

IDRAIECH

3

MODELLO CONCETTUALE

La definizione di un modello concettuale del sito di bonifica rappresenta il passo fondamentale ai fini della caratterizzazione. Le risultanze della fase di caratterizzazione costituiscono la base per la definizione esplicita delle condizioni fondamentali che rappresentano il sito contaminato e le componenti geoambientali che interagiscono. Il modello concettuale rappresenta a sua volta l'interpretazione e l'assimilazione di tutte le informazioni relative al sito, in assunzioni e ipotesi, che riguardano le fonti di contaminazione, la distribuzione della contaminazione e i processi e percorsi del trasporto dominante.

Il modello concettuale del sito deve definire gli elementi chiave delle condizioni idrogeologiche, geopedologiche e chimico fisiche che influenzano il movimento, la dissoluzione, e la volatilizzazione dei composti idrocarburici. Il fine di qualsiasi attività di campo che faccia seguito alla fase di caratterizzazione deve essere quindi quello di delineare e definire le componenti critiche individuate nel modello concettuale. Una volta definito, il modello concettuale del sito rappresenta la base per la valutazione dei rischi, per la definizione delle strategie di intervento e degli obiettivi della bonifica, per le attività di monitoraggio.

Nei paragrafi che seguono verranno descritte i risultati delle indagini condotte sul sito di Raffinerie di Roma S.p.A con riferimento a:

- Analisi del ciclo produttivo e tipi di prodotti in stoccaggio
- Condizioni idrogeologiche e proprietà dei terreni
- Schemi di trasporto dei contaminanti
- Analisi degli incidenti pregressi e condizioni di contaminazione
- Individuazione di possibili ricettori

Condizioni idrogeologiche e proprietà dei terreni

L'area occupata dagli impianti di Raffinerie di Roma S.p.A. si estende per circa 2 km in direzione NNW – SSE con larghezza media di circa 500 m all'interno della bassa Valle del Rio Galeria a quote comprese tra 15 e 20 m s.l.m.. Tale depressione valliva, originatasi a partire dal Pleistocene Superiore, risulta colmata in questo settore da depositi alluvionali che raggiungono spessori di 50 – 60 m per lo più costituiti da terreni di taglia da fine a medio fine con passaggi laterali a terreni di taglia da media a grossolana per lo più a geometria lenticolare.

I terreni costituenti il substrato delle unità deposizionali alluvionali sono rappresentati da unità deposizionali Plio-Pleistoceniche. Tali terreni affiorano estesamente lungo i versanti prospicienti la bassa valle del Rio Galeria. I terreni afferenti alla unità più antica Plio-Pleistocenica (Formazione di Monte Mario) sono rappresentati da limi argillosi, e argille limose sovraconsolidate e risultano in generale non affioranti o sub-affioranti all'interno dell'area di investigazione. A tale unità si sovrappongono con contatto trasgressivo le unità deposizionali della Formazione di Ponte Galeria.

Le unità basali della Formazione di Ponte Galeria sono per lo più costituite da terreni sabbioso-ghiaiosi con orizzonti plurimetrici di ghiaie sabbiose. La formazione di Monte Mario sostiene una circolazione idrica talora in pressione contenuta all'interno di tali unità basali della Formazione di Ponte Galeria. Tale circolazione idrica è stata ricostruita per il settore immediatamente ad ovest del sito di raffineria (vedi allegato... Carta Idrogeologica) tramite un censimento dei punti d'acqua con misure freatiche eseguite sui pozzi censiti. La superficie potenziometrica della circolazione idrica ricostruita mostra gradienti medi dell'1.2 % verso la depressione valliva del Rio Galeria.

L'assetto litostratigrafico ricostruito nelle sezioni geolitologiche (vedi allegato ... Sezioni Geolitologiche) individua un contatto tra l'acquifero contenuto all'interno delle unità basali della Formazione di Ponte Galeria e le unità deposizionali alluvionali con travaso di acque tra tale acquifero e le unità più permeabili e superficiali dei depositi alluvionali.

La ricostruzione di tale quadro idrogeologico ha richiesto la definizione di un modello che descriva da un punto di vista concettuale l'assetto litostratigrafico dei depositi alluvionali direttamente soggiacenti gli impianti di Raffinerie di Roma S.p.A.. Sono state individuate eterogeneità deposizionali che possono riflettersi in anisotropie dei caratteri idrogeologici dei corpi litologici in grado di influenzare i flussi in direzioni preferenziali lungo assi di

drenaggio sotterranei in terreni che presentano conducibilità idrauliche sensibilmente superiori rispetto ai terreni circostanti.

Tale modello di riferimento è stato ricostruito tramite l'esame delle caratteristiche descrittive dei terreni attraversati contenute nelle stratigrafie di:

- n. 20 piezometri con profondità media di 10 metri (Indagine SET, 2001);
- n. 296 microcarotaggi spinti fino ad una profondità media compresa tra 3 e 5 metri (Indagine SET, 2001);
- n. 92 saggi con profondità media compresa tra 2 e 5 metri (Indagine SET, 2001);
- n. 3 sondaggi geognostici spinti fino alla profondità di 35 m (Indagine Impresonda di Caserta, 1993);
- n. 3 Pozzi per emungimento realizzati dalla impresa Trivelpozzi di Roma per conto di Raffinerie di Roma S.p.A. spinti fino alle profondità di 71 metri (Pozzo n. 8), 70 metri (Pozzo n. 9), 60.4 metri (Pozzo n. 10)

Tutto il materiale su menzionato è stato reperito negli archivi della amministrazione delle Raffinerie di Roma S.p.A. e viene fornito in allegato nel Volume B del presente rapporto.

L'analisi geostatistica condotta sulla distribuzione areale delle quote assolute di passaggi litostratigrafici significativi, ai fini della ricostruzione dell'assetto idrogeologico dei terreni direttamente soggiacenti il sito di raffineria, ha consentito la preparazione dei seguenti elaborati:

- Carta della soggiacenza del primo orizzonte acquifero (Elaborato ..)
- Carta del tetto del primo orizzonte acquifero
- Carta dello spessore del primo orizzonte acquifero (Elaborato ..)
- Carta del letto del primo orizzonte acquifero (Elaborato ..)
- Carta della circolazione idrica nel primo orizzonte acquifero (Elaborato..)
- Sezioni geolitologiche (Elaborato ..)
- Sezioni idrogeologiche (Elaborato ..)

Tali elaborati sono forniti in allegato al Volume A del presente rapporto.

L'analisi di tali elaborati consente di definire un modello concettuale di riferimento relativo all'assetto idrogeologico dei terreni direttamente soggiacenti gli impianti di Raffinerie di Roma S.p.A. I paragrafi che seguono entrano nel merito delle caratteristiche litostratigrafiche e strutturali che controllano direttamente la distribuzione e il trasporto dei composti idrocarburici eventualmente presenti nel sottosuolo.

