# Comune di Sant'Arcangelo Trimonte

Provincia di Benevento



## PROGETTO ESECUTIVO

***"Interventi di Messa in Sicurezza Operativa della discarica di località Nocecchia, Comune di S. Arcangelo Trimonte (BN), ai sensi dell'art. 240, comma 1, lettera n) del D.lgs. 152/2006 e s.m.i."***

**Committente :**

REGIONE CAMPANIA

**Il Responsabile Unico del Procedimento:**

ing. Gianluigi Della Ragione

**Studio di progettazione :**


IMPERIA SOCIETÀ DI INGEGNERIA

IMPERIA S.R.L.
84128 SALERNO
Via Antonio Iannuzzi, 35
tel. 348 549 4302

e-mail: info@imperiaingegneria.com
www.imperiaingegneria.com
Imperia Ingegneria
imperia_ingegneria


TÜV SÜD ISO 9001
ISO 9001:2015
Nr. 50 100 16636


ing. Egidio Grillo
(Direttore tecnico)


IMPERIA S.r.l.
Il Direttore Tecnico
Ingegnere Egidio Grillo

ELABORATO

## Relazione specialistica interventi di bonifica della falda

CODIFICA

| prog. | categoria | sottocatgoria | progress. | revisione | data | scala | plot |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PE | AMB | RS | 001 | D | 09/2026 | ---- | A4 |

| rev | data | descrizione | redatto | approvato |
|---|---|---|---|---|
| a | 04/2026 | EMISSIONE | EG | EG |
| b | 06/2026 | INTEGRAZIONE VERBALE VERIFICA | EG | EG |
| c | 07/2026 | INTEGRAZIONE VERBALE VERIFICA | EG | EG |
| d | 09/2026 | INTEGRAZIONE VERBALE VERIFICA | EG | EG |
| e | | | | |


Il presente documento non potrà essere riprodotto, copiato o altrimenti pubblicato senza il consenso scritto da parte di Imperia srl. Ogni utilizzo non autorizzato sarà perseguitato a norma di legge.

**SOMMARIO**

1 PREMESSA ..... 3

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO ..... 4

3 CRONISTORIA DEL SITO ..... 6

3.1 Contaminazione accertata ..... 7

3.2 Indagini eseguite – febbraio 2026 ..... 10

4 QUADRO DELLA CONTAMINAZIONE DELLA MATRICE FALDA ..... 14

5 SOLUZIONE PROGETTUALE ADOTTATA ..... 15

5.1 Scelta tecnologica dell'impianto di trattamento delle acque emunte e motivazioni della modifica rispetto al Progetto Operativo ..... 18

6 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI BONIFICA DELLA FALDA ..... 21

6.1 Realizzazione della barriera idraulica ..... 21

6.1.1 Analisi del regime di flusso ..... 22

6.2 Installazione impianto di trattamento delle acque emunte ..... 24

7 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL SISTEMA DI BONIFICA DELLA FALDA ..... 27

7.1 Dimensionamento della barriera idraulica ..... 27

7.1.1 Pozzi di emungimento ..... 29

7.1.2 Elettropompe sommerse ..... 30

7.1.3 Collettore pozzi ..... 33

7.2 Dimensionamento dell'impianto di trattamento ..... 34

7.2.1 Schema funzionale e principio di funzionamento ..... 35

7.2.2 Sezione di accumulo ed equalizzazione ..... 36

7.2.3 Sezione di reazione chimico-fisica ..... 37

7.2.4 Sezione di separazione solido-liquido ..... 37

7.2.5 Sezione di filtrazione e affinamento ..... 38

7.2.6 Sezione reagenti e sistemi ausiliari ..... 39

7.2.7 Sistema di automazione e controllo ..... 39

7.3 Verifica del dimensionamento dell'impianto in relazione al carico inquinante in ingresso e ai limiti allo scarico 39

8 GESTIONE OPERATIVA DELL'IMPIANTO TAF E TELECONTROLLO INTEGRATO ..... 42

8.1 Criterio di funzionamento del sistema ..... 42

8.2 Parametri significativi e prestazioni del trattamento ..... 42

8.3 Reagenti, fanghi e costi di gestione ..... 43

8.4 Sistema integrato di automazione e telecontrollo ..... 44

9 MONITORAGGIO E GESTIONE DEL SISTEMA DI EMUNGIMENTO ..... 45

10 CONCLUSIONI ..... 47

# 1 PREMESSA

La presente relazione specialistica riguarda gli interventi di bonifica operativa della matrice acque sotterranee previsti nell'ambito del progetto esecutivo relativo alla messa in sicurezza operativa della discarica sita in località Nocecchia, nel Comune di Sant'Arcangelo Trimonte (BN), ai sensi dell'art. 240, comma 1, lettera n), del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i.

L'elaborato è redatto in continuità con il Progetto Operativo già predisposto per il sito, del quale riprende l'impostazione tecnico-conoscitiva generale, sviluppandone tuttavia in forma più approfondita e specialistica gli aspetti connessi alla contaminazione della falda, al modello idrogeologico locale e alla definizione delle opere di captazione, emungimento e trattamento delle acque sotterranee contaminate.

La necessità del presente approfondimento deriva dalla specificità del contesto ambientale e geologico in cui ricade il sito, caratterizzato da una circolazione idrica sotterranea non riconducibile a un acquifero continuo di base, bensì a una falda superficiale discontinua, localmente sostenuta da livelli a bassa permeabilità e fortemente influenzata sia dagli apporti meteorici diretti sia dall'eterogeneità litostratigrafica dei terreni affioranti e di sottosuolo.

Sotto il profilo procedimentale, il progetto si colloca nell'ambito delle determinazioni già assunte in sede di caratterizzazione, validazione dei dati ambientali e approvazione del modello concettuale del sito, sviluppando in forma esecutiva gli interventi strettamente connessi alla messa in sicurezza operativa della falda. In tale ambito, gli interventi prioritari risultano essere quelli relativi al **ripristino del sistema di regimazione delle acque** funzionale al controllo idraulico del sito, alla **realizzazione dei nuovi piezometri**, alla **rete di emungimento della falda** e alla fornitura e posa in opera **dell'impianto di trattamento delle acque emunte**, comprensivo del sistema di telecontrollo.

Le elaborazioni contenute nella presente relazione tengono conto, oltre che degli esiti delle pregresse attività di caratterizzazione e delle risultanze del Progetto Operativo, anche delle più recenti indagini geognostiche e idrogeologiche eseguite nell'area, con particolare riferimento ai nuovi sondaggi a carotaggio continuo, al condizionamento dei fori a piezometro, alle prove di permeabilità Lefranc, agli slug test e alle prove di laboratorio geotecnico sui campioni prelevati, che consentono di affinare il modello fisico del sottosuolo e di orientare con maggiore attendibilità le scelte progettuali relative agli interventi sulla matrice falda .

Obiettivo della relazione è pertanto quello di definire, su basi tecnico-scientifiche e progettuali aggiornate, il quadro degli interventi necessari al contenimento idraulico e alla gestione controllata della contaminazione delle acque sotterranee, individuando la soluzione più coerente con le condizioni sito-specifiche, con il quadro normativo vigente e con le effettive esigenze di messa in sicurezza operativa del sito.

## 2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Il sito in oggetto è sede di attività tuttora in fase di completamento, pertanto, gli interventi che si propongono vengono inquadrati come messa in sicurezza operativa per garantire, quindi, come specificato nell'allegato 3 alla parte V del citato Dlgs per i siti in esercizio, la continuità e compatibilità con le lavorazioni svolte.

Infatti, gli interventi di messa in sicurezza operativa costituiscono l'insieme di azioni effettuate su siti contaminati con attività in esercizio con l'obiettivo di minimizzare o ridurre il rischio per la salute umana o ambientale attraverso:

- il contenimento dei contaminanti all'interno dei confini del sito;
- la protezione delle matrici ambientali;
- la graduale eliminazione delle sorgenti inquinanti secondarie medianti tecniche che siano compatibili con il proseguimento delle attività svolte nel sito.

In riferimento alla normativa ambientale in particolare la "Parte Quarta - Norme in materia di gestione dei rifiuti e di bonifica dei siti inquinati, Titolo V - Bonifica di siti contaminati", si riportano i principali riferimenti considerati per predisporre le misure di messa in sicurezza operativa.

L'art. 240 comma 1 lettera n) del d.lgs n. 152/06 e s.m.i. definisce la messa in sicurezza operativa come l'insieme degli interventi eseguiti in un sito con attività in esercizio atti a garantire un adeguato livello di sicurezza per le persone e per l'ambiente, in attesa di ulteriori interventi di messa in sicurezza permanente o bonifica da realizzarsi alla cessazione dell'attività. Essi comprendono altresì gli interventi di contenimento della contaminazione da mettere in atto in via transitoria fino all'esecuzione della bonifica o della messa in sicurezza permanente, al fine di evitare la diffusione della contaminazione all'interno della stessa matrice o tra matrici differenti. In tali casi devono essere predisposti idonei piani di monitoraggio e controllo che consentano di verificare l'efficacia delle soluzioni adottate.

Nell'Allegato 3 al Titolo V della Parte Quarta del Decreto citato "sono presentate, quindi, le diverse opzioni da prendere in considerazione sia per pervenire ad un'effettiva eliminazione/riduzione della contaminazione, sia per conseguire un'efficace azione di protezione delle matrici ambientali influenzate dagli effetti del sito, mediante la messa in sicurezza dello stesso, qualora le tecniche di bonifica dovessero risultare meno efficaci, ovvero non sostenibili economicamente ovvero non compatibili con la prosecuzione delle attività produttive".

Inoltre il citato decreto indica "*Per i siti 'in esercizio', infatti, laddove un intervento di bonifica intensivo comporterebbe delle limitazioni se non l'interruzione delle attività di produzione, il soggetto responsabile dell'inquinamento o il proprietario del sito può ricorrere, in alternativa, ad interventi altrettanto efficaci di messa in sicurezza dell'intero sito, finalizzati alla protezione delle matrici ambientali sensibili mediante il contenimento degli inquinanti all'interno dello stesso, e provvedere*

*gradualmente all'eliminazione delle sorgenti inquinanti secondarie in step successivi programmati, rimandando la bonifica alla dismissione delle attività.*"

# 3 CRONISTORIA DEL SITO

Si riportano di seguito le tappe principali che hanno portato all'elaborazione del progetto operativo di bonifica.

