



MINISTERO DELL'AMBIENTE
E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE



Commissario di Governo per le Bonifiche e
la Tutela delle Acque nella Regione Campania



REGIONE CAMPANIA

ACCORDO DI PROGRAMMA

Per la definizione degli interventi di messa in sicurezza e bonifica delle aree comprese
nel Sito di Interesse Nazionale di Napoli Orientale



**INTERVENTI DI MESSA IN SICUREZZA E BONIFICA DELLA FALDA
DEL SIN NAPOLI ORIENTALE E REALIZZAZIONE DELLA PRIMA FASE ATTUATIVA
PROGETTO DEFINITIVO**

Titolo elaborato
**MODELLO IDROGEOLOGICO DI FALDA E
DI TRASPORTO DEI CONTAMINANTI
1/5**

Tavola
ED 04

Redatto da



Project Manager :
Ing. Rosanna GRADO

IL DIRETTORE TECNICO
Ing. Carlo MESSINA



Il Responsabile
del Procedimento
Ing. Pasquale PARENTE

Redatto da :

Geol. A. CARLONI (modello idrogeologico)

Cod. Commessa

Codice

Nome file

Data : Maggio 2016

CAM 805

PD

ED

0

0

4

rev.
2

CAM805_PDEG004_2

Rev.	Data	Descrizione modifica
0	lug/2015	1ª Emissione
1	gen/2016	2ª Emissione CdS Istruttoria MATTM 7/10/2015
2	mag/2016	3ª Emissione Riunione Tecnica MATTM 8/4/2016

verificato

approvato

**MODELLO NUMERICO DEL FLUSSO IDRICO
SOTTERRANEO E TRASPORTO DEGLI INQUINANTI
DELL'ACQUIFERO ALLUVIONALE COSTIERO
DELL'AREA DEL S.I.N DI NAPOLI ORIENTALE**

INDICE

1. PREMESSA	8
2. QUADRO DI RIFERIMENTO E MODELLO CONCETTUALE DEL SITO	11
2.1 Inquadramento dell'area di studio	12
2.2 Condizioni climatiche	16
2.3 Caratteristiche del sistema idrico superficiale e di canalizzazione	16
2.4 Caratteristiche geologico strutturali	21
2.5 Ricostruzione del modello litostratigrafico di riferimento	26
2.5.1 Definizione delle unità litostratigrafiche	31
2.5.2 Analisi e modellazione delle superfici litostratigrafiche	31
2.6 Assetto idrogeologico	47
2.6.1 Caratteristiche idrostratigrafiche del sito	47
2.6.2 La circolazione idrica sotterranea generale	49
2.6.3 Ricostruzione della piezometria di riferimento e del sistema di deflusso locale	50
2.6.4 Analisi dell'interfaccia tra acque di falda e salate	64
2.6.5 Parametri idrodinamici del sistema acquifero	67
2.6.6 Calcolo delle voci di bilancio idrogeologico dell'area	70
3. MODELLO DI FLUSSO IDRICO SOTTERRANEO DELL'AREA SIN	76
3.1 Aspetti generali e caratteristiche del modello utilizzato	76
3.2 Implementazione del modello di flusso di riferimento	77
3.2.1 La griglia di calcolo	77
3.2.2 Ricostruzione dello schema idrostratigrafico	80
3.2.3 Condizioni al contorno	104
3.2.4 Parametrizzazione idrodinamica	109
3.3 Simulazioni di flusso e calibrazione del modello	109
3.4 Bilancio di massa e valutazione della portata di deflusso della falda	135
4. SIMULAZIONI PREVISIONALI DI PROGETTO	137
4.1 Descrizione degli interventi esistenti di MiSE e bonifica delle acque di falda	137
4.2 Definizione degli obiettivi e descrizione degli interventi di progetto	149
4.3 Simulazione e verifica degli interventi di progetto	161
5. MODELLO DI FLUSSO DI DETTAGLIO DELL'AREA NORD EST DEL SIN	198
5.1 Implementazione del modello di flusso di dettaglio	198
5.2 Simulazioni di flusso e calibrazione del modello	212
6. MODELLO DI TRASPORTO DEGLI INQUINANTI	221
6.1 Obiettivi del modello di trasporto degli inquinanti in falda	221

6.2	Valutazione dello stato di contaminazione delle acque sotterranee nell'area del SIN	221
6.3	Meccanismi di dispersione degli inquinanti nelle acque sotterranee	224
6.4	Aspetti generali e caratteristiche del modello utilizzato	228
6.5	Definizione delle aree sorgente / hot-spot dei fenomeni di contaminazione riscontrati	229
6.6	Implementazione del modello di trasporto	230
6.6.1	Griglia di calcolo	230
6.6.2	Parametri idrodispersivi	231
6.6.3	Isoterme di adsorbimento - coefficienti di partizione (Kd)	233
6.6.4	Condizioni al contorno del modello di trasporto	235
6.7	Simulazioni di trasporto degli inquinanti e verifica degli interventi	236
7.	CONSIDERAZIONI TECNICHE SULLE SOLUZIONI ADOTTATE	242
8.	DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI	244
9.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	246
	APPENDICE	248
	ALLEGATI	257

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1	- Perimetrazione del Sito di Interesse Nazionale di Napoli Orientale.	14
Figura 2	- Dominio di analisi e delle elaborazioni modellistiche.	15
Figura 3	- Reticolo idraulico e opere di bonifica (Consorzio di Bonifica delle Paludi di Napoli e Volla, Piano di Classifica 2008).	19
Figura 4	- Reticolo dei collettori nell'area di Napoli orientale (Comune di Napoli, 2014)	20
Figura 5	- Ricostruzione del modello digitale del terreno (DTM).	24
Figura 6	- Ricostruzione delle fasce altimetriche della topografia dell'area.	25
Figura 7	- Quadro geologico generale sulla base della Carta Geologica d'Italia del Foglio 183	28
Figura 8	- Sezioni idrostratigrafiche (Bellucci et Alii, 1998, modificato e integrato da Allocca & Celico, 2008).	29
Figura 9	- Sezioni geologiche del settore occidentale del SIN di Napoli Orientale (Commissario di Governo per l'emergenza rifiuti, bonifica e tutela delle acque nella Regione Campania, 2002).	30
Figura 10	- Quadro dei dati stratigrafici disponibili derivanti dai Piani di Caratterizzazione e di messa in sicurezza delle singole aree, dal Comune e dalla Provincia di Napoli.	33
Figura 11	- Analisi stratigrafica dei depositi alluvionali e dei depositi piroclastitici.	36
Figura 12	- Ricostruzione dei limiti stratigrafici dei depositi alluvionali e dei depositi piroclastitici.	37

Figura 13 - Analisi stratigrafica dei depositi tufacei e lavici.	38
Figura 14 - Ricostruzione dei limiti stratigrafici dei depositi tufacei e lavici.	39
Figura 15 - Isobate della base dei depositi Alluvionali recenti Limoso Torbosi.	42
Figura 16 - Isobate del tetto dei depositi Tufacei.	43
Figura 17 - Isobate della base dei depositi Tufacei.	44
Figura 18 - Isopache dei depositi Piroclastici Superiori (PR1).	45
Figura 19 - Isopache dei depositi Tufacei (TGN e TV).	46
Figura 20 - Rete di monitoraggio piezometrico dell'area in seguito alla caratterizzazione ambientale.	54
Figura 21 - Punti di monitoraggio utilizzati per la ricostruzione dell'assetto piezometrico di riferimento.	55
Figura 22 - Stralcio della morfologia della superficie piezometrica riferita al periodo ottobre-novembre 2002 (Piano di Tutela delle Acque redatto dall'Autorità di Bacino Nord-Occidentale, modificato e integrato)	56
Figura 23 - Ricostruzione della superficie piezometrica a partire dai punti di monitoraggio con metodo di interpolazione <i>Local Polynomial Method</i> (LPM).	59
Figura 24 - Ricostruzione della superficie piezometrica a partire dai punti di monitoraggio con metodo di interpolazione <i>Ordinary Kriging</i> (OK).	60
Figura 25 - Ricostruzione della superficie piezometrica a partire dai punti di monitoraggio con metodo di interpolazione <i>Radial Basis Function</i> (RBF).	61
Figura 26 - Soggiacenza dal piano campagna della superficie piezometrica ricostruita.	62
Figura 27 - Aree di potenziale risorgiva delle acque di falda.	63
Figura 28 - Grafico dell'andamento della curva di equilibrio acque dolce-salata	66
Figura 29 - Diagramma dei range del coefficiente χ nel caso di terreni e rocce poco coperte (da Sappa G., pubbl. Università di Roma 1 - Ingegneria dell'Ambiente e Territorio, a.a. 2009-2010).	72
Figura 30 - Aree di ricarica per infiltrazione.	74
Figura 31 - Dominio di calcolo del modello numerico.	78
Figura 32 - Discretizzazione dello spazio orizzontale in mesh triangolari.	79
Figura 33 - Slice 1: Superficie topografica.	82
Figura 34 - Slice 3: Base delle alluvioni di ambiente fluvio-lacustre (A).	83
Figura 35 - Slice 4: Tetto dei depositi Tufacei (TSV e TGN).	84
Figura 36 - Slice 5: Base dei depositi Tufacei (TSV e TGN)	85
Figura 37 - Slice 6: Base del modello.	86
Figura 38 - Modello discreto 3D: Mesh e Griglia di calcolo.	87
Figura 39 - Modello discreto 3D: Layers e Slices.	87
Figura 40 - Proiezione dei sondaggi stratigrafici nel dominio di calcolo.	88
Figura 41 - Sezioni stratigrafiche E-W e N-S del modello geologico.	88

Figura 42 - Sezioni E-W del modello geologico.	89
Figura 43 - Sezioni N-S del modello geologico.	89
Figura 44 - Ricostruzione 3D del modello geologico.	90
Figura 45 - Sezione verticale E-W del modello geologico 3D.	90
Figura 46 - Sezione verticale E-W del modello geologico 3D.	91
Figura 47 - Sezione verticale E-W del modello geologico 3D.	91
Figura 48 - Sezione verticale N-S del modello geologico 3D.	92
Figura 49 - Sezione verticale N-S del modello geologico 3D.	92
Figura 50 - Sezione verticale E-W e N-S del modello geologico 3D.	93
Figura 51 - Sezione verticale E-W e N-S del modello geologico 3D.	93
Figura 52 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota 0 metri s.l.m).	94
Figura 53 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -5 metri s.l.m).	94
Figura 54 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -10 metri s.l.m).	95
Figura 55 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -15 metri s.l.m).	95
Figura 56 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -20 metri s.l.m).	96
Figura 57 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -25 metri s.l.m).	96
Figura 58 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -30 metri s.l.m).	97
Figura 59 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -35 metri s.l.m).	97
Figura 60 - Tracce di sezione.	98
Figura 61 - Sezione n°1.	99
Figura 62 - Sezione n°2.	99
Figura 63 - Sezione n°3.	100
Figura 64 - Sezione n°4.	101
Figura 65 - Sezione n°5.	101
Figura 66 - Sezione n°6.	102
Figura 67 - Sezione n°7.	102
Figura 68 - Sezione n°8.	102
Figura 69 - Sezione n°9.	103
Figura 70 - Sezione n°10.	103
Figura 71 - Condizioni al contorno del modello di flusso: Constant Head; Flow Transfer.	107
Figura 72 - Condizioni al contorno del modello di flusso: Constant Flow.	108
Figura 73 - Confronto tra la piezometria ricostruita per interpolazione e quella calcolata dal modello.	115
Figura 74 - Residui dei carichi idraulici osservati e calcolati.	116
Figura 75 - Mappa dei residui dei carichi idraulici osservati e calcolati: layer 1 silce 1- 2.	117

Figura 76 - Mappa dei residui dei carichi idraulici osservati e calcolati: layer 2 silce 3 - 4.	118
Figura 77 - Mappa dei residui dei carichi idraulici osservati e calcolati: layer 3 silce 5 - 6.	119
Figura 78 - Elaborazioni statistiche di calibrazione: Scatter plot dei residui.	120
Figura 79 - Elaborazioni statistiche di calibrazione: Istogramma di frequenza dei residui.	120
Figura 80 - Soluzione del modello di flusso: isopiezometriche slice 1.	123
Figura 81 - Soluzione del modello di flusso: isopiezometriche slice 3.	124
Figura 82 - Soluzione del modello di flusso: isopiezometriche slice 5.	125
Figura 83 - Sezione idrogeologica n°1.	126
Figura 84 - Sezione idrogeologica n°2.	126
Figura 85 - Sezione idrogeologica n°3.	126
Figura 86 - Sezione idrogeologica n°4.	127
Figura 87 - Sezione idrogeologica n°6.	127
Figura 88 - Sezione idrogeologica n°7.	127
Figura 89 - Sezione idrogeologica n°8.	128
Figura 90 - Soluzione del modello di flusso: velocità di flusso calcolato al layer 1.	129
Figura 91 - Soluzione del modello di flusso: velocità di flusso calcolato al layer 3.	130
Figura 92 - Soluzione del modello di flusso: velocità di flusso calcolato al layer 5.	131
Figura 93 - Soggiacenza della falda calcolata dal modello di flusso.	132
Figura 94 - Aree di potenziale risorgiva delle acque di falda calcolate dal modello.	133
Figura 95 - Interventi di MiSE e bonifica privati presenti nel SIN di Napoli orientale.	148
Figura 96 - Interventi di progetto.	151
Figura 97 - Interventi complessivi nell'area del SIN di Napoli orientale.	152
Figura 98 - Interventi di progetto MiSPT (A) con piezometria Ante Operam (Output Modello Layer 1).	154
Figura 99 - Interventi di progetto MiSPT (B), MiSPT (I) con piezometria Ante Operam (Output Modello Layer 1).	155
Figura 100 - Interventi di progetto MiSPT (C) con piezometria Ante Operam (Output Modello Layer 3).	157
Figura 101 - Interventi di progetto MiSPT (D) e MiSPT (E) con piezometria Ante Operam	159
Figura 102 - Piezometria Ante Operam (Layer 1) con opere di bonifica dei privati esportate in GIS.	163
Figura 103 - Piezometria Post Operam (Layer 1) con opere di progetto esportate in GIS.	164
Figura 104 - Piezometria Post Operam (Layer 1) con opere di progetto esportate in GIS.	165
Figura 105 - Soluzione del modello di flusso Post Operam: isopiezometriche Layer 3.	166
Figura 106 - Piezometria Post Operam (Layer 3) con opere di progetto esportate in GIS.	167
Figura 107 - Soluzione del modello di flusso Post Operam: isopiezometriche Layer 5.	168

Figura 108 - Piezometria Post Operam (Layer 5) con opere di progetto esportate in GIS.	169
Figura 109 - Efficienza idraulica degli interventi: area di influenza e cattura dei pozzi di MiSPT (Layer 1).	170
Figura 110 - Efficienza idraulica degli interventi: area di influenza e cattura dei pozzi di MiSPT (Layer 2).	171
Figura 111 - Efficienza idraulica degli interventi: area di influenza e cattura dei pozzi di MiSPT (Layer 3).	172
Figura 112 - Soggiacenza della falda calcolata dal modello di flusso Post Operam.	173
Figura 113 - Aree di potenziale risorgiva delle acque di falda calcolate dal modello Post Operam.	174
Figura 114 - Interventi di progetto MiSPT (A) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 1).	177
Figura 115 - Interventi di progetto MiSPT (A) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 3).	178
Figura 116 - Interventi di progetto MiSPT (A) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 5).	179
Figura 117 - Interventi di progetto MiSPT (B), MiSPT (I) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 1).	182
Figura 118 - Interventi di progetto MiSPT (B), MiSPT (I) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 3).	183
Figura 119 - Interventi di progetto MiSPT (B) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 5).	184
Figura 120 - Interventi di progetto MiSPT (C) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 1).	188
Figura 121 - Interventi di progetto MiSPT (C) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 3).	189
Figura 122 - Interventi di progetto MiSPT (C) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 5).	190
Figura 123 - Interventi di progetto MiSPT (D), MiSPT (E) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 1).	193
Figura 124 - Interventi di progetto MiSPT (D), MiSPT (E) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 3).	194
Figura 125 - Interventi di progetto MiSPT (D), MiSPT (E) con piezometria Post Operam (Output Modello Layer 5).	195
Figura 126 – Area d'intervento di bonifica e MiSE – I Fase.	201
Figura 127 - Dominio di calcolo del modello numerico di dettaglio.	202
Figura 128 - Discretizzazione dello spazio orizzontale in mesh triangolari.	203
Figura 129 - Slice 1: Superficie topografica.	204
Figura 130 - Slice 3: Base delle alluvioni di ambiente fluvio-lacustre (A).	205
Figura 131 - Slice 4: Tetto dei depositi Tufacei (TSV e TGN).	206

Figura 132 - Slice 5: Base dei depositi Tufacei (TSV e TGN)	207
Figura 133 - Modello discreto 3D: Mesh e Griglia di calcolo.	208
Figura 134 - Modello discreto 3D: Layers e Slices.	208
Figura 135 - Ricostruzione 3D del modello geologico.	209
Figura 136 - Sezione verticale E-W e N-S del modello geologico 3D.	209
Figura 137 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -5 metri s.l.m).	210
Figura 138 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -10 metri s.l.m).	210
Figura 139 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -15 metri s.l.m).	211
Figura 140 - Mappa dei residui dei carichi idraulici osservati e calcolati: layer 1 e 2 (silce 1- 2 – 3).	214
Figura 141 - Elaborazioni statistiche di calibrazione: Scatter plot dei residui.	215
Figura 142 - Elaborazioni statistiche di calibrazione: Istogramma di frequenza dei residui.	215
Figura 143 - Soluzione del modello di flusso e carichi idraulici misurati (isopiezometriche slice 1 esportate in GIS).	216
Figura 144 - Soluzione del modello di flusso e carichi idraulici misurati (isopiezometriche slice 3 esportate in GIS).	217
Figura 145 - Soluzione del modello di flusso: isopiezometriche slice 1 (Output Feflow).	218
Figura 146 - Soluzione del modello di flusso: isopiezometriche slice 3 (Output Feflow).	219
Figura 147 - Soluzione del modello di flusso: isopiezometriche slice 5 (Output Feflow).	220
Figura 148 – Interventi di MiSE e bonifica privati nell'area nord est del SIN.	223
Figura 149 - Variazione della dispersività longitudinale in funzione della distanza	232
Figura 150 – Estensione dei plumes di contaminazione e interventi di progetto (I Fase).	240
Figura 151 – *Estensione dei plumes di contaminazione e interventi di progetto (I Fase).	241

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Parametri chimico – fisici rilevati.	64
Tabella 2 - Sintesi delle prove di permeabilità eseguite nell'acquifero di Napoli orientale.	70
Tabella 3 - Parametri progettuali dei sistemi privati di MiSE.	147
Tabella 4 - Parametri progettuali dei sistemi di MiSPT (A) e (B).	196
Tabella 5 - Parametri progettuali dei sistemi di MiSPT (C), (D) ed (E).	197
Tabella 6 - Parametri Kd e K [-] di riferimento	235

1. PREMESSA

La presente relazione illustra metodologia e risultati delle attività riguardanti la modellizzazione numerica del flusso delle acque sotterranee relativo all'intera area costiera del SIN di Napoli Orientale. Lo studio modellistico rappresenta il risultato finale di un percorso che è partito dallo Studio di Fattibilità redatto nel 2008, propedeutico alle successive fasi di progettazione dell'interventi previsti, e proseguito nel Progetto Preliminare sviluppato e presentato nel 2010.

Il modello di flusso è stato implementato principalmente sulla base dei dati disponibili dai Piani della Caratterizzazione relativi alle diverse aree industriali nell'ambito del SIN, attraverso un'attività di sintesi e omogeneizzazione in un quadro per quanto possibile unitario. Tale attività di omogeneizzazione è stata supportata anche dai dati idrodinamici e stratigrafici derivanti dalle indagini nell'ambito del Piano delle Indagini integrative finalizzate alla Progettazione Definitiva condotta da SOGESID nel 2012.

Il modello costituisce uno strumento di analisi, omogeneizzazione e sintesi degli elementi che derivano dai singoli Piani della Caratterizzazione, a supporto di valutazioni e scenari di progetto alla scala dell'intero territorio. Il modello matematico di flusso ha permesso di verificare ed individuare le alternative possibili di intervento e la contemporanea predisposizione come strumento di supporto alle decisioni.

L'importante mole di dati acquisiti spesso non derivando da un quadro conoscitivo eterogeneo e da indagini non specificamente finalizzate alla caratterizzazione idrodinamica, ha richiesto uno sforzo notevole e particolare attenzione nella ricostruzione degli schemi stratigrafici, dei corpi acquiferi e acquitardi, nella parametrizzazione idrodinamica, nella definizione del modello concettuale di alimentazione e ricarica della falda. Ciò ha portato alla costruzione di uno schema concettuale semplificato ma consistente con gli studi geologici e idrogeologici condotti da Celico (2001) per il C.U.G.R.I (Dinamiche idrogeologiche nella piana ad Oriente di Napoli nell'ultimo secolo), e da Corniello, de Riso e Ducci (2002) nello Studio Geologico- Stratigrafico e idrogeologico quantitativo nel Piano di Caratterizzazione del Sito di Interesse Nazionale di Napoli Orientale.

Obiettivo dell'attività di modellazione numerica è la valutazione e la verifica di efficienza di possibili interventi per la messa in sicurezza e bonifica delle acque di falda dell'intero sito industriale, attraverso un idoneo sistema di confinamento idraulico e/o fisico che tenga conto di quanto già implementato e analizzato nello Studio di Fattibilità e delle caratteristiche progettuali individuate nel Progetto Preliminare. L'obiettivo specifico dell'intervento prevede che sia impedita la diffusione di contaminanti dall'area industriale di Napoli nelle zone limitrofe e verso i principali recettori della contaminazione, con particolare riferimento al sistema marino.

Il percorso metodologico seguito per la realizzazione dello studio, successivamente descritto nel dettaglio, ha riguardato una prima fase di raccolta, analisi ed integrazione dei dati pregressi, a cui è seguita la ricostruzione dell'assetto stratigrafico ed idrogeologico di dettaglio e la ricostruzione del

quadro generale della contaminazione delle aree interessate dallo studio. In un contesto complesso e marcatamente eterogeneo come quello in esame, uno sviluppo del modello a livello progettuale dovrà necessariamente partire dall'affinamento del modello concettuale, più specificamente nei settori di possibile intervento, attraverso l'acquisizione di ulteriori elementi conoscitivi, quali in particolare:

- rilievo piezometrici, riferibili a misure eseguite sull'intero SIN, e rappresentativi di differenti stati idrologici e di ricarica dell'acquifero;
- dati di maggiore dettaglio relativi ai prelievi/reimmissioni da/verso falda, compresi gli scarichi al suolo o nel sottosuolo di acque bianche delle superfici pavimentate;
- localizzazione di strutture in sottterraneo esistenti o in progetto interferenti con il flusso di falda;
- prove di permeabilità per la caratterizzazione idrodinamica dei corpi acquiferi.

L'attività complessiva di modellizzazione si sviluppa in funzione dei seguenti obiettivi, corrispondenti a fasi di studio:

- ricostruzione del modello geologico tridimensionale del sito;
- messa a punto del modello di flusso "ante operam", riferito alla condizione di flusso attuale, a supporto della progettazione degli interventi di bonifica e messa in sicurezza;
- applicazione del modello per scenari di intercettazione della falda nelle differenti sezioni o comparti fisici del SIN e valutazioni della complementarietà di interventi di bonifica e di barrieramento idraulico.

Il modello di flusso è stato implementato principalmente sulla base dei dati disponibili dai Piani della Caratterizzazione relativi alle diverse aree industriali nell'ambito del SIN, attraverso un'attività di sintesi e omogeneizzazione in un quadro per quanto possibile unitario. Tale attività di omogeneizzazione è stata supportata anche dai dati idrodinamici e stratigrafici derivanti dalle indagini integrative e di rilievo piezometrico eseguite da SOGESID nel 2012 e validate dall'ARPA Campania. Rispetto a quanto già formulato nello Studio di Fattibilità e nel Progetto Preliminare sono stati acquisiti ed elaborati un importante numero di dati geognostici e piezometrici derivanti da campagne di caratterizzazione ambientale interne al SIN riferibili a quelle aree che prima del 2011 non avevano ancora provveduto a tale adempimento ai sensi del D.Lgs n.152/2006.

Il quadro conoscitivo complessivo è composto da indagini non specificamente finalizzate alla caratterizzazione idrodinamica, il modello costituisce comunque uno strumento di analisi idrogeologica che pur che pur derivando elementi dai singoli Piani della Caratterizzazione permette di definire un quadro d'insieme e di sintesi il più possibile omogeneo, in grado pertanto di offrire una ricostruzione plausibili considerazioni del fenomeno del flusso idrico sotterraneo a supporto di scenari di progetto alla scala dell'intero territorio.

A riguardo schemi stratigrafici e degli acquiferi, parametrizzazioni idrodinamiche, modelli concettuali di alimentazione e ricarica sono stati oggetto di una complessiva integrazione e

reinterpretazione in un quadro unitario. Ciò ha portato in alcuni casi alla costruzione di schemi concettuali ovviamente semplificati il più possibile coincidenti con la realtà composta di partenza e rappresentativi a livello più ampio del quadro idrodinamico e dello schema di flusso.

Anticipando considerazioni che saranno sviluppate nel seguito in maggiore dettaglio, le attività hanno condotto alla costruzione di uno strumento di calcolo attendibile ed efficace come modello di bilancio idrogeologico per le differenti macro aree del SIN.

Alla scala del dettaglio locale, alcuni elementi piezometrici evidenziati dai PdC sono invece risultati calibrabili solo attribuendo al modello peculiarità locali non del tutto supportate dal modello concettuale quale risultante dai Piani medesimi, né riscontro diretto per quanto osservabile in campo o dalle indagini integrative eseguite. Nella necessità di poter offrire un quadro d'insieme unitario del flusso di falda e non avendo altri dati a disposizione, sono stati utilizzati valori di monitoraggio piezometrico nell'area non coevi dal punto di vista temporale, introducendo di fatto un elemento d'incertezza nella lettura delle soluzioni modellistiche e concettuali. Le discordanze riscontrate dal punto di vista piezometrico sono state valutate ed evidenziate, evitando qualsiasi "forzatura" dello schema concettuale, e costituiscono elementi di verifica a supporto di un'eventuale sviluppo del modello per applicazioni alla scala del dettaglio di progettazione degli interventi.

Il definitiva il modello implementato è stato applicato per la definizione del campo di moto della falda superficiale costiera e la valutazione dei flussi attraverso sezioni di bilancio corrispondenti a possibili linee di intercettazione della falda a valle delle aree contaminate.

2. QUADRO DI RIFERIMENTO E MODELLO CONCETTUALE DEL SITO

Come citato in premessa, la costruzione di un modello concettuale di riferimento propedeutica all'implementazione del modello numerico di flusso idrico sotterraneo, rappresenta la fase ultima di un percorso di acquisizione, analisi ed elaborazione dati che ha avuto inizio con lo Studio di Fattibilità redatto e presentato nel 2008 e proseguito con il Progetto Preliminare del 2010. Si è proceduto dunque attraverso una integrazione dati che ha permesso di ridurre le incertezze dei risultati procedendo attraverso un processo di successive approssimazioni del sistema fisico e dei processi naturali.

La formulazione del Modello Concettuale idrogeologico definitivo del sito si è basata sull'integrazione dei dati derivanti dai differenti Piani di Caratterizzazione delle aziende ricadenti nell'ambito del SIN, oltre che sui riscontri delle indagini eseguite nel sito nell'ambito delle attività di caratterizzazione condotte da SOGESID. I dati a disposizione sono stati acquisiti e resi disponibili da vari soggetti pubblici quali:

- il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM);
- il Commissario di Governo per l'emergenza rifiuti, bonifica e tutela delle acque nella Regione Campania;
- la Regione Campania;
- il Comune di Napoli;
- la Provincia di Napoli;
- il Consorzio di Bonifica delle Paludi di Napoli e Volla
- l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Campania;
- il C.U.G.R.I.

Partendo dai dati disponibili presso il MATTM, relativi ai risultati dei piani di Caratterizzazione presentati negli ultimi anni dalle aziende, e con la successiva campagna di indagini integrativa condotta da SOGESID nel 2012, è stato possibile acquisire informazioni che hanno consentito di migliorare le conoscenze del quadro litostratigrafico ed idrogeologico su specifici settori dell'area, in particolare:

- dati di caratterizzazione e di monitoraggio ambientale nelle aree interne al SIN presentati al MATTM;
- indagini geognostiche e prove di permeabilità eseguite da SOGESID nell'ambito del piano di Indagini integrative (2012);
- rilievi piezometrici eseguiti su punti selezionati nelle aree demaniali, con riferimento alla rete di piezometri di monitoraggio dell'ARPA Campania nel SIN (2012);
- dati forniti dal Ministero dell'Ambiente relativi al monitoraggio piezometrico delle aziende interessate da attività di caratterizzazione nel corso degli anni compresi tra il 1998 e il 2014.

L'integrazione ed omogeneizzazione del materiale documentale e dei dati sperimentali disponibili ha comportato le seguenti attività:

- definizione del modello geologico stratigrafico;
- definizione dell'assetto piezometrico di riferimento;
- stima dei termini di bilancio idrogeologico;
- parametrizzazione idrodinamica dell'acquifero;
- ricostruzione del modello concettuale idrogeologico;
- traduzione del sistema fisico di flusso idrico sotterraneo in modello matematico.

In seguito verranno descritte in dettaglio metodologia e risultati delle attività citate.

2.1 Inquadramento dell'area di studio

Nella presente relazione, che fa riferimento all'intera area interessata dagli interventi di Messa in Sicurezza e Bonifica delle acque di falda, vengono sintetizzate le attuali conoscenze geologico-strutturali e idrogeologiche del territorio derivanti oltre che dalla bibliografica esistente anche dai risultati dei Piani di caratterizzazione attuati dai soggetti pubblici e privati insediati all'interno del Sito di Interesse Nazionale di Napoli Orientale.

L'area industriale di Napoli è stata inclusa nell'elenco dei Siti di Interesse Nazionale, secondo quanto stabilito dalla legge 426/98 ed è stato successivamente perimetrata con ordinanza commissariale del Sindaco di Napoli del 29/12/1999. L'area perimetrata, ricadente integralmente nel territorio amministrativo del Comune di

Napoli, interessa i quartieri orientali di Barra, Poggioreale, Ponticelli e San Giovanni e ha un'estensione complessiva di circa 827 ettari (Figura 2.1). Nella perimetrazione è compresa anche l'area marina (entro la batimetrica -50) antistante alle aree industriali che si addentrano per circa 3.000 metri dalla linea di costa. Gran parte dell'area era una depressione morfologica paludosa fino alla metà del 400, data in cui iniziarono i lavori di bonifica idraulica che portarono alla creazione del "Fosso Reale" e una rete di canali minori. La rete idrografica risulta poco sviluppata e la pressione antropica ha portato alla "tombatura" dei corsi d'acqua esistenti.

La piana ad Oriente di Napoli compresa all'interno del sito di Interesse Nazionale (SIN) è delimitata dal distretto vulcanico dei Campi Flegrei ad NW ed il Somma-Vesuvio a SE. L'unico corso d'acqua che defluiva perennemente era il Sebeto che in seguito fu privato di ogni alimentazione. Il sito caratterizzato dalla contemporanea presenza di aree industriali dismesse e attive, di attrezzature portuali e di popolosi quartieri, ha subito un'industrializzazione del territorio iniziata alla fine del settecento che è andata crescendo fino a raggiungere il culmine nel periodo compreso tra gli anni 50-'70 con il nascere di impianti industriali, termoelettrici, petrolchimici, meccanici, alimentari, tessili, concerie e vetrerie. Nel periodo tra l'82 e il '90 si è assistito a un progressivo processo di deindustrializzazione. Le attività industriali che hanno interessato l'area sono le cause del degrado ambientale dell'intero sito di Napoli Orientale.

Al fine di intercettare le acque di falda contaminate e di evitare anche la loro diffusione verso il mare, è in corso un'azione di coordinamento per assicurare la continuità dei tratti di diaframma impermeabili progettati dall'Autorità Portuale di Napoli, dalla Tirreno Power S.p.A. e dal Commissario di Governo per l'Emergenza Bonifiche e della Tutela delle Acque della Regione Campania che coprono una lunghezza complessiva di circa 2.2 km rispetto un'estensione di circa 5.3 km della linea di costa perimetrata, a valle dell'area industriale inclusa nel SIN di Napoli Orientale (Figura 1). Nel presente lavoro di analisi idrogeologica quantitativa allo scopo di implementare uno strumento tecnico di supporto per la progettazione definitiva degli interventi di Messa in Sicurezza e Bonifica delle acque di falda del SIN di Napoli Orientale si è proceduto alla definizione di un dominio di analisi che fosse sufficientemente ampio da includere l'intero perimetro del SIN e che potesse a sua volta tenere in considerazione anche le principali caratteristiche idrogeologiche dell'area, fermo restando che i dati disponibili per lo studio sono quasi esclusivamente riferibili a caratterizzazioni ambientali avvenute nel corso degli anni all'interno dell'area SIN. Per tale scopo si è proceduto alla suddivisione dell'area di interesse in un dominio di analisi che si riporta in Figura 2, l'area di studio così definita ricopre una superficie totale di circa 1597 ettari. Di seguito tutte le elaborazioni e le soluzioni modellistiche saranno riferite a questo dominio geometricamente così definito.



