

RTI Progettisti:



PROGETTO DEFINITIVO DELLA SECONDA LINEA TRANVIARIA DI BOLOGNA (TRATTO NORD LINEA VERDE)

STUDI SPECIALISTICI GEOLOGIA - GEOTECNICA - IDRAULICA Relazione Geologica

COMUNE DI BOLOGNA
SETTORE MOBILITA' SOSTENIBILE E INFRASTRUTTURE

IL DIRETTORE DEL SETTORE
ING. CLETO CARLINI

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
ING. GIANCARLO SGUBBI

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO
ING. MIRKA RIVOLA

SEGRETERIA TECNICA

ing. Barbara Baraldi
arch. Virginia Borrello
ing. Giulio Cimbali
geom. Agnese Fero
ing. Stefania Guadagnini
geom. Luciano Notte
ing. Lisa Ombra
ing. Marco Pesare

GRUPPO DI PROGETTAZIONE

RESPONSABILE DI COMMESSA
ING. PAOLO MARCHETTI

COORDINATORE TECNICO
ING. ALESSANDRO PIAZZA

SISTEMA TRANVIARIO
ING. SANTI CAMINITI

ARCHITETTURA E INSERIMENTO URBANISTICO
ARCH. SEBASTIANO FULCI DE SARNO

OPERE A VERDE
ARCH. NICOLA CANTARELLI

OPERE STRUTTURALI
ING. STEFANO TORTELLA

SEGNALAMENTO E TELECOMUNICAZIONI
ING. ANGELA TORTORELLA

AMBIENTE
PROF. MATTEO MATTIOLI

SICUREZZA
ARCH. SERGIO MOSCHEO

ARCHEOLOGIA
DOTT. CRISTINA BIGAZZI

BIM MANAGER
GEOM. MIRKO CASAROLI

RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE
ING. SANTI CAMINITI

IMPIANTI TECNOLOGICI
ING. SIMONE VILLA

STUDI TRASPORTISTICI
ING. ANDREA SPINOSA

VIABILITA' INTERFERENTE E SOTTOSERVIZI
ING. PIETRO CAMINITI

IDRAULICA E IDROLOGIA
ING. ANDREA BENVENUTI

DEPOSITO
ING. GIORGIO COLETTI

ARMAMENTO
ING. MAURIZIO FALZEA

GEOLOGIA E GEOTECNICA
DOTT. GEOL. ANTONIO PAONE

TRAZIONE ELETTRICA
ING. DOMENICO D'APOLLONIO

IMPIANTI MECCANICI
ING. SALVATORE GIUA

| COMMESSA | | FASE | | LOTTO | | WBS | | DISCIPLINA | | TIPO | | NUMERO | | REV. | SCALA | NOME FILE | | | | | |
|----------|---|------|---|-------|---|-----|---|------------|---|------|---|--------|---|------|-------|-----------|---|---|---|---|----------------------|
| B | 3 | 8 | 1 | C | D | X | 0 | 0 | G | G | I | G | E | O | R | T | 0 | 1 | A | - | B381CDX00GGIGEORT01A |

| REV. | DATA | DESCRIZIONE | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO |
|------|-----------|-----------------|---------------|------------|-------------|
| A | Ago. 2023 | PRIMA EMISSIONE | M. VENTURELLI | A. PAONE | S. CAMINITI |
| B | | | | | |
| C | | | | | |
| D | | | | | |

INDICE

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. PREMESSA..... | 3 |
| 2. REFERENZE..... | 5 |
| 2.1 ELABORATI A CORREDO DELLO STUDIO GEOLOGICO | 5 |
| 2.2 DOCUMENTI NORMATIVI | 6 |
| 2.3 BIBLIOGRAFIA | 7 |
| 2.4 SITOGRAFIA..... | 9 |
| 3. DESCRIZIONE GENERALE DELL'AREA ED INQUADRAMENTO CARTOGRAFICO | 10 |
| 4. QUADRO DI RIFERIMENTO PROGRAMMATICO | 12 |
| 5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO | 13 |
| 5.1 GEOMORFOLOGIA DELL'AREA..... | 13 |
| 5.2 ASSETTO GEOLOGICO REGIONALE..... | 14 |
| 5.3 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO | 20 |
| 5.3.1 Unità idrogeologiche profonde..... | 23 |
| 5.3.2 Unità idrogeologiche superficiali | 25 |
| 5.3.3 Modello idrogeologico concettuale e possibili interferenze con l'opera | 30 |
| 6. SUBSIDENZA..... | 32 |
| 6.1 SUBSIDENZA LOCALE: I DATI..... | 33 |
| 7. INQUADRAMENTO SISMICO | 39 |
| 8. INDAGINI GEOGNOSTICHE DI RIFERIMENTO | 40 |
| 8.1 INDAGINI DELLA BANCA DATI RER..... | 40 |
| 8.2 CAMPAGNA INDAGINE 2022 | 41 |
| 8.3 CAMPAGNA INDAGINE 2023 | 41 |
| 8.3.1 Sondaggi a carotaggio continuo..... | 42 |
| 8.3.2 Indagini geofisiche..... | 45 |

| | | |
|-------|------------------------------------------------------------|----|
| 8.3.3 | Prove di laboratorio geotecnico..... | 46 |
| 9. | LIVELLI PIEZOMETRICI | 50 |
| 9.1 | BANCA DATI RER..... | 50 |
| 9.2 | OPERE IN SOTTERRANEO E RELATIVO MODELLO IDROGEOLOGICO..... | 51 |
| 9.2.1 | Sottovia via mazza..... | 52 |
| 9.2.2 | Sottoattraversamento passante..... | 59 |
| 9.2.3 | Sottoattraversamento ferrovia..... | 60 |
| 10. | MODELLO GEOLOGICO DI PROGETTO..... | 61 |
| 10.1 | INQUADRAMENTO STRATIGRAFICO ALLA SCALA DELL'OPERA..... | 62 |
| 11. | NOTE CONCLUSIVE E GIUDIZIO DI FATTIBILITÀ | 65 |

1. PREMESSA

La presente Relazione Geologica è inquadrata nell'ambito dell'incarico di progettazione definitiva della tratta nord della Seconda linea tranviaria della città di Bologna (Linea Verde).

Il tracciato della Linea Verde, dal capolinea su via dei Mille al capolinea Nord di Corticella è lungo poco più di 6.70 km e si sviluppa quasi interamente sull'asse sud-nord costituito da via Indipendenza, via Matteotti, via Corticella, via Bentini, per poi deviare leggermente e percorrere via S. Anna, via Byron e via Shakespeare per il tratto finale.

Lungo il tracciato, oltre ai suddetti capolinea, sono collocate 15 fermate, di cui 3 in comune con la realizzanda Linea Rossa.

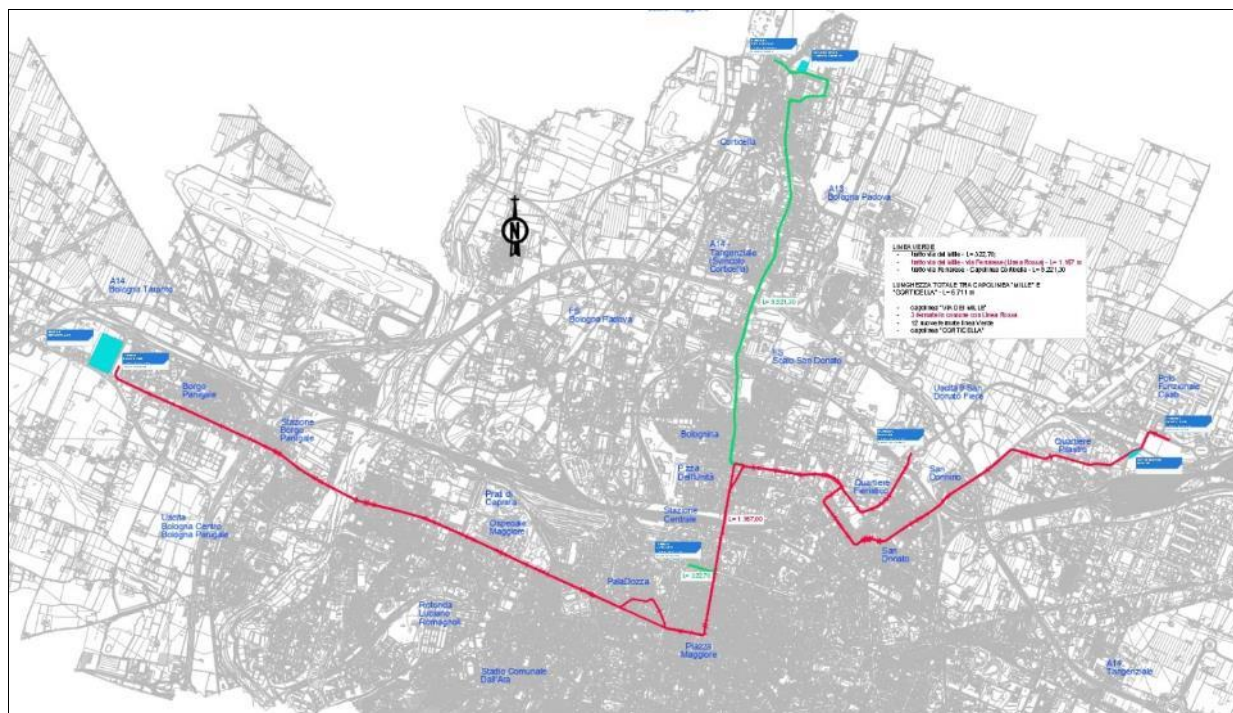


Figura 1-1 – Planimetria generale Linea rossa + Tratta nord Linea Verde

La modellazione geologica del territorio in esame è desunta dai dati pregressi esistenti (sondaggi a carotaggio continuo e a distruzione disponibili all'interno del database di pubblico accesso del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna) integrati alla luce dei

risultati delle indagini geognostiche e geofisiche integrative esperite nella presente fase di progettazione definitiva.

2. REFERENZE

2.1 ELABORATI A CORREDO DELLO STUDIO GEOLOGICO

Vengono di seguito elencate le tavole di riferimento per il presente studio geologico.

Vista l'estensione planimetrica del progetto e la dimensione a scala comunale della cartografia prodotta, per ogni elaborato si rimanda al link del proprio sviluppo digitale per una migliore lettura grafica degli elementi costitutivi.

| ELABORATO | COLLEGAMENTO IPERTESTUALE |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B381CDX00GGIIND CO01A | informa.comune.bologna.it/iperbole/media/files/tav02_litologia_superficiale.pdf |
| B381CDX00GGIIND CO02A | informa.comune.bologna.it/iperbole/media/files/tav031_carta_geomorfologica_pianura.pdf informa.comune.bologna.it/iperbole/media/files/tav032_carta_geomorfologica_pianura.pdf |
| B381CDX00GGIIND CO03A | www.comune.bologna.it/documenti/ambiente/suolo/f2_Allegati.pdf |
| B381CDX00GGIIND CO04A | informa.comune.bologna.it/iperbole/media/files/tav06_bacini_scolanti.pdf |

2.2 DOCUMENTI NORMATIVI

AGI: raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Giugno 1977.

D.M. 21 gennaio 1981 – “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.

Circ. Dir. Centr. Tecn. n. 97/81 – “Istruzioni relative alle norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.

ISRM International Society for Rock Mechanics: Rock characterization testing and monitoring suggested methods - Commission on Testing Methods, 1981.

D.M. LL.PP. 11 marzo 1988 - “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.

Circ. Min. LL.PP. 24 settembre 1988 n. 30483 – “Istruzioni applicative al D.M. 11/03/88”.

Eurocodice Ec7 per l'ingegneria geotecnica, Settembre 1988.

Ordinanza n. 3274 del 20/03/2003 - “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.

D.M. 14.09.2005 - “Norme tecniche sulle costruzioni”.

D.M. 14.01.2008 - “Norme tecniche per le costruzioni”.

D.M. 17.01.2018 - “Norme tecniche per le costruzioni”.

2.3 BIBLIOGRAFIA

Abbate E. & Sagri M., 1970 – *The eugeosynclinal sequences*. In: G. Sestini ed. “Development of the Northern Appennines Geosyncline”, *Sedimentary Geology*, 4 (3-4), pp. 251-340, Elsevier, Amsterdam.

Amorosi A., Colalongo M.L. & Vaiani S.C., 1993 – *Le Unità epiliguri nel settore emiliano dell’Appennino settentrionale. Biostratigrafia, stratigrafia sequenziale e implicazioni litostratigrafiche*. *Palaeopelagos*, 3, pp. 209-240, Roma.

Bettelli G. & Panini F., 1992 – *Liguridi, mélanges e tettonici nel Complesso caotico lungo la “linea del Sillaro” (Appennino settentrionale, Province di Firenze e Bologna)*. *Mem. Descr. Carta Geol. d’It.*, 46 (1991), pp. 387-415, Roma.

Bortolotti V. (a cura di), 1992 – *Appennino Tosco-Emiliano, Guide geologiche regionali*. *Soc.Geol.It.*, Roma.

Castellarin A., Eva C., Giglia C. & Vai G.B., 1985 – *Analisi strutturale del fronte appennino-padano*. *Giornale di Geologia*, 3a serie, 47, pp. 47-76.

Castellarin A., Pini G.A., Crestana G. & Rabbi E., 1986 – *Caratteri strutturali mesoscopici delle argille scagliose dell’Appennino bolognese*. *Mem. Scienze Geologiche*, vol. 38 (1986), pp. 459-477, Padova.

Castellaro S. and Mulargia F., 2009. *The effect of velocity inversions on H/V*. *Pure Appl. Geophys.* (accepted).

Colombo P. & Colleselli F., 1996 – *Elementi di geotecnica*, (2a ediz.). Zanichelli editore, Bologna.

Fäh D., Kind F. and Giardini D., 2001. *A theoretical investigation of average H/V ratios*. *Geophys. J. Int.* 145, 535-549.

Geoportale Emilia-Romagna: <http://geoportale.regione.emilia-romagna.it/it>

Ibs-von Seht M. and Wohlenberg J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bull. Seismol. Soc. Am. 89, 250-259.

ISRM International Society for Rock Mechanics: Rock characterization testing and monitoring suggested methods - Commission on Testing Methods, 1981.

Lachet C. and Bard P. Y., 1994. Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitation of Nakamuras thecnique, J. Phys. Earth 42, 377-397.

Lancellotta R., 1987 – Geotecnica, Zanichelli editore, Bologna.

Lermo J. and Chavez-Garcia F. J., 1994. Are microtremors useful in site response evaluation?. Bull. Seismol. Soc. Am. 84, 1350-1364.

Merla G., 1951 – Geologia dell'Appennino settentrionale. Boll. Soc. Geol. It., 70 (1), pp. 95-382, Roma.

Mulargia F., Castellaro S., Rossi P.L., 2007. Effetti di sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica. Il Geologo dell'Emilia Romagna Anno VII-2007 N.25 - Nuova serie.

Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface. QR of RTI, 30, 25-33.

Nogoshi M. e Igarashi T., 1970. On the propagation characteristics of microtremors. J. Seism. Soc. Japa, 23, 264-280.

Pieri M., 1961 – Nota introduttiva al rilevamento del versante appenninico padano eseguito nel 1955-59 dai geologi dell'AGIP mineraria. Boll. Soc. Geol. It., v. 80, n. 1, pp.3-34, Roma.

Principi G. & Treves B., 1984 – Il sistema corso-appenninico come prisma d'accreszione. Riflessioni sul problema generale del limite Alpi-Appennini. Mem. Soc. Geol. It., 28, pp. 529-576, Roma.

Regione Emilia-Romagna, Eni - Agip, 1998. Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia Romagna.

Ricci Lucchi F., 1987 – Semi-allochthonous sedimentation in the Apennine Thrust Belt. Sedim. Geol., 50, pp. 119-134.

Treves B., 1984 – Orogenic belts as accretionary prism: the example of the Northern Apennines. Ofioliti, 9/3, pp. 577-618.

2.4 SITOGRAFIA

Foglio n. 221 Bologna - Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (progetto CARG)

<http://www.isprambiente.gov.it>).

Banca dati delle prove geognostiche della Regione Emilia-Romagna (servizio WebGis)

<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/webgis>.

Agenzia regionale per la protezione ambientale- Emilia-Romagna (ARPAE)

<https://www.arpae.it/>

Il portale cartografico di Arpae

<https://www.arpae.it/it/dati-e-report/dati-ambientali/il-portale-cartografico-di-arpae>

La classificazione sismica dei Comuni in Emilia-Romagna

<https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/sismica/la-classificazione-sismica/la-classificazione-sismica-dei-comuni-in-emilia-romagna>

3. DESCRIZIONE GENERALE DELL'AREA ED INQUADRAMENTO CARTOGRAFICO

Il territorio del Comune di Bologna si sviluppa al passaggio tra l'alta pianura e le prime propaggini collinari, compresa tra il Fiume Reno ed il Torrente Lavino a Ovest e il Torrente Savena a Est, per una superficie complessiva di circa 141 Km², di cui 105 ricompresi nella zona di alta e media pianura e 36 in quella collinare. Da un punto di vista planoaltimetrico le quote massime pari a circa 390 m s.l.m. si rilevano nei pressi di Monte Sabbiuno mentre le minime in località "Magistrini" pari a circa 29,5 m s.l.m.. L'opera oggetto di questo elaborato sarà realizzata nella porzione pianeggiante del territorio comunale di Bologna (BO). Dal punto di vista amministrativo il Comune di Bologna confina a Nord con i Comuni di Calderara di Reno, Castel Maggiore e Granarolo Dell'Emilia, ad Est con i Comuni di Castenaso e San Lazzaro di Savena, a Sud con i Comuni di Pianoro e Sasso Marconi ed a Ovest con i Comuni di Casalecchio di Reno, Zola Predosa e Anzola Dell'Emilia.

