

falda su scala regionale, o di bacino, influenza profondamente anche il comportamento idraulico della singola opera di captazione, o del loro insieme.

Il pompaggio di acqua dolce attuato mediante pozzi comporta il sollevamento delle acque marine a causa delle depressioni idrodinamiche generate dal pompaggio stesso, con la formazione di un cono di intrusione di acqua di mare nella falda di acqua dolce, fenomeno in genere denominato brevemente *salt-water upconing*, presentato nei capitoli 2 e 5. La descrizione fisico – matematica del fenomeno risulta complessa, in quanto concerne l'accoppiamento di un problema di filtrazione di fluidi a densità variabile con un problema di trasporto della massa di sale. Tuttavia, in alcuni casi, al fine di trarre gli elementi di base necessari per una corretta progettazione, realizzazione e gestione delle opere di captazione, il fenomeno può essere semplificato introducendo l'ipotesi dell'esistenza di una interfaccia acqua dolce – acqua di mare netta in una regione di acquifero poroso omogeneo ed isotropo, da cui sono scaturiti nel tempo metodi di calcolo semplificati, come già discusso nel paragrafo 2.3. A seguito di tale ipotesi si deduce che l'entità del sollevamento del cono di intrusione marina è funzione della penetrazione del pozzo in falda, della portata estratta, della durata dell'emungimento e delle caratteristiche idrogeologiche locali dell'acquifero. L'incremento dell'emungimento può determinare l'instabilità del cono, con la conseguente irruzione dell'acqua di mare nel pozzo.

Per la tutela della risorsa si deve comunque tenere presente che, in generale, in condizioni di uso sostenibile della risorsa idrica a scala regionale, il *salt-water upconing* è reversibile, talché, dopo l'interruzione del pompaggio, la salinità dell'acqua tende a ridursi (STAKELBEEK, 1988; ESCA & VENTURINI, 2006). Ciò è confermato nella nostra regione dall'analisi dei dati storici, ad esempio relativi a pozzi potabili (cap. 20).

Il passaggio dall'acqua di falda alla sottostante acqua di mare non è mai netto ed è ormai nota l'esistenza di una zona di transizione e di una stratificazione salina delle acque di falda, con un incremento graduale della salinità dell'acqua estratta in fase di emungimento. Per elevati regimi di emungimento, i gradienti di pressione determinano una

12. - CRITERI DI PROGETTAZIONE E CONDIZIONI DI ESERCIZIO DELLE OPERE DI CAPTAZIONE DAGLI ACQUIFERI INTERESSATI DALL'INTRUSIONE MARINA

12.1. - PREMESSA

L'estrazione di acqua dolce da una falda avente alla base acqua di mare di intrusione continentale è un'operazione che richiede specifici criteri di progettazione e gestione. La presenza di acqua di mare alla base della falda di acqua dolce, oltre che costituire un fenomeno condizionante il flusso della

filtrazione anche nella porzione di acquifero occupata dalla zona di transizione e dalla sottostante acqua di mare (ALIEWI & MACKAY, 1999).

Le dinamiche del *salt-water upconing*, dovrebbero quindi, a rigore, essere interpretate con modelli fisico-matematici basati sulla teoria della dispersione idrodinamica (BEAR, 1979), ossia valutando anche gli spostamenti delle particelle di sale connessi ai vettori di velocità di filtrazione effettiva (dispersione meccanica) e ai gradienti di concentrazione (diffusione molecolare, in genere trascurabile). Seguendo tale approccio è infatti possibile simulare, con analisi numeriche, l'evoluzione della zona di transizione in corso di emungimento, venendo così a determinare l'effettiva salinità dell'acqua estratta e la sua variazione nel tempo (cap. 5).

La corretta progettazione e gestione di un pozzo deve dunque partire dal suo dimensionamento, ossia dalla determinazione del suo diametro, della penetrazione in falda, della posizione e dello spessore del tratto drenante, della portata di esercizio, svolto sulla base della modellazione di cui sopra, dunque in funzione delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero.

Ferma restando la necessità di definire su scala regionale la portata di esercizio dei pozzi nell'ambito di un piano di gestione della risorsa idrica sotterranea, in questo paragrafo l'attenzione è rivolta specificamente agli aspetti locali che incidono sul *salt-water upconing* durante l'estrazione da pozzi.

La trattazione sarà di seguito sviluppata partendo da un'analisi dei dati costruttivi e idrochimici resisi disponibili per 930 pozzi ubicati nella regione pugliese, i cui risultati costituiscono la base per analisi di dettaglio svolte con riferimento alle singole aree idrogeologiche in cui è stato suddiviso il territorio regionale (capp. 13÷18). A seguire saranno illustrati i risultati ottenuti da simulazioni numeriche effettuate con il codice di calcolo agli elementi finiti SUTRA 2D3D.1 applicato a pozzi realmente esistenti, e quelli invece ottenibili, per gli stessi pozzi, con metodi di calcolo semplificati. Infine si esaminerà, attraverso simulazioni numeriche, l'utilità del cosiddetto "pozzo orizzontale", riscontrato spesso assai vantaggioso nella realtà pugliese, come mostrato con riferimento all'impianto di proprietà dell'Acquedotto Pugliese in località Trepuzzi. A tal

riguardo va ricordato che diversi sono stati in Puglia i tentativi di captare le acque sotterranee con cunicoli orizzontali, tutti risultati positivi, come dimostrano i pozzi di Veglie, Mesagne e dello storico Pozzo Guardati, oggi non più in funzione, che attingeva alla falda presente nell'acquifero miocenico della città di Lecce (par. 18.4).

12.2. - ANALISI DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE DI FALDA PRELEVATE DA POZZI ESISTENTI, IN RELAZIONE ALLE CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE, COSTRUTTIVE E DI ESERCIZIO

Nell'ambito della presente ricerca è stato possibile eseguire un'analisi della qualità delle acque di falda prelevate in 930 pozzi, variamente dislocati nella regione, penetranti negli acquiferi carbonatici fratturati in cui ha sede la falda profonda. L'analisi è stata focalizzata su quei pozzi per i quali è stato possibile reperire sia risultati di determinazioni chimiche di laboratorio, sia informazioni sulle caratteristiche costruttive e di esercizio dell'opera di captazione.

Lo studio è stato volto a relazionare la qualità delle acque estratte ai parametri condizionanti il *salt-water upconing*, quali il coefficiente di permeabilità dell'acquifero, la penetrazione del pozzo in falda, il carico piezometrico, lo spessore della lente di acqua dolce, lo spessore, la forma e la posizione della zona di transizione, la portata di esercizio del pozzo e la durata dell'emungimento.

In molti casi non è stato possibile definire la natura freatica o confinata dell'acquifero, in quanto non per tutti i pozzi è nota l'effettiva quota di rinvenimento della falda. In ogni caso va tenuto presente che detta grandezza è di univoca definizione solo nel caso di acquifero freatico, ove la superficie di falda rappresenta anche il limite superiore della zona satura dell'acquifero. In tal caso, definiti (fig. 12.1a):

L [m] = profondità della base del pozzo misurata partendo dalla superficie di falda,

H [m] = profondità dell'interfaccia misurata rispetto alla superficie di falda, pari allo spessore della falda di acqua dolce,

si definisce la percentuale di penetrazione del pozzo in falda P :

$$P [\%] = 100 L/H. \quad (12.1)$$

Nel caso di falda confinata la superficie piezometrica relativa al tetto dell'acquifero è posta ad una quota superiore allo stesso (fig. 12.1b), per cui, a rigore, è possibile definire due percentuali di penetrazione, una riferita al tetto dell'acquifero (P') e l'altra alla detta superficie piezometrica (P''). In tal caso, definiti:

L' [m] = profondità della base del pozzo misurata rispetto al tetto dell'acquifero, ossia al letto della copertura impermeabile,

H' [m] = profondità dell'interfaccia misurata rispetto al tetto dell'acquifero, pari allo spessore della falda di acqua dolce,

L'' [m] = profondità della base del pozzo misurata rispetto alla superficie piezometrica al tetto dell'acquifero ($L'' > L'$);

H'' [m] = profondità dell'interfaccia misurata rispetto alla superficie piezometrica al tetto dell'acquifero ($H'' > H'$);

si ha:

$$P' [\%] = 100 L'/H' \quad (12.2)$$

$$P'' [\%] = 100 L''/H'' \quad (12.3)$$

Pur essendo la percentuale definita dall'equazione 12.2 quella effettivamente rappresentativa della penetrazione in falda del pozzo, nel seguito, per falde

confinata, ci si riferirà alla percentuale di penetrazione definita dall'equazione 12.3. In ogni caso, per i pozzi per i quali era nota la quota del tetto impermeabile dell'acquifero, è stato verificato che la differenza tra P' e P'' è in genere da ritenersi trascurabile se il fine dell'analisi è quello di fornire valutazioni di carattere regionale, quali quelle che seguono nel presente capitolo. Nel seguito, sia per acquiferi confinati che per acquiferi freatici, la percentuale di penetrazione sarà sempre indicata con P .

La profondità dell'interfaccia adottata nel calcolo della percentuale di penetrazione del pozzo in falda è stata desunta sulla base della relazione di Ghyben–Herzberg, a rigore valida solo per condizioni di quiete o di filtrazione orizzontale. Invero, tale relazione perde di validità soprattutto presso la costa, o in corrispondenza di opere di captazione, ove il moto di filtrazione non può ritenersi orizzontale (capp. 2 e 5). Nelle analisi a scala regionale l'adozione di ipotesi semplificative ha implicato l'assunzione:

$$h \text{ [m]} = 38 t \quad (12.4)$$

dove h e t sono, rispettivamente, la profondità dell'interfaccia ed il carico piezometrico della falda assunto in condizioni idrostatiche, entrambi riferiti al livello mare. Detta ipotesi corrisponde ad assumere, secondo la relazione di Ghyben – Herzberg:

$$\gamma = \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} = 38, \quad (12.5)$$

dove ρ_d [kg/m³] e ρ_s [kg/m³] sono rispettivamente le densità dell'acqua dolce di falda e dell'acqua di mare. L'errore insito nell'approssimazione adottata può essere valutato se si osserva che il valore assunto dal rapporto indicato nell'equazione 12.5 è sensibilmente superiore a quello desumibile nel caso in cui si consideri una densità dell'acqua dolce pari a 1.000 kg/m³ ed una densità dell'acqua di mare pari a quelle dell'Adriatico (1.029,9 kg/m³) o dello Ionio (1030,7 kg/m³), cui corrispondono valori di γ pari a circa 32÷33. Nelle analisi che seguono si è quindi assunto uno spessore della falda superiore a quello desumibile dalla relazione di Ghyben – Herzberg, e ciò al fine di tener conto di quanto nella nostra regione è stato possibile osservare con i cosiddetti “pozzi spia”. Le indagini con-

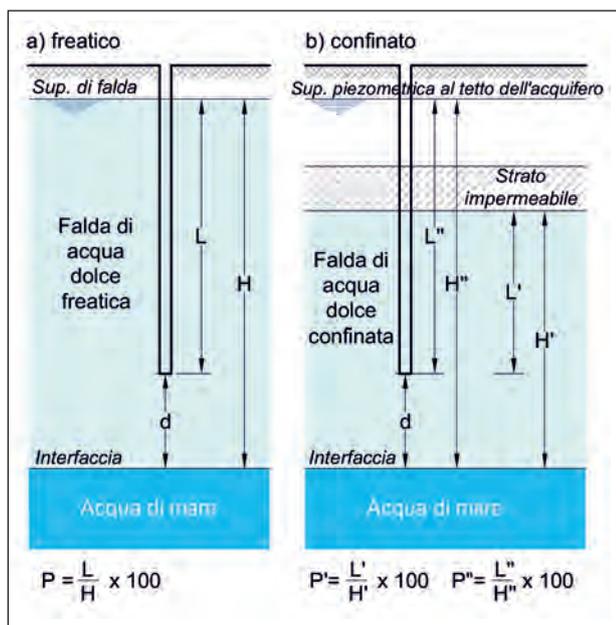


Fig. 12.1 – Definizione della percentuale di penetrazione (P) di un pozzo in falda: a) acquifero freatico; b) acquifero confinato.

– Groundwater penetration percentage (P) of a well in: a) unconfined aquifer; b) confined aquifer.

dotte alla fine degli anni '60 in alcuni "pozzi spia" variamente distribuiti nel territorio regionale, hanno infatti fornito una profondità dell'interfaccia \bar{h} nell'intervallo 37÷54 t, nell'ipotesi che essa coincida con il tetto della zona di transizione, e 42÷82 t nell'ipotesi che essa coincida con il letto della zona di transizione (COTECCHIA, 1977). Le valutazioni che seguono, eseguite assumendo \bar{h} pari a 38t, si riferiscono dunque, sulla base di dette indagini, ad una posizione dell'interfaccia teorica prossima al tetto della zona di transizione.

La difficoltà nell'adottare modelli interpretativi dell'esercizio delle opere di captazione più sofisticati è, nel caso dei 930 pozzi esistenti qui presi in considerazione, connessa alla mancanza di dati sulle condizioni di impiego della falda in prossimità del pozzo e sulle condizioni idrogeologiche locali dell'acquifero. Queste ultime non vanno definite, infatti, sulla base della sola conoscenza del coefficiente di permeabilità dell'acquifero, ad esempio desunto dalla prova di portata del pozzo. L'osservazione, ad esempio, dell'estrazione di acque con concentrazione salina elevata in pozzi di ridotta penetrazione in falda e portata di emungimento e depressione modesta, suggerisce quanto possa essere incidente il contesto idrogeologico che, in tali casi, ha evidentemente comportato la presenza di acque di elevata concentrazione salina già nelle porzioni più superficiali della falda. Ciò può essere dovuto anche alla presenza di pozzi vicini a quello in analisi, non correttamente progettati e/o gestiti, responsabili del sollevamento della zona di transizione (fig. 12.2), oppure a particolari condizioni idrogeologiche locali tali da determinare una stratificazione salina della falda caratterizzata da elevati valori di salinità già a piccole profondità. Al contempo, condizioni idrogeologiche locali fortunate ostacolanti l'ingresso nel pozzo dell'acqua di mare, possono, viceversa, permettere l'uso di pozzi mal progettati nei confronti del *salt-water upconing* senza che estraggano acque eccessivamente salate; ciò può succedere, ad esempio, ove esistano strati impermeabili sotto la base del pozzo, costituiti da roccia compatta o livelli di terre rosse di significativo spessore ed estensione (fig. 12.3).

Quanto sin qui illustrato evidenzia dunque l'impossibilità di definire a priori e senza specifiche in-

dagini quali debbano essere le caratteristiche costruttive di un pozzo finalizzate a garantirne la corretta funzionalità. Non vanno quindi deliberati arbitrari limiti normativi sulla penetrazione del pozzo in falda, sulla depressione della falda sotto emungimento e sulla concentrazione dello ione cloruro dell'acqua estratta, che non considerino i legami che coesistono tra tali grandezze e come questi si modificano al variare delle condizioni idrogeologiche sia locali sia regionali. Tale valutazione, oltre che giustificata su base teorica, emerge dall'analisi dei dati riferiti ai 930 pozzi esistenti illustrati nel seguito.

Considerando, ad esempio, le sole due variabili rappresentate dalla percentuale di penetrazione del pozzo in falda P e dalla concentrazione dello ione cloruro Cl^- , è stato possibile osservare il prelievo di acque con Cl^- maggiore di 0,1 g/l, quindi sicuramente contaminate dal mare (par. 2.3; CIVITA, 2005), per pozzi presentanti sia percentuale di penetrazione bassa sia elevata. Sulla base di detta osservazione i pozzi presi in esame sono stati suddivisi in 6 classi: - 1^a classe: $P < 40\%$ e $Cl^- < 0.1$ g/l, che include i casi in cui è stata adottata, in generale, un corretta percentuale di penetrazione del pozzo in falda, cui corrisponde una buona qualità dell'acqua estratta;

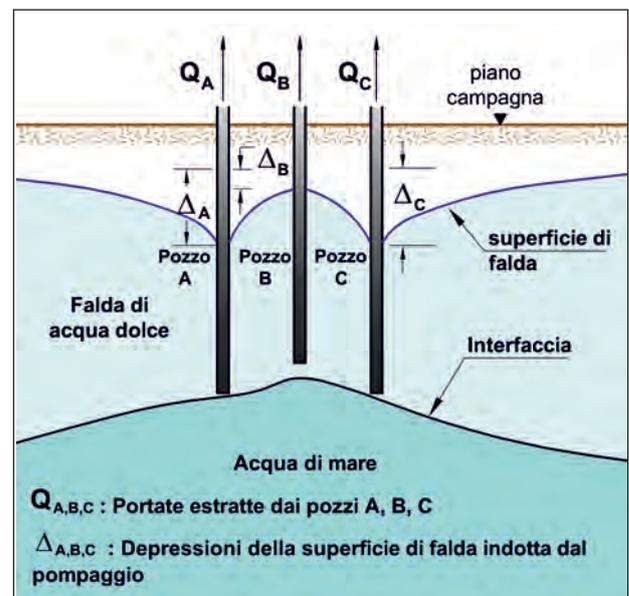


Fig. 12.2 - Sollevamento del cono di intrusione marina in prossimità di un pozzo in emungimento (pozzo B), influenzato dalla presenza di opere di captazione mal progettate in sua prossimità (pozzi A e C).