Figura 1 - Perimetrazione del Sito di Interesse Nazionale di Napoli Orientale.



Figura 2 - Dominio di analisi e delle elaborazioni modellistiche.

2.2 Condizioni climatiche

Tutto il territorio regionale della Campania trae vantaggio, oltre che dell'esposizione al mare, dalla presenza di ampie e profonde valli, che dalle pianure litoranee si incuneano fra le montagne, facilitando la penetrazione degli influssi di origine marittima. Il clima presente nel territorio consortile in linea di massima ha caratteristiche mediterranee, con una fase estiva secca e un massimo delle precipitazioni in autunno, che vanno a scemare in primavera ed in inverno. Si segnala una temperatura media massima di circa 21°C con un picco massimo di circa 36,5°C ed una temperatura media minima di 11°C con un picco minimo di - 2,2°C.

All'interno di tale clima mediterraneo si possono individuare, secondo il sistema proposto da Thornwaite, tre fasce climatiche ben definite:

- una fascia costiera molto influenzata dalla presenza del mare; si rilevano le temperature in media più elevate (sia estive che annue) ed un clima da umido a subumido;
- una seconda fascia intermedia che comprende i rilievi oltre i 150 metri circa, gran parte della penisola sorrentina, le pianure interne, la zona pedemontana dei rilievi di Gragnano e Castellamare; tale fascia si caratterizza per la mitezza delle temperature e per il clima umido;
- un'ultima fascia (zona più elevata) dove si riscontrano temperature un po' più fresche e clima umido.

Nell'area ristretta riferibile al SIN di Napoli orientale i dati meteorologici sono stati acquisiti dalla stazione del servizio idrografico di Napoli posta ad una quota di 30 metri s.l.m nell'arco di tempo considerato che va dal 1960 al 2006. L'andamento dei valori medi di temperatura mostra nei mesi più freddi (Dicembre, Gennaio e Febbraio) temperature comprese tra 10 e 12°C, mentre nei periodi estivi (Giugno, Luglio e Agosto) i valori medi di temperatura risultano essere sostanzialmente più caldi oscillando fra i 23°C e i 26°C.

Per quanto riguarda le precipitazioni sono riportate come somma mensile della quantità di acqua, sotto forma di pioggia, neve e grandine fuse in mm. Dai dati medi delle diverse stazioni si osserva che il clima è caratterizzato da valori di piovosità con media annuale di 884 mm. Il mese più piovoso è novembre con 126 mm, mentre il mese meno piovoso è luglio con 16 mm.

2.3 Caratteristiche del sistema idrico superficiale e di canalizzazione

Dal punto di vista generale la zona a Oriente di Napoli occupa la porzione centrale della più ampia Piana Campana compresa tra il distretto vulcanico dei Campi Flegrei, ad ovest, i rilievi carbonatici dei Monti Avella e Pizzo d'Alvano, a nord est e ad est, e il Somma-Vesuvio a sud. Essa è morfologicamente suddivisa in due porzioni, la Piana di Volla e l'alto corso dei Regi Lagni, dallo spartiacque superficiale presente lungo l'allineamento S. Anastasia-Casalnuovo-Casoria.

Il bacino idrografico costiero corrispondente all'area di Napoli orientale è quasi integralmente e intensivamente urbanizzato, composto sia dai settori urbani di Napoli che scendono dalle pendici dei Camaldoli e dal Vomero fino all'area pianeggiante di Napoli est e al mare, sia dal territorio più orientale afferente al bacino idrografico del Consorzio di Bonifica delle Paludi di Napoli e di Volla che dalle pendici del Vesuvio giunge alla piana oggi completamente urbanizzata di Napoli est.

Tale settore, posto in destra idraulica del sistema di collettori Secondigliano-Volla, è caratterizzato dalla presenza contemporanea di canali di bonifica e di una fitta rete di collettori comunali. Al suo interno, oltre ad essere presenti i rami minori della rete fognaria comunale, si rinvengono canali di bonifica e grossi collettori pluviali, misti e neri, gestiti dal Servizio Fognature del comune di Napoli, eccezion fatta per il collettore dello Sperone e il canale Corsea, che sono gestiti dal Consorzio di Bonifica delle Paludi di Napoli e Volla.

Dal punto di vista storico la piana del Volla, a cui si riferisce l'area del SIN, era originariamente attraversata da numerosi corsi d'acqua, tra cui il principale era il Sebeto. Gli interventi antropici degli ultimi decenni hanno di fatto cancellato la rete idrografica superficiale che risulta, oggi, praticamente irriconoscibile per le numerose derivazioni e gli interrimenti realizzati. Il bacino è oggi attraversato ad ovest dal canale Sbauzone e, nell'area industriale ad est, dai fossi Volla, Cozzone Reale che, parzialmente interrati e deviati, sversando nell'area portuale di Napoli ove un tempo sfociava l'alveo del Pollena. La piana del Volla, attualmente priva di una rete idrografica superficiale efficiente per lo smaltimento delle acque meteoriche, è quindi soggetta a fenomeni di allagamento divenuti di recente più gravosi anche a seguito del cessato emungimento e del conseguente innalzamento delle falda freatica in precedenza utilizzata per scopi industriali ed acquedottistici.

I sistemi di drenaggio urbano a servizio dei detti bacini superficiali presentano condizioni di funzionamento ben lontane da quelle ottimali, ed i canali di bonifica, oggi regolamentati dal Consorzio di Bonifica delle Paludi di Napoli e Volla, sono stati progressivamente trasformati in collettori fognari a sezione chiusa con funzioni di raccolta delle acque nere e meteoriche dei bacini urbani sottesi (Figura 3). La realizzazione dello schema principale della fognatura a servizio dell'intera città di Napoli è stata effettuata tra il 1889 ed il 1915 con una progressiva trasformazione dei canali di bonifica in condotti fognari; tale schema ha poi dovuto inevitabilmente adeguarsi alle mutate esigenze del tessuto urbano.

La rete è essenzialmente di tipologia mista tramite una serie di manufatti partitori le acque bianche vengono convogliate nel bacino portuale, mentre le acque nere e la componente meteorica non sfiorata dovrebbero avere quale recapito finale l'impianto di depurazione di S. Giovanni a Teduccio o il nuovo impianto di depurazione di Napoli est. In realtà, la suddivisione acque bianche e acque nere a monte dei corpi idrici ricettori non è ancora efficiente, non solo perché non tutte le opere di ripartizione e captazione sono state realizzate, ma anche perché i collettori di tipologia pluviale si trovano di fatto a sversare a mare acque miste, o per l'insufficienza della rete nera o per la presenza di scarichi abusivi.

Ed inoltre è del tutto probabile che nei collettori siano anche presenti acque di falda, considerando che la piezometria della falda costiera è collegata al livello del mare e quindi direttamente incidente rispetto alla giacitura dei collettori per effetto di una carenza di tenuta idraulica che rendono possibile l'interscambio di acqua tra esterno e interno.

In particolare, i principali canali di bonifica, proseguendo da est ad ovest e da nord a sud, sono: il canale Lamia, il canale S. Severino, il canale dello Sperone, il Fosso Reale, il canale Petriccione, l'alveo comune dei torrenti di Pollena. Seguendo il medesimo ordine, i principali collettori sono invece: il collettore Secondigliano- Volla, il nuovo collettore di Capodichino, la fecale di via Galeoncello, il collettore di Via De Roberto, il collettore di scarico dell'Impianto di Napoli-Est, il collettore Orientale del C. Direzionale, il collettore Occidentale del C. Direzionale, il collettore Arenaccia, il collettore Alto Orientale, il collettore di Via delle Breccie, il nuovo collettore di Via Granturco, il collettore Sbauzone e il collettore Sbauzone bis (Figura 4).

Dallo calcolo del bilancio idrico eseguito nello Studio di Fattibilità risulta confermata la ragguardevole entità delle portate superficiali che dal bacino idrografico raggiungono il mare in corrispondenza dell'area del SIN. In particolare è stata stimata una portata media annua di acque fognarie nere di $2.70 \text{ m}^3/\text{s}$ e quella delle media annua di acque meteoriche $1.75 \text{ m}^3/\text{s}$ senza contare la portata drenata dalla falda.

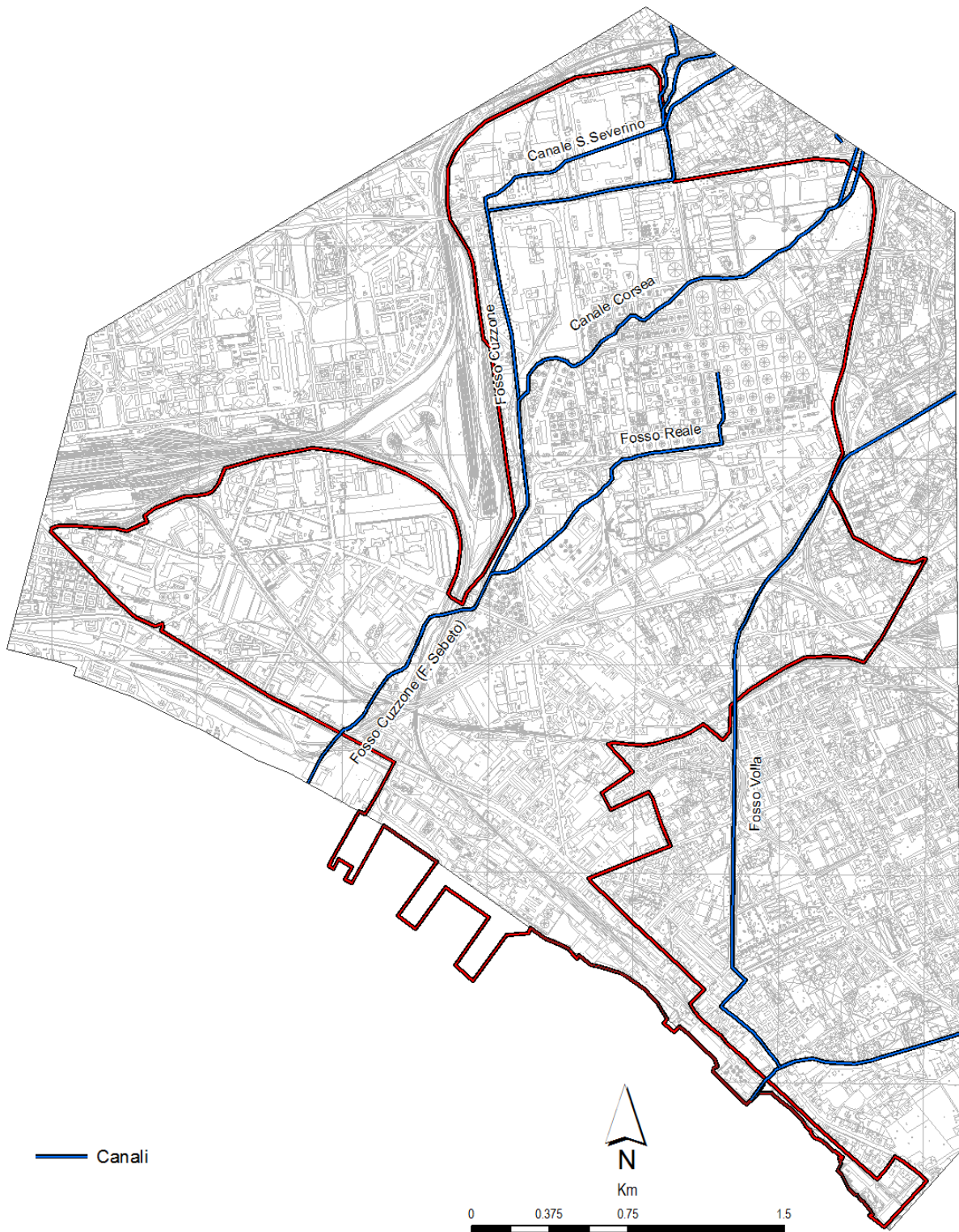


Figura 3 - Reticolo idraulico e opere di bonifica (Consorzio di Bonifica delle Paludi di Napoli e Volla, Piano di Classifica 2008).

2.4 Caratteristiche geologico strutturali

Il SIN è inserito nella vasta depressione di Volla, che occupa il settore sud-occidentale della Piana Campana e le cui caratteristiche geologiche e strutturali sono strettamente connesse alla genesi e all'evoluzione della Piana Campana stessa. L'origine di questa ultima è legata alle fasi distensive e di assottigliamento della crosta continentale provocati dalla rotazione antioraria della penisola italiana. Questo movimento di rotazione ha permesso la creazione dell'attuale Mar Tirreno, a partire dal Miocene superiore, ed è stato accompagnato dall'attivazione di faglie ad alto angolo, a vergenza sia appenninica (NW-SE) sia anti appenninica (NE-SW), che hanno provocato, a partire dal Pliocene superiore, il ribassamento dei blocchi carbonatici che costituivano la catena appenninica meridionale. L'attività tensionale delle faglie ha permesso la formazione, lungo il margine tirrenico, di diverse fosse tettoniche (Graben) separate da alti strutturali (Horst). La Piana Campana rappresenta l'evoluzione di una di queste depressioni strutturali, riempitesi nel corso del tempo di migliaia di metri (da 2000 a 5000 m circa) di prodotti sedimentari (marini e alluvionali) e vulcanoclastici (tufi e piroclastiti sciolte). Inoltre, lungo le faglie che hanno generato la fossa tettonica, si sono impostati diversi apparati vulcanici che oggi si ritrovano ai bordi della Piana (Roccamonfina, Somma-Vesuvio e Campi Flegrei).

Nella Piana Campana, fino alla prima metà del Pleistocene superiore, per la forte subsidenza dell'intera area, si è impostato un ambiente sedimentazione marina, passato alla fine del Pleistocene a un ambiente continentale per l'inversione dei fenomeni di subsidenza. La sedimentazione continentale recente (Pleistocene superiore - Olocene) è rappresentata quasi esclusivamente da depositi vulcanici connessi all'attività eruttiva dei Campi Flegrei (essenzialmente Tufo Grigio Campano o Ignimbrite Campana-circa 33.000 anni fa e Tufo Giallo Napoletano-circa 12.000 anni fa). Lo spessore di tali prodotti è molto variabile e si trovano la di sotto dei depositi piroclastici-alluvionali, generalmente di natura limo-sabbiosa, con intercalati spesso livelli torbosi di origine alluvionale e/o palustre e nell'area sud-occidentale, al di sotto delle piroclastiti e tufi provenienti dai fenomeni eruttivi del Somma-Vesuvio.

I depositi dell'Ignimbrite Campana sembrerebbero essere assenti nella Piana di Volla (Celico et Alii 1997). La depressione di Volla, si estende dall'abitato di Lufrano fino al mare ed è delimitata lungo il margine occidentale dalle colline orientali di Napoli e lungo il margine orientale dal Vesuvio. La sua formazione è successiva alla messa in posto dell'Ignimbrite Campana, e i corsi d'acqua che solcavano l'hanno eroso pressoché completamente. Fino a 25.000 anni fa, lungo i lineamenti strutturali sui quali era impostata la depressione, si sono succedute eruzioni di tipo esplosivo. Successivamente i prodotti piroclastici e lavici del Somma-Vesuvio si riversarono nella depressione sbarrando il naturale deflusso delle acque (paleo-Sebeto) creando aree paludose, con la formazione di depositi torbosi (14.000 anni fa) anche di notevole spessore. Circa 12.000 anni fa la messa in posto del Tufo Giallo Napoletano interessò solo l'area più occidentale della depressione e anch'esso venne successivamente in parte eroso. In epoca storica la depressione di Volla era solcata dal fiume

Sebeto, in cui confluivano le acque di numerosi fossi minori. La captazione di alcune sorgenti (sorgente della Bolla), a partire dal IV secolo, e probabilmente gli effetti di alcuni eventi sismici e vulcanici, determinarono una forte riduzione del flusso delle acque e un nuovo impaludamento della zona.

Infatti, l'area è conosciuta sin dal 950 circa con il nome di "palude di Napoli" ed era disseminata di stagni e acquitrini che vennero bonificati in epoca borbonica. La depressione di Volla è, quindi, caratterizzata da una potente successione piroclastico alluvionale, con intercalazioni di sedimenti marini e di transizione, i cui orizzonti significativi sono rappresentati dai banchi di lava del Somma, dal Tufo Giallo Napoletano, dai tufi legati all'attività del Somma-Vesuvio e dalle lave del Vesuvio di epoca storica. In

Figura 7 è riportato lo stralcio della Carta Geologica d'Italia, foglio Napoli (scala 1:100.000)

Dal punto di vista morfologico la zona interessata dallo studio ricade principalmente nella piana di Volla e nel complesso vesuviano Somma - Vesuvio. La Piana di Volla costituisce la valle del fiume Sebeto, originariamente paludosa e come descritto in precedente trasformata in zona agricola fertile in seguito ad interventi antropici di bonifica. L'area morfologicamente ribassata dal punto di vista strutturale, limitata da faglie, è stata interessata dal vulcanismo potassico dei Campi Flegrei e del Somma-Vesuvio. I depositi, infatti, come dimostrato dall'analisi dei dati geognostici sono caratterizzati spesso dalla presenza di più strati sovrapposti, sviluppati su materiali vulcanici incoerenti e su limi ed argille fluviali. Dominano suoli con struttura granulare, friabili, porosi, con scheletro pomiceo, tessitura franco-sabbiosa, drenaggio interno buono.

Nel caso specifico la conoscenza e la ricostruzione dell'assetto morfologico della superficie topografica costituisce un elemento di fondamentale importanza per la comprensione dei fenomeni di circolazione idrica superficiale e sotterranea, in quanto come sarà illustrato di seguito il livello piezometrico delle acque di falda è molto vicino a quello topografico.

A tale scopo si è proceduto alla ricostruzione dell'assetto morfologico della superficie topografica mediante l'elaborazione dei dati altimetrici acquisiti dalla Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10000, integrati e verificati con le quote associate ai sondaggi e ai piezometri presenti nell'area. I punti sono stati interpolati mediante triangolazione (TIN) e trasformati in formato raster con celle di 10 metri. È stato necessario operare varie correzioni ed eliminare l'insieme dei punti quotati riferiti a fabbricati o manufatti non corrispondenti alla morfologia dell'area. In Figura 5 si riporta il modello digitale del terreno (DTM) ricostruito con una discretizzazione della maglia di rappresentazione di 10x10 metri. La definizione dettagliata delle condizioni altimetriche del sito ha permesso di effettuare alcune importanti considerazioni di natura geologica e idrogeologica. Ciò che appare evidente è la presenza di due zone altimetricamente distinte, ovvero:

- La prima zona è quella che interessa la porzione centrale del SIN, topograficamente più depressa con quote comprese tra 0 e 3 metri s.l.m che si estende lungo l'asse di drenaggio del paleoalveo del Sebeto oggi riferibile al Canale Sperone. Quest'area si estende per

almeno 2 Km ortogonalmente alla linea di costa con una fascia di contorno altimetricamente poco più elevata con quote massime comprese tra 4-6 metri s.l.m come è possibile apprezzare dalla carta delle Altimetrie riportata in Figura 6. Tale area morfologicamente più depressa e con quote minime di 2 metri costituisce un limite di base per il drenaggio delle acque superficiali, con la raccolta del ruscellamento dagli edifici vulcanoclastici ad est del Somma Vesuvio e quello ad ovest del corpo dei Campi Flegrei. La depressione costituisce di fatto anche il recapito delle acque sotterranee, con emergenze e risorgive che alimentavano l'area palustre costiera prima della bonifica e la costruzione di canali che hanno regimato le acque superficiali e drenato i recapiti sorgivi di quelle sotterranee.

- La seconda zona più elevata posta nel settore NW del dominio di studio le quote progrediscono verso massimi di 15 metri s.l.m, mentre lungo il settore SE le quote topografiche aumentano progressivamente sino ai 25 metri s.l.m, definendo i due alti morfologici associati ai sistemi deposizionali vulcanici Flegreo e Vesuviano (Figura 6). Dal punto di vista geolitologico è caratterizzata da una successione di prodotti piroclastici incoerenti con spessori che variano tra i 10 ed i 20 metri, che molto spesso fanno da transizione a materiali lavici ed in talune zone direttamente a materiali tufacei. La successione piroclastica sciolta si presenta in alternanza di ceneri (da sabbioso-ghiaiose a sabbiose-limose), livelli di lapilli pomicei e lapidei. La coltre superficiale si presenta generalmente incoerente, non strutturata, facilmente erodibile, permeabile o molto permeabile.

Questa distinzione tra l'area depressa al centro del SIN, il cui elemento idrologico principale è costituito dal canale Sperone, e quella a quote più elevate al suo contorno rappresenta un motivo fisiografico di fondamentale importanza nella definizione del modello di circolazione idrica sotterranea e nella ricostruzione dei rapporti idrici tra i canali e le acque di falda e degli equilibri di bilancio idrico dell'area.

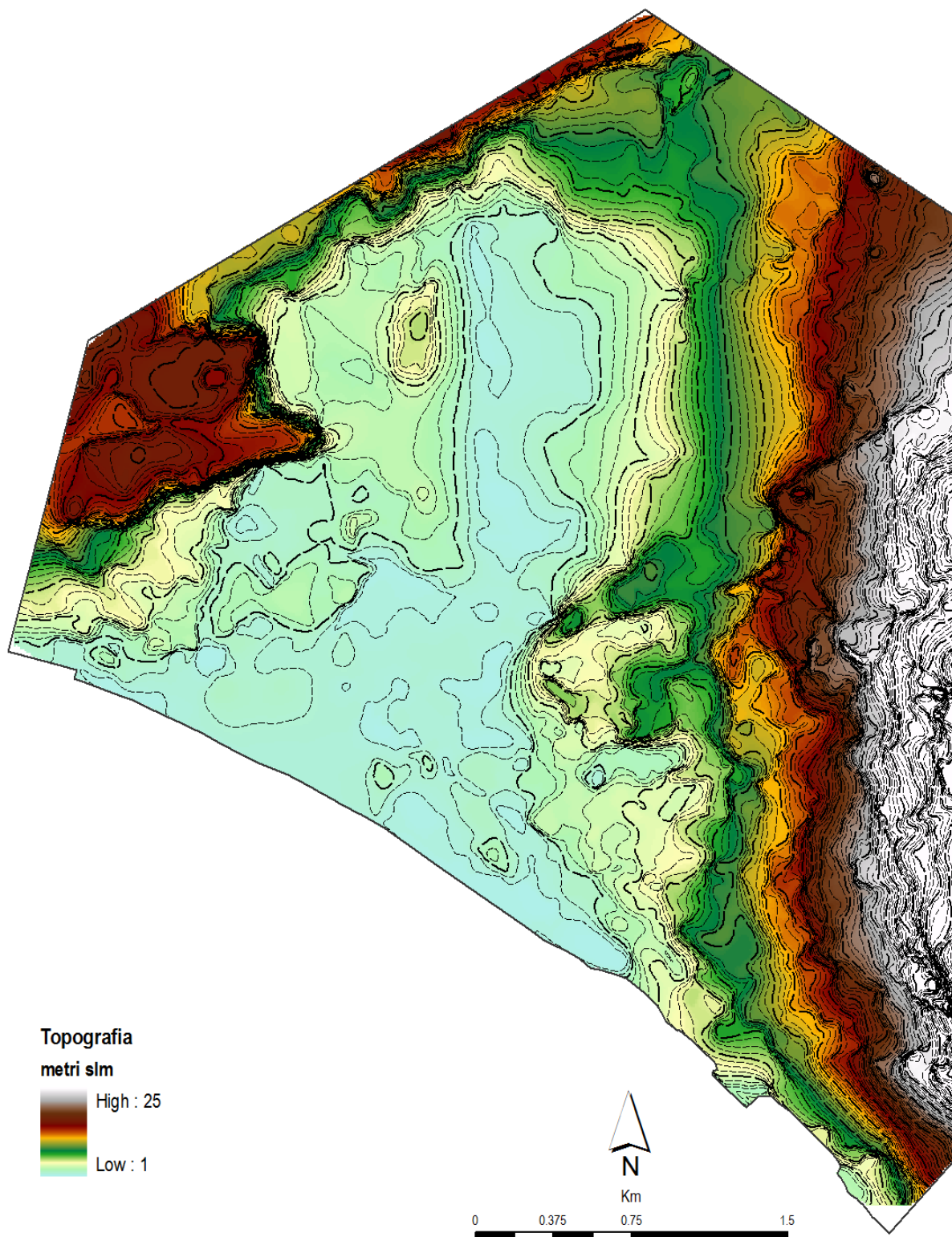


Figura 5 - Ricostruzione del modello digitale del terreno (DTM).

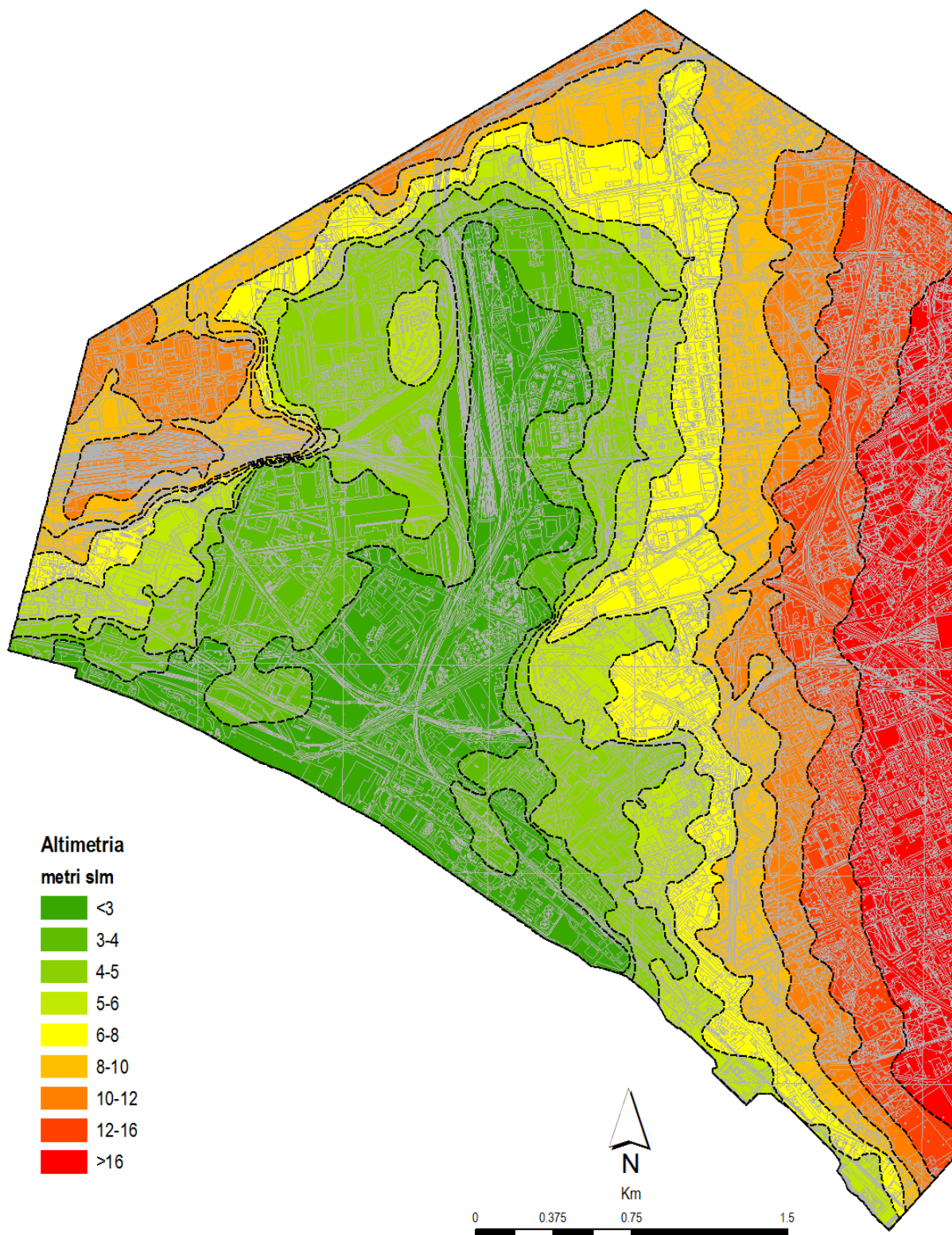


Figura 6 - Ricostruzione delle fasce altimetriche della topografia dell'area.

2.5 Ricostruzione del modello litostratigrafico di riferimento

Come descritto in precedenza la piana ad Oriente di Napoli è stata colmata durante il Quaternario da depositi vulcanici, di origine flegrea e vesuviana, da sedimenti alluvionali e di ambiente marino. In linea generale in affioramento, sono, infatti, presenti depositi alluvionali, a granulometria variabile (da sabbioso ghiaiosa a sabbioso limosa), sedimenti piroclastici, in giacitura primaria e rimaneggiati, e depositi fluvio-lacustri. I depositi di origine piroclastico – alluvionale hanno spessori dell'ordine dei 20 metri con granulometria variabile da sabbie, sabbie - limose a limi sabbiosi con un generale aumento dello stato di addensamento al crescere della profondità. All'interno di tale formazione sono presenti livelli più o meno continui di torba. Al di sotto di questi depositi si rinvengono depositi tufacei di diversa origine. Tali depositi si rinvengono a una profondità generalmente superiore a 20 metri dal p.c., con spessori dell'ordine di decimetri. In particolare alla destra idrologica del Fosso Sebeto-Volla sono presenti i depositi del Tufo Giallo Napoletano mentre nel settore orientale del SIN, alla sinistra idrologica del Fosso Sebeto-Volla, sono presenti i depositi tufacei dell'attività del Somma-Vesuvio.

Per la ricostruzione dell'assetto litostratigrafico dell'area sono stati analizzati i dati acquisiti presso Enti e/o letteratura scientifica. Tali dati anche se diffusamente distribuiti sul territorio d'interesse, sono estremamente eterogenei e il loro grado di dettaglio è molto variabile. In particolare sono risultati disponibili per l'area in esame i dati relativi a:

- i risultati dei Piani di Caratterizzazione e di messa in sicurezza dei singoli siti, in particolare sono state recuperate molte stratigrafie derivanti da 1051 sondaggi, con profondità limitate ai 10-15 metri dal p.c. (Figura 10);
- le stratigrafie riportate in alcune pubblicazioni scientifiche;
- stratigrafie da 15 sondaggi realizzati da SOGESID (2012) nell'ambito del Piano di Indagine integrative;
- stratigrafie da 28 sondaggi acquisiti dal database della Provincia di Napoli;
- le sezioni stratigrafiche di dettaglio riportate su pubblicazioni scientifiche e da altri progetti di messa in sicurezza delle acque di falda all'interno del SIN.