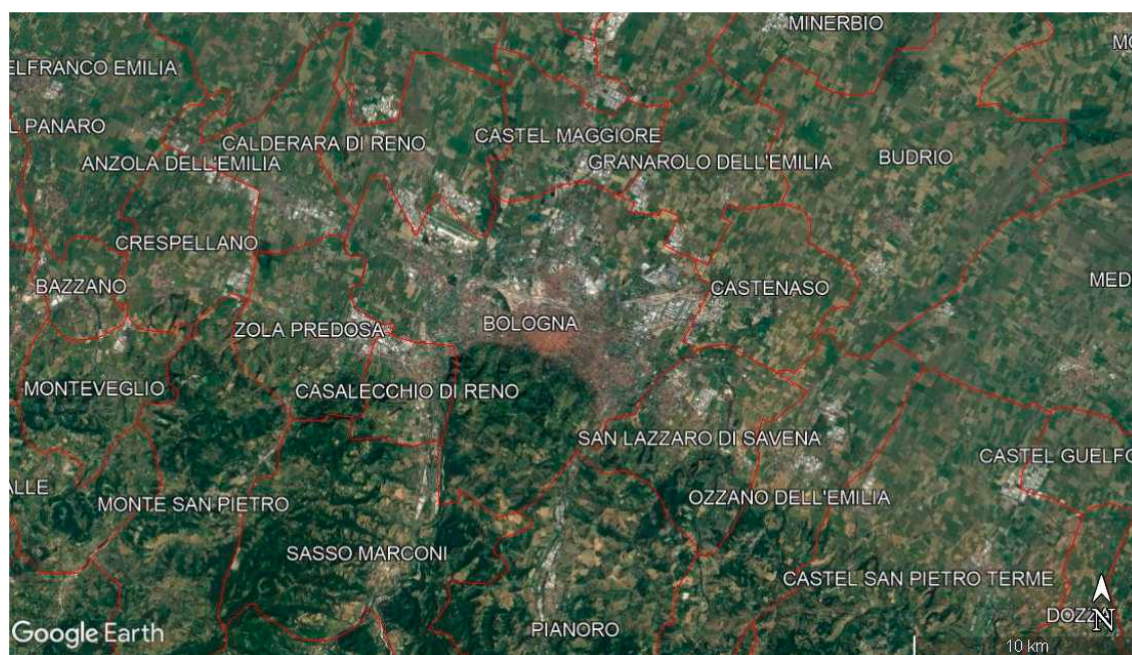


Figura 3-1 – Comuni della RER confinanti con il Comun di Bologna.

L'opera in progetto si sviluppa lungo l'asse Nord-Sud di connessione tra i territori comunali di Bologna e Castel Maggiore estendendosi per circa 6,0 km a quote comprese tra i 43 ed i 26 m s.l.m in un'area sostanzialmente pianeggiante.

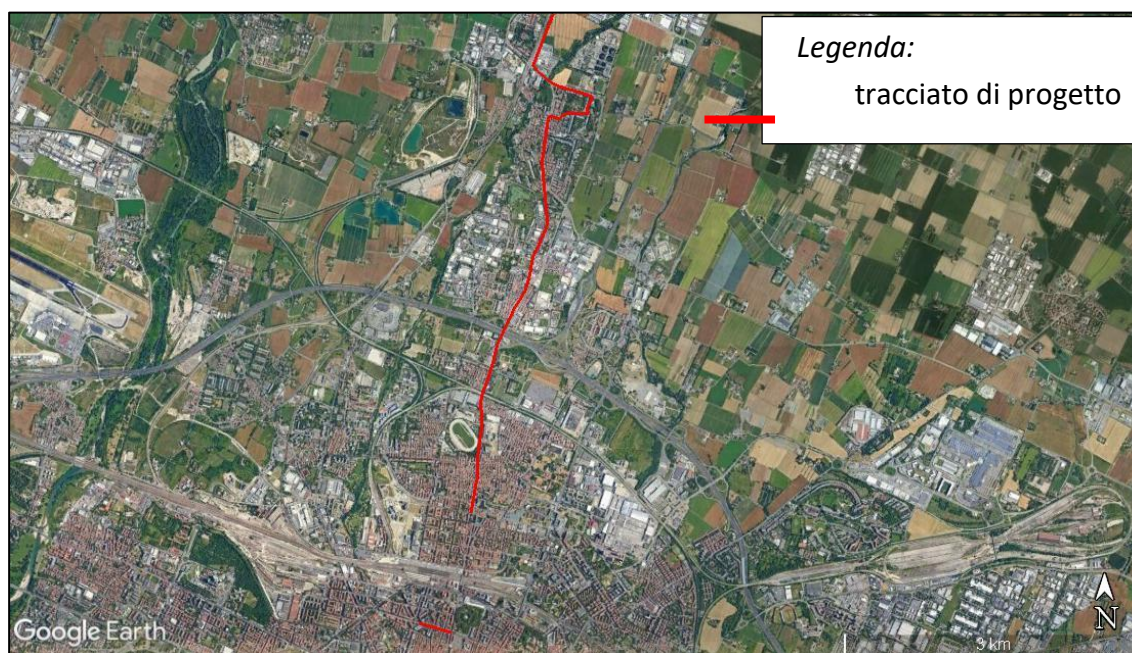


Figura 3-2 - Diramazione Corticella. Tracciato di progetto.

L'area è inclusa nelle Tavole 221 NO (Bologna Nord-Est) e 221SO (Bologna Sud-Est) della Carta Tecnica Regionale in scala 1:25.000 e nelle Sezioni 221010 (Castel Maggiore), 221050 (Bologna Nord) e 221090 (Bologna Sud) della Carta Tecnica Regionale in scala 1:25.000.

4. QUADRO DI RIFERIMENTO PROGRAMMATICO

Per la verifica della conformità della proposta progettuale con le previsioni in materia urbanistica e geologico/ambientale coerenti all'intervento, che corrisponde a quello che nella legislazione nazionale viene definito "Quadro di riferimento Programmatico" è possibile fare riferimento agli elaborati progettuali di riferimento, dove si procede all'analisi della coerenza con la cartografia allegata ai seguenti piani:

Piano Territoriale Regionale (PTR);

Piano Territoriale Paesistico Regionale (PTPR);

Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA);

Piano Aria Integrato Regionale (PAIR) della Regione Emilia Romagna

Piano Territoriale Metropolitano (PTM);

Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS);

Piano Strutturale Comunale (PSC) del Comune di Bologna;

Regolamento Urbanistico Edilizio (RUE);

Piano Generale Traffico Urbano (PGTU)

Piano Energetico Regionale (PER) e Piano d'azione per l'energia sostenibile (PAES)

5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO

Nel presente capitolo verrà descritta l'area in esame da un punto di vista geologico-geomorfologico e contestualmente verrà illustrata la componente idrogeologica locale.

5.1 GEOMORFOLOGIA DELL'AREA

Gli elementi geomorfologici riscontrabili in corrispondenza del tracciato in progetto, sono essenzialmente ascrivibili ad ambienti di deposizione alluvionale quali ambiente di conoide, di piana alluvionale e, localmente, di terrazzo alluvionale.

La pianura bolognese può essere suddivisa in tre settori sulla base delle caratteristiche morfologiche, sedimentologiche e tessiturali dei depositi presenti.

L'alta pianura, compresa tra il limite appenninico a Sud e la direttrice Anzola-Castelmaggiore-Castenaso a Nord, caratterizzata principalmente dalla presenza di litotipi a granulometria grossolana di spessore anche rilevante.

La media e la bassa pianura si collocano a Nord del settore individuato e procedendo in direzione Sud-Nord si assiste ad un progressivo aumento dei litotipi a granulometria fine. Le quote variano da 80-90 m s.l.m. m a ridosso del margine appenninico a 32 m s.l.m. m in prossimità del confine settentrionale del territorio comunale. Le pendenze della superficie topografica diminuiscono da valori superiori al 25 per mille in corrispondenza dell'alta pianura a valori di 1-2 per mille nelle porzioni più distali.

L'alta pianura è essenzialmente caratterizzata dalla presenza dei conoidi alluvionali riferibili alla attività deposizionale del F. Reno e del T. Savena che hanno modellato la fascia pedecollinare rispettivamente in corrispondenza del settore occidentale ed orientale dell'area in esame. Fra le due strutture di conoide principali si interpongono le strutture minori del T. Ravone, Rio Meloncello, T. Aposa e Fossa Cavallina.

Le forme di origine antropica sono estremamente diffuse dato il notevole sviluppo di aree urbane in rapida evoluzione. Si tratta essenzialmente di arginature dei corsi d'acqua, canalizzazioni, siti di deviazione fluviale e aree di cava attive, abbandonate o ripristinate.

Di seguito vengono illustrati gli stralci delle carte geomorfologiche di pianura Est ed Ovest per il Comune di Bologna in cui si individuano gli elementi geomorfologici principali, in particolare i corsi d'acqua principali e secondari, i dossi fluviali, i depositi alluvionali antichi e recenti e conoidi alluvionali.

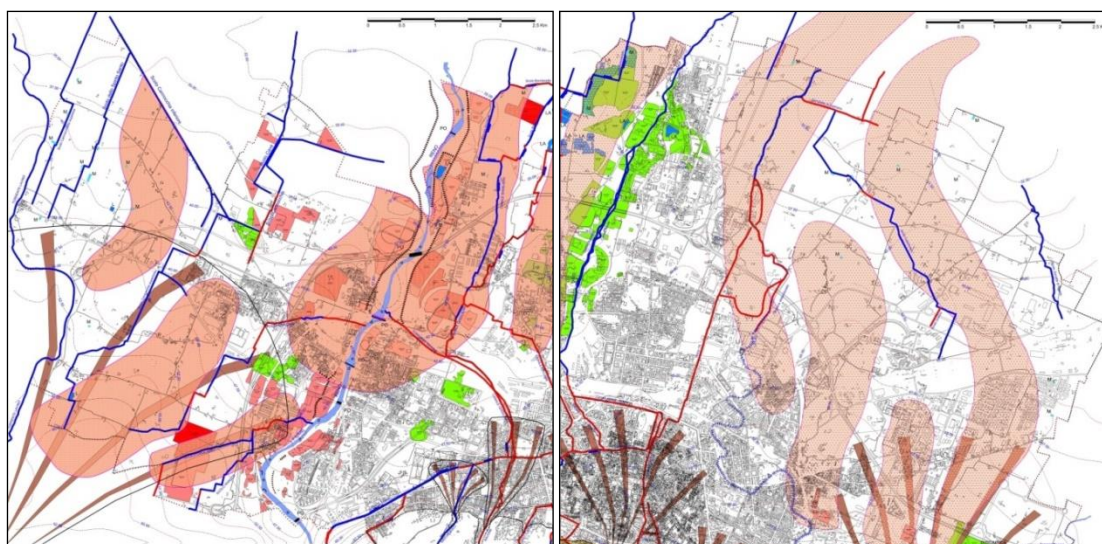


Figura 5-1 - Stralcio della carta geomorfologica di pianura del Comune di Bologna

5.2 ASSETTO GEOLOGICO REGIONALE

La formazione della pianura bolognese, nella quale è situato il territorio in esame, è legata all'evoluzione tettonica-sedimentaria del bacino padano.

Le prospezioni geofisiche ed i sondaggi effettuati dall'Agip per la ricerca di idrocarburi hanno individuato nel sottosuolo padano strutture profonde, sviluppatesi in un lasso di tempo compreso tra il Miocene superiore ed il Pleistocene, geneticamente connesse alla tettonica di embricazione che ha caratterizzato l'evoluzione strutturale dell'Appennino. I fronti dei sovrascorrimenti sepolti, che interessano le stesse unità litologiche per lo più di origine marina

che è possibile osservare in affioramento nel margine collinare, sono marcati da pronunciate pieghe anticlinali asimmetriche, vergenti a N-NE, con asse orientato mediamente NW-SE, fra le quali si segnalano le pieghe della cosiddetta Dorsale Ferrarese.

L'indagine geofisica ha inoltre evidenziato la presenza di un importante sistema di faglie che esplica tuttora la sua attività a carattere compressivo, noto in letteratura come "sovrascorrimento pedeappenninico": esso costituisce l'elemento morfostrutturale di separazione tra la fascia collinare in sollevamento e l'antistante pianura interessata dalla subsidenza. Il significato cinematico attribuito a tale lineamento concorda con il generale sovrascorrimento degli elementi appenninici al di sopra di quelli padani summenzionati.

La pianura bolognese è quindi compresa tra il sistema tettonico del "sovrascorrimento pedeappenninico" ed il fianco meridionale delle pieghe della Dorsale Ferrarese.

Il colmamento del bacino bolognese si è realizzato principalmente in seguito all'attività sedimentaria dei corsi d'acqua appenninici: procedendo dal basso verso l'alto si rinvencono dapprima sedimenti di origine marina, successivamente sedimenti transizionali (lagunari e costieri) ed infine depositi di origine francamente continentale che costituiscono le alluvioni quaternarie. Le variazioni di spessore e dei caratteri deposizionali, registrate dalla successione litostratigrafica, sono riconducibili a fenomeni tettonici e glacio-eustatici che hanno controllato la sedimentazione all'interno del bacino e hanno condizionato la potenzialità deposizionale dei vari corsi d'acqua. Il riempimento del bacino marino ed il successivo passaggio alla sedimentazione continentale non si sono verificati in maniera continua e progressiva, ma sono stati il risultato di eventi tettonico-sedimentari parossistici, separati nel tempo da periodi di forte subsidenza bacinale e movimenti ridotti delle strutture compressive.

Di fatto la successione quaternaria continentale (porzione sommitale del riempimento del bacino padano), poggia con un contatto discordante sul ciclo pleistocenico inferiore marino.

Lo spessore del ciclo continentale è molto variabile a seconda delle zone considerate. In prossimità del fiume Reno la facies di transizione all'ambiente marino si incontra ad una profondità di circa 400 m.

Studi recenti hanno individuato nell'area emiliana una formazione fluvio-lacustre che costituisce la base della successione quaternaria continentale. Al suo interno è riconoscibile un'alternanza di unità ghiaiose e pelitico-sabbiose. Le prime vengono interpretate come facies di conoide mentre le seconde come appartenenti ad ambienti di piana alluvionale.

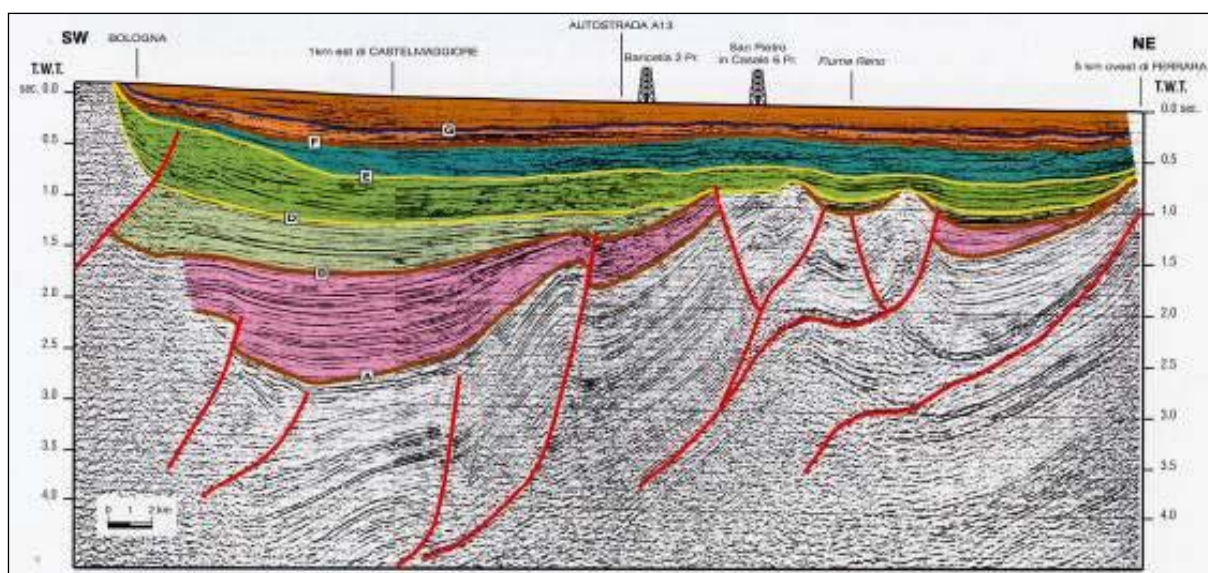


Figura 5-2 - Profilo sismico interpretato (cortesia AGIP, tratto da Regione Emilia Romagna - ENI-AGIP, 1998 :
Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia Romagna, a cura di G. Di Dio)

Facendo riferimento alla sezione di Figura 3-2 ed alla successione geologico-stratigrafica riportata nella pubblicazione da cui è tratta (Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP, 1998: "Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna". A cura di G. Di Dio), lo schema di riferimento per la pianura bolognese è costituito dalla successione di tre diverse sequenze deposizionali:

