché coautore del bel volume, ricco di documentazione fotografica e di notizie inedite di carattere storico, archeologico e documentale, realizzato presso il suo studio professionale di P.zza Stazione ed edito nel 1990 da "Geoservice" di Barletta dal titolo "ARCHEOLOGIA CON LA LENTE".

Ruggiero Capozza per molti anni è stato un sicuro riferimento anche per enti pubblici e privati grazie alla sua profonda conoscenza del territorio geologico pugliese, alla sua infaticabile operosità, al suo disarmante entusiasmo che gli consentiva di affrontare problemi anche complessi, con la semplicità, che poteva apparire anche irresponsabile, ma che nascondeva una profonda convinzione sulle proprie forze, sulla indiscussa volontà e capacità di trovare le giuste collaborazioni ed i riferimenti più idonei per superare le momentanee difficoltà.

A tutti coloro che lo hanno conosciuto, stimato ed apprezzato, manca un collega ma anche un amico, un "sognatore ottimista", un professionista esperto, un compagno sincero ed autorevole, da salutare con rispetto, da abbracciare con affetto e serena fiducia.

Sono orgoglioso di questo padre che mi ha in dirizzata sulla strada da lui tracciata e, mantenendone il ricordo, percorrerne le tracce ed onorandone la memoria.

Geol. Pietro Salvatore CAPOZZA

POZZI PER L'AFRICA - "MICHELE MAGGIORE"



È stato realizzato il secondo pozzo in Africa in ricordo di Michele Maggiore (foto), a vantaggio di piccole comunità dove sono attivi i progetti idrici sviluppati da Amref.

Preservare le caratteristiche dell'acqua e assicurarne la disponibilità a favore di tutte le comunità umane è il principale obiettivo etico dell'idrogeologia, scienza che esplora i processi che determinano la composizione e la distribuzione dell'acqua negli ambienti naturali del nostro pianeta.

Michele Maggiore (1945 - 2010), docente di Idrogeologia presso l'Università degli Studi di Bari, ha trasmesso a quanti lo hanno conosciuto la consapevolezza che "l'acqua è un bene prezioso", espressione che vibrava della sua generosità di insegnante e della sua instancabile passione di studioso.

Realizzare pozzi in Africa è un'iniziativa promossa dalla SIGEA per donare il bene prezioso dell'acqua alle popolazioni afflitte da gravi carenze idriche.