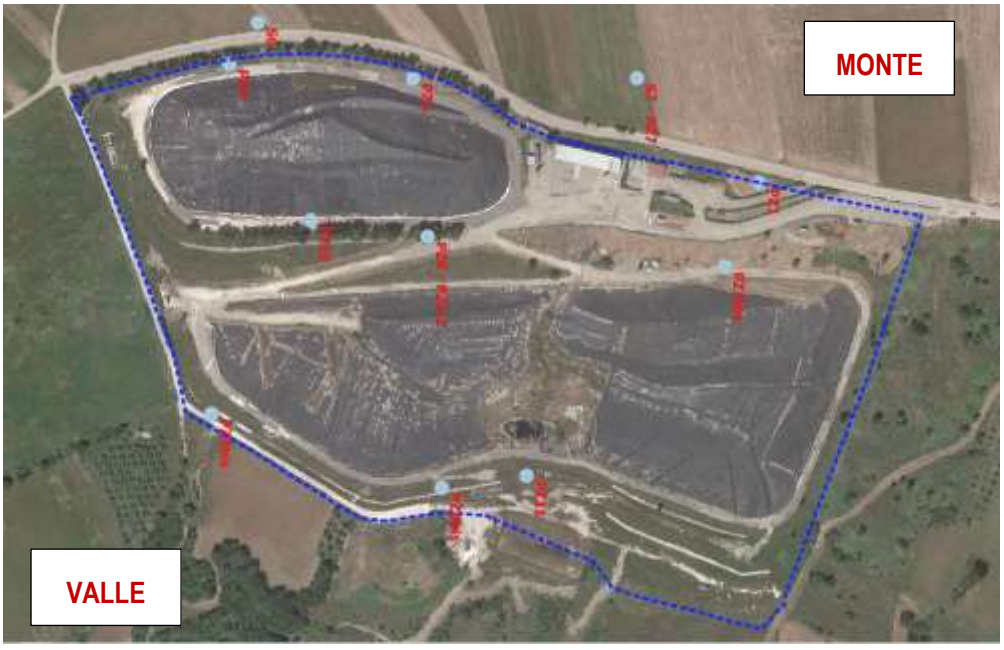
- con Decreto Dirigenziale n. 151 del 19/12/2018 è stato approvato il piano di caratterizzazione della discarica;
- la SAMTE con nota prot. n. 4030 del 08/10/2019 ha trasmesso le risultanze del piano di caratterizzazione e il modello concettuale di analisi di rischio sito specifico, di cui all'art. 242 del D.lgs n. 152/06 e s.m.i.;
- l'ARPAC con nota prot. n. 0062629 del 24/10/2019 ha trasmesso la relazione del documento di validazione dei risultati per la caratterizzazione e nello stesso documento ha richiesto di revisionare degli esami sulle acque sotterranee in contraddittorio con ARPAC;
- in data 31/12/2019 si è tenuta la seconda conferenza dei servizi con l'aggiornamento alla data del 21/11/2019;
- l'ARPAC con nota prot. n. 0066548 del 12/11/2019 ha trasmesso la relazione integrativa al documento di validazione;
- in data 21/11/2019 si è tenuta la conferenza di servizi decisoria che ha approvato le risultanze del piano di caratterizzazione e il modello concettuale di analisi di rischio sito specifico, di cui all'art. 242 del D.lgs n. 152/06 e s.m.i.;
- con Decreto Dirigenziale n. 231 del 05/12/2019 sono state approvate le risultanze del piano di caratterizzazione e del modello concettuale di Analisi di rischio della discarica regionale sita in località Nocecchia nel Comune di Sant'Arcangelo Trimonte;
- con prot. 1185 del 2.8.2021 la SAMTE S.r.l. consegnava alla Regione Campania - UOD 501706 Autorizzazioni Ambientali e Rifiuti di Benevento una proposta di Progetto Operativo di Messa in Sicurezza Operativa per la discarica di RSU sita alla località "Le Nocecchie" CSPC2078C002 come previsto da Decreto Dirigenziale n. 231 del 05/12/2019 della Regione Campania - UOD 501706;
- Tale proposta di progetto operativo conteneva, come concordato tra Provincia e SAMTE srl, un addensamento delle indagini di monitoraggio ma era privo della documentazione riguardante gli interventi richiesti dall'art.240 c.1 lett n) del D.Lgs. 152/06, per assicurare un adeguato livello di sicurezza delle matrici ambientali sottese;
- in data 05/07/2023 presso il Settore Gestione del territorio risorse idriche e ambiente della Provincia di Benevento, si è tenuto un tavolo tecnico finalizzato a valutare le integrazioni da presentare alla Regione per la riapertura della C.d.S.;
- con determinazione n. 74 del 26/03/2024 la SAMTE ha affidato alla scrivente società di ingegneria la redazione del progetto operativo degli interventi di bonifica di cui all'art. 240 comma 1 lettera n) del d.lgs. n. 152/06 e s.m.i.

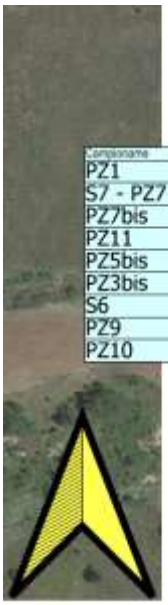
## *3.1 Contaminazione accertata*

Il sito in esame è censito nel Piano Regionale delle Bonifiche (PRB) con codice 2078C002 denominata "Discarica Regionale di Sant'Arcangelo Trimonte" sita in località Pianella Nocecchia nel territorio comunale di sant'Arcangelo Trimonte. Il sito risulta essere contaminato per la matrice falda da seguenti inquinanti. **Metalli e Metalloidi, Composti inorganici.** Si riporta di seguito stralcio tabella 3 del PRB contenente l'elenco recante il Censimento dei Siti potenzialmente (CSPC locali):

| Codice | Denominazione | Indirizzo | Comune | Prov. | Proprietà | Tipologia sito | Contaminanti: Suolo | Contaminanti: Acque sotterranee | Contaminanti: Acque Superficiali / Sedimenti | Iter Procedurale | Superficie (m²) | coord_X | coord_Y |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2078C002 | Discarica Regionale di Sant'Arcangelo Trimonte | Loc. Pianella Nocecchia | Sant'Arcangelo Trimonte | BN | Pubblica | Discarica Regionale | | Metalli e Metalloidi, Composti Inorganici | | Progetto di Messa in Sicurezza Operativa Presentato | 73000 | 492717 | 4567280 |

Nel presente paragrafo si rappresentano le condizioni di contaminazione accertate nelle precedenti fasi del procedimento. I fatti esposti di seguito sono stati desunti dai documenti presenti agli atti delle conferenze dei servizi e trasmessi dal Committente. Di seguito si riporta stralcio planimetrico con indicazione dei piezometri eseguiti in fase di caratterizzazione del sito.





Perimetro della Discarica

Piezometri utilizzati per Piano di Caratterizzazione

| Campionname | Tipologia | X | Y |
|---|---|---|---|
| PZ1 | Campione Acqua Sotterranea Piezometro | 493593.725 | 4558132.71 |
| S7 - PZ7 | Campioni nel Sondaggio e Campione Acqua Piezometro | 493523.113 | 4558050.202 |
| PZ7bis | Campione Acqua Sotterranea Piezometro | 493650.029 | 4558109.215 |
| PZ11 | Campione Acqua Sotterranea Piezometro | 493790.999 | 4557975.822 |
| PZ5bis | Campione Acqua Sotterranea Piezometro | 493799.254 | 4557918.672 |
| PZ3bis | Campione Acqua Sotterranea Piezometro | 493749.152 | 4557763.647 |
| S6 | Campioni nel Sondaggio | 493485.61 | 4557794.724 |
| PZ9 | Campione Acqua Sotterranea Piezometro | 493513.635 | 4557775.462 |
| PZ10 | Campione Acqua Sotterranea Piezometro | 493618.791 | 4557830.454 |

Sistema di coordinate: WGS84 33N
Coordinate in metri

I punti individuati rappresentano i Punti di Conformità del Progetto Operativo

In fase di redazione del presente progetto operativo di bonifica la Committenza ha trasmesso la documentazione inerente le precedenti fasi di bonifica. Nella relazione *"integrazione richiesta della conferenza di servizi dal 21/11/2019 con validazione finale dei dati e analisi di rischio sito-specifica*" protocollo Samte s.r.l. n. 0000826 del 25/02/2020 si evince quanto di seguito riportato.

*In relazione alle nuove CSC adottate dal nuovo Regolamento relativo agli interventi di bonifica, ripristino ambientale e messa in sicurezza (d'emergenza, operativa e permanente) delle aree destinate alla produzione agricola e all'allevamento, ai sensi dell'articolo 241 del decreto legislativo 152/2006., D.M. 1° marzo 2019 n. 46, si prende atto della esclusione definitiva dell'analita Boro nei suoli superficiali e profondi in quanto il nuovo limite, pari a 7 mg/kg, supera ampiamente il valore più alto misurato nell'ambito del piano di caratterizzazione, pari a 3.10 mg/Kg nel suolo superficiale e 2.50 mg/Kg nel suolo profondo.*

*Relativamente all'analita Stagno non si effettua la valutazione in quanto tale parametro non è più normato.*

*Invece per le acque sotterranee, l'analita Nichel risulta essere presente solo all'esterno del perimetro della discarica e sarà oggetto di specifico provvedimento di monitoraggio e valutazione che si rendesse opportuno dagli Enti competenti.*

*Per quanto riguarda i fluoruri, tutte le analisi effettuate a fine ottobre 2019 sui campioni di acqua prelevati nei piezometri di controllo, sia da parte di SAMTE, che dall'ARPAC, non hanno mostrato superamenti della soglia di contaminazione.*

*Di conseguenza, è stato modificato il modello concettuale definitivo da adottare che, ricordiamo, risulta essere relativo alle sole acque sotterranee.*

*Il modello concettuale del sito è stato aggiornato per l'attuale valutazione (di cui il presente documento ne costituisce la sintesi) sulla base di quanto emerso nell'ambito della CdS del 21/11/2019 con le formali richieste di adeguamento ed integrazione dell'ARPAC a seguito di validazione delle concentrazioni soglia di contaminazione ai fini dell'Analisi di Rischio della discarica.*

*Qui di seguito si riporta la tabella Riepilogativa dei valori di concentrazione relativi a tutti i risultati della campagna di caratterizzazione comprese le concentrazioni validate da ARPAC nei singoli piezometri, che sono state utilizzate per le verifiche:*

**TABELLLA RIEPILOGATIVA DEI VALORI DI MASSIMA CONCENTRAZIONE RILEVATI E VALIDATI NEI SINGOLI PIEZOMETRI**

| Punto di Camp.nto | Arsenico | Boro | Fluoruri | Solfati | Manganese | Nichel |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | (VF = 10 µg/l) | (VF = 1000 µg/l) | (VF = 7376 µg/l) | (VF = 500 µg/l) | (VF = 108 µg/l) | (VF = 37 µg/l) |
| PZ3bis | - | 1506 | - | 3094,1 | - | - |
| PZ4 | - | - | - | 2240,0 | 115 | - |
| PZ5bis | 12.6 | 3681 | 9118 | 3200,0 | 125 | - |
| PZ6 | - | 2420 | - | 2928,0 | - | - |
| PZ9 | 12,0 | 1485 | - | 3563,9 | 353 | - |
| PZ10 | - | 1904 | - | 5973,2 | 2357 | - |
| PZ11 | - | 1982 | - | 3615,0 | - | - |
| S6* | - | - | - | 1337,6 | 127 | 89 |
| S7* | - | - | - | 668,8 | 114 | 96 |
| Rilevato da | ARPAC | SAMTE | | | | |
| * Sondaggio esterno alla discarica | | | | | | |
| In grassetto i valori massimi registrati | | | | | | |

*L'Analisi del Rischio ha consentito di valutare se il corpo rifiuti costituisce una fonte di pericolo per la matrice ambientale acqua sotterranea, nella quale sono stati rilevati i dati relativi allo stato di contaminazione mediante il Piano delle Indagini di caratterizzazione.*

*Tale analisi è stata effettuata considerando le evoluzioni delle migrazioni chimiche degli analiti a partire dal perimetro esterno della discarica e, quindi, i punti di conformità sono stati posti in corrispondenza dei piezometri PZ3bis, PZ5bis, PZ11 e PZ8 a valle della discarica, mentre a monte sono stati individuati PZ4 e PZ9.*

*In particolare, il piezometro PZ8 è oggetto di una forte variazione di presenza di falda, tanto da risultare secco nella attuale fase del Piano di Caratterizzazione; pertanto, non vi sono analisi di campioni di acqua. Tuttavia, in passato, nelle campagne di monitoraggio, si è avuta presenza di acqua con possibilità di campionamenti ed analisi che hanno dimostrato*

*alcuni superamenti di CSC. Per tali ragioni il piezometro PZ8 rimane nel programma di monitoraggio e verrà puntualmente campionato ed analizzato in caso di presenza idrica, oltre a rappresentare un punto di conformità.*

*Infine, sono state riviste e adeguate le tavole di rappresentazione dello stato di contaminazione sulla scorta della comparazione e validazione dei dati da parte di ARPAC, su cui sono state evidenziate i livelli di contaminazione attuali e le prevalenti direzioni di flusso della circolazione idrica sotterranea, che hanno consentito di rappresentare gli areali di presenza con una proiezione temporale a 10 anni a partire dallo stato attuale.*

## *3.2 Indagini eseguite – febbraio 2026*

La Geoprove Srl di Ruffano, su incarico della IMPERIA Srl, ha eseguito delle indagini geognostiche e di caratterizzazione ambientale presso la Discarica di Sant'Arcangelo Trimonte (BN).