- Supersistema del Pliocene medio-superiore: costituisce la base dei gruppi acquiferi del bolognese (età da 3,6 a 2,2 milioni di anni, in rosa nella sezione)

- Supersistema del Quaternario marino: caratterizzato dalla presenza di 4 complessi acquiferi, depositatisi nel periodo compreso tra 2,2 e 0,65 milioni di anni (in verde e blu nella sezione)
- Supersistema Emiliano-Romagnolo, che rappresenta la successione quaternaria continentale.

| PRINCIPALI UNITA' STRATIGRAFICHE | | | | | | | | | | ETA' (milioni di anni) | SCALA CRONOSTRATIGRAFICA (milioni di anni) | UNITA' IDROSTRATIGRAFICHE | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---|----|
| AFFIORANTI | | | | | SEPOLTE | | | | | | | GRUPPO ACQUIFERO | COMPLESSO ACQUIFERO | | |
| QUATERNARIO CONTINENTALE | DILUVIUM p.p. | TERRE ROSSE, DILUVIUM, ALLUVIUM, TERRAZZI E ALLUVIONI | FORMAZIONE FLUVIO - LACUSTRE | FORMAZIONE DI OLIVATELLO | UNITA' DI VILLA DEL BOSCO | UNITA' DI CA' DI SOLA | SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO | SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE | UNITA' DI BORGO PANIGALE | ORIZZONTE DI FOSSOLO | ALLUVIONI / QUATERNARIO MARINO E SABBIE DI ASTI | PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE | 0.125 | A | A1 |
| | | | | | | | | | | | | | | | A2 |
| | | | | | | | | | | | | | | | A3 |
| | | | | | | | | | | | | | | | A4 |
| QUATERNARIO MARINO | MILAZZIANO SABBIE di CASTELVETRO p.p. SABBIE GIALLE di IMOLA p.p. | MILAZZIANO e CALABRIANO p.p. SABBIE di CASTELVETRO p.p. SABBIE GIALLE di IMOLA p.p. | CALABRIANO p.p. SABBIE di MONTERICCO FORMAZIONE di TERRA del SOLE p.p. | CALABRIANO p.p. FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO p.p. | SUPERSISTEMA DEL QUATERNARIO MARINO | SUBSISTEMA QUATERNARIO MARINO 3" | SUBSISTEMA QUATERNARIO MARINO 3' | SISTEMA QUATERNARIO MARINO 2 | SISTEMA QUATERNARIO MARINO 1 | UNITA' ALLUVIONALE INFERIORE | ALLUVIONI / QUATERNARIO MARINO E SABBIE DI ASTI | PLEISTOCENE MEDIO | | B | B1 |
| | | | | | | | | | | | | | | | B2 |
| | | | | | | | | | | | | | | | B3 |
| | | | | | | | | | | | | | | | B4 |
| P ₂ | FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO p.p. | SUPERSISTEMA DEL PLIOCENE MEDIO-SUPERIORE | | PLIOCENE MEDIO SUPERIORE | | | | | | | | ~0.65 | 0.89 | C | C1 |
| | | | | | | | | | | | | | | | C2 |
| | | | | | | | | | | | | | | | C3 |
| | | | | | | | | | | | | | | | C4 |
| | | | | | | | | | | | | ~0.8 | 1.72 | | C5 |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | ~1.0 | 3.55 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | ~2.2 | PLIOCENE MEDIO - SUPERIORE | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | ~3.3-3.6 | PLIOCENE INFERIORE MIOCENE | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | ~3.9 | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| ACQUITARDO BASALE | | | | | | | | | | | | | | | |

orizzonte inferiore: segnalato alla profondità di 280 m dal p.c., presenta uno spessore di 20/25 m;

orizzonte superiore: denominato Unità di Fossolo, è situato ad una profondità di circa 120/140 m dal p.c., con spessori variabili tra 20 m e 30 m.

I terreni affioranti nei pressi dell'area in progetto sono raggruppati nel Supersistema Emiliano Romagnolo e sono inserite nel Subsistema di Ravenna (AES8) come facies di limi sabbiosi. La Figura 5-4 illustra la distribuzione delle litologie affioranti nella zona di progetto.



Figura 5-4 - Stralcio della Carta geologica RER (scala 1:100000) dell'area studio.

Vengono di seguito descritte le caratteristiche delle litofacies ghiaiose, sabbiose e limoso argillose dei vari livelli che costituiscono il Subsistema.

LITOFACIES GHIAIOSE

I livelli ghiaiosi presentano un grado di organizzazione molto variabile. Le facies più disorganizzate sono generalmente massive, poco cernite e tipicamente matrice sostenute.

La matrice è rappresentata in genere da sabbie da fini a grossolane e da peliti. La dimensione massima dei ciottoli è di circa 25/30 cm e all'interno dei banchi non si riscontrano significative tendenze granulometriche. Questi depositi vengono generalmente interpretati come depositi da colata. Le facies organizzate sono più frequenti delle precedenti ed al loro interno è riconoscibile un motivo deposizionale definito da sequenze fining upward di 2/5 m di spessore a base grossolana. Sono disposte in corpi generalmente amalgamati, limitati alla base da superfici debolmente erosive e irregolari, passanti verso l'alto a orizzonti discontinui o a lenti di sabbie a stratificazione incrociata o a laminazione parallela.

Questi depositi possono essere interpretati come il prodotto della migrazione delle barre fluviali e come il riempimento di canali secondari. Nell'area di interesse le ghiaie si rinvencono ad una profondità generalmente maggiore di 10,0 m.

LITOFACIES LIMOSO-SABBIOSE

Le sabbie sono generalmente comprese all'interno di unità prevalentemente fini come corpi isolati, oppure sovrastano le unità ghiaiose. Hanno geometria piano-concava, base erosiva e presentano una granulometria variabile da grossolana a fine che forma tipiche sequenze fining upward. Questi depositi sono interpretati come il riempimento di canali in ambiente di conoide intermedio distale e di piana alluvionale. I corpi che mostrano basso rapporto lunghezza/altezza corrispondono al riempimento di canali stabili, mentre quelli il cui rapporto è molto alto riflettono lo spostamento laterale del canale in condizioni di scarsa subsidenza. Lateralmente ai depositi di canale si ritrovano alternanze ritmiche di sabbie fini e finissime con limi sabbiosi organizzate in piccole sequenze a base netta, fining upward ed aventi spessore decimetrico.

Nei rari strati di maggior spessore si possono riconoscere una laminazione obliqua a piccola scala con presenza di ripples rampicanti e di stratificazione lenticolare. Si tratta di depositi di argine o di margine di canale dove avvenivano fenomeni di trazione-decantazione tra loro alternati.

LITOFACIES LIMOSO-ARGILLOSE

I livelli prevalentemente limosi vengono interpretati come depositi di argine distale che, lateralmente, passano a unità costituite da argille limose caratteristiche di ambienti a bassa energia ubicati tra due sistemi di canale-argine. All'interno della successione fine di piana alluvionale si segnalano inoltre degli orizzonti scuri o neri, con spessori variabili da alcuni decimetri ad oltre un metro, che mostrano un'altissima percentuale di sostanza organica (spesso si rinvencono frustoli vegetali e frammenti di legno). Questi orizzonti a forte componente organica sono spesso associati a pacchi di argille di alcuni metri di spessore, con forti concentrazioni di molluschi che indicano un ambiente palustre di acqua dolce.

5.3 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Gli acquiferi nell'area di pianura bolognese assumono un ruolo di primaria importanza nell'ambito della gestione delle risorse idriche sotterranee, alimentando i tre principali centri di approvvigionamento idrico comunale.

Gli approfondimenti condotti nell'ambito dei vari progetti consentono una descrizione dettagliata della struttura geologica del sottosuolo. Sono state identificate le seguenti unità idrogeologiche:

- Acquifero A1
- Acquitarzo Alfa
- Acquifero A2, A3, A4 (unità acquifere accorpate in una singola unità denominata A234)
- Acquitarzo Delta
- Acquifero B

- Acquitardo Epsilon
- Acquifero C

La Figura 5-5 fornisce uno schema di comparazione fra la nomenclatura utilizzata in letteratura nell'ambito della definizione delle unità geologiche riconosciute, cui si è fatto riferimento in precedenza, e la denominazione delle unità idrogeologiche proposta più recentemente.

| Sistema Acquifero | | | Acquitardi | Falde |
|-------------------|----|---------|------------|-----------|
| A | A1 | A1c | | SUP3-SUP4 |
| | | A1b | | SUP2 |
| | | A1a | | SUP1 |
| | | | Alfa | Profondo |
| | A2 | | | |
| | A3 | | | |
| | A4 | | | |
| | | | Delta | |
| B | | | | |
| | | Epsilon | | |
| C | | | | |

Figura 5-5 - Quadro riassuntivo delle unità geologiche ed idrogeologiche riconosciute.

La struttura geologica dell'area in esame è stata definita attraverso l'analisi di sondaggi e stratigrafie di pozzi idrici e tramite la ricostruzione di appropriate sezioni idrogeologiche.

Vengono di seguito descritte le principali caratteristiche delle unità idrogeologiche identificate:

ACQUIFERO A1

Rappresenta l'acquifero più superficiale. Di geometria cuneiforme, presenta spessori variabili da 24-28 m in prossimità del margine collinare a 65-70 m nelle zone più distali. Ospita un articolato complesso di falde superficiali.

ACQUITARDO ALFA

Questo acquitardo costituisce un importante elemento di suddivisione all'interno del Gruppo Acquifero A, separando il complesso delle falde superficiali dal complesso delle falde profonde. I depositi che lo costituiscono sono prevalentemente di tipo limoso-argilloso, con locali intercalazioni grossolane.

ACQUIFERO A2+A3+ A4 (A234)

La porzione dell'acquifero A sottostante l'Acquitardo Alfa è costituita dalle sottunità denominate A2, A3 e A4 di spessore complessivo compreso tra 40 e 160 m, aumentando in direzione Sud-Nord.

L'Acquifero A234 è sede di una falda profonda confinata caratterizzata da livelli piezometrici differenziati.

ACQUITARDO DELTA

L'Acquitardo Delta si localizza tra gli acquiferi A e B. Lo spessore è compreso tra 20 e 25 m ed i depositi sono prevalentemente limoso-argillosi, con locali intercalazioni grossolane.

ACQUIFERO B

Lo spessore complessivo di tale acquifero varia da 15 a 150 m, aumentando in direzione Nord, con sensibile riduzione riconosciuta in corrispondenza del centro storico di Bologna e connessa a motivi di attività tettonica. È sede di una falda profonda confinata.

ACQUITARDO EPSILON

L'Acquitardo Epsilon separa gli acquiferi B e C. Nell'ambito dell'area in esame lo spessore varia da 15 a 25 m. I depositi che lo costituiscono sono essenzialmente siltoso-argillosi, con locali intercalazioni di sedimenti a granulometria grossolana.

ACQUIFERO C

L'Acquifero C è sede di un acquifero profondo confinato. I rilievi piezometrici eseguiti confermano l'esistenza di un acquifero multifalda costituito da un complesso di falde superficiali ed un complesso di falde profonde (Farina et al., 2001). Tale articolazione si sviluppa ulteriormente all'interno delle falde superficiali, localizzate nell'ambito dei primi 30-40 metri di profondità.

In corrispondenza di profondità inferiori o superiori, ovvero in riferimento a falde ospitate all'interno degli acquiferi B ed A1, si riscontrano livelli piezometrici nettamente diversi, con soggiacenza più prossima al piano campagna (A1) o più profonda (Ciclo B).

Vengono di seguito descritte le principali caratteristiche delle unità idrogeologiche profonde e superficiali e delle falde in esse contenute.

5.3.1 UNITÀ IDROGEOLOGICHE PROFONDE

Le falde profonde si collocano all'interno di acquiferi posti a profondità comprese tra 50-60 metri e 300-400 metri, corrispondenti alle unità stratigrafiche dei Cicli B e C e della porzione inferiore del Ciclo A. Tali corpi acquiferi sono caratterizzati da intercalazioni pelitiche che portano ad una elevata anisotropia della permeabilità. A profondità ulteriori è presente l'interfaccia acqua dolce-acqua salmastra (Agip, 1972); l'acqua presente a tali profondità non è pertanto sfruttabile a fini economici.

La documentazione piezometrica nota da letteratura (Regione Emilia Romagna-Arpa, 1998) evidenzia una profonda depressione nel conoide del Reno, dovuta agli intensi prelievi, che giunge a -55 m dal piano campagna.

L'evoluzione piezometrica temporale permette di osservare un continuo e progressivo abbassamento della falda, con medie di oltre 2 m/anno (Artioli e Baldini, 1997).

L'area bolognese, ubicata su uno dei più antichi centri di emungimento (campi pozzi di Borgo Panigale e Tiro a Segno), ha visto stabilizzarsi le quote piezometriche su livelli dinamici assai depressi, intorno alla metà degli anni '80 anche a seguito della diminuzione dei volumi sollevati.

Il richiamo causato dall'emungimento dei pozzi profondi si trasmette anche negli acquiferi più superficiali. Fenomeni di drenanza sono osservabili fino a circa 200 metri di profondità, pur verificandosi con particolare evidenza tra il piano campagna e i 70 metri di profondità (Artioli e Baldini, 1997) dove la differenza tra le quote piezometriche dei diversi acquiferi è pari a circa 20-30 m.

La morfologia della superficie piezometrica risulta interessata da una marcata depressione localizzata all'interno del conoide del F. Reno. I valori di soggiacenza raggiungono, in queste zone, valori pari a -55 m dal piano campagna.

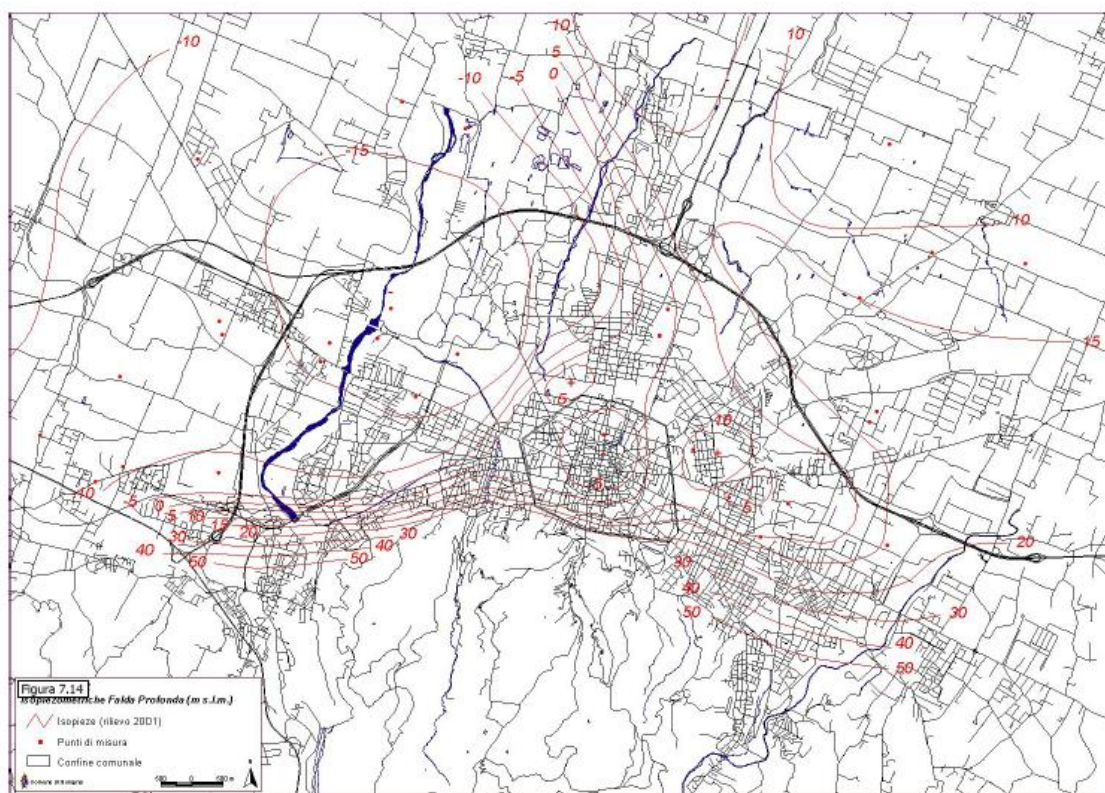


Figura 5-6 - Isopiezometriche falda profonda, m s.l.m. (da P.A.E.2007 - Comune di Bologna)

5.3.2 UNITÀ IDROGEOLOGICHE SUPERFICIALI

La struttura delle unità superficiali, contraddistinta come precedentemente descritto, dall'alternanza verticale di corpi a granulometria grossolana e fine, rappresenta una condizione favorevole per l'individuarsi di un acquifero multifalda.

All'interno dell'Unità A1 (o UBP4) sono stati riconosciuti tre corpi ghiaioso-sabbiosi, denominati A1a, A1b, A1c (Farina et al., 1998). Si tratta di corpi acquiferi parzialmente saturi, localmente in pressione, totalmente insaturi in corrispondenza di specifiche localizzazioni.