- Rising of salt-water upconing near a pumping well (well B), affected by the presence of badly designed nearby wells (A and C).

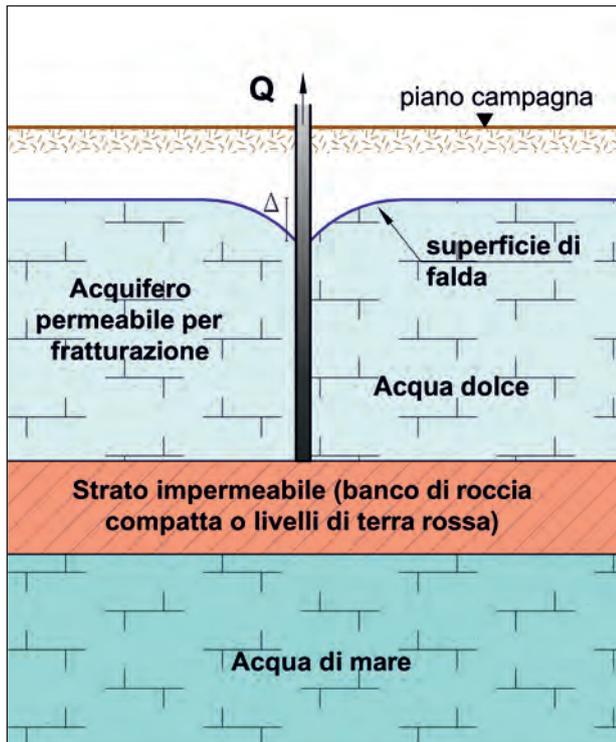


Fig. 12.3 – Strato impermeabile che ostacola l'ingresso dell'acqua di mare nel pozzo (mod., da COTECCHIA, 1955).

– *Impermeable layer hampering seawater ingress into the well (modified after COTECCHIA, 1955).*

- 2^a classe: $P > 40\%$ e $Cl^- < 0.1 \text{ g/l}$, relativa ai casi in cui è stata adottata un'eccessiva percentuale di penetrazione del pozzo in falda, cui tuttavia risulta associata una buona qualità dell'acqua estratta. Ciò è in generale dovuto a condizioni idrogeologiche favorevoli, secondo quanto dianzi illustrato (es. in fig. 12.3). A detta classe appartengono anche i pozzi per i quali il campionamento dinamico utilizzato per la determinazione della concentrazione dello ione cloruro è stato eseguito a breve distanza temporale dall'inizio del pompaggio, come anche i casi in cui la portata estratta è modesta in relazione alla permeabilità del mezzo;

- 3^a classe: $P < 40\%$ e $0.1 < Cl^- < 1 \text{ g/l}$, che include i casi in cui la concentrazione dello ione cloruro è significativamente elevata, pur essendo la percentuale di penetrazione del pozzo in falda ridotta; detta condizione è spesso rilevata presso la costa, dove le acque di falda presentano elevata salinità già nelle porzioni superiori della falda ed in assenza di emungimento, a causa degli effetti della dispersione idrodinamica;

- 4^a classe: $P > 40\%$ e $0.1 < Cl^- < 1 \text{ g/l}$, relativa ai

casi in cui sia la percentuale di penetrazione in falda sia la concentrazione di ione cloruro sono abbastanza elevate, nella maggior parte dei casi a seguito del *salt-water upconing*;

- 5^a classe: $P < 40\%$ e $Cl^- > 1 \text{ g/l}$, che configura i casi in cui la concentrazione dello ione cloruro è molto alta, pur essendo la percentuale di penetrazione del pozzo in falda abbastanza ridotta; detti pozzi sono quelli di solito ubicati in porzioni di acquifero ove la falda di acque dolci presenta elevata concentrazione salina anche in assenza di emungimento, come succede in prossimità della costa in corrispondenza di peculiarità idrogeologiche (es. elevata profondità di rinvenimento dell'acquifero), o in zone caratterizzate da un generale sovrasfruttamento della risorsa idrica sotterranea;

- 6^a classe: $P > 40\%$ e $Cl^- > 1 \text{ g/l}$, che rappresenta i casi in cui sia la percentuale di penetrazione sia la concentrazione di ione cloruro sono molto elevate.

La numerosità delle classi individuate riflette il possibile accoppiamento di più fattori nel determinare la concentrazione dello ione cloruro nell'acqua estratta, sia di carattere idrogeologico locale, sia propri della modalità di gestione del pozzo (portata estratta e depressione dinamica), come d'altronde già evidenziato nella letteratura scientifica sin dagli anni '50 (COTECCHIA, 1955; 1958; COTECCHIA *et alii*, 1957; ORABONA & COTECCHIA, 1959; COTECCHIA, 1963). Ciononostante, tali evidenze scientifiche e i conseguenti indirizzi metodologici di gestione sono valsi ben poco nelle applicazioni di gestione attuate per gli acquiferi regionali!

Nell'analisi dei dati è stato possibile riscontrare solo in pochi casi delle correlazioni dirette tra la sola salinità dell'acqua emunta e la percentuale di penetrazione del pozzo in falda, come illustrato nei successivi capitoli 13÷18, con riferimento a ciascuna specifica area idrogeologica. Solo la normalizzazione dei dati rispetto ai caratteri idrogeologici permette, infatti, di riconoscere delle corrispondenze tra la percentuale di penetrazione del pozzo in falda e la salinità acqua emunta.

Sulla base di queste prime analisi si è proceduto a rappresentare la distribuzione di frequenza della concentrazione dello ione cloruro (fig. 12.4) e l'andamento della concentrazione dello ione cloruro in funzione della distanza d (fig. 12.1) della base del

pozzo dall'interfaccia teorica (fig. 12.5). Analizzando nell'insieme i risultati ottenuti da dette rappresentazioni, è stato possibile individuare, tranne che per alcuni casi ricadenti nel 10 % circa dei 930 pozzi esaminati, i seguenti 5 gruppi di pozzi in funzione della concentrazione dello ione cloruro, ad ognuno dei quali è corrisposto un intervallo di variazione della distanza d :

- Gruppo 1: $\text{Cl}^- = 0 - 40 \text{ mg/l} \rightarrow d > 100 \text{ m}$
- Gruppo 2: $\text{Cl}^- = 40 - 100 \text{ mg/l} \rightarrow 40 \text{ m} < d < 1000 \text{ m}$
- Gruppo 3: $\text{Cl}^- = 100 - 400 \text{ mg/l} \rightarrow 30 \text{ m} < d < 300 \text{ m}$;
- Gruppo 4: $\text{Cl}^- = 400 - 1000 \text{ mg/l} \rightarrow 20 \text{ m} < d < 300 \text{ m}$,
- Gruppo 5: $\text{Cl}^- > 1000 \text{ mg/l} \rightarrow d < 200 \text{ m}$.

La possibilità di associare a ciascuno dei sopraindicati intervalli di variazione della concentrazione dello ione cloruro un intervallo di variazione della distanza d della base del pozzo dalla interfaccia teorica, evidenzia come quest'ultima sia ben rappresentativa delle condizioni di rischio rispetto al *salt-water upconing*. Se si considera ad esempio un pozzo con percentuale di penetrazione pari al 90%,

penetrante in un acquifero dove la lente di acqua dolce presenta uno spessore di 1000 metri, avremo una distanza della base del pozzo dall'interfaccia pari a 100 metri, mentre nel caso di falda di acqua dolce spessa 100 metri, assumendo sempre una percentuale di penetrazione pari a 90%, detta distanza si riduce ad appena 10 metri. È chiaro che il secondo dei pozzi citati presenta delle condizioni di rischio di risalita del cono di intrusione marina maggiori del primo, e ciò a parità di percentuale di penetrazione. Infatti, nel caso di acquifero omogeneo ed isotropo si ha che, a parità di coefficiente di permeabilità, la portata critica oltre la quale si ha l'instabilità del cono di intrusione marina, dipende dallo spessore iniziale della falda, oltre che dalla percentuale di penetrazione del pozzo in falda (REILLY *et alii*, 1987).

I 5 gruppi di pozzi prima descritti sono stati rappresentati in tavola 5 (allegata al volume), ove è stata indicato, per ciascun pozzo, anche l'intervallo di percentuale di penetrazione. Dall'analisi di detta tavola è evidente che ad ogni gruppo di pozzi corrisponde uno specifico contesto idrogeologico regionale, ed in particolare:

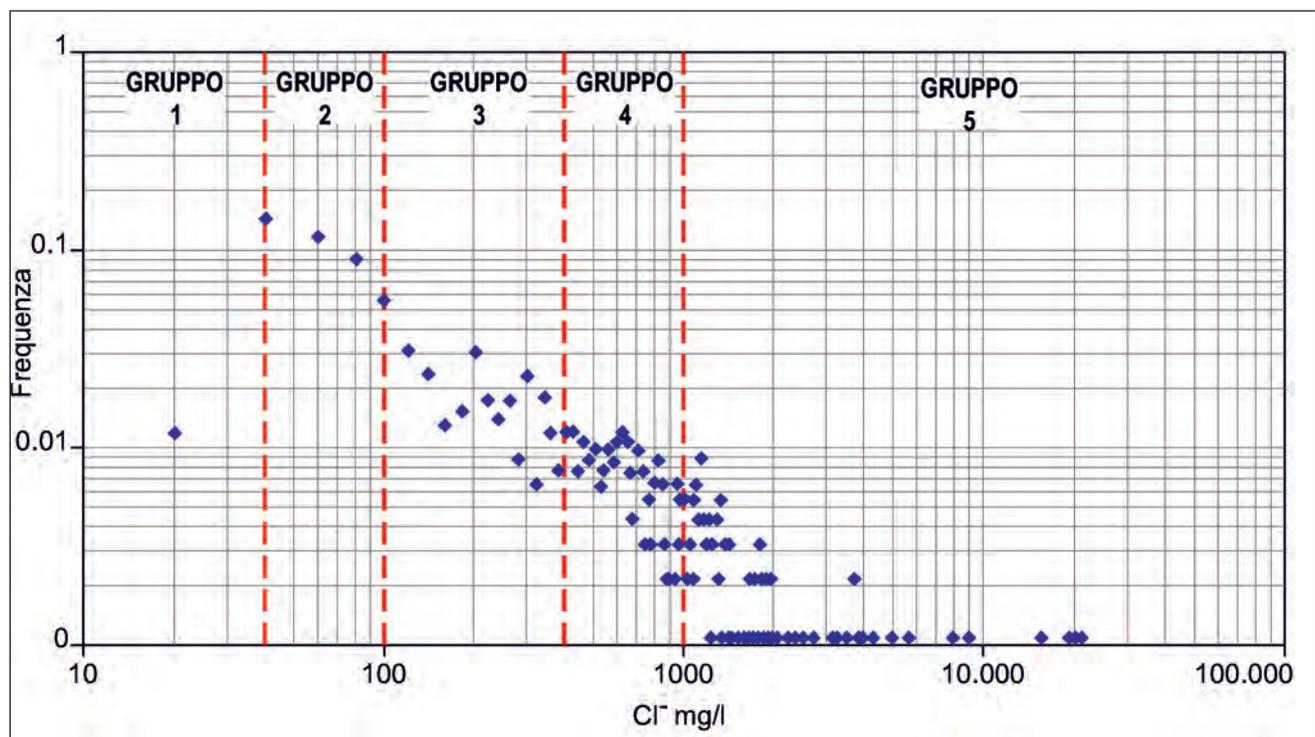


Fig. 12.4 – Distribuzione di frequenza della concentrazione dello ione cloruro in acque campionate da 930 pozzi penetranti nell'acquifero carbonatico profondo.
– Frequency distribution of chloride ion concentration in waters sampled from 930 wells penetrating the deep carbonate aquifer.

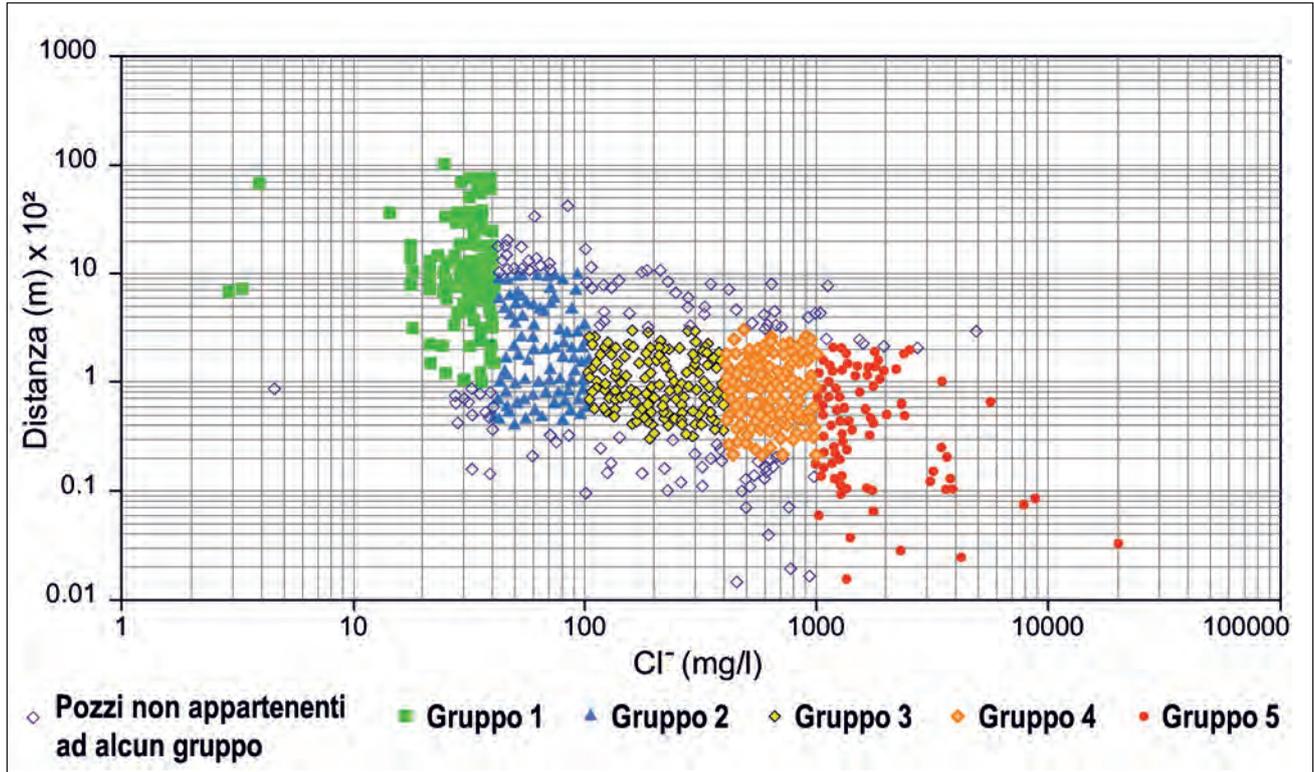


Fig. 12.5 – Suddivisione dei pozzi in gruppi in funzione della distanza della base del pozzo dall'interfaccia teorica e della concentrazione di ione cloruro.
– Subdivision of wells in function of the distance of the well bottom from the theoretical interface and of the chloride ion concentration.

