

Metodi topografici per la ricostruzione dettagliata della piezometria nelle aree costiere: il caso del Parco Regionale della Maremma (Toscana meridionale)

Termini chiave:

Rilievo GNSS, Livellazione geometrica, Accuratezza delle misure, Superficie piezometrica, Intrusione marina.

Keywords:

GNSS relief, Geometric leveling, Accuracy of measurements, Piezometric surface, Marine intrusion.

Daniele Chies, Pier Lorenzo Fantozzi, Samuele Francalacci, Roberto Rigati, Massimo Salleolini, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente - Strada Laterina 8 - 53100 Siena, fisso 0577-233811, fax 0577-233933, massimo.salleolini@unisi.it

Abstract

A topographic methodology has been developed to achieve a planar altimetric data of an area where a detailed piezometric reconstruction is necessary for hydrogeological modelling of the groundwater flow and in particular the modelling of the local marine intrusion phenomena. The methodology has the target to fulfill high accuracy in the reconstruction of the topographic elevation and sufficient running speed to ensure time and cost sustainability. The survey technique is based the integrated use of GNSS instrumentation and geometric leveling. The proposed procedure is therefore considered to be convenient in all hydrogeological applications of coastal areas characterized by the coexistence between a low hydraulic gradient and a significant variation in the altitude, typical geomorphological case of the Italian coasts with high risk of marine intrusion.

Riassunto

Una metodologia topografica è stata messa a punto all'interno del Parco Regionale della Maremma (Grosseto) con l'obiettivo di conseguire una determinazione dei dati plano-altimetrici della

locale rete di monitoraggio piezometrico tale da assicurare un'elevata accuratezza nella ricostruzione della rete di flusso ed una sufficiente velocità di esecuzione in modo da garantirne la sostenibilità di tempi e costi. I rilievi effettuati tramite strumentazione GNSS e livellazione geometrica "dal mezzo" hanno consentito un significativo miglioramento delle conoscenze sull'idrodinamica della falda ed in particolare sui locali fenomeni di intrusione marina. La procedura proposta è da ritenersi pertanto conveniente in tutte le applicazioni idrogeologiche delle zone costiere caratterizzate dalla concomitanza tra un basso gradiente idraulico ed una significativa variazione della quota altimetrica, tipica casistica geomorfologica dei litorali italiani.

Introduzione

Le aree costiere italiane sono caratterizzate da uno sfruttamento irrazionale delle risorse idriche sotterranee, sia per usi civili che nei diversi contesti produttivi, tra i quali principalmente l'agricoltura e il turismo (BARROCU, 2003); ciò ha innescato fenomeni di intrusione marina che hanno provocato il deterioramento complessivo della qualità della falda rendendo talvolta parzialmente

Dissesti
e alluvioni

Rischio
sismico

Risorsa
acqua

Attività
estrattive

Geoscambio
ed energie

Università
e ricerca

Pianificazione

Bonifiche siti
inquinati e
discariche

Protezione
civile

Professione
& Società

Il Geologo
progettista

Geositi,
Geoparchi
& Geoturismo

o completamente inutilizzabile l'acqua emungibile dai pozzi. La gestione razionale dei consumi idrici, peraltro accentuati dai frequenti periodi di siccità stagionale, richiede tra l'altro la disponibilità di un'adeguata modellazione del comportamento idrodinamico e idrochimico degli acquiferi costieri (MAIMONE *et alii*, 2004; BIANCHI *et alii*, 2011); il progresso scientifico e tecnologico nel settore idrogeologico permette ormai una definizione di dettaglio di tali modelli, a condizione che si disponga di dati accurati e di un'elevata risoluzione spaziale e temporale delle fluttuazioni dei volumi di risorse idriche disponibili, e quindi della piezometria.

La corretta ricostruzione della superficie piezometrica rappresenta infatti il principale strumento interpretativo dell'idrogeologia qualitativa e quantitativa, in particolare nelle zone costiere dove talvolta si ha la concomitanza tra un basso gradiente idraulico ed una significativa variazione della quota altimetrica; in altre parole, mentre il flusso naturale della falda incontra l'acqua di mare mediante una ridotta cadente piezometrica, la superficie topografica può essere caratterizzata da ondulazioni di una certa entità (ad esempio, dune costiere affiancate a depressioni palustri, che rappresentano una tipica casistica geomorfologica dei litorali italiani).

In queste situazioni, la precisione ottenibile nella misurazione della profondità del livello dell'acqua nei pozzi/piezometri della rete di osservazione (dell'ordine del centimetro) è spesso vanificata dalla ben più scarsa precisione conseguibile attraverso la determinazione della quota assoluta del piano campagna sulla base della sola cartografia normalmente disponibile. Pertanto, al fine di ottenere precisioni dello stesso ordine di grandezza dei rilevamenti piezometrici, si rende talora necessario effettuare una quotatura della rete mediante livellazione geometrica e/o rilevamenti GNSS; tuttavia, i metodi classici di rilevamento accurato della superficie topografica, quali ad esempio la livellazione geometrica, risultano non sempre facilmente applicabili nelle pianure costiere dove la presenza

di zone coltivate, aree boschive, insediamenti civili ed industriali limita l'estensione delle misure lungo direttrici uniche, che risultano quindi lente e conseguentemente costose.

Nel presente articolo si propone quindi un metodo di rilevamento dei dati plano-altimetrici delle reti di monitoraggio piezometrico in un'area costiera, che assicuri al tempo stesso un'elevata accuratezza (centimetrica) ed una sufficiente velocità di esecuzione in modo da garantirne la sostenibilità di tempi e costi. La procedura di seguito descritta è stata applicata per la determinazione della quota ortometrica del piano campagna in corrispondenza dei piezometri posizionati all'interno della Pineta Granducale del Parco Regionale della Maremma (Grosseto), ottenendo un significativo miglioramento delle conoscenze nell'obiettivo finale di mitigare gli effetti dell'intrusione marina, che è destinata ad aggravarsi a causa della locale tendenza alla riduzione delle risorse idriche potenziali rinnovabili (BARAZZUOLI *et alii*, 2003) ed al sollevamento del livello del mare associato al riscaldamento globale (BATES *et alii*, 2008).

Inquadramento dell'area e del problema di studio

L'area esaminata ha un'estensione di circa 8 km² ed è ubicata a sud-est della foce del F. Ombrone all'interno della pianura alluvionale di Grosseto (Fig. 1). Essa è caratterizzata, come gran parte del litorale grossetano, da una serie di cordoni dunali («*tomboli*») su cui è insediata una fascia di pineta a pino marittimo e domestico ed è anche solcata da una rete di canalizzazioni di bonifica, recentemente ripristinate. Dal punto di vista geologico, l'area è occupata interamente da depositi olocenici prevalentemente sabbiosi di origine eolica, (ma anche alluvionali, lagunari, palustri, lacustri e di colmata) ed è limitata a sud-est dai calcari massicci di facies toscana (Lias inf.); La linea di costa è andata soggetta a forti mutamenti negli ultimi decenni; oggi risulta avanzata a sud di Marina di Alberese, mentre ha subito un notevole arretramento sui due lati di Bocca d'Ombrone (BELLOTTI

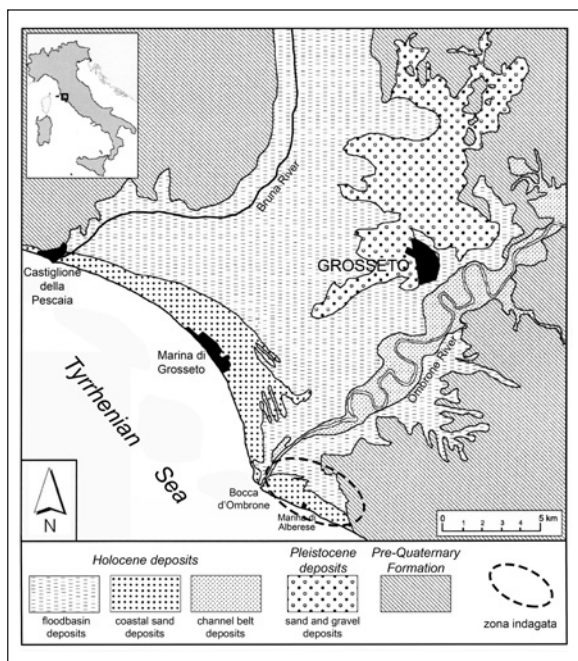
et alii, 2004; BISERNI & VAN GEEL, 2005).