Le attività di caratterizzazione ambientale eseguite sul sito della discarica di località Nocecchia hanno consentito di definire un quadro conoscitivo articolato della matrice acque sotterranee, evidenziando condizioni di contaminazione localizzate e strettamente correlate alle peculiarità idrogeologiche del sito.

Sono stati pertanto eseguiti:

- n. 2 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, di profondità pari a 15 m;
- Condizionamento dei 2 fori eseguiti a piezometro a tubo aperto e denominati PZ1N e PZ2N;
- Esecuzione di n.4 prove di permeabilità Lefranc nei fori di sondaggio eseguiti
- Esecuzione di 1 prova di risalita in un piezometro esistente sull'area;
- Esecuzione di n.2 slug test (una in ciascun piezometro eseguito);
- Prelievo ed analisi di laboratorio eseguite su n.1 campione;
- Misura del livello di falda nei due piezometri eseguiti ed in tre piezometri esistenti sul sito.




*Figura 1 Sondaggi geognostici e piezometri*

Su alcuni piezometri presenti nell'area indagata è stata eseguita la misura della falda ed in uno di questi eseguita una prova di risalita (riportata nella sezione delle prove idrauliche).

In particolare nei piezometri P5, P6 e PZ5bis è stato misurato il livello della falda e, successivamente, nel P5 eseguita una prova di risalita.

Si fa riferimento alle seguenti planimetrie:




*Figura 2 Piezometri*

| ID | Livello falda (m dal boccapozzo) | Profondità piezometro |
|---|---|---|
| P5 | 2.2 | 6 m |
| P6 | 2.26 | 6 m |
| PZ5BIS | 2.10 | n.d. |

*Tabella 1 Misura livello falda nei piezometri esistenti*

Dal punto di vista idrogeologico, le nuove indagini eseguite nel 2026 hanno fornito elementi fondamentali per una lettura più accurata della dinamica della contaminazione.

I sondaggi geognostici a carotaggio continuo, spinti fino a profondità di circa 15 m e successivamente attrezzati a piezometri (PZ1N e PZ2N), hanno confermato una stratigrafia dominata da terreni a matrice fine, costituiti da **argille con componente sabbiosa, limosa e ghiaiosa**, con struttura generalmente compatta e a bassa permeabilità.

Le analisi granulometriche e geotecniche di laboratorio evidenziano una significativa presenza della frazione argillosa (fino al 44%) associata a frazioni sabbiose e limose, con valori di porosità intorno al 45% e grado di saturazione variabile. I coefficienti di permeabilità determinati in laboratorio risultano dell'ordine di $10^{-6}$ cm/s, coerenti con terreni a conducibilità idraulica medio-bassa.

Le prove idrauliche in situ (Lefranc e slug test) hanno confermato tali valori, evidenziando una trasmissività limitata e una risposta lenta del sistema agli stimoli idraulici, con tempi di riequilibrio compatibili con una circolazione idrica fortemente frenata dalla matrice fine del terreno.

In tale contesto, la falda non si configura come un acquifero continuo e ben definito, bensì come un sistema di **livelli idrici sospesi e discontinui**, impostati all'interno della coltre superficiale e fortemente influenzati:

- dagli apporti meteorici;
- dalla morfologia del sito;
- dalla presenza di discontinuità litologiche locali.

Le misure piezometriche effettuate evidenziano livelli idrici relativamente superficiali, con valori intorno ai **2,0–2,3** m dal piano campagna nei piezometri esistenti, soggetti a variazioni stagionali e agli eventi di precipitazione.

# 4 QUADRO DELLA CONTAMINAZIONE DELLA MATRICE FALDA

Le evidenze analitiche, validate nell'ambito del procedimento amministrativo e richiamate nel Progetto Operativo, hanno mostrato il superamento delle concentrazioni soglia di contaminazione in alcuni piezometri ubicati a valle idrogeologica del corpo discarica, assunti quali punti di conformità. Tali superamenti risultano riferibili prevalentemente a parametri di natura inorganica, con un comportamento spaziale non uniforme e privo di una distribuzione assimilabile a un plume continuo.

Un elemento rilevante emerso già in fase di caratterizzazione riguarda la presenza di valori di fondo naturale per alcuni parametri, riconducibili alle caratteristiche geochimiche dei terreni locali. Tale circostanza è stata oggetto di specifiche valutazioni da parte degli enti competenti e ha contribuito a delineare un quadro nel quale la contaminazione antropica si sovrappone a condizioni ambientali di base non trascurabili.

L'interpretazione dei dati di monitoraggio deve pertanto essere condotta tenendo conto della duplice componente:

- naturale, legata alla matrice geologica;
- antropica, connessa alla presenza della discarica e ai fenomeni di lisciviazione.

Alla luce delle indagini eseguite, il modello di contaminazione della falda si discosta significativamente dai casi tipici caratterizzati da acquiferi granulari continui.

Nel caso in esame:

- non si osserva un plume continuo e stabile;
- la migrazione degli inquinanti avviene in modo localizzato e intermittente;
- i percorsi preferenziali sono legati a eterogeneità stratigrafiche e micro-discontinuità.

La contaminazione risulta pertanto confinata in volumi limitati e strettamente correlata alla dinamica di infiltrazione e percolazione delle acque meteoriche attraverso il corpo discarica e i terreni di copertura.

Il ruolo delle infiltrazioni risulta determinante: le criticità del sistema di copertura e della rete di regimazione delle acque superficiali favoriscono l'ingresso di acqua nel sottosuolo, con conseguente attivazione di circuiti di circolazione locale e mobilizzazione dei contaminanti.

In termini di rischio ambientale, tale configurazione comporta due implicazioni principali.

Da un lato, la bassa permeabilità del mezzo e la discontinuità della falda limitano la propagazione su larga scala della contaminazione, riducendo la probabilità di formazione di un plume esteso.

Dall'altro lato, la presenza di circuiti idrici locali attivi rende possibile la migrazione puntuale degli inquinanti verso le aree di valle, soprattutto in corrispondenza di eventi meteorici intensi o di condizioni di saturazione del terreno.

Ne deriva un quadro in cui la criticità non è rappresentata dalla diffusione massiva della contaminazione, bensì dalla sua persistenza e mobilità localizzata, che richiede un approccio di controllo idraulico attivo piuttosto che interventi di bonifica diffusa.

Alla luce delle evidenze disponibili, il quadro della contaminazione della matrice falda può essere sintetizzato nei seguenti elementi interpretativi:

- la contaminazione è presente ma spazialmente discontinua e non assimilabile a un plume classico;
- il mezzo poroso è caratterizzato da bassa permeabilità e forte eterogeneità;
- la falda è superficiale, discontinua e fortemente influenzata dagli apporti meteorici;
- la migrazione degli inquinanti avviene lungo percorsi preferenziali locali;
- il rischio ambientale è legato a fenomeni di trasporto puntuale verso valle.

Tali condizioni indirizzano in maniera univoca verso l'adozione di sistemi di **contenimento idraulico e gestione attiva delle acque sotterranee**, piuttosto che tecnologie di bonifica in situ su larga scala.

# 5 SOLUZIONE PROGETTUALE ADOTTATA

Nel precedente livello progettuale è stata condotta un'analisi comparativa delle possibili tecnologie di intervento sulla matrice acque sotterranee, finalizzata all'individuazione della soluzione più idonea in relazione alle condizioni geologiche, idrogeologiche e ambientali del sito. Il metodo impiegato è stato quello dell'**analisi multicriterio** al fine di definire la soluzione tecnica (o l'insieme di soluzioni tecniche) applicabile per la messa in sicurezza/bonifica della falda dell'area di discarica.

Preme ricordare che la selezione delle alternative è stata fatta considerando che la tipologia di contaminazione della falda rilevata nelle indagini pregresse del 2013 e 2015 e nelle indagini integrative.

L'analisi multicriterio è stata sviluppata confrontando quattro possibili tecnologie di intervento sulla matrice acque sotterranee, individuate in funzione della tipologia di contaminazione, delle caratteristiche geologiche e idrogeologiche del sito e della necessità di garantire un sistema di messa in sicurezza operativa controllabile nel tempo.

Le alternative considerate sono le seguenti:

- **P&T – Pump & Treat**, consistente nell'emungimento controllato delle acque di falda, nel loro trattamento in impianto dedicato e nel successivo scarico nel rispetto dei limiti normativi applicabili;

- **ISCO – In Situ Chemical Oxidation**, consistente nell'immissione nel sottosuolo di agenti ossidanti finalizzati alla degradazione chimica dei contaminanti;
- **PRB – Permeable Reactive Barrier**, consistente nella realizzazione di una barriera permeabile reattiva lungo la direttrice di flusso della falda, finalizzata al trattamento passivo delle acque sotterranee in attraversamento;
- **Biorisanamento**, consistente nell'attivazione o potenziamento di processi biologici naturali o indotti per la degradazione dei contaminanti presenti.

La valutazione è stata condotta attribuendo a ciascuna alternativa un punteggio compreso tra 0 e 2 per ogni criterio considerato, secondo la seguente scala:

*0 = soluzione non applicabile o scarsamente compatibile con il sito;*

*1 = soluzione parzialmente applicabile o applicabile con limitazioni;*

*2 = soluzione pienamente applicabile o maggiormente idonea.*

Poiché i criteri considerati non hanno la medesima incidenza sulla scelta progettuale, a ciascun parametro è stato attribuito un peso percentuale, definito in funzione della rilevanza tecnico-ambientale del criterio rispetto agli obiettivi di messa in sicurezza operativa della falda.

| CRITERIO | MOTIVAZIONE DEL CRITERIO | PESO ATTRIBUITO |
|---|---|---|
| **Sviluppo, affidabilità, diffusione** | Valuta il grado di maturità della tecnologia, la disponibilità di esperienze applicative consolidate e l'affidabilità attesa in condizioni operative reali | **10%** |
| **Applicabilità in funzione delle caratteristiche del sottosuolo** | Valuta la compatibilità della tecnologia con il modello geologico e idrogeologico del sito, caratterizzato da terreni limo-argillosi, bassa permeabilità e falda discontinua | **15%** |
| **Applicabilità in funzione dello stato di contaminazione** | Valuta la coerenza della tecnologia rispetto alla contaminazione rilevata, prevalentemente di natura inorganica e localizzata | **15%** |
| **Compatibilità ambientale e paesaggistica** | Valuta il grado di interferenza della tecnologia con il contesto ambientale e con l'assetto morfologico-paesaggistico del sito | **10%** |
| **Posizione trattamento interno al sito** | Valuta la possibilità di gestire il trattamento all'interno dell'area di discarica, riducendo movimentazioni esterne e aumentando il controllo operativo | **10%** |
| **Compatibilità valore storico e archeologico** | Valuta la compatibilità con eventuali vincoli o sensibilità storico-archeologiche e con la limitazione delle opere invasive | **5%** |
| **Manutenzione** | Valuta la semplicità gestionale, la possibilità di controllo, manutenzione e regolazione della tecnologia nel tempo | **10%** |
| **Tempistiche** | Valuta i tempi di realizzazione, avviamento e conseguimento dell'efficacia operativa | **10%** |
| **Costi stimati** | Valuta la sostenibilità economica dell'intervento, sia in termini di realizzazione sia in termini di gestione | **10%** |
| **Compatibilità con altre tecnologie** | Valuta la possibilità di integrare la tecnologia con altri interventi previsti dal progetto, compresi monitoraggio, regimazione idraulica, trattamento e gestione adattiva | **5%** |
| **Totale** | | **100%** |

Sulla base dei criteri sopra indicati, la matrice dei punteggi è la seguente.

| | Sviluppo, affidabilità, diffusione | Applicabilità in funzione delle caratteristiche del sottosuolo | Applicabilità in funzione dello stato di contaminazione | Compatibilità ambientale e paesaggistica | Posizione trattamento interno al sito | Compatibilità valore storico e archeologico | Manutenzione | Tempistiche | Costi stimati | Compatibilità con altre tecnologie |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P&T | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| ISCO | 0 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| PRB | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Biorisanamento | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 |

Il punteggio ponderato è stato calcolato moltiplicando il punteggio attribuito a ciascun criterio per il relativo peso percentuale. Poiché il punteggio massimo attribuibile per ciascun criterio è pari a 2, il valore finale è stato normalizzato su base 100.

| Alternativa | Punteggio finale normalizzato |
|---|---|
| **P&T** | 85,0/100 |
| **ISCO** | 70,0/100 |
| **PRB** | 62,5/100 |
| **Biorisanamento** | 55,0/100 |

Dall'analisi multicriterio emerge che la soluzione P&T consegue il punteggio più elevato, pari a **85,0/100**, risultando pertanto la tecnologia complessivamente più idonea rispetto alle condizioni sito-specifiche e agli obiettivi di messa in sicurezza operativa della falda.