Il gruppo 1 ($Cl^- = 0 \div 40$ mg/l; $d > 100$ m) è diffuso nella Media ed Alta Murgia e nel Gargano centrale, con casi sporadici in altre zone. I pozzi appartenenti a detto gruppo prelevano in genere acqua dolce di falda caratterizzata da una *facies* chimica bicarbonato-calcica, circostanza garantita dagli alti carichi piezometrici che determinano notevoli spessori della falda; questi infatti comportano elevati valori di d . Va tuttavia evidenziato che nell'Alta Murgia e nelle porzioni centrali del Gargano non è mai nota, secondo i dati conoscitivi disponibili, l'esistenza di acqua di mare alla base della falda di acqua dolce, anche se la sua presenza è molto probabile (capp. 13 e 15);

Il gruppo 2 ($Cl^- = 40 \div 100$ mg/l, 40 m $< d < 1000$ m) è frequente nella Media Murgia e nella zona centrale del Salento. Include pozzi che prelevano acque sotterranee definibili di buona qualità, tuttavia interessate in modesta misura dal fenomeno dell'intrusione marina; in genere i carichi piezometrici sono elevati, se pur significativamente minori di quelli delle zone centrali del Gargano e dell'Alta Murgia (gruppo 1), e garantiscono la no-

tevole profondità dell'interfaccia. In tale gruppo ricadono anche i casi di pozzi con percentuali di penetrazione elevate, dell'ordine anche del 70%, la cui buona qualità dell'acqua è molto probabilmente garantita da livelli impermeabili sotto la base del pozzo, che inibiscono il *salt-water upconing*. Anche per questo gruppo la *facies* chimica è in genere di tipo bicarbonato-calcica.

Il gruppo 3 ($Cl^- = 100 \div 400$ mg/l; 30 m $< d < 300$ m) include pozzi da cui è estratta acqua di qualità discreta, anche se influenzata dall'acqua di mare, in alcuni casi a causa del ridotto valore della distanza d e di una notevole percentuale di penetrazione, benché inferiore al 70%. In altri casi, l'elevata concentrazione dello ione cloruro è dovuta a particolari condizioni idrogeologiche locali sfavorevoli, quali quelle proprie di acquiferi prossimi alla linea di costa, di elevata concentrazione salina anche in assenza di emungimenti. Questo gruppo, che è presente nelle zone costiere di tutti gli acquiferi regionali cretacicci, è però maggiormente frequente nel Salento.

Il gruppo 4 ($Cl^- = 400 \div 1000$ mg/l; 20 m $< d <$

300 m) comprende i pozzi che presentano elevata percentuale di penetrazione in falda, anche superiore al 70%. La presenza dell'acqua di mare alla base condiziona profondamente le caratteristiche chimiche delle acque di falda estratte, che sono da ritenersi salmastre. Anche questi pozzi ricadono nelle porzioni costiere di tutti gli acquiferi regionali cretatici;

Il gruppo 5 ($Cl^- > 1000$ mg/l; $d < 200$ m) comprende i pozzi che prelevano acque salate. Si tratta anche in questo caso di pozzi costieri, con elevate penetrazioni o pozzi penetrati in porzioni d'acquifero totalmente invasi dall'acqua di mare.

Va sottolineato però che, come reso evidente da analisi particolareggiate che verranno esposte nei capitoli 13÷18, anche lì dove si siano riscontrati valori di salinità molto bassi, ad esempio con valore di concentrazione dello ione cloruro inferiore a 100 mg/l, il fenomeno d'intrusione marina non può essere trascurato. Da qui la necessità di monitorare anche quelle porzioni di territorio che appaiono sede di condizioni idrogeologiche favorevoli all'estrazione di acque sotterranee idonee alla maggior parte degli usi, persino a quello potabile.

L'analisi sin qui esposta conferma l'inopportunità di definire valori limite della percentuale di penetrazione in falda dalle opere di captazione e della concentrazione dello ione cloruro delle acque estratte di validità generale per l'intero territorio regionale. Le deliberazioni normative volte alla prevenzione dovrebbero infatti imporre analisi particolareggiate, specifiche per ciascuna area idrogeologica ed, in alcuni casi, anche per zone limitate all'interno di dette aree. Tali analisi dovrebbero essere coadiuvate da un monitoraggio che consenta di valutare l'evoluzione temporale dei parametri caratterizzanti il chimismo della falda, in funzione del quale adeguare le prescrizioni costruttive e/o di esercizio dei pozzi (capp. 11, 27, 30), i quali dovrebbero comunque essere oggetto di dimensionamento secondo i criteri che saranno di seguito illustrati.

12.3. - CRITERI DI PROGETTAZIONE E GESTIONE DEI POZZI PENETRANTI IN ACQUIFERI COSTIERI

L'analisi di un elevato numero di pozzi presenti sul territorio regionale che estraggono dalla falda

profonda contenuta negli acquiferi carbonatici, ha evidenziato che la progettazione della maggior parte dei pozzi è stata fino ad oggi eseguita senza tener conto dei rischi connessi alla formazione del cono di intrusione marina. Infatti, detta progettazione, nella nostra regione, è in genere un'attività svolta dal "perforatore", che stabilisce la profondità del pozzo e la relativa portata in funzione esclusivamente delle caratteristiche di permeabilità locali del mezzo nel quale si ritrova e sulla base degli aspetti economici dell'operazione che si appresta a compiere. In sostanza il perforatore tende ad incrementare la penetrazione del pozzo lì dove l'acquifero presenta bassa permeabilità, oppure ove la falda risulta confinata a notevole profondità. È evidente invece la necessità di procedere al dimensionamento dei pozzi ed alla loro gestione, secondo criteri idraulici rispondenti ai risultati degli studi del *salt-water upconing*.

12.3.1. - *Applicazione della teoria della dispersione idrodinamica nell'analisi del fenomeno di formazione del cono di intrusione marina durante l'emungimento*

I modelli di calcolo che contemplano il fenomeno della dispersione idrodinamica consentono di simulare il flusso di una falda che contiene una certa massa di sale all'interno della zona satura di un mezzo poroso o poroso equivalente, considerando le dinamiche di trasporto del sale (cap. 5). Lo spostamento del sale può avvenire a causa delle variazioni del vettore velocità di filtrazione (dispersione meccanica), a loro volta funzione della tortuosità dei percorsi dei filetti idrici, o per l'instaurarsi di gradienti di concentrazione determinanti il trasporto del soluto tra linee di flusso adiacenti (diffusione molecolare). Tali modelli, ove implementati in analisi numeriche, permettono dunque lo studio del *salt-water upconing*, in presenza di stratificazione salina, tipica della falda profonda pugliese, rendendo possibile la simulazione dell'evoluzione della zona di transizione durante l'emungimento e la determinazione della salinità dell'acqua estratta nel tempo.

Nell'ambito del presente lavoro sono state condotte simulazioni numeriche del funzionamento di alcuni pozzi variamente distribuiti sul territorio,

allo scopo di fornire elementi di possibile riferimento nella definizione di criteri progettuali per i pozzi nella regione, quali ad esempio la profondità del pozzo e la portata di progetto, tali da garantire sufficiente sicurezza nei confronti del *salt-water upconing*. Il codice di calcolo agli elementi finiti adottato è il SUTRA 2D3D.1, per la cui illustrazione si rimanda alla letteratura (VOSS, 1984, 1999; VOSS & PROVOST, 2003).

Nel seguito, prima di illustrare i risultati ottenuti, si riporta la definizione del modello di calcolo adottato, con la descrizione delle condizioni iniziali e al contorno, ed una serie di raccomandazioni utili ad una appropriata modellazione nei contesti indagati.

12.3.1.1. - Analisi agli elementi finiti: definizione del modello e delle condizioni iniziali e al contorno

Nell'ipotesi di considerare il mezzo permeabile come poroso equivalente, omogeneo ed isotropo, la distribuzione della concentrazione salina nella falda nell'intorno di un pozzo in regime di emungimento, presenta una simmetria radiale, per cui è sufficiente svolgere l'analisi in un piano diametrale del cilindro di asse coincidente con l'asse del pozzo (fig. 12.6). Si definisce in tale contesto raggio di influenza la distanza radiale dal pozzo, R , a partire dalla quale gli effetti dell'emungimento possono ritenersi trascurabili. Il problema piano vede lo spessore del modello assumere valore $2\pi r$, dove r è la distanza dall'asse del pozzo. (REILLY & GOODMAN, 1987; VOSS & PROVOST, 2003). Ciò vale anche quando l'introduzione di anisotropie non comporti la perdita di simmetria radiale del problema, come succede ad esempio nel caso frequente di coefficiente di permeabilità orizzontale k_h differente da quello verticale k_v . Il piano diametrale considerato nelle analisi è stato quindi discretizzato, adottando un livello di infittimento della *mesh* tale da rappresentare adeguatamente la variabilità dei parametri del sistema e garantire la stabilità del metodo numerico; esso è stato determinato per successivi tentativi, rispettando il numero di Peclet della *mesh* (VOSS & PROVOST, 2003).

Nella definizione della distribuzione di pressione

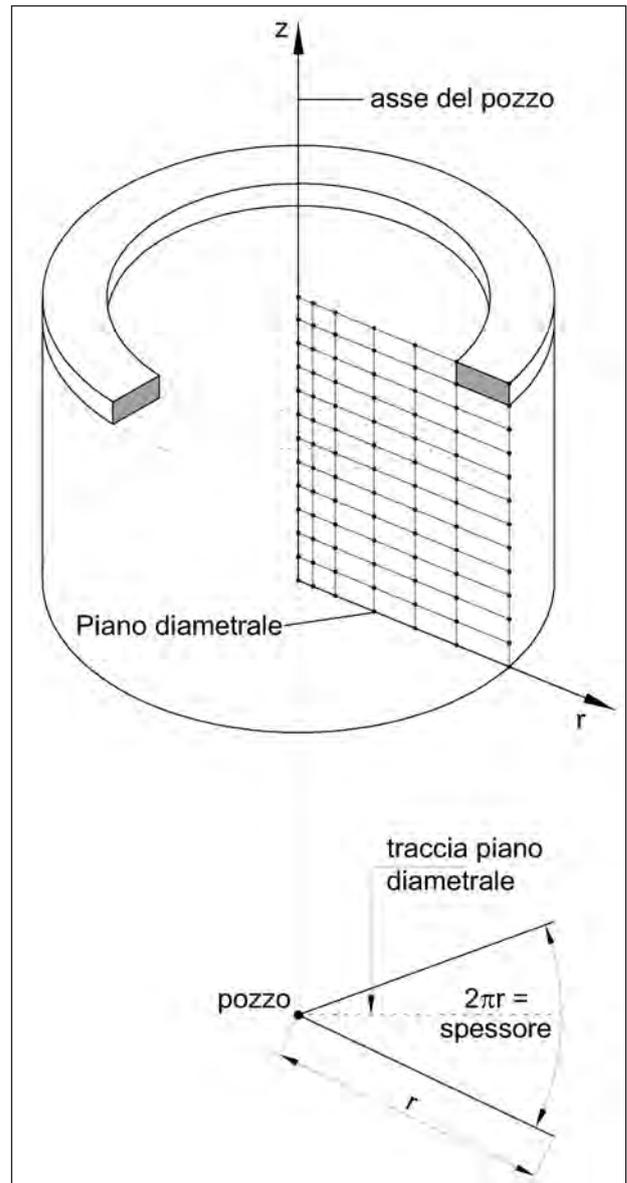


Fig. 12.6 – Sistema di riferimento per lo studio del *salt-water upconing*.
– Reference system for study *salt-water upconing*.

iniziale è stata adottata l'ipotesi idrostatica, dunque di altezza piezometrica costante. È stato inoltre assunto, per semplicità, che la densità dell'acqua dolce e dell'acqua di mare siano costanti e pari rispettivamente a 1.000 g/l e 1029,4 g/l, e che la zona di transizione sia caratterizzata da un incremento lineare con la profondità della concentrazione salina. Detta ipotesi comporta un andamento iniziale lineare della pressione nella falda di acqua dolce e nell'acqua di mare, ed un andamento parabolico nella zona di transizione. Infine si è assunta l'ipotesi di falda confinata, con pressione

interstiziale nulla al tetto dell'acquifero nelle condizioni iniziali. Dette z_0 e z_1 , rispettivamente le quote del letto e del tetto della zona di transizione, e z_2 la quota del tetto dell'acquifero (fig. 12.7), si ha quindi:

$$\text{per } z \geq z_1, p(z) = (z_2 - z)\rho_d g \quad (12.6)$$

dove ρ_d è la densità della falda di acqua dolce e g è l'accelerazione di gravità;

$$\text{per } z_0 \leq z < z_1, p(z) = p(z_1) + g \int_{z_1}^z \rho(z) dz \quad (12.7)$$

dove $\rho(z)$ è il valore della densità alla generica quota z della zona di transizione, funzione della stratificazione salina presente;

$$\text{per } z < z_0, p(z) = p(z_0) + \rho_s g(z_0 - z) \quad (12.8)$$

dove ρ_s è la densità dell'acqua di mare.

Va osservato che la densità dell'acqua nell'ambito della zona di transizione può essere determinata, con buona approssimazione, secondo la relazione (VOSS & PROVOST, 2003; cap. 5):

$$\text{dove: } \rho(c) = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial c} (c - c_0) \quad (12.9)$$

c_0 [kg/kg] = concentrazione salina iniziale della falda, qui assunta pari a zero;

ρ_0 [kg/m³] = valore iniziale della densità della falda corrispondente al valore c_0 della concentrazione salina, in questo caso pari a 1.000 g/l;

c [kg/kg] = concentrazione salina in corrispondenza della quale si vuole determinare il valore della densità;

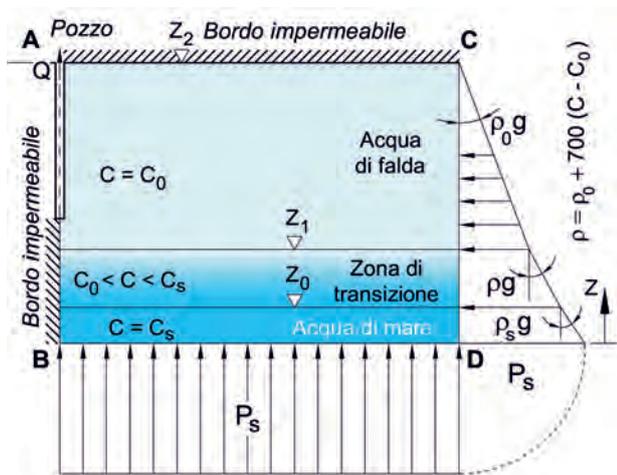


Fig. 12.7 – Condizioni iniziali e al contorno adottate per l'analisi del salt water upconing con il codice di calcolo numerico Sutra 2D3D.1.
 – Initial and boundary conditions adopted for the analysis of salt-water upconing with Sutra 2D3D.1 code.

$$\frac{\partial \rho}{\partial c} \text{ [kg/m}^3\text{]} = \text{variazione della densità della fase}$$

liquida corrispondente ad una variazione unitaria di concentrazione di sale, che, nel caso di miscelamento tra acqua dolce di falda ed acqua di mare, si può assumere pari a 700 kg/m³.

Nell'ambito delle condizioni iniziali e al contorno, è inoltre necessario predisporre la posizione della zona di transizione. Si è dunque assunto che l'isosalina appartenente alla zona di transizione cui corrisponde un valore di salinità pari al 50% di quella dell'acqua di mare, sia disposta ad una profondità pari a 40*t*, dove *t* è il carico piezometrico della falda misurato rispetto al livello del mare. Detta assunzione corrisponde ad assumere che detta isosalina coincida con l'interfaccia teorica, secondo la relazione di Ghyben–Herzberg, nell'ipotesi:

$$\gamma = \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} = 40. \quad (12.10)$$

Dopo aver stabilito posizione e conformazione della zona di transizione, è stato necessario fissare le condizioni al contorno ai bordi del modello. Con riferimento alla figura 12.7, gli unici bordi sui quali è possibile assegnare delle condizioni al contorno fisicamente esistenti nella realtà (FRANKE *et alii*, 1998), sono AB, ove è ubicato il pozzo, e AC tetto dell'acquifero ove confinato. Sui bordi CD e BD non è invece possibile definire delle condizioni al contorno desumibili dall'assetto geometrico e fisico reale, per cui tali bordi sono stati disposti ad una distanza che possa corrispondere al bordo della zona di influenza, ossia in un'area ove ormai gli effetti prodotti dall'emungimento del pozzo sono trascurabili. Le condizioni al contorno assunte sono dunque le seguenti:

- bordo CD: è assunta una distribuzione della pressione idrica con la profondità pari a quella iniziale idrostatica, secondo le equazioni 12.6, 12.7 e 12.8;
- bordo AB: è assunto quale bordo impermeabile per la porzione non interessata dal pozzo, stante l'assunta simmetria radiale. Il pozzo è stato simulato attraverso l'imposizione della portata di emungimento.
- bordo BD: è assunta una pressione idrica costante pari a quella ivi calcolata con l'equazione 12.8;
- bordo AC: è assunto quale bordo impermeabile. Sui bordi BD e CD, ossia ove si è impostata la pres-

sione idrica, è necessario imporre anche il valore di salinità dell'acqua che entrerà nel modello. In particolare si è assunta, in ogni punto, una salinità pari a quella imposta per le condizioni iniziali.