Il sistema acquifero multifalda della pianura di Grosseto è interessato da fenomeni di intrusione marina a causa di un emungimento irrazionale per mezzo di migliaia di pozzi variabili per tipologia, profondità e portata estratta (BENCINI *et alii*, 2001; ALDINUCCI *et alii*, 2012), con la conseguente degradazione della qualità chimica dell'acqua di falda (AGATI *et alii*, 2001); tale situazione è riscontrabile anche nella falda dunale costiera, in modo differenziato tra il settore a nord-ovest e quello a sud-est della foce dell'Ombrone (FRANCALACCI, 2016). In quest'ultima zona è in corso uno studio idrogeologico pluriennale per conto dell'Ente Parco Regionale della Maremma, coordinato da uno degli scriventi. Le indagini finora eseguite hanno messo in evidenza che i cordoni dunali ospitano una falda freatica di importanza strategica dal punto di vista ambientale, ma caratterizzata da un diverso grado di salinizzazione a seguito di intrusione marina; l'acquifero può trovarsi sia in condizioni freatiche nella zona centrale della duna, dove le sabbie affiorano, sia in condizioni di confinamento

create dalla copertura argillosa, costituita da terreni continentali di bonifica (Fig. 2).

Le condizioni di salinizzazione della falda sono probabilmente influenzate anche dalla presenza dell'anzidetta rete di canali artificiali e dalla realizzazione di un'idrovora posizionata nei pressi della foce dell'Ombrone che aspira acqua dal canale collettore principale e ne deprime il livello, incrementandone l'effetto drenante esercitato sull'area (FRANCALACCI, 2016). Al fine di definire i locali meccanismi di intrusione marina e verificare l'influenza esercitata dalle opere di bonifica è stata installata una rete di monitoraggio costituita da 14 piezometri del tipo filtrante, con tratto finestrato negli ultimi 50 cm (Fig. 3); essi sono stati installati mediante infissione con getto d'acqua (*jetting* con lavaggio del foro), tecnica derivata dai sistemi *wellpoint* utilizzati in campo geotecnico per il drenaggio di falde superficiali. La rete realizzata presenta un'elevata densità di punti di misura ed è quindi in grado di soddisfare le necessità di una corretta caratterizzazione quantitativa dei modelli di acquifero adottabili in questo caso.

Figura 1 – Reticolo polare di Schmidt



Purtroppo, a fronte di una misurazione centimetrica della soggiacenza della falda conseguibile con la rete di monitoraggio, non è stato possibile disporre di un'altrettanto accurata valutazione della quota del piano campagna sulla base della sola cartografia disponibile (Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000), con la conseguenza che

Figura 2 - Schema dei rapporti stratigrafici nel sottosuolo delle aree dunali della pianura di Grosseto (FRANCALACCI, 2016, modificato).

Figure 2 - Schematic of stratigraphic relationships in the subsurface of the dune areas of the Grosseto plain (FRANCALACCI, 2016, modified).

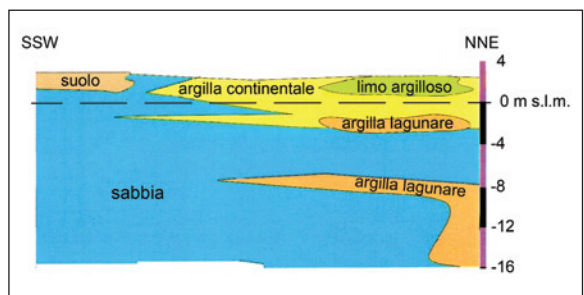


Figura 3 - Ubicazione dei piezometri della rete di monitoraggio.

Figure 3 - Location of the piezometers monitoring network.



gli errori introdotti nella ricostruzione della superficie piezometrica erano dello stesso ordine di grandezza o addirittura superiori alle possibili effettive variazioni della superficie stessa. In sintesi, la corretta rappresentazione della locale rete di flusso può essere conseguita solo attraverso una definizione della quota del piano campagna della stessa precisione con cui è possibile misurare la profondità dell'acqua nel piezometro. Si è pertanto proceduto alla pianificazione di un rilievo topografico di dettaglio finalizzato al conseguimento della precisione centimetrica di tutte le quote di campagna dove sono ubicati i piezometri della rete.

Scelta delle metodologie di rilievo della superficie topografica

L'analisi sulla disponibilità dei dati topo-cartografici dell'area ha messo in evidenza quanto segue (Fig. 4):

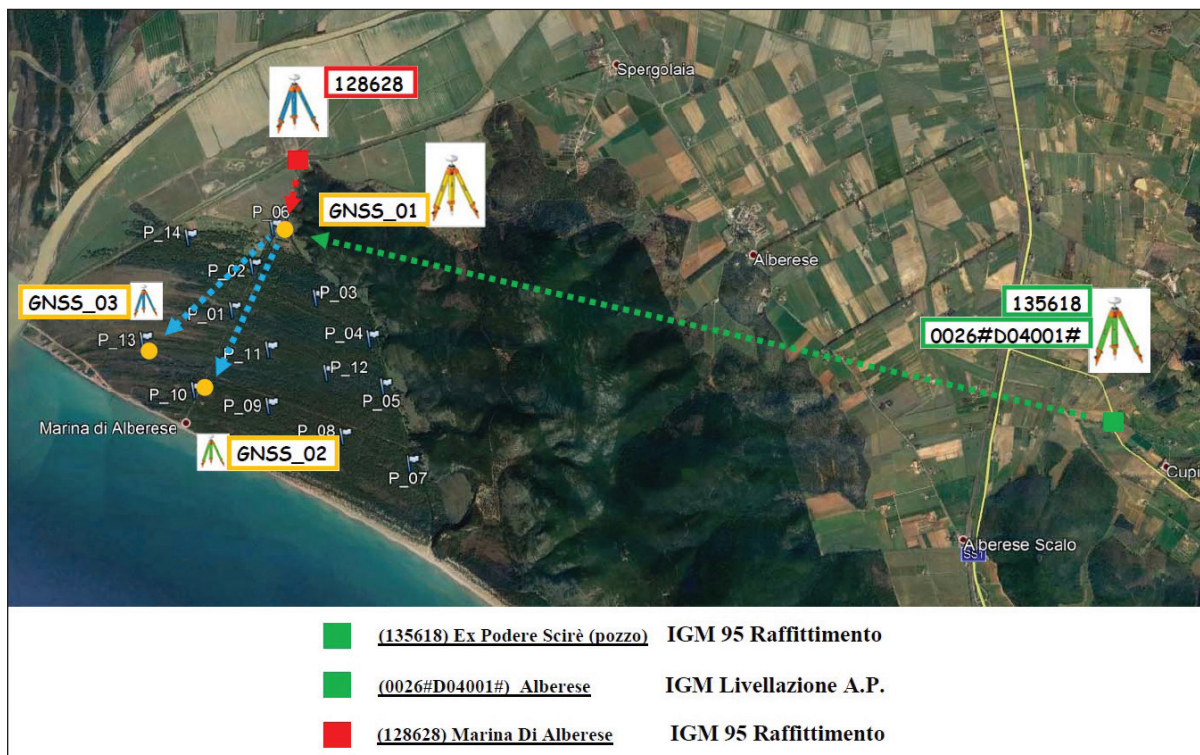
a) il caposaldo di livellazione della Rete di Alta

Precisione dell'IGM più vicino all'area di studio si trova ad una decina di chilometri dall'ingresso nella pineta di Marina di Alberese;

- b) è presente un Punto di Raffittimento della rete IGM a circa 1 km dall'inizio dell'area dove sono stati installati i piezometri;
- c) quasi tutti i piezometri da rilevare si trovano all'interno della fitta ed alta pineta, che costituisce una seria limitazione nella ricezione del segnale GNSS e dove la quasi totalità dei percorsi è costituito da sentieri sterrati il cui fondo risulta sconnesso e malfermo;
- d) le uniche strade completamente asfaltate e parzialmente scoperte dalla pineta, che potrebbero facilitare le operazioni di rilievo sia altimetrico che planimetrico, sono quelle che portano verso il mare e verso la foce dell'Ombrone;
- e) all'interno del parco non è in alcun modo possibile la materializzazione di cippi in calcestruzzo che rendano stabile il riferimento

Figura 4 - Pianificazione delle "baseline".

Figure 4 - Baseline planning.



altimetrico nei confronti della fauna del parco o rispetto ad atti vandalici.