La scelta del P&T risulta pertanto coerente con il modello concettuale del sito, con il quadro della contaminazione accertata e con gli obiettivi di messa in sicurezza operativa di cui all'art. 240, comma 1, lettera n), del D.Lgs. 152/2006.

All'esito di tale valutazione, è stata individuata quale soluzione ottimale l'adozione di un **sistema di contenimento idraulico mediante emungimento controllato delle acque di falda (Pump & Treat), associato a un impianto di trattamento delle acque emunte.**

Nel caso specifico si è optato per la realizzazione di un sistema di pozzi drenanti collegati ad un impianto di trattamento e successivo scarico nel vallone esistente. Si riporta di seguito schema concettuale della soluzione prevista.




## *5.1 Scelta tecnologica dell'impianto di trattamento delle acque emunte e motivazioni della modifica rispetto al Progetto Operativo*

Il Progetto Operativo prevedeva, quale schema di trattamento delle acque emunte dalla barriera idraulica, una soluzione impiantistica basata su tecnologia a osmosi inversa. In sede di sviluppo del Progetto Esecutivo, tale impostazione è stata oggetto di approfondimento tecnico alla luce del quadro conoscitivo aggiornato, delle risultanze delle indagini geologiche, geognostiche e idrogeologiche eseguite nel 2026, delle caratteristiche sito-specifiche e della natura dei contaminanti effettivamente attesi nelle acque di falda da trattare.

La scelta progettuale complessiva conferma l'impostazione basata su un sistema di contenimento idraulico mediante emungimento controllato delle acque di falda, secondo lo schema Pump & Treat, associato a un impianto di trattamento delle acque emunte. Nel caso specifico si prevede la realizzazione di un sistema di pozzi drenanti collegati a un impianto di trattamento e successivo scarico nel corpo recettore superficiale, mantenendo invariato l'obiettivo generale dell'intervento, ossia il controllo della migrazione della contaminazione e la gestione controllata delle acque sotterranee intercettate.

La scelta è stata motivata sulla base delle specificità sito-specifiche, che rendono poco efficaci o non applicabili le tecnologie di bonifica in situ tradizionali. In particolare, il modello geologico e idrogeologico del sito, come già delineato nel Progetto Operativo e ulteriormente confermato dalle indagini più recenti, evidenzia la presenza di terreni a matrice prevalentemente limo-argillosa, caratterizzati da valori di permeabilità medio-bassi, dell'ordine di $10^{-6}$ cm/s, con conseguente limitata trasmissività idraulica. Tale configurazione comporta condizioni sfavorevoli all'applicazione di tecnologie in situ basate su iniezione o circolazione forzata di reagenti, in quanto la diffusione dei reagenti risulterebbe fortemente limitata, il controllo dei processi di reazione sarebbe difficilmente garantibile e l'efficacia dell'intervento risulterebbe eterogenea e non prevedibile.

Le indagini geognostiche e idrauliche eseguite nel 2026 hanno ulteriormente rafforzato tale quadro interpretativo, evidenziando una struttura del sottosuolo sostanzialmente omogenea lungo la verticale, ma con discontinuità locali che

determinano una circolazione idrica frammentata e non uniforme. Inoltre, la falda si presenta come un sistema discontinuo, privo di un acquifero continuo di base, con livelli idrici superficiali e fortemente influenzati dagli apporti meteorici. Tale condizione rende inefficace qualsiasi approccio basato su una bonifica diffusa del volume saturo, mentre risulta più appropriato un sistema di controllo localizzato dei flussi.

Alla luce di tali elementi, la soluzione basata su emungimento e trattamento consente di intercettare i flussi idrici contaminati lungo i percorsi preferenziali, controllare attivamente la migrazione degli inquinanti, modulare nel tempo l'intensità dell'intervento in funzione delle condizioni idrauliche e garantire un elevato grado di controllo e monitoraggio del processo. Le più recenti indagini geologiche e idrogeologiche hanno consentito di affinare il modello di riferimento del sito, confermando la validità della soluzione adottata e fornendo elementi utili per una più efficace configurazione delle opere, in termini di localizzazione dei pozzi, profondità di captazione e gestione delle portate.

Un ulteriore elemento a favore della soluzione adottata è rappresentato dalla natura della contaminazione, prevalentemente di tipo inorganico. In tale contesto, le tecnologie di trattamento ex situ risultano generalmente più affidabili e controllabili rispetto ai processi in situ, poiché consentono di trattare le acque effettivamente captate, verificare analiticamente la qualità in ingresso e in uscita, regolare i parametri di processo e intervenire sui dosaggi e sulle sezioni di trattamento in funzione delle concentrazioni rilevate.

Nell'ambito della configurazione ex situ del sistema, la tecnologia a osmosi inversa prevista nel Progetto Operativo è stata sostituita, nel Progetto Esecutivo, con una linea di trattamento chimico-fisico integrata da sedimentazione, filtrazione su quarzite e affinamento su carbone attivo. Tale modifica non altera la strategia generale di messa in sicurezza operativa della falda, che resta fondata sull'emungimento controllato e sul trattamento delle acque captate, ma costituisce un'ottimizzazione della linea tecnologica di trattamento rispetto alle effettive condizioni del sito e alle caratteristiche qualitative del refluo atteso.

La scelta del trattamento chimico-fisico, in luogo dell'osmosi inversa, è motivata da considerazioni di efficacia, robustezza gestionale e proporzionalità tecnica. La tecnologia a osmosi inversa, pur idonea in presenza di esigenze di rimozione spinta dei sali disciolti, risulta maggiormente sensibile alla variabilità qualitativa del refluo, ai fenomeni di fouling e intasamento delle membrane, alla presenza di solidi sospesi, colloidi, metalli precipitati e variazioni di pH. Essa richiede inoltre pretrattamenti più spinti e produce un flusso concentrato contenente gli inquinanti rimossi, con conseguenti maggiori oneri gestionali, necessità di stoccaggio, conferimento e smaltimento del concentrato e incremento della complessità operativa dell'impianto.

Nel caso in esame, caratterizzato da portate contenute e variabili, falda discontinua e contaminazione prevalentemente inorganica, una linea chimico-fisica risulta più coerente con le esigenze di gestione del sistema. Essa consente infatti la

correzione del pH, la coagulazione e flocculazione dei contaminanti rimovibili per precipitazione o adsorbimento sui fiocchi, la separazione solido-liquido mediante decantazione, la rimozione delle frazioni fini residue mediante filtrazione su quarzite e un affinamento finale su carbone attivo prima dello scarico. Il processo consente inoltre di trasferire i contaminanti rimossi alla fase solida, sotto forma di fanghi gestibili come rifiuto, evitando la produzione continua di un concentrato liquido tipica dei trattamenti a membrana.

La configurazione adottata risulta pertanto più flessibile rispetto al funzionamento discontinuo o modulato della barriera idraulica, consentendo l'avvio, l'arresto e la regolazione della linea in funzione delle effettive portate emunte. Il sistema è inoltre compatibile con il monitoraggio gestionale dell'impianto e con successive regolazioni dei dosaggi, dei tempi di reazione, delle frequenze di spurgo fanghi e dei cicli di filtrazione sulla base dei dati analitici rilevati durante l'esercizio.

Sotto il profilo processistico, la linea di trattamento prevista nel Progetto Esecutivo è costituita da una sezione di accumulo ed equalizzazione delle acque emunte, con funzione di omogeneizzazione del refluo in ingresso e disaccoppiamento tra portata emunta e portata trattata; una sezione di reazione chimico-fisica, articolata in comparti di coagulazione, neutralizzazione e flocculazione, con dosaggio controllato dei reagenti; una sezione di separazione solido-liquido mediante decantatore lamellare; una sezione di filtrazione su quarzite; una sezione di affinamento su carbone attivo; una sezione reagenti e sistemi ausiliari; un sistema di automazione e telecontrollo mediante PLC per la gestione delle apparecchiature, dei dosaggi, degli allarmi e dei parametri di processo.

La scelta progettuale risulta inoltre coerente con gli indirizzi espressi in sede istruttoria dagli enti competenti, che hanno individuato tra gli interventi prioritari e finanziabili quelli direttamente connessi al controllo della falda, mediante sistemi di emungimento e trattamento delle acque sotterranee.

Ne deriva un approccio progettuale coerente e progressivo, nel quale la strategia individuata nel Progetto Operativo viene tradotta, nel presente livello esecutivo, in un sistema di intervento tecnicamente definito, adattato alle condizioni reali del sito e orientato al controllo efficace della contaminazione della falda. La modifica tecnologica introdotta nel Progetto Esecutivo deve pertanto essere intesa come aggiornamento migliorativo e di dettaglio della soluzione originariamente prevista, finalizzato a garantire maggiore affidabilità gestionale, migliore controllabilità del processo e proporzionalità della tecnologia rispetto alle effettive condizioni idrogeologiche e contaminologiche del sito.

# 6 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI BONIFICA DELLA FALDA

Gli interventi di messa in sicurezza operativa della matrice acque sotterranee si articolano in un sistema integrato di opere finalizzate al controllo idraulico della contaminazione e alla gestione delle acque emunte.

In coerenza con quanto definito nel Progetto Operativo e con le indicazioni emerse in sede istruttoria, il sistema di intervento è costituito da due componenti principali tra loro strettamente interconnesse:

- la realizzazione della barriera idraulica a valle della discarica;
- l'installazione dell'impianto di trattamento delle acque emunte.

Tali interventi sono concepiti come un sistema unitario, nel quale la fase di captazione e quella di trattamento operano in maniera coordinata al fine di garantire il contenimento della contaminazione e il rispetto dei limiti allo scarico.

La configurazione complessiva del sistema deriva direttamente dal modello idrogeologico del sito, che evidenzia la presenza di una falda superficiale discontinua, impostata entro i livelli più alterati e permeabili della coltre di copertura, con dinamica fortemente influenzata dagli apporti meteorici e dalla eterogeneità litostratigrafica locale. In tale contesto la soluzione progettuale non è orientata alla bonifica diffusa del sottosuolo, bensì al controllo attivo della migrazione degli inquinanti mediante emungimento localizzato e trattamento ex situ delle acque contaminate, in coerenza con la scelta già assunta nel precedente livello di progettazione.