Infine, nelle analisi eseguite, stante la mancanza di dati, la dispersione longitudinale α_L e quella trasversale α_T (par. 5.3) sono state assunte pari rispettivamente ad 1 m e 0,5 m. La porosità dell'acquifero è stata assunta pari a $n = 10\%$.

Condizioni per l'applicabilità del metodo

Le valutazioni che seguono sono state eseguite nell'ipotesi di acquifero confinato. Esse possono ritenersi valide anche per acquiferi freatici, nel caso in cui le depressioni indotte dal pompaggio siano molto piccole rispetto allo spessore della falda di acqua dolce, carattere in genere rappresentativo delle normali condizioni di esercizio di un pozzo.

L'assunzione di quiete iniziale (condizioni idrostatiche) è in generale valida nello studio del *salt water upconing*, quando la cadente piezometrica iniziale nella falda risulta molto ridotta, come in genere succede negli acquiferi regionali costieri della Puglia, così che la cadente generata dall'emungimento è molto superiore a quella che determina il moto naturale della falda. L'ipotesi di assialsimmetria va però adottata con prudenza nel caso di pozzi molto prossimi alla costa, per i quali il *salt-*

water upconing non gode di simmetria rispetto all'asse del pozzo. In tale caso si ha infatti che l'intrusione marina determinata dall'emungimento non avviene solo dal basso ma anche dai lati (fig. 12.8). In dette condizioni non si può quindi trascurare la filtrazione in condizioni indisturbate, la quale è proprio fattore incidente sulla notevole curvatura dell'interfaccia presso la costa.

L'analisi del *salt-water upconing*, con metodi numerici che contemplano il trasporto di massa, richiede conoscenze di parametri idrogeologici spesso mancanti. In verità non tutti questi parametri hanno la stessa importanza agli effetti dello studio del *salt-water upconing*. Volendo considerare il caso generale di mezzo anisotropo, che presenta una differenziazione tra permeabilità orizzontale e verticale, è stato verificato attraverso analisi parametriche (VAN MEIR *et alii*, 2000), che il parametro più incidente è la permeabilità verticale, e poi, in ordine decrescente di importanza, la permeabilità orizzontale, la porosità dell'acquifero, il coefficiente di immagazzinamento, la dispersione longitudinale e la dispersione trasversale. Quest'ultima presenta invece notevole importanza nello studio dell'equilibrio acqua dolce – acqua di mare su scala regionale, in quanto gioca un ruolo cruciale nell'evoluzione della zona di transizione su vasta area (DAGAN, 2006).

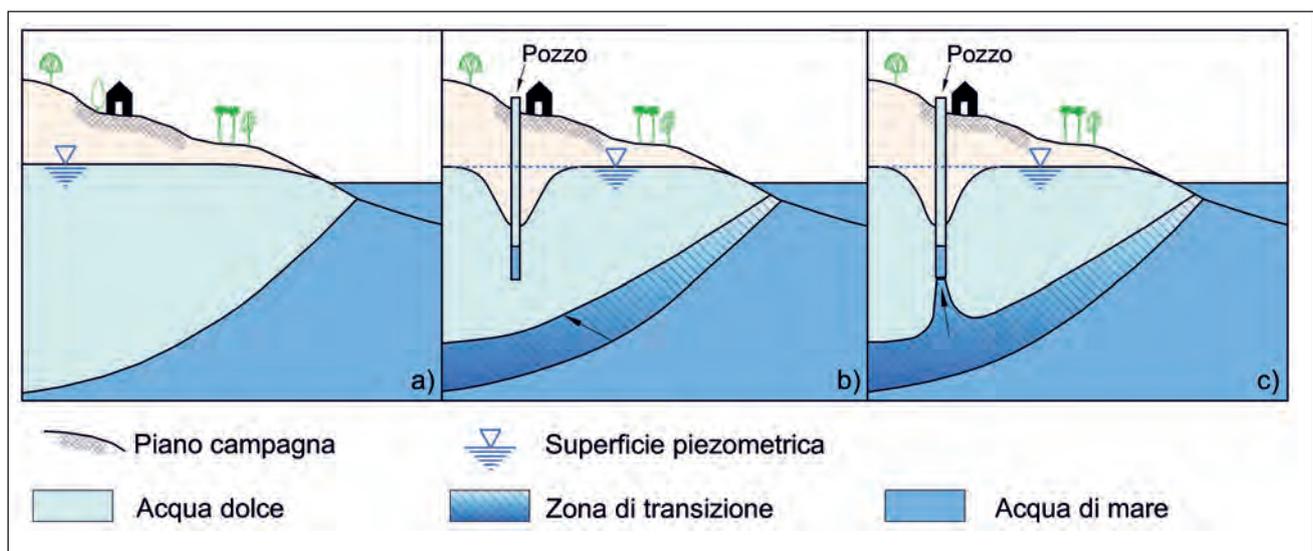


Fig. 12.8 – Intrusione marina laterale generata dall'emungimento eseguito da un pozzo in prossimità della costa: a) condizione indisturbata; b) spostamento dell'interfaccia determinato dall'emungimento da un pozzo prossimo alla costa; c) ingressione dell'acqua di mare.

– Lateral seawater intrusion generated from pumping in a well near the coast: a) undisturbed condition; b) interface displacement caused by pumping from a well near the coast; c) ingestion of seawater.

In merito alla posizione della zona di transizione, se non nota dai dati di sito, quanto assunto dalla (12.10) risulta un'ipotesi credibile di lavoro. Va comunque osservato che, in generale, nelle profondità comprese tra 32 t e 40 t è possibile rinvenire superfici isocloriche comprese tra 2.000 e 21.000 ppm (ORABONA & COTECCHIA, 1959). In ogni caso le ipotesi adottate per determinare la posizione della zona di transizione comportano una forte sensibilità del modello al carico piezometrico assunto per la falda, per cui ad una imprecisione nella sua determinazione conseguono errori considerevoli.

Per quanto riguarda l'assunzione della portata critica, è opportuno ricordare che la sua definizione si basa sull'ipotesi di esistenza di una interfaccia netta di separazione tra la falda di acqua dolce e la sottostante acqua di mare, per cui detta portata corrisponde all'instabilità del cono di intrusione marina, che così irrompe nel pozzo. Secondo detti modelli semplificati si ha quindi che l'acqua di falda estratta presenta una salinità costante e pari a quella della falda di acqua dolce sino al raggiungimento di detta portata critica, oltre la quale l'acqua di mare, divenuto instabile il cono di intrusione marina, irrompe nell'acquifero, segnando quindi la totale salificazione dell'acqua estratta. I criteri di calcolo basati sullo studio del trasporto di massa consentono invece di analizzare l'evoluzione della zona di transizione durante l'emungimento, per cui l'acqua di falda estratta presenterà, all'aumentare della portata, una salinità crescente. Attraverso l'analisi della dispersione idrodinamica è quindi possibile seguire il sollevamento delle varie isosaline, le quali possono raggiungere il pozzo durante l'emungimento. Detta circostanza è confermata dalle osservazioni sperimentali, che evidenziano in genere un progressivo incremento della salinità dell'acqua estratta durante l'emungimento (ORABONA & COTECCHIA, 1959). In tale ordine di idee è quindi necessario fissare un valore limite di salinità dell'acqua emunta, in corrispondenza del quale calcolare la massima portata estraibile, qui definita portata limite. La portata limite andrebbe quindi valutata caso per caso, in relazione alla stratificazione salina della falda esistente prima dell'emungimento, oltre che alla destinazione delle acque estratte. Nel seguito si è assunta quale portata limite quella che determina il raggiun-

gimento della base del pozzo da parte dell'isosalina corrispondente ad una salinità di 1 g/kg. Essa è quindi da intendersi esclusivamente quale ipotesi di lavoro.

12.3.1.2. - Definizione della percentuale di penetrazione del pozzo in falda e della portata di esercizio: il caso dei pozzi in agro di Castellaneta (TA)

Al fine di evidenziare la necessità di definire correttamente la percentuale di penetrazione del pozzo in falda in relazione alla portata di emungimento del pozzo, e quindi alla relativa depressione idrodinamica, sono stati analizzati due pozzi gestiti dall'Acquedotto Pugliese ed ubicati in agro di Castellaneta (fig. 12.9), ritenuti in tal senso dei casi esemplari. Detti pozzi presentano le seguenti caratteristiche:

Pozzo Castellaneta 6:

Altezza piezometrica falda $t = 5$ m s.l.m.;
Spessore della falda $H = 40 t + t = 205$ m;
Penetrazione del pozzo in falda $L = 89$ m;
Percentuale di penetrazione $P = L/H = 43$ %;
Portata di progetto $Q = 16,5$ l/s.

Pozzo Castellaneta 8:

Altezza piezometrica falda = 3,2 m s.l.m.;
Spessore della falda $H = 40 t + t = 131,2$ m;
Penetrazione del pozzo in falda $L = 88$ m;

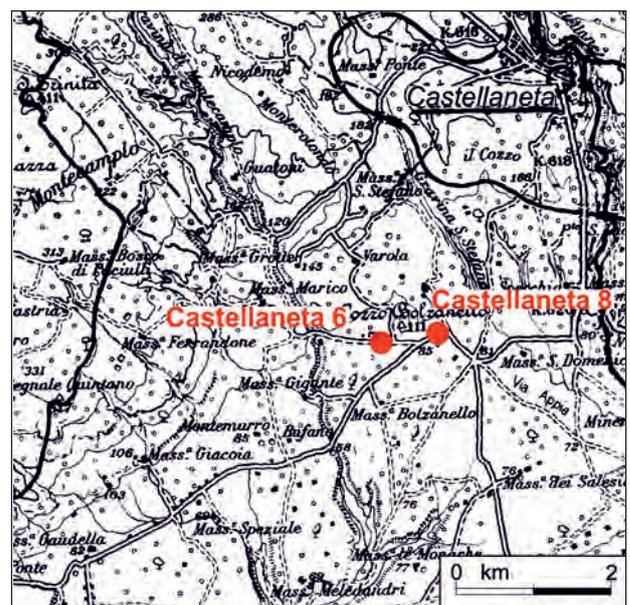


Fig. 12.9 – Planimetria con ubicazione dei pozzi Castellaneta 6 e Castellaneta 8.
– Location of the wells Castellaneta 6 and Castellaneta 8.

Percentuale di penetrazione $P = L/H = 67 \%$;
 Portata di progetto $Q = 17 \text{ l/s}$.

La prima analisi svolta è stata condotta per la determinazione del coefficiente di permeabilità dell'acquifero a partire dai risultati ottenuti dalle prove di portata eseguite sui due pozzi (fig. 12.10). Detta analisi, i cui dettagli si omettono per brevità, è stata eseguita per semplicità senza considerare il trasporto di massa, onde è consistita nel variare il coefficiente di permeabilità dell'acquifero sino ad ottenere dal calcolo una curva di portata che ben approssimi quella misurata *in situ*. Essendo i due pozzi caratterizzati da curve di portata molto simili, si è ritenuto di adottare un unico valore del coefficiente di permeabilità ($k = 6,66 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$), con una curva di portata ottenuta dal calcolo che ben approssima le curve sperimentali di entrambi i pozzi. In tal modo i risultati delle analisi per i due pozzi potranno essere agevolmente confrontati. Nel caso del pozzo Castellaneta 6, il coefficiente di permeabilità assunto comporta una lieve sottostima della depressione idrodinamica in corrispondenza dei bassi regimi di emungimento, mentre, viceversa, per il pozzo Castellaneta 8 si ha una lieve sovrastima (fig. 12.10). Stante le finalità del calcolo che qui si riporta, l'errore commesso è stato considerato accettabile.

Dall'analisi dei dati di base di detti pozzi si evince che la scelta della portata di esercizio e della penetrazione, praticamente identica per i due pozzi, è scaturita solo da considerazioni basate

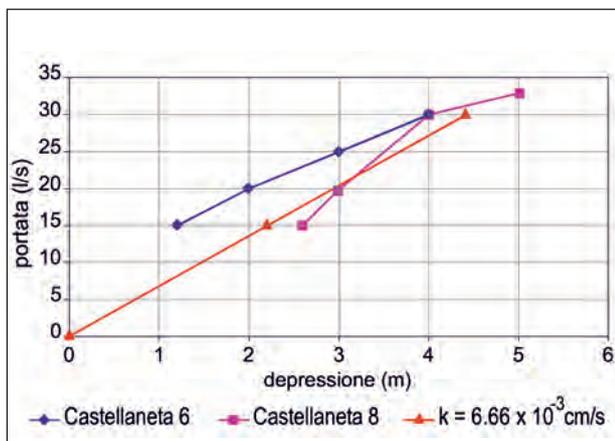


Fig. 12.10 – Curve di portata misurate in situ per i pozzi Castellaneta 6 e Castellaneta 8 e quella ottenuta dal codice di calcolo Sutra 2D3D.1, assumendo $k = 6,66 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$.

– Discharge curves measured in situ for the wells Castellaneta 6 and Castellaneta 8, and discharge curve obtained from Sutra 2D3D.1 code, assuming $k = 6,66 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$.

sulla permeabilità del mezzo: ad una sostanziale parità di permeabilità sono corrisposti, per i due pozzi, una sostanziale uguaglianza sia delle penetrazioni in falda sia delle portate di esercizio. I due pozzi presentano però quote piezometriche della falda significativamente differenti, cui corrisponde anche un differente comportamento nei confronti del *salt-water upconing*, di cui tener conto in fase di progettazione ed esercizio del pozzo stesso. Il pozzo Castellaneta 6 presenta, infatti, un carico piezometrico significativamente superiore a quello del pozzo Castellaneta 8, cui corrisponde anche un maggior spessore della falda di acqua dolce. Ma a detta sostanziale differenza nelle condizioni idrogeologiche che caratterizzano la falda in prossimità delle due opere di captazione, non è corrisposta una differenza in termini di dimensionamento delle stesse. Va comunque osservato che la differenza di carico piezometrico misurata tra i due pozzi, tra loro poco distanti (fig. 12.9), appare eccessiva ed è probabile che sia affetta da errore, ed inoltre che per il pozzo Castellaneta 8 una seconda prova di portata ha fornito un risultato differente da quello della prova di portata rappresentata in figura 12.10. L'adozione di detti incerti parametri idrogeologici è qui suggerita, quindi, solo per fini metodologici, ossia per illustrare come dovrebbe definirsi la penetrazione del pozzo in falda e la relativa portata di esercizio. Una verifica rigorosa dei pozzi qui presi di riferimento meriterebbe infatti ulteriori approfondimenti di rilievi di sito.