Primo orizzonte acquifero

L'analisi dei dati stratigrafici disponibili ha messo in evidenza passaggi litostratigrafici significativi ai fini della definizione di eterogeneità deposizionali che possono riflettersi in anisotropie dei caratteri idrogeologici dei corpi litologici.

L'analisi geostatistica, condotta sulla distribuzione areale delle quote dei passaggi litostratigrafici, e sugli spessori di unità litologiche con caratteristiche simili, ha consentito di definire la presenza di un corpo litologico, costituito da terreni sabbioso ghiaiosi e sabbioso limosi, individuato come primo orizzonte acquifero immediatamente sottostante spessori variabili tra 2 e 4 metri di spessori di terreni limo argillosi e limo sabbiosi al di sotto dell'area di raffineria. Il corpo litologico costituente il primo orizzonte acquifero risulta delimitato verso N e NE, dove raggiunge spessori nulli, da passaggi a terreni prevalentemente limoso argillosi (vedi Elaborato.. Carta dello spessore del primo orizzonte acquifero).

La distribuzione dello spessore del primo orizzonte acquifero individua un paleo alveo del corso del Rio Galeria che si sviluppava in posizione più prossima ai rilievi direttamente posti ad ovest del sito di raffineria con una geometria del corso molto simile alla geometria dell'attuale corso del Rio Galeria. In corrispondenza dell'asse di tale paleoalveo si depositavano sabbie e ghiaie con passaggi verso est a facies sabbioso limose tipiche di un ambiente di retro argine. Gli spessori maggiori di materiali sabbioso ghiaiosi, in taluni casi superiori a 7 metri, si riscontrano in corrispondenza dei piezometri PZ12, PZ13, PZ14, PZ15, PZ19 e PZ20.

La morfologia del paleo alveo (vedi Allegato.. Carta della base del primo livello acquifero) individua una depressione con asse orientato in direzione NS con quote che degradano verso sud in accordo con l'ipotesi di una paleomorfologia legata alla dinamica fluviale del Rio Galeria. Le ricostruzioni presentate in Allegato.. Sezioni Geolitologiche estrapolano la continuità di tale corpo litologico fino ad intercettare l'attuale corso del Rio Galeria verso Est e le unità basali della formazione di Ponte Galeria verso Ovest. La continuità verso sud di tale corpo litologico è confermata dai dati stratigrafici dei piezometri PZ19 e PZ20. Le misure freaticometriche eseguite su alcuni dei piezometri installati nel 2001, ancora disponibili all'uso, hanno consentito di ricostruire un' ipotesi di circolazione idrica all'interno del primo orizzonte acquifero (vedi Allegato.. Carta della circolazione idrica nel primo orizzonte acquifero). La superficie potenziometrica ricostruita per mezzo di linee isopieze mostra un gradiente medio di circa 1.8% in direzione del corso del Rio Galeria.

Il modello ricostruito prevede una alimentazione del primo orizzonte acquifero da parte delle acque della circolazione idrica individuata all'interno delle unità basali della Formazione di Ponte Galeria lungo un fronte di contatto sepolto lungo circa 1800 metri per spessori variabili tra 2 e 6 metri disposto lungo l'asse della valle direttamente ad Ovest del sito di Raffineria. Il primo orizzonte acquifero, soggiacente l'area di Raffineria, con conducibilità idrauliche sensibilmente superiori alle zone circostanti, potrebbe essere in grado di comportarsi da asse di drenaggio preferenziale in direzione N-S per una parte della circolazione idrica.

L'attuale corso del Rio Galeria si comporta altresì da elemento drenante della circolazione idrica presente all'interno dei terreni del primo orizzonte acquifero ed è in grado di veicolare, verso settori di territorio a valle della raffineria, acque potenzialmente contaminate da composti idrocarburici in soluzione e di volumi di prodotto in fase surnatante.

Le quote di base del corso del Rio Galeria sono state definite sulla base di un rilievo planimetrico molto dettagliato, di provenienza sconosciuta, rappresentante l'area di raffineria precedente la costruzione della stessa. Le misure freaticometriche eseguite recentemente sulle installazioni piezometriche PZ8, PZ18, PZ19 individuano l'esistenza di un elemento drenante della circolazione idrica contenuta nel primo orizzonte acquifero, coincidente con il corso del Rio Galeria, in grado di spiegare l'inasprimento dei gradienti idraulici riscontrati in corrispondenza di tali punti di monitoraggio ubicati nelle immediate vicinanze del corso del Rio Galeria.

La circolazione idrica contenuta all'interno del primo orizzonte acquifero risulta quindi alimentata dalla circolazione idrica contenuta all'interno delle unità basali della Formazione di Ponte Galeria, in affioramento lungo il settore occidentale dell'area di raffineria, e da una percentuale di acque di infiltrazione efficace, che dopo aver saturato lo spessore di non saturo, sono in grado di percolare all'interno dell'acquifero alluvionale. I due contributi sono stati stimati assumendo i seguenti parametri di riferimento:

- Lunghezza (L) del fronte di contatto tra i due acquiferi pari a circa 1800 metri
- Altezza media (H) del fronte di contatto tra i due acquiferi pari a circa 4 metri
- Conducibilità idraulica del fronte di contatto tra i due acquiferi $K = 10^{-5}$ m/s
- Porosità efficace $n_e = 0.2$ in accordo con terreni di tipo sabbioso fine
- Gradiente idraulico medio della circolazione idrica all'interno dei depositi basali della Formazione di Ponte Galeria $I = 0.012$

- Altezza di pioggia media annua pari a circa 650 mm
- Infiltrazione efficace pari al 5% dell'altezza di pioggia media annua

Il primo contributo relativo all'alimentazione dovuta al passaggio di acqua tra i 2 acquiferi contigui e' stato stimato sulla base dell'equazione di Darcy così espressa

$$Q = KI \frac{LH}{ne}$$

Sulla base delle assunzioni di cui sopra il contributo alla ricarica dell'acquifero lungo la fascia di contatto tra i 2 acquiferi risulta essere pari a $Q = 136.236 \text{ m}^3/\text{anno}$ pari a 4.3 l/s . Si osserva che variazioni della conducibilità idraulica inferiori ad un ordine di grandezza possono far salire tale contributo come segue:

- Per $K = 1.5 \cdot 10^{-5}$ risulta che $Q = 204353 \text{ m}^3/\text{anno}$ pari a 6.5 l/s
- Per $K = 2.5 \cdot 10^{-5}$ risulta che $Q = 340.589 \text{ m}^3/\text{anno}$ pari a 10.8 l/s
- Per $K = 5.0 \cdot 10^{-5}$ risulta che $Q = 681.178 \text{ m}^3/\text{anno}$ pari a 21.6 l/s

Il contributo dovuto all'infiltrazione efficace risulta essere pari a $26000 \text{ m}^3/\text{anno}$ pari a 0.82 l/s .