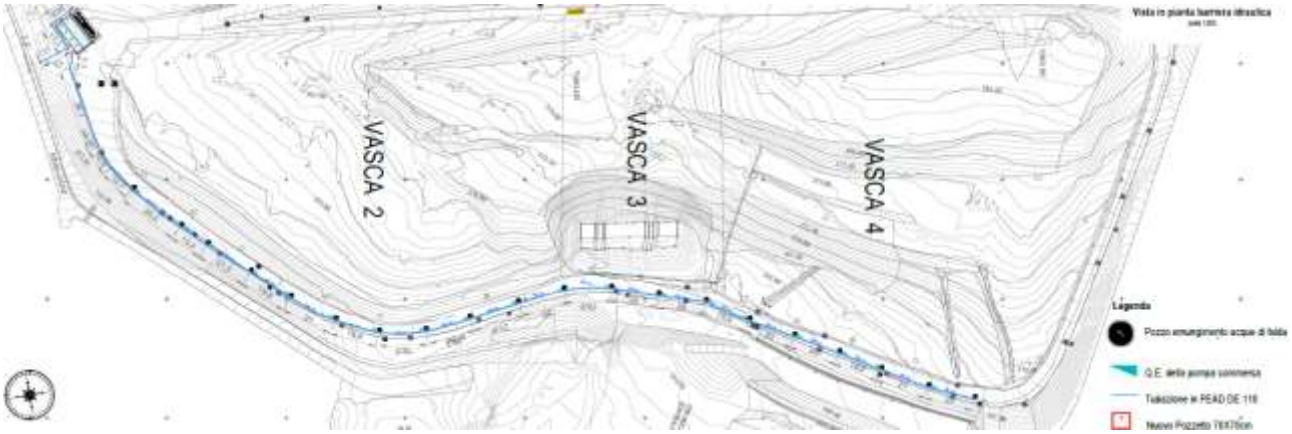



*Figura 3 Planimetria interventi bonifica della falda*

## *6.1 Realizzazione della barriera idraulica*

La barriera idraulica rappresenta l'opera principale di contenimento della contaminazione della falda ed è finalizzata a intercettare i flussi idrici in uscita dal corpo discarica lungo il margine idrogeologico di valle.

L'intervento prevede la realizzazione di una rete di pozzi di emungimento disposti secondo una configurazione lineare o pseudo-lineare, tale da coprire i principali percorsi di deflusso individuati sulla base del modello idrogeologico. La barriera non è assimilabile a una captazione su acquifero continuo, ma deve essere interpretata come un sistema di intercettazione diffusa, progettato per operare in un contesto caratterizzato da circolazione idrica discontinua e da limitata mobilità dei flussi. I pozzi saranno realizzati con caratteristiche geometriche e costruttive idonee a garantire l'intercettazione del livello saturo e l'efficacia del richiamo idraulico. In termini progettuali, si fa riferimento a opere di captazione di medio diametro e profondità compatibile con lo sviluppo della falda superficiale, con raggio di influenza del singolo pozzo limitato e funzione principalmente locale.

Le barriere idrauliche, costituite da uno o più pozzi, assorbono le contaminazioni incanalandole verso la depressione piezometrica creata dai loro prelievi. La figura successiva mostra come l'azione contemporanea di più pozzi produca una depressione piezometrica calcolabile con il metodo della sovrapposizione degli effetti.

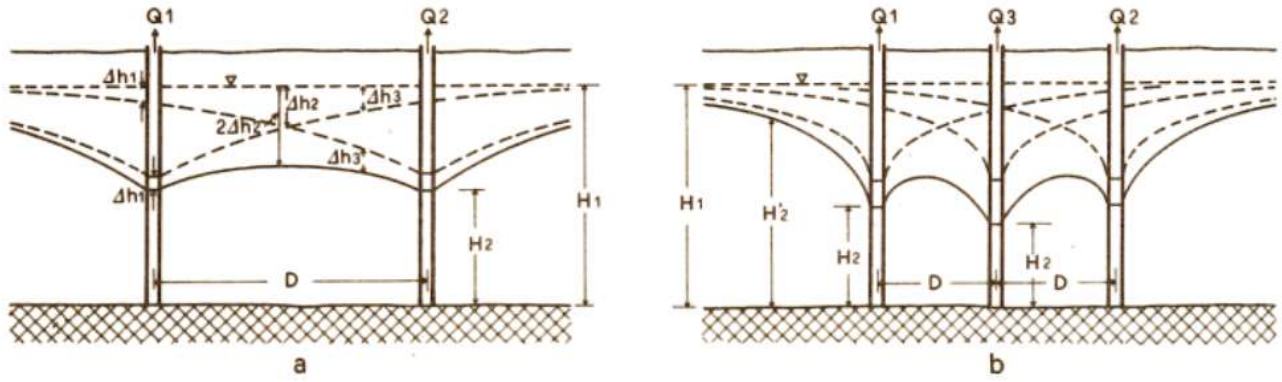



*Figura 4: sovrapposizione degli effetti di più pozzi allineati (J.Bear, 1979)*

Ciascun pozzo agisce richiamando verso di sé le acque di falda da un bacino delimitato da uno spartiacque piezometrico, in cui le acque entrano attraverso un fronte di richiamo disposto lungo una linea isopiezometrica.

### 6.1.1 Analisi del regime di flusso

In un pozzo di pompaggio:

- in una prima fase si osserva l'abbassamento del livello d'acqua nell'opera e nelle zone circostanti:
  - **regime non permanente** (deflusso della falda in condizioni di non equilibrio): il profilo della curva di depressione è variabile, legato ad un raggio d'azione e ad un livello dinamico variabile con il tempo di pompaggio.
- se la portata estratta rimane costante, nella pratica si osserva che il livello "dinamico" nell'opera e nell'acquifero circostante, indotto dal pompaggio, tende a rimanere costante dopo un certo tempo dall'avvio del pompaggio:

- **regime permanente** (deflusso della falda in condizioni di equilibrio): il profilo della curva di depressione è stabile ed è legato ad un raggio d'azione e ad un livello dinamico costante sino a quando non verrà variata la portata emunta

Nella realtà il raggio d'azione aumenta con il tempo inizialmente in maniera veloce, successivamente in maniera più debole, ma non perviene mai ad un valore costante per cui si parla di regime quasi permanente.

La portata massima da estrarre dai pozzi è data dalla seguente formula

$$Q_{T,min} = K \cdot i \cdot b \cdot L_{max} = T \cdot i \cdot L_{max}$$

dove: **K** è la conducibilità idraulica media e **T** è la trasmissività media dell'acquifero, **i** è il gradiente idraulico, **b** è lo spessore dell'acquifero (supposto contaminato) e **L** max è l'ampiezza massima del plume in falda.
Ai fini del dimensionamento preliminare occorre valutare:

- la distanza dal pozzo in cui l'effetto del pompaggio è trascurabile (raggio d'influenza del pozzo – R);
- la distanza a valle del pozzo in cui si verifica la condizione di flusso nullo (punto di stagnazione – xs);
- la larghezza della zona, misurata trasversalmente all'asse del flusso,
- ove si verifica il fenomeno di richiamo di acqua della falda verso il pozzo (fronte di richiamo del pozzo – F).

Ai fini del calcolo si applica l'ipotesi SI DUPUIT che prevede:

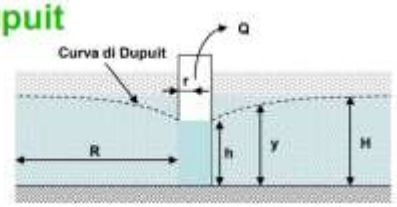
- Il funzionamento dell'opera determina un regime permanente (condizione di equilibrio);
- Acqua e roccia sono supposte incompressibili;
- La componente orizzontale della velocità dell'acqua è uguale in tutti i punti della stessa verticale (superfici piezometriche piane);
- Applicabilità della legge di Darcy in moto laminare (generalmente valido nella maggior parte dei casi);
- La componente verticale della velocità è trascurabile rispetto alla componente orizzontale;
- Il mezzo poroso è supposto omogeneo ed isotropo;
- Il raggio d'influenza è costante e la curva di depressione si raccorda con regolarità al livello piezometrico indisturbato
- il pozzo ha un'efficienza idraulica del 100% (si trascurano le perdite di carico);
- il pozzo è completo, cioè filtra tutta la falda.

Nella seguente immagine si riportano graficamente le ipotesi di DUPUIT

## Equazioni di Dupuit

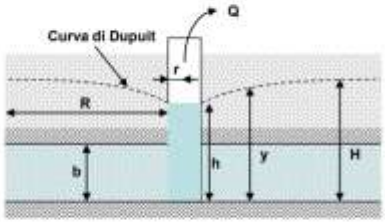
- Falda freatica molto potente (b elevato):

$$Q = \pi \cdot K \cdot \frac{(H^2 - h^2)}{ln\frac{R}{r}}$$ raggio di influenza




- Falda freatica poco potente e falda in pressione:

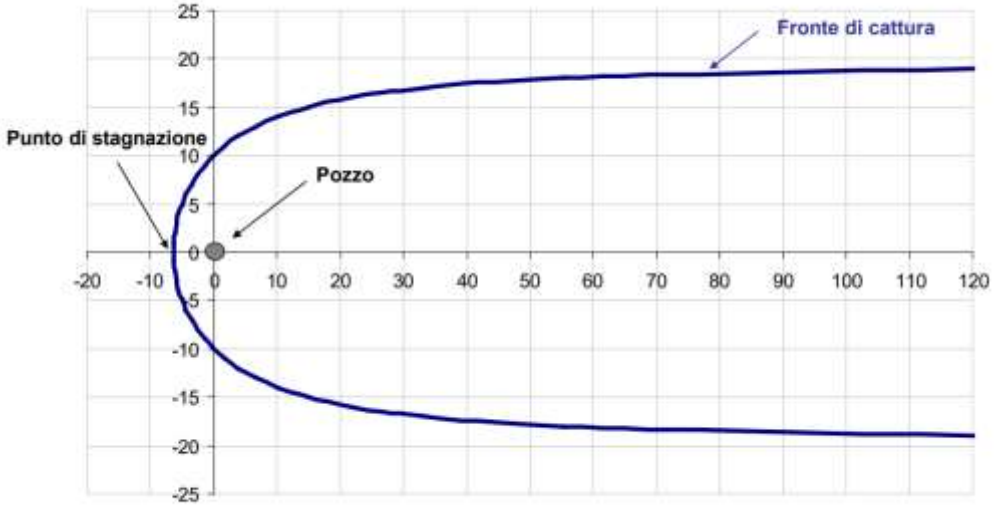
$$Q = 2\pi \cdot K \cdot b \cdot \frac{(H - h)}{ln\frac{R}{r}}$$ raggio di influenza




$$x_s = \frac{-Q}{\pi \cdot K \cdot i \cdot b}$$ punto di stagnazione

$$x = \frac{-y}{tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i \cdot y}{Q}\right)}$$ eq. fronte di cattura

## Andamento del fronte di cattura (Dupuit)




| Q = 20000 m³/giorno | b = 100 m | K = 1000 m/giorno | i = 0.005 |
|---|---|---|---|

## *6.2 Installazione impianto di trattamento delle acque emunte*

Le acque captate mediante la barriera idraulica saranno convogliate a un impianto di trattamento dedicato, progettato per garantire la rimozione dei contaminanti presenti e il rispetto dei limiti allo scarico previsti dalla normativa vigente.

L'impianto sarà dimensionato in relazione alle portate attese e alle caratteristiche qualitative delle acque di falda, tenendo conto della natura prevalentemente inorganica della contaminazione. La configurazione impiantistica sarà sviluppata

secondo una logica modulare, al fine di assicurare flessibilità gestionale e adattabilità alle variazioni delle condizioni operative.

Il processo di trattamento si articolerà in una sequenza di fasi finalizzate alla regolarizzazione delle portate, alla rimozione dei solidi sospesi e dei contaminanti disciolti e all'affinamento finale dell'effluente. In coerenza con il livello progettuale precedente, il sistema include tecnologie di trattamento chimico-fisico e processi di affinamento avanzato, in funzione delle prestazioni richieste.

L'impianto sarà ubicato in prossimità della linea di captazione, in posizione idonea a ottimizzare il sistema di collettamento e a ridurre le interferenze con le altre opere del sito. Sarà inoltre dotato di sistemi di controllo e telemonitoraggio, necessari per garantire la continuità operativa e la gestione in sicurezza del processo.