Le falde in essi contenute sono denominate, dalla più profonda alla più superficiale, SUP1, SUP2 e SUP3, e sono ospitate all'interno dei corpi acquiferi A1a A1b e A1c rispettivamente. Un'ulteriore falda, denominata SUP4, è contenuta nei depositi sabbioso siltoso-argillosi localizzati in

corrispondenza degli spessori più superficiali. In quest'ultimo caso non è chiaramente riconoscibile un corpo acquifero permeabile delimitato da intervalli a bassa permeabilità. L'acquifero appare infatti costituito da corpi semipermeabili difficilmente circoscrivibili.

Viene di seguito fornita una descrizione dei principali lineamenti caratterizzanti il complesso delle falde superficiali.

UNITÀ SUP1 – CORPO ACQUIFERO: CICLO A1A

L'unità denominata SUP1 è contenuta all'interno del corpo acquifero A1a ghiaioso-sabbioso, situato a profondità variabile fra 25 e 55 metri e caratterizzato da spessori superiori a 15 m in corrispondenza delle parti depocentrali della conoide del Fiume Reno.

Il corpo acquifero A1 si sovrappone stratigraficamente all'orizzonte acquitardo Alfa (Farina et al., 2001b) e la morfologia della superficie piezometrica consente di individuare un settore interessato da linee di flusso divergenti localizzato in corrispondenza di depositi a valori di conducibilità idraulica limitata, correlabili ai corpi acquiferi prevalentemente canalizzati in matrice limoso-argillosa presenti nella zona di interconoide nel cui ambito si colloca il centro storico di Bologna.

In corrispondenza di questo settore si viene ad individuare uno spartiacque che separa i due bacini idrogeologici principali riferibili al F. Reno e al T. Savena.

Gli assi di drenaggio corrispondono essenzialmente agli assi depocentrali delle strutture di conoide.

I settori di conoide del F. Reno e del T. Savena risultano presentano condizioni di falda libera individuabili principalmente in posizione apicale e mediana, mentre nelle posizioni distali si rilevano condizioni di falda in pressione.

Il settore di conoide del F. Reno, in particolare, risulta caratterizzato prevalentemente da condizioni di falda libera correlabili alla presenza di spessori superficiali consistenti di depositi a granulometria grossolana.

In conseguenza della situazione sopra descritta, la falda SUP1 riceve localmente alimentazione diretta dalla superficie e dal corso d'acqua.

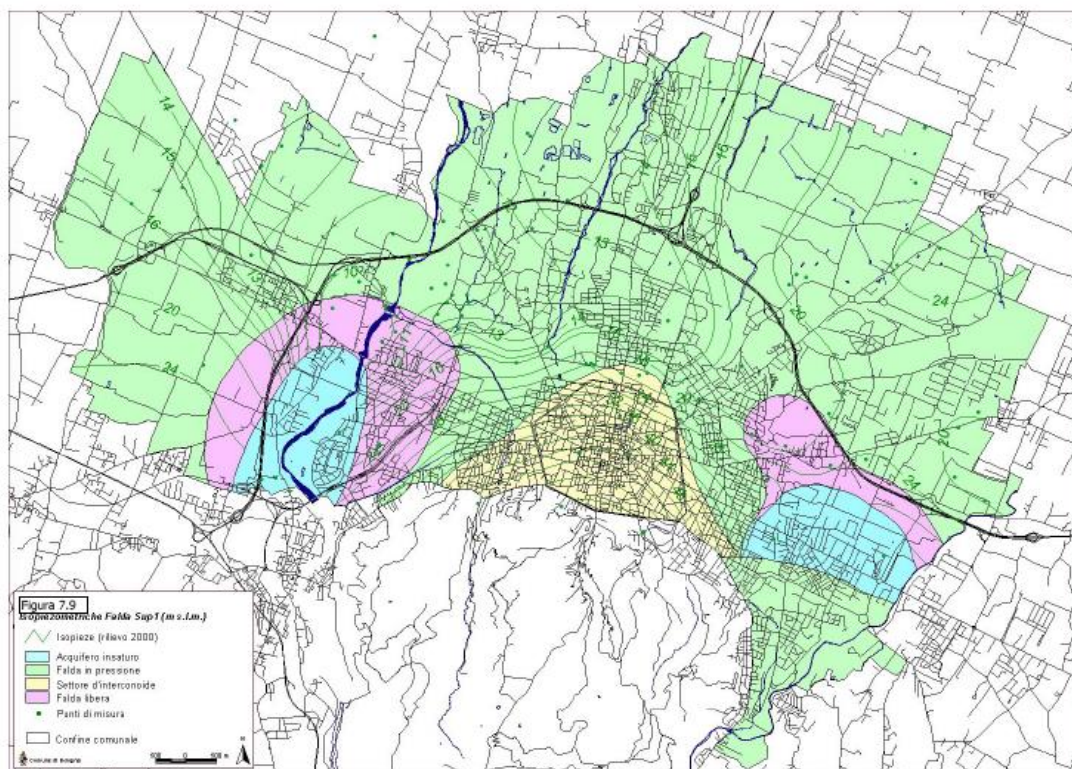


Figura 5-7 - Isopiezometriche falda Sup1, m s.l.m. (da P.A.E.2007 - Comune di Bologna)

UNITÀ SUP2 – CORPO ACQUIFERO: CICLO A1B

L'unità denominata SUP2 è contenuta all'interno dell'acquifero A1b e risulta stratigraficamente sovrapposta ad un acquitardo di minore importanza stratigrafica rispetto al caso precedentemente esaminato, caratterizzato da minori spessori di materiale grossolano, ridotti spessori di falda e una maggiore estensione areale del corpo grossolano

Il corpo acquifero A1b è caratterizzato da estesi corpi lenticolari delimitati in prevalenza da depositi fini e la struttura della falda SUP2 ripercorre i lineamenti morfologici della falda SUP1. Essa risulta caratterizzata da condizioni di falda libera per buona parte del territorio comunale. Condizioni di falda confinata si riscontrano nella porzione nord-orientale e nel settore di

interconoide. In particolare, data l'esiguità degli intervalli costituiti litotipi a granulometria fine, in corrispondenza delle porzioni occidentali, interessate dalla presenza della conoide del F. Reno. In corrispondenza di questo settore il corpo acquifero A1b è privo di manifestazioni idriche; i corpi A1a e A1b risultano saldati insieme e il corpo A1b costituisce l'insaturo della sottostante falda SUP1.

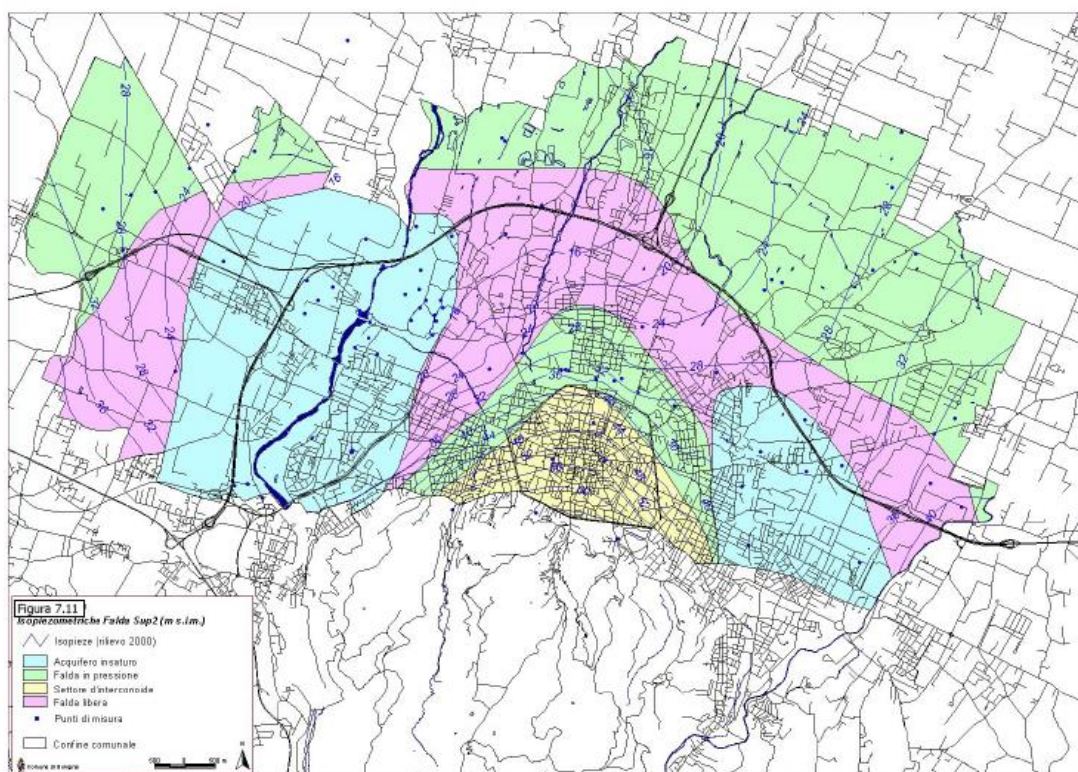


Figura 5-8 - Isopiezometriche falda Sup2, m s.l.m. (da P.A.E.2007 - Comune di Bologna)

UNITÀ SUP3 E SUP4 – CORPO ACQUIFERO: CICLO A1C

Il corpo acquifero A1c costituisce il corpo grossolano più prossimo al piano campagna. Le sue dimensioni sono meno rilevanti rispetto ai corpi A1a e A1b, nonostante la struttura a corpi ghiaiosi coalescenti mantenga una larghezza comunque considerevole e pari anche a 4-5 km.

La falda contenuta all'interno dell'unità descritta (SUP3) presenta solitamente una minore continuità rispetto alla falda sottostante.

Si riscontra una totale assenza di falda superficiale all'interno di un ampio settore assiale ai conoidi del F. Reno e del T. Savena, legata alla mancanza di orizzonti a granulometria fine di spessore e continuità sufficienti ad interrompere la continuità dei depositi ghiaiosi superficiali. La situazione descritta si rileva lungo il tracciato del F. Reno in corrispondenza di un settore di larghezza pari a circa 3-4 km, individuabile da Casalecchio al confine comunale settentrionale.

Nell'ambito del conoide del T. Savena tale situazione si riscontra all'interno di un settore ampio circa 3 km. La morfologia della superficie piezometrica della falda SUP4 evidenzia, inoltre, la depressione prodotta dal drenaggio esercitato dal Canale Navile nella parte occidentale del comune fino entro il limite del centro storico. Tale funzione di drenaggio porta a situazioni di depressione allungata nel senso del corso di acqua. È però plausibile ammettere che tale andamento delle isolinee venga accentuato dai numerosi vuoti di ex cava ivi presenti. Si osserva, inoltre, l'effetto di ricarica operata dal paleoalveo del Savena che determina la formazione di un possibile spartiacque.

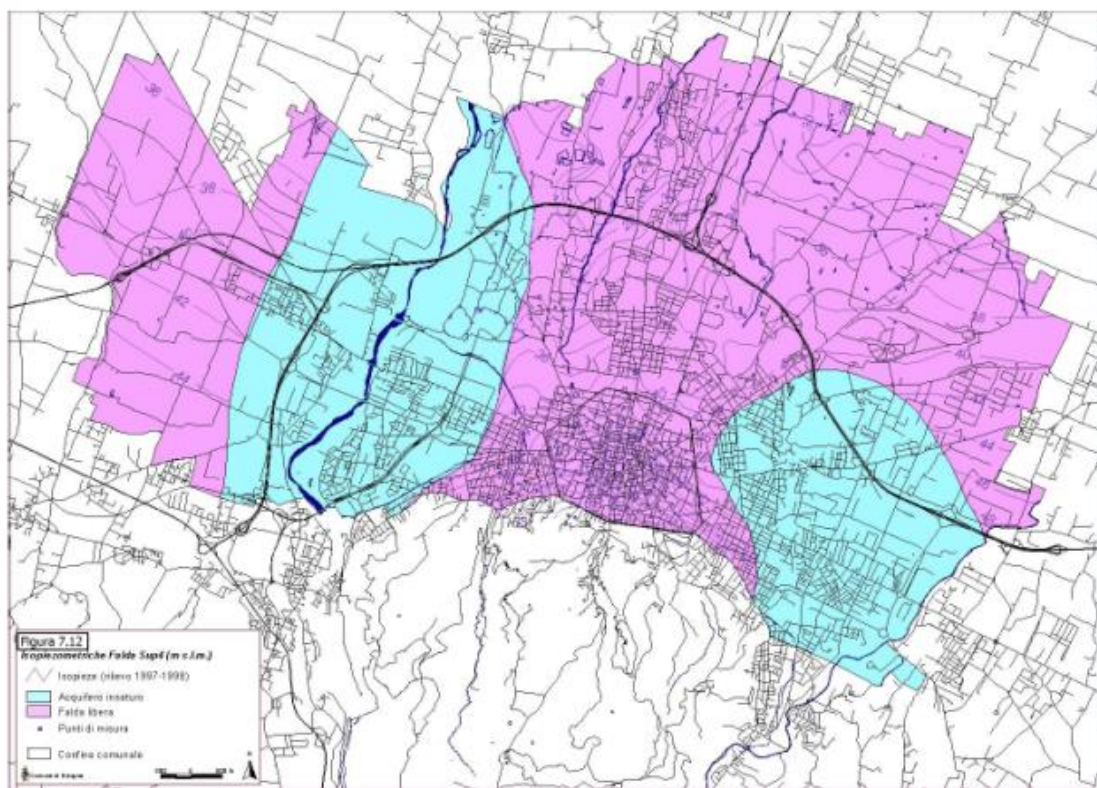


Figura 5-9 - Isopiezometriche falda Sup4, m s.l.m. (da P.A.E.2007 - Comune di Bologna)

5.3.3 MODELLO IDROGEOLOGICO CONCETTUALE E POSSIBILI INTERFERENZE CON L'OPERA

Per quanto esposto nei precedenti paragrafi, il tracciato della tranvia in progetto si colloca all'interno di un sistema acquifero multilivello, idrostratigraficamente ospitato nei depositi quaternari della porzione sommitale del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore; più precisamente risulta interessato il complesso acquifero A1 ospitante i livelli acquiferi SUP1-2 e SUP3-4 (questi ultimi due non sempre ben differenziabili e pertanto, alla scala dell'opera, considerati l'uno l'estensione dell'altro).

In termini di livelli acquiferi noti, a livello dell'opera risulta interferito prevalentemente il livello acquifero SUP3/SUP4.

La complessità intrinseca della geometria del sistema acquifero multilivello e l'eterogeneità dei relativi parametri idrogeologici lungo il tracciato, comporterà una risposta dell'acquifero alle opere in progetto significativamente diversa, a seconda della progressiva di avanzamento. Nel caso di opere in superficie, verranno realizzati interventi di sostegno e di drenaggio, così come di impermeabilizzazione. Viceversa, allo stato attuale, visti gli interventi in progetto per quanto riguarda le opere in sotterraneo, si ritiene che non sussistano le condizioni per un effetto barriera persistente ai fini del flusso idrico sotterraneo.

6. SUBSIDENZA

La subsidenza è un fenomeno che va inteso come movimento della superficie del terreno che interessa aree relativamente estese, con direzione prevalentemente verticale (Viggiani, 1978).

Si tratta di un movimento, generalmente lento, graduale e costante che può avere origini sia di tipo naturale sia antropico ma che, sempre più spesso, viene attivato o accelerato dalla compartecipazione delle due cause.

Le cause naturali possono così riassumersi:

- correnti magmatiche subcrostali (moti convettivi);
- risposta isostatica ad un sovraccarico che si verifica sulla crosta terrestre (imponente apporto sedimentario; crescita dei sistemi glaciali);
- perdita dei fluidi interstiziali nei terreni non cementati;
- costipamento negli accumuli di detriti;
- assestamenti nelle aree vulcaniche a seguito di eventi che determinano fuoriuscite di masse magmatiche (bradisismo negativo).
- Le cause antropiche in linea di massima sono invece:
- estrazione di idrocarburi, sia fluidi che gassosi, presenti nel sottosuolo con costipamento dei sedimenti che li contengono;
- emungimento della falda idrica con conseguente riduzione delle pressioni idrostatiche incremento delle tensioni efficaci ed innesco di fenomeni di consolidazione nei terreni coesivi;
- esecuzione di bonifiche idrauliche con allontanamento di acqua e conseguente compattazione dei terreni;

- aumento del carico statico dovuto alla edificazione con addensamento del terreno sottostante.

La subsidenza derivante da cause naturali si presenta generalmente con ritmi gradualmente e tempi piuttosto lenti. Quella attivata invece da azioni antropiche si presenta con velocità di abbassamento elevate ed elementi di imprevedibilità circa gli sviluppi e gli effetti.

Spesso il fenomeno risulta indotto dalla azione integrata delle cause naturali e quelle antropiche ed in tal caso assume la connotazione del rischio ambientale e come tale occorre che venga valutato in un confronto con la vulnerabilità territoriale.

6.1 SUBSIDENZA LOCALE: I DATI

Come evidenziato da ARPA nel progetto di rilievo della subsidenza in Emilia-Romagna realizzato per la Regione e la Provincia di Bologna, l'elemento primario è stato l'aggiornamento delle conoscenze sul fenomeno della subsidenza da un punto di vista geometrico, su un'area di indagine che comprende l'intera pianura regionale, circa 11.000 kmq.