Risulta evidente come il contributo dovuto all'infiltrazione efficace sia minimo e in qualche modo trascurabile ai fini della definizione del bilancio idrogeologico della circolazione idrica esistente all'interno del primo orizzonte acquifero.

L'analisi dei volumi di acqua in entrata lungo la fascia di contatto tra i 2 acquiferi e quella dei volumi d'acqua in uscita lungo il fronte drenante, rappresentato dal corso del Rio Galeria, rappresentano condizioni al contorno di estrema importanza nella modellizzazione della circolazione idrica all'interno del primo orizzonte acquifero. La fase di investigazione dovrà definire le conducibilità idrauliche e i coefficienti di immagazzinamento del corpo litologico individuato come primo orizzonte acquifero al fine di verificare quanto più accuratamente possibile i volumi di acqua in entrata ed individuare vie preferenziali di drenaggio della circolazione idrica nel primo orizzonte acquifero e dei percorsi di trasporto dei contaminanti in fase mobile e disciolta.

La definizione di un modello idrogeologico che si avvicini il più possibile alla realtà del sito di investigazione riveste particolare importanza nella definizione delle tecnologie di bonifica che prevedano tecniche di pompaggio con depressione della superficie piezometrica per il recupero di contaminanti in fase mobile e diaframmi di contenimento

associati a sistemi di pompaggio e trattamento per il recupero/stabilizzazione del plume di contaminazione in fase disciolta e/o mobile.

Terreno non saturo

Lo spessore dei terreni soprafalda, e le loro caratteristiche chimico fisiche, influenzano direttamente la possibilità che volumi di composti idrocarburici, accidentalmente rilasciati in superficie, possano raggiungere la frangia capillare che si sviluppa al passaggio tra i terreni in falda e i terreni non saturi; influenzano in maniera determinante la possibilità di accumulo di prodotto surnatante e la sua mobilità e possibilità di recupero in fase di bonifica; trattengono composti idrocarburici a concentrazioni residue negli spazi intergranulari difficilmente recuperabili totalmente con le tecnologie attualmente in uso per la bonifica.

La valutazione dello spessore e delle caratteristiche chimico fisiche di tali terreni assume quindi fondamentale importanza per la definizione di interventi di bonifica che siano praticabili ed efficaci da un punto di vista dell'analisi costo-beneficio.

La conoscenza dello spessore di tali terreni è inoltre una guida fondamentale per la preparazione di un programma di campionamento dei suoli e per la corretta progettazione preliminare della rete di strumentazioni di controllo dei livelli piezometrici e dello spessore di prodotto in fase mobile in attrezzature piezometriche di monitoraggio.

Lo spessore di terreno non saturo si evince dalla carta della soggiacenza del primo orizzonte acquifero (Elaborato ..). Tale elaborato è stato preparato da un DTM della topografia del sito di raffineria, come risulta dal rilievo aerofotogrammetrico Sara Nistri s.r.l. del 1987, a cui è stato sottratto il DTM del tetto del primo orizzonte acquifero così come definito dalla elaborazione geostatistica delle quote di passaggi litologici, rilevati nelle stratigrafie esaminate, tra terreni che presentavano caratteristiche descrittive tali da far supporre contrasti di conducibilità idrauliche rilevanti ai fini della circolazione idrica in falda. E' corretto ricordare che il DTM della superficie topografica, sulla base dei dati disponibili, non può che rappresentare una approssimazione abbastanza dettagliata della situazione topografica reale al sito di raffineria e che il DTM del tetto del primo orizzonte acquifero rappresenta un trend spaziale basato su un limitato numero di punti di controllo.

La carta della soggiacenza del primo orizzonte acquifero individua spessori di terreno non saturo per la massima parte compresi tra 2 e 4 metri. Tali terreni, come risulta dalle descrizioni litologiche delle stratigrafie prese in esame, sono composti generalmente da terreni di natura limoso argillosa e limoso sabbiosa direttamente sottostanti spessori

variabili di terreni di riporto e sottofondi stradali. Si individuano aree di notevole estensione, soprattutto nei settori centro occidentale e meridionale dove tale spessore si riduce al di sotto di 3 metri, aree dove ci si può aspettare uno spessore inferiore a 2 metri sono presenti nel settore settentrionale e centro occidentale. Aree dove si osserva un approfondimento anomalo del tetto del primo orizzonte acquifero come in corrispondenza di PZ11 dovranno essere soggette a verifica in fase di investigazione.

Le sezioni geolitologiche individuano spessori consistenti di terreni di riporto in corrispondenza dell'alveo sepolto del Fosso del Pantano del Grano (vedi Elaborato.. Indagine storica). Tali terreni risultano talora in contatto con il primo orizzonte acquifero o comunque sono presenti fino a profondità tali da far presumere una via preferenziale per l'accumulo e la mobilizzazione di volumi di composti idrocarburici accidentalmente rilasciati in superficie. In fase di investigazione si dovrà tener conto di tale situazione, andando ad investigare lo spessore e la natura dei terreni di riporto e le condizioni di contaminazione presenti lungo il corso dell'alveo sepolto. altresì spessori consistenti di terreni di riporto devono aspettarsi in corrispondenza del corso del canale Incile e in corrispondenza dell'area del Ponte di Carico dove le opere di sistemazione infrastrutturali hanno sicuramente determinato movimentazioni e accumuli di materiali a seguito di scavi e riprofilature

Acquifero profondo

La successione litostratigrafica dei depositi alluvionali è stata ricostruita sulla base delle stratigrafie dei pozzi di emungimento presenti nell'area di raffineria (la documentazione viene fornita in allegato al Volume B del presente rapporto).

La documentazione reperita, relativa alle stratigrafie e alle caratteristiche costruttive dei pozzi di emungimento n. 8 (profondo 71 metri), n. 9 (profondo 70 metri) e n. 10 (profondo 60.4 metri), realizzati negli anni 70 dalla ditta Trivelpozzi di Roma per conto di Raffinerie di Roma S.p.A, individua terreni sabbioso limosi e limo argillosi con intercalazioni metriche di sabbie e ghiaie, riferibili alla serie alluvionale olocenica, fino alle profondità di 49.5 metri nel pozzo n. 8, 55 metri nel pozzo n. 9 e 44.5 metri nel pozzo n. 10 ubicato all'estremo settore settentrionale dell'area di raffineria.

Le captazioni emungono acqua dai depositi ghiaioso sabbiosi di base della serie alluvionale direttamente soggiacenti le unità sabbioso limose e limo argillose sopra menzionate. Tali depositi ghiaioso sabbiosi sono sede di una circolazione idrica in pressione il cui livello statico si individua a pochi metri di profondità dal piano campagna.