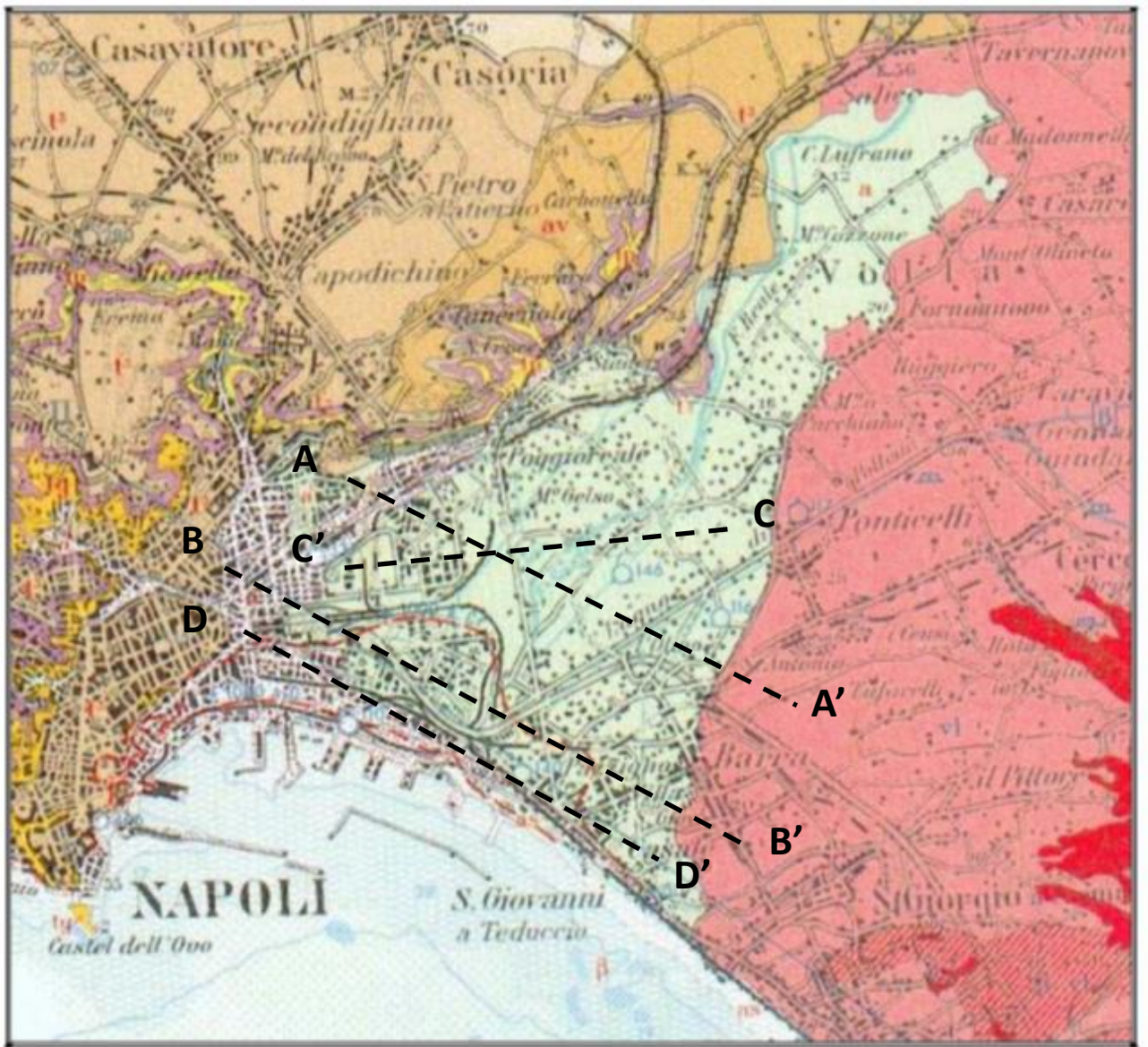
L'indagine stratigrafica ha comportato le seguenti attività:

1. definizione di "unità" omogenee, a cui riferire univocamente i livelli riscontrati nelle stratigrafie delle differenti aziende;
2. analisi delle colonne stratigrafiche e distinzione dei livelli di riferimento in base alle "unità" (riporti inclusi);
3. redazione di profili e sezioni incrociate attraverso l'area del SIN, estesi per interpretazione e correlazione all'intera area di modello;
4. mappatura della quota dei livelli acquiferi, della base e del tetto dei livelli a bassa permeabilità in corrispondenza dei punti a stratigrafia nota;

5. modellazione della quota di base acquifero superiore e della quota del tetto dell'acquifero inferiore; da tale attività sono derivate rappresentazioni matematiche (files grid) delle diverse superfici stratigrafiche, direttamente importabili nel modello numerico di flusso.

A titolo di schema di riferimento idrogeologico e dei rapporti stratigrafici, si riportano di seguito il quadro geologico generale sulla base della Carta Geologica d'Italia del Foglio 183 con indicate le tracce di alcune sezioni geologico interpretative dell'area di studio trasversale alla linea di costa, riportate da vari autori. In particolare si riportano le sezioni litostratigrafiche prodotte da Bellucci et Alii (1998), modificato e integrato da Allocca & Celico (2008) (Figura 8) e quelle del Commissario di Governo per l'emergenza rifiuti, bonifica e tutela delle acque nella Regione Campania (2002) (Figura 9).

Nella depressione del Volla-Sebeto e la fascia costiera, che coincide con la zona di specifico interesse dell'intervento di messa in sicurezza e di bonifica della falda sotterranea, sono presenti intercalazioni di depositi piroclastico-alluvionali, torbe, paleosuoli e sedimenti marini che danno luogo ad un acquifero parzialmente stratificato (cfr. Figura 8, sez. A-A' e B-B'); il locale sistema può essere a più larga scala con un unico corpo idrico avente deflusso unitario, e solo localmente a falde sovrapposte per la presenza di depositi lapidei tufacei a bassa permeabilità con spessori e continuità variabili (cfr. Figura 9 sez. C-C' e D-D') (Viparelli, 1978; Celico F. et Alii, 1995; Commissariato di Governo per l'Emergenza Rifiuti, Bonifica e Tutela delle Acque nella Regione Campania, 2002a; 2002b).



LEGENDA








- | | |
|---|---|
| <p>a
  Depositi limnoproclastici di Agnano e L. D'Averno. Terre nere palustri, torbifere.</p> <p>av
  Prodotti piroclastici flegrei e ceneri vesuviane
  Lapilli chiari non differenziati, depositi piroclastici e loro suoli.</p> <p>af
 </p> <p>vl
  Lapilli e ceneri delle pendici vesuviane inferiori prodotti dall'eruzione del 79 e precedenti: areniti, lapilli e ceneri pisolitiche; pomice chiare.</p> <p>t^a
  Prodotti piroclastici indifferenziati, provenienti da vari centri eruttivi flegrei: ceneri e pozzolane chiare. Lapilli pozzolanici, ceneri e pomice grigie.</p> | <p>va 6
  Scorie e lapilli più o meno stratificati e agglomerati, da grigi a nerastrì, con dicchi e banchi lavici intercalati, nella parte alta e media, ceneriti, prodotti dei vari periodi eruttivi.</p> <p>tb L_s</p> |
|---|---|

Figura 7 - Quadro geologico generale sulla base della Carta Geologica d'Italia del Foglio 183

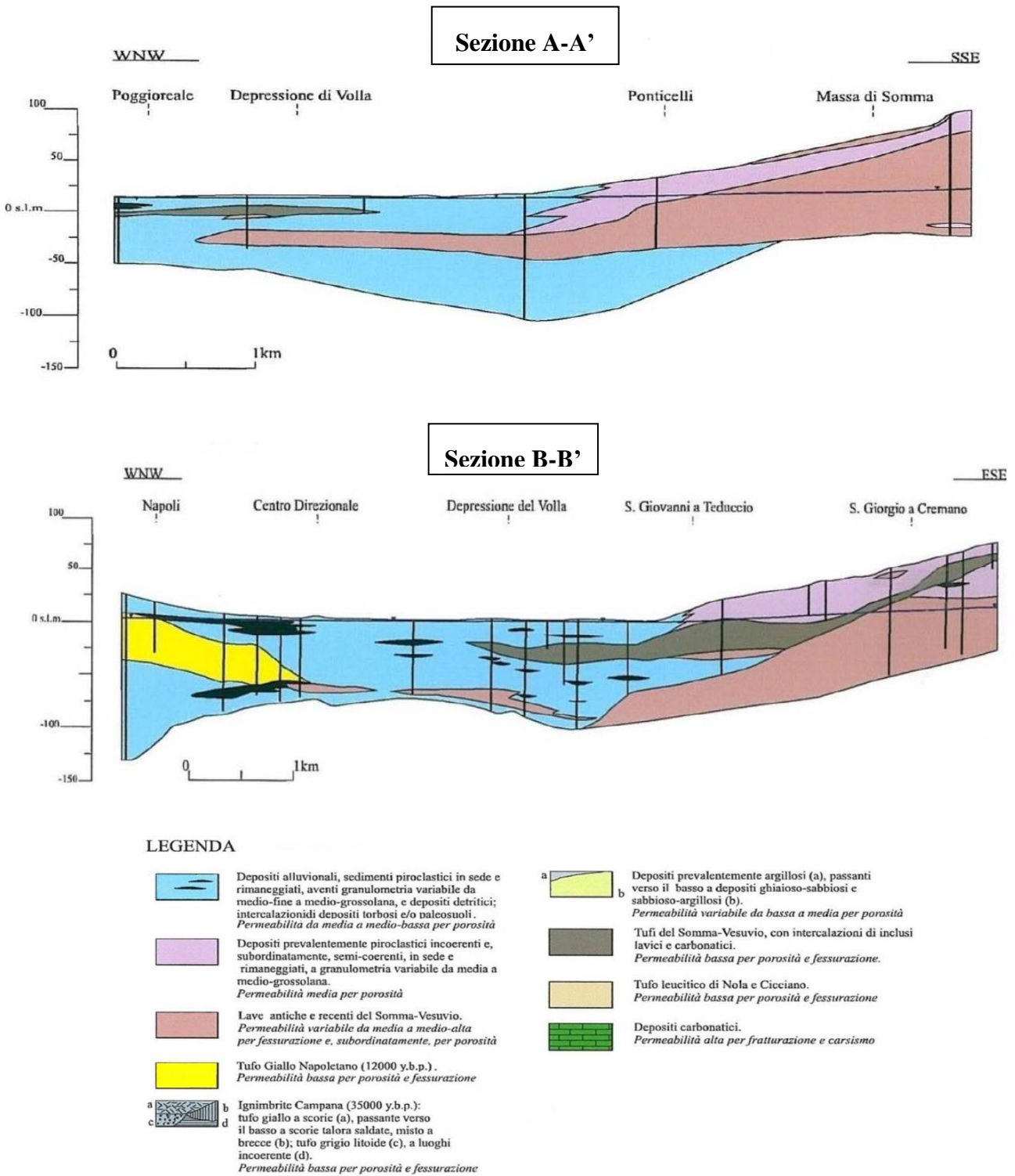


Figura 8 - Sezioni idrostratigrafiche (Bellucci et Alii, 1998, modificato e integrato da Allocca & Celico, 2008).

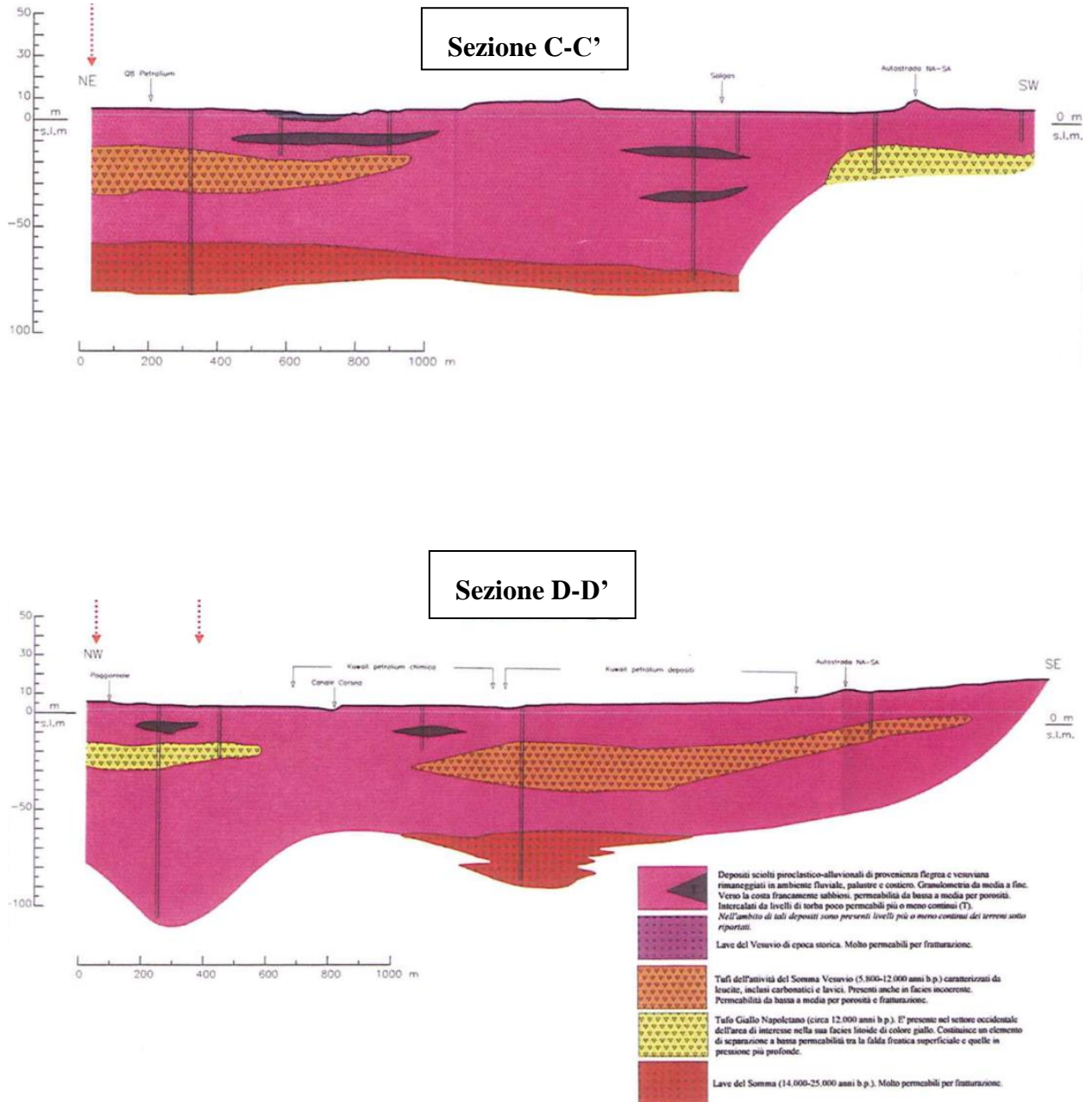


Figura 9 - Sezioni geologiche del settore occidentale del SIN di Napoli Orientale (Commissario di Governo per l'emergenza rifiuti, bonifica e tutela delle acque nella Regione Campania, 2002).

2.5.1 Definizione delle unità litostratigrafiche

In affioramento, sono, infatti, presenti depositi alluvionali, a granulometria variabile (da sabbioso-ghiaiosa a sabbioso-limosa), sedimenti piroclastici, in giacitura primaria e rimaneggiati, e depositi fluvio-lacustri. In conformità con gli elementi geologici riportati nei Piani della Caratterizzazione (PdC) delle singole aziende, e con particolare riferimento alle distinzioni operate dal PdC, sono state definite le seguenti unità della successione lito-stratigrafica:

- Sedimenti marini e alluvionali, con frequenti livelli torbosi e di paleosuolo, particolarmente presenti nella zona più depressa del sito nella parte originariamente occupata dalle acque palustri;
- Depositi piroclastici, colate laviche e orizzonti prevalentemente scoriacei presenti, in misura maggiore, lungo il margine settentrionale del Somma-Vesuvio;
- Depositi tufacei, di origine flegrea e vesuviana (Tufo Grigio Campano, Tufo Giallo Napoletano, Tufi del Somma-Vesuvio, etc.) e depositi piroclastici incoerenti, a granulometria mediamente grossolana, distribuiti, in maniera diversificata, in vari settori della piana.

Le unità suindicate, a cui sono stati riferiti i livelli e le correlazioni stratigrafiche dall'esame delle perforazioni in area SIN, identificano nel complesso materiali e insiemi granulometrici in prima approssimazione omogenei, costituendo tali distinzioni un riferimento anche in termini idrogeologici e del campo di permeabilità dei materiali stessi.

2.5.2 Analisi e modellazione delle superfici litostratigrafiche

Con riferimento ad una selezione significativa dei sondaggi disponibili nell'area del SIN, sono state distinte le differenti unità geologico-idrogeologiche, sulla base delle distinzioni stratigrafiche di cui al punto precedente. Sulla base dei dati analizzati, i primi 60 metri di sottosuolo, nell'area del SIN. Sono stati acquisiti ed analizzate le stratigrafie di 1051 sondaggi, circa l'85% dei sondaggi ha una profondità massima di 10 metri, il 13% con una profondità compresa tra 10 e 20 metri dal p.c. e solo un 2% dei sondaggi ha una profondità di indagine superiore a 20 metri dal p.c.. Per ricostruire l'assetto stratigrafico profondo, almeno fino ai primi 30 metri dal p.c. sono stati eseguiti 15 nuovi sondaggi nel 2012 da SOGESID, inoltre sono stati acquisiti dati stratigrafici da 26 sondaggi presenti nell'area d'interesse e disponibili nel database geologico stratigrafico della Provincia di Napoli con profondità variabile tra un minimo di 25 ad un massimo di 127 metri.

L'insieme dei dati a disposizione ha permesso di ricostruire in modo piuttosto dettagliato l'assetto litostratigrafico dei primi 10-15 metri dal p.c., mentre la porzione più profonda del complesso idrogeologico è stata ricostruita con il supporto oltre che dei dati stratigrafici dei sondaggi profondi (circa 60 in tutta l'area SIN), anche mediante le ricostruzioni delle superfici idrostratigrafiche delle isobate e delle isopache dei Tufo Giallo Napoletano (TGN) e dei Tufi Vesuviani (TV) eseguite

nello Studio geologico-stratigrafico e idrogeologico quantitativo del Piano di Caratterizzazione del SIN di Napoli orientale proposti dal Commissariato di Governo nel 2002.

Importanti per la definizione del modello litostratigrafico di riferimento lungo la fascia costiera sono state anche le sezioni geologiche proposte nel 2005 dall’Autorità Portuale di Napoli nel Progetto Esecutivo eseguite a fronte di indagini geognostiche dettagliate per la realizzazione della barriera fisica come messa in sicurezza permanente della falda fronte mare. Oltre a questo studio sono stati presi in esame i risultati delle indagini integrative eseguite per la progettazione esecutiva di “Bonifica degli arenili di San Giovanni a Teduccio (NA) e dei fondali antistanti – opere di prima fase”. I principali obiettivi dell’indagine era quella di raccogliere informazioni aggiuntive sulla stratigrafia dei terreni sovrastanti il banco di tufo, con particolare attenzione rispetto alla posizione, in profondità, del tetto del banco tufaceo (“Tufo”), in corrispondenza del palancolato di progetto e circa la resistenza e permeabilità dei terreni.

Entrambe le campagne di indagine sopra citate individuano una profondità dal piano campagna del corpo di Tufo compreso fra i 19 ed i 22 metri, quota alla quale sono stati ammorsati i sistemi di barrieramento fisico di progetto. Di contro le stratigrafie dei sondaggi eseguiti da SOGESID nel 2012, posti lungo il limite di costa nella porzione ovest del SIN, definiscono la presenza del Tufo ad una profondità più elevata superiore ai 35 metri e o addirittura assente.

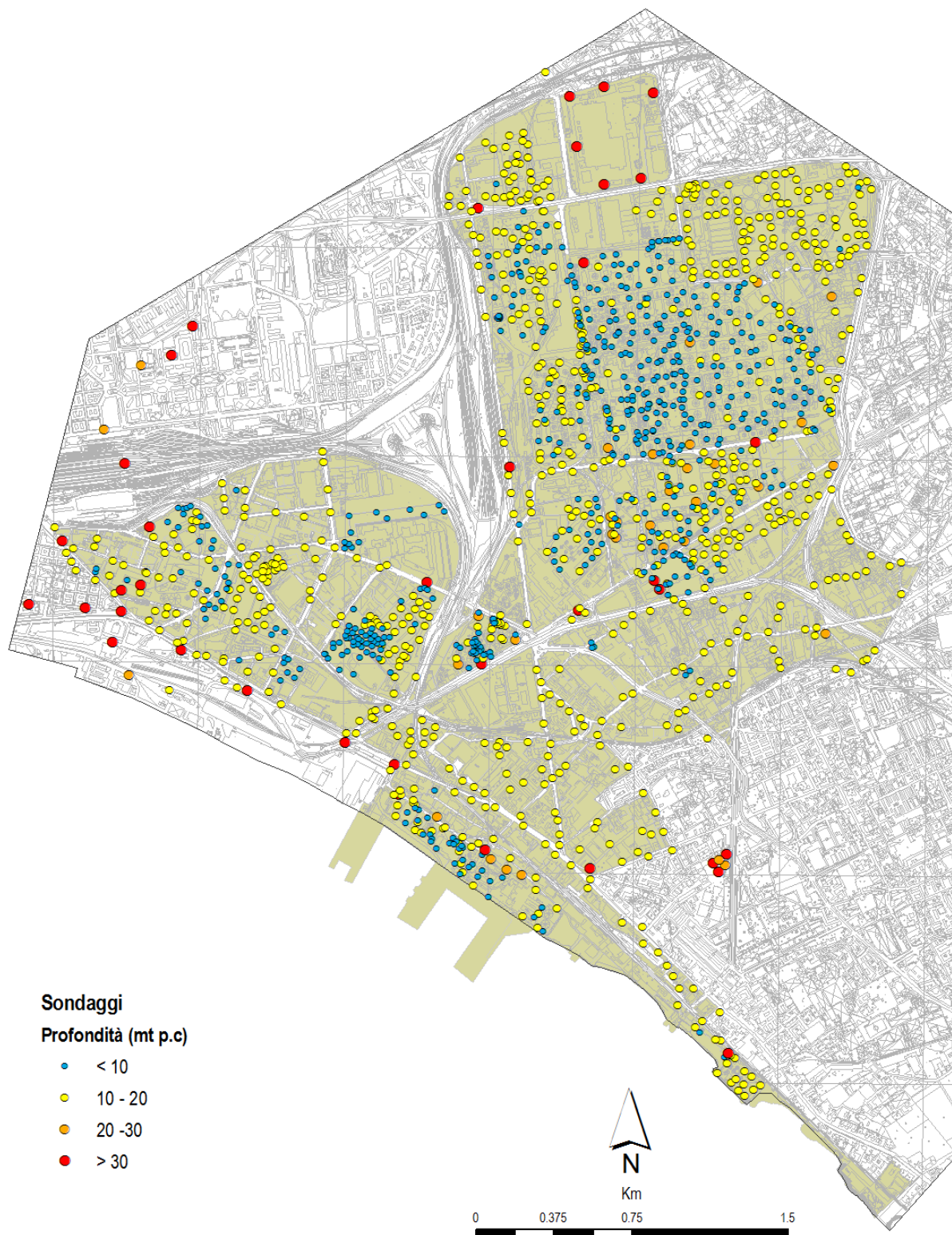


Figura 10 - Quadro dei dati stratigrafici disponibili derivanti dai Piani di Caratterizzazione e di messa in sicurezza delle singole aree, dal Comune e dalla Provincia di Napoli.

Dalle interpretazioni stratigrafiche è possibile descrivere un complesso stratigrafico caratterizzato dall'alto verso il basso, dai seguenti litotipi:

Terreni di riporto (R): estremamente variabili per granulometria e tipologia, sono dovuti alle opere di colmata dei canali e al generale innalzamento della superficie topografica. Spessori medi intorno a 1 – 2 metri con spessori massimi che raggiungono i 5 – 6 metri.

Depositi marino alluvionali (A): depositi di ambiente fluviale, lacustre e costiero, la granulometria varia da media a fine (da sabbie a limi sabbiosi) a molto fini con sostanza organica (limi argillosi e torbe), le variazioni granulometriche sono frequenti sia realmente che lungo le verticali nei primi 10-15 metri dal p.c.. I depositi più fini lacustri sono localizzati in corrispondenza della depressione centrale del sito, e procedendo verso la costa sono più abbondanti le litofacies sabbiose fluviali.

Depositi sciolti piroclastici (PR): piroclastiti di provenienza “flegrea” e “vesuviana” rimaneggiate in ambiente fluviale, lacustre e costiero. La granulometria varia da media a fine (da sabbie a limi sabbiosi) e le variazioni granulometriche sono frequenti sia realmente che lungo le verticali, così come il grado di “addensamento” dei depositi. I depositi sciolti piroclastico alluvionali costituiscono l'acquifero principale dell'area presentando una permeabilità da bassa a media per porosità e spessori generalmente superiori a 20 metri fino al centinaio di metri osservato in alcune verticali. Tali depositi sono intercalati da paleosuoli e livelli di torba più o meno continui.

Nell'ambito della successione dei depositi piroclastico-alluvionali ora descritti sono presenti livelli più o meno continui delle seguenti formazioni:

Lave del Vesuvio (LV): sono lave di epoca storica, sono presenti solo nel settore sud orientale dell'area esterna al perimetro del SIN, in alcuni settori oltre il dominio di studio affiorano con spessori dell'ordine dei 10 m; sono litotipi potenzialmente molto permeabili per fatturazione.

Tufi dell'attività del Somma Vesuvio (TSV): La messa in posto di questi tufi è attribuibile a eventi esplosivi di età inferiore ai 17.000 anni fa, nell'ambito della deposizione di prodotti piroclastici sciolti del Somma – Vesuvio. Sono caratterizzati dalla presenza di inclusi carbonatici e lavici con leucite. È segnalata una facies incoerente talora sottoposta a quella lapidea sede di un corpo acquifero. Si riscontrano nel settore centrale e orientale dell'area in esame con spessori che raggiungono un massimo di 45 metri.

Tufo Giallo Napoletano (TGN): La messa in posto è dovuta a un evento effusivo di circa 12.000 anni fa. Si presenta sia in facies litoide (tufo in s.s.) sia incoerente (pozzolana) e nell'area in oggetto è presente nel sottosuolo nella sua facies litoide di colore giallo. Nella Depressione del centrale della piana costiera di Napoli orientale, originariamente attraversata dal reticolo di canali e corsi d'acqua quali in Volla ed il Sebeto, l'erosione ne ha determinato un graduale assottigliamento. Poggia di sovente sulle lave del Somma. Gli spessori medi riscontrati in sondaggio nell'area e nelle sue immediate vicinanze sono di circa 30 metri, con minimi di 10 m e massimi di 50 m; è generalmente presente a profondità comprese tra 12 e 49 metri dal p.c.. Nella città di Napoli il TGN

litoide costituisce un elemento di separazione a bassa permeabilità tra la falda freatica superficiale e quella in pressione più profonda.

Lave del Somma (LS): nel settore orientale della depressione del Volla il TGN poggia su lave di età compresa tra 14.000 e 25.000 anni fa riferibili all'attività del Somma. Nell'area in esame sono presenti a partire dai 40 - 50 metri di profondità con spessori, indagati, che raggiungono i 30 metri. Sono permeabili per fratturazione.

In prima analisi si è proceduto alla localizzazione dei depositi alluvionali nei sondaggi a disposizione, distinguendo in due classi litologiche, ovvero quelli con più abbondante frazione limosa da quelli con più maggiore componente argillosa. Questa classificazione ha permesso di definire le aree del SIN caratterizzate da depositi alluvionali rispetto a quelle con maggiore presenza di piroclastiti nei primi 10 metri di profondità dal piano campagna (Figura 11 e Figura 12). Appare evidente come le litofacies argillose torbose siano localizzate nella parte topograficamente più depressa, area che storicamente ospitava un sistema lacustre costiero, ambiente deposizionale argilloso con sostanza organica. Allo stesso modo sono stati definiti i limiti e la continuità orizzontale dei depositi tufacei (Figura 13 e Figura 14), che in accordo con quanto già elaborato in letteratura, ha permesso di verificare una discontinuità ed un'assenza del Tufo nei sondaggi profondi localizzati nella parte centro occidentale del SIN, per effetto di erosione dei depositi da parte del sistema idrico superficiale.

Per la ricostruzione del modello geologico sono stati correlati i dati stratigrafici con le ricostruzioni delle superfici idrostratigrafiche proposte nel PdC (2002), sono state dunque elaborate mediante analisi geostatistica le nuove superfici idrostratigrafiche e facendo riferimento alle sezioni stratigrafiche interpretative prodotte da Celico (2001).

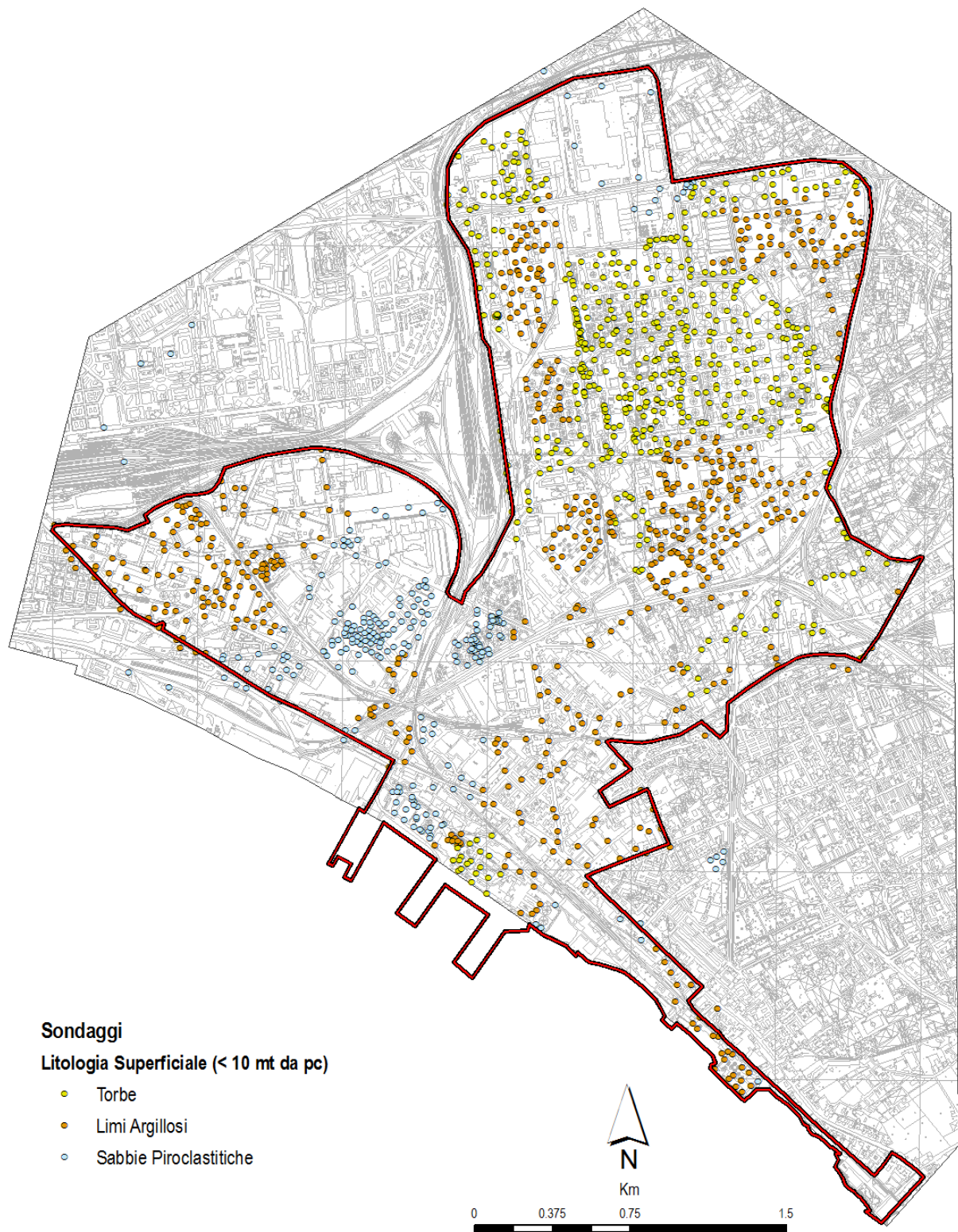


Figura 11 - Analisi stratigrafica dei depositi alluvionali e dei depositi piroclastici.

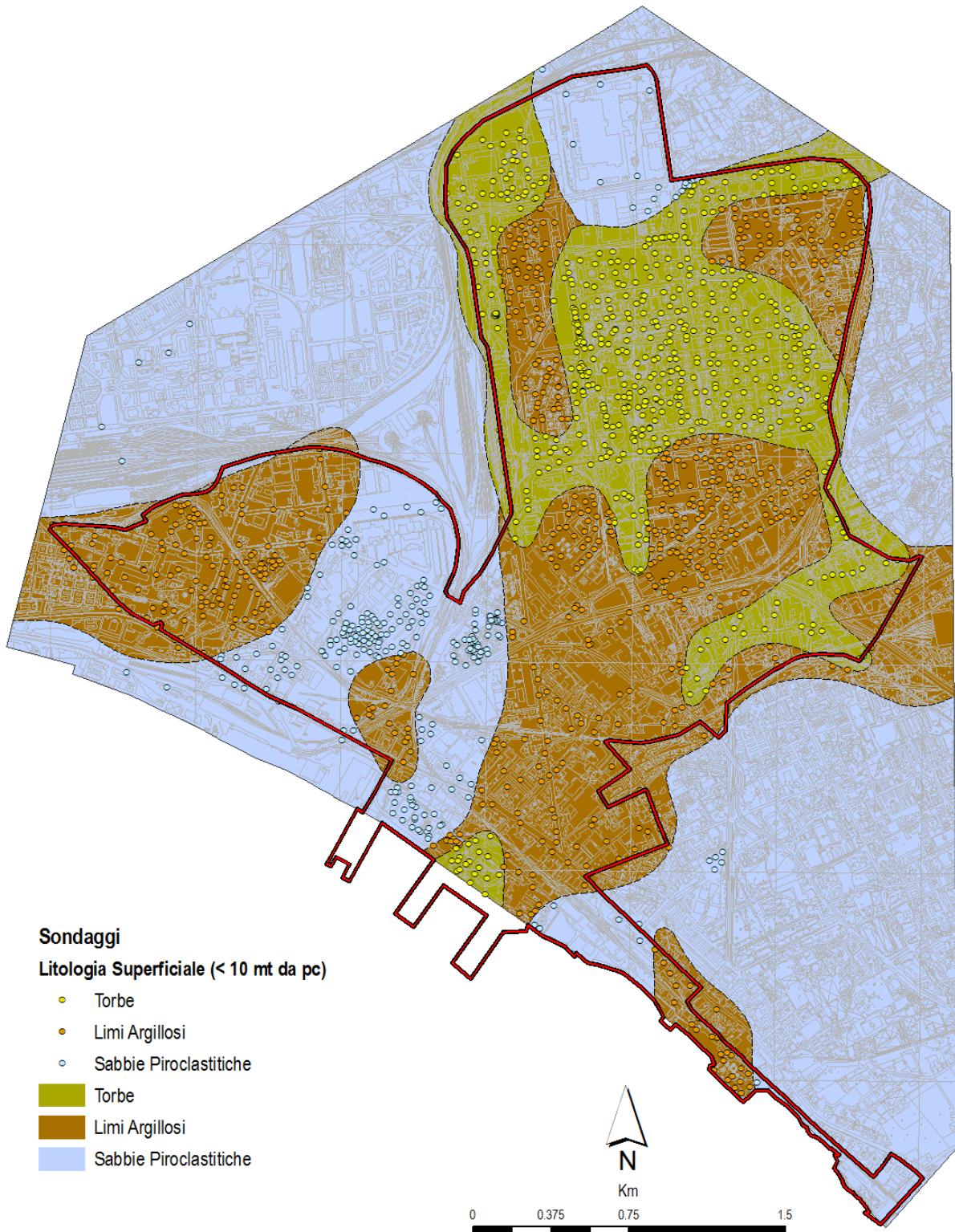


Figura 12 - Ricostruzione dei limiti stratigrafici dei depositi alluvionali e dei depositi piroclastici.