I capisaldi IGM presi come riferimento sono caratterizzati dai seguenti parametri:

- **135618** - punto IGM95/ETRF2000 - Ex Podere Scirè (Pozzo) - Centrino cementato su pozzo (vertici collegati 0026# D04 001#);
- **0026# D04 001#** - Caposaldo della Rete Altimetrica di Alta Precisione IGM - (CSO) - Centrino VTR (Regione Toscana) n° 135618 infisso sul bordo del pozzo d'ispezione a lato della strada per Cupi a 1,1 km dall'incrocio con la S.S.1 Aurelia Km 169,200;
- **128628** - punto IGM95/ETRF2000 - Marina di Alberese (Ponte) - Centrino cementato su termine del ponte.

Si è pertanto deciso di procedere nel modo

seguinte (Fig. 5):

- rilievo tramite strumentazione GNSS "GPS 1200 Leica" con metodo "statico" per la determinazione sia planimetrica che altimetrica dei capisaldi principali GNSS_01, GNSS_02 e GNSS_03;
- rilievo tramite strumentazione GNSS "GPS 1200 Leica" con metodo "NRTK" per la determinazione della sola posizione planimetrica dei piezometri (P), dei nuovi capisaldi di livellazione (LIVE) e di altri capisaldi (HERA) già esistenti nell'area di studio. La posizione planimetrica dei capisaldi è stata rilevata con il metodo NRTK che prevede l'utilizzo di un solo strumento GNSS ed il collegamento con una rete di Stazioni Permanenti; in caso di assenza di segnale della rete telefonica per il collegamento in remoto, si può ugualmente effettuare il rilievo utilizzando il metodo RTK

che prevede l'impiego di due ricevitori GNSS collegati tra loro tramite radiomodem, dei quali il primo deve essere posizionato su un punto di coordinate note che funge da "base" e il secondo (detto "rover") che viene spostato sui punti da rilevare effettuando l'acquisizione dei dati;

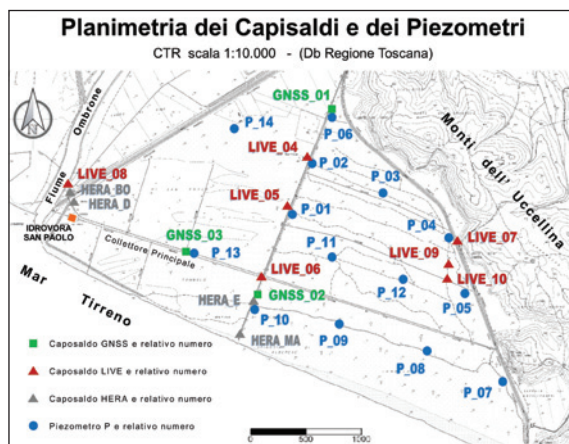
- rilievo tramite strumentazione topografica "Livello Digitale Leica LS15" e stadiе INVAR, eseguendo una livellazione geometrica di precisione "dal mezzo" per la determinazione della quota sia del piano campagna nei pressi dei piezometri che dei nuovi caposaldi di livellazione con una precisione pari a ± 1 cm (tale precisione non è raggiungibile nella componente altimetrica tramite rilievo GNSS).

La prima operazione è consistita nella realizzazione di un caposaldo all'interno dell'area di studio che avesse le stesse caratteristiche di precisione di quelle di un punto della rete IGM, sia nella componente planimetrica che in quella altimetrica (quota ortometrica). Il caposaldo principale GNSS_01 è stato posizionato sul bordo della pista ciclabile presente a lato strada, poco prima del suo ingresso all'interno della pineta (vedi Figg. 4 e 5), in modo tale da risultare vicino alla zona dove si trovano i punti da rilevare e da presentare tutte le condizioni di visibilità verso l'alto necessarie per effettuare una buona sessione di registrazione dei dati grezzi. La materializzazione di questo caposaldo è stata fatta tramite infissione sull'asfalto di un chiodo topografico e della relativa rondella colorata per una maggiore visibilità.

Successivamente, sono state individuate altre due posizioni strategiche, funzionali alle successive operazioni di livellazione, dove sono stati materializzati i capisalci GNSS_02 e GNSS_03 che hanno anch'essi le stesse caratteristiche tecniche e di posizionamento del GNSS_01. Anche i nuovi capisalci di livellazione (LIVE) sono stati materializzati tramite chiodo in acciaio e rondella colorata; essi sono stati posizionati durante l'esecuzione delle linee di livellazione dove si è ritenuto opportuno e necessario al fine di rendere disponibile in

Figura 5 - Planimetria dei capisalci GNSS, di quelli nuovi di livellazione (LIVE) e di quelli già presenti (HERA) e della rete dei piezometri (P).

Figure 5 - Planes of GNSS landmarks, landmarks relative to new leveling (LIVE), existing ones (HERA) and piezometric network (P).



posizioni ben definite la quota ortometrica con la precisione di ± 1 cm.

Infine, non essendo risultato possibile materializzare capisalci stabili all'interno del Parco tramite la realizzazione di cippi in calcestruzzo, per motivi paesaggistici e altri vincoli presenti, si è ritenuto efficace e non impattante infiggere al suolo fino alla definizione del piano campagna, nei pressi di ogni piezometro, delle barre in acciaio di circa 50 cm di lunghezza; questo tipo di materializzazione è stata pensata anche per ridurre al minimo il rischio di distruzione o rimozione dei capisalci e quindi per avere una maggiore accuratezza delle misurazioni nel tempo durante il monitoraggio dei livelli di falda.

Elaborazione dei dati

Elaborazione GNSS con metodo statico

Al fine di raggiungere una precisione centimetrica nel calcolo dei vettori delle *baseline* è vitale che sussistano condizioni tali da garantire l'accuratezza ricercata, sia in fase di rilievo che in quella di elaborazione. Durante il rilievo di campagna è necessario eseguire correttamente tutte le procedure previste per la corretta acquisizione dei dati ed

Figura 6 - Parametri di elaborazione della “baseline” tra caposaldo 135618 (IGM95) e GNSS_01.

Figure 6 - Parameters for processing the baseline between the master 135618 (IGM95) and GNSS_01.

Informazioni punto			
Tipo ricevitore / S/N:	Riferimento: 135618	rover: GNSS_01	
Tipo antenna / S/N:	ATX1230 / 309003	ATX1230 / 316353	
Altezza antenna:	ATX1230 GG Palina / - 1.0470 m	ATX1230 GG Pole / - 1.4680 m	
Coordinate iniziali:			
Latitudine:	42° 38' 14.41064" N	42° 40' 00.40232" N	
Longitudine:	11° 09' 05.61357" E	11° 02' 45.60829" E	
Quota ellis.:	83.0720 m	49.5685 m	
Parametri elaborazione			
Parametri	Selezionate	Usate	Commento
Angolo di cut-off:	15°	15°	
Tipo effermeridi (GPS):	Trasmesse	Trasmesse	
Tipo effermeridi (GLONASS):	Trasmesse	Trasmesse	
Tipo soluzione:	Automatico	Fase: tutto fix	
Tipo GNSS:	Automatico	GPS / GLONASS	
Frequenza:	Automatico	L1 e L2	
Fissa ambiguità fino a:	80 km	80 km	
Durata minima per soluzione float (statico):	5° 00"	5° 00"	
Frequenza di campionamento:	Usa tutto	15	
Modello troposferico:	Hopfield	Hopfield	
Modello ionosferico:	Automatico	Calcolato	
Usa modello stocastico:	SI	SI	
Distanza minima:	8 km	8 km	
Attività ionosferica:	Automatico	Automatico	

in particolare definire il posizionamento di ogni strumento GNSS con ottima visibilità verso l'alto, prevedere lunghi tempi di osservazione, valutare l'intervallo di campionamento (epoche) e l'impostazione corretta degli altri parametri necessari per la registrazione dei dati. In fase di elaborazione è necessario valutare e definire manualmente

tutti i principali parametri di calcolo (tra i quali il modello troposferico e ionosferico, l'angolo di *cut-off*, l'inserimento del corretto centro di fase dell'antenna e l'uso delle effemeridi precise scaricate dal sito della NASA) e poi procedere all'elaborazione dei dati per il calcolo delle componenti plano-altimetriche delle *baseline* (CINA, 2000). In questo caso l'elaborazione è stata eseguita tramite l'utilizzo del software *Leica Geo Office 8.4 (LGO)*, con il metodo della “singola base” (Fig. 6).