Per l'analisi del pozzo Castellaneta 6 è stato assunto un modello di acquifero cilindrico di altezza AB pari a 255 m ed un raggio BD pari a 500 m, discretizzando il piano radiale di analisi in elementi finiti rettangolari di lunghezza in direzione radiale pari a circa 7 m ed altezza pari a circa 2,5 m nella porzione di acquifero interessata dal pozzo e 3,5 m in quella sottostante (fig. 2.11). Nel caso del pozzo Castellaneta 8, ove la profondità dell'interfaccia teorica è inferiore, è stato invece analizzato un modello di altezza AB pari a 181 m e raggio BD pari a 400 m, discretizzato in elementi finiti rettangolari di altezza pari a circa 4,5 m e lunghezza in direzione radiale pari a 10 m. Nelle figure 12.12 e 12.13 è riportato l'*output* del calcolo in termini di distribuzione di salinità, rispettivamente per il

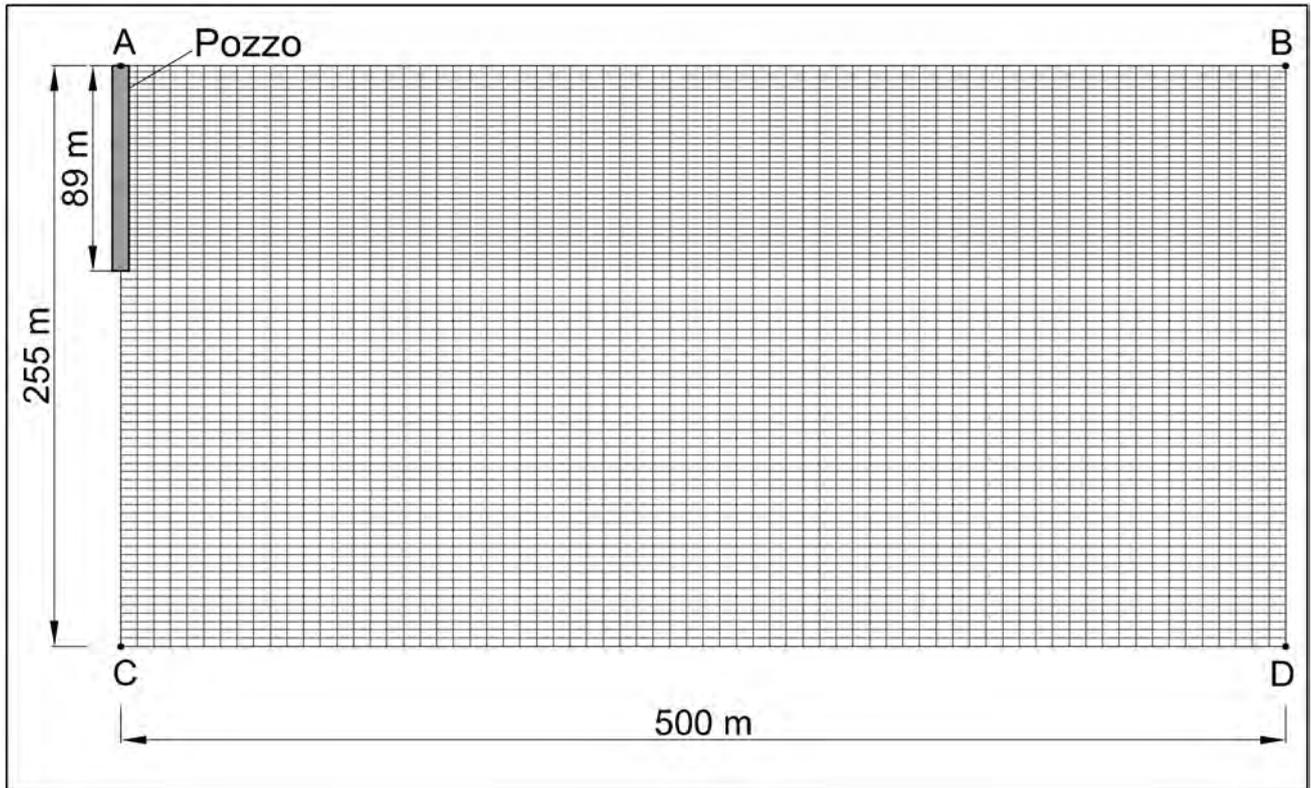


Fig. 12.11 – Mesh adottata per l'analisi del pozzo Castellaneta 6.
– Mesh adopted for the analysis of the well Castellaneta 6.

pozzo Castellaneta 6 e Castellaneta 8, in condizioni stazionarie. Mentre nel caso del pozzo Castellaneta 6 l'emungimento determina solo un lieve sollevamento delle isosaline appartenenti alla parte più superficiale della zona di transizione, nel caso del pozzo Castellaneta 8 si constata il raggiungimento della base del pozzo da parte dell'acqua di mare (isosalina corrispondente a circa 42 g/kg) e ciò in ragione del minore spessore iniziale della falda.

È interessante osservare la modalità con cui la salinità alla base del pozzo aumenta nel tempo quando si mantiene una portata di emungimento costante, di valore tale da determinare il sollevamento dell'acqua di mare sottostante, così come avviene nel pozzo Castellaneta 8 (fig. 12.14). Nel caso in esame si ha, infatti, che nel primo mese di pompaggio non si osserva un significativo incremento della salinità. Questa comincia ad aumentare significativamente durante il secondo mese. Tra il terzo ed il dodicesimo mese si osserva poi un forte incremento di salinità, che termina con l'irruzione dell'acqua di mare nel pozzo. L'andamento nel tempo della concentrazione mostra

quindi come esista un intervallo di tempo entro il quale, pur essendo il pozzo mal progettato, in esso si prelevi acqua di buona qualità, in ragione del maggiore tempo necessario alla risalita del cono di intrusione marina, necessario a raggiungere condizioni stazionarie.

Al fine di mantenere la zona di transizione a sufficiente distanza dalla base del pozzo Castellaneta 8, e consentire quindi l'uso dello stesso senza pericolo di contaminazione salina, è necessario ridurre sia la portata di esercizio sia la penetrazione in falda. Infatti, nel caso in cui si mantenesse la penetrazione in falda invariata, il valore della portata di esercizio dovrebbe valere circa 2 l/s (fig. 12.15). Nel caso in cui si riducesse anche la penetrazione, ad esempio portandola da 88 m a 40 m, sarebbe possibile emungere una portata molto superiore, pari a circa 8 l/s (fig. 12.16). Per il pozzo qui preso in esame, dimezzando all'incirca la penetrazione del pozzo in falda si ha dunque la possibilità di emungere in condizioni di sicurezza una portata d'acqua ben quattro volte superiore a quella estraibile per penetrazione invariata.

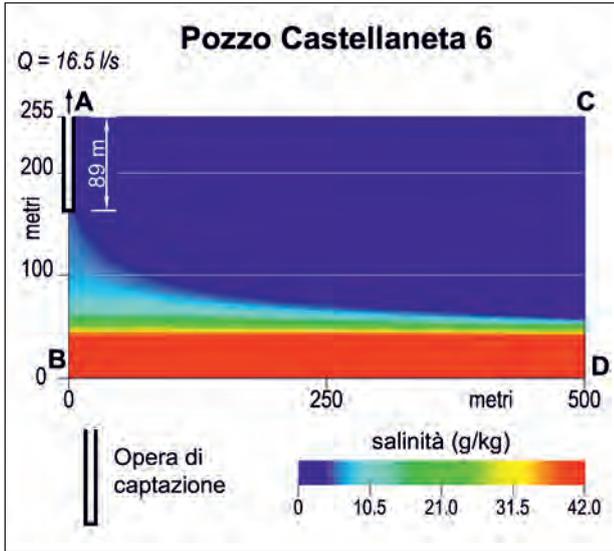


Fig. 12.12 – Pozzo Castellaneta 6: distribuzione di salinità ottenuta dal codice di calcolo Sutra 2D3D.1 adottando la portata di esercizio pari a 16.5 l/s.
 – Well Castellaneta 6: salinity distribution obtained from Sutra 2D3D.1 code adopting the well operating discharge equal to 16.5 l/s.

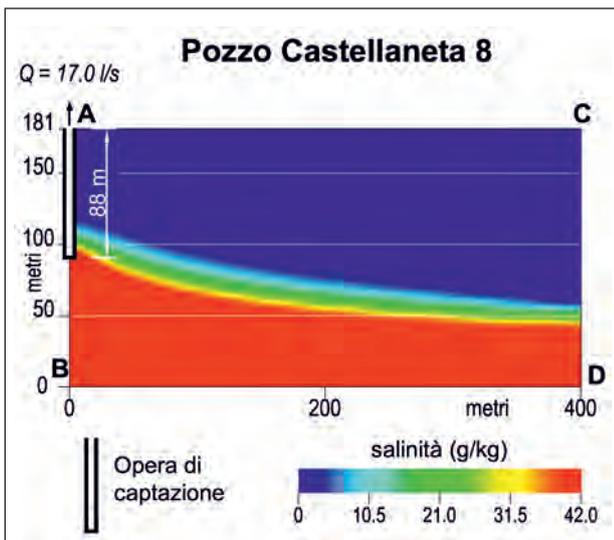


Fig. 12.13 – Pozzo Castellaneta 8: distribuzione di salinità ottenuta dal codice di calcolo Sutra 2D3D.1 adottando la portata di esercizio pari a 17 l/s.
 – Well Castellaneta 8: salinity distribution obtained from Sutra 2D3D.1 code adopting the well operating discharge equal to 17 l/s.

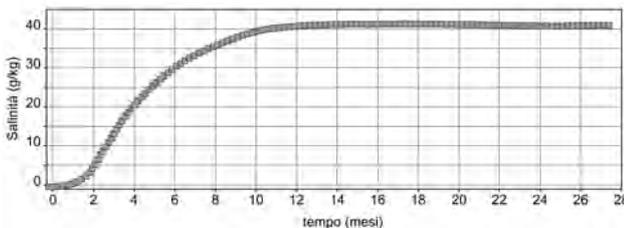


Fig. 12.14 – Andamento nel tempo della salinità alla base del pozzo Castellaneta 8 determinato dal calcolo adottando la portata di esercizio (17 l/s).
 – Time changes of salinity at the bottom of well Castellaneta 8, computed by adopting the well operating discharge (17 l/s).

12.3.1.3. - Comportamento della zona di transizione durante l'emungimento: analisi di un pozzo in agro di Lecce

Ulteriori analisi sono state condotte al fine di valutare l'evoluzione della forma e della posizione della zona di transizione durante l'emungimento, sino alla salsificazione dell'acqua di falda estratta. In particolare si è analizzato il caso del pozzo 94EM ubicato in agro di Lecce (fig. 12.17), gestito dall'Acquedotto Pugliese. Esso presenta le seguenti caratteristiche:

- Altezza piezometrica falda $t = 2,17$ m s.l.m.;
- Spessore falda $H = 40 t + t = 89$ m;
- Penetrazione del pozzo in falda $L = 37$ m;
- Percentuale di penetrazione $P = L/H = 41$ %;
- Portata di progetto 15 l/s;
- Depressione della superficie piezometrica sotto la portata di progetto $\Delta = 2,11$ m.

Si rileva anzitutto che la depressione indotta dal pompaggio con la portata di esercizio porta la superficie di falda quasi al livello mare, dal che si evince che la progettazione del pozzo non è adeguata alla sicurezza rispetto al *salt-water upconing*, così come sarà evidenziato dal calcolo. La modellazione è stata eseguita in termini parametrici al fine di valutare le modalità con cui si evolve il cono di intrusione marina al variare della portata.

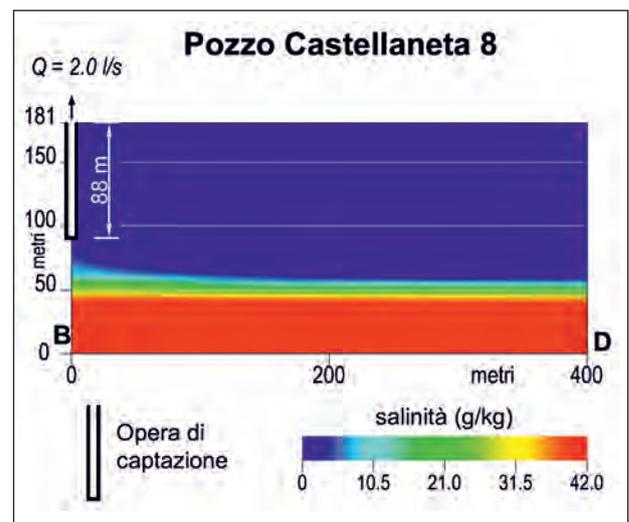


Fig. 12.15 – Pozzo Castellaneta 8: distribuzione di salinità ottenuta dal codice di calcolo Sutra 2D3D.1 adottando una portata (2 l/s) inferiore a quella di esercizio del pozzo (17 l/s).
 – Well Castellaneta 8: salinity distribution obtained from Sutra 2D3D.1 code adopting a discharge (2 l/s) smaller than the well operating discharge (17 l/s).

pozzo. Assumendo invece una portata di 3 l/s, cui corrisponde una depressione di circa 50 cm, la isoalina 1 g/kg raggiunge la base del pozzo, mentre le isoaline 10 g/kg e 20 g/kg subiscono un modesto sollevamento. È chiaro quindi che la portata di esercizio del pozzo dovrebbe essere compresa tra 1 l/s e 3 l/s, con una depressione dinamica di circa 50 cm, a fronte invece del valore di esercizio assunto per detto pozzo superiore a 2 m. Il progressivo aumento della portata causa in modo significativo anche il sollevamento delle isoaline più profonde, ossia quelle relative a 10 e 20 g/kg, segnando quindi il prelievo di acque salate. In corrispondenza di una portata pari a 15 l/s anche la isoalina corrispondente a 10 g/kg irrompe alla base del pozzo, mentre l'acqua di mare (≈ 42 g/kg) è ancora praticamente ferma (figg. 12.19 e 12.20).

La salinità dell'acqua estratta è il risultato del mescolamento lungo il pozzo di tutti i filetti liquidi captati. Di tale fenomeno si deve tener conto nell'interpretazione dei risultati di analisi chimiche condotte su campioni d'acqua prelevati durante l'emungimento, perché un lieve incremento della salinità dell'acqua emunta è evidentemente già indice di *salt-water upconing*.

12.3.1.4. - Confronto tra i risultati ottenuti con l'adozione della teoria della dispersione idrodinamica e quelli ottenibili con metodi semplificati

Le modellazioni eseguite da REILLY & GOODMAN, 1987, applicando sia metodi di calcolo basati sulla ipotesi di esistenza dell'interfaccia sia adottando modelli basati sulla dispersione idrodinamica, indicano che solo per modeste portate di emungimento si può ritenere che l'interfaccia coincida con la posizione assunta dalla isoclorica corrispondente al 50% della concentrazione di ione cloruro dell'acqua di mare. Dunque, le incertezze insite nell'applicazione dei metodi semplificati comportano l'adozione di portate di esercizio molto cautelative al fine di svolgere una progettazione in sicurezza.

Al fine di valutare l'efficacia di metodi semplificati nella progettazione delle opere di captazione, si sono rianalizzati con detti metodi i pozzi precedenti

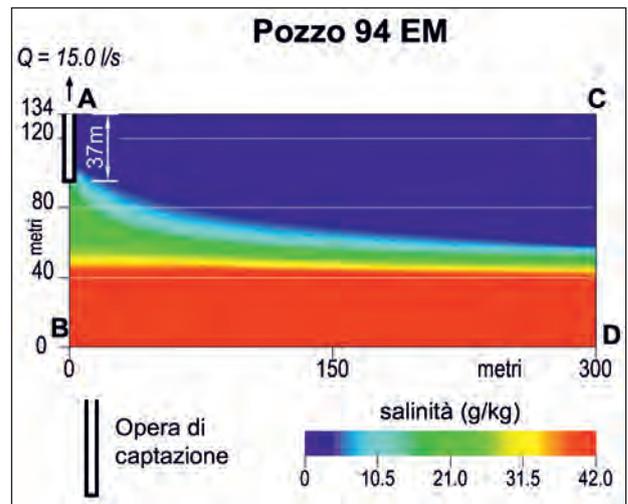


Fig. 12.19 – Pozzo 94 EM: distribuzione di salinità ottenuta dal codice di calcolo Sutra 2D3D.1 adottando la portata di esercizio pari a 15 l/s.

– Well 94 EM: salinity distribution obtained from Sutra 2D3D.1 code adopting a well operating discharge equal to 15 l/s.

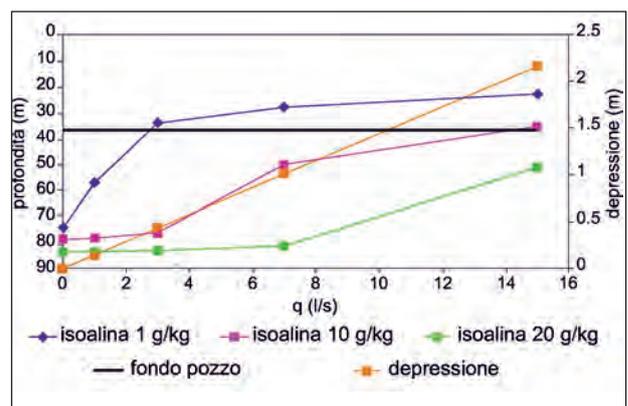


Fig. 12.20 – Andamento con la portata emunta, della profondità delle isoaline 1, 10 e 20 g/kg e della depressione della superficie di falda ottenute dall'applicazione del codice di calcolo Sutra 2D3D.1 in condizioni stazionarie.