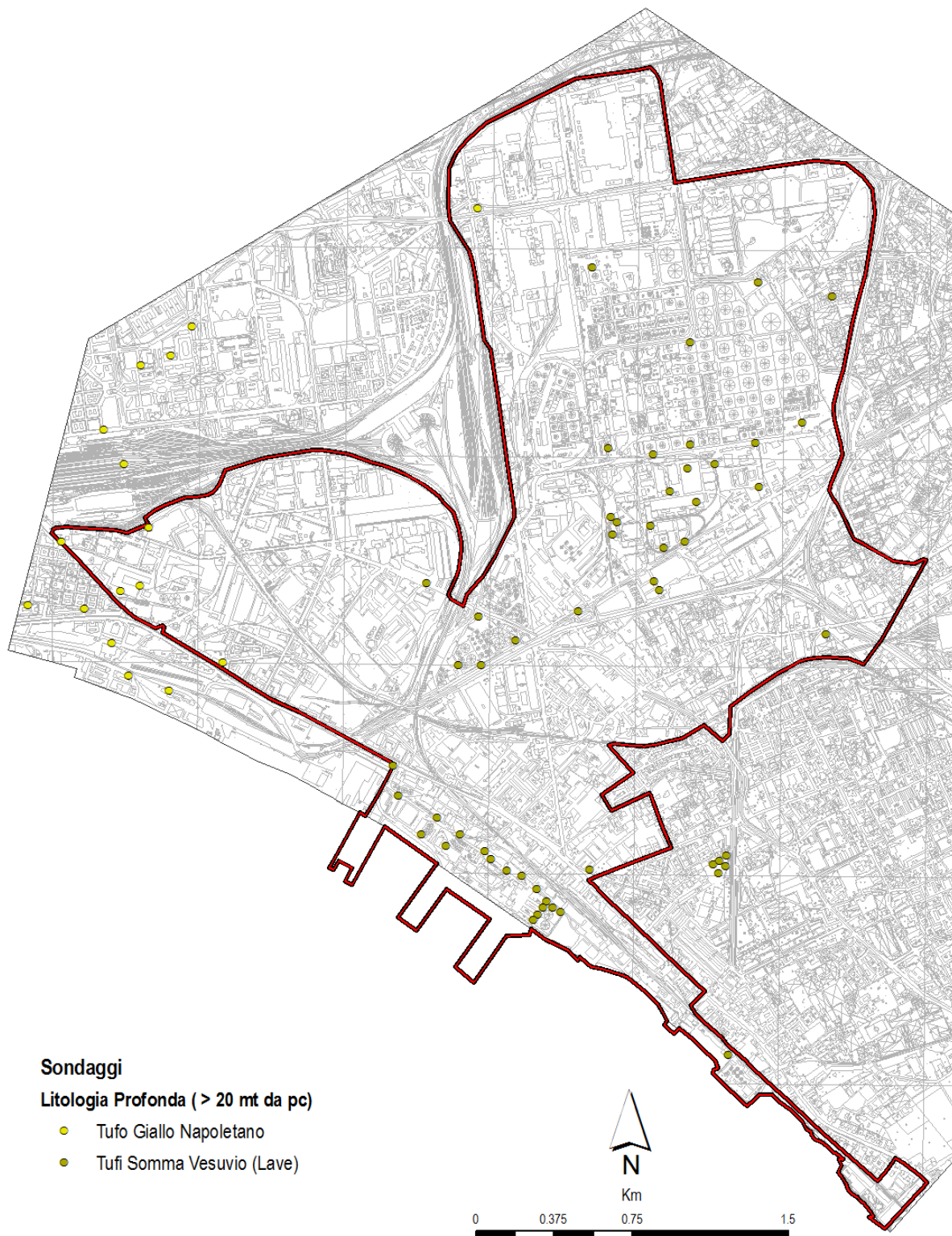


Figura 13 - Analisi stratigrafica dei depositi tufacei e lavici.

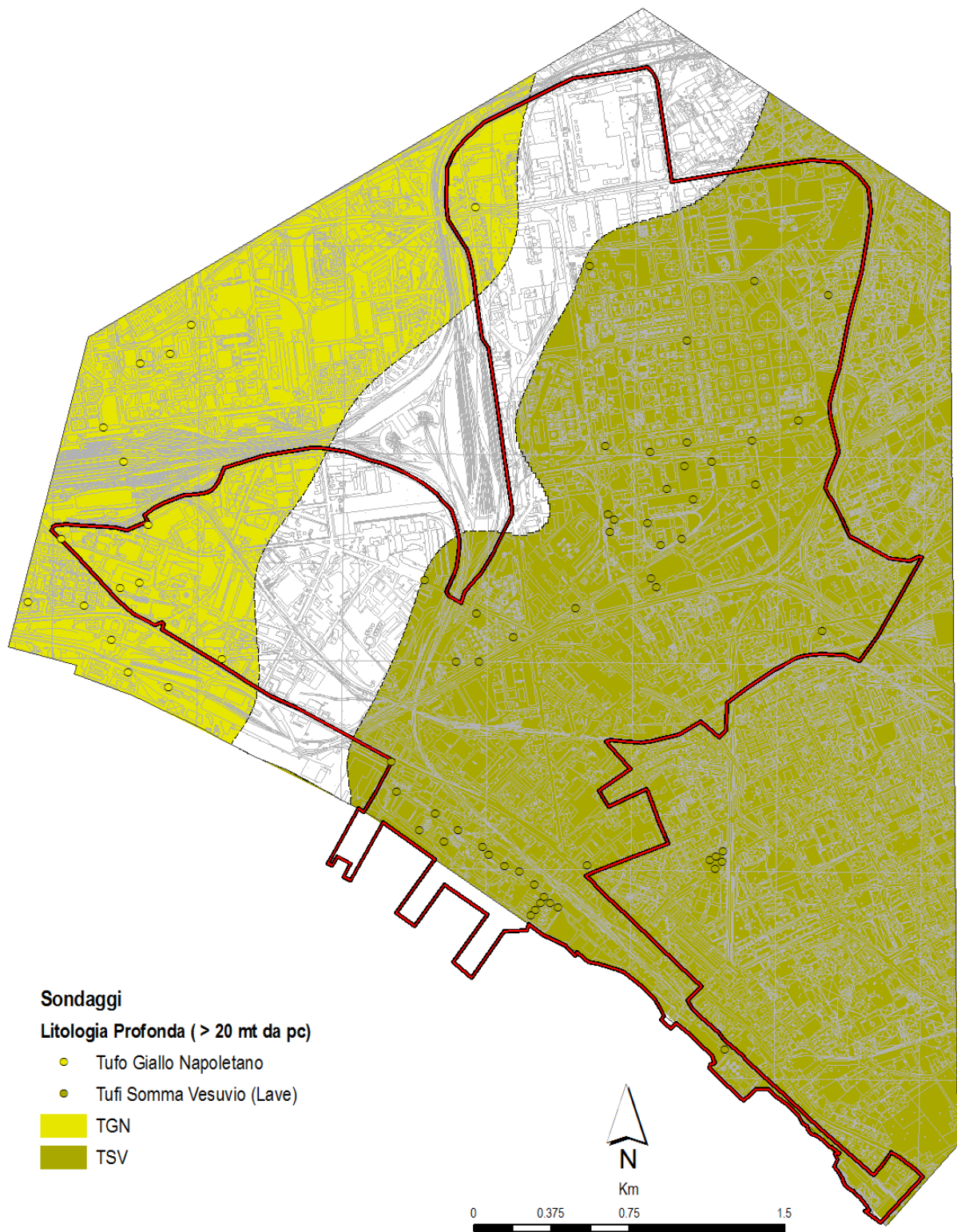


Figura 14 - Ricostruzione dei limiti stratigrafici dei depositi tufacei e lavici.

Utilizzando l'insieme dei dati puntuali a disposizione, sulla base di quanto dedotto dalle sezioni stratigrafiche, e a partire dalle carte delle isobate ed isopache delle unità idrostratigrafiche, si è proceduto alla ricostruzione della base dei depositi alluvionali (A) (Figura 15), la superficie idrostratigrafica del tetto e della base dei depositi lapidei del TGN e TV del sistema idrogeologico (Figura 16 e Figura 17). La ricostruzione delle superfici idrostratigrafiche limite necessariamente ha tenuto conto di quelli che sono gli obiettivi della modellazione, quale la ricostruzione del campo di flusso di falda compreso nei primi 70-80 metri di spessore del sistema acquifero, ovvero la profondità massima di indagine raggiunta dai sondaggi.

Per la ricostruzione è stato utilizzato un approccio di tipo geostatistico che ha permesso di poter stimare il valore della quota delle diverse unità idrostratigrafiche. Il comportamento spaziale della variabile è stato analizzato per mezzo dell'analisi del variogramma (o semivariogramma sperimentale, ESV). Il variogramma è stato modellato per ottenere i parametri necessari all'interpolazione, verificando prima la validità tra il set di dati ed il loro modello strutturale attraverso un procedimento di validazione incrociata. Le funzioni d'interpolazione sono state usate per preparare i set di dati relativi per definire le geometrie delle unità idrogeologiche. Per produrre il set di dati distribuiti in modo continuo nello spazio è stato utilizzato l'algoritmo d'interpolazione Kriging. Le superfici idrostratigrafiche così ricostruite sono state importate direttamente nel modello geologico tridimensionale come quota per ogni singolo nodo della maglia di discretizzazione.

Per sottrazione della superficie topografica con quella delle isobate delle singole unità sono state ricostruite le carte delle isopache definendo gli spessori dei depositi delle principali unità idrostratigrafiche (Figura 18 e Figura 19).

Dall'osservazione degli elaborati grafici possono essere tratte le seguenti considerazioni di sintesi e complessive sull'assetto del complesso acquifero dell'area SIN:

- il tetto dei Tufi del Vesuvio (TSV) (Figura 16) è localizzato a circa 10-15 metri dal p.c. nel settore orientale dell'area di studio, e progreda verso la porzione centrale del SIN con regolarità passando dai 20 sino ai -15 metri s.l.m. Nella parte centrale del SIN non sono stati rinvenuti i depositi TV e gli stessi spessori dei tufi rastremano procedendo verso tale settore. Gli spessori dei TV massimi sono di circa 35-40 metri nel settore orientale per ridursi sino a pochi metri nel settore centrale del SIN;
- il tetto del Tufo Giallo Napoletano (TGN) (Figura 16) è localizzato a circa -25, -30 metri s.l.m nel settore occidentale dell'area di studio, molto più profondo dunque delle unità tufacee del Vesuvio corrispondenti ad eventi eruttivi successivi e a diverse condizioni morfologiche dell'area di deposizione. Progradano anch'essi come per i TV verso la parte centrale del SIN con approfondimenti massimi di -35 metri s.l.m sino a raggiungere i -25 metri s.l.m nella parte centrale del SIN. Lo spessore dei TGN è di 40 metri nell'area occidentale e progreda velocemente con spessori minimi nell'area centrale;

- i depositi alluvionali argillosi limosi lacustri (Figura 15) hanno spessori che raggiungono massimo 10-15 metri nella porzione centrale del SIN afferente alla depressione topografica del Sebeto, gli spessori e la continuità di tali depositi diminuiscono progressivamente ed in modo irregolare verso la linea di costa dove passano a depositi sabbiosi limosi;
- i depositi Piroclastici (PR) (Figura 18) che rappresentano l'unità acquifera del complesso hanno spessori variabili che vanno dai 10 ai 50 metri dal p.c., per quanto riguarda la porzione superiore del sistema idrogeologico, mentre le stesse piroclastiti al disotto delle unità litoidi tufacee (acquitardi) hanno spessori che raggiungo almeno 70-80 metri da quanto riportato da dati di letteratura poiché i sondaggi più profondi a disposizione non raggiungono la base dei depositi argillosi marini, base del sistema idrogeologico costiero.

Nella depressione del centrale del SIN, afferente alla zona del paleoalveo del Sebeto, l'erosione del sistema idrico superficiale ha determinato un graduale assottigliamento dei depositi tufacei, in una fascia continua che percorre il settore centro occidentale del perimetro SIN non si rinvengono nei sondaggi profondi, mentre lungo la linea di costa attinente al SIN sono stati individuati le facies litoidi ad una profondità variabile compresa tra i 25 e i 40 metri dal p.c..

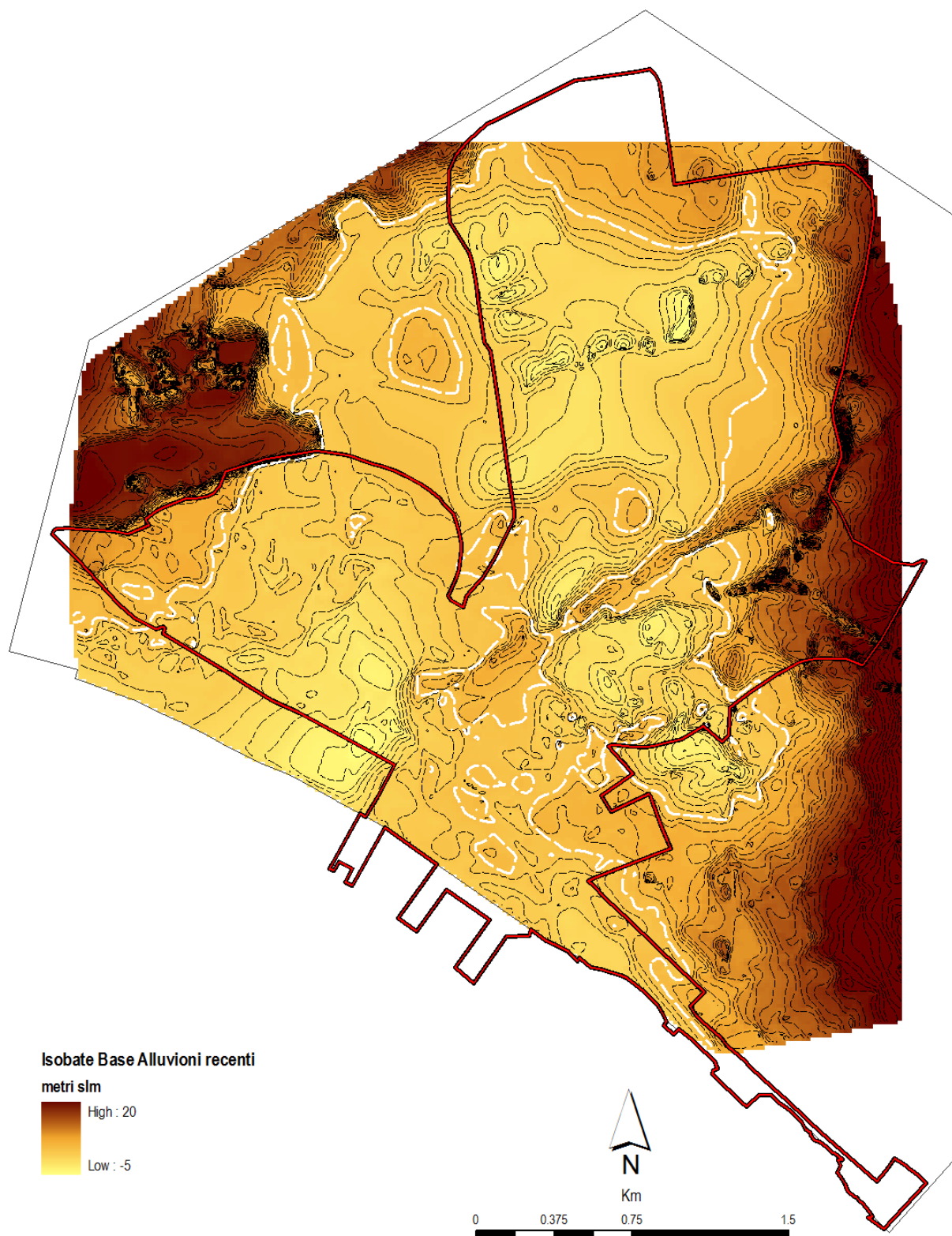


Figura 15 - Isobate della base dei depositi Alluvionali recenti Limoso Torbosi.

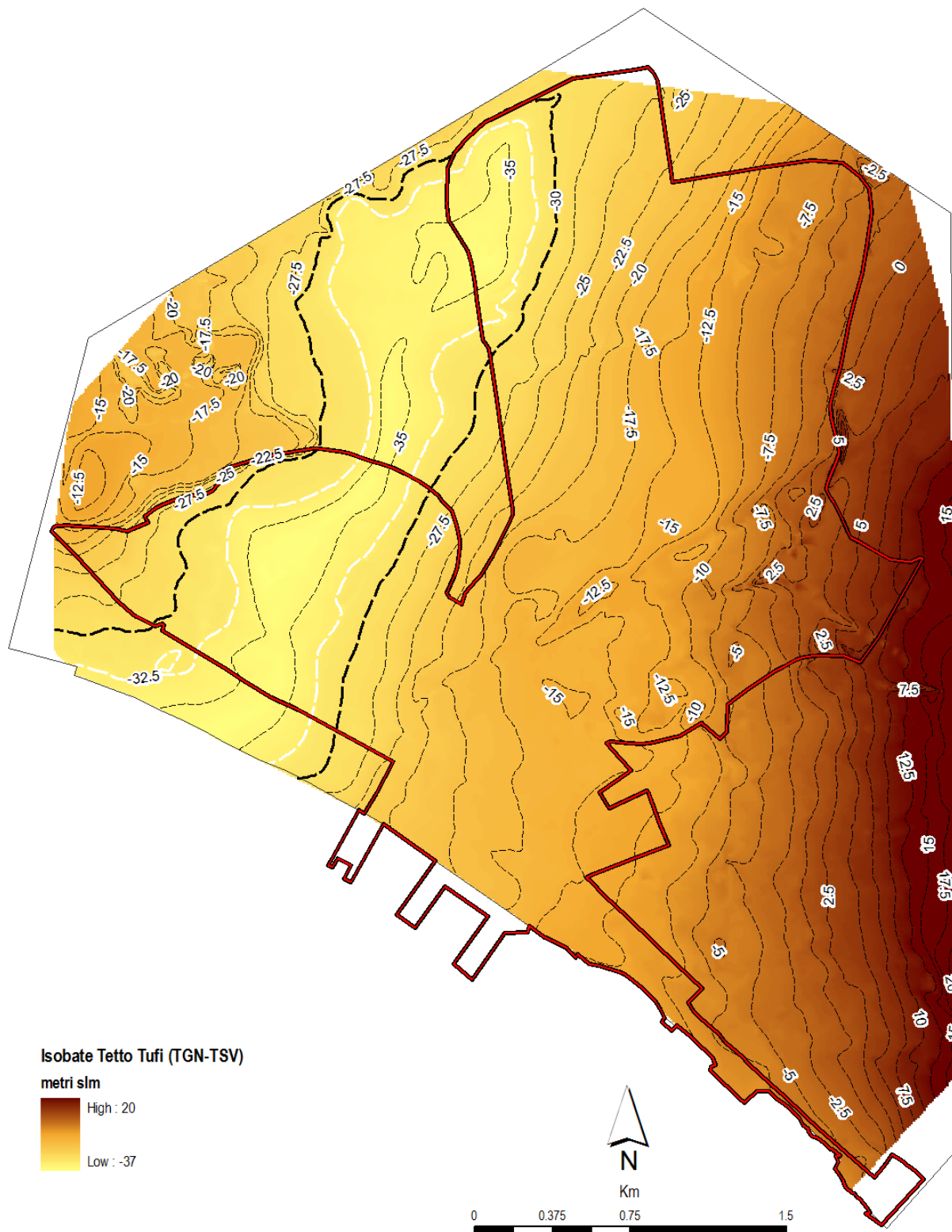


Figura 16 - Isobate del tetto dei depositi Tufacei.

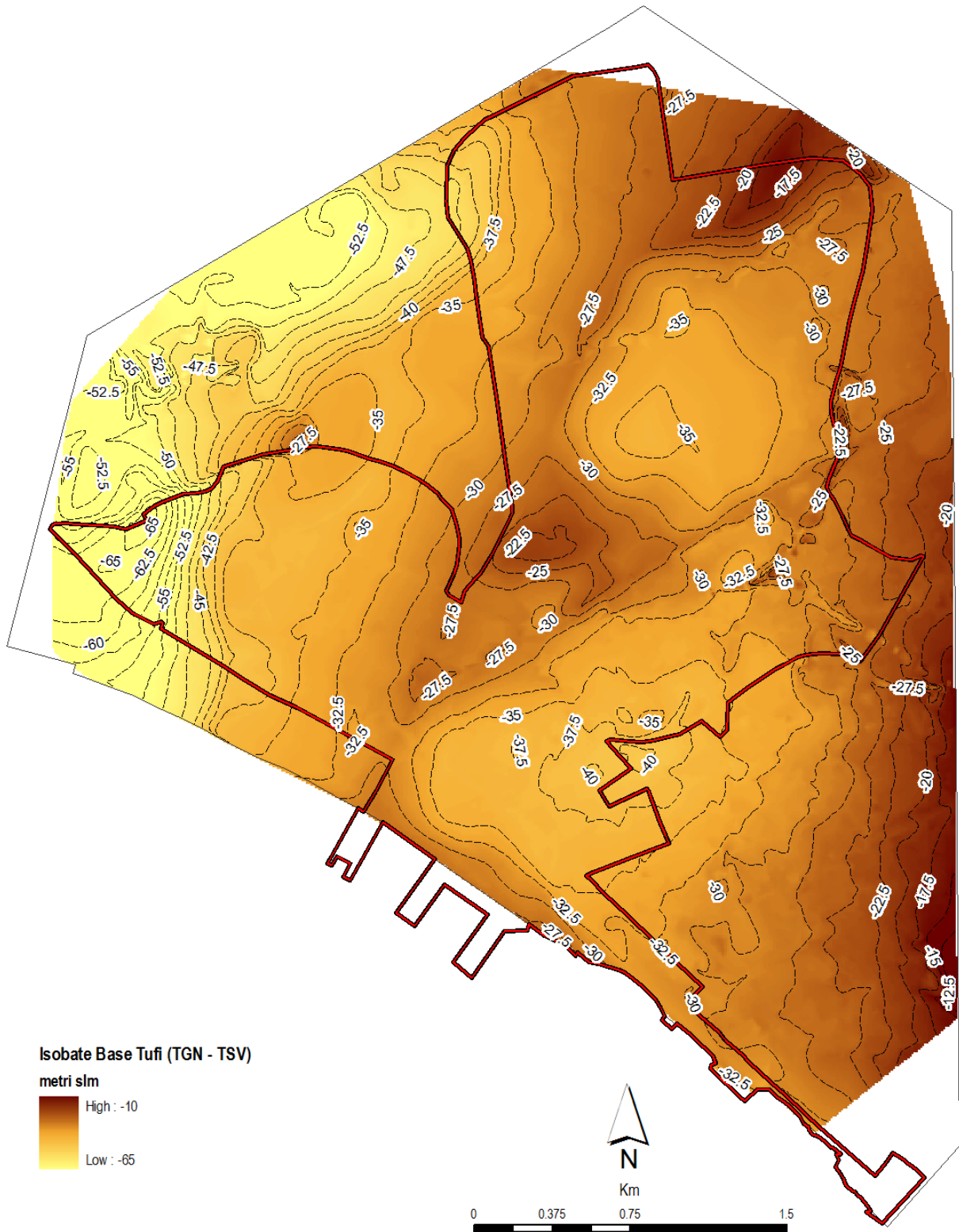


Figura 17 - Isobate della base dei depositi Tufacci.

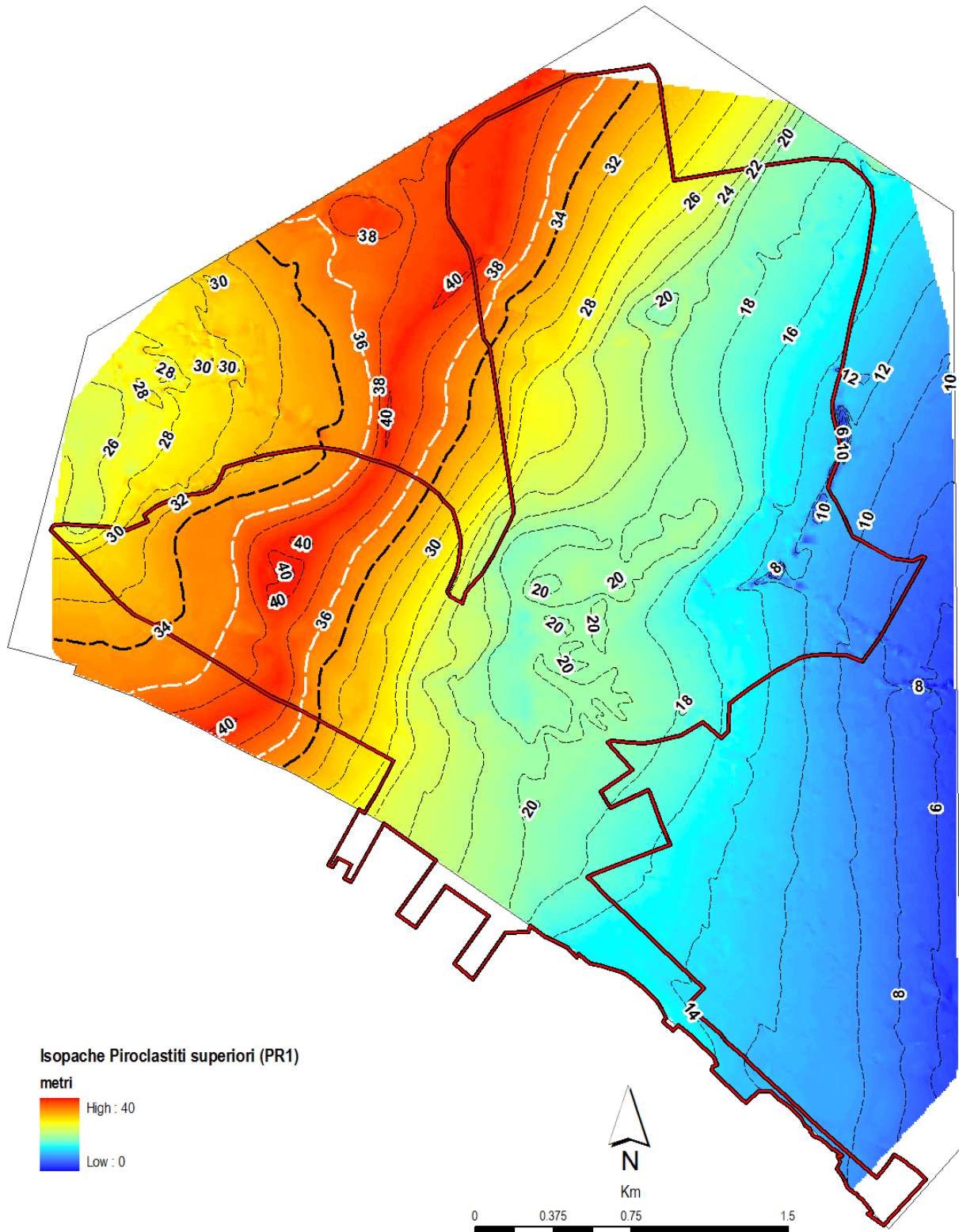


Figura 18 - Isopache dei depositi Piroclastici Superiori (PR1).

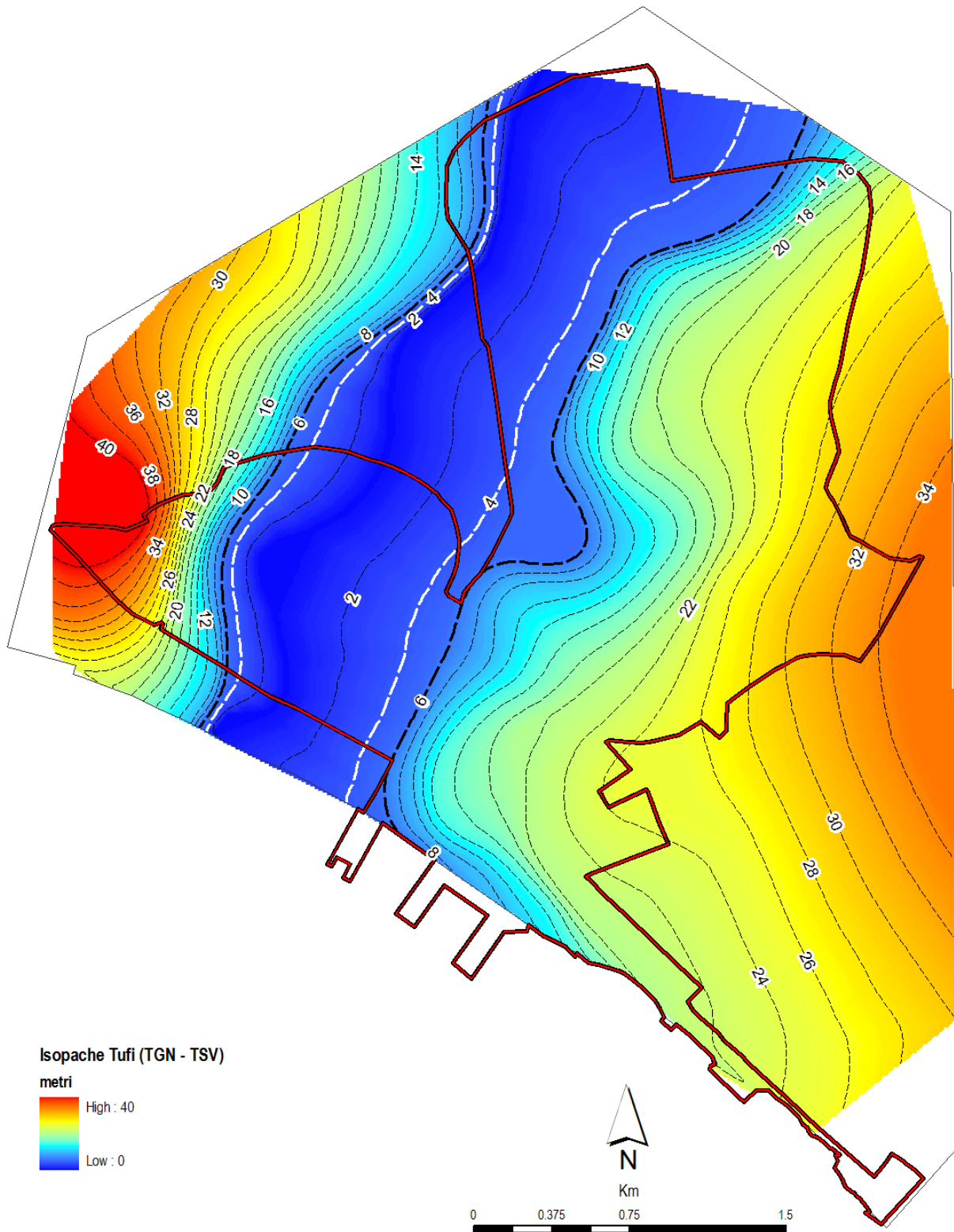


Figura 19 - Isopache dei depositi Tufacei (TGN e TV).