L'elemento innovativo è stato l'utilizzo del metodo satellitare dell'interferometria differenziale: il metodo è noto da almeno una quindicina di anni ma solo dopo l'avvento della tecnica PSInSAR™, nel 2000, ha mostrato tutte le sue reali potenzialità, in particolare per la valutazione dei movimenti verticali del suolo utilizzando un grande numero di bersagli radar a terra.

La misura di tali movimenti, specie se piccoli, è stata sempre affidata ad operazioni topografiche quali le livellazioni geometriche di alta precisione che, pur fornendo ottimi risultati quanto a qualità delle misure, non possono fornire un'informazione altrettanto capillare e diffusa.

Un metodo non esclude l'altro: entrambi vanno utilizzati in completa integrazione. Nel 2005 è stata realizzata la misura di una rete di livellazione, sottoinsieme della rete regionale, di circa 1000 km di sviluppo, per confrontarla con le misure del 1999 e determinare i movimenti del suolo relativamente a circa un migliaio di capisaldi. Questa campagna, oltre a fornire una prima visione

del fenomeno, è servita per operare tutte quelle verifiche indispensabili ai fini di un concreto utilizzo del metodo satellitare. Successivamente sono state realizzate analisi interferometriche e sono state compiute le operazioni necessarie per la validazione e la messa a punto dei dati radar. Lo studio ha dimostrato come la tecnica dei diffusori permanenti radar possa essere utilizzata per questo tipo di analisi territoriali, anche se sono emersi alcuni problemi, soprattutto per indagini così ad ampia scala, come la necessità di elaborazioni congiunte di un gran numero di immagini appartenenti a molte trasse differenti, o la necessità di operare separatamente per siti e successivamente mosaicare i risultati. Quest'ultima procedura darebbe probabilmente risultati migliori se per ogni sito si potesse disporre sia di un punto di riferimento di cui fosse noto, da misure di altro tipo, il movimento in atto, sia di altri capisaldi da usare come punti di controllo. A tal fine è risultato di grande utilità il supporto delle misure di livellazione geometrica, tanto da risultare un riferimento imprescindibile per un corretto utilizzo del dato interferometrico.

I risultati ottenuti forniscono un quadro di dettaglio del fenomeno della subsidenza a scala regionale in un arco temporale molto ampio, che va letto ricordando il grado di incertezza associato alle velocità calcolate. I valori più elevati sono quelli che caratterizzano una vasta area della provincia di Bologna, con abbassamenti medi intorno a 20 mm/anno, sebbene si registri, in generale, un notevole miglioramento rispetto agli anni '90.

PERIODO 1992-2000

Nel periodo 1992-2000 nella provincia di Bologna il fenomeno si presenta particolarmente accentuato sia per i valori massimi, oltre 40 mm/anno, sia per l'estensione della superficie interessata, oltre 600 kmq, i cui confini arrivano a sud con la via Emilia da Ponte Samoggia fino ad Ozzano dell'Emilia, a ovest ai centri di San Giovanni in Persiceto e di San Matteo della Decima, a nord sino a Pieve di Cento e ad est ai centri di San Giorgio di Piano, di Minerbio e di Budrio.

All'interno di tale area in particolare si distinguono tre zone di massimo sprofondamento in corrispondenza di Sala Bolognese, Bonconvento e Cadriano con oltre 40 mm/anno; mentre al di fuori di tale area si notano altri 2 coni di abbassamento significativi in corrispondenza della

località Poggio (4 km a nord di Castel San Pietro) con un massimo di 30 mm/anno e di Sasso Morelli (5 km a est di Castel Guelfo) con un massimo di circa 20 mm/anno.

Per ciò che riguarda in dettaglio i territori comunali di Bologna e Castel Maggiore, si hanno i massimi abbassamenti registrati, pari anche a 45 mm/anno (vd. Figura 5-1).

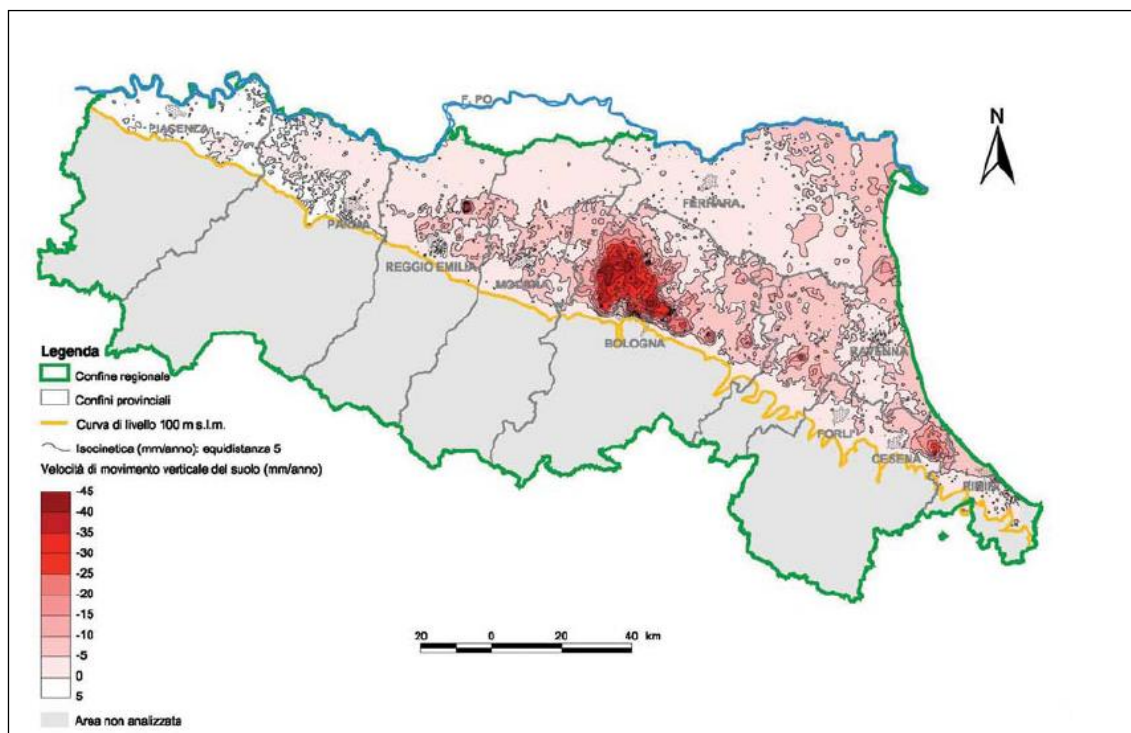


Figura 6-1 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 1992-2000 – Provincia di Bologna.

PERIODO 2002-2006

Nel periodo 2002-2006 nella stessa provincia di Bologna si evidenziano abbassamenti generalmente in accentuata riduzione rispetto al periodo precedente; in particolare tale riduzione è evidente in corrispondenza dell'area ampia, anche se sono ancora presenti alcuni picchi localizzati nei pressi di Sala Bolognese, Anzola dell'Emilia e Cadriano con circa 30 mm/anno e Bonconvento con circa 40 mm/anno.

Al di fuori di tale area, si evidenzia ancora il cono di sprofondamento della località Poggio, con un massimo di 30 mm/anno come nel periodo precedente. Viene confermata anche l'area di abbassamento presso Sasso Morelli seppure con valori di poco inferiori (15 mm/anno). Si evidenzia inoltre la scomparsa dell'area di sprofondamento localizzata precedentemente a nord di Ozzano dell'Emilia, mentre per l'area compresa all'interno dei comuni di Bologna e Castel Maggiore, si nota un accentuamento del fenomeno di subsidenza con valori massimi di abbassamento compresi tra i 0 ed i 35 mm/anno (vd. Figura 5-2).

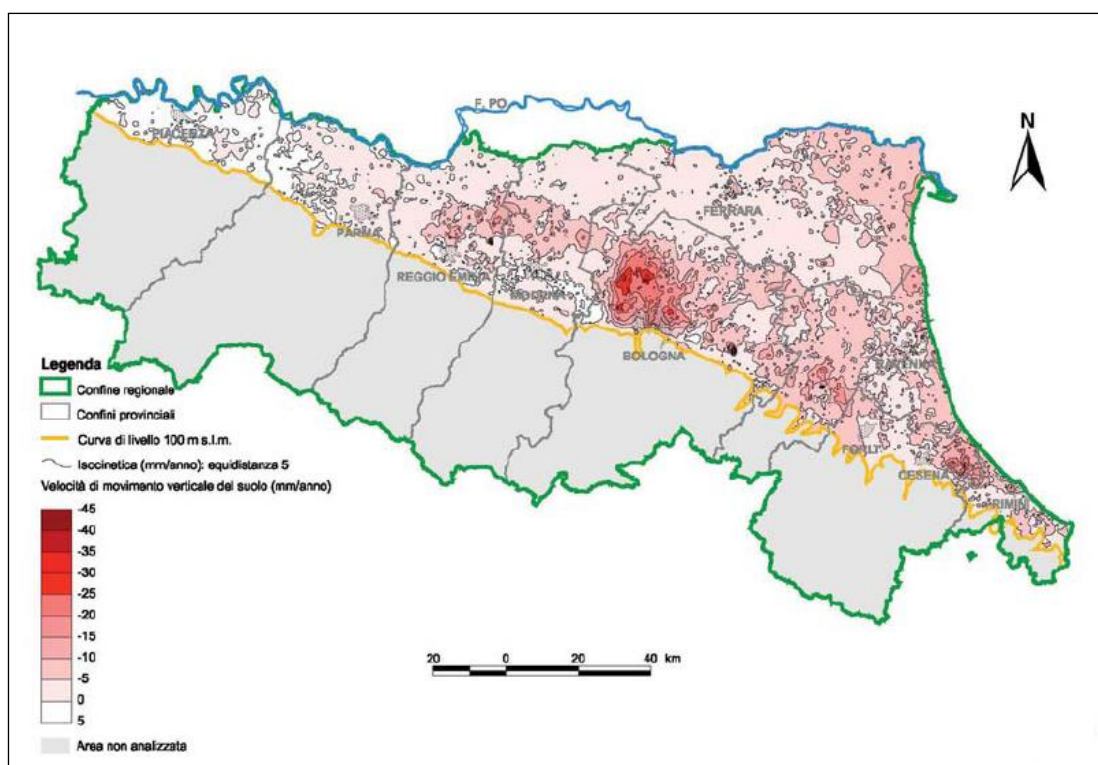


Figura 6-2 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2002-2006 – Provincia di Bologna.

PERIODO 2006-2011

Dall'esame degli elaborati prodotti si evince che la gran parte del territorio di pianura della regione non presenta nel periodo 2006-11 variazioni di tendenza rispetto al periodo 2002-06; circa un terzo della superficie evidenzia una riduzione della subsidenza e appena il 3% un incremento, presente in particolare nel Modenese, Bolognese, Ravennate e Forlivese.

Il Bolognese si conferma come il territorio più subsidente, nonostante continui la tendenza, già in atto da alcuni decenni, verso una progressiva riduzione degli abbassamenti. Persiste, infatti, un'ampia area a ridosso della città di Bologna, con una superficie di oltre 500 km², con un abbassamento medio di circa 15 mm/anno e punte massime di oltre 30 mm/anno in corrispondenza di Sala Bolognese, Lavino di Sotto e dell'area tra Lavino di Mezzo e Anzola dell'Emilia; di oltre 35 mm/anno in corrispondenza della cassa di espansione a ridosso del Fiume Reno nei pressi di Malacappa; di oltre 30 mm/anno a Castello d'Argile e di oltre 20 mm/anno a Castelmaggiore. Il centro storico di Bologna, in particolare, risulta invece esente da abbassamenti significativi (alcuni mm/anno).

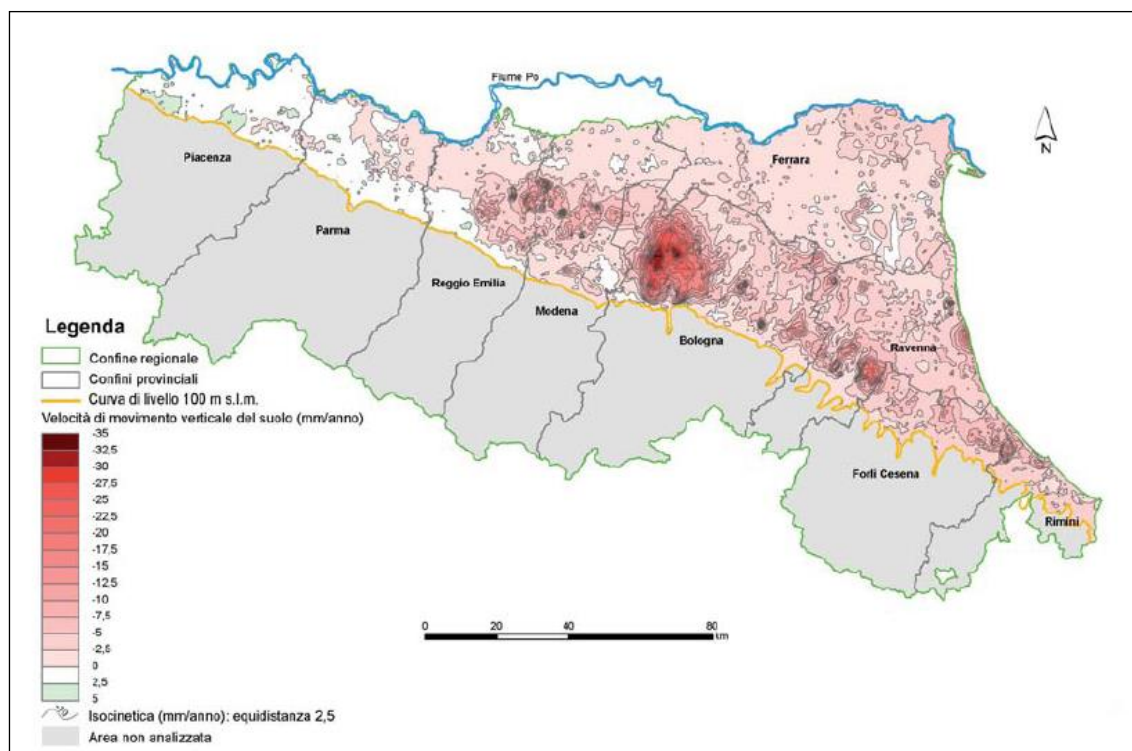


Figura 6-3 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2011 – Provincia di Bologna.

PERIODO 2011-2016

Nel periodo di osservazione 2011-16, per la provincia di Bologna, risulta immediatamente evidente la forte riduzione della velocità media di abbassamento del suolo e, in particolare, la

progressiva diminuzione e quindi scomparsa delle superfici territoriali caratterizzate dai fenomeni di subsidenza maggiormente critici: già al 2000 la percentuale di superficie con velocità di abbassamento maggiori di 20 mm/anno si era più che dimezzata, per poi scomparire del tutto nell'ultima campagna, che evidenzia limitatissime superfici con velocità superiore a 10 mm/anno.

È possibile affermare che, l'abbassamento generalizzato che ha caratterizzato in passato il territorio bolognese, sia per vastità delle superfici interessate sia per i valori di velocità particolarmente elevati, si è fortemente ridimensionato, in ragione principalmente della riduzione dei prelievi acquedottistici. Il 39% dell'intero territorio presenta una riduzione della subsidenza e nel dettaglio la città di Bologna presenta abbassamenti di alcuni mm/anno fino a massimi di 5 mm/anno, grosso modo in linea con il precedente rilievo.

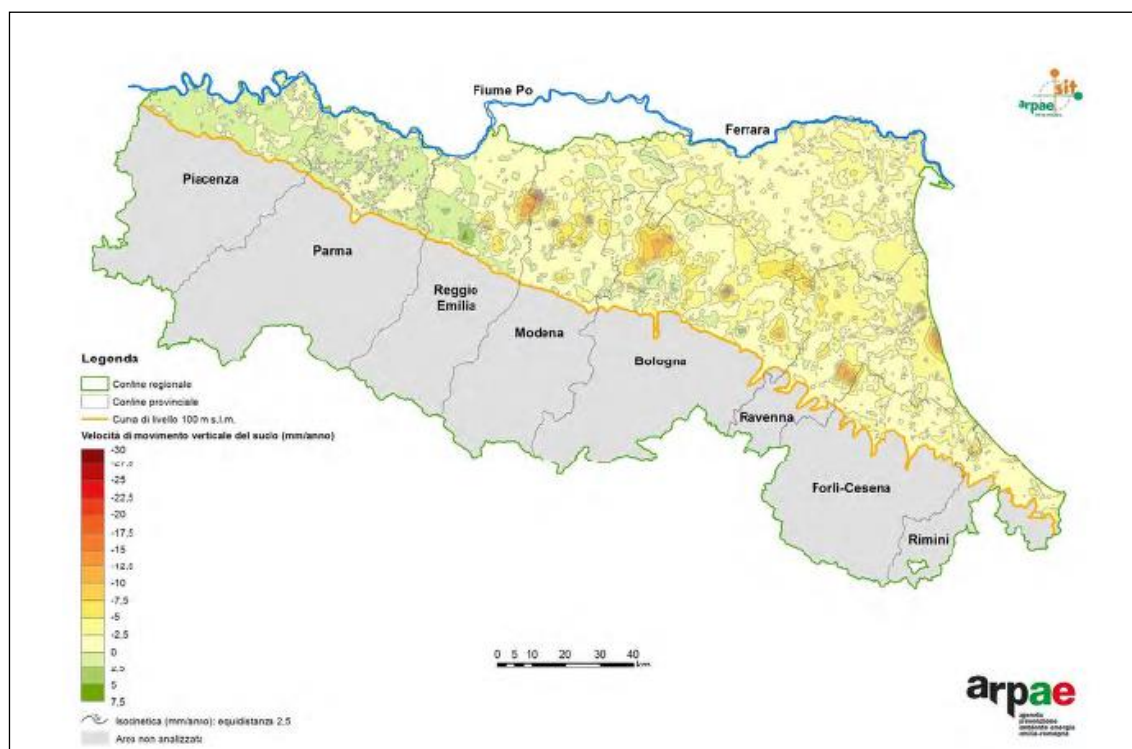


Figura 6-4 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016 – Provincia di Bologna.