– Depth pattern of isobalines 1, 10 e 20 g/kg and water table drawdown versus the well discharge obtained from the application of Sutra 2D3D.1 code under steady conditions.

temente esaminati con la teoria della dispersione idrodinamica. In particolare si è ripercorso un approccio già proposto oltre 50 anni fa (COTECCHIA, 1955; ORABONA & COTECCHIA, 1959), che consente di determinare la depressione critica δ_{cr} in funzione della profondità del pozzo \bar{L} e del carico piezometrico t della falda, definiti rispetto al livello mare, con la seguente relazione (COTECCHIA *et alii*, 1957; COTECCHIA, 1958; COTECCHIA, 1963):

$$\delta_{cr} [\text{m}] = t/2 - 0,01562 \bar{L} \quad (12.11)$$

diagrammata in figura 12.21.

Applicando detta relazione ai pozzi esaminati in questo capitolo si ottiene:

Pozzo Castellaneta 6, $\delta_{cr} = t/2 - 0,01562\bar{L} = 1,18$ m. Dalla curva di portata del pozzo Castellaneta 6 riportata in figura 12.10, adottando una depressione di 1,18 m, si ottiene una portata di esercizio di poco inferiore a 15 l/s, paragonabile alla portata assegnata di progetto (16,5 l/s). Si fa osservare che anche il calcolo eseguito con la teoria della dispersione idrodinamica ha evidenziato la sostanziale correttezza della portata di esercizio assegnata a detto pozzo, stante la sua penetrazione in falda;

Pozzo Castellaneta 8, $\delta_{cr} = t/2 - 0,01562\bar{L} = 0,27$ m. Dalla curva di portata del pozzo Castellaneta 8 riportata in figura 12.10, adottando una depressione di 0,27 m, si ottiene una portata di esercizio di circa 2 l/s, di molto inferiore alla portata di progetto, pari invece a 17 l/s, così come evidenziato anche dal calcolo numerico prima riportato; se per lo stesso pozzo si riduce la penetrazione in falda da 88 m a 40 m, con conseguente riduzione della percentuale di penetrazione da 67% a 30%, si ha un incremento della depressione critica calcolata con l'equazione 12.11 da 0,22 m a circa 1 m, cui corrisponderebbe una portata di esercizio dell'ordine di $6 \div 7$ l/s (fig. 12.10). La riduzione di penetrazione di detto pozzo aveva fornito, dall'applicazione del calcolo numerico, una portata critica di 8 l/s, di poco superiore quindi a quella determinata con la formula semplificata proposta;

Pozzo 94 EM, $\delta_{cr} = t/2 - 0,01562\bar{L} = 0,54$ m. Dalla curva di portata del pozzo (fig. 12.20), adottando una depressione di 0,54 m, si ottiene una portata di esercizio di circa 3 l/s, di molto inferiore alla portata di progetto, pari invece a 17 l/s, così come evidenziato anche dal calcolo numerico prima riportato;

L'applicazione di metodi semplificati per l'analisi del *salt-water upconing* conduce quindi a risultati in linea generale attendibili, che consentono di progettare più o meno correttamente un pozzo a partire dalla conoscenza della quota del livello statico della falda indisturbata e dei risultati di una prova di portata, almeno nei casi in cui l'acquifero possa essere considerato, con buona approssimazione, omogeneo ed isotropo, ed il passaggio dalla falda di acqua dolce alla sottostante acqua di mare avvenga attraverso una zona di transizione di spessore modesto rispetto a quello della falda. Si tratta

comunque di previsioni che, come d'uso nell'ingegneria, vanno sempre sottoposte al controllo tramite prove *in situ*. Va infine osservato che i modelli semplici proposti forniscono tuttavia dei risultati fortemente dipendenti dalle misure di carico piezometrico della falda e dai risultati delle prove di permeabilità, la cui esecuzione deve quindi essere molto accurata.

Gli strumenti di calcolo più complessi, se da un lato consentono di studiare il fenomeno in tutte le sue componenti, dall'altro richiedono la conoscenza di numerosi parametri di ingresso. La loro applicazione richiede, infatti, la conoscenza, oltre che delle caratteristiche di permeabilità dell'acquifero e del livello statico della falda, anche della stratificazione salina della stessa e dei coefficienti di dispersione idrodinamica longitudinale e trasversale. Nei casi geometricamente ed idrogeologicamente complessi (forti anisotropie, eterogeneità, elevato spessore della zona di transizione, ecc.), i metodi di calcolo numerico sono da preferirsi a quelli semplificati, in quanto sono gli unici che riescono a simulare dette complessità.

12.4. - IL "POZZO ORIZZONTALE"

L'emungimento attuato mediante un pozzo verticale determina nell'acquifero una condizione di moto tridimensionale che, nell'ipotesi di trascurare il flusso avente parte in condizioni indisturbate e di considerare l'acquifero omogeneo, può ritenersi assialsimmetrica, con asse di simmetria coincidente con l'asse del pozzo. Sotto tali condizioni, l'estrazione di acqua attuata invece con un pozzo orizzontale, realizzato al *top* dell'acquifero, determina una condizione di moto che può essere considerata in buona approssimazione piana, con il piano del moto coincidente con un generico piano normale all'asse del pozzo (fig. 12.22). Le condizioni di moto effettivamente piane sono da ritenersi valide solo nelle porzioni centrali del pozzo stesso, e quindi quando il pozzo presenta un notevole sviluppo L lungo il suo asse. Va infatti osservato che in corrispondenza delle sezioni trasversali iniziale e finale del pozzo orizzontale, esso può drenare acqua dalla falda anche nella direzione parallela al suo asse, con effetti di bordo non contemplati nell'analisi piana.

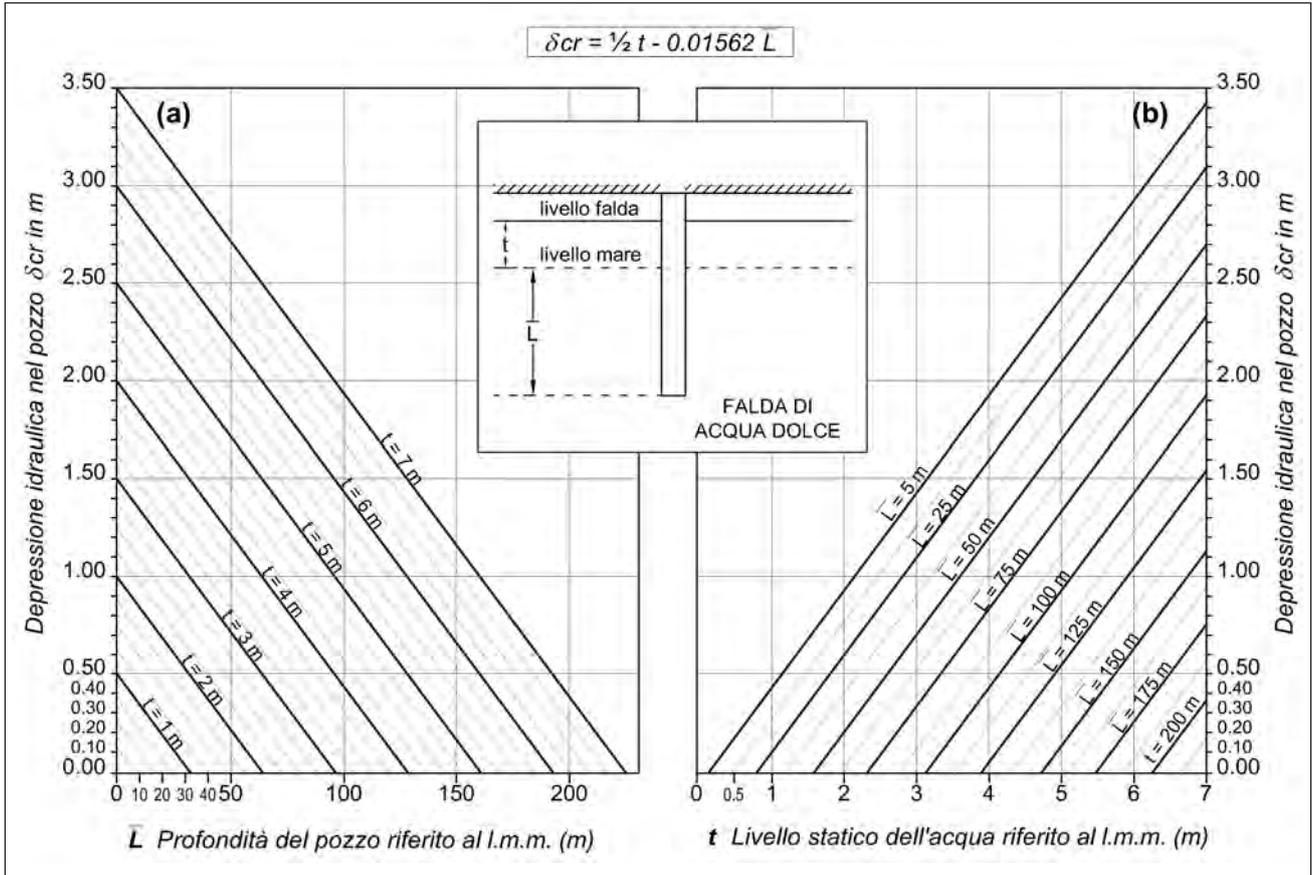


Fig. 12.21 – Diagrammi per il calcolo della profondità del pozzo (\bar{L}) rispetto al livello mare e della depressione critica (δ_{cr}) in funzione del carico piezometrico (t) (mod., da COTECCHIA *et alii* 1957; COTECCHIA, 1963): a) andamento della depressione critica in funzione della profondità del pozzo al variare del carico piezometrico della falda; b) andamento della depressione critica in funzione del carico piezometrico della falda al variare della profondità del pozzo.

– Charts for computing the well depth (\bar{L}) with respect to sea level and the critical drawdown (δ_{cr}) versus the piezometric head (t) (modified after COTECCHIA *et alii* 1957; COTECCHIA, 1963): a) pattern of critical drawdown versus well depth with the change in the piezometric head of groundwater; b) pattern of critical drawdown versus the piezometric head of groundwater with the change in well depth.

A tale differenza delle condizioni di moto corrisponde una sostanziale differenza anche nella risposta della falda nei riguardi del *salt-water upconing*. Infatti, mentre nel caso di pozzo verticale in acquifero omogeneo ed isotropo, il cono di intrusione marina gode di una simmetria radiale rispetto all'asse del pozzo, nel caso del pozzo orizzontale non è più corretto parlare di cono di intrusione marina, in quanto quest'ultima avviene attraverso una superficie, di cui in figura 12.22 viene rappresentata una sezione trasversale, che si sviluppa lungo tutta la lunghezza L del cunicolo stesso. In tal caso sarebbe infatti più opportuno definire una portata critica del pozzo riferita all'unità di lunghezza; detta circostanza comporta la possibilità di variare la portata critica complessiva del pozzo orizzontale incrementando L , teoricamente in modo indefinito. Nel caso del pozzo verticale, la

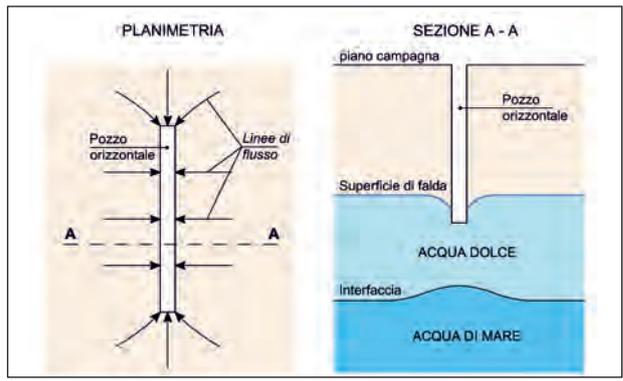


Fig. 12.22 – Schematizzazione del pozzo orizzontale: a) planimetria con linee di flusso; b) sezione con indicazione della deformazione dell'interfaccia acqua dolce-acqua di mare determinata dall'emungimento.

– Sketch of the horizontal well: a) plan with flow lines; b) cross-section showing deformation of the fresh-seawater interface caused by pumping.

lunghezza è condizionata dall'effettivo spessore della falda di acqua dolce, così come abbiamo visto nei paragrafi precedenti. Si intuisce quindi che, nei

casi in cui l'acquifero dolce presenti modesto spessore, la realizzazione di pozzi orizzontali può consentire la captazione di significativi volumi di acqua sotterranea di discreta qualità, lì dove invece sarebbe del tutto inopportuna la realizzazione di pozzi verticali.

Negli acquiferi costieri l'utilizzo dei pozzi orizzontali può quindi comportare notevoli vantaggi, sia in termini di portata totale estraibile, sia in termini di qualità dell'acqua estratta (COTECCHIA, 1963; LIVINGSTON, 1993; LABREGÈRE *et alii*, 2006; TARBOX & HUTCHINGS, 2008).

Particolari condizioni idrogeologiche possono inoltre esaltare ulteriormente i motivi che inducono a preferire il pozzo orizzontale rispetto a quello verticale. Innanzitutto vi è da considerare il caso, assai frequente negli acquiferi carbonatici della regione Puglia, in cui la permeabilità subisce una graduale riduzione con la profondità. Il pozzo orizzontale interessa l'acquifero solo nelle porzioni più superficiali, ossia più permeabili, ove invece il pozzo verticale va ad intercettare anche i livelli di acquifero più profondi, di permeabilità molto inferiore.

Un'altra caratteristica idrogeologica favorevole all'uso del pozzo orizzontale è la presenza di singolarità geostrutturali a sviluppo prevalentemente orizzontale. I calcari carbonatici, permeabili per fratturazione e carsismo, molto spesso presentano giunti di strato che, specie quando interessati dal carsismo, possono presentare una notevole permeabilità. Dette discontinuità, quando presenti a piccola distanza dalla superficie di falda, possono agevolmente essere intercettate e seguite lungo tutto lo sviluppo del cunicolo orizzontale (fig. 12.23). Nel caso del pozzo verticale, che invece presenta un asse verticale e quindi pressappoco ortogonale ai giunti di strato, la superficie interna del pozzo è molto meno esposta a dette singolarità.

Va infine considerato che la falda contenuta negli acquiferi regionali costieri presenta un lieve incremento di salinità già a partire dalle quote superiori, specie quando ci riferiamo alle porzioni a breve distanza dal litorale del territorio regionale. Ciò determina la possibilità, da parte del pozzo orizzontale, di estrarre l'acqua solo dalle porzioni superiori dell'acquifero, ove la falda presenta una salinità inferiore, mentre il pozzo verticale an-



Fig. 12.23 – Pozzo orizzontale realizzato in prossimità di Mesagne (BR), dove l'acquifero carbonatico presenta una permeabilità dovuta essenzialmente ai giunti di strato.

– Horizontal well drilled near Mesagne (BR), where the carbonate aquifer permeability is mainly due to bedding planes.

drebbe ad estrarre acqua anche alle profondità maggiori, ove la salinità può assumere valori rilevanti già in assenza di emungimento.

Quanto sopra illustrato induce quindi a favorire l'esercizio dei pozzi orizzontali. A tal riguardo si segnala, quindi, la possibilità di intercettare le acque di falda mediante cunicoli orizzontali realizzati a monte di importanti manifestazioni sorgentizie. Le sorgenti costiere pugliesi alimentate dalla falda profonda presentano, in generale, una marcata salinità, determinata dai fenomeni di mescolamento con l'acqua di mare che si producono in prossimità della vera e propria scaturigine. La realizzazione di pozzi orizzontali ubicati a monte della sorgente consentirebbe di captare le acque sotterranee dirette alla sorgente prima del loro ingente mescolamento con l'acqua di mare; e ciò previa determinazione delle condizioni geochemiche e della stratificazione salina della falda che alimenta le sorgenti di maggiore rilevanza.