2.6 Assetto idrogeologico

2.6.1 Caratteristiche idrostratigrafiche del sito

Le unità litostratigrafiche della piana orientale di Napoli, nel loro insieme, danno forma a un complesso idrogeologico costituito principalmente da unità acquifere porose, di natura prevalentemente detritico-piroclastica, tra loro in contatto stratigrafico e in alcuni settori separati da unità di acquitardi, realizzando un complesso sistema dal punto di vista idrostratigrafico e articolato dal punto di vista idrodinamico. I numerosi studi idrogeologici eseguiti sull'area di piana (Viparelli, 1967; Viparelli, 1978; Civita et Alii, 1973; Celico P., 1983; 1990; Celico & de Paola, 1992; Celico P. et Alii, 1980; Celico P. et Alii, 1994; Celico F. et Alii, 1995; Celico P. et Alii, 1997; Celico P. et Alii, 1998; Celico F. et Alii, 2001; Bellucci et Alii, 1990; GEOLAB, 1988; Esposito, 1998; Esposito & Piscopo, 1997; Corniello et Alii, 1990; Comune di Napoli-C.U.G.R.I., 2001; Corniello et Alii, 2003; Allocca & Celico, 2004a, 2004b; Commissariato di Governo per l'emergenza rifiuti, bonifica e tutela delle acque nella Regione Campania, 2002a; 2002b; Autorità di Bacino Regionale Nord Occidentale della Campania, 2004; Regione Campania, 2006; Allocca & Celico, 2008) hanno consentito di evidenziare la presenza di diversi settori dal comportamento idrogeologico caratteristico:

Nella porzione occidentale della Piana rispetto al SIN, l'esistenza del Tufo Giallo Napoletano determina, localmente, la formazione di un sistema a falde idriche sovrapposte, la prima defluisce nei depositi posizionati al di sopra della formazione ignimbratica, in condizioni freatiche; la seconda, posta al di sotto dell'orizzonte tufaceo, è semiconfinata; tra le due falde idriche è possibile un travaso, in accordo con Celico P. (1990), Celico & de Paola (1992), Celico P. et Alii, (1994) e Celico F. et Alii (1995). Nella porzione centrale della Piana l'assenza del Tufo, per effetti di erosione alluvionale, implica la presenza di una unica falda idrica in condizioni freatiche (Bellucci et Alii, 1990; Celico F. et Alii, 1995; Regione Campania - Comune di Marigliano, 2002).

Nella fascia del SIN più prossima al Somma-Vesuvio, degli orizzonti acquiferi, la falda è localizzata nei depositi piroclastici più grossolani e nelle lave fessurate; qui il deflusso può considerarsi freatico, sebbene sia possibile riscontrare condizioni di semiconfinamento in zone dove gli orizzonti lavici risultano compatti e poco fessurati. Nelle parti più profonde stratigraficamente, al di sotto dei 15 metri dal p.c. circa, si rinvengono i Tufi del Vesuvio poco fessurati e con permeabilità secondaria ridotta. Tale condizione stratigrafica determina effetti di semiconfinamento della falda presente nei depositi piroclastici profondi.

Nella Depressione del Sebeto-Volla e nella fascia costiera, che coincide con la zona di specifico interesse dell'intervento di messa in sicurezza e di bonifica della falda sotterranea, la presenza di intercalazioni di depositi piroclastico-alluvionali, torbe, paleosuoli e sedimenti marini, dà luogo ad un acquifero stratificato in più orizzonti idrici tra loro interconnessi in un unico corpo idrico avente deflusso unitario, per la presenza di soluzioni di continuità nei litotipi meno permeabili (Viparelli,

1978; Celico F. et Alii, 1995; Commissariato di Governo per l’Emergenza Rifiuti, Bonifica e Tutela delle Acque nella Regione Campania, 2002a; 2002b).

Facendo riferimento alle più recenti ricostruzioni piezometriche riferite ai livelli idrici osservati nel periodo ottobre novembre 2002 come riportato dal Piano di Tutela delle Acque redatto dall’Autorità di Bacino Nord Occidentale, è possibile descrivere il sistema di circolazione idrica sotterranea dell’area (Figura 22). Dalla ricostruzione piezometrica proposta i livelli idrici, risultano essere in accordo coerenti con quanto osservato nel 2004 (Regione Campania, 2006), e molto simili a quelli registrati nel 1924 e nel periodo 1978 e 1979 a testimonianza del quasi totale recupero dei livelli piezometrici pregressi. Come è possibile osservare dalla ricostruzione piezometrica (Figura 22), si ha un asse di drenaggio preferenziale della falda NE-SW lungo l’asse del Volla, la falda riceve apporti laterali dall’area nord ovest di Napoli (Massico Flegreo) e dalla zona più orientale e cioè dalle falde del Vesuvio, il recapito ultimo delle acque di deflusso sotterraneo è rappresentato dal mare e dal sistema di drenaggio operato dai canali di bonifica.

Il sistema idrogeologico dell’area SIN può essere così suddiviso:

Livelli Acquicludo/Acquitardi

- (A) - litotipi alluvionali a scarsa permeabilità quali argille e limi argillosi localmente di palude presenti nel settore depresso al centro del SIN, che costituiscono i depositi superficiali direttamente affioranti con spessori modesti (conducibilità idraulica definita in letteratura 10^{-8} - 10^{-6} m/s);
- (TSV-TGN) - depositi lapidei vulcanici tufacei, come i Tufi del Somma Vesuvio e Tufo Giallo Napoletano che in relazione al loro stato di fessurazione, continuità geometrica laterale e verticale dei depositi, possono costituire dei livelli localmente acquitardi e occasionalmente acquicludi, determinando nel settore orientale ed occidentale dell’area di studio condizioni di parziale isolamento delle falde idriche con possibili flussi verticali (fuga) più o meno consistenti (conducibilità idraulica definita in letteratura 10^{-8} - 10^{-6} m/s). Fenomeni di neotettonica legati all’attività vulcanica presente potrebbe aver generato locali condizioni di fratturazione nei tufi conferendo all’ammasso lapideo vie preferenziali di deflusso e locali collegamenti tra le falde.

Livelli Acquiferi

- (A) - litotipi alluvionali a media permeabilità quali sabbie e sabbie limose presenti principalmente nel settore del SIN fronte mare, che costituiscono i depositi superficiali affioranti riferibili a facies di sedimentazione fluvio lacustre (conducibilità idraulica definita in letteratura 10^{-5} - 10^{-4} m/s);
- (PR) – depositi piroclastici rimaneggiati granulometricamente assimilabili a sabbie localmente ghiaiose e limose, con media alta permeabilità che rappresentano il principale acquifero dell’area. I depositi piroclastici possono essere suddivisi in due sub-unità distinte in base alle caratteristiche granulometriche, quella superiore (PR1), al di sopra dei depositi

tufacei, con granulometria più fine ed una inferiore (PR2) ai livelli tufacei con una maggiore componente sabbiosa e maggiore permeabilità per porosità (conducibilità idraulica definita in letteratura 10^{-5} - 10^{-3} m/s);

- (LV-LS) – depositi lavici, come le Lave del Somma e quelle del Vesuvio, caratterizzati da una permeabilità secondaria per fessurazione che in particolari circostanze può essere alta. Le lave sono in diretta connessione idraulica con le piroclastiti e non esistono dunque falda separate tra i corpi acquiferi principali dell'area di pianura, mentre in quella Vesuviana l'acquifero vulcanico alimenta quello alluvionale prevalentemente piroclastitico (conducibilità idraulica definita in letteratura 10^{-4} - 10^{-3} m/s).

2.6.2 La circolazione idrica sotterranea generale

Sulla base delle caratteristiche geologico-strutturali e idrogeologiche del territorio e dei più recenti dati piezometrici, per l'intera piana Campana che include il SIN di Napoli orientale si configura un bacino idrogeologico assai ampio. Il complesso acquifero della piana è caratterizzato da una elevata eterogeneità, a causa delle frequenti variazioni di spessore, litologia e granulometria dei diversi orizzonti acquiferi.

I numerosi studi idrogeologici eseguiti sull'area di piana (Celico et al., 2001) hanno consentito di evidenziare la presenza di diversi settori dal comportamento idrogeologico talora diversificato. L'estrema articolazione idrostratigrafica dell'acquifero di piana dà luogo quindi, a scala locale, ad una circolazione idrica sotterranea per falde sovrapposte, avente sede nei depositi piroclastico alluvionali, a granulometria più grossolana, e negli orizzonti lavici più fessurati. La presenza dell'Ignimbrite Campana dotata di una notevole continuità spaziale con valori di permeabilità caratteristici assai inferiore a quella dei depositi sovrapposti, determina la formazione di almeno due diversi livelli idrici sotterranei: (1) un primo in condizioni freatiche nei depositi porosi piroclastici alluvionali; (2) un secondo più profondo in condizioni di semiconfinamento (Celico, 1983; Celico 1990; Celico, F. et al. 1995 e Esposito, 1996). I due livelli sono in comunicazione attraverso flussi verticali di drenanza diretti in condizioni di equilibrio idrogeologico dal livello inferiore (in pressione) verso quello superiore (Celico & De Paola 1992) con gradienti bassi per effetto delle contenute differenze piezometriche (di pochi decine di centimetri) tra i livelli. Secondo questo schema di circolazione idrica sotterranea la falda profonda risulterebbe naturalmente protetta da eventuali fenomeni di contaminazione.

La separazione idraulica tra l'acquifero superficiale e quelli profondi è confermata dal livello piezometrico dei pozzi profondi presenti nell'area della raffineria KRC (Kuwait Raffinazione e Chimica S.p.A) come definito nel documento relativo al "Progetto definitivo di bonifica dei suoli dei siti di proprietà Kuwait di Napoli" (2008). In questi pozzi, che presentano i tratti fessurati a circa a 40-50, 70-80 e 90-100 metri di profondità dal piano campagna, il carico idraulico misurato risulta essere più elevato rispetto a quello freatico dei pozzi superficiali. La separazione è confermata inoltre dai differenti caratteri chimici e assenza di contaminazione delle acque emunte a

differenti quote. In particolare alla profondità di circa 70 metri (come si evince dai dati derivati dalla perforazione di un pozzo ad uso antincendio nell'area KRC) si registra la presenza di un acquifero confinato contenente una falda in pressione avente livello piezometrico circa 1 metro al di sopra del piano campagna.

Di contro, nell'area di pianura corrispondente al paleo tracciato del Volla e Sebeto, per effetto dell'azione di rimaneggiamento ed erosione del sistema idrico superficiale la presenza dell'Ignimbrite Campana è molto discontinua o assente lasciando spazio a piroclastiti e depositi sabbioso limoso fluvio palustre e marini. In un quadro d'insieme, comunque, i differenti depositi costituenti la piana ad Oriente di Napoli, danno forma ad un ampio ed unico acquifero, benché assai articolato dal punto di vista idrostratigrafico e idrodinamico. A scala di bacino è possibile far riferimento ad un deflusso idrico sotterraneo a carattere unitario poiché i diversi orizzonti acquiferi sono tra loro intercomunicanti per la presenza di: ripetute soluzioni di continuità dei livelli semipermeabili; flussi di drenaggio attraverso gli orizzonti meno permeabili; un elevatissimo numero di pozzi che, essendo mal condizionati, consente la diretta interazione tra i diversi orizzonti acquiferi.

Lungo la fascia costiera, infine, recapito ultimo delle acque sotterranee rappresentato dal mare, i diversi dati piezometrici non rilevano particolari fenomeni di intrusione marina; la falda sembra essere in equilibrio idrogeologico con il mare, sebbene locali fenomeni di ingressione salina possano manifestarsi in prossimità della linea di costa, laddove la rete fognaria, avente caratteristiche drenanti, è ubicata a quota più bassa del livello del mare (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2000).

Il deflusso delle acque sotterranee del bacino è orientato principalmente verso sud-ovest ma, all'altezza di Napoli, viene condizionato dagli alti piezometrici del Somma-Vesuvio e delle colline flegree (Bellucci et Alii 1993). Per tale effetto il deflusso si concentra verso i depositi piroclastico-alluvionali della piana del Sebeto-Volla per il cui tramite le acque sotterranee raggiungono il mare: tutto ciò comportava, nel passato, anche recapiti esterni della falda creando aree paludose dove effluivano le acque di numerose sorgenti, oggi scomparse, che animavano diversi corsi d'acqua (Funel 1994).

2.6.3 Ricostruzione della piezometria di riferimento e del sistema di deflusso locale

Per comprendere le cause delle diverse modificazioni idrogeologiche osservate sulla piana ad Oriente di Napoli, nello Studio di Fattibilità è stata analizzata l'evoluzione spazio-temporale della circolazione idrica sotterranea, a scala locale e di bacino. Sono diversi gli studi analizzati che hanno permesso di ricostruire, con differenti gradi di approssimazione, la morfologia della superficie piezometrica della falda ad Oriente di Napoli.

In particolare le acque sotterranee defluiscono da NE verso SW e tendono a convergere verso il centro della Piana e la Depressione del Volla, dove in passato (Fiorelli, 1926) affioravano numerose

sorgenti (Volla, Cozzone, Sanseverino), oggi completamente scomparse. Dagli alti piezometrici del Somma Vesuvio e delle colline Flegree (Bellucci et Alii, 1993) il deflusso di falda si concentra verso i depositi pirocalstici alluvionali della Depressione del Volla attraverso la quale le acque sotterranee raggiungono il mare, ove in passato era presente un'area paludosa di risorgiva. La falda idrica è alimentata, oltre che dalle acque di infiltrazione efficace, anche dagli afflussi sotterranei provenienti dagli acquiferi dal Somma-Vesuvio e dalla zona collinare di Napoli. Gli interscambi idrici della falda con la rete idrografica superficiale avvengono nella zona del paleo canale Sebeto, ancorché condizionata dalla presenza di opere di cementazione, alimenta, in condizioni indisturbate, il corpo idrico superficiale, per gran parte del tracciato (Regione Campania 2002). Lungo la fascia costiera, non si rilevano particolari fenomeni di intrusione marina, nonostante la presenza di un sistema fognario con caratteristiche drenanti (Comune di Napoli - C.U.G.RI., 2000) che per alcuni tratti è ubicato a quota più bassa del livello del mare, provocando locali richiami di acqua salata.

Per la definizione dell'assetto piezometrico di riferimento dell'area SIN, utile all'implementazione del modello numerico del flusso, si è fatto riferimento alle misure effettuate nell'ambito dei singoli piani della caratterizzazione. Nello specifico è stato implementato un database georeferenziato in ambiente GIS di tutte le informazioni di carattere piezometrico acquisite durante lo svolgimento dello Studio di Fattibilità prima e successivamente del Progetto Preliminare. Questo insieme di dati è stato integrato e completato con le più recenti consegne (successive al 2012) dei risultati delle caratterizzazioni e dei monitoraggi eseguite nell'area SIN, messe a disposizione dal Ministero dell'Ambiente. Ad oggi la banca dati a disposizione costituisce l'insieme "completo" delle informazioni piezometriche dell'intero SIN raccolte nel corso di circa 15 anni, da fine anni '90 sino al 2014. In Figura 20 si riporta l'insieme dei punti di misura del livello piezometrico, intesi come piezometri o pozzi, presenti e censiti nell'area, per un totale di 723 punti.

Il sistema di flusso della falda è stato concettualizzato a partire dai dati piezometrici rilevati nell'ultima campagna di monitoraggio eseguita da SOGESID nel periodo di morbidità relativo al dicembre 2012. Il monitoraggio piezometrico è stato condotto su 31 piezometri e pozzi localizzati all'interno del SIN e facenti parte della rete del monitoraggio ARPAC, integrati con dati freatrimetrici rilevati in 43 piezometri derivanti dall'attività di monitoraggio svolto in fase di caratterizzazione ambientale operato dalle ditte nel medesimo anno. Per avere una maggiore copertura spaziale del dato piezometrico, in particolare nelle aree prossime alla depressione centrale del SIN, sono stati acquisiti altri dati confrontabili dal punto di vista temporale così da avere la massima distribuzione spaziale. L'integrazione del dataset di misure piezometriche ha permesso di aumentare la densità del dato nello spazio ed incrementare i punti di controllo sino ad un massimo utile di 318 punti (Figura 21).

Per poter estendere l'intervallo temporale di riferimento delle misure piezometriche ritenute "omogenee" e confrontabili dal punto di vista stagionale è stato preso in esame il periodo di "morbidità" piezometrico dell'area compreso tra il 2004 e il 2014, in ragione del fatto che la maggior parte delle misure piezometriche sono state eseguite proprio nell'intervallo invernale. I dati piezometrici integrativi non sono perfettamente coevi dal punto di vista temporale a quelli rilevati

da SOGESID nel dicembre 2012. La scelta del dataset integrativo è stata operata cercando di ottenere di distribuzione spaziale del dato che fosse più omogenea possibile senza lasciare aree scoperte e prive di informazioni, facendo riferimento a misure rilevate nel periodo di morbida anche se corrispondenti a diversi anni idrologici.

In particolare sono state analizzate le misure rilevate nei mesi compresi tra fine ottobre e fine marzo, estendendo di fatto l'analisi temporale a circa 4-5 mesi, assumendo che in questo intervallo temporale i carichi idraulici si possano ritenere sufficientemente omogenei e confrontabili tra loro nell'area di riferimento. Applicando questa metodologia la base di dati per la ricostruzione dell'assetto piezometrico può ritenersi, almeno numericamente e spazialmente soddisfacente, anche se le limitazioni e le incertezze in termini di ricostruzione locale dell'assetto piezometrico permangono vista la presenza di numerose interferenze di carattere antropico piuttosto che per condizioni legate a regimi pluviometrici diffusi nei diversi anni, dato che l'elevata urbanizzazione determina una riduzione sostanziale dell'infiltrazione delle acque meteoriche.

Sono stati dunque selezionati set di misure e andamenti per quanto possibile correlabili da punto di vista temporale, da cui si è proceduto all'elaborazione di un'unica carta piezometrica della falda dell'area di studio. Gli elaborati suddetti consentono pertanto di ricostruire un campo piezometrico in larga prevalenza riferito ad una condizione invernale di morbida. Con l'insieme dei dati a disposizione è stato possibile ricostruire la piezometria per la totalità dell'acquifero costiero nell'area SIN, in particolare si è fatto riferimento alle seguenti campagne di rilievo:

- area AEDILIA (rilievi dal 2004 al 2012);
- area AGIP PETROLI (rilievo 2012);
- area ANSALDO BREDA (rilievo 2012);
- area DE FALCO - PISANO (rilievo 2012);
- area ENEL (rilievo 2012);
- area ENERGAG (rilievo 2012);
- area ENI - Ex Depositi Costiero (rilievi dal 2004 al 2012);
- area ESSO (rilievi dal 2005 al 2012);
- area FINTECNA (rilievi dal 2004 al 2012);
- area ITALCOST (rilievi dal 2007 al 2014);
- area MAGNAGHI (rilievo 2012);
- area NAPOLETANA GAS (rilievo 2012);
- area PMC - AUTOMATIVE (rilievo 2012);
- area PETROLCHIMICA PARTENOPEA (rilievo dal 2006 al 2012);
- area PETRONAS (rilievo dal 2004 al 2012);
- area POSTE ITALIANE (rilievo dal 2008 al 2012);
- area Q8 - QUASER (rilievo 2012);
- area Q8 - BENIT (rilievo dal 2004 al 2013);
- area Q8 - Deposito KRC (rilievo dal 2004 al 2012);
- area Q8 - PV7247 (rilievo 2007);

- area Q8 - PVF6629 (rilievo dal 2004 al 2012);
- area WHIRLPOOL (rilievo 2012);
- piezometri rete monitoraggio COMUNE DI NAPOLI (rilievi del 2012);
- piezometri rete monitoraggio ARPAC (rilievi dal 2004 al 2012).

Di contro poche e sporadiche informazioni sono state acquisite per le aree esterne al perimetro SIN riferibili a rilievi puntuali e ricostruzioni piezometriche proposte da vari autori nel corso degli anni come descritto in precedenza. Il lavoro di sintesi è consistito nel produrre un'unica piezometria media di riferimento nel periodo di morbida degli ultimi 10 anni. In questo ultimo intervallo temporale in esame le attività di emungimento interne al SIN per ragioni industriali sono state ridotte fortemente come del resto i prelievi delle aree esterne al SIN, in particolare quelle derivanti dal campo pozzi idropotabile di Lufrano, settore posto a circa 4 Km a nord dall'area d'interesse. In particolare a partire dagli anni 2000, e facendo riferimento al periodo ottobre-novembre 2002, le quote piezometriche più elevate rilevate dell'Autorità di Bacino Nord Occidentale della Campania sono di 5 m s.l.m., nella zona più prossima alla stazione centrale di Napoli, e di 14 -18 m s.l.m., nella zona compresa tra Lufrano, Casalnuovo e Pomigliano d'Arco. I livelli idrici, coerenti con quanto osservato nel 2004 (Regione Campania, 2006), sembrano essere molto simili a quelli registrati nel periodo 1978-1979 e nel 1924 a testimonianza del quasi totale recupero dei livelli piezometrici pregressi.

Nella Figura 22 si riporta lo stralcio della morfologia della superficie piezometrica riferita al periodo ottobre-novembre 2002 presente nel Piano di Tutela delle Acque redatto dall'Autorità di Bacino Nord-Occidentale, utilizzato come base di riferimento per il modello concettuale piezometrico nel Progetto Preliminare SOGESID (2010). Come è possibile osservare, si ha un asse di drenaggio preferenziale della falda nella porzione centrale del SIN in corrispondenza del paleolaveo del Sebeto, con direzione di deflusso NE-SW, con recapito finale in mare, in corrispondenza della zona portuale dei "Granili". La falda inoltre riceve apporti laterali anche da parte delle colline di Napoli compresa tra Capodimonte e Poggioreale; mentre nella zona più orientale da Cercola e cioè dalle falde del Vesuvio.

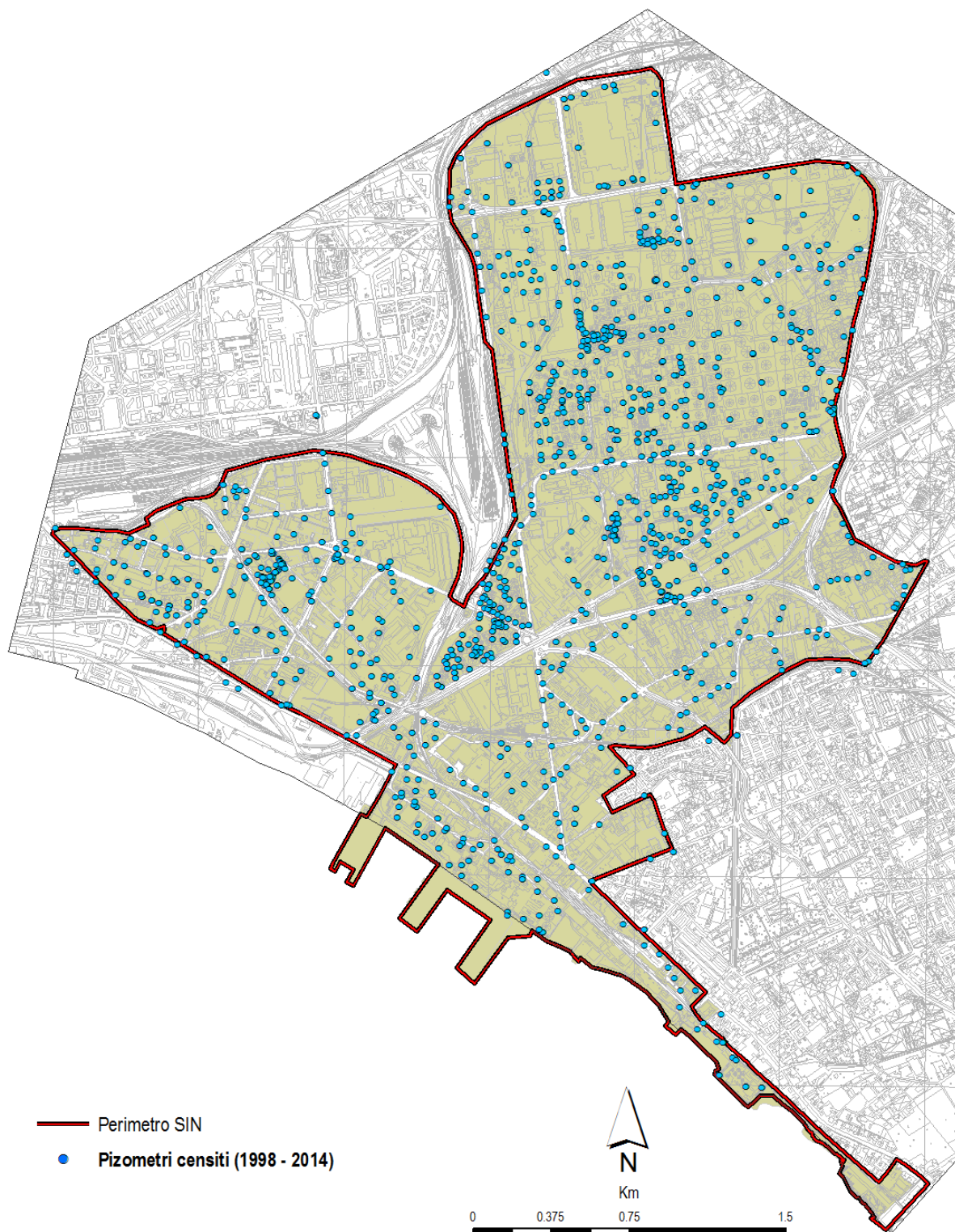


Figura 20 - Rete di monitoraggio piezometrico dell'area in seguito alla caratterizzazione ambientale.

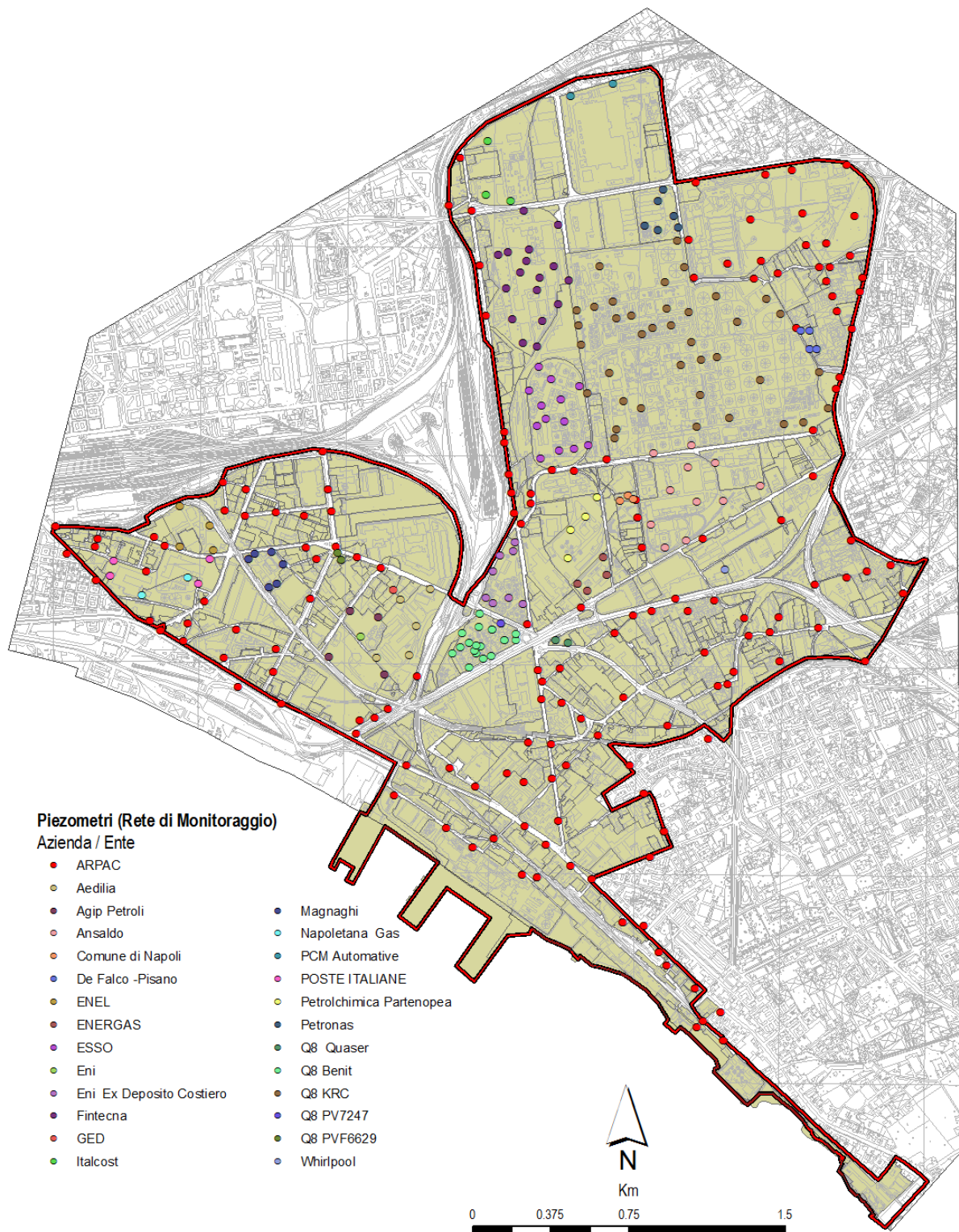


Figura 21 - Punti di monitoraggio utilizzati per la ricostruzione dell'assetto piezometrico di riferimento.

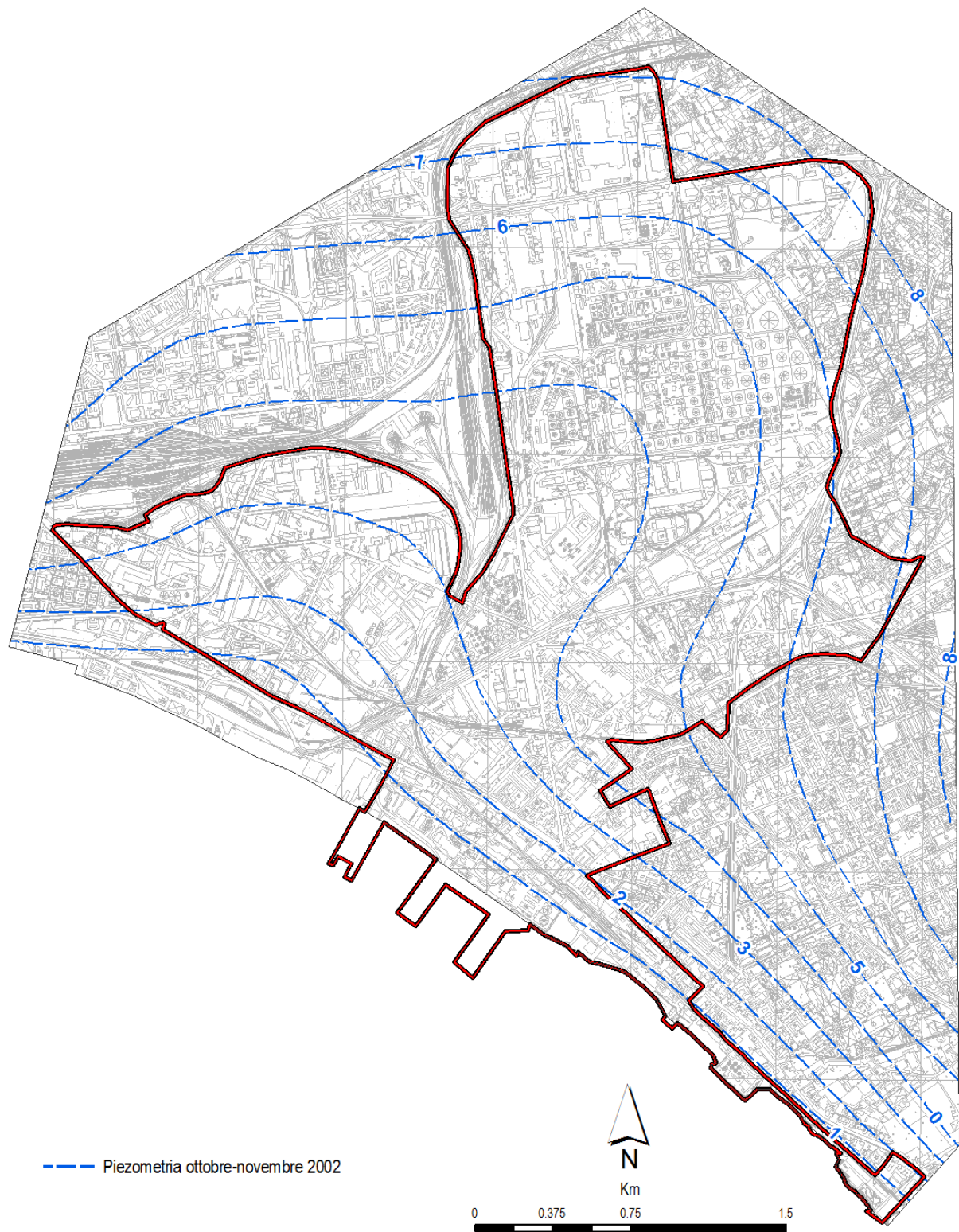


Figura 22 - Stralcio della morfologia della superficie piezometrica riferita al periodo ottobre-novembre 2002 (Piano di Tutela delle Acque redatto dall'Autorità di Bacino Nord-Occidentale, modificato e integrato)

Per poter analizzare in maniera esaustiva in fase concettuale la complessità dell'assetto piezometrico locale si è proceduto alla elaborazione della base di dati selezionata utilizzando diversi algoritmi di interpolazione. Nella Figura 23, Figura 24 e Figura 25, si riportano le tre diverse soluzioni raggiunte utilizzando nell'ordine un metodo di interpolazione *Radial Basis Function (RBF)*, *Ordinary Kriging (OK)* e *Local Polynomial (LP)*. Come è possibile constatare le tre soluzioni, pur molto simili, presentano caratteristiche e peculiarità differenti, in particolare il metodo RBF mette in evidenza l'aspetto transitorio con numerosi bassi piezometrici e aree di richiamo, evidentemente per la presenza di situazioni locali di prelievi, come i pozzi di MiSE e altre peculiarità di cui non si hanno informazioni specifiche. Il risultato dell'interpolazione con OK è meno erratico e disturbato rispetto alla soluzione proposta con il RBF in quanto le misure di rilievo sono comunque stimate dall'algoritmo a partire dai valori dei punti di misura adiacenti, producendo un effetto *smoothing*. Di contro, con l'algoritmo RBF, nelle regioni dello spazio in cui sono presenti punti di misura, l'algoritmo non procede ad una nuova stima e mantiene inalterato il dato rilevato, risultando più fedele proprio in tale regione dello spazio. L'effetto *spline* della superficie piezometrica ottenuto con il metodo OK è ancora più evidente utilizzando un sistema di interpolazione di tipo LP, in cui gli alti e i bassi piezometrici sono ridotti da funzioni di stima polinomiali di 1 o 2 ordine.