L'unità delle ghiaie di base dei depositi alluvionali appare quindi continua da nord a sud con spessori variabili tra 8.50 metri nel pozzo n.8, 2 metri nel pozzo n.9 e 4.5 metri nel pozzo n. 10 (vedi allegato.. Sezioni geolitologiche), tale unità marca l'inizio della fase erosiva tardo pleistocenica, verificatasi in concomitanza di notevoli cambiamenti paleogeografici dovuti essenzialmente alla variazione del livello marino.

La presenza di depositi ghiaioso sabbiosi alla base delle serie alluvionali oloceniche è una costante dell'area geologica romana. L'alimentazione di questi orizzonti acquiferi non avviene mai per infiltrazione locale ma è da ricercarsi nei contatti sepolti di tali orizzonti con le falde di base contenute all'interno dei depositi vulcanici e dei depositi pre vulcanici del substrato sedimentario. Tali aree di alimentazione generalmente si individuano nei settori mediani o apicali delle incisioni vallive.

Nell'area della raffineria tali depositi di apertura del ciclo alluvionale olocenico poggiano su un substrato costituito dalle argille limose e sabbiose della Formazione di Monte Mario del Pliocene Inferiore Medio, tale passaggio litostratigrafico è stato individuato a 58 metri di profondità nel pozzo n. 8, 57 metri di profondità nel pozzo n. 9 e 49 m di profondità nel pozzo n. 10. Le ricostruzioni in Allegato.. mostrano un piano di contatto debolmente inclinato verso sud in direzione dell'alveo del Fiume Tevere.

Le caratteristiche costruttive delle opere di captazione e l'assetto idrogeologico dell'orizzonte acquifero delle ghiaie di base, oggetto di captazione, testimoniano a favore di una difficile se non impossibile comunicazione tra il primo orizzonte acquifero e l'acquifero profondo.

Gli orizzonti sabbiosi presenti a varie altezze nel pacco alluvionale possono contenere circolazioni idriche in pressione che appaiono protette da possibili fenomeni di contaminazione da pacchi di terreni limoso argillosi di spessore plurimetrico.

Trasporto dei contaminanti

L'analisi del processo produttivo del sito di Raffinerie di Roma S.p.A individua unità di stoccaggio di prodotti idrocarburici con caratteristiche fisico chimiche diverse (vedi Elaborato.. Carta...). Si tratta di prodotti di raffinazione assimilabili alla generale categoria degli LNAPL (Light Non Aqueous Phase Liquid) della letteratura scientifica statunitense. Ossia un composto idrocarburico liquido "poco" solubile in acqua a densità inferiore a quella dell'acqua.

In Fig. si riporta un modello concettuale semplificato delle condizioni di contaminazione che ci si possono attendere a seguito di un rilascio accidentale di LNAPL in una situazione geologica ed idrogeologica come quella ricostruita per il sito di Raffinerie di Roma S.p.A.

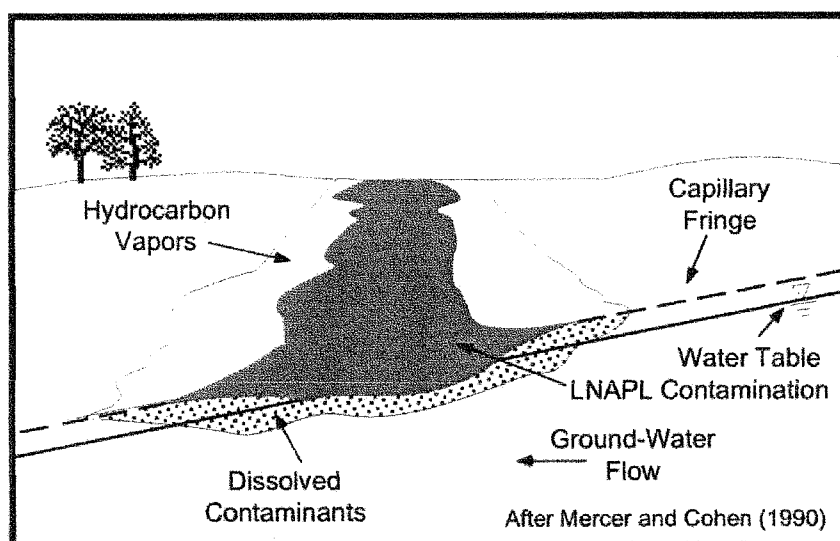


Fig. – Modello concettuale semplificato delle condizioni di migrazione di composti LNAPL

A seguito di un rilascio accidentale in superficie di un volume di LNAPL si verificherà un movimento verso il basso del composto idrocarburico attraverso il mezzo non saturo dove una percentuale di prodotto resterà intrappolata dalle forze capillari nei pori del terreno (concentrazione residua) riducendo il volume della massa di LNAPL in movimento. Se un volume sufficiente viene accidentalmente rilasciato o se la fonte di contaminazione è continua nel tempo si potrà verificare una migrazione della massa di contaminante fino ad incontrare una barriera fisica rappresentata da strati a bassa conducibilità idraulica o dalle forze di galleggiamento in prossimità della superficie freatica. Una volta raggiunta la frangia capillare il composto idrocarburico può muoversi lateralmente in fase libera lungo la superficie superiore della zona satura per effetto della gravità e delle forze capillari.

L'infiltrazione di acque di precipitazione o il passaggio di acque di falda, in porzioni di terreno dove sia presente LNAPL in fase mobile o intrappolato a concentrazioni residue, comporta la dissoluzione dei componenti solubili della massa idrocarburica con la formazione di un plume di contaminazione in fase acquosa. In aggiunta la volatilizzazione dei composti volatili costituenti la massa idrocarburica può contribuire alla contaminazione di settori più estesi di suoli.

Trasporto nel terreno non saturo

I parametri che influenzano il trasporto di LNAPL nel mezzo non saturo dipendono dalle caratteristiche fisico chimiche del composto idrocarburico e del mezzo che viene ad essere attraversato.

- La conducibilità idraulica di un mezzo poroso, definita come unità di lunghezza nel tempo, aumenta all'aumentare della densità del fluido e diminuisce all'aumentare della viscosità del fluido.
- La pressione di risalita capillare all'interno di un mezzo poroso non saturo influenza in maniera determinante le condizioni e la configurazione della massa di LNAPL intrappolata a concentrazioni residue. La pressione di risalita capillare deve essere superata prima che un composto idrocarburico in fase fluida possa muoversi attraverso il mezzo poroso. Effetti della pressione di risalita capillare possono essere identificati nella maggiore facilità al movimento di LNAPL attraverso materiali di taglia media e grossolana piuttosto che medio fine. In Fig. sono rappresentate le curve relative alle pressioni di risalita capillare che si ingenerano in vari tipi di terreni a differente grado di saturazione (fonte American Petroleum Institute Interactive LNAPL Guide) a partire da valori della densità naturale e dalle percentuali di distribuzione granulometrica di 15000 campioni di terreno.