7. INQUADRAMENTO SISMICO

Per quanto attiene agli aspetti sismici sito specifici e per le verifiche di suscettibilità alla liquefazione dei terreni interessati dal progetto, si faccia riferimento all'elaborato B381CDX00GGISISRT01A.

8. INDAGINI GEOGNOSTICHE DI RIFERIMENTO

Di seguito vengono illustrate le indagini geognostiche di riferimento finalizzate alla determinazione della natura litologica e delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni che costituiscono il primo sottosuolo.

8.1 INDAGINI DELLA BANCA DATI RER

Le indagini di repertorio, già di riferimento per lo studio geologico a corredo del PFTE, comprendono sondaggi a carotaggio continuo disponibili all'interno del database di pubblico accesso del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna.

Di seguito si riporta in forma tabellare un quadro riassuntivo delle indagini di riferimento, con indicazione delle profondità investigate e data di esecuzione:

| SONDAGGIO | UBICAZIONE | PROFONDITÀ [m da p.c.] | DATA ESECUZIONE | LIVELLO IDRICO [m da p.c.] |
|-------------|-------------------|---------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 221050P429 | Piazza dell'Unità | -30,00 | 19-21/12/1987 | -10,00 |
| 221050P416 | Via di Corticella | -30,50 | 09/12/1988 | -14,20 |
| 221050P417 | Via di Corticella | -30,00 | 07/09/1988 | -11,90 |
| 221050P418 | Via di Corticella | -30,00 | 16-18/12/1987 | -13,10 |
| 221050P419 | Via di Corticella | -30,00 | 15-16/12/1987 | -9,90 |
| 221050P420 | Via di Corticella | -30,00 | 18-21/12/1987 | -13,90 |
| 221050P421 | Via di Corticella | -32,00 | 07-08/01/1988 | -13,20 |
| 221050P422 | Via di Corticella | -30,00 | 12-14/12/1987 | -11,90 |
| 221050P423 | Via di Corticella | -30,00 | 10-11/12/1987 | -16,30 |
| 221050P424 | Via di Corticella | -30,00 | 15/12/1987 | -8,10 |
| 221050P425 | Via di Corticella | -27,00 | 11-12/12/1987 | -11,20 |
| 221050P426 | Via di Corticella | -22,00 | 03-04/12/1987 | -17,40 |
| 221050P457 | Via di Corticella | -26,00 | 29/11/1984 | n.r. |
| 221050P456 | Via N. Corazza | -20,00 | 28/11/1984 | -19,20 |
| 221050P427 | Via di Corticella | -32,00 | 09-11/01/1988 | n.r. |
| 221050P103A | Via Carlo Porta | -20,00 | 05/1969 | n.r. |
| 221050P447 | Via di Corticella | -30,50 | 9-11/12/1987 | n.r. |
| 221050P448 | Via di Corticella | -30,50 | 02-03/12/1987 | -10,40 |
| 221050P449 | Via di Corticella | -30,00 | 26-27/11/1987 | -10,90 |
| 221050P100A | Via dei Giardini | -10,00 | 06/1974 | -4,00 |

| SONDAGGIO | UBICAZIONE | PROFONDITÀ [m da p.c.] | DATA ESECUZIONE | LIVELLO IDRICO [m da p.c.] |
|-------------|---------------------|---------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 221050P102F | Via dell'Arcoveggio | -9,00 | 06/1969 | n.r. |
| 221050P489 | Via Colombarola | -12,45 | 22/07/1994 | -6,95 |
| 221050P516 | Via delle Fonti | -50,00 | 16/06/1998 | n.r. |

8.2 CAMPAGNA INDAGINE 2022

Tra Giugno e Luglio 2022 è stata eseguita una campagna di approfondimenti di indagine mirati alla definizione del modello idrogeologico sito-specifico e definizione di misure di mitigazione in caso di interruzione del flusso idrico sotterraneo da parte delle strutture in progetto.

Nella tabella seguente vengono sintetizzate le indagini realizzate con indicazione delle profondità investigate e delle attrezzature installate.

| SONDAGGIO | PROFONDITÀ [m da p.c.] | ATTREZZATURA INSTALLATA | DATA ESECUZIONE |
|-----------|---------------------------|---------------------------------|-----------------|
| SOT01 | -30,00 | Piez. Norton 3" 0-3 m cieco | 20/06/2022 |
| SOT01-B | -30,00 | Piez. Norton 3" 0-20 m cieco | 14-15/07/2022 |
| SOT03 | -30,00 | Piez. Norton 3" 0-3 m cieco | 16/06/2022 |
| SOT03-B | -30,00 | Piez. Norton 3" 0-18 m cieco | 13/07/2022 |
| SOT04 | -30,00 | Piez. Norton 3" 0-3 m cieco | 21/06/2022 |
| SOT04-B | -30,00 | Piez. Norton 3" 0-21 m cieco | 18-19/07/2022 |
| SOT06 | -30,00 | Piez. Norton 3" 0-3 m cieco | 14-15/06/2022 |

8.3 CAMPAGNA INDAGINE 2023

Ai fini del presente studio, e ad integrazione dei dati disponibili, l'assetto litostratigrafico e le caratteristiche geotecniche e sismiche dei litotipi costituenti il sottosuolo è stata effettuata sulla

base dei dati acquisiti nel corso della campagna di indagine geognostica eseguita e consistita nella realizzazione di:

- sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo spinti a profondità comprese tra -10,00 e -30,00 m da p.c., con esecuzione di prove di permeabilità in foro, installazione di strumentazione geotecnica in foro e prelievo di campioni di terreno rimaneggiati da sottoporre a test di laboratorio geotecnico;
- prove sismiche di tipo Down-Hole in foro di sondaggio attrezzato;
- indagini sismiche di superficie per mezzo di tecnica integrata MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) + HVSr.

Negli elaborati B381CDX00GGIINDRT01A - B381CDX00GGIINDRT02A - B381CDX00GGIINDRT03A, vengono proposti i risultati scaturiti dalla campagna di indagine, mentre per l'ubicazione delle prove si rimanda alle planimetrie proposte negli elaborati grafici B381CDX00GGIINDDR01A - B381CDX00GGIINDDR02A - B381CDX00GGIINDDR03A.

8.3.1 *SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO*

L'indagine ha previsto la realizzazione di n. 48 sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo spinti sino a profondità comprese tra -10,00 e -30,00 m da piano campagna, con fori di sondaggio attrezzati con tubo piezometrico a tubo aperto tipo "Norton" ovvero con tubi in PVC per indagini sismiche Down-Hole, come riportato nello specifico nella tabella che segue.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono state inoltre realizzate le seguenti attività:

- Rilievo stratigrafico.
- Prelievo di campioni rimaneggiati all'interno delle cassette catalogatrici (a seguito delle attività di sorveglianza archeologica) da sottoporre a prove di laboratorio geotecnico.
- Esecuzione di prove di permeabilità in foro tipo "Lefranc" da eseguirsi in foro di sondaggio
- rilievo del livello di falda all'inizio e alla fine dell'attività;

- fotografie a colori del sito di esecuzione del sondaggio e delle carote depositate in cassetta.

Nella tabella seguente si riporta il quadro riassuntivo dei sondaggi meccanici terebrati in sito con indicazione delle profondità investigate, dell'attrezzatura installata, attività eseguite in corso di carotaggio ed opere d'arte oggetto delle indagini.

| SONDAGGIO | PROFONDITÀ | STRUMENTAZIONE | PROVE PERMEABILITÀ (PROF) | PRELIEVO CAMPIONI RIMANEGGIATI | |
|-----------|------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------|
| LV1 | 30 | Tubo DH | x | x | |
| LV2 | 10 | Piezometro "NORTON" | 2,00/5,00 | LV1/C1 | 2,00/5,00 |
| LV3 | 10 | x | x | x | |
| LV4 | 10 | x | x | x | |
| LV5 | 10 | Piezometro "NORTON" | 2,00/5,00 | LV5/C1 | 2,00/5,00 |
| LV6 | 10 | x | x | x | |
| LV7 | 10 | x | 2,00/5,00 | LV7/C1 | 2,00/5,00 |
| LV8 | 10 | x | 2,00/5,00 | LV8/C1 | 2,00/5,00 |
| LV9 | 20 | Piezometro "NORTON" | x | x | |
| LV10 | 20 | x | x | x | |
| LV11 | 30 | Tubo DH | x | x | |
| LV12 | 20 | Piezometro "NORTON" | x | x | |
| LV13 | 30 | Tubo DH | 2,00/5,00 | LV13/C1 | 2,00/5,00 |
| | | | 5,00/10,00 | LV13/C2 | 5,00/10,00 |
| | | | 10,00/15,00 | LV13/C3 | 10,00/15,00 |
| LV14 | 20 | Piezometro "NORTON" | x | x | |
| LV15 | 10 | Piezometro "NORTON" | x | x | |
| LV16 | 10 | x | x | x | |
| LV17 | 10 | x | x | x | |
| LV18 | 10 | Piezometro "NORTON" | | LV18/C1 | 0,00/5,00 |
| LV19 | 10 | x | x | x | |
| LV20 | 10 | Piezometro "NORTON" | 2,00/5,00 | LV20/C1 | 2,00/5,00 |
| LV21 | 10 | x | x | x | |
| LV22 | 10 | x | x | x | |
| LV23 | 30 | Tubo DH | 2,00/5,00 | LV23/C1 | 2,00/5,00 |
| | | | 5,00/10,00 | LV23/C2 | 5,00/10,00 |
| LV24 | 10 | x | x | x | |

| SONDAGGIO | PROFONDITÀ | STRUMENTAZIONE | PROVE PERMEABILITÀ (PROF) | PRELIEVO CAMPIONI RIMANEGGIATI | |
|-----------|------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------|
| LV25 | 10 | x | x | x | |
| LV26 | 10 | Piezometro "NORTON" | 2,00/5,00 | LV26/C1 | 2,00/5,00 |
| LV27 | 10 | x | x | x | |
| LV28 | 10 | x | x | x | |
| LV29 | 10 | Piezometro "NORTON" | 2,00/5,00 | LV29/C1 | 2,00/5,00 |
| LV30 | 10 | x | x | x | |
| LV31 | 10 | x | x | x | |
| LV32 | 30 | Tubo DH | 2,00/5,00 | LV32/C1 | 2,00/5,00 |
| LV33 | 10 | Piezometro "NORTON" | | | |
| LV34 | 10 | Piezometro "NORTON" | 2,00/5,00 | LV20/C1 | 2,00/5,00 |
| LV35 | 10 | x | x | x | |
| LV36 | 10 | x | x | x | |
| LV37 | 10 | Piezometro "NORTON" | 2,00/5,00 | LV37/C1 | 2,00/5,00 |
| LV38 | 10 | Piezometro "NORTON" | 2,00/5,00 | LV38/C1 | 2,00/5,00 |
| LV39 | 10 | x | x | x | |
| LV40 | 10 | x | x | x | |
| LV41 | 10 | Piezometro "NORTON" | 2,00/5,00 | LV41/C1 | 2,00/5,00 |
| LV42 | 10 | x | x | x | |
| LV43 | 30 | Tubo DH | 2,00/5,00 | LV43/C1 | 2,00/5,00 |
| LV44 | 10 | Piezometro "NORTON" | | | |
| LV45 | 10 | Piezometro "NORTON" | | | |
| LV46 | 10 | Piezometro "NORTON" | | | |
| LV47 | 10 | Piezometro "NORTON" | | | |
| LV48 | 10 | Piezometro "NORTON" | | | |

8.3.2 INDAGINI GEOFISICHE

Ad integrazione dei dati geognostici disponibili ed al fine di ottenere informazioni indirette sulle proprietà fisiche e reologiche del terreno indagato e quindi al fine di valutare il parametro VSeq caratteristico dell'area (ai sensi del DM 17/01/2018) sono state realizzate indagini geofisiche come di seguito illustrato.

INDAGINI SISMICHE INTEGRATE MASW + HVSR

Le indagini hanno previsto l'esecuzione di prospezioni sismiche per mezzo di tecnica integrata MASW+HVSR.

Al fine di acquisire l'intero campo d'onda, sono stati realizzati stendimenti utilizzando un numero variabile di geofoni (solitamente 24), allineati a spaziatura regolare (5 m) con l'obiettivo di derivare una curva velocità onde S – profondità, la cui forma è associata alle proprietà meccaniche del terreno da indagare.

Ad integrazione dei dati acquisiti mediante MASW, si è proceduto a misure di sismica passiva dei rapporti spettrali HVSR mediante stazione sismometrica a tre componenti e relativa elaborazione HVSR.

| INDAGINI SISMICHE | UBICAZIONE |
|-------------------|-------------------------|
| MASW+HVSR1 | fermata Poliziano |
| MASW+HVSR2 | fermata ippodromo |
| MASW+HVSR3 | fermata Bassanelli |
| MASW+HVSR4 | sottopasso ferrovia |
| MASW+HVSR5 | fermata Saliceto |
| MASW+HVSR6 | fermata Croce Coperta |
| MASW+HVSR7 | fermata Pinardi |
| MASW+HVSR8 | Fermata Fiammelli |
| MASW+HVSR9 | SSE Lipparini |
| MASW+HVSR10 | Fermata Bentini |
| MASW+HVSR11 | Fermata Gorki |
| MASW+HVSR12 | Fermata Sant'anna/Byron |

| INDAGINI SISMICHE | UBICAZIONE |
|-------------------|---------------------------------|
| MASW+HVS13 | Fermata Shakespeare |
| MASW+HVS14 | Ponte navile |
| MASW+HVS15 | Adeguamento Stazione Corticella |
| MASW+HVS16 | Sottopasso stazione Corticella |
| MASW+HVS17 | Terminal Castel Maggiore |
| MASW+HVS18 | Parceggio Castel Maggiore |

PROVE SISMICHE IN FORO – DOWN HOLE

Nei fori di sondaggio allestiti con tubo in PVC, si è proceduto all'esecuzione di prospezioni sismiche con tecnica Down-hole lungo il foro con rilievo delle onde P e delle onde S, analisi della attenuazione delle onde sismiche e determinazione del fattore adimensionale qualità Q_v , per ogni metro di avanzamento.

Di seguito indicazione dei fori di sondaggio oggetto di propezione sismica Down-hole

| SONDAGGIO | PROF | STRUMENTAZIONE | UBICAZIONE |
|-----------|--------|----------------|----------------------------------|
| LV1 | -30,00 | Tubo PVC DH | Sottopasso piazza Unità |
| LV11 | -30,00 | Tubo PVC DH | Sottopasso piazza Unità |
| LV13 | -30,00 | Tubo PVC DH | Parceggio interrato piazza Unità |
| LV23 | -30,00 | Tubo PVC DH | Sottopasso passante |
| LV32 | -30,00 | Tubo PVC DH | Sottopasso passante |
| LV43 | -30,00 | Tubo PVC DH | Deposito Castel Maggiore |

8.3.3 PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO

Al fine di caratterizzare dal punto di vista geotecnico i diversi litotipi individuati è stato previsto il prelievo di campioni rimaneggiati all'interno delle cassette catalogatrici, successivamente conservati entro appositi contenitori trasparenti chiusi ermeticamente ed appositamente etichettati e consegnati al laboratorio geotecnico di analisi.

Le prove, eseguite secondo la normativa e raccomandazioni italiane o, in mancanza di queste, secondo normative straniere di normale impiego anche in Italia, hanno previsto le seguenti attività:

- apertura e descrizione geotecnica dei campioni con prove speditive di consistenza (pocket penetrometer e scissometro) sui materiali coesivi e documentazione fotografica;
- determinazione del contenuto naturale d'acqua;
- pesi di volume naturale e secco;
- analisi granulometrica per vagliatura e sedimentazione;
- determinazione dei Limiti di Atterberg;
- prove di taglio diretto CD con determinazione dei parametri di resistenza di picco e residua;
- prove di consolidazione edometrica con determinazione di C_v , K_v , m_v e del coefficiente di consolidazione secondaria C_α .