Di seguito verranno pertanto illustrati i risultati ottenuti dall'esecuzione di analisi numeriche finalizzate al confronto, su base quantitativa, del comportamento idrodinamico della falda quando captata da un "pozzo orizzontale" con quello che invece caratterizza le normali condizioni di attingimento lungo pozzi verticali. La dimostrazione fisico-matematica dei fenomeni, sopra brevemente riassunti, risulta invero complessa. Tuttavia si è ritenuto qui di analizzare nel dettaglio un caso ideale

semplice, per pervenire a delle regole di carattere generale, che andrebbero poi contestualizzate dal punto di vista quantitativo caso per caso. Viene infine descritto un caso di pozzo orizzontale studiato da chi scrive e realizzato dall'Acquedotto Pugliese: il pozzo di Trepuzzi (LE), realizzato alla fine degli anni '50 del secolo scorso ed ancora oggi in esercizio ottimale.

12.4.1. - Confronto tra le condizioni di esercizio del pozzo orizzontale e quelle del pozzo verticale penetranti in acquiferi costieri

Nelle analisi numeriche che seguono si è considerato un acquifero con caratteri idrogeologici rapportabili a molte aree della regione pugliese, ad una distanza di pochi km dalla costa. Si assume indicativamente un coefficiente di permeabilità pari a $k = 10^{-1}$ cm/s, una porosità dell'acquifero pari al 10% ed un carico piezometrico di 1,5 m s.l.m.. Lo spessore della lente di acqua dolce può essere determinato nell'ipotesi di validità della relazione di Ghyben-Herzberg, assumendo:

$$\frac{\rho d}{\rho s - \rho d} = 45, \quad (12.12)$$

maggiore di 32÷33 in quanto si ipotizza una breve distanza dalla costa (par. 12.2). In tali condizioni, lo spessore della falda risulta quindi pari a:

$$H = 45 t+t \approx 70 \text{ m}. \quad (12.13)$$

Tale spessore di falda è del tutto paragonabile a quello dello storico pozzo spia SR (463 EISS) di "Mass. Fondo Cupo" in agro di Lecce a circa 5,1 km dal mare Adriatico, per il quale è stato rilevato un carico piezometrico pari 1,64 m s.l.m. ed una zona di transizione ampia circa 30 m, che verrà come tale assunta nei calcoli che seguono (fig. 12.24).

Adottando condizioni iniziali, al contorno e definizione della portata limite analoghe a quelle assunte nelle analisi numeriche illustrate in precedenza, si è proceduto, adottando il codice di calcolo SUTRA, ad un esame delle differenze tra le condizioni di esercizio di due pozzi, uno verticale ed uno orizzontale, idealmente ubicati nella medesima posizione.

Il modello dell'acquifero esaminato nel calcolo

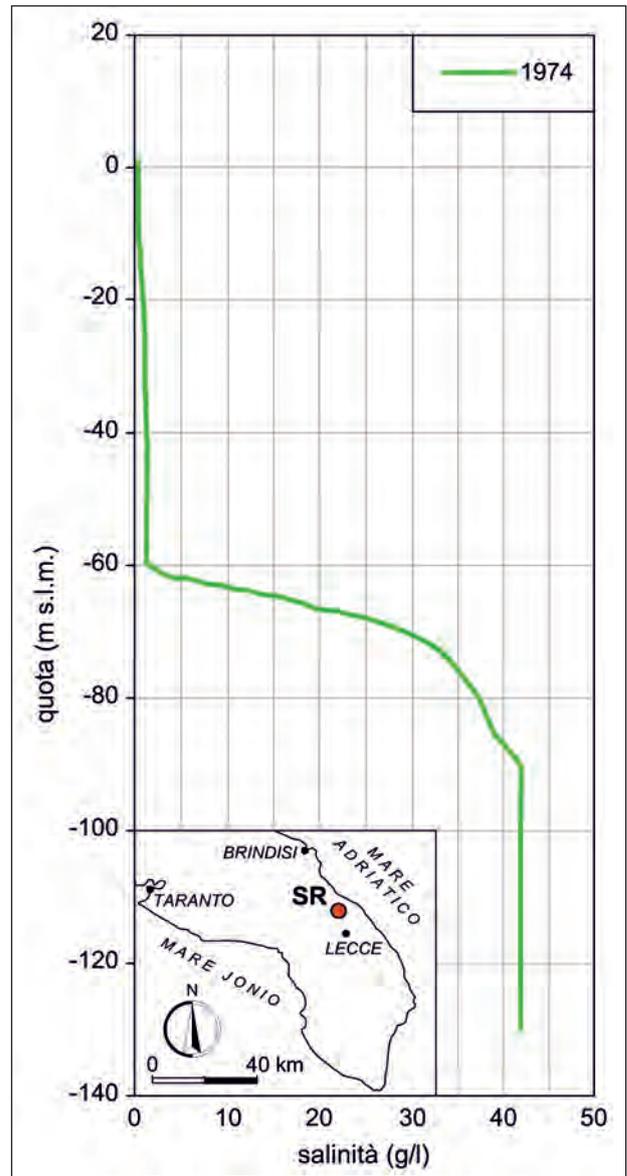


Fig. 12.24 – Profilo di salinità rilevato nel pozzo 463 EISS (SR) nel 1974.
– Salinity profile observed in well 463 EISS (SR) in 1974.

presenta un'altezza pari a 150 m e una lunghezza pari a 350 m. Nel caso di pozzo verticale, il cui calcolo è stato eseguito in condizioni di assialsimmetria, dette condizioni corrispondono a quelle di un piano diametrale dell'acquifero cilindrico con asse coincidente con l'asse del pozzo. Nel caso di pozzo orizzontale si è invece eseguita un'analisi in condizioni piane, per cui le dette dimensioni corrispondono a quelle del piano del modello. In entrambi i casi si sono adottati elementi finiti quadrati di lato pari circa 5 m. Le dispersioni longitudinale e trasversale sono state assunte rispettivamente pari a $a_L = 10$ m e $a_T = 0,4$ m.

Il pozzo verticale

Il pozzo verticale presenta penetrazione in falda pari ad $L = 20$ m, e quindi una percentuale di penetrazione pari a $P = 20/70 \approx 28\%$. Al fine di valutare l'evoluzione della stratificazione salina della falda all'aumentare della portata, durante la simulazione si è diagrammato l'andamento della salinità in 4 punti di controllo ubicati a differenti profondità dal fondo del pozzo: 0 m (Punto 1), 15 m (Punto 2), 45 m (Punto 3), 75 m (Punto 4).

Il calcolo è stato eseguito adottando diversi valori di portata sino al raggiungimento delle condizioni stazionarie, per ognuna delle quali è stata determinata la distribuzione della salinità.

A partire da 10 l/s, è stata incrementata la portata estratta sino a 90 l/s, in corrispondenza della quale si è registrato il sollevamento delle isoaline afferenti alla zona di transizione sino alla base del pozzo (fig. 12.25), mentre l'acqua di mare è sostanzialmente rimasta ferma. L'isoalina 1g/kg raggiunge il fondo del pozzo (Punto 1) per una portata limite pari a 20 l/s (fig. 12.26).

Il pozzo orizzontale

Il modello numerico del pozzo orizzontale si differenzia dal precedente per i punti che seguono:

- l'analisi viene condotta in coordinate piane, assumendo lo spessore dell'acquifero e la lunghezza del pozzo unitari; la portata di emungimento assegnata è dunque una portata per unità di lunghezza del pozzo;
- l'emungimento avviene in corrispondenza di un singolo nodo nel vertice superiore sinistro del modello, avendo assunto una simmetria rispetto al piano longitudinale verticale contenente l'asse del pozzo orizzontale.

L'analisi è stata eseguita incrementando progressivamente la portata di emungimento del pozzo orizzontale sino a raggiungere una portata di 1 l/s per metro di sviluppo (orizzontale) del pozzo, in corrispondenza della quale si registra il sollevamento sino alla base del pozzo delle isoaline afferenti alla zona di transizione (fig. 12.27). Analizzando l'andamento della concentrazione salina nei punti di controllo posti a profondità lungo la verticale uguali a quelle analizzate in presenza di pozzo verticale (fig. 12.28), si evince che la portata limite per metro di sviluppo del pozzo è pari a circa

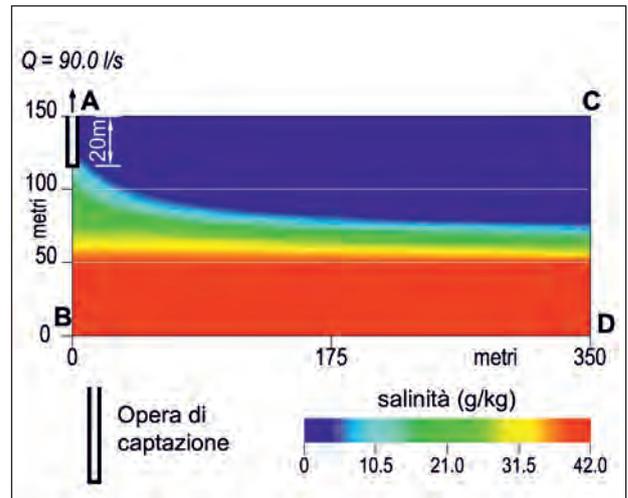


Fig. 12.25 – Distribuzione di salinità ottenuta dal codice di calcolo Sutra 2D3D.1 durante l'emungimento attuato con il pozzo verticale ($Q = 90$ l/s).
– Salinity distribution obtained from Sutra 2D3D.1 code during pumping by the vertical well ($Q = 90$ l/s).

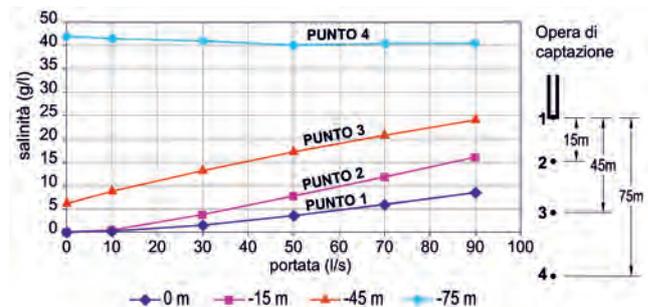


Fig. 12.26 – Salinità al variare della portata estratta in 4 punti a diverse profondità rispetto al fondo del pozzo verticale.
– Salinity with the change in well discharge at 4 points at different depths from the bottom of the vertical well.

0,4 l/s, valore in corrispondenza del quale la isoalina 1 g/kg raggiunge la base del pozzo. Superata la portata di 0,5 l/s si ha un rapido sollevamento della zona di transizione.

Volendo ottenere una portata totale pari a 20 l/s, pari cioè alla portata limite del pozzo verticale prima analizzato, è necessario quindi adottare una lunghezza del pozzo orizzontale pari a circa 50 m. È quindi necessario adottare una lunghezza del pozzo orizzontale maggiore di 50 m al fine di prelevare una quantità di acqua maggiore di quella prelevabile con pozzo verticale presentante una percentuale di penetrazione del 30% circa.

Le analisi eseguite fanno riferimento ad un acquifero poroso omogeneo ed isotropo e sotto particolari condizioni idrogeologiche. In realtà, così come descritto nel paragrafo precedente, condizioni

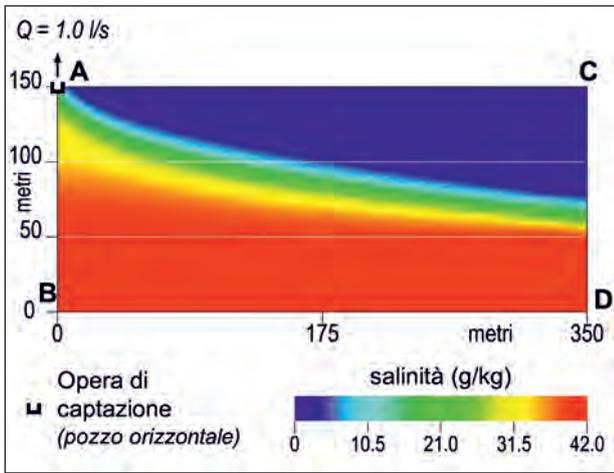


Fig. 12.27 – Distribuzione di salinità ottenuta per il “pozzo orizzontale” con il codice di calcolo agli elementi finiti Sutra 2D3D.1 adottando una portata pari a 1.0 l/s per metro di sviluppo orizzontale del pozzo stesso.
 – Salinity distribution obtained for the “horizontal well” by the finite-element Sutra 2D3D.1 code adopting a discharge equal to 1.0 l/s per meter length of the well.

di eterogeneità e/o singolarità geostrutturali, molto frequenti negli acquiferi carbonatici regionali, spesso rendono ancor più vantaggioso l'uso del pozzo orizzontale. Ciò sarà evidente nel paragrafo successivo allorché verranno analizzate le condizioni di esercizio del pozzo Trepuzzi, che già per lunghezze del pozzo orizzontale significativamente inferiori a quanto in precedenza determinato, offre significativi vantaggi rispetto al pozzo verticale.

12.4.2. - Il pozzo di Trepuzzi (LE) utilizzato dall'AQP per l'approvvigionamento idropotabile del Salento

Il pozzo di Trepuzzi è stato finanziato dalla Cassa per il Mezzogiorno e realizzato alla fine degli anni '50 del secolo scorso. Esso è sito in agro di Trepuzzi (LE), località Villa Consiglio (fig. 12.29),

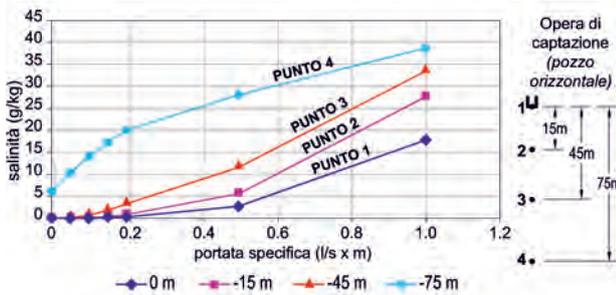


Fig. 12.28 – Salinità al variare della portata estratta in 4 punti a diverse profondità rispetto al fondo del pozzo orizzontale.
 – Salinity with the change in well discharge at 4 points at different depths from the bottom of the horizontal well.

a circa 12 km di distanza dalla costa. Il pozzo, di proprietà dell'Acquedotto Pugliese, ha una portata di esercizio pari a 56 l/s, e fornisce acqua potabile a circa 150.000 abitanti.

Nell'area in esame il piano campagna presenta



Fig. 12.29 – Foto aerea con ubicazione dello storico “pozzo orizzontale” Trepuzzi (da maps.google.it).
 – Aerial photo showing the location of the historical “horizontal well” Trepuzzi (from maps.google.it).

una quota pari a circa 58 m s.l.m.. Al fine di raggiungere la superficie della falda è stato quindi necessario eseguire uno scavo di profondità pari a circa 60 m. Lo scavo eseguito presenta sezione rettangolare, di lati all'incirca pari a 5 x 11 m (fig. 12.30). Alla base dello scavo è stata realizzata quindi la trincea, di profondità pari a circa 3 m e larghezza poco superiore ad 1 m. Nell'area il pelo libero della falda, rilevato negli anni '50, si presentava ad una quota pari a circa 2,7 m s.l.m., sicché la trincea risultava profonda sotto il livello di falda per appena 1 m (COTECCHIA, 1963).

Lo scavo eseguito per raggiungere la superficie della falda ha interessato per circa 25 m la formazione calcarenitica e per i restanti 35 m la formazione calcarea cretacea, che alla quota entro cui è stata realizzata la trincea contiene la falda profonda carsica del Salento, da cui attinge quindi il pozzo orizzontale. Ad una quota di circa 2 m superiore a quella del livello di falda è stata realizzata una camera entro cui sono alloggiare le pompe (fig.