Le acque trattate saranno recapitate nel corpo idrico superficiale individuato dal progetto, previo rispetto dei limiti normativi applicabili. Il sistema di trattamento risulta pertanto strettamente integrato con le opere di regimazione idraulica del sito e con il canale di scarico delle acque post-trattamento previsto tra gli interventi di progetto.

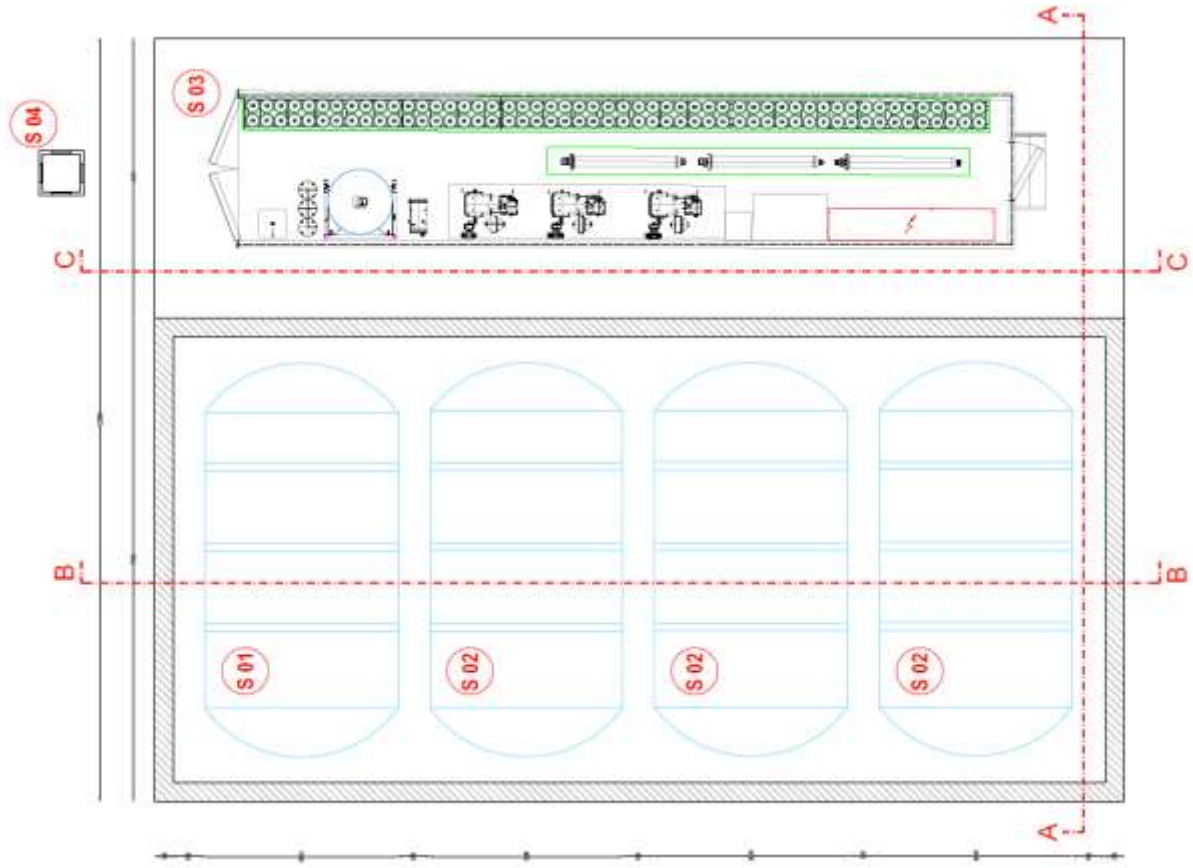



*Figura 5 Impianto trattamento*

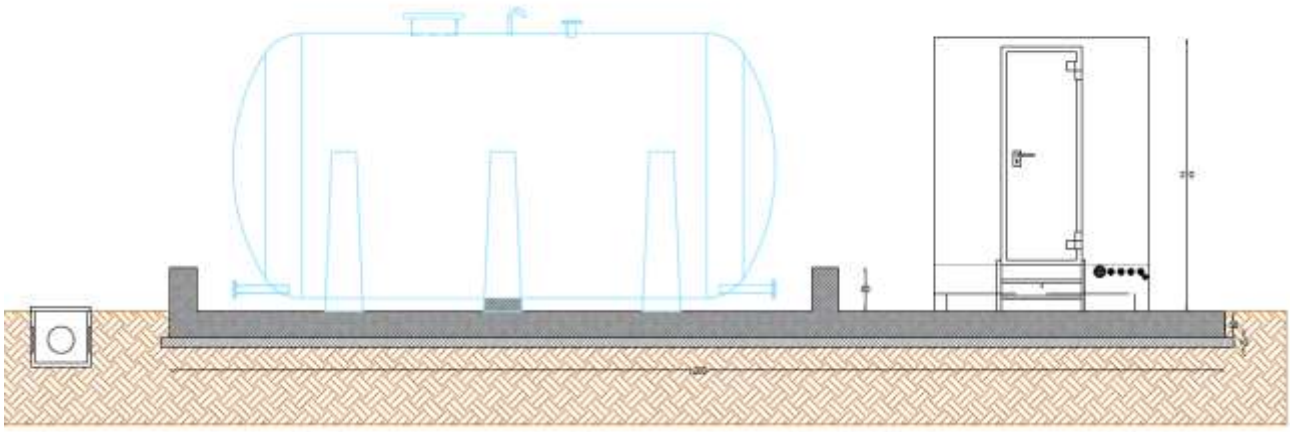


*Figura 6 Particolare serbatoi di accumulo*

# 7 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL SISTEMA DI BONIFICA DELLA FALDA

Il dimensionamento del sistema di messa in sicurezza operativa della falda è stato sviluppato sulla base del modello idrogeologico del sito e dei parametri idraulici derivanti dalle indagini geognostiche e dalle prove in sito, con particolare riferimento alle prove Lefranc, agli slug test e alle analisi di laboratorio geotecnico.

Il contesto idrogeologico è caratterizzato da una falda superficiale discontinua, impostata all'interno di terreni a prevalente matrice limo-argillosa, con valori di permeabilità dell'ordine di $10^{-6}$ cm/s e conseguente limitata mobilità dei flussi idrici. Le prove in sito hanno consentito di assumere, per l'acquifero, una **trasmissività compresa tra 2,70 x $10^{-6}$ e 3,00 x $10^{-6}$ m²/s**, coerente con un sistema a bassa capacità di trasporto e fortemente influenzato dagli apporti meteorici.

## *7.1 Dimensionamento della barriera idraulica*

Il dimensionamento della barriera idraulica è stato sviluppato sulla base del modello idrogeologico sito-specifico, aggiornato con le indagini geognostiche e idrauliche eseguite nel 2026, che hanno consentito di definire con maggiore attendibilità le caratteristiche di permeabilità e il comportamento della falda.

Il sottosuolo risulta costituito prevalentemente da terreni a matrice fine, classificabili come argille con componente sabbioso-limosa e frazioni ghiaiose subordinate, caratterizzati da una struttura compatta e da valori di permeabilità medio-bassi. Le prove di laboratorio e in sito hanno evidenziato coefficienti di permeabilità dell'ordine di grandezza di circa $10^{-8} \div 10^{-7}$m/s, coerenti con un sistema a bassa conducibilità idraulica.

Tali condizioni determinano una circolazione idrica sotterranea lenta e discontinua, fortemente influenzata dagli apporti meteorici e dalle eterogeneità stratigrafiche locali, come già evidenziato nel modello concettuale del sito. Ne deriva che la propagazione della contaminazione avviene con velocità limitata e con un fronte non continuo, ma comunque suscettibile di migrazione verso valle.

In questo contesto, la barriera idraulica è stata dimensionata con l'obiettivo di intercettare il **flusso idrico lungo la direttrice di valle della discarica**, creando una depressione piezometrica sufficiente a garantire il richiamo delle acque contaminate verso i pozzi di emungimento.

Il criterio di dimensionamento non è stato impostato su elevate portate di captazione, come nei sistemi in acquiferi ad alta permeabilità, bensì su una distribuzione diffusa dei punti di emungimento, in grado di generare un campo di depressione continuo anche in presenza di bassi gradienti idraulici.

La scelta del numero e della disposizione dei pozzi deriva quindi da un equilibrio tra:

- bassa permeabilità dei terreni;

- limitata produttività dei singoli pozzi;
- necessità di garantire la continuità della barriera lungo il fronte di valle.

I dati di campo evidenziano livelli di falda relativamente superficiali (circa 2–2,3 m dal piano campagna nei piezometri esistenti) e una variabilità significativa della presenza idrica, con condizioni locali di falda anche temporaneamente assente. Questo aspetto ha inciso direttamente sul dimensionamento, rendendo necessario adottare un sistema flessibile, in grado di operare anche in condizioni di falda discontinua.

In termini operativi, il dimensionamento della barriera può essere sintetizzato come segue:

| Parametro | Valore/Classe | Implicazioni progettuali |
|---|---|---|
| **Litologia** | Argille limoso-sabbiose | Bassa permeabilità |
| **Permeabilità K** | ~$10^{-8}$ ÷ $10^{-7}$ m/s | Basse portate di emungimento |
| **Tipo di falda** | Superficiale, discontinua | Sistema non uniforme |
| **Livello piezometrico** | ~2–2,3 m da p.c. | Pozzi poco profondi |
| **Regime di flusso** | Lento, controllato da piogge | Risposta variabile |

Alla luce di tali condizioni, la barriera è stata dimensionata prevedendo portate di emungimento contenute per ciascun pozzo, tali da evitare fenomeni di sovra-emungimento e garantire al contempo la stabilità del sistema nel tempo. L'efficacia del contenimento non è infatti legata alla singola portata, ma alla capacità complessiva del sistema di generare una fascia continua di richiamo idraulico.

Ne consegue che il dimensionamento definitivo della barriera non può essere considerato rigidamente deterministico, ma deve essere integrato con una fase di esercizio controllato, durante la quale le portate potranno essere regolate in funzione delle risposte piezometriche e dei dati di monitoraggio.

In questa ottica, il sistema progettato si configura come una barriera idraulica a gestione adattiva, nella quale il dimensionamento iniziale rappresenta la condizione di avviamento, mentre l'assetto definitivo sarà definito attraverso l'ottimizzazione progressiva dei parametri di esercizio.