I programmi per la post-elaborazione dei dati utilizzano, in genere, il metodo “per variazioni di coordinate” che sinteticamente consiste nel partire da una soluzione approssimata da migliorare mediante un processo iterativo basato sul principio “dei minimi quadrati”. Al fine di effettuare il *post-processing* nel modo più corretto ed efficiente possibile, non si deve mai assumere come punto di partenza un punto che abbia le coordinate di navigazione in quanto queste coordinate hanno un'approssimazione che varia da 15 a 30 m; altrimenti, si corre il rischio che il calcolo della linea di base non sia risolto attraverso il miglior approccio della soluzione delle ambiguità di fase pur avendo

Figura 7 - Parametri di elaborazione della “baseline” tra caposaldo 135618 (IGM95) e GNSS_01.

Figure 7 - Parameters for processing the “baseline” between the master 135618 (IGM95) and GNSS_01.

ID punto	Classe p...	Inizio	Fine	Durata	Tipo GNSS	Tipo	Altezza ante...
135618	Navigata	02/15/2017 10:22:01	02/15/2017 13:25:51	3h 03' 50"	GPS/GLONASS	Statico	1.0470
128628	Navigata	02/15/2017 10:56:10	02/15/2017 14:33:54	3h 37' 44"	GPS/GLONASS	Statico	0.1950
GNSS_01	Navigata	02/15/2017 11:25:03	02/15/2017 15:46:41	4h 21' 38"	GPS/GLONASS	Statico	1.4680
GNSS_02	Navigata	02/15/2017 14:05:03	02/15/2017 15:54:10	1h 49' 07"	GPS/GLONASS	Statico	1.6770
GNSS_03	Navigata	02/15/2017 15:00:07	02/15/2017 15:38:26	38' 19"	GPS/GLONASS	Statico	1.6500

dei dati senza salti di ciclo. Buona regola da rispettare è quella di partire con delle coordinate del punto di partenza aventi la massima precisione possibile, che in questo caso sono quelle del caposaldo dell'IGM95, da cui definire altri due aspetti fondamentali (Fig. 7):

- ✓ la linea di base da calcolare (di colore rosso è il *reference*, mentre il verde indica il *rover*);
- ✓ il verso di calcolo (LGO esegue sempre il calcolo dal *reference* al *rover*).

Una volta lanciata l'elaborazione della linea di base, vengono fissate le ambiguità e calcolate le tre componenti ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) del vettore che unisce i due vertici GNSS; quest'ultimo passaggio rappresenta normalmente il risultato finale del processo di calcolo tramite il quale sono state definite le coordinate dei capisaldi materializzati all'interno del Parco e la relativa quota ellissoidica (Fig. 8). Le quote ortometriche sono state ottenute, a partire da quelle ellissoidiche tramite una trasformazione con i grigliati (*.grk) eseguita con il software VERTO dell'IGM, applicando il modello di geoidi ITALGEO2005.

Il confronto tra le quote ortometriche calcolate tramite i grigliati e quelle presenti nelle monografie dell'IGM dei punti 128628 e 135618 consente di

verificare l'assenza di differenze superiori a ± 5 mm, che rappresentano quindi l'ordine di grandezza della precisione altimetrica che è possibile garantire anche a tutti i nuovi capisaldi GNSS_01, GNSS_02 e GNSS_03.

Elaborazione delle livellazioni

L'elaborazione dei sette tratti di livellazione geometrica è stata eseguita all'interno del software *Leica Infinity*, dove al termine di ogni giornata di lavoro sono stati scaricati e controllati i dati. Il controllo sui dati è stato eseguito per valutare l'errore di chiusura di ogni linea (in andata e ritorno, o ad anello) al fine di stabilire se tale errore, in virtù della distanza percorsa, consentisse o meno di restare all'interno della tolleranza centimetrica prefissata espressa dalla formula relativa all'anzidetta livellazione di precisione (Fig. 9):

$$\text{Tolleranza} = \pm 6 \cdot \sqrt{L} \text{ [mm]}$$

dove L è la lunghezza in km della linea di livellazione.

L'elaborazione dei dati e la compensazione delle linee di livellazione sono state eseguite dopo aver effettuato il calcolo dei punti di riferimento GNSS in modalità "statico" collegati alla rete IGM95; si è così in grado di trasferire direttamente ad ogni

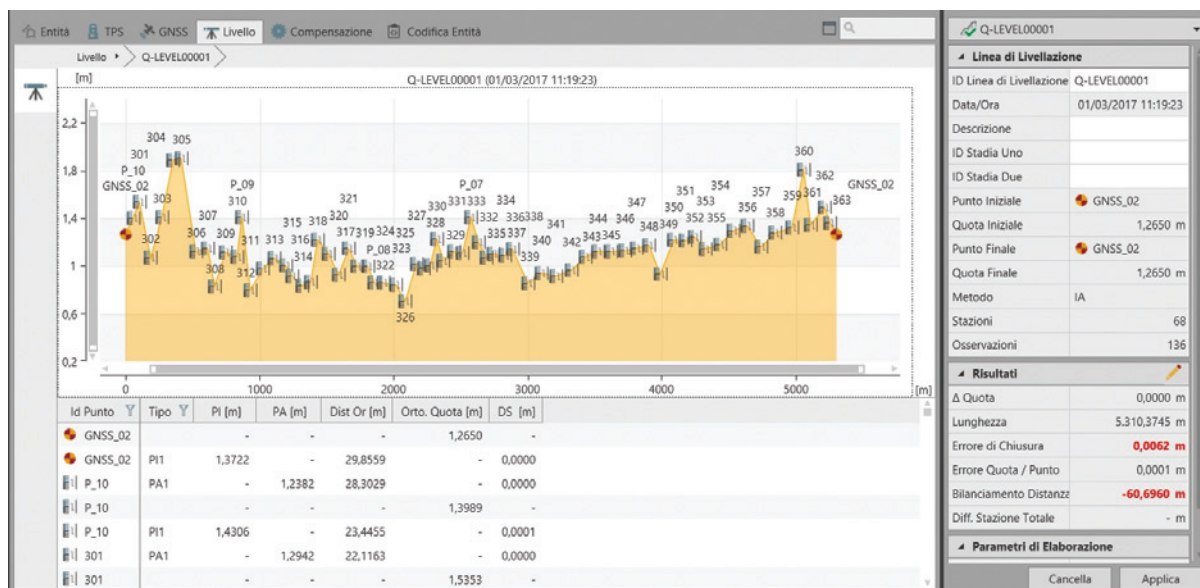
Figura 8 - Coordinate geografiche e quote dei capisaldi GNSS dopo la post-elaborazione dei dati.

Figure 8 - Geographic coordinates and quotes of GNSS landmarks after post-processing data.

Punto	Geografiche (ETRF2000)		Ellissoidica	Ortometrica
	Lati φ [sessagesimali]	Longi λ [sessagesimali]	h [m]	H [m s.l.m.]
128628	42°40'51,9657"	11°04'22,5677"	52,909	4,701
135618	42°39'14,4106"	11°09'05,6136"	83,072	34,785
GNSS_01	42°40'00,4023"	11°02'45,6083"	49,569	1,384
GNSS_02	42°39'06,8482"	11°02'13,9749"	49,442	1,265
GNSS_03	42°39'21,6915"	11°01'47,0903"	49,764	1,595

Figura 9 - Tratto n. 3: Tolleranza = ± 613,83 mm > 6,20 mm (errore di chiusura).

Figure 9 - Section no. 3: Tolerance = ± 613.83 mm > 6.20 mm (residual "closing" error).



punto una precisione molto simile (centimetrica o sub-centimetrica) alle quote assolute della Rete di Livellazione di Alta Precisione IGM.

La Fig. 10 riassume le quote ortometriche dei capisaldi e del piano campagna nei pressi dei piezometri al termine delle operazioni di calcolo e compensazione delle linee di livellazione.

Elaborazione GNSS con metodo NRTK

Dal punto di vista operativo, gli ultimi anni hanno visto lo sviluppo di strumentazione GNSS sempre più orientata ad un incremento di efficienza per consentire all'utenza rilievi di alta precisione in tempi sempre più contenuti. La realizzazione di infrastrutture NRTK, come la rete SmartNet ItalPOS realizzata da privati con Leica Geosystems Italia, consente di modellare gli errori del sistema GNSS e di fornire i dati necessari a correggere le misure (che l'operatore esegue con un singolo strumento) al fine di ottenere direttamente in campagna precisioni centimetriche nella definizione della posizione. Questa modalità di rilievo non necessita di particolari elaborazioni che vengono fatte in tempo reale da un centro di calcolo e le correzioni

Figura 10 - Quote ortometriche dei capisaldi e dei piezometri, rilevate in campagna tramite livellazione.