Concettualmente le tre ricostruzioni ci stanno ad indicare come lo stesso fenomeno può essere ricostruito a partire da un diverso approccio e produrre tre risultati che, pur corretti in se dal punto di vista del metodo di interpolazione, danno maggiore risalto ad un aspetto piuttosto che ad un altro. Nel primo caso la ricostruzione piezometrica con il metodo RBF mette in evidenza ed esaspera i connotati di transitorietà del fenomeno legati a situazioni locali, di contro il risultato ottenuto con il metodo LP dà risalto agli aspetti generali del deflusso riducendo la definizione delle alterazioni locali al flusso, la superficie piezometrica che si ottiene permette di definire con maggiore chiarezza gli assi di drenaggio, le direzioni principali di flusso ed i gradienti idraulici. L'assetto piezometrico derivato con il metodo OK permette di trovare una rappresentazione di sintesi, un compromesso in grado di rappresentare sia le condizioni transitorie locali (alti e bassi piezometrici da emungimenti e alterazioni antropiche) sia quelle generali di maggiore stazionarietà del flusso.

La piezometria ottenuta per l'area di studio è riportata nelle successive Figura 23, Figura 24 e Figura 25, in cui si evidenziano gli elementi caratteristici del campo di moto della falda rilevabili da tale elaborato sono in sintesi:

- andamento radiale convergente della falda da N, NW e SE che si raccorda nel settore centrale del SIN;
- presenza di linee di drenaggio preferenziali corrispondenti allo sviluppo del vecchio reticolo di bonifica idraulica esistente nel settore centrale del SIN nella depressione del Sebeto, attualmente occupato dal Collettore dello Sperone;
- forte perdita di carico idraulico, pari a circa 0.005, localizzata nella fascia di raccordo morfologico tra l'area di piana e le aree in rilievo topografico dal settore NW Flegreo e con maggiore evidenza in quello SE Vesuviano;

- basso gradiente idraulico nella parte centrale del SIN e su tutto il fronte marino pari a 0.002;
- quote piezometriche minime comprese tra 2 e 3 metri s.l.m nell'area depressa del Sebeto, in particolare lungo il reticolo di bonifica idraulica che si raccorda con le quote di falda più basse lungo il fronte marino;
- ampia depressione piezometrica con quote comprese tra 1.6 e 2.2 metri s.l.m presente nell'area centro orientale del SIN, afferente alle proprietà Q8 ed Esso, dovuta alla presenza di un importante sistema di messa in sicurezza della falda mediante barriere idrauliche e pozzi di bonifica;
- quote piezometriche massime comprese tra i 7 e 9 metri s.l.m lungo le aree limite NW e SE del dominio di studio;
- nell'area topograficamente depressa del paleoalveo del Sebeto è possibile riconoscere un asse di drenaggio idrico sotterraneo importante con basse quote piezometriche allineate lungo i punti di monitoraggio in prossimità del vecchio reticolo di bonifica che progradano dai 3 metri s.l.m, lato nord, sino a 2 metri s.l.m, nella parte più prossima alla linea di costa. Tale assetto indica una via preferenziale di deflusso riconducibile probabilmente alla presenza dei depositi di paleoalveo e alla vecchia canalizzazione;
- la soggiacenza della falda è molto ridotta proprio nella porzione più depressa della piana, ed è in questo settore, topograficamente compreso tra i 2-3 metri di altitudine, che si realizzerebbero valori minimi compresi tra 0,5 e 1 metro. Tale area è stata messa in evidenza nella Figura 26 come potenziale rischio di risorgiva e affioramento della falda in condizioni di morbida, situazione mitigata e limitata dalla presenza di numerosi pozzi ad uso privato ed industriale, oltre a quelli utilizzati per le bonifiche ambientali in atto. Dalla Figura 27 è possibile constatare come vi sia un'ottima sovrapposizione spaziale, inoltre, tra le aree di risorgiva della falda e il reticolo di canali e collettori, a testimonianza dell'effettiva corrispondenza tra le aree idraulicamente a rischio con il sistema di mitigazione messo in atto nel recente passato, a conferma della qualità delle elaborazioni eseguite per la definizione dell'assetto topografico dal un lato e quello piezometrico dall'altro.

E' da rilevare come, nonostante le approssimazioni del caso, è possibile riscontrare, comunque, una buona coerenza a livello locale con le ultime ricostruzioni proposte dalle ditte nei PdC sia con quanto eseguito negli studio di caratterizzazione geologico stratigrafico e idrogeologico del 2002 e con quelli dello Studio di Fattibilità e Progetto Preliminare. Tuttavia, trattandosi evidentemente di rilievi non omogenei per data oltre che per metodologia di interpolazione e densità dei dati puntuali, la definizione di un'unica piezometria di riferimento ha comportato localmente interpretazioni in parte aleatorie soprattutto nel settore esterno al SIN in cui mancano dati di riferimento, condizione che sarà tenuta in conto nella definizione degli obiettivi di calibrazione del modello di flusso.

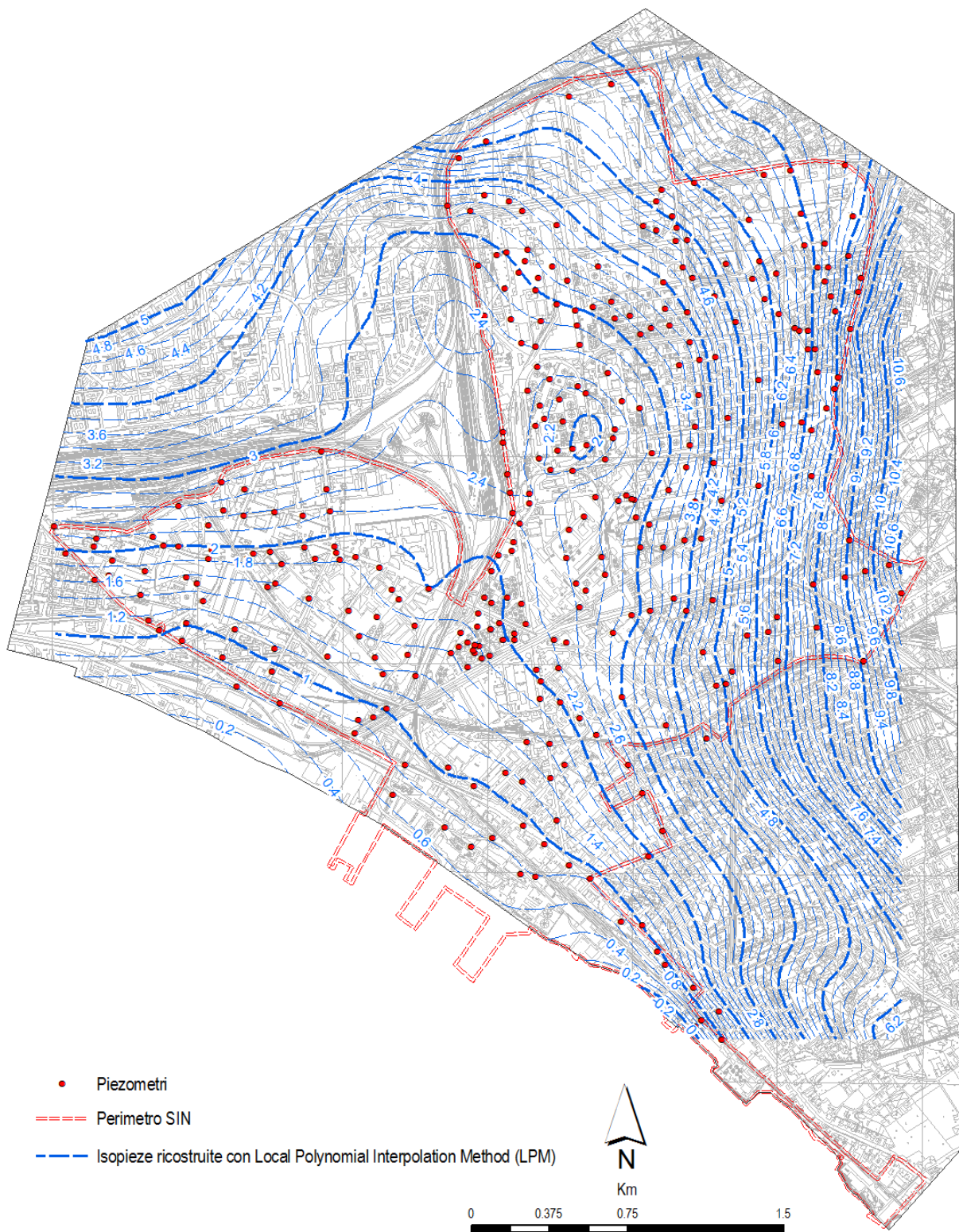


Figura 23 - Ricostruzione della superficie piezometrica a partire dai punti di monitoraggio con metodo di interpolazione *Local Polynomial Method* (LPM).

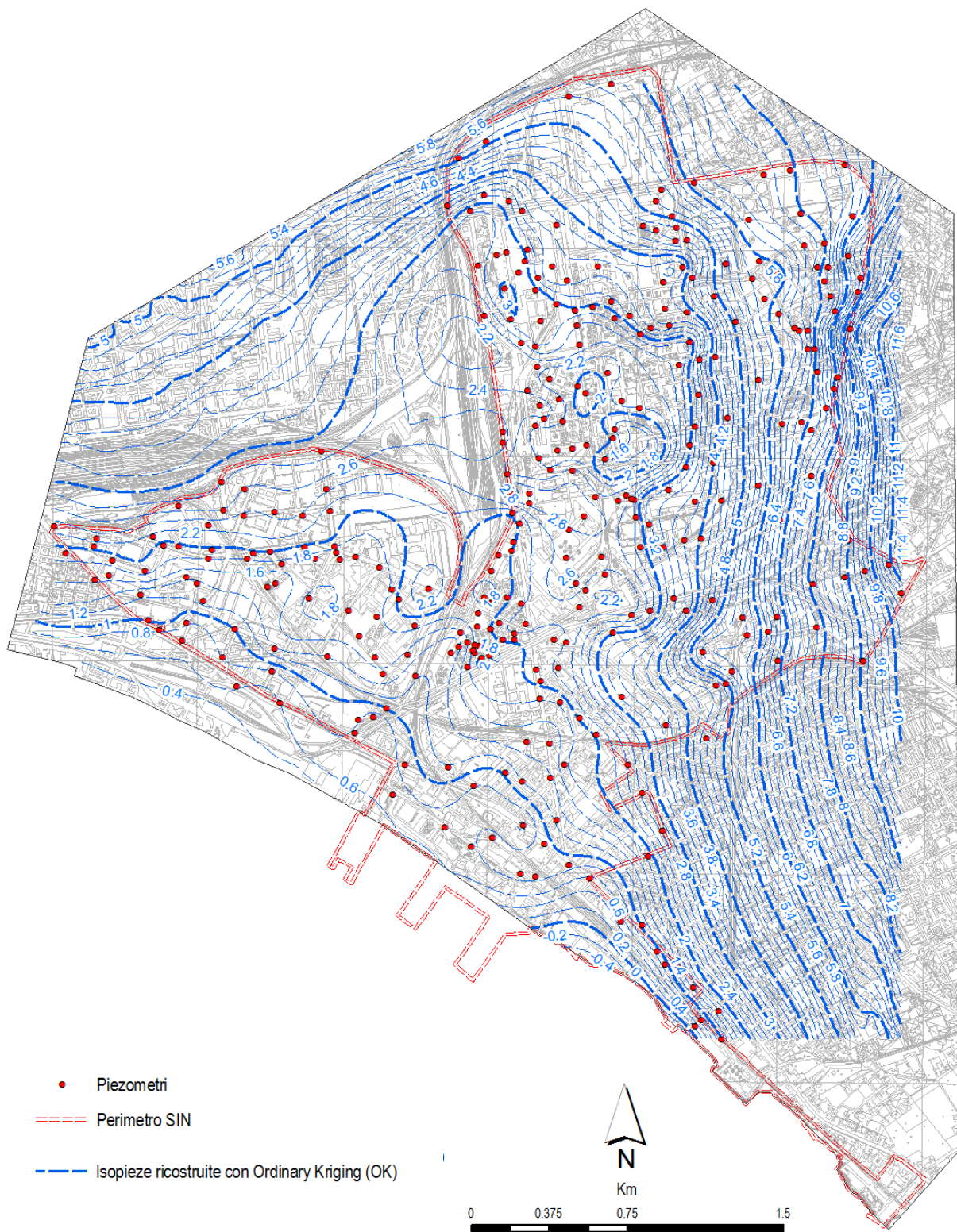


Figura 24 - Ricostruzione della superficie piezometrica a partire dai punti di monitoraggio con metodo di interpolazione *Ordinary Kriging* (OK).

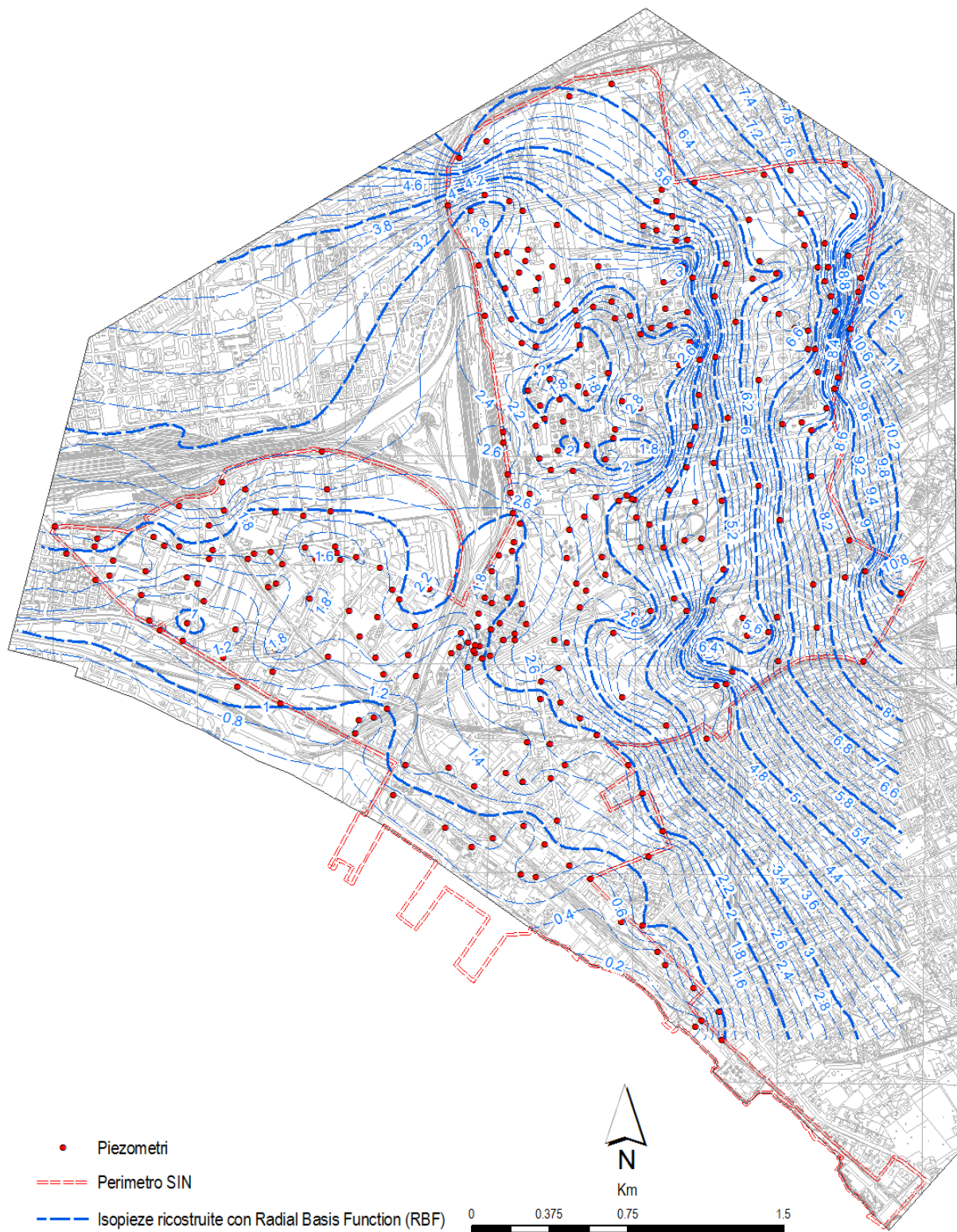


Figura 25 - Ricostruzione della superficie piezometrica a partire dai punti di monitoraggio con metodo di interpolazione *Radial Basis Function* (RBF).

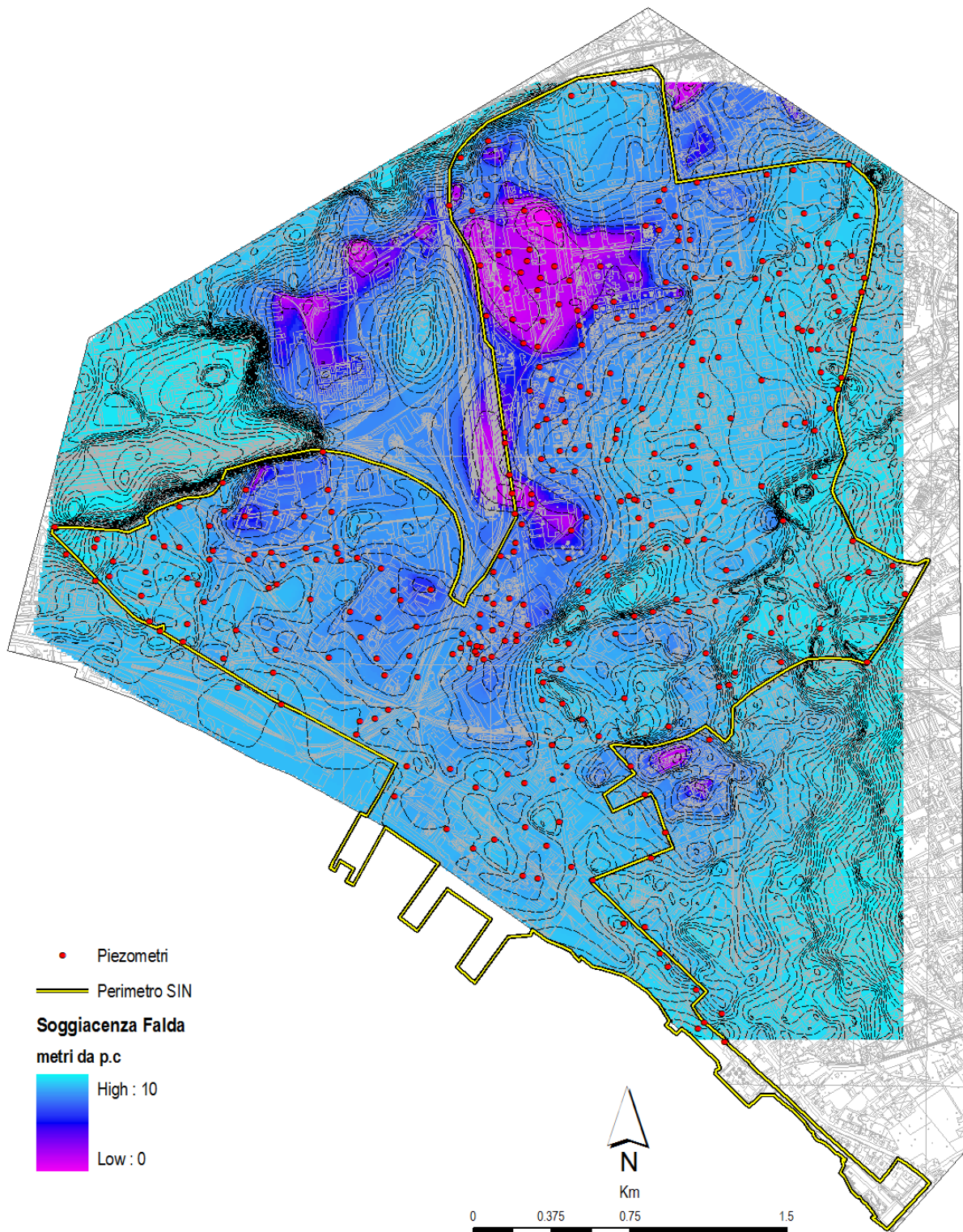


Figura 26 - Soggiacenza dal piano campagna della superficie piezometrica ricostruita.

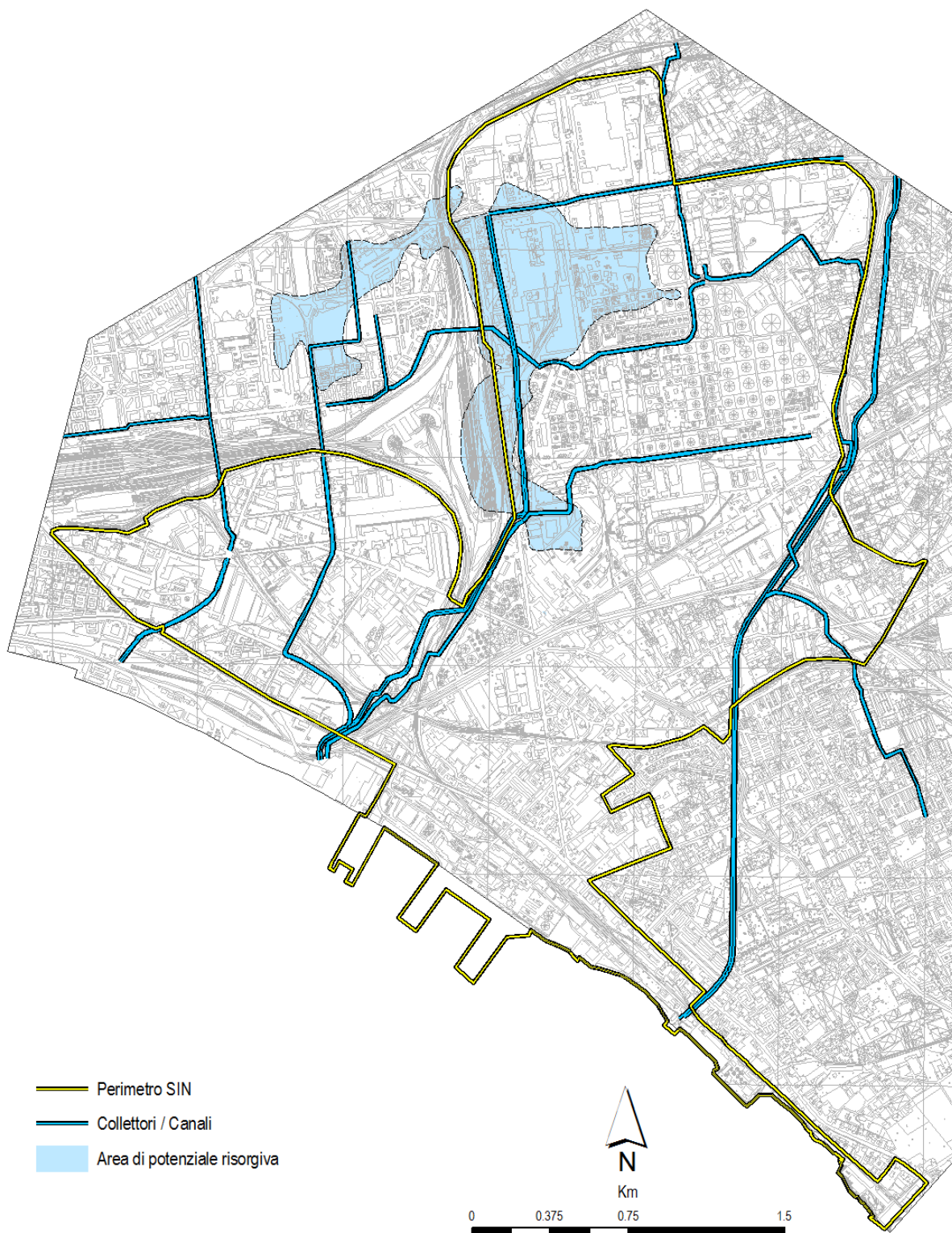


Figura 27 - Aree di potenziale risorgiva delle acque di falda.

2.6.4 Analisi dell'interfaccia tra acque di falda e salate

Per approfondire le conoscenze sullo stato di salinità della falda costiera sono stati acquisiti dati mediante un rilievo di campo eseguito nell'area fronte mare pertinente alla Autorità Portuale è stato possibile verificare lo stato di salinità della porzione superiore delle acque sotterranee. L'acquisizione dei dati è stata eseguita mediante l'utilizzo di una sonda multiparametrica che ha permesso di misurare alcuni parametri chimico fisici delle acque direttamente nel foro del piezometro e a diverse profondità rispetto al piano campagna. Sono stati misurati la torbidità (NTU = Nephelometric Turbidity Units), la conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{m}$), la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ed il livello piezometrico (m slm). In particolare è stato possibile accedere a 4 piezometri con profondità variabile compresa tra gli 8 ed i 10 metri dal pc, si riportano nella Tabella seguente i valori misurati.

Tabella 1 - Parametri chimico – fisici rilevati.

Denominazione Punto	Profondità (m. pc.)	Livello Pizometrico (m. slm)	Trasparenza (m) / Torbidità (NTU)	Conducibilità ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conducibilità ($\mu\text{S}/\text{cm}$) - 25 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Profondità interfaccia (Ghyben-Herzberg) (m.pc.)
PZ1	-2.5	0.85	129.4	1164	1353	18.75	-31.48
	-3.5		136.3	1153	1350	18.42	
	-4.5		142.7	1131	1351	17.51	
	-5.5		146.9	1099	1342	16.50	
	-6.5		169.9	1088	1327	16.54	
	-7.5		172.0	1080	1337	15.84	
PZ2	-3.5	0.15	133.6	1894	2173	19.34	-5.56
	-4.5		189.4	2026	2363	18.60	
	-5.5		141.6	13610	16119	17.91	
	-6.5		153.8	20280	24203	17.56	
	-7.5		153.4	20540	24572	17.45	
	-8.5		159.6	24260	29186	17.19	
PZ3	-9.0	165.2	26870	32368	17.13	-3.70	
	-3.5	139.4	2550	2901	19.71		
	-4.5	146.8	14255	16672	18.48		
	-6.5	163.8	18137	21296	18.30		
	-8.5	183.8	23408	27522	18.24		
P2	-9.5	385.7	21244	24994	18.21	-9.26	
	-2.0	134.8	1358	1589	18.47		
	-4.0	153.9	1493	1746	18.49		
	-5.5	170.3	1720	2014	18.42		

La conducibilità elettrica dipende fortemente dalla temperatura crescendo con l'aumentare di questa, quindi, per uniformare il valore con quello di riferimento "standard" oggi comunemente adottata in campo scientifico, pari al valore di temperatura di 25 $^{\circ}\text{C}$, è stata adottata la formula empirica di conversione:

$$C_{25} = C_t * [1 + X * (25-t)]$$

In cui X è il coefficiente di temperatura della conducibilità o fattore di conversione pari a circa 0.026. La trasformazione è stata poi riportata in Tabella.

Come specificato nella relazione specialistica la quota di interfaccia acqua dolce-salata del cuneo salino, si basa sulla stima della profondità della zona di equilibrio statico di due colonne di differente densità che secondo la relazione empirica di Herzberg (1901) è pari a:

$$P_a = \rho_s g h = \rho_d g (h+s)$$

ovvero

$$s = h (\rho_d / \rho_s - \rho_d)$$

in cui

P_a = pressione idrostatica nel punto A

g = accelerazione di gravità

h = carico idraulico della falda (m)

s = profondità dell'interfaccia dal livello mare (m)

ρ_s = densità dell'acqua di mare (1027 kg/m³ a circa 42 g/l di contenuto salino)

ρ_d = densità dell'acqua dolce di falda (circa 1000 kg/m³)

Nella relazione di Ghiben-Herzberg si ipotizza che l'acqua dolce e quella di mare siano immiscibili, che esistenza di una interfaccia netta, che l'acqua di mare sia immobile e che la componente orizzontale del moto dell'acqua dolce è costante lungo una verticale, quindi che le superfici equipotenziali siano verticali.

La profondità dell'interfaccia (s) dipende dal carico idraulico della falda e dalla densità dei due liquidi. Con i valori di densità precedenti, la relazione fornisce un valore di s circa pari a 37 m per 1 metro slm di carico idraulico, che in dipendenza dei valori di densità reali dell'acqua dolce e dell'acqua salata, tale coefficiente può variare tra 33 e 50, ammettendo 37 come valore medio. La relazione di Ghyben - Herzberg determina, quindi, che ciascun metro di carico di acqua dolce corrisponda a 37 metri di profondità dell'interfaccia, sempre rispetto al livello del mare. Nella realtà l'acqua dolce e l'acqua salata sono due liquidi perfettamente miscibili tra di loro, per cui al posto di una interfaccia netta esiste in realtà una zona a salinità variabile (zona di transizione).

Dall'esame dei risultati è possibile dedurre come vi sia una ottima correlazione tra i valori di carichi idraulici misurati nei piezometri e quelli di conducibilità elettrica. A tale proposito è possibile riconoscere nei piezometri PZ2 e PZ3, in cui i carichi idraulici sono rispettivamente 0.15 e 0.10 metri slm, il passaggio di transizione tra le acque di falda dolci e quelle marine. Nel PZ2, alla profondità di 4.5 e 5.5 metri dal pc, si passa dai 2363 a 16119 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C), evidenziando il netto passaggio da acque a salinità ancora da ricomprendersi in un contesto al limite delle acque di falda dolci verso acque decisamente salate. Rispetto al carico idraulico misurato in tale piezometro la

profondità del livello di transizione si dovrebbe attestare intorno ai 5 metri, seguendo lo sviluppo della curva teorica di Herzberg. Allo stesso modo tale peculiarità, si riscontra anche nel PZ3, in cui alla profondità compresa tra i 3 ed i 4 metri si rileva il passaggio di conducibilità da 2901 e 16672 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C), sempre in accordo con la curva teorica. Nei piezometri PZ1 e P2, in cui il carico idraulico è più elevato, rispettivamente 0.85 e 0.25 metri slm, i valori di conducibilità elettrica sono molto più bassi e riferibili a quelli di acque di falda dolci. Teoricamente la zona di interfaccia si dovrebbe individuare alla profondità di circa 9-10 metri nel piezometro P2 e circa 31-32 metri nel PZ1.

Basandoci sui pochi dati a disposizione non è possibile avanzare delle considerazioni più generalizzate di natura modellistica che possano includere l'intera fascia costiera del SIN in cui sono previsti gli interventi di progetto. Di contro è stato possibile constatare che, almeno nel settore fronte mare afferente all'Autorità Portuale, sembra non esistere un fenomeno di ingressione del cuneo salino mantenendosi in sostanziale il naturale equilibrio della zona di transizione acque di falda e quelle salate marine. Di questa informazione, unitamente alle attività di monitoraggio previste nel progetto, si terrà conto nella fase di gestione operativa dei sistemi di MiSPT, attraverso l'utilizzo di opportuni sistemi di telecontrollo dei livelli piezometrici e dei valori di conducibilità elettrica delle acque di falda che permetteranno di tarare le portate massime ottimali così da evitare l'ingressione del cuneo salino.