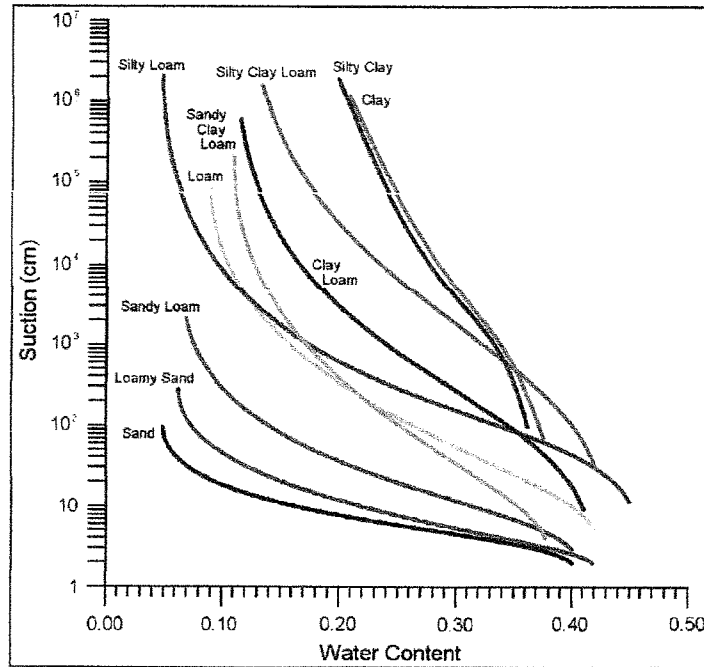


Fig. Pressioni di risalita capillare in differenti tipi di terreni per differenti gradi di saturazione
(fonte American Petroleum Institute Interactive LNAPL guide)

- La saturazione in prodotto idrocarburico in un mezzo poroso rappresenta la frazione relativa di volume dei pori che contiene LNAPL. I profili di saturazione in prodotto idrocarburico sono influenzati dalla tessitura dei terreni e dalle caratteristiche fisiche dell'LNAPL. La saturazione in prodotto idrocarburico, e quindi i volumi di LNAPL eventualmente presenti nel sottosuolo, possono essere quantitativamente definiti per un terreno sulla base di comuni dati di laboratorio e da valori di letteratura. In particolare la saturazione in prodotto idrocarburico può essere calcolata utilizzando valori di TPH (Total Petroleum Hydrocarbon) da analisi su campioni e valori di porosità, densità naturale del terreno e misure della densità del prodotto idrocarburico presente (American Petroleum Institute Interactive LNAPL Guide – Calculation Tools).
- La mobilità di un composto idrocarburico è direttamente influenzata dalla saturazione in LNAPL, maggiore è il grado di saturazione, maggiore sarà la mobilità del composto idrocarburico. Il termine *permeabilità relativa* rappresenta un fattore che indica la capacità di un fluido di muoversi in un mezzo poroso in presenza di un altro fluido e rappresenta il rapporto della permeabilità di un fluido ad un certo grado di saturazione e la permeabilità del fluido al 100% di saturazione. In un sistema trifase aria- acqua – LNAPL come quello che si verifica nel mezzo non saturo, la permeabilità della fase idrocarburica è sempre inferiore a quella a completa

saturazione. In Fig. viene mostrato come fase idrocarburica ed acqua interferiscono con la mobilità dell'uno e dell'altro.

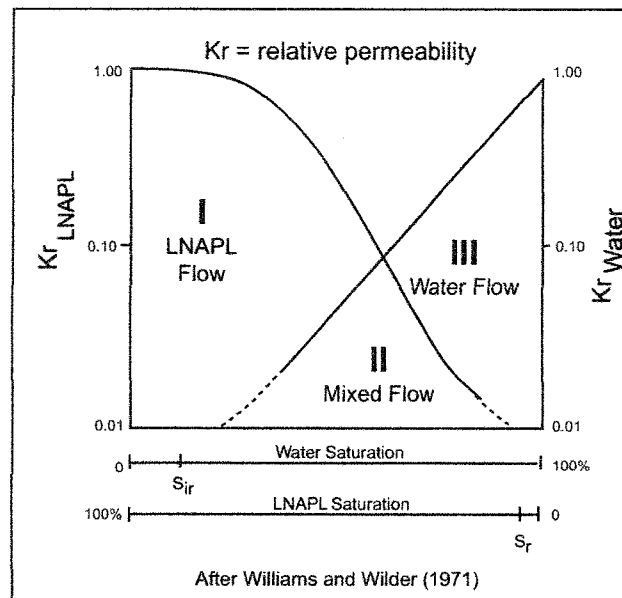


Fig. Permeabilità relativa di composti idrocarburici ed acqua
(fonte EPA/540/S-95/500)

Ad un aumento del grado di saturazione in acqua corrisponde una diminuzione della permeabilità del composto idrocarburico; allo stesso modo un aumento della saturazione in LNAPL comporta una diminuzione della permeabilità relativa dell'acqua. Il grafico sopra riportato individua 3 zone:

Zona I: l'LNAPL si ritrova come potenzialmente mobile e il grado di saturazione in LNAPL è elevato. Tali condizioni si verificano all'interno di accumuli consistenti di prodotti idrocarburici.

Zona II: si tratta della zona dove le concentrazioni di entrambi i fluidi riducono le relative permeabilità. Tali condizioni si verificano nelle zone dove si riscontra la presenza di ridotti volumi di prodotto in fase libera come in prossimità della superficie freatica.

Zona III: il prodotto idrocarburico è intrappolato e isolato e l'acqua è libera di fluire nel mezzo poroso. Tali condizioni si verificano all'interno della zona a concentrazione residua in LNAPL al di sotto della superficie freatica.

Il livello di saturazione al quale un composto idrocarburico diventa discontinuo ed è immobilizzato dalle forze capillari viene indicato come *saturazione residua*.

I volumi di terreno che presentano concentrazioni residue di LNAPL rappresentano fonti di contaminazione continue di composti in soluzione nelle acque di falda.

Le condizioni idrogeologiche e l'assetto litostratigrafico soggiacenti l'area di Raffinerie di Roma S.p.A. prevedono l'esistenza di un primo orizzonte acquifero costituito da depositi sabbioso ghiaiosi e sabbioso limosi che si individua ad una profondità media di compresa tra 3 e 4 metri. Tale orizzonte acquifero risulta sede di una circolazione idrica che viene alimentata per la massima parte lungo un fronte di contatto sepolto con i terreni sabbioso ghiaiosi delle unità basali della formazione di Ponte Galeria. La circolazione idrica ricostruita mostra gradienti medi dell' 1.8% verso il corso del Rio Galeria che si comporta da elemento drenante della circolazione idrica contenuta nel primo orizzonte acquifero. Un pacco di terreni limo argillosi e limo sabbiosi di spessore variabile tra 1 metro e 5 metri si sovrappone al corpo litologico costituente il primo orizzonte acquifero, terreni di riporto e di sottofondo stradale sono presenti per spessori variabili da 0.5 metri a 4 metri (in corrispondenza dell'alveo sepolto del Fosso di Pantano di Grano).