Figure 10 - Elevations quotes of the landmarks and piezometers, surveyed in the field by leveling.

Punto	Ortometrica
	H
	[m s.l.m.]
GNSS_01	1,38
GNSS_02	1,27
GNSS_03	1,60
LIVE_04	2,41
LIVE_05	1,54
LIVE_06	1,38
LIVE_07	1,47
LIVE_08	1,30
LIVE_09	1,64
LIVE_10	1,83
HERA_BO	3,86
HERA_D	3,86
HERA_E	1,27
HERA_MA	2,11

Punto	Ortometrica
	H
	[m s.l.m.]
P_01	1,31
P_02	1,80
P_03	1,81
P_04	1,61
P_05	1,84
P_06	1,06
P_07	1,41
P_08	1,00
P_09	1,41
P_10	1,40
P_11	1,27
P_12	1,37
P_13	1,09
P_14	0,98

necessarie inviate al ricevitore; pertanto, restano da eseguire soltanto delle semplici operazioni di scarico dei dati e di verifica che gli stessi siano corretti (CINA, 2014).

Le coordinate ETRF2000 restituite dallo strumento GNSS in modalità NRTK (Fig. 11) sono sempre

Figura 11 - Coordinate geografiche ETRF2000 e quote ellissoidiche ottenute da rilievo GNSS in modalità NRTK.

Figure 11 - Geographic coordinates according to ETRF2000 and ellipsoid quotes obtained from GNSS survey in NRTK mode.

Punto	Geografiche (ETRF2000)		Ellissoidica	Punto	Geografiche (ETRF2000)		Ellissoidica
	Lati ϕ [sessagesimali]	Longi λ [sessagesimali]	h [m]		Lati ϕ [sessagesimali]	Longi λ [sessagesimali]	h [m]
GNSS_01	42°40'00,40232"	11°02'45,60829"	49,569	P_01	42°39'32,177649"	11°02'29,191584"	49,499
GNSS_02	42°39'06,84822"	11°02'13,97492"	49,442	P_02	42°39'46,867859"	11°02'37,713055"	49,997
GNSS_03	42°39'21,69147"	11°01'47,09033"	49,764	P_03	42°39'36,822014"	11°03'07,338419"	50,029
LIVE_04	42°39'47,224349"	11°02'36,969613"	50,609	P_04	42°39'23,415707"	11°03'32,829715"	49,733
LIVE_05	42°39'32,687225"	11°02'28,675749"	49,719	P_05	42°39'07,292113"	11°03'39,296425"	49,951
LIVE_06	42°39'13,415758"	11°02'17,332110"	49,568	P_06	42°39'59,745721"	11°02'46,311499"	49,257
LIVE_07	42°39'21,859076"	11°03'35,691441"	49,691	P_07	42°38'42,282307"	11°03'52,578646"	49,589
LIVE_08	42°39'40,543291"	11°00'59,920142"	49,493	P_08	42°38'50,801119"	11°03'21,652650"	49,175
LIVE_09	42°39'14,687824"	11°03'31,846985"	49,830	P_09	42°39'00,190634"	11°02'47,768341"	49,624
LIVE_10	42°39'11,186734"	11°03'31,552510"	50,006	P_10	42°39'05,108953"	11°02'13,803620"	49,518
HERA_BO	42°39'38,328457"	11°01'00,393669"	52,066	P_11	42°39'18,908480"	11°02'46,356926"	49,462
HERA_D	42°39'37,924479"	11°01'00,682607"	52,053	P_12	42°39'12,021936"	11°03'13,598192"	49,551
HERA_E	42°39'05,807575"	11°02'13,319039"	49,501	P_13	42°39'21,041159"	11°01'48,858990"	49,290
HERA_MA	42°38'55,989461"	11°02'07,432774"	50,282	P_14	42°39'56,256013"	11°02'08,336306"	49,132

formate da una terna di numeri che possono essere espresse come coordinate geografiche (longitudine, latitudine e quota ellissoidica) oppure geocentriche (X, Y e Z), in ogni caso sempre inquadrato nel nuovo riferimento geodetico italiano oggi incentrato nel frame denominato Rete Dinamica Nazionale (RDN).

Allo scopo di una migliore gestione futura in ambito sia GIS che catastale, le coordinate ETRF2000 ottenute dal rilievo GNSS NRTK sono state trasformate in piane TM-ETRF2000 ed espresse anche in altri sistemi di riferimento quali GAUSS-BOAGA e CASSINI-SOLDNER; la trasformazione delle coordinate ETRF2000 a quelle piane TM-ETRF2000 ed a quelle GAUSS-BOAGA è stata eseguita tramite *Verto On Line*, software disponibile all'interno del sito dell'Istituto Geografico Militare (Fig. 12).

Infine, per tutti i punti rilevati (capisaldi e piezometri) è stata redatta una scheda monografica dove si è provveduto a riportare le indicazioni necessarie per l'individuazione del punto e la sua materializzazione, oltre naturalmente ad indicare le quote ortometrica ed ellissoidica e tutte le coordinate espresse nei vari sistemi di riferimento calcolati (Fig. 13), compreso quello catastale la cui trasformazione è stata però eseguita tramite il software *CartLab1* (CIMA et alii, 2002).

Considerazioni conclusive

I dati di campagna misurati tramite le operazioni topografiche sopra descritte hanno consentito la definizione univoca e certa (± 1 cm) del piano di riferimento assoluto "z" (quota ortometrica) di ogni piezometro della rete di monitoraggio; i risultati così ottenuti, rispetto alle stesse quote ricavate per interpolazione di dati sulla CTR in scala 1:5.000, presentano evidenti differenze che variano da un minimo di +0,008 m per il P_09 ad un massimo di -0,805 m per il P_02 (Fig. 14), con un valore medio di -0,240 m.

Al fine di migliorare questo confronto nei mesi monitorati, soprattutto per quanto riguarda le implicazioni idrodinamiche, sono state ricostruite le relative superfici piezometriche mediante l'utilizzo del software di analisi geostatistica *Surfer*, ovviamente con la stessa metodologia di interpolazione; i risultati così ottenuti sono evidenziati nelle Figg. da 15 a 18. La ricostruzione piezometrica effettuata sulla base dei dati della livellazione descrive una rete di flusso molto differente; infatti, mentre quella derivante dai dati desunti dalla CTR mostra un flusso complessivamente diretto dall'entroterra pianeggiante verso il mare con zone di alto e basso piezometrico difficilmente

Figura 12 - Trasformazione di coordinate tramite il software Verto On Line™.

Figure 12 - Coordinate transformation using Verto On Line™ software



Coordinate Ingresso: Lon/Est: Lat/Nord:

Sistema Rif. In Ingresso:

Sistema Rif. In Uscita:

Formato di Uscita: Sessagesimale Sessadecimale

Coordinate Uscita: Lon/Est: Lat/Nord:

Sistemi di riferimento

La trasformazione è possibile fra i Sistemi Geodetici più utilizzati in Italia: ROMA40, ED50, ETRF89 ed ETRF2000, sia in coordinate geografiche che nei sistemi piani ed essi normalmente associati, con riferimento ai codici EPSG (European Petroleum Survey Group). Fra i codici presenti nell'EPSG non sono accettati: 4982, 4983, 4670, 3064 e 3065, poiché riferiti all'IGM95 che non è un Sistema ma una rete geodetica; questa infatti, nel tempo, è stata espressa in diversi Riferimenti. Non sono altresì accettati i codici: 4978, 4979, 32632, 32633 e 32634, poiché riferiti al WGS84 che non è mai stato utilizzato in Italia. Una spiegazione che illustra il significato dei codici EPSG è riportata nella pubblicazione: ["Corretto utilizzo dei Sistemi Geodetici di Riferimento all'interno del software GIS"](#) - Carroccio Marianna, Cima Virgilio, Maseroli Renzo - Atti della 18a Conferenza Nazionale ASITA, Firenze, 14-16 ottobre 2014


Le trasformazioni tra sistemi sono eseguite correttamente all'interno del seguente rettangolo:
 Nord min 35°17' Est min 06°23'; Nord max 47°15' Est max 18°39'

Formato delle coordiante

In generale si accetta sia la virgola che il punto decimale. Le coordinate geografiche sessagesimali possono essere scritte nella forma 42° 23'12,1212" (o 42d23'12,1212"), dove il simbolo per i secondi sono le virgolette e NON due volte l'apice; per inserire coordinate geografiche sessadecimali è possibile utilizzare una forma del tipo 12,51212" (o semplicemente 12.51212). Gli spazi non sono mai significativi.