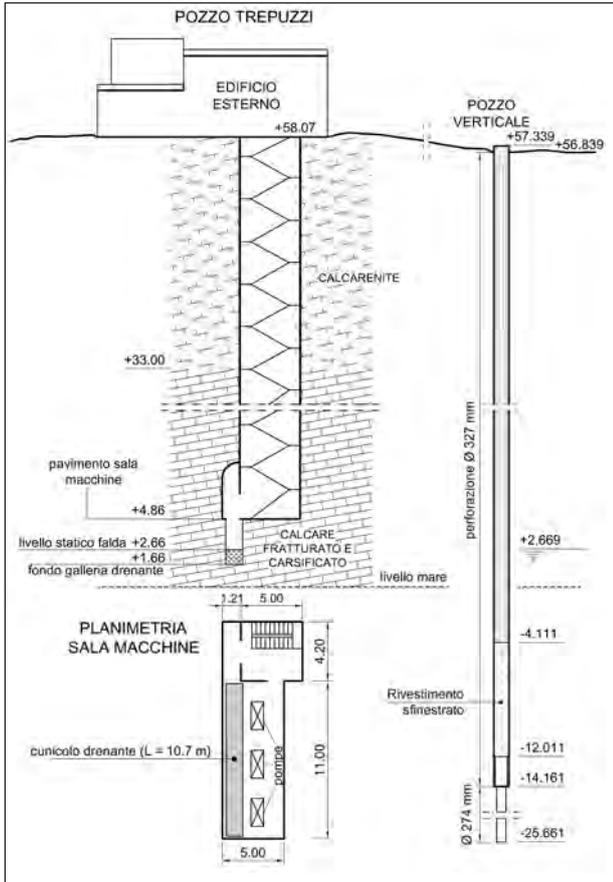


Fig. 12.30 – Planimetria e sezione del “pozzo orizzontale” Trepuzzi (mod., da COTECCHIA, 1963).
– Plan and cross-section of the “horizontal well” Trepuzzi (modified after COTECCHIA, 1963).

12.31), utilizzate per il sollevamento dell’acqua che è poi accumulata in un serbatoio esterno.

In prossimità del pozzo orizzontale di Trepuzzi, ad una distanza di circa 30 m, fu realizzato un pozzo verticale per il monitoraggio idrogeologico della falda (fig. 12.30), oggi purtroppo non più utilizzabile. Dopo la sua costruzione, il pozzo orizzontale di Trepuzzi fu oggetto di accertamenti idrogeologici, volti anche alla verifica dei vantaggi che il prelievo di acque sotterranee eseguito dalla trincea potesse presentare rispetto a quello attuato mediante il pozzo verticale. Le prove eseguite, dei cui risultati oggi purtroppo non vi è traccia se non quelli richiamati in COTECCHIA, 1963, hanno evidenziato che in corrispondenza del pozzo orizzontale si può prelevare una portata di 150 l/s con depressione dinamica pari a 15 cm e contenuto in ione cloruro pari a 180 mg/l, mentre nel pozzo verticale fu possibile prelevare circa 35 l/s, con depressioni maggiori, ed un contenuto in ione cloruro di 350 mg/l.

In corrispondenza di codesto storico pozzo orizzontale, nell’ambito della presente ricerca, sono stati eseguiti ulteriori accertamenti idrogeologici. In particolare, il giorno 10.02.2011, mentre il pozzo era in regolare esercizio con una portata di

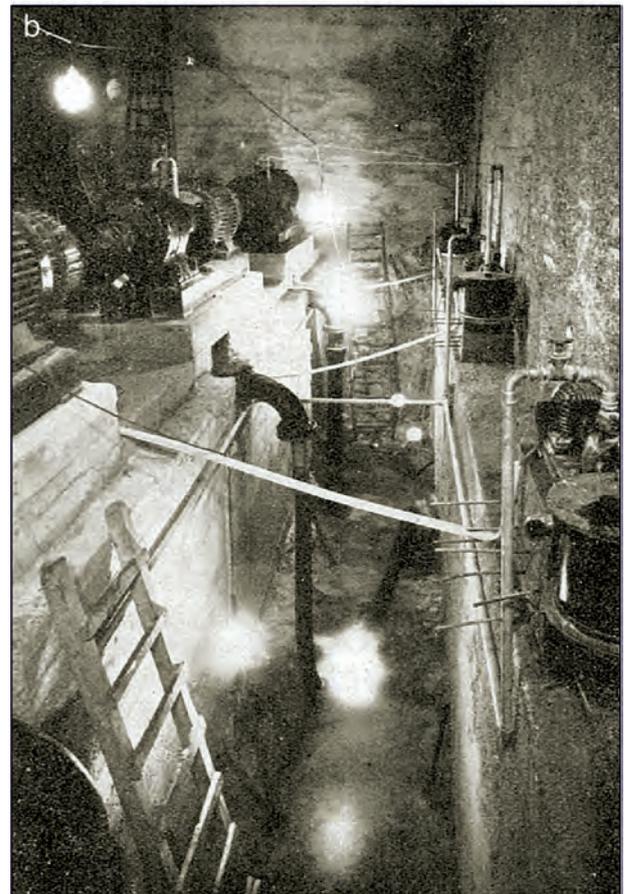


Fig. 12.31 – Foto della camera di alloggiamento delle pompe del pozzo Trepuzzi: a) attuale; b) come si presentava negli anni ‘60, ove è visibile anche il cunicolo a sviluppo orizzontale.

– Pump room at the Trepuzzi well: a) today; b) as it was in the 1960s showing also the draining conduit.

55 l/s, è stato rilevato il livello dinamico della falda, risultato pari a 2,18 m s.l.m., ed è stato eseguito un campionamento dinamico. La concentrazione dello ione cloruro è risultata pari a 179 mg/l e la conducibilità elettrica specifica a 20° è risultata pari a 1.162 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cui corrisponde una salinità grossomodo pari a 871 mg/l. Il giorno 11.02.2011, dopo circa 12 ore di interruzione del pompaggio, è stata rilevata la quota della superficie di falda indisturbata, pari a 2,22 m s.l.m. ed è stato eseguito un campionamento statico. La concentrazione dello ione cloruro e la conducibilità elettrica si sono ridotti rispettivamente a 166 mg/l e 1.127 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cui corrisponde una salinità all'incirca pari a 845 mg/l. Si è quindi provveduto a riattivare il pompaggio, installando un idrometrografo per seguire la evoluzione nel tempo della depressione idrodinamica indotta dal pompaggio (fig. 12.32). Dopo circa due ore di acquisizione dati è stato evidenziato il raggiungimento di uno stato che può ritenersi stazionario, con quota del livello dinamico della falda identica a quella rilevata prima dell'interruzione del pompaggio, pari a 2,18 m s.l.m. La depressione indotta dal pompaggio è risultata dunque pari a 4 cm. Il risultato conferma i caratteri di permeabilità dell'acquifero rilevati negli anni '60, quando veniva misurata una depressione di 15 cm,

ma con una portata di emungimento pari a 150 l/s (COTECCHIA, 1963). Ad intervalli di 1 ora si è poi provveduto ad eseguire un campionamento dinamico, che ha evidenziato un progressivo, ma modesto, incremento di salinità, se paragonati alle risultanze chimiche relative al campionamento statico (tab. 12.1). Il contenuto dello ione cloruro è praticamente identico a quello che si presentava circa 50 anni fa, sicché si può sicuramente concludere che il pozzo risulta correttamente progettato nei confronti del *salt-water upconing*. Il modesto incremento della concentrazione dello ione cloruro

Tab. 12.1 – Risultati delle determinazioni chimiche di laboratorio condotte presso il “pozzo orizzontale” Trepuzzi. – Results of laboratory chemical test carried out near the “horizontal well” Trepuzzi.

Data Prelievo	Tipo Prelievo	Nota	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cl (mg/l)
2/10/11	Dinamico	prima di spegnere la pompa	1162	179
2/11/11	Statico	dopo 12 ore di assenza di emungimento	1127	166
2/11/11	Dinamico	dopo 1 ora di pompaggio	1152	173
2/11/11	Dinamico	dopo 2 ore di pompaggio	1145	172

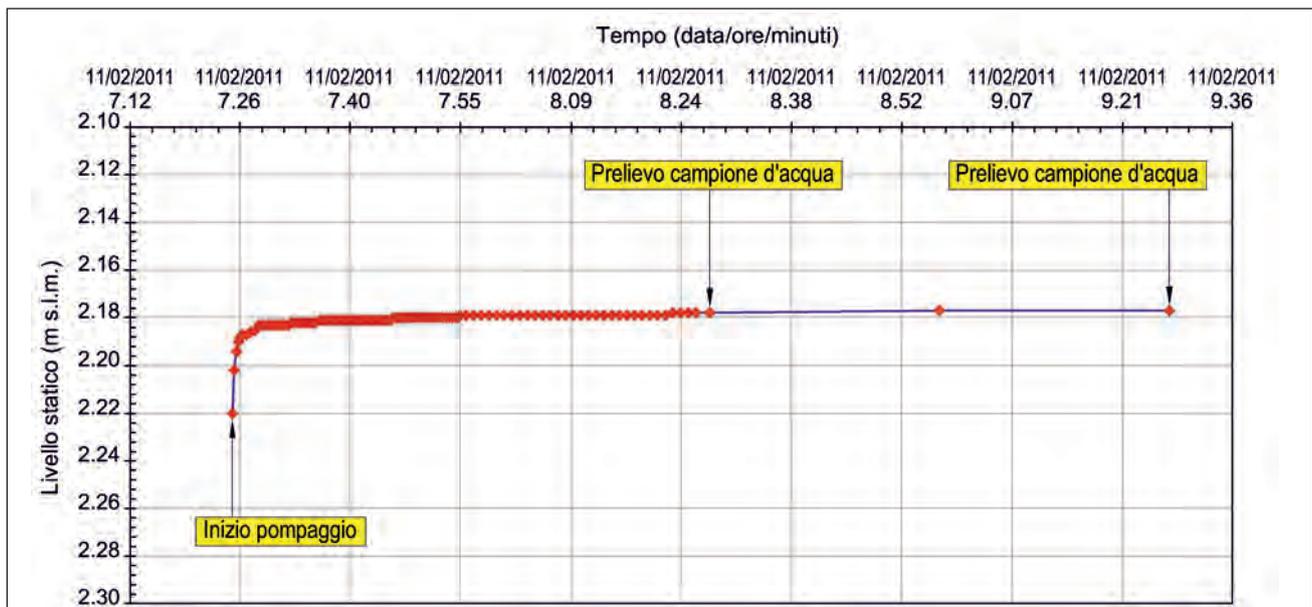


Fig. 12.32 – Variazione del carico piezometrico nel “pozzo orizzontale” Trepuzzi ottenuto durante l'emungimento con una portata di 55 l/s, con indicazione degli istanti in cui sono stati eseguiti i campionamenti di tipo dinamico.

– Variation in the piezometric head in the “horizontal well” Trepuzzi during pumping with a discharge of 55 l/s, and indication of the time of dynamic sampling.

è probabilmente da imputarsi all'inevitabile sollevamento delle isoaline più superficiali appartenenti alle porzioni di falda disposte immediatamente al di sotto del pozzo.

Sulla base del risultato ottenuto sono state eseguite simulazioni numeriche finalizzate alla determinazione del coefficiente di permeabilità dell'acquifero, facendo riferimento sia alla prova di portata condotta nell'ambito del presente progetto di ricerca sia a quella condotta negli anni '50.

In figura 12.33 è riportata la curva di portata ottenuta in situ, adottando i due gradini di portata attuati a circa 50 anni di differenza, e la curva di portata ottenuta dall'applicazione del codice di calcolo SUTRA, adottando un coefficiente di permeabilità pari a $3,33 \times 10^{-2}$ cm/s. Il risultato appare

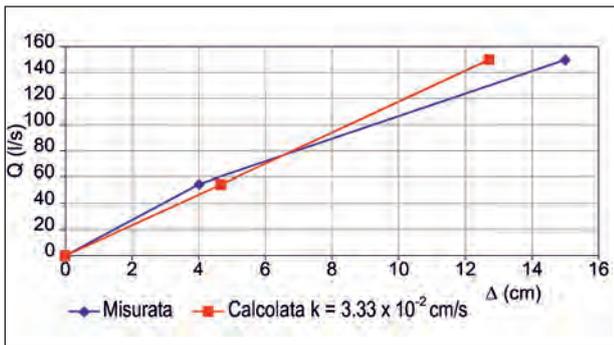


Fig. 12.33 - Confronto tra la curva di portata misurata per il "pozzo orizzontale" Trepuzzi e quella ottenuta con l'applicazione del codice di calcolo Sutra 2D3D.1 adottando un coefficiente di permeabilità $k = 3,33 \times 10^{-2}$ cm/s.
 - Comparison between the discharge curve measured for the "horizontal well" Trepuzzi and the curve obtained from Sutra 2D3D.1 code adopting a permeability coefficient $k = 3,33 \times 10^{-2}$ cm/s.

confermare l'adeguatezza del coefficiente di permeabilità adottato per l'acquifero, in linea con quanto determinato per l'area nella Carta della Permeabilità allegata al presente lavoro (tav. 3 f.t.).

È stata infine eseguita una modellazione agli elementi finiti atta a confrontarne i risultati con quanto osservato nelle passate e recenti indagini di sito. Non disponendo di informazioni sulla effettiva stratificazione salina della falda, sulle eventuali anisotropie ed eterogeneità presenti e sulla posizione e spessore della zona di transizione, il calcolo è stato effettuato adottando le seguenti ipotesi: quota di rinvenimento dell'acqua di mare pari a circa -110 m s.l.m.; spessore della zona di transizione pari a circa 20 m; dispersioni longitudinali e trasversali rispettivamente pari a $\alpha_L = 5$ m e $\alpha_T = 0,25$ m; porosità dell'acquifero pari al 10%. La porzione di acquifero modellata ha un'altezza pari a 140 m e lunghezza pari a circa 280 m, con discretizzazione in elementi finiti rettangolari di altezza pari a 2,5 m e lunghezza pari a 5 m. Come si osserva dalla figura 12.34 a e b, il calcolo evidenzia una sostanziale immobilità della zona di transizione per entrambi i gradini di portata, assunti pari a 55 l/s e 150 l/s, in accordo con le osservazioni di sito. Solo nel caso di portata emunta pari a 150 l/s si osserva un lieve sollevamento della isoalina relativa ad 1 g/kg, che rimane tuttavia molto distante dalla base del pozzo orizzontale. Tutto ciò, anche se secondo una modellazione semplificata, appare rafforzare l'ipotesi di assenza del *salt-water upconing* per il pozzo orizzontale Trepuzzi.

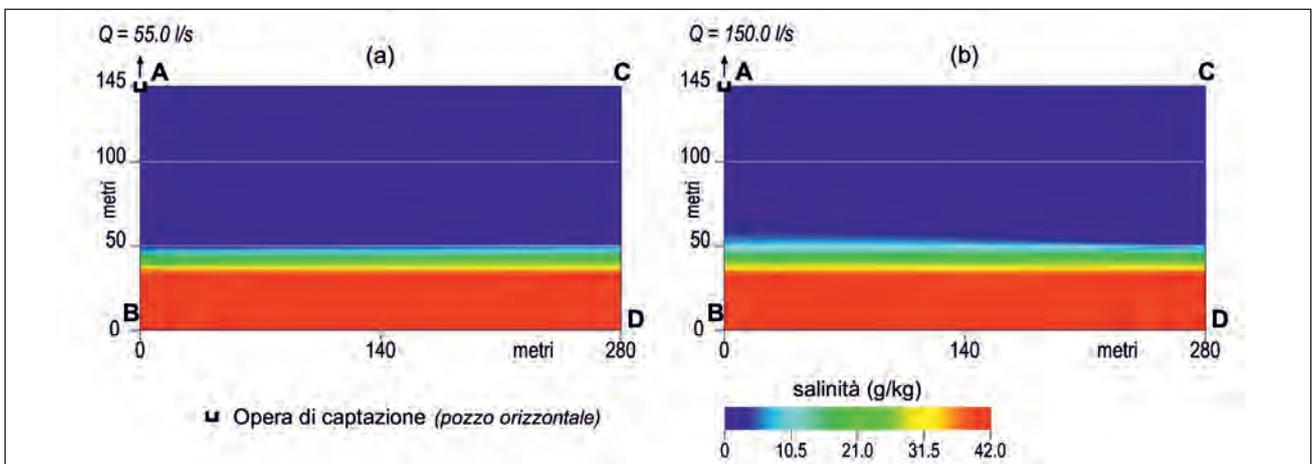


Fig. 12.34 - "Pozzo orizzontale" di Trepuzzi: distribuzione di salinità ottenuta dal codice di calcolo Sutra 2D3D.1 adottando una portata di 55 l/s (a) e di 150 l/s (b).
 - "Horizontal well" Trepuzzi: salinity distribution obtained from Sutra 2D3D.1 code adopting a discharge of 55 l/s (a) and 150 l/s (b).