Eventuali rilasci di volumi di composti idrocarburici determinerebbero sicuramente un accumulo di composti in fase libera al contatto tra materiali di riporto e il pacco argilloso. Tali accumuli tenderebbero quindi a muoversi verso le aree depresse di tale superficie di contatto secondo un gradiente imposto dalla morfologia del contatto. I prodotti idrocarburici tenderebbero quindi ad infiltrarsi verso il basso nei terreni limo argillosi e limo sabbiosi che ricoprono il primo orizzonte acquifero fino a raggiungere la frangia capillare dove, se presenti in concentrazioni superiori alla concentrazione residua, tenderebbero a muoversi nella direzione del gradiente della superficie potenziometrica della circolazione idrica freatica.

Le ricostruzioni dell'assetto litostratigrafico ed idrogeologico dell'area sottostante il sito di Raffinerie di Roma S.p.A. sembrano individuare uno strato continuo di materiali fini immediatamente sovrastanti il primo orizzonte acquifero. Tale ricostruzione, basata su un limitato numero di colonne stratigrafiche, testimonierebbe a favore di una circolazione idrica in pressione nel primo orizzonte acquifero per buona parte dell'estensione del corpo acquifero. Tale situazione comporterebbe la presenza di ampi volumi di materiali fini contaminati da composti idrocarburici a concentrazioni tali da ritenersi poco mobili.

Tali masse di prodotti idrocarburici tenderebbero a muoversi verso il basso in corrispondenza di periodi durante i quali si verifica un abbassamento della frangia capillare a seguito di un aumento della permeabilità relativa del prodotto in fase libera. Un movimento in direzione orizzontale di masse di prodotto a concentrazioni superiori ai valori di concentrazione residua, sarebbe da aspettarsi invece in corrispondenza di una risalita

della frangia capillare quando si può ipotizzare una diminuzione della permeabilità relativa e a seguito dell'instaurarsi di gradienti in direzione orizzontale della pressione di risalita capillare da imputarsi a variazioni anche minime della tessitura dei terreni di copertura del primo orizzonte acquifero. I processi di volatilizzazione estenderebbero ulteriormente i processi di contaminazione nel mezzo non saturo e nel mezzo saturo. Tale scenario concettualizzato in Fig. comporta la contaminazione di volumi sempre più estesi di mezzo non saturo a concentrazioni prossime ai livelli di concentrazione residua.

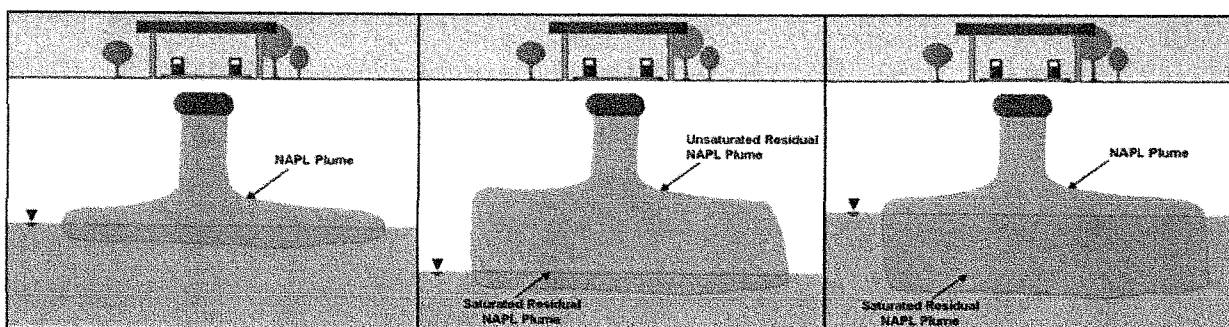


Fig. Effetti delle fluttuazioni della superficie piezometrica della circolazione idrica
(fonte American Petroleum Institute Interactive LNAPL Guide)

Le possibilità di recupero del prodotto in fase libera tramite sistemi di drenaggio sarebbero poco praticabili e il trasporto in falda di costituenti in fase disciolta, dovuto all'infiltrazione delle acque meteoriche e per oscillazione della frangia capillare sarebbe preponderante.

In fase di investigazione dovranno essere definite, tramite un adeguato numero di perforazioni a carotaggio continuo e campionamenti, le caratteristiche fisiche di riconoscimento e le conducibilità idrauliche dei terreni immediatamente sovrastanti il primo orizzonte acquifero e dei terreni di riporto.

La definizione di possibili eterogeneità laterali con passaggi a materiali più grossolani è di fondamentale importanza per la scelta delle tecniche di bonifica da adottare in un sito complesso come quello delle Raffinerie di Roma S.p.A.. Il passaggio in alcune zone a condizioni di circolazione freatiche può comportare la possibilità di recupero di parte del prodotto tramite sistemi di drenaggio che utilizzino i gradienti naturali della superficie della circolazione freatica o sistemi di pompaggio che siano in grado di crearne di artificiali.

Campioni di terreno da sottoporre ad analisi di tipo chimico dovranno essere prelevati a varie altezze nel mezzo non saturo. La maglia di campionamento all'interno della frangia capillare dovrà essere particolarmente densa. La determinazione dei valori di concentrazione del parametro TPH consentirà di stimare i volumi di prodotti idrocarburici all'interno del mezzo non saturo e di fare valutazioni sulla mobilità delle masse di prodotti

individuare sulla base delle condizioni della circolazione idrica e delle caratteristiche di conducibilità idraulica dei terreni.

Trasporto nel primo orizzonte acquifero

Il rilascio accidentale di volumi di LNAPL in superficie comporta la formazione di volumi di prodotto a concentrazioni superiori ai valori di concentrazione residua direttamente sostenuti dalla spinta di galleggiamento agente alla superficie di contatto tra i terreni in falda e i terreni del mezzo non saturo. La mobilità di tali accumuli è funzione delle conducibilità idrauliche dei terreni costituenti la fascia a cavallo di tale superficie di contatto, dei valori di concentrazione raggiunti, e delle caratteristiche chimico fisiche del prodotto costituente l'accumulo in fase mobile. Il movimento di tali accumuli avviene nella direzione dei gradienti della superficie potenziometrica della circolazione idrica freatica. Le caratteristiche di conducibilità idraulica dei terreni costituenti la fascia di passaggio tra corpo acquifero e mezzo non saturo influenzano in maniera determinante la possibilità di recupero di tali volumi di prodotti mobili in galleggiamento.