Figura 13 - Esempio di scheda monografica (piezometro n. 10).

Figure 13 - Example of a monograph (piezometer No. 10).




**UNIVERSITÀ
DI SIENA**
1240

**Monografia
P_10**

**Provincia di Grosseto - Comune di Grosseto - Marina di Alberese
PARCO REGIONALE DELLA MAREMMA**

Note : Le coordinate Geografiche (ETRF2000) sono state rilevate con strumentazione GNSS in metodologia NRTK nel marzo 2017.
 Le coordinate plane (UTM-ETRF2000), (Gauss Boaga) e (Cassini Soldner) sono state calcolate, dalle coordinate Geografiche ETRF2000 tramite algoritmo di trasformazione. Le quote ortometriche sono state rilevate tramite livellazione geometrica dal mezzo nel marzo 2017.

Inquadramento tramite foto aerea




Geografiche (ETRF2000)	Piane (UTM-ETRF2000) Fuso 32	Piane (Gauss Boaga) Fuso Ovest	Piane (Cassini Soldner) Origine Torre del Mangia
[sessagesimali]	[m]	[m]	[m]
Φ: 42° 39' 05,1090"	N: 4724118,444	N: 4724131,597	X: -74 043,51
λ: 11° 02' 13,8036"	E: 666984,674	E: 1667014,725	Y: -24 196,13


Materializzazione :
 Picchetto in acciaio infisso sul terreno accanto al tubo del piezometro che fuoriesce dal piano di campagna

Quota s.l.m.
H = 1,399 m.

Quota ell.
h = 49,518 m.

Carta Tecnica Regionale **Scala 1:10000**








Figura 14 - Risultati ottenuti nella valutazione delle quote ortometriche del piano campagna in corrispondenza dei piezometri (RIL) e confronto con quelle ricavate dall'interpolazione sulla CTR 1:5.000.

Figure 14 - Results obtained in the evaluations of the orthometric quotes surveyed at piezometers top (RIL) and comparison with the quotes obtained by interpolation on CTR toposheets at the scale 1: 5,000.

POZZO	2016		2017		Marzo 2016			Agosto 2016		
	Piezo n.	CTR5000 m (s.l.m.)	RILIEVO m (s.l.m.)	differenza m	boccaPx m	Soggiacenza m	CTR m (s.l.m.)	RIL m (s.l.m.)	Soggiacenza m	CTR m (s.l.m.)
P_01	1,70	1,31	-0,39	0,18	-1,73	0,15	-0,24	-2,23	-0,35	-0,74
P_02	2,60	1,80	-0,81	0,16	-2,01	0,75	-0,05	-2,42	0,34	-0,47
P_03	2,10	1,81	-0,29	0,13	-1,72	0,51	0,22	-2,09	0,14	-0,15
P_04	1,70	1,61	-0,09	0,35	-1,51	0,54	0,45	-2,07	-0,02	-0,11
P_05	1,20	1,84	0,64	0,28	-1,84	-0,36	0,28	-2,50	-1,02	-0,38
P_06	1,50	1,06	-0,44	0,27	-0,91	0,86	0,42	-1,70	0,07	-0,37
P_07	1,30	1,41	0,11	0,41	-1,42	0,29	0,40	-1,94	-0,23	-0,12
P_08	1,20	1,00	-0,20	0,61	-1,64	0,17	-0,03	-1,99	-0,18	-0,38
P_09	1,40	1,41	0,01	0,13	-1,60	-0,07	-0,06	-1,98	-0,45	-0,44
P_10	1,60	1,40	-0,20	0,24	-1,65	0,19	-0,01	-2,08	-0,24	-0,44
P_11	1,60	1,27	-0,34	0,22	-1,66	0,16	-0,18	-2,05	-0,23	-0,57
P_12	1,60	1,37	-0,23	0,51	-1,95	0,16	-0,07	-2,30	-0,19	-0,42
P_13	1,70	1,09	-0,61	0,15	-1,80	0,05	-0,56	-1,90	-0,05	-0,66
P_14	1,50	0,98	-0,52	0,31	-1,44	0,37	-0,15	-1,91	-0,10	-0,62

Figura 15 - Carta piezometrica dell'acquifero dunale relativa a marzo 2016: quote da CTR.

Figure 15 - Piezometric map of dunal aquifer relative to March 2016: quote from CTR.

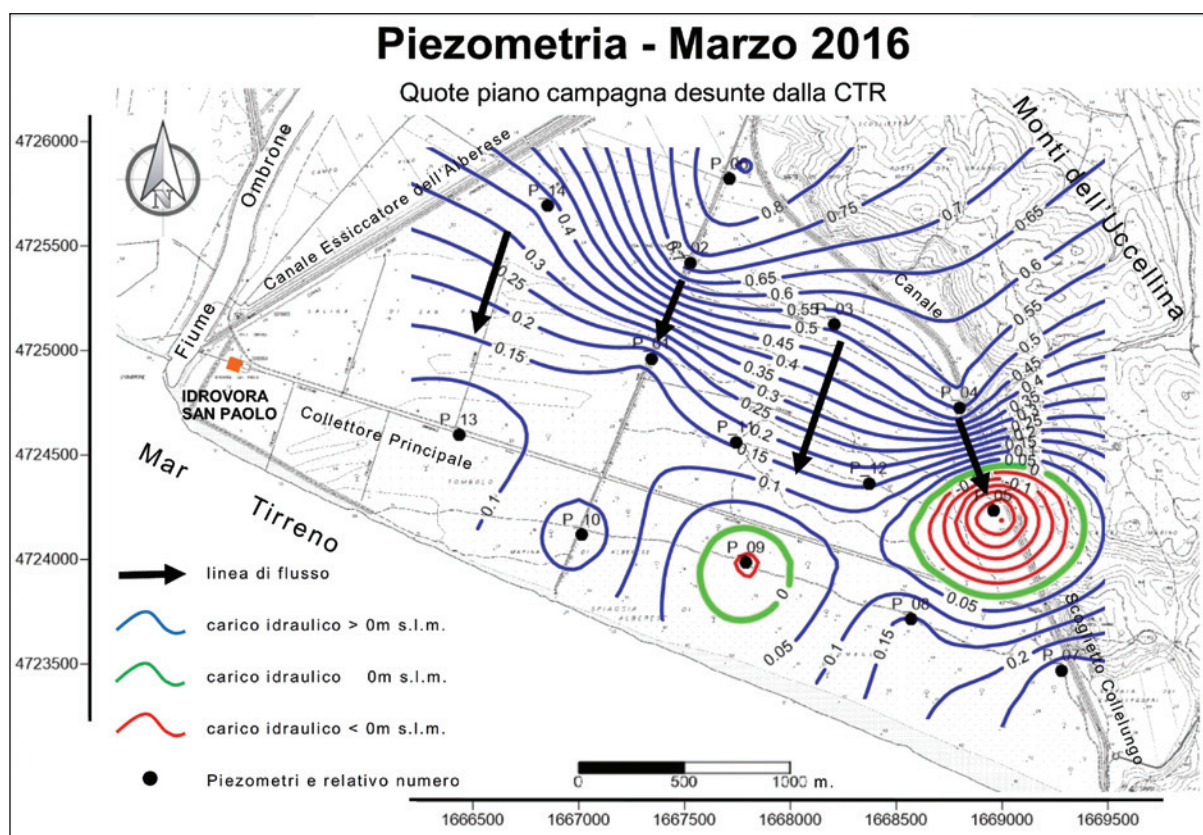
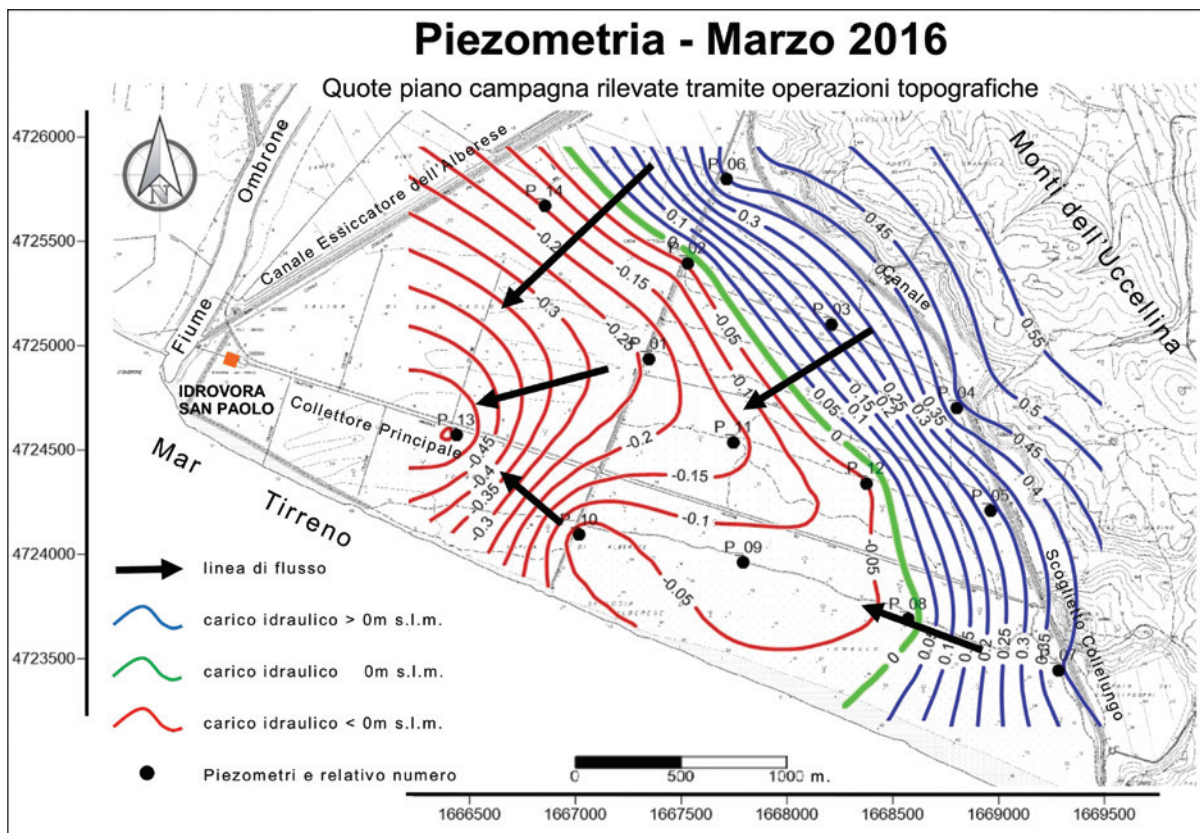