Nella seguente tabella si riporta il computo delle attività di laboratorio previste su ciascun campione prelevato:

| Camp | Profondità (m) | DC | w | γ | Lim | Gra. + Sed. | CD | Edo |
|---------|----------------|----|---|----------|-----|-------------|----|-----|
| LV1/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| | | | | | | | | |
| LV5/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV7/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| | | | | | | | | |
| LV8/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| | | | | | | | | |
| LV13/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV13/C2 | 5,00/10,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV13/C3 | 10,00/15,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV18/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |

| Camp | Profondità (m) | DC | w | γ | Lim | Gra. + Sed. | CD | Edo |
|---------|-------------------|----|---|----------|-----|-------------------|----|-----|
| LV20/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV23/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV23/C2 | 5,00/10,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV26/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| | | | | | | | | |
| LV29/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| | | | | | | | | |
| LV32/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| | | | | | | | | |
| LV34/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV37/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV38/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV41/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |
| LV43/C1 | 2,00/5,00 | X | X | X | X | X | X | X |

- Camp: identificativo del campione;
- Profondità: profondità indicativa relativa al prelievo del campione;
- DC: estrazione di campioni indisturbati da fustelle, esecuzione di prove di consistenza speditive e descrizione geotecnica;
- w: determinazione del contenuto in acqua;
- γ : determinazione della massa volumetrica apparente di una terra;
- Lim: determinazione congiunta del limite liquido e del limite plastico e calcolo dell'indice di plasticità;
- Gra + Sed: granulometria combinata per vagliatura e sedimentazione con areometro;
- CD: prova di taglio diretto, consolidata drenata, con determinazione dei parametri di resistenza al taglio di picco;

- Edo: prova di consolidazione edometrica eseguita su provini di diam. 50 o 71 mm, per un numero massimo di 9 incrementi nella fase di carico e 4 nella fase di scarico e con pressione massima di 6,4 o 3,2 MPa con determinazione di $c_v - k_v - m_v$

9. LIVELLI PIEZOMETRICI

Per quanto esposto nei precedenti capitoli, il tracciato della tranvia in progetto si colloca all'interno di un sistema acquifero multilivello, idrostratigraficamente ospitato nei depositi quaternari della porzione sommitale del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore; più precisamente risulta interessato il complesso acquifero A1 ospitante i livelli acquiferi SUP1-2 e SUP3-4 (questi ultimi due non sempre ben differenziabili e pertanto, alla scala dell'opera, considerati l'uno l'estensione dell'altro).

La complessità intrinseca della geometria del sistema acquifero multilivello e l'eterogeneità dei relativi parametri idrogeologici lungo il tracciato, comporterà una risposta dell'acquifero alle opere in progetto significativamente diversa, a seconda della progressiva di avanzamento. Nel caso di opere in superficie, verranno realizzati interventi di sostegno e di drenaggio, così come di impermeabilizzazione. Viceversa, per quanto riguarda le opere in sotterraneo, qualora sussistano condizioni per un effetto barriera persistente ai fini del flusso idrico sotterraneo, saranno previste opere di mitigazione.

9.1 BANCA DATI RER

L'Agenzia Prevenzione Ambiente Energia dell'Emilia-Romagna (Arpae) gestisce una rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee sulla quale vengono condotti rilievi della piezometria degli acquiferi profondi, che consta di circa 470 pozzi di controllo, misurati almeno 2 volte all'anno ed una quarantina di piezometri automatici con letture a cadenza oraria. Da tali dati di monitoraggio Arpae ha prodotto la "Rappresentazione cartografica della soggiacenza media (profondità del livello della falda in metri da piano campagna) negli acquiferi liberi e confinati superiori della Pianura dell'Emilia-Romagna - periodo 2014-2019" e la "Rappresentazione cartografica della soggiacenza media (profondità del livello della falda in metri da piano campagna) negli acquiferi liberi e confinati inferiori della Pianura dell'Emilia-Romagna - periodo 2014-2019", secondo normativa Piano di Gestione - Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE.

Come emerge dalla Figura 9-1 -, le soggiacenze medie delle falde relative agli acquiferi liberi e confinati superiori e relative agli acquiferi liberi e confinati inferiori, che interessano il tracciato di progetto variano dai 30 ai 20 m e tra i 40 ed i 35 m, rispettivamente.

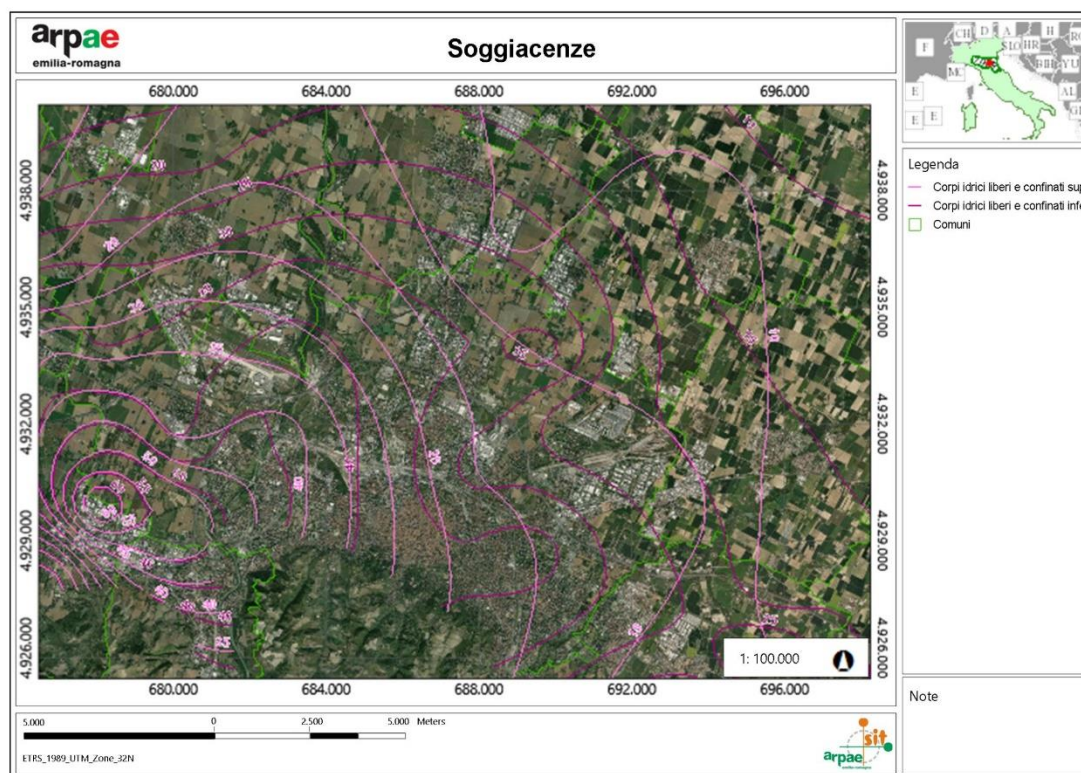


Figura 9-1 - Rappresentazione cartografica della soggiacenza media negli acquiferi liberi e confinati inferiori (viola) e negli acquiferi liberi e confinati superiori (rosa)

9.2 OPERE IN SOTTERRANEO E RELATIVO MODELLO IDROGEOLOGICO

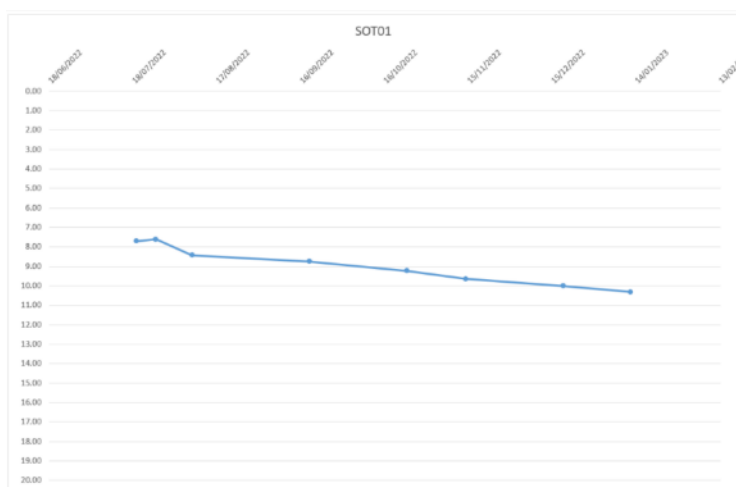
Nei paragrafi che seguono, vengono illustrate le opere in sotterraneo più rappresentative con relativo modello idrogeologico ricostruito a partire dal monitoraggio piezometrico condotto sui piezometri installati.

9.2.1 SOTTOVIA VIA MAZZA

Di seguito si riportano i dati ottenuti dalla campagna di monitoraggio del carico idraulico all'interno dei piezometri installati, nell'arco temporale 19/07/2022 - 14/01/2023.

SOT01

| 19/07/22 | 26/07/22 | 08/08/22 | 19/09/22 | 24/10/22 | 14/11/22 | 19/12/22 | 12/01/23 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7.70 | 7.61 | 8.43 | 8.75 | 9.23 | 9.65 | 10.01 | 10.32 |



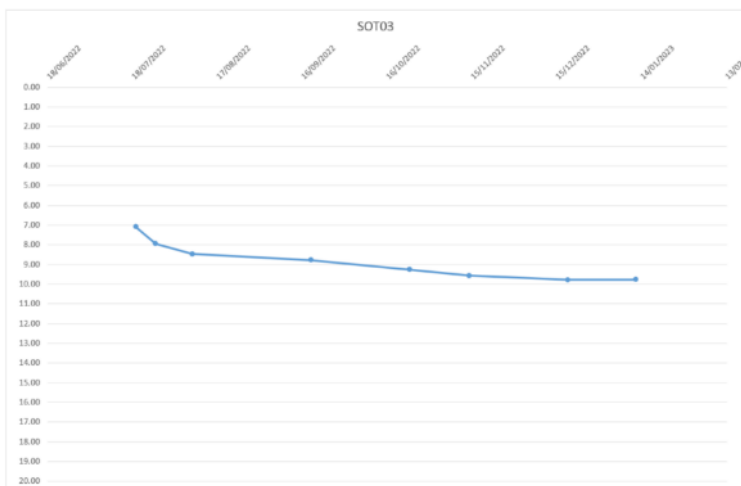
SOT01-B

| 19/07/22 | 26/07/22 | 08/08/22 | 19/09/22 | 24/10/22 | 14/11/22 | 19/12/22 | 12/01/23 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 13.42 | 13.19 | 13.66 | 14.08 | 14.15 | 13.86 | 14.05 | 13.81 |



SOT03

| 19/07/22 | 26/07/22 | 08/08/22 | 19/09/22 | 24/10/22 | 14/11/22 | 19/12/22 | 12/01/23 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7.09 | 7.95 | 8.46 | 8.78 | 9.25 | 9.56 | 9.78 | 9.77 |



SOT03-B

| 19/07/22 | 26/07/22 | 08/08/22 | 19/09/22 | 24/10/22 | 14/11/22 | 19/12/22 | 12/01/23 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 11.68 | 11.48 | 12.65 | 13.30 | 13.65 | 13.96 | 14.23 | 14.65 |



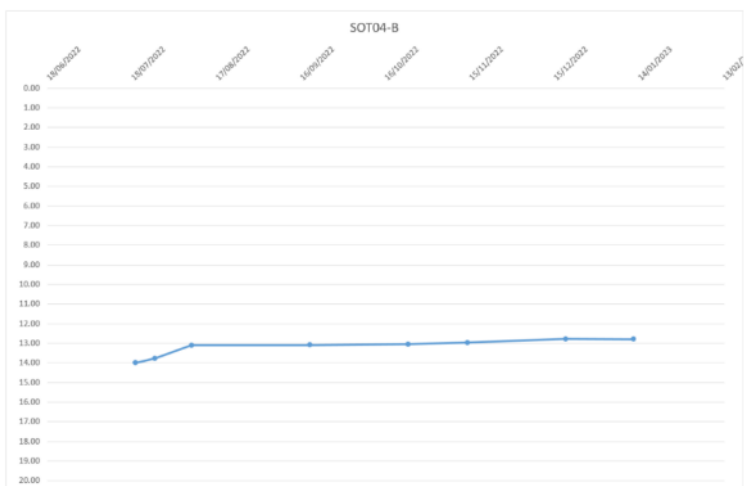
SOT04

| 19/07/22 | 26/07/22 | 08/08/22 | 19/09/22 | 24/10/22 | 14/11/22 | 19/12/22 | 12/01/23 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 9.46 | 9.22 | 8.58 | 8.45 | 8.42 | 8.38 | 8.45 | 8.65 |



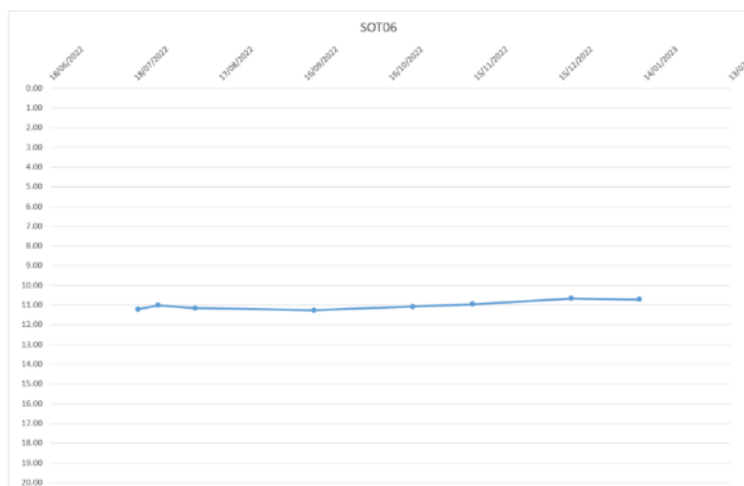
SOT04-B

| 19/07/22 | 26/07/22 | 08/08/22 | 19/09/22 | 24/10/22 | 14/11/22 | 19/12/22 | 12/01/23 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 14.00 | 13.77 | 13.10 | 13.08 | 13.04 | 12.96 | 12.78 | 12.79 |



SOT06

| 19/07/22 | 26/07/22 | 08/08/22 | 19/09/22 | 24/10/22 | 14/11/22 | 19/12/22 | 12/01/23 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 11.20 | 11.00 | 11.15 | 11.26 | 11.07 | 10.95 | 10.66 | 10.71 |



I dati ottenuti dalle misurazioni del livello di falda all'interno dei piezometri sono stati in seconda analisi fittati ricorrendo all'utilizzo della serie di Fourier implementata in Matlab, attraverso l'equazione:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(wt) + b_1 \sin(wt) + a_2 \cos(2wt) + b_2 \sin(2wt)$$

In quanto il livello di falda segue un andamento periodico riconducibile ad una combinazione lineare di funzioni trigonometriche ed in modo da ottenere un andamento del livello di falda estendibile al di fuori del periodo di osservazione.

Utilizzando i seguenti valori dei coefficienti della serie di Fourier utilizzati per il fitting.

| a0 | a1 | b1 | a2 | b2 | w |
|-------|-------|--------|------------------------|---------|------|
| -0.42 | -0.02 | 0.0141 | -7.05x10 ⁻⁵ | -0.0264 | 0.16 |

Si ottengono i seguenti valori di soggiacenza media annuali

| SOT01 | SOT01-B | SOT03 | SOT03-B | SOT04 | SOT04-B | SOT06 |
|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| 8.92 | 13.86 | 8.78 | 13.18 | 8.65 | 13.23 | 11.10 |

Le mappe isofreatiche sono state elaborate in riferimento alle falde individuate, basandosi sui dati raccolti nel corso delle campagne di misurazioni piezometriche effettuate, attraverso l'utilizzo del software Surfer 8 prodotto dalla Golden Software. Surfer 8 è un prodotto software per la graficizzazione di contorni e di superfici 3D; esso, rapidamente e facilmente, converte i dati in mappe a contorni e trame della superficie.

I dati sparsi (scattered), vengono trasformati in grafici perfettamente in griglia usati per produrre grafici contour e mappe della superficie, sulle quali si possono sovrapporre altri dati in riferimento ai precedenti. Surfer 8 permette l'interpolazione di un dataset ampio scegliendo tra diversi tipi di algoritmi; nello specifico, il metodo d'interpolazione scelto è stato il Radial Basic Function che rappresenta un metodo molto flessibile e in termini d'abilità nel fit dei punti di misura e di capacità di riprodurre superfici smooth, è paragonabile alla tecnica del kriging, soprattutto utilizzando le funzioni multiquadratiche (Chaplot et al., 2006; Jin et al., 2000). La particolarità delle funzioni multiquadratiche è che forniscono un sistema di equazioni piuttosto ben condizionato che è garantito essere non singolare e quindi fornire una soluzione.

Si è optato per il Radial Basic Function perché, in assenza di smoothing factor ($c=0$), risulta essere un metodo d'interpolazione esatto, ovvero onora esattamente i dati quando i nodi della griglia coincidono con i punti di misura ed è un metodo d'interpolazione adatto quando i punti di misura non superano alcune centinaia (Hardy, 1971; 1990).

La mappa di Figura 1-5 è stata elaborata in riferimento alla falda più superficiale, considerando per ciascun piezometro i valori di soggiacenza media annuali



Figura 9-2 – Mappa isofreatica SUP3

È evidente che le elaborazioni condotte confermano il trend di massima testimoniato dall'analisi del campo di moto freatico effettuata a supporto dal P.A.E. 2007 e nel dettaglio, dalla lettura della carta delle isopieze è riscontrabile un gradiente preferenziale in direzione SE-NW.

In riferimento alla falda confinata SUP2, in Figura 1-6 ne è rappresentata la mappa isofreatica che mostra, anche in questo caso un gradiente piezometrico con direzione SE-NW.