Si riportano in Fig., Fig., Fig. e Fig. i grafici relativi alle risultanze di modellazioni numeriche tese a valutare la possibilità di recupero di differenti tipi di prodotti idrocarburici in vari tipi di terreni. Le variabili considerate nell'analisi sono: la conducibilità idraulica del materiale acquifero, il tipo di prodotto, e il volume di LNAPL iniziale definito come spessore di prodotto in galleggiamento in un pozzo di osservazione. Le simulazioni sono state condotte considerando spessori di prodotto in galleggiamento pari a circa 15 cm, 30 cm, 75 cm, 1.5 metri. Lo spessore di prodotto in galleggiamento viene considerato uniforme, così come le caratteristiche di conducibilità idraulica dell'acquifero e la superficie potenziometrica della circolazione idrica viene considerata orizzontale. La modellazione prevede un unico pozzo di recupero attrezzato al centro del dominio del modello che emunge a portata costante con la pompa posizionata circa un metro sotto la superficie di falda iniziale. L'obiettivo dell'analisi è quello di fornire uno strumento di valutazione veloce e conservativo per differenziare condizioni in cui "il prodotto idrocarburico può non essere recuperabile" da condizioni in cui "il prodotto idrocarburico può essere recuperabile". La possibilità di recupero di prodotto idrocarburico viene definita come percentuale di volume di prodotto recuperato del volume di prodotto inizialmente presente. Conservativamente si definiscono le condizioni di non recuperabilità del prodotto quando meno del 10% di prodotto inizialmente presente viene recuperato.

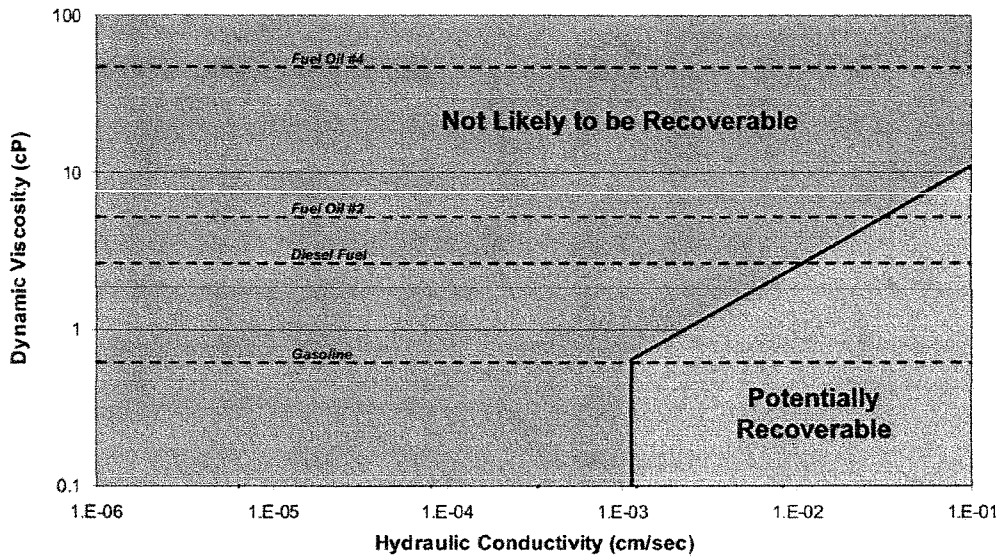


Fig.. Possibilità di recupero di LNAPL (spessore di prodotto in galleggiamento pari a circa 15cm)
 (fonte American Petroleum Institute Interactive LNAPL Guide)

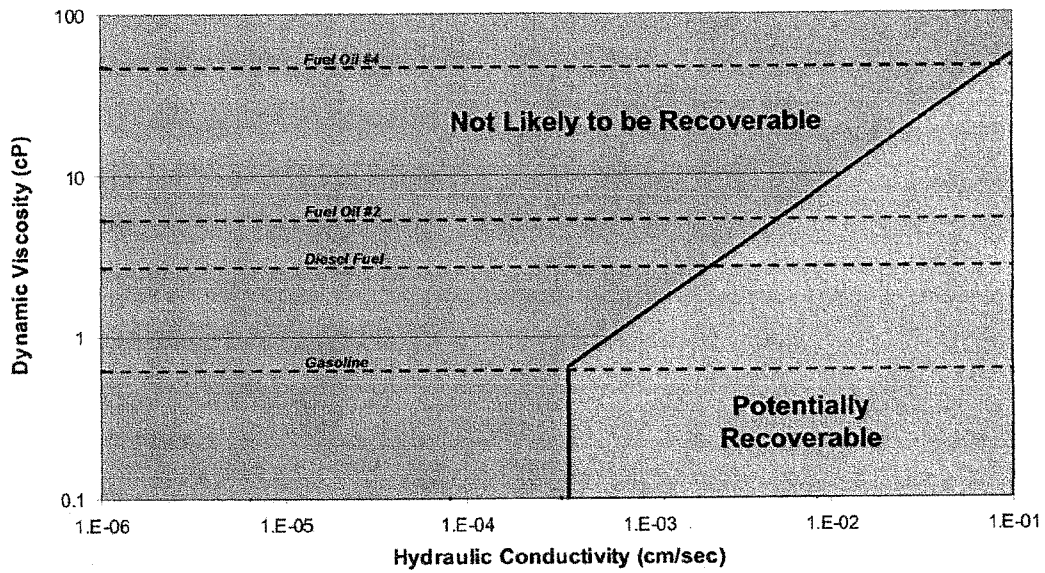


Fig.. Possibilità di recupero di LNAPL (spessore di prodotto in galleggiamento pari a circa 30cm)
 (fonte American Petroleum Institute Interactive LNAPL Guide)

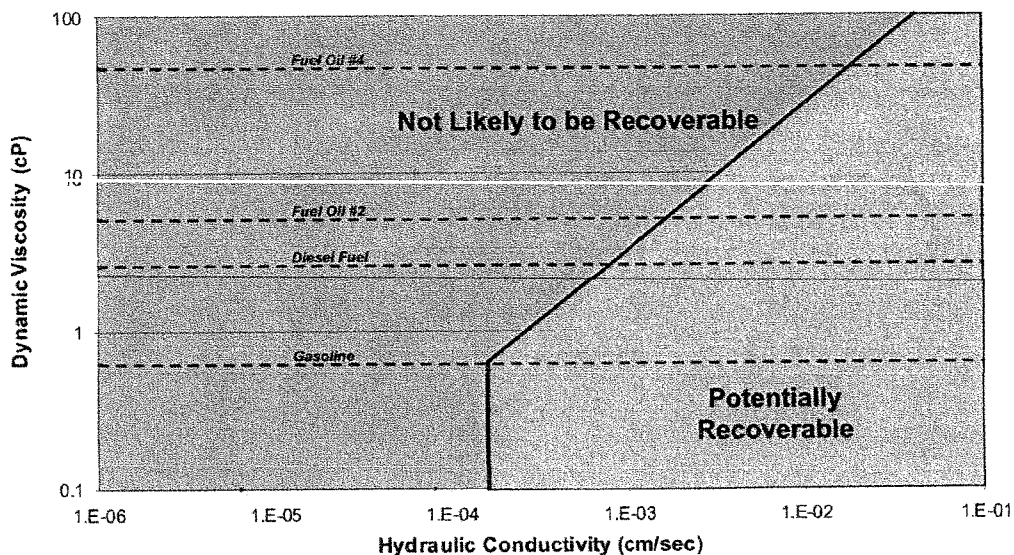


Fig.. Possibilità di recupero di LNAPL (spessore di prodotto in galleggiamento pari a circa 75 cm)
(fonte American Petroleum Institute Interactive LNAPL Guide)