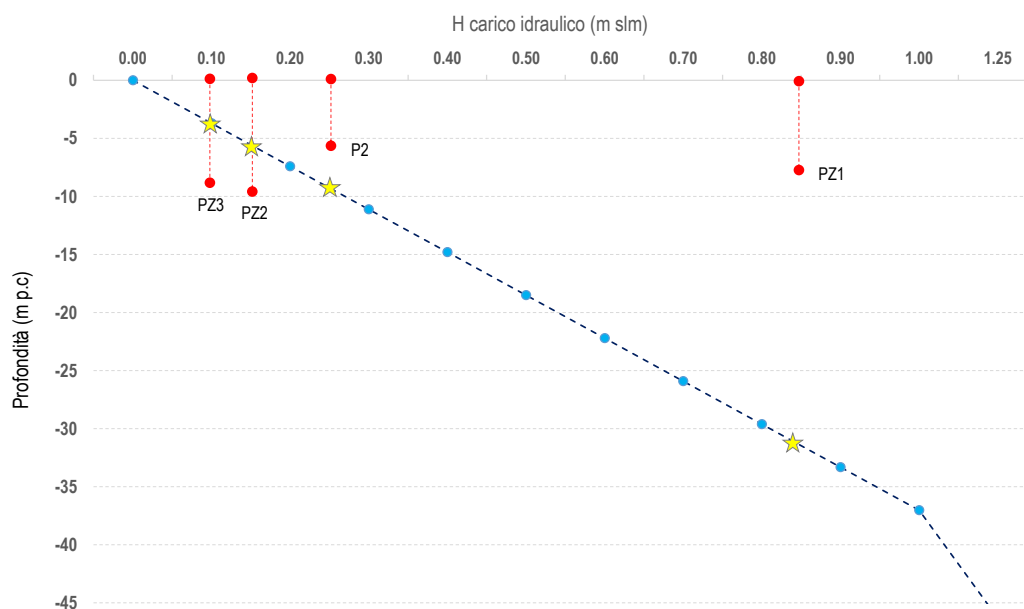


Figura 28 – Grafico dell'andamento della curva di equilibrio acque dolce-salata

2.6.5 Parametri idrodinamici del sistema acquifero

I rapporti stratigrafici sulla base dei litotipi osservati in fase di perforazione dei sondaggi e dei pozzi, hanno evidenziato una buona continuità areale dei principali corpi, pur essendo presenti, a scala minore, variazioni litologiche che possono comportare variazioni locali della permeabilità dell'acquifero. Sulla base delle principali unità idrogeologiche definite si è proceduto alla parametrizzazione del sistema attraverso l'attribuzione di un campo di valori di conducibilità idraulica (K), sulla base dei risultati di prove di permeabilità e in correlazione con le caratteristiche litologiche delle unità stratigrafiche precedentemente definite. Per quanto riguarda i riscontri sperimentali, la parametrizzazione si è basata:

- sul materiale documentale relativo alle prove di permeabilità eseguite nell'ambito dei diversi Piani di Caratterizzazione delle aziende all'interno dell'area SIN;
- sulle determinazioni dirette (prove di permeabilità) eseguite nelle indagini integrative SOGESID 2012;
- sulle prove eseguite in fase di progettazione dei sistemi di messa in sicurezza d'emergenza poste in essere da diverse società private all'interno del SIN;
- sulle prove eseguite per la realizzazione delle opere di marginamento fisico lungo la fascia costiera da parte dell'Autorità Portuale e dal Commissario di Governo per l'emergenza Bonifiche e tutela delle acque nella Regione Campania.

Queste ultime prove hanno fornito indicazioni anche sulla complessa eterogeneità dei depositi, con unità litologiche caratterizzate da insiemi granulometrici che vanno dai limi argillosi a sabbie ghiaiose. Tale eterogeneità granulometrica è stata confermata dall'ampia distribuzione dei valori di conducibilità idraulica. Una selezione significativa delle prove disponibili e i risultati delle stesse sono riportati nella successiva Tabella 2. In totale sono stati analizzati i dati provenienti da 74 Slug Test e 32 Prove di Portata eseguite nei depositi porosi alluvionali e piroclastici a profondità comprese tra gli 8 ed i 35 metri. Oltre a questi sono stati acquisiti dati su Prove Lugeon eseguite dall'Autorità Portuale nei depositi Tufacei a profondità comprese tra i 18 e i 22 metri. A disposizione anche Prove tipo Lefranc, esaminati per fare un raffronto con gli altri dati disponibili, a causa dei ben noti limiti di affidabilità nella determinazione dei valori di conducibilità idraulica.

Dall'analisi della distribuzione è possibile riconoscere un sistema acquifero poroso superficiale con permeabilità variabile, con valore medio di 4×10^{-4} m/s con minimi di 2×10^{-7} m/s e una con valori massimi di medie di 4×10^{-3} m/s. Il range di variabilità piuttosto ampio (tre ordini di grandezza) sta a testimoniare la grande eterogeneità dei depositi in termini di permeabilità, soprattutto in quelli alluvionali fini, che rappresentano i termini litologici a più bassa permeabilità, mentre le piroclastiti hanno un campo di variazione delle K inferiore, e si attestano intorno a 10^{-4} m/s.

In riferimento alla significatività delle suddette prove per le specifiche finalità di implementazione di un modello di flusso, la problematica da considerare è relativa all'eterogeneità delle metodiche di indagine, che rende non sempre agevole il confronto e la correlazione dei dati.

In particolare la metodologia di riferimento è costituita da prove Lefranc, tali prove, con particolare oltre a fornire di norma valori di K marcatamente sottostimati rispetto alle prove di emungimento, come da letteratura consolidata, riguardano un volume di acquifero limitato all'intorno del punto di prova, risultando molto approssimata la caratterizzazione in ambienti eterogenei come l'acquifero superficiale specificamente in esame. Dall'esame delle prove di permeabilità per le differenti unità stratigrafiche-idrogeologiche presenti nell'area del SIN, alla luce anche di tali precisazioni può essere ricavato il seguente quadro di sintesi:

- **Prove Lefranc:** complessivamente sono state eseguite 30 Prove Lefranc a profondità compresa tra i 5 e 10 metri dal p.c., che hanno permesso di determinare il valore del coefficiente di permeabilità dei terreni superficiali alluvionali, quali limi e argille limose nelle aree più interne del SIN, e piroclastiti nella porzione più prossima alla linea di costa. Le prove hanno restituito valori di K medi di 2.5×10^{-5} m/s, con massimi di 9×10^{-5} m/s e minimi di 1.8×10^{-7} m/s. E' tuttavia necessario effettuare alcune precisazioni. La misura, largamente prevalente in ambito dei PdC (prove Lefranc a carico variabile) può risultare adeguata per le unità litologiche a bassa e media permeabilità, estesamente rappresentate nell'ambito del SIN, comprendendo il campo dai limi e argille palustri (A) per i quali si possono ritenere rappresentativi i valori di K derivanti dalle suddette prove. Si ritiene invece poco rappresentativa, e anche non coerente con le prescrizioni tecniche di riferimento (cfr. in particolare norme A.G.I. – Associazione Geotecnica Italiana, 1977) la caratterizzazione di depositi clastici, come in particolare i depositi piroclastici (PR1 e PR2), prevalentemente sabbiosi con limi e ghiaie subordinate, mediante prove Lefranc a carico variabile. Tale metodologia, nello specifico contesto, porta come noto ad una forte sottostima dei valori di conducibilità idraulica. Nel caso specifico le prove di permeabilità quali Slug Test rappresentano la metodologia più indicata per caratterizzare dal punto di vista idrodinamico i depositi piroclastici in prevalenza sabbiosi.
- **Slug Test:** sono state prese in considerazione 74 prove di permeabilità Slug Test, ereditati dai piani di caratterizzazione delle aree private acquisite dal Ministero dell'Ambiente e svolte da SOGESID nella campagna di indagine 2012. Tale metodo è più adeguato per la stima della permeabilità rispetto a quelle di tipo Lefranc. In particolare le prove hanno restituito valori di K medi di 4.0×10^{-4} m/s, con massimi di 4.3×10^{-3} m/s e minimi di 2×10^{-7} m/s.
- **Prove di Portata:** sono state prese in considerazione 32 Prove di Portata, svolte in particolare per il corretto dimensionamento degli interventi di messa in sicurezza d'emergenza posti in essere nelle aree "Whirlpool", "Magnaghi" e "Eni Deposito costiero", dove sono ad oggi attivi sistemi di emungimento. Tale metodo risulta essere il più affidabile per la parametrizzazione di supporto ai modelli idrodinamici, potendo investigare un volume di

terreno molto più ampio, sottoponendo il sistema a diversi cambiamenti delle condizioni di emungimento (prove a portata variabile) e eseguite per un tempo sufficientemente lungo sino alla stabilizzazione e al raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio del sistema (stazionarietà). In particolare le prove hanno restituito valori di K medi di 3.6×10^{-4} m/s, con massimi di 1.7×10^{-3} m/s e minimi di 4.5×10^{-5} m/s.

- **Prove Lugeon:** Per quanto riguarda la permeabilità dei Tufi (TSV e TGN) in letteratura sono indicati valori di conducibilità idraulica compresi tra 1×10^{-9} m/s, per le porzioni di tufo avente una scarsa fessurazione, e 1×10^{-5} m/s per le porzioni di tufo più alterato e fessurato (Celico 2000). Infatti i depositi tufacei (presenti a una profondità media di 20 m dal p.c. lungo la linea di costa) costituiscono livelli a bassa e bassissima permeabilità con valori ricavati da Prove Lugeon. Per tale ragione costituiscono un elemento di separazione naturale tra la falda superficiale e quella profonda e sono stati oggetto di caratterizzazione idrodinamica mediante prove in situ eseguite in particolare per la realizzazione dei sistemi di contenimento fisico realizzati dall'Autorità Portuale di Napoli nel Progetto Esecutivo per la realizzazione della "Barriera fisica come messa in sicurezza permanente della falda fronte mare", e per la progettazione esecutiva di "Bonifica degli arenili di San Giovanni a Teduccio (NA) e dei fondali antistanti – opere di prima fase". Lo scopo delle prove è stato quello di valutare le caratteristiche di "impermeabilità" del banco tufaceo in corrispondenza del "Tufo", che hanno evidenziato un comportamento da materiale a bassa permeabilità nel caso in cui il corpo litoide si presenta "integro", con valori di conducibilità idraulica misurata in 5×10^{-9} - 7×10^{-9} m/s eseguite in aree limitrofe. La presenza di fenomeni di fessure eventualmente presenti nell'ammasso determinano ovviamente un aumento della permeabilità anche se nel caso specifico analizzato il corpo risulta essere piuttosto compatto. Tale caratteristica è stata riscontrata anche dalle prove geotecniche e dalla caratterizzazione fisico meccanica dei tufi eseguita dall'Autorità Portuale di Napoli in fase di indagine ed ampliamento delle strutture della Nuova Darsena e della Diga Duca d'Aosta, nell'Area di Levante del Porto di Napoli. I valori dell'indice RQD (*Rock Quality Designation*) determinati in sito sulle carote di tufo per i sondaggi a terra e per i sondaggi a mare variano da un minimo del 45% fino al 100%, con un valore medio globale dell'indice pari al 73%, che indica una discreta integrità del materiale carotato. La classifica della roccia, in base al valore di RQD, è tra "media" e "buona".

Tabella 2 - Sintesi delle prove di permeabilità eseguite nell'acquifero di Napoli orientale.

CARATTERISTICHE IDRAULICHE DEI DEPOSITI								
Esecutore Prova	N° Prove	Tipo di Prova	Profondità Prova		Coefficiente di Permeabilità			
			(metri da p.c.)		K (m/s)			
			Max	Min	Max	Med	Min	
EX CIRIO EUROLAT	6	Slug Test	10	8	6.84E-04	5.33E-04	5.10E-05	
ARPAC	16	Slug Test	10	7	4.36E-03	8.82E-04	1.66E-04	
Q8 DEPOSITO BENIT	8	Slug Test	26	8	3.68E-05	1.96E-05	2.54E-06	
Q8 KRC	34	Slug Test	35	10	4.52E-05	8.91E-06	1.98E-07	
SOGESID	6	Slug Test	12	12	2.68E-05	7.59E-06	8.32E-07	
DEPOSITO CONTAINERS	4	Slug Test	10	10	1.25E-03	9.82E-04	7.39E-04	
WHIRLPOOL	6	Prove Portata	10	25	1.70E-03	3.40E-04	7.10E-05	
MAGNAGHI	22	Prove Portata	15	10	1.00E-03	6.50E-04	9.10E-05	
ENI DEPOSITO	4	Prove Portata	15	10	3.40E-04	8.80E-05	4.50E-05	
AUTORITA' PORTUALE	2	Prove Lugeon	22	18	7.00E-09	6.00E-09	5.00E-09	

2.6.6 Calcolo delle voci di bilancio idrogeologico dell'area

Per la stima preliminare delle principali voci del bilancio idrogeologico del dominio di studio, afferente all'area del SIN, si è proceduto al calcolo per via analitica utilizzando l'equazione di Darcy come modello matematico di riferimento prendendo in considerazione la ricostruzione piezometrica elaborata (Figura 23, Figura 24 e Figura 25). Tale piezometria è stata utilizzata per calcolare in via approssimativa la portata idrica sotterranea della falda e stimare le voci di bilancio idrogeologico a partire dalle principali condizioni al contorno del flusso idrico sotterraneo dell'area, quali gli afflussi superficiali e sotterranei dai limiti NW e SE e la portata che defluisce verso mare attraverso il bordo SW del sito di interesse. Ai fini del calcolo della portata della falda, sono stati utilizzati 68 dati valori di conducibilità idraulica distribuiti sul territorio in modo disomogeneo. Si riportano di seguito le stime analitiche del bilancio:

Deflusso verso Mare:

Conducibilità idraulica (K): valore medio pari a circa 5×10^{-4} m/s;

Lunghezza e spessore della sezione drenante (L): lunghezza fronte marino di circa 5.200 metri, sezione satura di deflusso circa pari a 60 metri.

Gradiente idraulico (i): la media pesata riferita al settore compreso tra l'isopiezometrica 3 metri (s.l.m.) e la linea di costa (a quota 0 m.) è di circa 0,003.

Portata = 562 l/s (48522 m³/giorno)

Afflusso sotterraneo dal limite Nord-Ovest:

Conducibilità idraulica (K): valore medio pari a circa 2.5×10^{-4} m/s;

Lunghezza e spessore della sezione drenante (L): lunghezza fronte marino di circa 3.000 metri, sezione satura di deflusso circa pari a 60 metri.

Gradiente idraulico (i): la media pesata riferita al settore compreso tra l'isopiezometrica 7 e 5 metri (s.l.m.) è di circa 0,005.

Portata = 225 l/s (19440 m³/giorno)

Afflusso sotterraneo dal limite Nord-Est:

Conducibilità idraulica (K): valore medio pari a circa 1.5×10^{-4} m/s;

Lunghezza e spessore della sezione drenante (L): lunghezza fronte marino di circa 4.500 metri, sezione satura di deflusso circa pari a 60 metri.

Gradiente idraulico (i): la media pesata riferita al settore compreso tra l'isopiezometrica 9 e 7 metri (s.l.m.) è di circa 0,008.

Portata = 324 l/s (27994 m³/giorno)

Afflusso sotterraneo dal limite Nord:

Conducibilità idraulica (K): valore medio pari a circa 5×10^{-4} m/s;

Lunghezza e spessore della sezione drenante (L): lunghezza fronte marino di circa 1.800 metri, sezione satura di deflusso circa pari a 60 metri.

Gradiente idraulico (i): la media pesata riferita al settore compreso tra l'isopiezometrica 8 e 6 metri (s.l.m.) è di circa 0,003.

Portata = 162 l/s (13997 m³/giorno)

Infiltrazione della superficie topografica:

L'infiltrazione verticale diretta è stata attribuita in coerenza con i valori stimati nel calcolo del bilancio idrogeologico, sulla base dei dati meteo della stazione di Napoli (periodo 1944-1994). In particolare, l'aliquota di ricarica verticale può essere oggetto di una prima valutazione, per l'input al modello di flusso, derivante dalla stima di un coefficiente di infiltrazione, attraverso la relazione:

$$I = (P - E_v) * \chi = Q * \chi$$

dove Q rappresenta la precipitazione efficace al netto dell'evapotraspirazione E_v .

Per la stima del coefficiente χ si propongono i range di valori riportati in Figura 29, compatibili anche con risultati di ampia sperimentazione nell'ambiente geologico e climatico dell'Italia centro-meridionale.

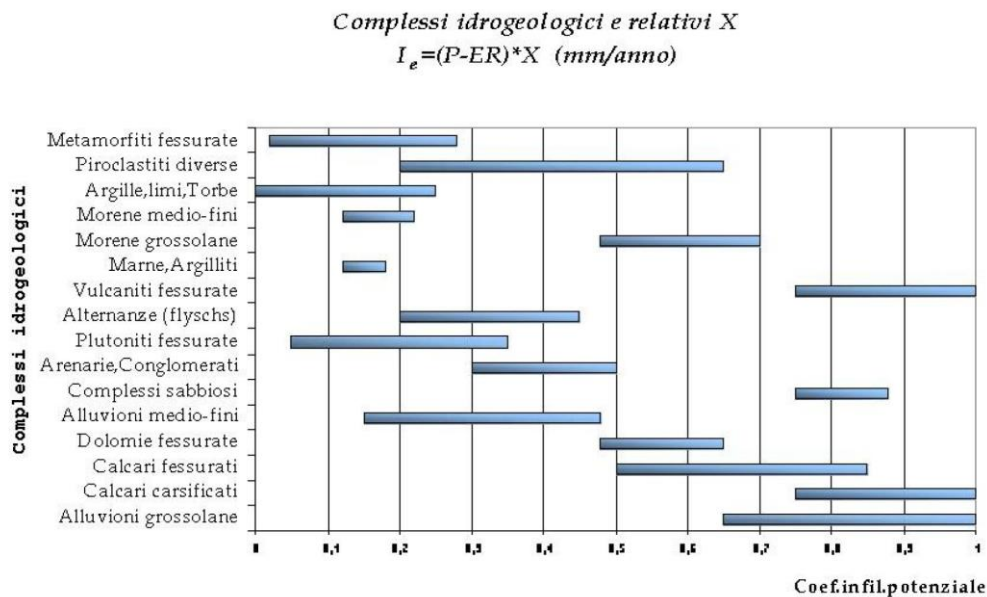


Figura 29 - Diagramma dei range del coefficiente χ nel caso di terreni e rocce poco coperte (da Sappa G., pubbl. Università di Roma 1 – Ingegneria dell’Ambiente e Territorio, a.a. 2009-2010).

Di seguito si riportano i termini per il calcolo dell’infiltrazione efficace.

Superficie di infiltrazione: l’area complessiva del dominio di calcolo in esame è di circa 15.975.000 m² di cui circa l’85% (13.695.000 m²) risulta urbanizzata, il restante 15% (2.280.000 m²) è costituito da aree libere, ovvero rappresentate da zone verdi coltivate, parchi o tratti non interessate da infrastrutture in grado di limitare l’infiltrazione delle precipitazioni come il tracciato ferroviario nella parte nord del sito. Le aree appena descritte sono riportate in Figura 30.

Precipitazioni: La pluviometria media annua dell’area di Napoli è di circa 884 mm/anno, con un massimo di 1375 mm (anno 1969) e un minimo di 614 mm (anno 1983). Il trend per la stazione di Napoli è costante e le variazioni annuali permettono di individuare un periodo piovoso (morbida) concentrato nei mesi di novembre-dicembre, mentre il mese più secco (magra) è quasi sempre luglio.

Evapotraspirazione: Le temperature registrate dalla stazione termometrica di Napoli indicano valori medi di 18°C, e considerando una temperatura media annua in funzione della pluviometria media mensile (Tp), come indicato nella formulazione di Turc per il calcolo dell’evapotraspirazione, si ottiene un valore di Tp pari a 16.5 °C. Applicando l’equazione di Turc si ottiene una evapotraspirazione media pari a 660 mm/anno.

Infiltrazione Potenziale: Sottraendo il valore di Precipitazione media annua a quello di evapotraspirazione si ottiene il volume di acqua potenzialmente disponibile all’infiltrazione pari a 224 mm/anno, ad eccezione di un’aliquota che concorrerà al deflusso idrico superficiale.

Coefficiente di Infiltrazione Potenziale (CIP%): L'area industriale di Napoli è intensamente urbanizzata con aree complessivamente a bassa capacità di infiltrazione considerando che l'80% della superficie del terreno è urbanizzata (cementata o impermeabilizzata), e che parte dei depositi superficiali sono costituiti da limi e torbe specialmente nella depressione centrale del SIN. Il CIP attribuibile alle aree scoperte è assimilabile a un valore medio di 0.3, ottenuto dalla media del CIP per le piroclastiti che può raggiungere anche uno 0.5 e quello dei depositi alluvionali fini (limi) molto più bassi intorno allo 0.1; mentre per le aree cementate si riduce drasticamente a 0.05. I valori medi sono stati stimati a partire dal diagramma dei range del coefficiente nel caso di terreni e rocce poco coperte (Figura 11, da Sappa G., pubbl. Università di Roma 1 – Ingegneria dell'Ambiente e Territorio, A.A. 2009-2010).

- area scoperte: 68 mm/a
 $I_1 = (P-Ev) * \chi = 224 * 0.3 = 68 \text{ mm/anno}$
 $Q_1 = I * \text{Area} = 26 \text{ l/s}$
- area cementate: 12 mm/a
 $I_2 = (P-Ev) * \chi = 224 * 0.05 = 12 \text{ mm/anno}$
 $Q_2 = I * \text{Area} = 8 \text{ l/s}$

Portata = 34 l/s (2938 m³/giorno)

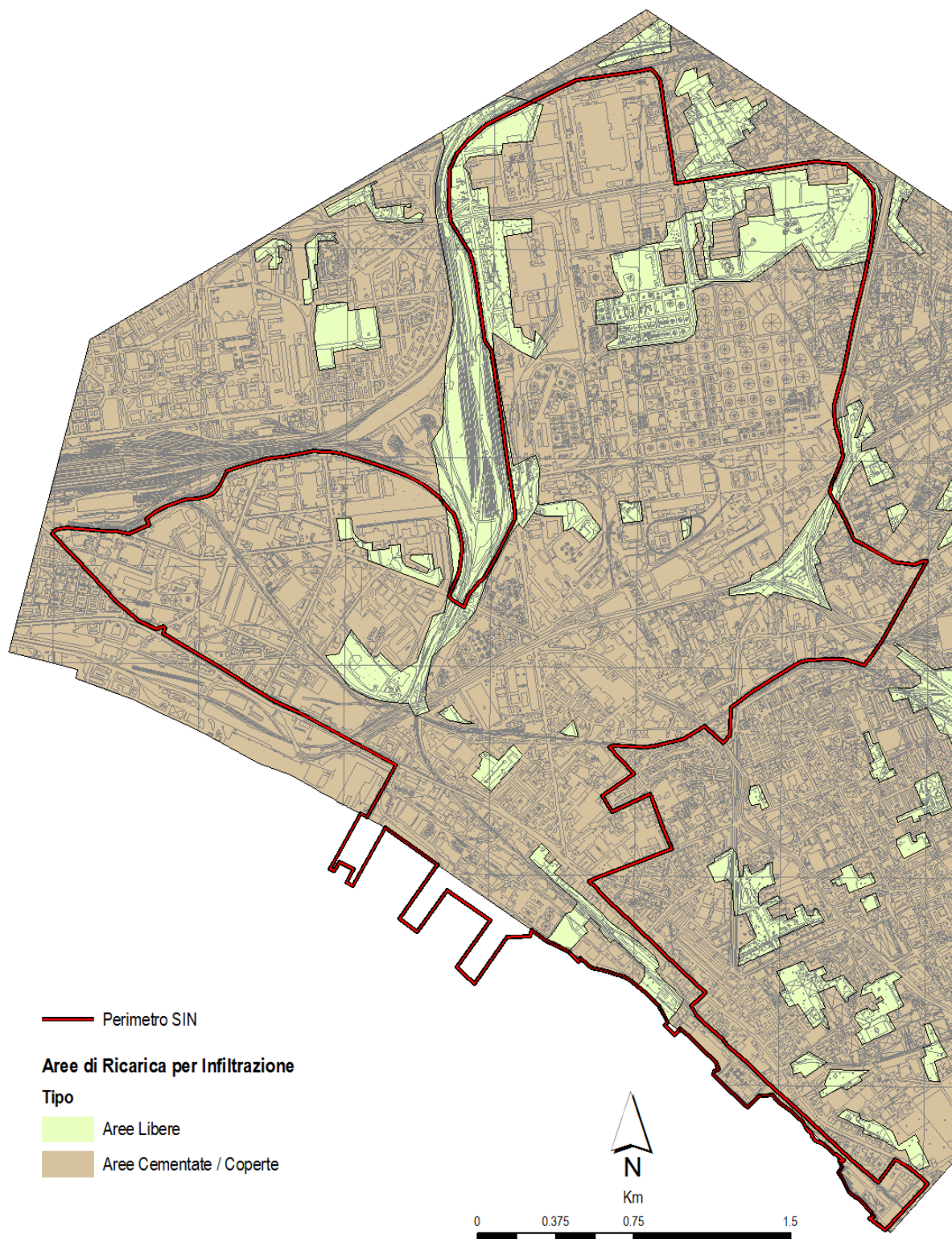


Figura 30 - Aree di ricarica per infiltrazione.

Prelievi dai pozzi industriali:

Negli ultimi anni i prelievi sono fortemente diminuiti a causa della parziale dismissione delle aree produttive e per la presenza del sistema acquedottistico. Per l'area Kuwait si è passati da 300 l/s del 1987 a circa 8 l/s del 2002. I dati di prelievo forniti dal Comune di Napoli (C.U.G.R.I, 2001) ci indicano come i prelievi complessivamente denunciati nell'area industriale siano passati da 350 l/s del 1975 a circa 790 l/s del 1991 sino ad una drastica riduzione pari a circa 125 l/s del 1999. In totale nel 2000 i prelievi complessivi sono stati stimati dall'Ufficio Tutela e Monitoraggio dell'aria e dell'acqua della Provincia di Napoli in circa 100 l/s (8640 m³/giorno), in progressiva diminuzione sino a d oggi. Inoltre, negli ultimi anni, almeno a partire da fine anni '90, sono stati messi in funzione numerosi pozzi per il raggiungimento degli obiettivi ambientali di bonifica e messa in sicurezza della falda nelle aree private in cui né è stata accertata contaminazione. L'entità di questi prelievi non è confrontabile con quella dei pozzi ad uso industriale, infatti, nel calcolo del bilancio idrogeologico costituiscono una voce marginale stimata intorno ai 30 l/s, così come riportato nel paragrafo 4.1. Anche se contenuti e localizzati, questi pozzi assolvono un ruolo importante ai fini della ricostruzione del campo di moto della falda, in quanto determinano alterazioni locali della porzione superficiale del sistema di flusso date le profondità contenute di pozzi, generalmente intorno ai 10 metri.

La portata complessiva in uscita dal sistema acquifero è di 562 l/s verso il limite marino, mentre la somma degli afflussi è di circa 745 l/s (64368 m³/giorno), con un deficit di output pari a circa 186 l/s (15846 m³/giorno) escludendo gli emungimenti dei pozzi. Nel bilancio non sono state riportate le perdite potenziali derivanti dal sistema acquedottistico non potendo stimare l'entità e la localizzazione delle perdite dalla rete. Con tutta probabilità i 186 l/s in deficit dal bilancio devono essere imputabili all'azione di prelievo dai pozzi industriali diffusi nell'area e secondariamente da quelli di MiSE e bonifica privati. La portata, infatti, è del tutto compatibile con i prelievi stimati a partire da fine anni '90 (circa 100 l/s) in aggiunta con quelli presenti per gli interventi di bonifica (circa 30 l/s). I restanti 50 l/s in eccesso potrebbero essere drenati dal vecchio sistema di canalizzazione dell'area, anche se la trasformazione del reticolo in collettori chiusi ha ridotto al minimo la capacità di interscambio idrico con la falda. Questa incognita sarà definita in fase di calibrazione del modello di flusso al fine di ottenere un corretto bilancio di massa in relazione alle informazioni piezometriche utili alla calibrazione.

3. MODELLO DI FLUSSO IDRICO SOTTERRANEO DELL'AREA SIN

3.1 Aspetti generali e caratteristiche del modello utilizzato

Ricostruito il modello concettuale, si è proceduto alla modellazione in termini matematici del sistema naturale, definendo e discretizzando il dominio di calcolo (griglia) ed imponendo le condizioni al contorno ed i parametri idrodinamici. E' stato sviluppato un modello numerico del flusso applicando il codice di calcolo FEFLOW (WASI-DHI) basato su di un approccio agli elementi finiti per approssimare le soluzioni delle equazioni differenziali alle derivate parziali nelle tre dimensioni che governano il flusso delle acque sotterranee. Il codice FEFLOW (*Finite Element subsurface FLOW system*) è uno dei più sofisticati codici numerici ad oggi disponibili per la modellazione dei processi di flusso e trasporto in mezzi porosi e fratturati, in condizioni sia sature che insature. Rimandando per il dettaglio alla letteratura tecnica disponibile, si riportano le seguenti caratteristiche generali del modello implementato:

- discretizzazione con mesh tridimensionale agli elementi finiti;
- simulazione in zona satura;
- simulazione in mezzi porosi e fratturati, con possibilità di assegnazione differenziata delle 3 componenti vettoriali dell'ellissoide di conducibilità idraulica;
- simulazione dei processi di trasporto degli inquinanti, con integrazione di un'estesa tipologia di reazioni chimiche e meccanismi di degradazione.

L'approccio agli elementi finiti è raccomandato in presenza di forti irregolarità geometriche ed eterogeneità nel modello stratigrafico, non correttamente schematizzabili sulla base di grid regolari alle differenze finite e peraltro riscontrabili per tutta l'area del SIN come evidenziato dalla ricostruzione stratigrafica. L'utilizzo di una maglia irregolare ha consentito inoltre di riprodurre al meglio anche i forti e diffusi contrasti di conducibilità idraulica, come riscontrabili ad esempio nel riporto tra Tufi e Pirocalstiti, di norma causa di problemi rilevanti di convergenza del modello nella soluzione alle differenze finite.

L'applicazione di FEFLOW, è adatta a simulare ogni condizione di progetto includendo il codice di calcolo moduli per l'inserimento di pozzi di pompaggio, pozzi di iniezione, barriere lineari semipermeabili o impermeabili, strutture impermeabilizzate sotto falda.

Le simulazioni sono state eseguite in regime stazionario tenendo in considerazione il set di dati piezometrici utilizzati per la definizione concettuale del campo di flusso riportato nel paragrafo 2.3.1. La scelta di lavorare in condizioni stazionarie per il flusso ante operam è dovuto principalmente alla difficoltà evidente di caratterizzare i depositi dal punto di vista dell'immagazzinamento dinamico, sia in quanto l'approccio in stazionario risulta comunque cautelativo, "massimizzando" gli effetti sul deflusso sotterraneo degli interventi in progetto in condizioni post operam (es. rigurgito connesso all'inserimento di barriere e strutture impermeabili, depressione dinamica indotta da pompaggi o pozzi barriera, trincee ecc.).

La fase di implementazione del modello numerico si è svolta seguendo le procedure e le metodologie di qualità standard riportate definite dal Servizio Geologico degli Stati Uniti (USGS) e gli standard internazionali ASTM (*American Society for Testing and Materials*): (1) USGS (2004) *Guidelines for evaluating ground-water flow models* (SIR 2004-5038); (2) ASTM D5718 - 95(2006) *Standard Guide for Documenting a Groundwater Flow Model Application*. Per lo sviluppo del modello numerico del flusso sono state svolte nell'ordine le seguenti attività principali:

- definizione della geometria del sistema idrogeologico investigato;
- discretizzazione orizzontale e verticale del dominio di studio;
- implementazione dei parametri idrodinamici;
- implementazione delle condizioni al contorno;
- implementazione delle condizioni iniziali.

3.2 Implementazione del modello di flusso di riferimento

3.2.1 La griglia di calcolo

Il dominio di calcolo stabilito ha una superficie di 1600 ettari con sviluppo e si estende per tutta l'area che include il SIN di Napoli orientale. L'estensione del dominio di calcolo è sufficientemente ampia da tenere conto degli effetti delle opere in un'area di influenza ritenuta rappresentativa. Nella scelta dell'estensione massima di modellazione ha avuto un ruolo importante anche il numero e la distribuzione dei sondaggi disponibili per poter ricostruire il modello geologico del sottosuolo (Figura 31). Il modello di flusso tridimensionale è costituito da una griglia di 67200 elementi triangolari (Mesh Nodes) sul piano orizzontale presenta un dettaglio differenziato, massimo in corrispondenza di specifici settori come i canali di bonifica e le aree interessate morfologicamente più depresse dove si esercitano i principali fenomeni di drenaggio della falda superficiale.