Figura 16 - Carte piezometrica dell'acquifero dunale relativa a marzo 2016: quote da livellazione.

Figure 16 - Piezometric map of dunal aquifer relative to March 2016: quote from leveling.



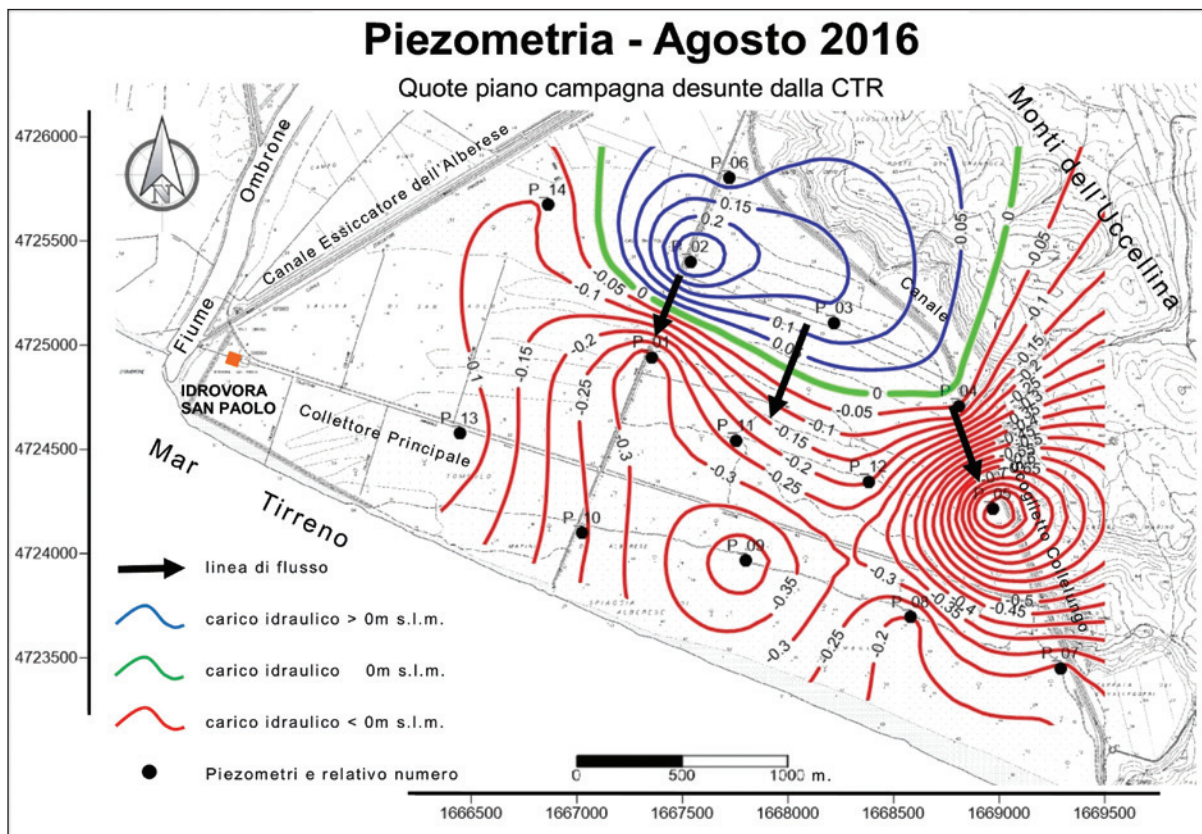
interpretabili in una zona priva di emungimenti tramite pozzi, la nuova ricostruzione si presenta invece morfologicamente ben più uniforme e con un flusso sempre proveniente dai rilievi calcarei dell'Uccellina e diretto verso la confluenza dei collettori principali e quindi anche dell'idrovora San Paolo e della foce dell'Ombrone. Quest'ultimo aspetto supporta, tra l'altro, l'ipotesi che le opere di canalizzazione delle acque, e soprattutto le loro modalità di funzionamento, influiscano in modo decisivo sul locale fenomeno di intrusione marina, come ipotizzato da FRANCALACCI (2016). Si può anche osservare che le carte piezometriche derivate alla livellazione mostrano un notevole arretramento, rispetto alla linea di costa, dell'iso-linea che rappresenta un carico idraulico uguale

a zero. È quindi probabile che il livello della falda sia mantenuto artificialmente sempre ribassato dalla presenza e gestione delle suddette opere di drenaggio, a cui contribuisce ovviamente in alcuni periodi la diminuzione stagionale delle precipitazioni; piezometrie negative così ampie e permanenti in una zona prossima alla linea di costa costituiscono certamente un fattore decisivo per la presenza dell'intrusione marina.

In definitiva, lo studio in corso sull'area costiera del Parco Regionale della Maremma ed i rilievi ora effettuati tramite strumentazione GNSS e livellazione geometrica "dal mezzo" hanno portato alla determinazione della quota di campagna con la necessaria precisione centimetrica per le finalità idrogeologiche; questo nuovo dato ha consentito

Figura 17 - Carta piezometrica dell'acquifero dunale relativa ad agosto 2016: quote da CTR.

Figure 17 - Piezometric map of dunal aquifer relative to August 2016: quote from CTR.



infatti di effettuare elaborazioni corrette sull'idrodinamica della falda, in quanto più precise e realistiche, conseguendo un sensibile miglioramento nell'interpretazione dei locali processi idrogeologici ed in particolare dell'intrusione marina.