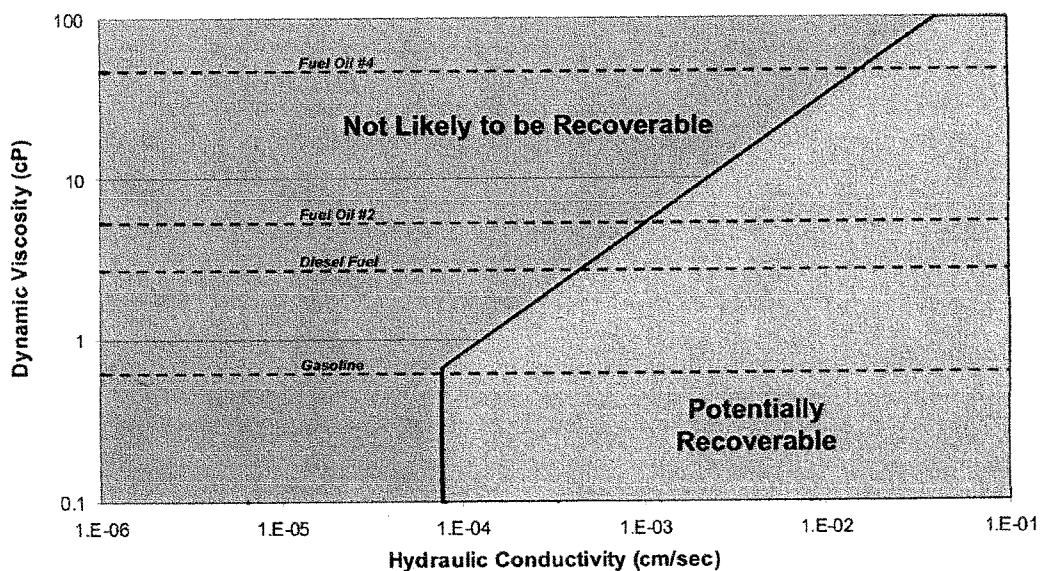


Fig.. Possibilità di recupero di LNAPL (spessore di prodotto in galleggiamento pari a circa 1.5 m)
(fonte American Petroleum Institute Interactive LNAPL Guide)

I risultati delle analisi indicano che la possibilità di recupero di prodotto viene limitata dalla viscosità del liquido dallo spessore di prodotto in galleggiamento e dalla conducibilità idraulica dell'acquifero.

Le condizioni litostratigrafiche del sito di produzione di Raffinerie di Roma S.p.A risulta caratterizzato da terreni eterogenei con passaggi laterali anche bruschi da terreni sabbioso ghiaiosi a terreni limo argillosi. Le differenze di conducibilità idrauliche che ci si

possono aspettare nella zona satura e nella zona non satura sono in grado di influenzare significativamente la distribuzione di LNAPL sia in fase mobile che disciolta. Le differenti proprietà dei terreni sono in grado di produrre flussi in direzioni preferenziali. La definizione specifica delle condizioni dei terreni e dei prodotti presenti nel sito in esame vanno definite accuratamente ai fini degli obiettivi della bonifica e delle tecniche di bonifica.

Il piano di investigazione dovrà prevedere un sufficiente numero di indagini da effettuare per la definizione delle condizioni dell'assetto geometrico e delle caratteristiche del primo orizzonte acquifero.

Perforazioni a carotaggio continuo in numero sufficiente saranno ubicate per la definizione di possibili passaggi laterali tra terreni a conducibilità idrauliche differenti e per verificare la continuità e l'assetto geometrico del corpo litologico costituente il primo orizzonte acquifero in settori dove è stato possibile solo fare supposizioni basate su un numero di punti di controllo limitato.

La rete di monitoraggio piezometrico esistente andrà integrata con un numero sufficiente di attrezzature piezometriche che consentano la definizione dell'andamento della superficie potenziometrica della circolazione idrica contenuta all'interno del primo orizzonte acquifero, per ora basata su un numero limitato di punti di osservazione. Questo punto riveste fondamentale importanza nella definizione di vie preferenziali di flusso della circolazione idrica nel primo orizzonte acquifero. Infatti, qualora fosse possibile individuare inasprimenti o rilassamenti dei gradienti idraulici, imputabili a settori caratterizzati da differenti conducibilità idrauliche, questi potrebbero essere direttamente relazionabili ad assetti geolitologici derivabili dall'analisi e dalle interpretazioni delle correlazioni dei passaggi individuati nelle stratigrafie di sondaggio.

Un adeguato numero di determinazioni della conducibilità idraulica dei terreni immediatamente soprafalda e sottofalda dovranno essere condotti durante le operazioni di perforazione al fine di determinare dei parametri medi da poter utilizzare nella modellizzazione del trasporto di contaminanti in fase disciolta e in fase mobile.

Prove di pompaggio di lunga durata dovranno essere condotte in pozzi di osservazione dotati di piezometri di controllo al fine di definire le trasmissività e i coefficienti di immagazzinamento in settori dove le caratteristiche della circolazione idrica nel primo orizzonte acquifero non possano essere indubbiamente definite come freatiche o in pressione sulla base delle osservazioni delle stratigrafie di sondaggio e delle misure dei livelli piezometrici.

Dovrà essere condotta una adeguata campagna di monitoraggio dello spessore di prodotto surnatante, rilevabile nella rete di attrezzature piezometriche, a mezzo di sonda da interfaccia acqua-olio, al fine di definire le zone di accumulo di prodotto in fase mobile. Dovrà essere predisposta un'adeguata campagna di prelievi e analisi chimiche su acque di falda da pozzetti di monitoraggio opportunamente predisposti. L'interpolazione dei dati di concentrazione per costituenti indice selezionati è in grado di definire l'estensione e la natura del plume di contaminazione dei costituenti in fase disciolta. L'osservazione della distribuzione planimetrica di curve di iso-concentrazione per costituenti indice selezionati consente di definire le possibili aree sorgente e i percorsi preferenziali di trasporto dei costituenti in fase disciolta.