Seguendo questa logica il dominio di calcolo è stato suddiviso in tre sub-zone ognuna afferente a un livello altimetrico ben preciso (Figura 32). L'area del dominio topograficamente più elevata, con quote superiori ai 12 metri s.l.m, interessando zone esterne al SIN è stata suddivisa con una mesh più ampia, con lato degli elementi triangolari dell'ordine di 50 metri. Il territorio ricadente nella fascia altimetrica compresa tra 12 e 6 metri s.l.m, intermedia e ricadente nella porzione perimetrale del SIN, è stata suddivisa con una mesh con elementi di lato dell'ordine dei 25 metri. Infine, per la porzione appunto altimetricamente più bassa compresa tra 6 e 1 metri s.l.m, che interessa quasi per intero la superficie del SIN, la discretizzazione è stata molto raffinata con mesh di lato compreso tra i 5 e 10 metri, così da poter implementare condizioni di flusso precise e da ottenere soluzioni molto dettagliate.

Successivamente per migliorare il dettaglio delle soluzioni del modello verranno intensificate le discretizzazioni delle aree afferenti alle linee di progetto barriere a alle aree di intervento.

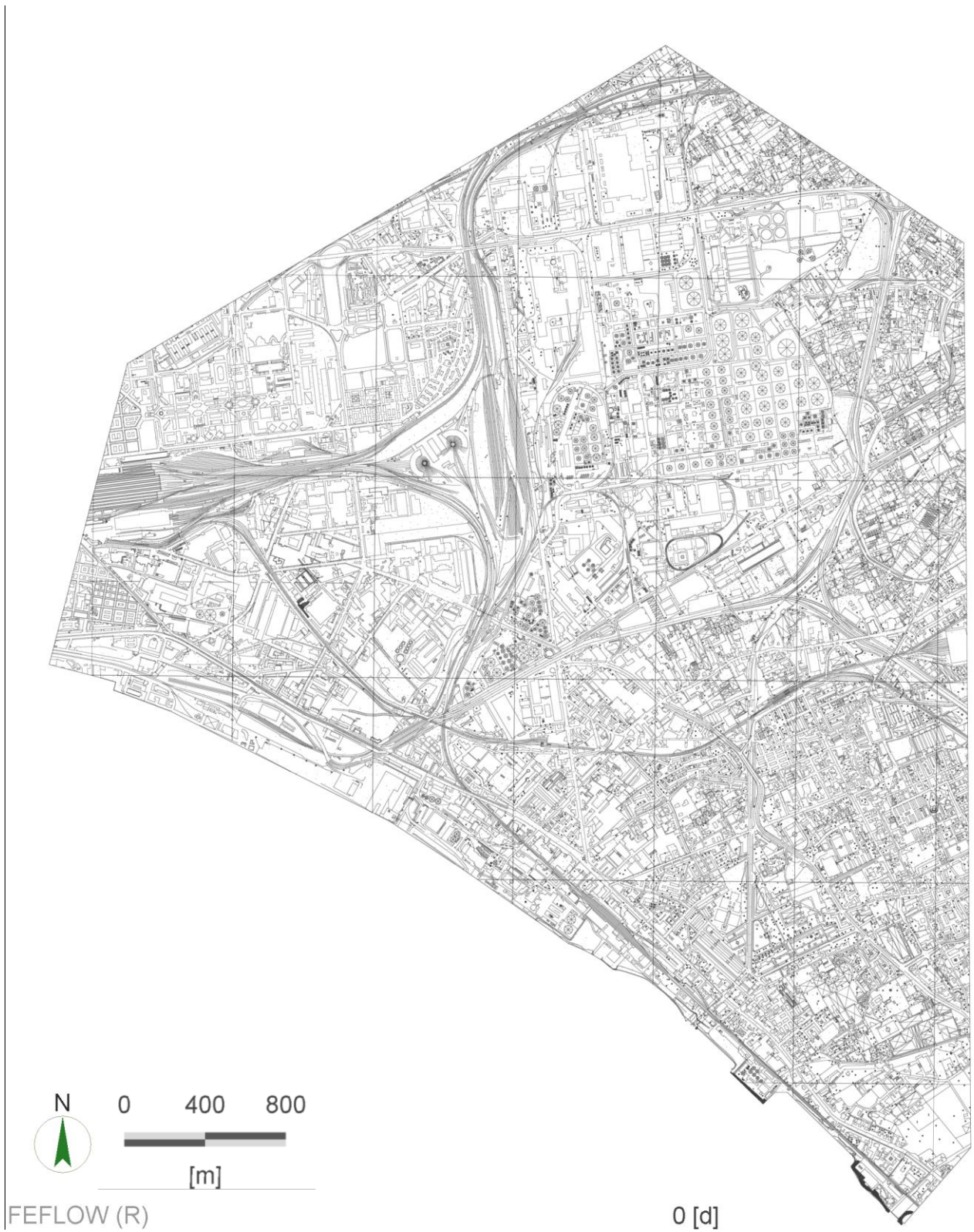


Figura 31 - Dominio di calcolo del modello numerico.

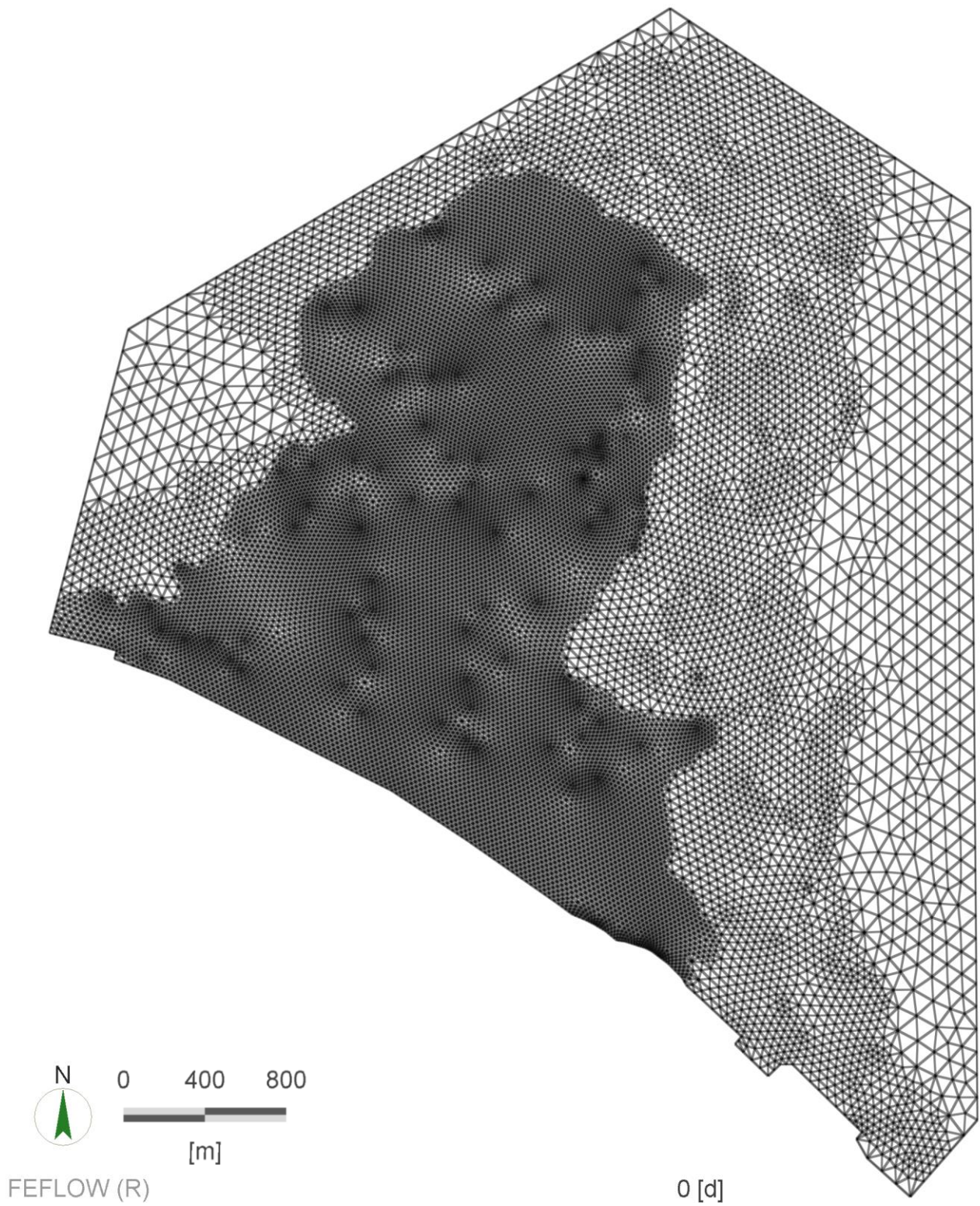


Figura 32 - Discretizzazione dello spazio orizzontale in mesh triangolari.

3.2.2 Ricostruzione dello schema idrostratigrafico

Per la schematizzazione verticale del modello si è fatto riferimento alle ricostruzioni delle superfici idrostratigrafiche precedentemente elaborate (cfr. paragrafo 2.5.2).

FEFLOW consente di trasporre le sezioni stratigrafiche direttamente entro la griglia di modello. Attribuendo le relative quote degli strati “reali” ai singoli layer, eventualmente con ulteriori punti di infittimento dove necessario per una migliore correlazione, è successivamente possibile modellare le differenti slices in funzione dell’andamento degli strati, utilizzando gli strumenti di interpolazione interni al codice di calcolo.

- Slice 1: Superficie topografica (Figura 33);
- Slice 2-3: Base delle alluvioni di ambiente fluvio-lacustre e depositi piroclastici (A+PR1) (Figura 34);
- Slice 4: Tetto dei depositi Tufacei (TV e TGN) (Figura 35);
- Slice 5: Base dei depositi Tufacei (TV e TGN) (Figura 36);
- Slice 6: Base del dominio di calcolo compreso nelle Piroclastiti inferiori (PR2) (Figura 37).

Il Layer 1, compreso tra la Slice 1 e 2, fa riferimento ai depositi più superficiali costituiti dal riporto e depositi alluvionali più recenti prevalentemente limosi torbosi per le facies lacustri e limoso sabbiose per quelle fluviali (litofacies A), gli spessori vanno dai 2 ai 6 metri (Figura 34). Il Layer 2, compreso tra la Slice 2 e 3, rappresenta la porzione basale dei livelli alluvionali recenti costituiti da piroclastiti rimaneggiate da alluvioni e depositi marino costieri (litofacies A e PR1), da cui la necessità di distinguere tale layer con differenti valori dei parametri idrodinamici rispetto a quelli più francamente alluvionali fluvio-lacustri del Layer 1, con gli spessori del Layer 2 sono minimi di 1 e massimi di 5 metri.

Il Layer 3, compreso tra la Slice 3 e 4, individua il corpo acquifero costituito dalle piroclastiti superiori (litofacies PR1), l’andamento della superficie della Slice 4 è irregolare e raggiunge la quota minima di -35 metri s.l.m. nella parte centro occidentale del SIN, parte in cui tali depositi risultano di spessori limitati o assenti dovuti alle condizioni genetiche di deposizione o all’erosione post deposizionale (Figura 35).

Il Layer 4, compreso tra la Slice 4 e 5, rappresenta i depositi acquitardi caratterizzati dai Tufi, nella parte centro occidentale del SIN gli spessori sono limitati o assenti, ciò dovuto alle condizioni genetiche di deposizione o all’erosione post deposizionale (Figura 36). Il modello consente evidentemente la distinzione solo di layer e slice continui, pertanto nelle parti in cui tali depositi sono assenti è stato assegnato uno spessore minimo di default del Layer 4 pari a 0.1 m per garantire una continuità del sistema discreto, poi in fase di assegnazione delle proprietà idrodinamiche, in tale settore è stato attribuito un valore pari alle unità PR1 e PR2.

Il Layer 5, compreso tra la Slice 5 e 6, rappresenta i depositi piroclastici inferiori (litofacies PR2). Sul piano verticale il dominio di calcolo è stato limitato ad una quota compresa tra -60 e -80 metri s.l.m., all’interno degli stessi depositi piroclastici (Figura 37). Questa semplificazione modellistica,

che individua un limite di flusso verticale all'interno dell'acquifero, si è resa necessaria non avendo a disposizione dati stratigrafici in grado di poter definire la superficie idrostratigrafica a bassa permeabilità base del complesso acquifero dell'area. Da informazioni di letteratura l'acquifero costiero dovrebbe oltrepassare i 150 metri di spessore, mentre la massima profondità dei pozzi di emungimento presenti nell'area si aggirano intorno agli 80 metri dal p.c..

Secondo la relazione di Ghyben – Herzberg la profondità media dell'interfaccia tra acque di falda e quelle salate lungo l'area costiera può essere ricompresa tra i 33 e 50 metri. Sulla base di questa condizione è stata definita la quota base del modello di flusso. Nella realtà l'acqua dolce e l'acqua salata sono due liquidi perfettamente miscibili tra di loro, per cui al posto di una interfaccia netta esiste in realtà una zona a salinità variabile (zona di transizione). Considerando questa stima si ritiene sufficiente, ai fini della corretta stima dei termini di bilancio del modello di flusso, un'approssimazione della quota limite base del modello a circa -60 metri dal p.c., includendo abbondantemente la sezione della fascia costiera di deflusso delle acque di falda e quella dei potenziali flussi con componente verticale indotta da pozzi.

Si riportano di seguito le sezioni del modello 3D con le diverse zone di conducibilità idraulica assegnata ad ogni elemento discreto per le unità idrogeologiche individuate. In particolare per la rappresentazione grafica del modello stratigrafico tridimensionale di riferimento sono visibili le sezioni verticali 3D del modello E-W e N-S, riportate dalla Figura 38 alla Figura 51, mentre dalla Figura 52 alla Figura 59 sono rappresentate quelle sezioni sub-orizzontali. In Figura 60 si riportano le 9 tracce di sezione E-W e N-S proiettate nel modello geologico, le sezioni sono rappresentate dalla Figura 61 alla Figura 70.

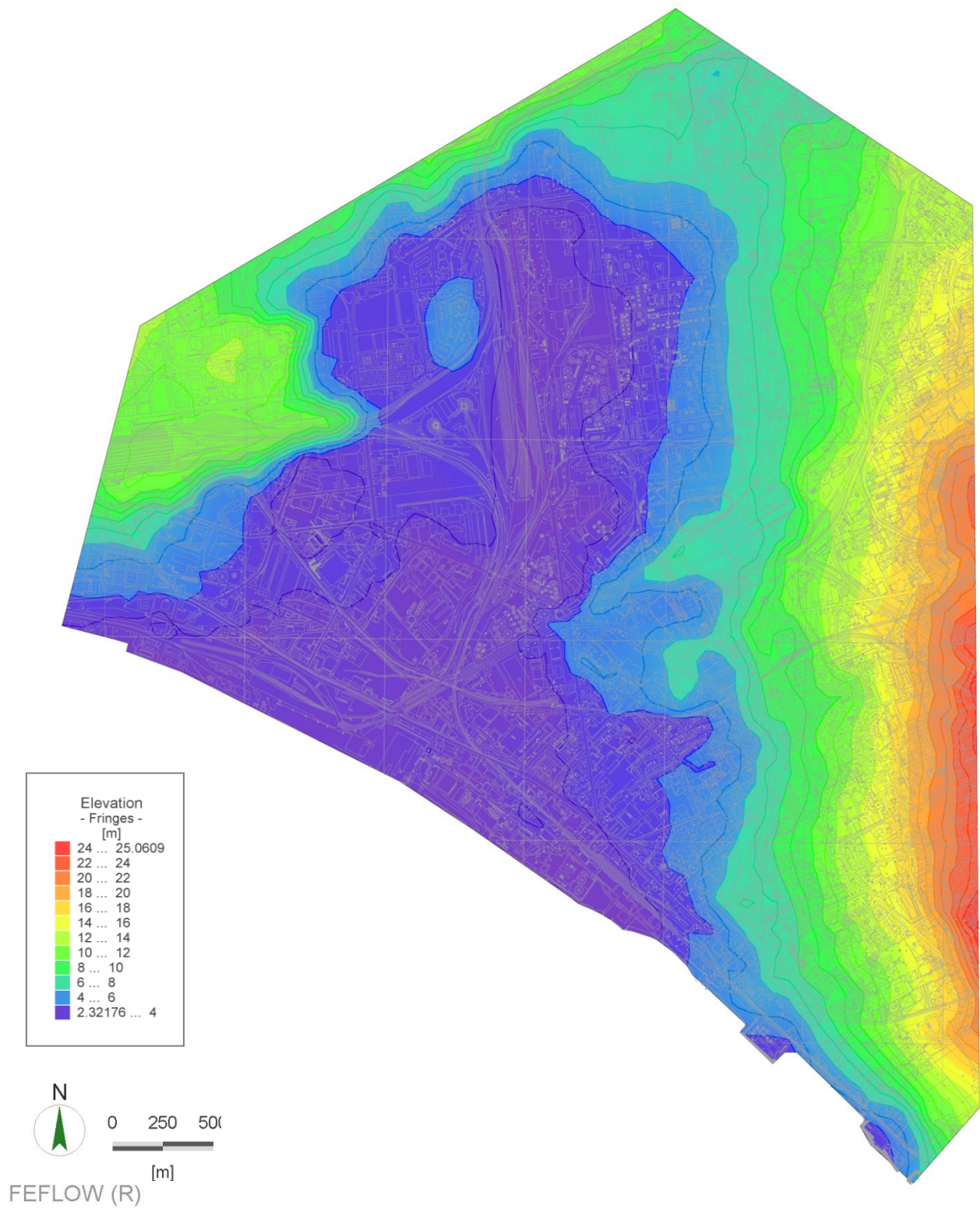


Figura 33 - Slice 1: Superficie topografica.

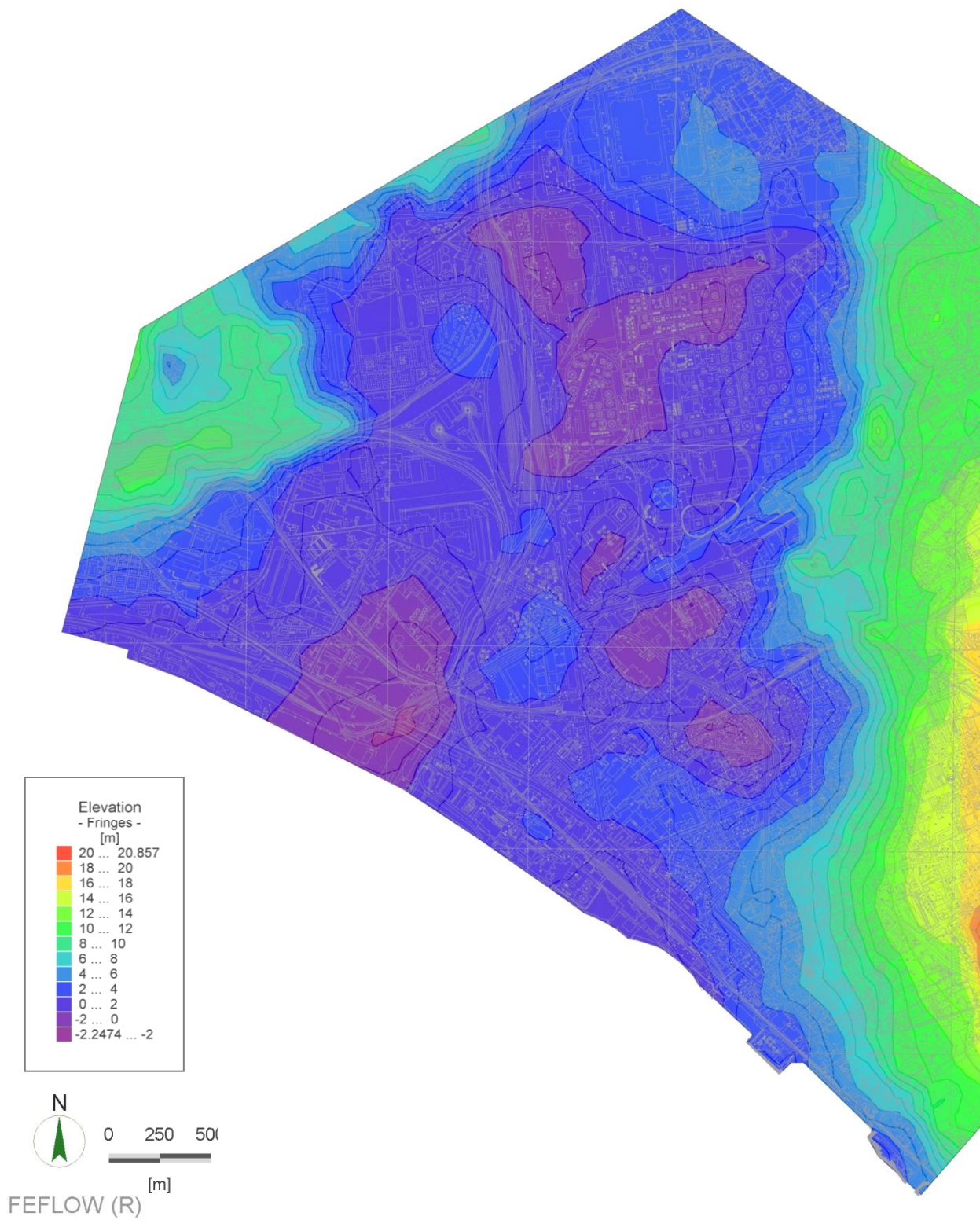


Figura 34 - Slice 3: Base delle alluvioni di ambiente fluvio-lacustre (A).

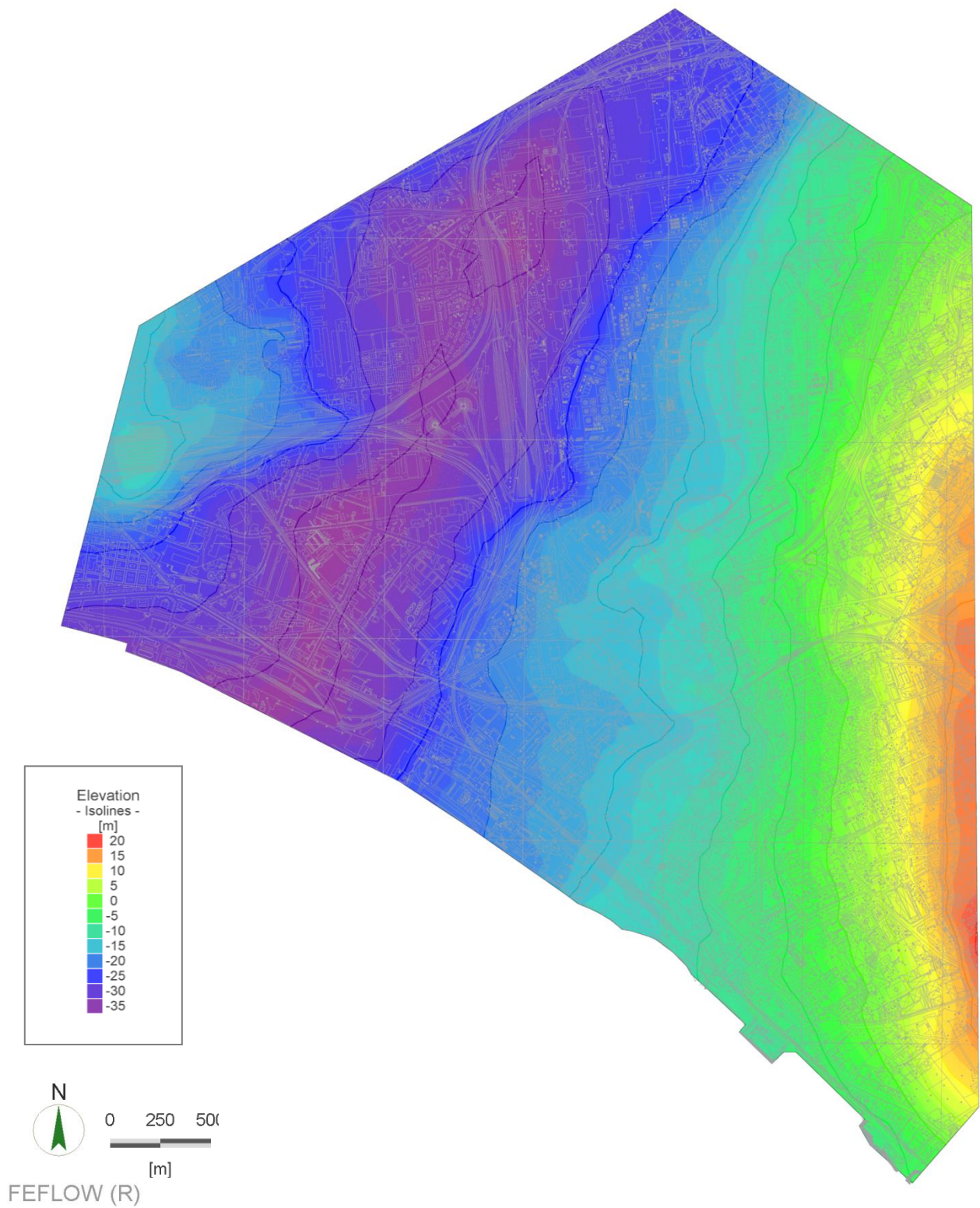


Figura 35 - Slice 4: Tetto dei depositi Tufacei (TSV e TGN).

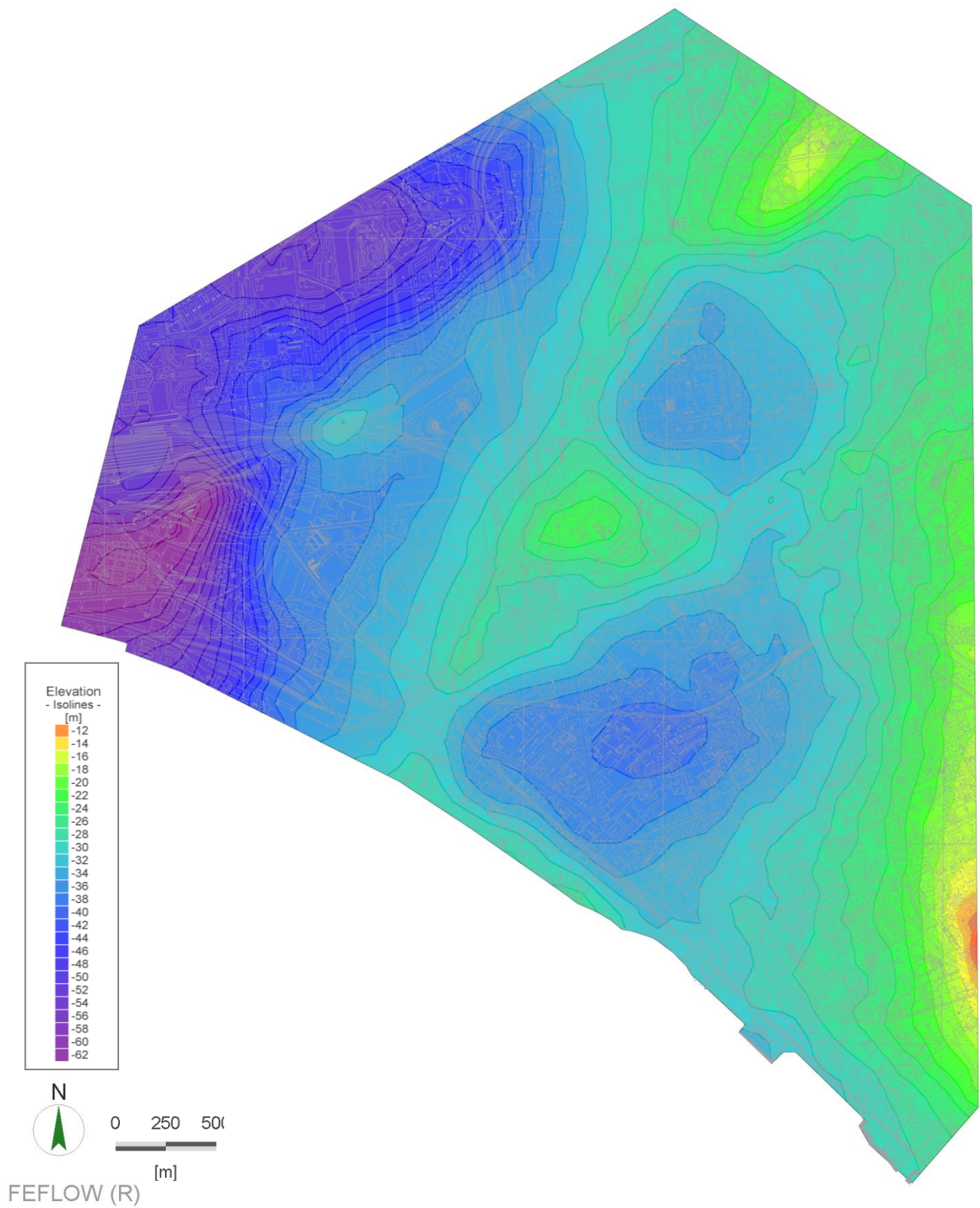


Figura 36 - Slice 5: Base dei depositi Tufacei (TSV e TGN)

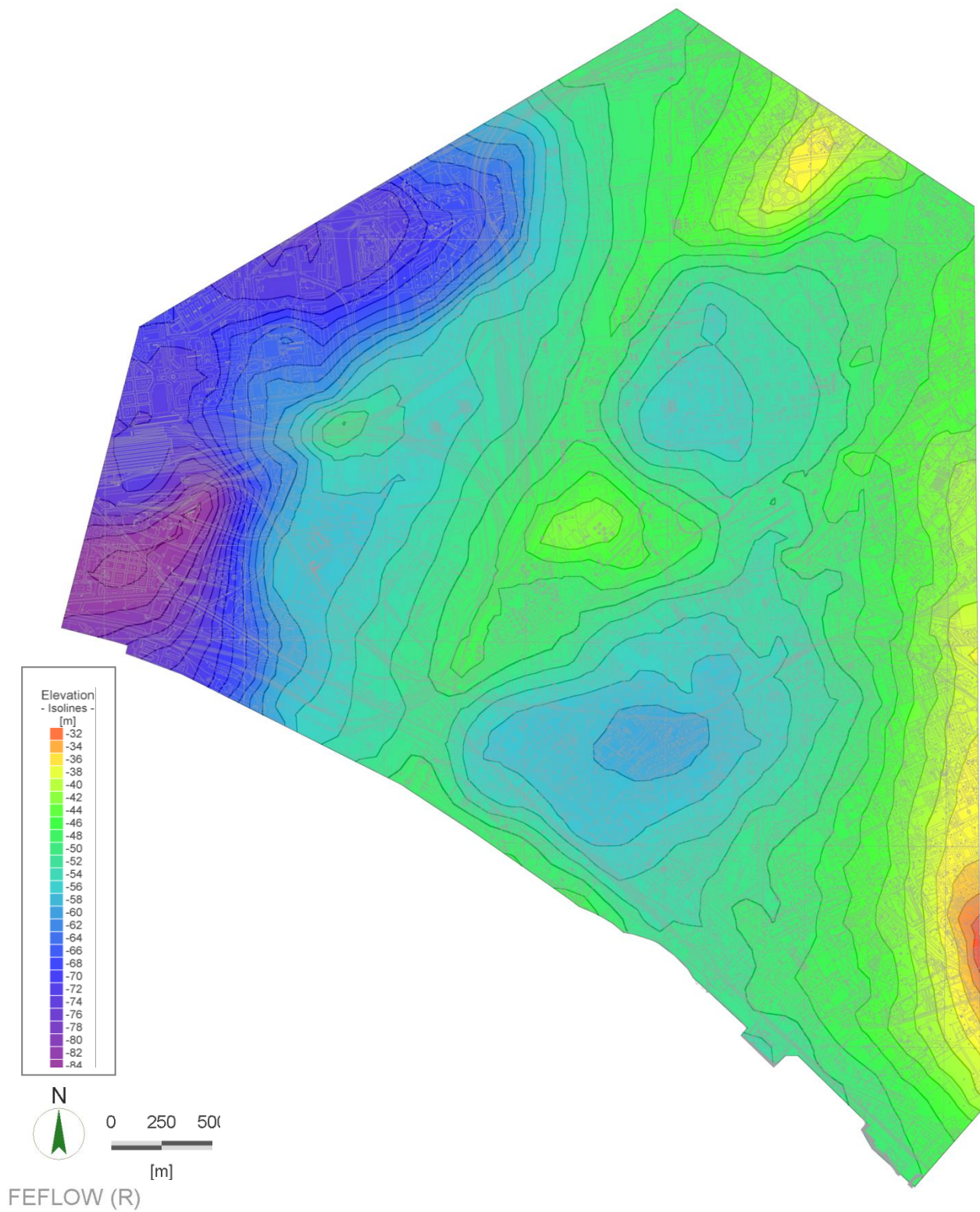


Figura 37 - Slice 6: Base del modello.