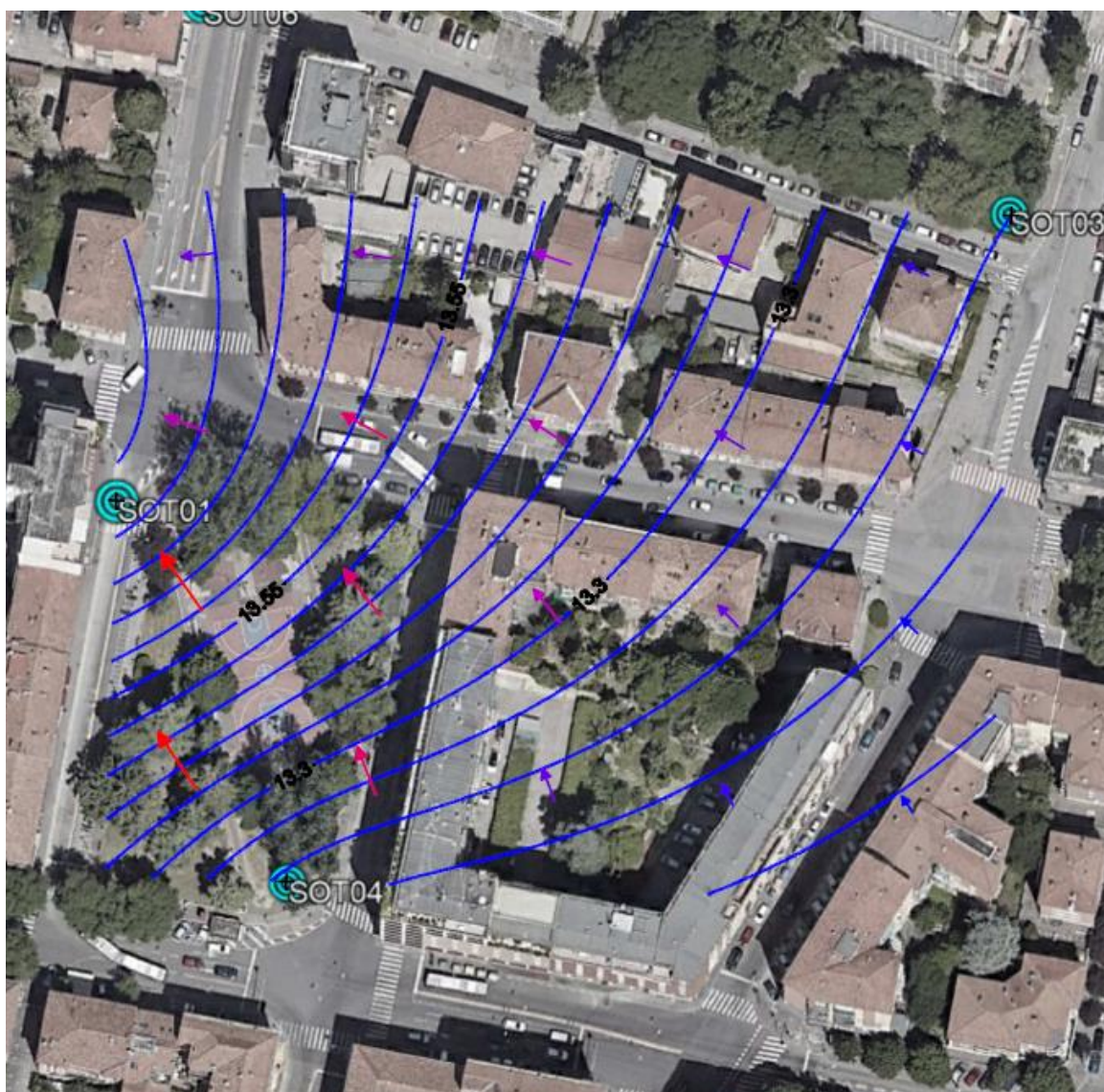


Figura 9-3 – Mappa isofreatica SUP2

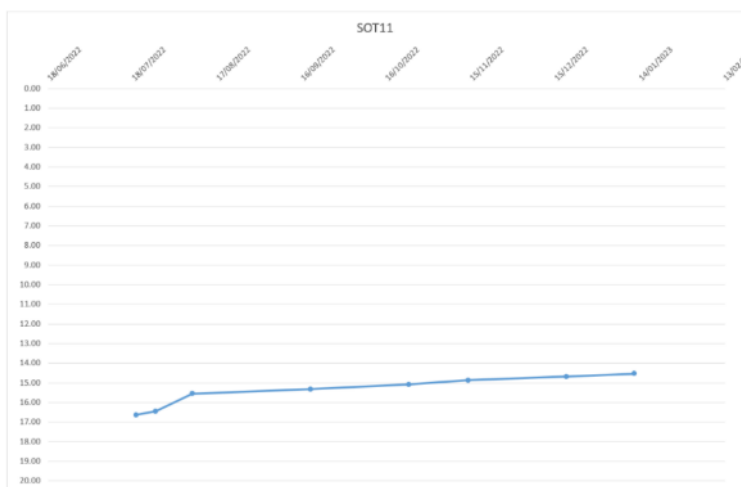
L'attività di monitoraggio svolta e la relativa analisi dei dati, ha permesso il riscontro, in corrispondenza dell'area, di una effettiva separazione idraulica tra l'orizzonte acquifero superficiale (A1c) ed il sistema acquifero sottostante (A1b). La situazione descritta ha trovato ulteriore conferma infatti nella diversità dei valori di carico idraulico riportata nelle sezioni tracciate e nella continuità areale dell'elemento di separazione tra i due acquiferi.

9.2.2 SOTTOATTRAVERSAMENTO PASSANTE

Di seguito si riportano i dati ottenuti dalla campagna di monitoraggio del carico idraulico all'interno dei piezometri installati, nell'arco temporale 19/07/2022 - 14/01/2023.

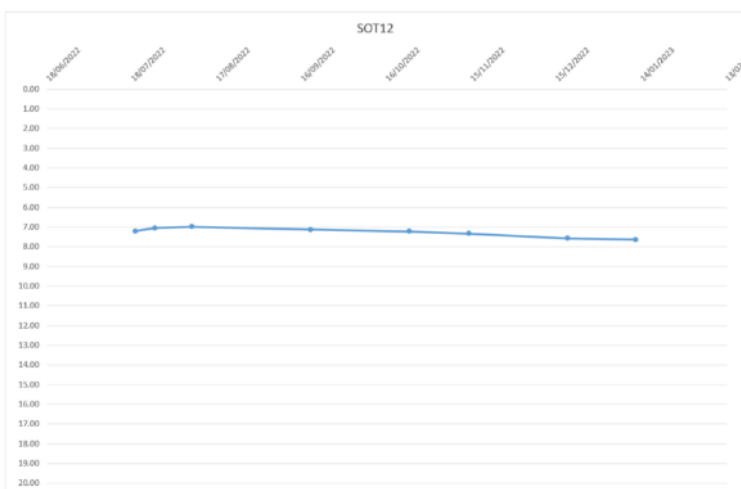
SOT11

| 19/07/22 | 26/07/22 | 08/08/22 | 19/09/22 | 24/10/22 | 14/11/22 | 19/12/22 | 12/01/23 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 16.63 | 16.45 | 15.55 | 15.32 | 15.08 | 14.86 | 14.68 | 14.53 |



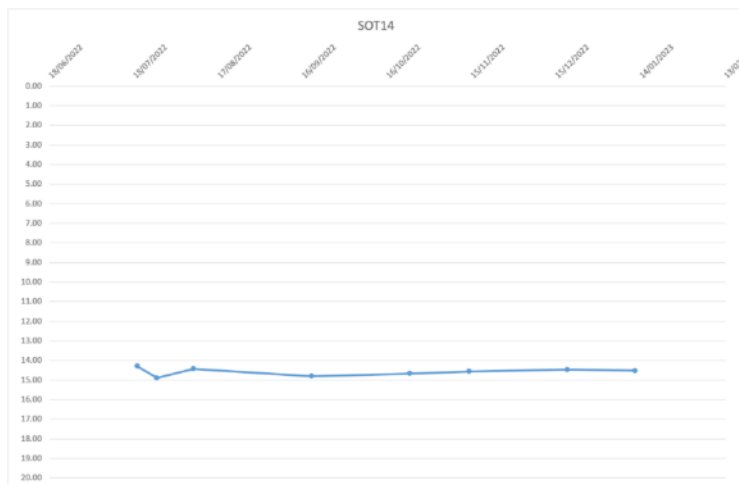
SOT012

| 19/07/22 | 26/07/22 | 08/08/22 | 19/09/22 | 24/10/22 | 14/11/22 | 19/12/22 | 12/01/23 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7.21 | 7.05 | 6.98 | 7.13 | 7.22 | 7.33 | 7.57 | 7.64 |



SOT14

| 19/07/22 | 26/07/22 | 08/08/22 | 19/09/22 | 24/10/22 | 14/11/22 | 19/12/22 | 12/01/23 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 14.29 | 14.90 | 14.42 | 14.80 | 14.66 | 14.56 | 14.46 | 14.52 |



Ricorrendo alla serie di Fourier, per la falda SUP2 si ottengono i seguenti valori di soggiacenza media annuali:

| SOT11 | SOT14 |
|-------|-------|
| 15.30 | 14.44 |

9.2.3 SOTTOATTRAVERSAMENTO FERROVIA

Stante gli esiti delle indagini bibliografiche di riferimento prese in esame e disponibili nella banca dati della Servizio Geologico della RER (sondaggio 221050P423 (1987)), l'opera in progetto non risulta interferire con il sistema acquifero superficiale del sottosuolo dell'area inquadrabile all'interno dei depositi limoso-sabbiosi rinvenuti a partire dalla profondità di -14,00 m da p.c., (A1b) con livello piezometrico riscontrato alla profondità di -16,30 m da p.c. al termine dell'esecuzione del sondaggio.

10. MODELLO GEOLOGICO DI PROGETTO

La ricostruzione litostratigrafica del sottosuolo indagato scaturisce dall'analisi dei risultati conseguiti a seguito della realizzazione delle indagini in sito e delle conoscenze geologiche dell'area acquisite tramite fonti bibliografiche.

Da un punto di vista stratigrafico, tenendo conto della inevitabile eterogeneità delle caratteristiche litologiche dei terreni presenti nell'intera area è possibile distinguere diverse associazioni di facies caratterizzanti il sottosuolo, con rapporti stratigrafici fortemente eteropici e conseguenti repentine variazioni e cambi di facies sia in senso orizzontale che verticale.

Le associazioni di facies individuate sono le seguenti:

- RIPORTO

Depositi antropici di natura limoso-sabbiosa che presentano localmente inclusi di varia natura, caratterizzati da eterogeneità degli spessori e delle caratteristiche di consistenza.

- UNITÁ A –Facies limoso-argillosa

Limo argilloso e argilla limosa di colore grigio verdastro con presenza di calcinelli e bioclasti. Localmente si rinvencono corpi lenticolari costituenti la Facies B e C.

- UNITÁ B – Facies sabbiosa-limosa

Sabbia fine e media talvolta debolmente limosa di color marrone. Questa unità si rinviene in corpi lenticolari distribuiti nelle Facies A e C.

- UNITÁ C – Facies ghiaiosa

Ghiaia da fine a medio-grossolana in matrice sabbioso limosa. Localmente si rinvencono corpi lenticolari costituenti la Facies A e B.

10.1 INQUADRAMENTO STRATIGRAFICO ALLA SCALA DELL'OPERA

Il quadro delle conoscenze geologico-stratigrafiche e sismiche ha consigliato la suddivisione del tracciato in sei aree principali, ognuna delle quali presenta caratteristiche stratigrafico-deposizionali peculiari:

- Dalla pk 0+000 alla pk 0+140;
- Dalla pk 0+140 alla pk 1+050;
- Dalla pk 1+050 alla pk 1+670;
- Dalla pk 1+670 alla pk 1+890;
- Dalla pk 1+890 alla pk 5+290;
- Dalla pk 5+290 alla pk 5+525.

Il quadro stratigrafico illustrato, coerente con il quadro geologico illustrato nei capitoli precedenti, si basa sulla correlazione stratigrafica dei sondaggi geognostici realizzati a supporto del progetto oltre a tenere conto delle campagne geognostiche pregresse. La descrizione dei sondaggi, oltre ad avvalersi della tradizionale descrizione litologica “di cantiere”, si basa sulla caratterizzazione sedimentologica delle carote e sull’analisi delle relazioni verticali-laterali tra le associazioni di facies. La possibilità di disporre di verticali omogeneamente distribuite è evidentemente condizionata dai vincoli di superficie (fondazioni, edifici, sottoservizi, occupazioni superficiali) imposti dall’ambiente urbano, specie in seno ad un ambiente urbano.

Il quadro stratigrafico risultante costituisce una approssimazione della complessa realtà geologica dell’area in esame, caratterizzata quasi esclusivamente da depositi alluvionali che, come è noto, presentano geometrie prevalentemente lenticolari, caratterizzate da un’elevata variabilità verticale e laterale, e per questo difficilmente prevedibili sulla base di semplici criteri di correlazione fisica. Per questo le carote di sondaggio sono state studiate in dettaglio secondo i criteri propri dell’analisi sedimentologica-stratigrafica, consentendo di definire specifiche

colonne stratigrafiche. L'affidabilità delle correlazioni stratigrafiche risulta ovviamente maggiore dove più elevata è la densità dei dati.

L'assetto stratigrafico con l'indicazione della distribuzione delle diverse unità geologiche in profondità è rappresentato, per il tracciato in progetto, nel profilo geologico proposto nell'elaborato B381CDX00GGIGEOPR01A. La reale geometria delle diverse unità è accertata solo in corrispondenza delle verticali d'indagine prese in esame, mentre per le altre distribuzioni, trattandosi di estrapolazioni su base sedimentologica in funzione delle indagini, sono da tener conto possibili variazioni locali.

Da pk 0+000 a pk 0+140.

Al di sotto dei primi 2.00 m caratterizzati da terreni di riporto, si rinviene un'alternanza tra argille limose e sabbie ghiaiose debolmente limose e/o argillose. La prima unità (A) si trova tra 2.00 e 9.00 m da p.c. (al di sotto dei terreni di riporto), tra 12.00 e 21.50 m da p.c. e tra 24.50 e 30.00 m da p.c.. La seconda unità (B) è localizzata tra 9.00 e 12.00 m da p.c., tra 21.50 e 24.50 m da p.c.

Da pk 0+140 alla pk 1+050.

Al di sotto dei primi 2.50 m caratterizzati da terreni di riporto, si rinviene un'alternanza tra argille limose e sabbie ghiaiose debolmente limose e/o argillose. La prima unità (A) si trova tra 7.50 e 17.50 m da p.c., e tra 39.00 e 49.50 m da p.c.. La seconda unità (B) si trova tra 2.50 e 7.50 m da p.c. (al di sotto dei terreni di riporto), tra 17.50 e 30.00 m da p.c.

Da pk 1+050 alla pk 1+670.

Al di sotto dei primi 1.50 m caratterizzati da terreni di riporto, si rinviene un'alternanza tra argille limose e sabbie ghiaiose debolmente limose e/o argillose. La prima unità (A) si trova tra 6.00 e 19.00 m da p.c. e tra 30.00 e 40.50 m da p.c.. La seconda unità (B) si trova tra 1.50 e 6.00 m da p.c. (al di sotto dei terreni di riporto), tra 19.00 e 30.00 m da p.c.

Da pk 1+670 alla pk 1+890.

Al di sotto dei primi 3.00 m caratterizzati da terreni di riporto, si rinviene un'alternanza tra argille limose e sabbie ghiaiose debolmente limose e/o argillose. La prima unità (A) si trova tra 3.00 e 16.00 m da p.c. (al di sotto dei terreni di riporto), tra 20.00 e 21.00 m da p.c. e tra 27.00 e 42.50 m da p.c.. La seconda unità (B) si trova tra 16.00 e 20.00 m da p.c., tra 21.00 e 27.00 m da p.c.

Da pk 1+890 alla pk 5+290.

Al di sotto dei primi 2.00 m caratterizzati da terreni di riporto, si rinviene un'alternanza tra argille limose e sabbie ghiaiose debolmente limose e/o argillose. La prima unità (A) si trova tra 5.00 e 10.00 m da p.c. e tra 20.00 e 35.50 m da p.c.. La seconda unità (B) si trova tra 2.00 e 5.00 m da p.c. (al di sotto dei terreni di riporto), tra 10.00 e 20.00 m da p.c.

Da pk 5+290 alla pk 5+525.

Al di sotto dei primi 3.00 m caratterizzati da terreni di riporto, si rinviene un'alternanza tra argille limose e sabbie ghiaiose debolmente limose e/o argillose. La prima unità (A) si trova tra 3.00 e 16.00 m da p.c. (al di sotto dei terreni di riporto), tra 20.00 e 21.00 m da p.c. e tra 27.00 e 41.50 m da p.c.. La seconda unità (B) si trova tra 16.00 e 20.00 m da p.c., tra 21.00 e 27.00 m da p.c.

11. NOTE CONCLUSIVE E GIUDIZIO DI FATTIBILITÀ

Nel presente rapporto viene presentato un inquadramento geologico, idrogeologico e sismico generale delle aree oggetto di studio e sulla base delle indagini in sito e di laboratorio geotecnico realizzate a supporto del progetto è stato desunto il modello geologico del sottosuolo di interesse.

Alla luce dello studio condotto, della natura e delle caratteristiche degli interventi da attuarsi, i lavori in progetto risultano compatibili con la situazione geologica e morfologica dei luoghi e tali da non influire negativamente sulla stabilità delle aree.