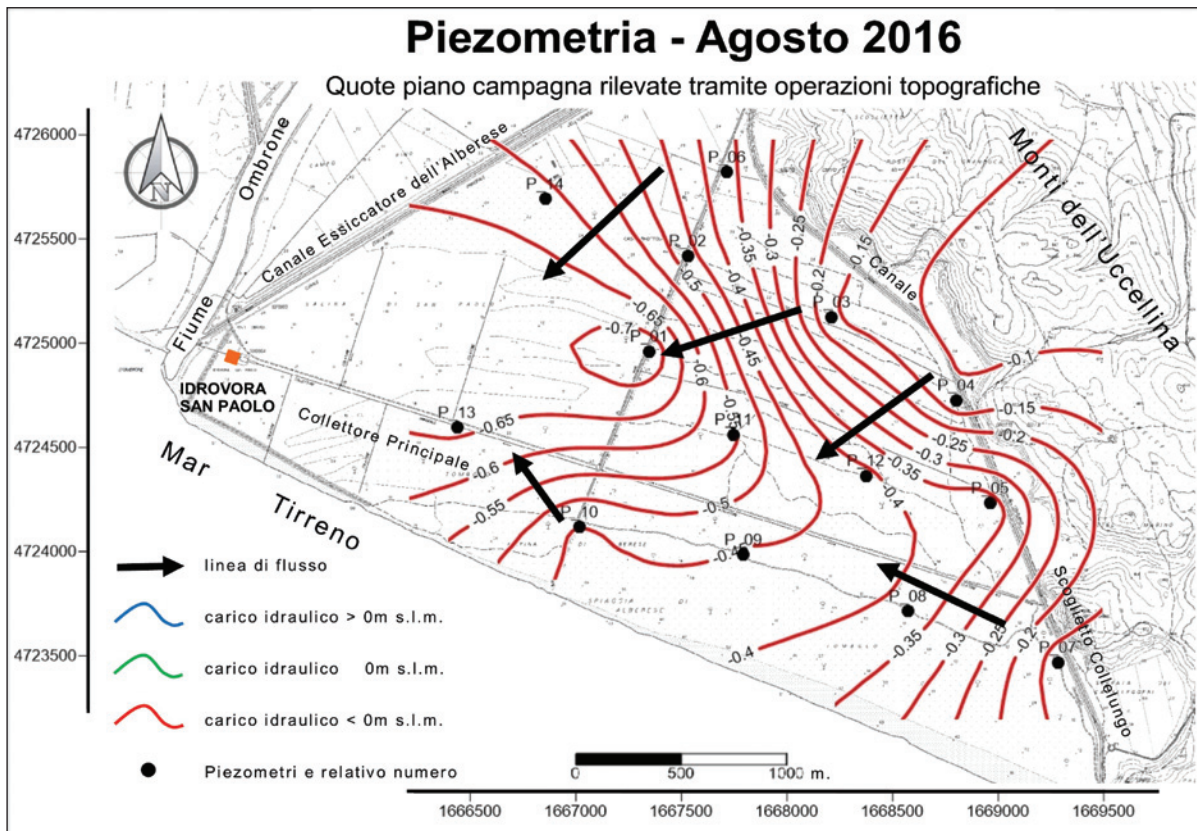
Alla luce dei risultati ottenuti, nonostante le note problematiche presenti nelle fasce costiere quale quella della Maremma, la procedura proposta è da ritenersi conveniente in tutte le applicazioni idrogeologiche in quei tratti di costa ove risulti necessaria l'accurata ricostruzione topografica del piano campagna. È anche da sottolineare che, al fine di ottimizzare il lavoro e trarre il massimo beneficio dalle tecniche di rilievo utilizzate, la loro integrazione ha consentito certamente un

risparmio di tempo/lavoro consentendo, tra l'altro, di mantenere invariati gli standard delle precisioni finali prefissati per lo studio dell'area. Infatti, pur consapevoli che la tecnica migliore per ottenere alte precisioni nella misurazione delle quote è la livellazione geometrica, la distanza di circa 10 km del più vicino caposaldo della Rete di Livellazione di Alta Precisione dell'IGM avrebbe comportato un onere di lavoro in campagna e in *back office* che avrebbe inciso molto nell'economia dell'indagine e non avrebbe portato sensibili differenze rispetto a quanto ottenuto con una più veloce livellazione GNSS tramite rilievo in modalità "statico" e relativo *post-processing*.

Altri possibili metodi e/o soluzioni per il rilievo dell'area che consentissero di ottenere le

Figura 18 - Carta piezometrica dell'acquifero dunale relativa ad agosto 2016: quote da livellazione.

Figure 18 - Piezometric map of dunal aquifer relative to August 2016: quote from leveling.



precisioni imposte dalla ricerca sono state ritenute non convenienti nel rapporto qualità/prezzo in quanto l'impiego della strumentazione e l'incremento delle ore complessive di lavoro non avrebbe aumentato in modo efficace la precisione e sarebbero risultate più onerose nell'impiego di tempo e mezzi; pertanto, si ritiene che la procedura definita per questo caso di studio consenta di ottenere ottime *performance* su tutti i rilievi che si rendano necessari sulle fasce costiere ai fini della migliore comprensione dei fenomeni geomorfologici ed idrogeologici.

Ringraziamenti

L'articolo è tratto dai risultati ottenuti nell'ambito

di un accordo di ricerca tra il Prof. Massimo Salleolini e l'Ente Parco Regionale della Maremma dal titolo "Studio preliminare sull'acquifero dunale del Parco Regionale della Maremma". Gli autori ringraziano l'Ing. Renzo Maseroli (Responsabile del settore geodetico dell'Istituto Geografico Militare, Firenze) per la rilettura del manoscritto ed i proficui suggerimenti.

Riferimenti bibliografici

AGATI L., BARBIERI M., BAZZOLI P., DALL'AGLIO M., MANTELLI F., PALMIERI R. & VENANZI G. (2001) - *Drinking water quality in the Grosseto Province, Tuscany, Italy. An appraisal on the basis of the study of water rock interaction*. Proceedings of the Water Rock

Interaction (WRI-10) International Congress, Cagliari, June 2001, Vol. 2, 1059-1062.

ALDINUCCI M., LEONINI M., MARCHETTI M.R., NOCCHI M. & SALLEOLINI M. (2012) - *Idrogeologia del sistema acquifero multifalda della pianura di Grosseto (Toscana meridionale)*. Engineering-Hydro-Environmental Geology, 15, 61-81.

BARAZZUOLI P., MOCENNI B., RIGATI R. & SALLEOLINI M. (2003) - *L'influenza della variabilità climatica sulle risorse idriche rinnovabili della Toscana meridionale*. Atti del I Congresso Nazionale A.I.G.A., Chieti, 19-20 febbraio 2003, Rendina Ed., Roma, 55-68.

BARROCU G. (2003) - *Seawater intrusion in coastal aquifers of Italy*. In: López-Geta J.A., Gómez J. de D., de La Orden J.A., Ramos G., Rodriguez L. (Eds.), Coastal Aquifers Intrusion Technology: mediterranean Countries, tomo II, Madrid, 207-223.

BATES B.C., KUNDZEWICZ Z.W., WU S. & PALUTIKOF J.P. (Eds.) (2008) - *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 2008, 210 pp.

BELLOTTI P., CAPUTO C., DAVOLI L., EVANGELISTA S., GARZANTI E., PUGLIESE F., VALERI P. & VESICA P. (2004) - *Morpho-sedimentary characteristics and Holocene evolution of the emergent part of the Ombrone delta (southern Tuscany)*. Geomorphology, 61, 71-90.

BENCINI A., GIMENEZ FORCADA G. & PRANZINI G. (2001) - *Salinization in coastal plain of Grosseto: hydrochemical study*. Proceedings of the Water Rock Interaction (WRI-10) International Congress, Cagliari, June 2001, 517-520.

BIANCHI S., NOCCHI M. & SALLEOLINI M. (2011) - *Hydrogeological investigations in southern Tuscany (Italy) for coastal aquifer management*. AQUA-mundi, Scribo s.r.l. (Firenze), 2(1), 53-70.

BISERNI G. & VAN GEEL B. (2005) - *Reconstruction of*

Holocene vegetation e sedimentation history of the Ombrone alluvial plain (South Tuscany, Italy). Review of Palaeobotany and Palynology, 136, 16-28.

CIMA V., MASEROLI R. & SURACE L. (2002) - *CartLab1. Versione 1.2.1*. <http://geologia2000.anisn.it/Program.html>

CINA A. (2000) - *GPS. Principi, modalità, tecniche di posizionamento*. CELID, Torino, 128 pp.

CINA A. (2014) - *Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System). Per la geomatica*. CELID, Torino, 374 pp.

FRANCALACCI S. (2016) - *Studio idrogeologico dell'acquifero dunale della pianura di Grosseto*. Tesi di Laurea inedita, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente dell'Università degli Studi di Siena, A.A. 2015-2016 (Relatore: Prof. M. Salleolini), 135 pp.

MAIMONE M., HARLEY B., FITZGERALD R., MOE H., HOSSAIN R. & HEYWOOD B. (2004) - *Coastal aquifer planning elements*. In: Cheng A.H.D., Ouazar D. (Ed.) "Coastal Aquifer Management: monitoring, modeling, and case studies", Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 1-27.