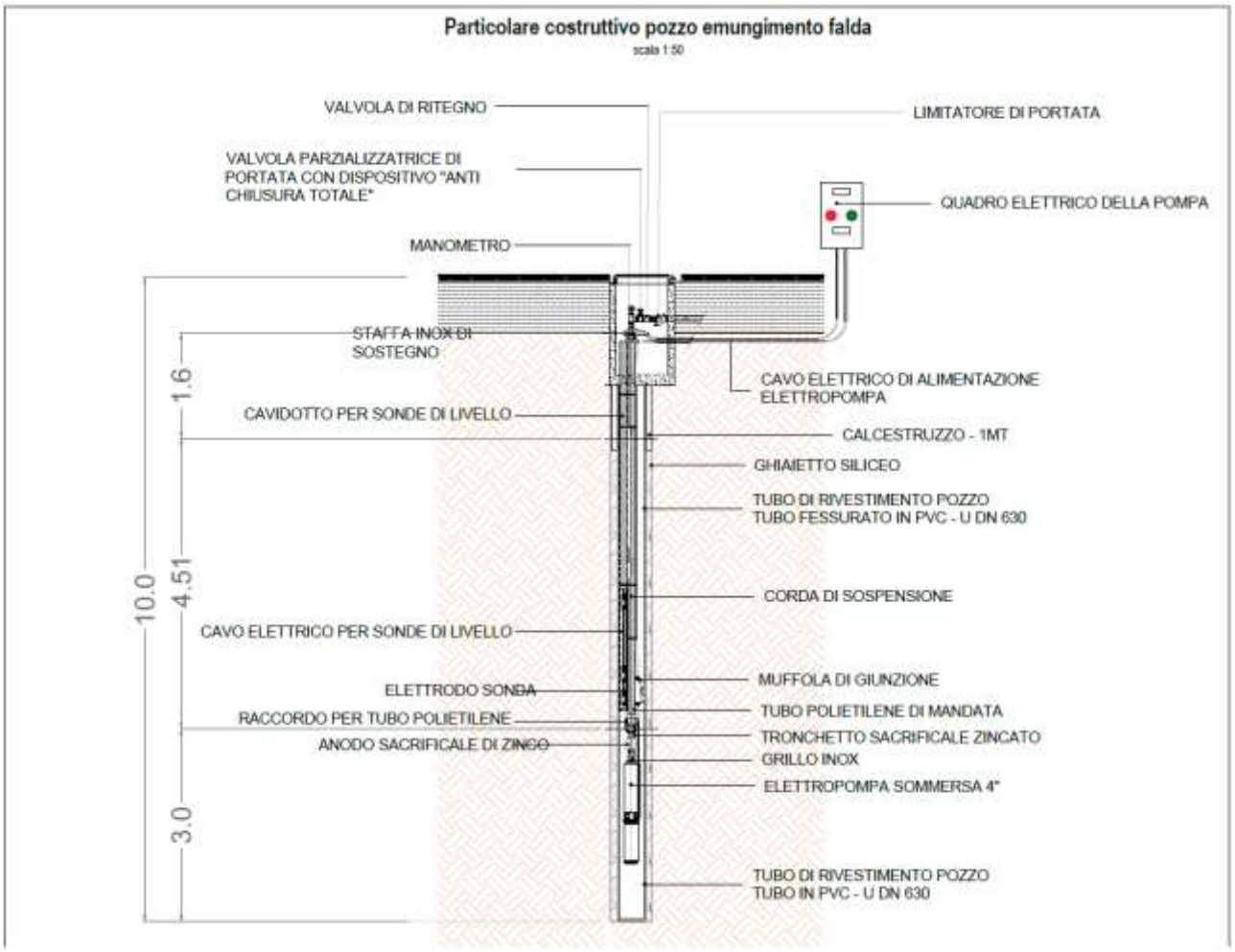



*Figura 7 Particolare pozzo*

### 7.1.1 Pozzi di emungimento

Dal punto di vista geometrico e costruttivo, ciascun pozzo è stato progettato con un **tubo di rivestimento interno del diametro di 630 mm**, all'interno del quale è alloggiata l'elettropompa sommersa. Tale configurazione consente di garantire un adeguato volume anulare tra foro e tubazione, necessario per la posa del dreno filtrante (ghiaietto selezionato) e per il corretto sviluppo del tratto fenestrato. La profondità di progetto, pari a **circa 10 m** dal piano campagna, risulta coerente con l'obiettivo di intercettare la falda superficiale, generalmente presente nei primi metri (circa 2–3 m), assicurando al contempo un adeguato sviluppo del tratto captante e condizioni di esercizio stabili. Il diametro adottato, pur inferiore rispetto a soluzioni di grande diametro, risulta idoneo al contesto idrogeologico in esame, caratterizzato da terreni a bassa permeabilità, garantendo un corretto compromesso tra efficienza di captazione, sostenibilità realizzativa e facilità di manutenzione.

Ai fini del dimensionamento impiantistico, la barriera è stata valutata assumendo, in via cautelativa, una **portata di progetto pari a 4,5 m³/h** per ciascun pozzo. Tale valore, superiore alle portate teoricamente attese in base alle caratteristiche idrauliche dei terreni, è stato adottato per verificare le condizioni di esercizio più gravose e dimensionare correttamente il sistema di collettamento e adduzione. Ne deriva una portata complessiva pari a 90 m³/h, corrispondente a circa 25 l/s, rappresentativa del funzionamento contemporaneo di tutti i pozzi a pieno regime.

Il sistema così configurato mantiene comunque l'impostazione tipica delle barriere idrauliche in contesti a bassa permeabilità, basata su una captazione distribuita lungo il fronte di valle, finalizzata alla creazione di una fascia continua di richiamo idraulico. Il dimensionamento adottato consente pertanto di garantire un adeguato livello di sicurezza e robustezza del sistema, pur mantenendo la possibilità di gestione modulare delle portate. In fase di esercizio, infatti, le portate dei singoli pozzi potranno essere regolate in funzione delle reali condizioni piezometriche, ottimizzando l'efficienza complessiva della barriera e assicurando la continuità del controllo idraulico della falda.

### *7.1.2 Elettropompe sommerse*

Il sistema di emungimento è equipaggiato con elettropompe sommerse installate all'interno dei singoli pozzi, dimensionate in coerenza con le caratteristiche geometriche degli stessi (tubazione di rivestimento Ø 630 mm) e con le portate di progetto assunte per il funzionamento della barriera idraulica.

Per ciascun pozzo è prevista l'installazione di una pompa sommersa con portata nominale pari a circa 4,5 m³/h, idonea al sollevamento delle acque di falda verso il sistema di collettamento. Le pompe sono del tipo multistadio centrifugo, specificamente progettate per funzionamento in continuo in ambiente sommerso, con motore elettrico accoppiato direttamente alla girante e raffreddamento garantito dal fluido pompato.

Le elettropompe saranno installate a quota opportuna all'interno del tratto filtrante del pozzo, in modo da garantire condizioni di aspirazione sempre sommerse ed evitare fenomeni di cavitazione o funzionamento a secco. Il sistema di installazione prevede il collegamento alla tubazione di mandata mediante colonna montante e l'ancoraggio tramite cavo in acciaio o sistema equivalente, nonché l'alimentazione elettrica mediante cavo stagno dimensionato per posa in ambiente umido e aggressivo.

Ciascuna pompa sarà dotata di dispositivi di protezione e controllo, quali sonde di livello per la gestione automatica dell'avviamento e arresto, protezioni contro il funzionamento a secco, sovraccarichi e surriscaldamento del motore. Il funzionamento del sistema potrà essere gestito in modalità automatica, con possibilità di regolazione delle portate dei singoli pozzi, al fine di ottimizzare il regime di emungimento in funzione delle condizioni piezometriche reali.

La scelta di adottare pompe con portata superiore a quella teoricamente derivabile dalle caratteristiche idrogeologiche del sito risponde a un criterio cautelativo di dimensionamento, finalizzato a garantire la piena efficienza del sistema anche in condizioni di esercizio gravose, nonché a consentire una gestione flessibile e modulare della barriera idraulica nel tempo.

| **LIMITI OPERATIVI** | | | **CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Liquido pompato | Acqua | | Diametro mandata | G 1.1/4" | - |
| Temp. max liquido pompato (*) | 30 | °C | Diametro massimo d'ingombro | 98 | mm |
| Densità massima | 1 | kg/dm³ | Tipo Girante | Radiale | |
| Viscosità massima | 1 | mm²/s | Numero stadi | 10 | |
| Contenuto max di sostanze solide | 300 | g/m3 | Tenuta motore | Meccanica | |
| Battente massimo | 150 | m | Tipo installazione | Verticale | |
| N.ro massimo avviamenti ora | 20 | | Momento d'inerzia | - | |
| Tempo massimo di funzionamento a bocca chiusa e pompa sommersa | 3 | min | **PESI** | | |
| | | | Peso pompa | 4,4 | Kg |
| Sommergenza minima | 245 | mm | Peso motore sommerso | 9,4 | Kg |
| | | | Peso elettropompa | 13,8 | Kg |

| **CARATTERISTICHE DI FUNZIONAMENTO** **** | | | | **CARATTERISTICHE MOTORE ELETTRICO** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Portata di esercizio | | 4,7 | m³/h | Marca | | |
| Prevalenza di esercizio | | 54,2 | m | Modello | MCH415-8 | |
| Qmin | Qmax | 3,2 – 7,2 | m³/h | Potenza nominale | 1,1 | kW |
| H (Q=0) | Hmax (Qmin) | 66,1 – 59,5 | m | Frequenza nominale | 50 | Hz |
| Potenza assorbita punto di lavoro | | 1 | kW | Tensione nominale | 400 | V |
| Massima potenza assorbita | | 1,1 | kW | Velocità nominale | 2800 | rpm |
| Rend. pompa | Rend. gruppo | 69,44 – 44,4 | % | Corrente nominale | 3,3 | A |
| Massimo rendimento pompa | | 70,6 | % | N.ro poli | 2 | |
| NPSH richiesto | | 2,4 | m | Tipo motore | 3 ~ | |
| Velocità di rotazione | | ~ 2800 | rpm | Rendimento 4/4 - 3/4 | 65,0 - 63,0 % | |
| Senso di rotazione (**) | | Antiorario | | Fattore di potenza 4/4 - 3/4 | 0,745 - 0,655 | |
| Tolleranza secondo norma | | ISO 9906:2012 3B | | Fattore di potenza rifasato (***) | - | |
| MEI | | | | Classe d'isolamento | F | |
| Diametro girante | | - | | Protezione termica | - | |
| Numero pompe installate | | In funzione | Stand-by | Tipo di avviamento | D | |
| | | 1 | 0 | Grado di protezione | IP68 | |
| | | | | Numero cavi uscita motore | 1 | |
| | | | | Service Factor | Is/In – Ts/Tn | 1 – 4,5 - 3,2 |

| **MATERIALI POMPA** **** | | **MATERIALI MOTORE** | |
|---|---|---|---|
| Girante | Tecnopolimero | Albero | Acciaio inox |
| Albero | Acciaio inox | Parasabbia | Gomma |
| Manicotto di trasmissione | Acciaio inox | Supporto superiore | Ghisa grigia |
| Diffusore | Tecnopolimero | Tenuta meccanica | Ceramica/grafite |
| Mantello | Acciaio inox | Cuscinetto superiore | Acciaio |
| Corpo valvola | Acciaio inox | Rotore | Lamierino magnetico |
| Clapet | Tecnopolimero | Statore | Lamierino magnetico |
| Succheruola | Acciaio inox | Camicia statore | Acciaio inox |
| Parasabbia | Acciaio inox | Avvolgimento | Rame |
| Defender® | Ghisa grigia | Cuscinetto inferiore | Acciaio |
| Supporto aspirazione | Acciaio inox | Supporto inferiore | Alluminio |
| Disco intermedio | Acciaio inox/gomma | Membrana | Gomma |
| Bussola albero | Allumina | Coperchio membrana | Acciaio inox |
| Tegolo di protezione cavi | Acciaio inox | Bulloneria | Acciaio inox |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | - | |

*Figura 8 Caratteristiche tecniche pompe sommerse*

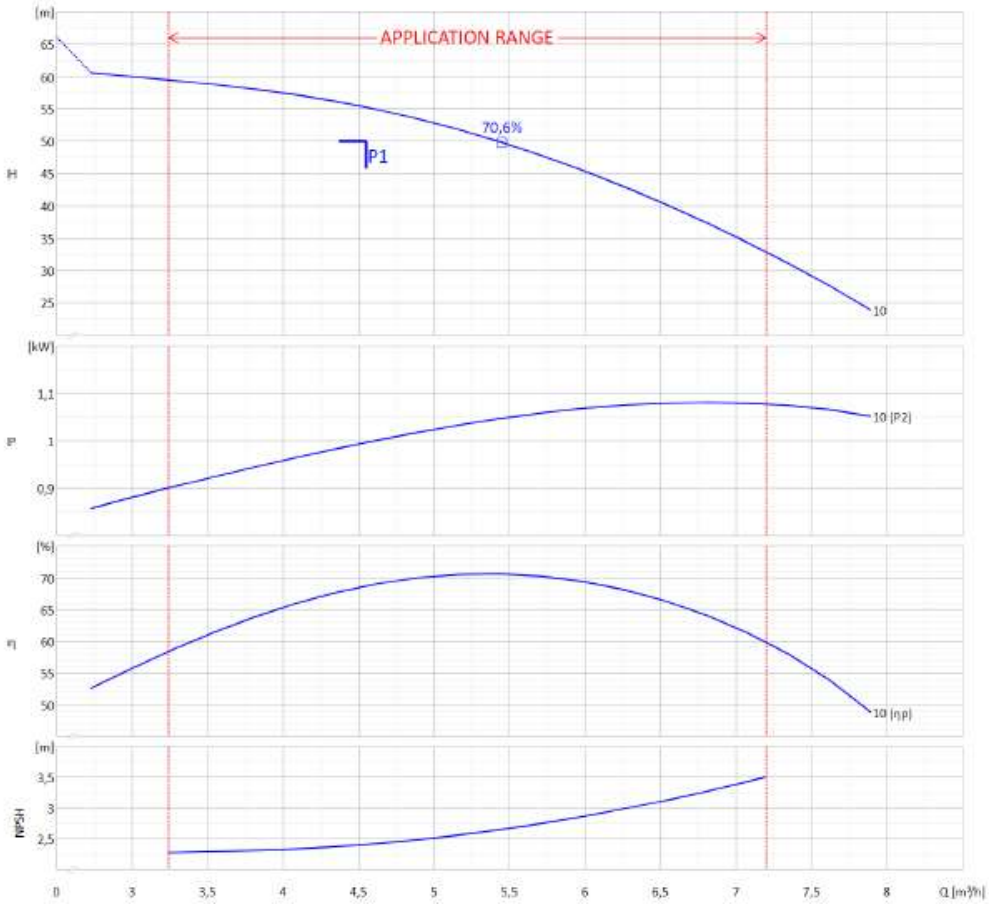
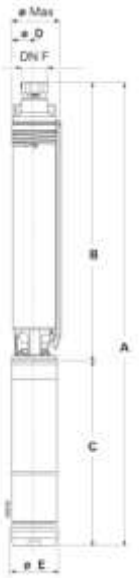



*Figura 9 Curve di prestazione*




| Dimensioni [mm] | |
|---|---|
| A | 887 |
| B | 516 |
| C | 371 |
| D | 93 |
| E | 96 |
| F | G1 1/4 |
| Ø max | 98 |

*Figura 10 Particolare costruttivo e dettagli tecnici pompa sommersa*

### 7.1.3 Collettore pozzi

Le acque emunte dai singoli pozzi della barriera idraulica sono convogliate verso il sistema di accumulo e successivo trattamento mediante una rete di collettamento in pressione, costituita da un collettore principale al quale afferiscono progressivamente le linee di mandata dei singoli pozzi.

Il sistema è configurato secondo uno schema ramificato, in cui ciascun pozzo è collegato al collettore mediante una tubazione secondaria dimensionata sulla portata unitaria di progetto, pari a circa 4,5 m³/h, mentre il collettore principale è dimensionato sulla portata complessiva della barriera. Assumendo il funzionamento contemporaneo di n. 20 pozzi, la portata totale risulta pari a circa 90 m³/h, corrispondente a 25 l/s, valore adottato ai fini del dimensionamento cautelativo dell'intero sistema di adduzione.

Il collettore principale è previsto in tubazione in polietilene ad alta densità (PEAD) per condotte in pressione, con diametro pari a 180 mm. Tale dimensionamento risulta idoneo a garantire il convogliamento della portata complessiva di progetto mantenendo velocità di esercizio compatibili con il corretto funzionamento della condotta e con il contenimento delle perdite di carico, anche in presenza di uno sviluppo lineare significativo del tracciato. La scelta del diametro consente inoltre di assicurare adeguato margine operativo rispetto a possibili variazioni di esercizio, depositi, incrostazioni o parziali riduzioni della sezione utile nel tempo.

Le tubazioni secondarie di collegamento dei singoli pozzi al collettore principale saranno realizzate anch'esse in PEAD, con diametro opportunamente commisurato alla portata di ciascun pozzo, e saranno dotate di organi di intercettazione per consentire l'esclusione di singole linee in caso di manutenzione, verifica o regolazione del sistema. In corrispondenza degli allacci sarà inoltre opportuno prevedere dispositivi di non ritorno, al fine di evitare riflussi lungo le linee secondarie e garantire un funzionamento idraulicamente stabile dell'intera rete.

Il tracciato del collettore sarà realizzato mediante posa interrata, con profondità e modalità esecutive tali da garantire la protezione meccanica della condotta, la durabilità del sistema e la sicurezza rispetto ai carichi superficiali e alle interferenze presenti nell'area di intervento. La rete di collettamento recapiterà infine ai serbatoi di accumulo a servizio dell'impianto di trattamento, consentendo il disaccoppiamento tra fase di emungimento e fase di trattamento e garantendo una gestione flessibile ed efficace dell'intero sistema di barriera idraulica.

## *7.2 Dimensionamento dell'impianto di trattamento*

Il dimensionamento dell'impianto di trattamento delle acque di falda è stato sviluppato sulla base della portata di progetto pari a 50 m³/giorno, della portata nominale della linea pari a 5 m³/h e dei dati analitici assunti dal fornitore specialistico per la verifica del processo chimico-fisico.

Il regime di esercizio assunto ai fini del dimensionamento è pari a 10 h/giorno, corrispondente al trattamento di 50 m³/giorno alla portata nominale di 5 m³/h, con riferimento a 26 giorni di esercizio mensili.

Per la verifica del processo sono assunte, in condizioni cautelative, concentrazioni di progetto pari a 71 mg/L per l'Alluminio e 45 mg/L per il Ferro. Per il dosaggio della soda caustica è assunto un fattore di sicurezza pari a 1,5. I limiti di emissione richiamati dal fornitore sono pari a 1 mg/L per l'Alluminio, 2 mg/L per il Boro e 1.000 mg/L per i Solfati.

Le principali verifiche dimensionali delle singole sezioni sono riepilogate nella tabella seguente.

| Sezione | Parametro di verifica | Valore |
|---|---|---|
| Dati generali | Portata giornaliera di progetto | 50 m³/g |
| Dati generali | Portata nominale linea | 5 m³/h |
| Dati generali | Esercizio | 10 h/g; 26 gg/mese |
| Equalizzazione | Tempo di detenzione su portata media giornaliera | 4,80 h |

| Sezione | Parametro di verifica | Valore |
|---|---|---|
| Reazione – settore 1 | Tempo di contatto | 6,00 min |
| Reazione – settore 2 | Tempo di reazione/precipitazione | 8,40 min |
| Reazione – settore 3 | Tempo di flocculazione | 6,00 min |
| Reazione – totale | Tempo di detenzione complessivo | 20,40 min |
| Decantatore lamellare | Carico idraulico superficiale | 1,72 m³/(m²·h) |
| Filtro a quarzite | Velocità di filtrazione | 6,37 m/h |
| Filtro a carbone attivo | Velocità di filtrazione | 4,42 m/h |
| NaOH 30% | Dosaggio operativo di progetto | 1,55 L/m³ |

Tabella – Sintesi del dimensionamento idraulico e di processo

### 7.2.1 Schema funzionale e principio di funzionamento

Il ciclo di trattamento si sviluppa secondo una sequenza di operazioni unitarie costituita da accumulo ed equalizzazione, trattamento chimico-fisico, decantazione lamellare, filtrazione su quarzite e affinamento su carbone attivo.

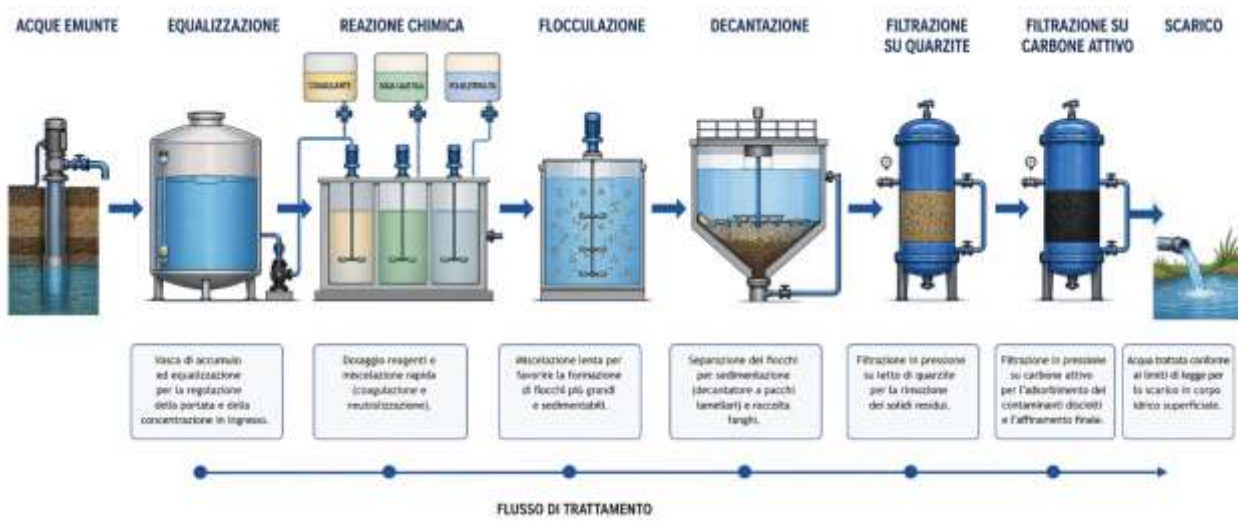



*Figura 11 Diagramma di flusso*

L'intero processo è gestito mediante quadro elettrico generale, PLC e pannello operatore, con possibilità di supervisione a distanza.

### 7.2.2 Sezione di accumulo ed equalizzazione

La prima fase del trattamento è costituita dalla vasca di equalizzazione, avente funzione di accumulo, regolazione della portata e omogeneizzazione dei flussi provenienti dai pozzi barriera. Le caratteristiche principali sono:

- Volume utile: 10 m³
- Diametro: 2.000 mm
- Altezza: 4.500 mm
- Materiale: PEHD

Il volume installato corrisponde a:

- circa 4,8 h di detenzione rispetto alla portata media giornaliera di progetto (50/24 = 2,08 m³/h);
- circa 2,0 h rispetto alla portata nominale della linea di trattamento pari a 5 m³/h.

Il rilancio alla linea di trattamento è assicurato da n. 1+1 pompe centrifughe, con:

- portata: 5 m³/h
- prevalenza: 4 m c.l.

- potenza installata: 0,75 kW

La configurazione 1+1 assicura ridondanza della fase di rilancio.

### 7.2.3 Sezione di reazione chimico-fisica

Il trattamento chimico-fisico avviene in una vasca suddivisa in tre comparti, realizzata in acciaio inox AISI 316L, dimensionata sulla portata nominale di 5 m³/h.

La configurazione volumetrica e i relativi tempi di contatto sono:

- 1° comparto – coagulante: 0,50 m³; tempo di contatto 6,0 min
- 2° comparto – soda caustica: 0,70 m³; tempo di reazione/precipitazione 8,4 min
- 3° comparto – flocculante: 0,50 m³; tempo di flocculazione 6,0 min
- Volume totale: 1,70 m³; tempo di detenzione complessivo 20,4 min

I comparti sono dotati delle apparecchiature previste dal fornitore, comprendenti:

- elettroagitatori a 70 giri/min, con albero in AISI 316 e potenza 0,75 kW;
- sistemi dedicati di dosaggio dei reagenti;
- pH-metri nelle sezioni di processo previste.

Il tempo complessivo di detenzione, pari a circa 20,4 min, è assunto dal fornitore come coerente con i tempi di processo di un sistema compatto di coagulazione, precipitazione e flocculazione.

I reagenti previsti sono:

- coagulante;
- soda caustica;
- polielettrolita.

### 7.2.4 Sezione di separazione solido-liquido

La separazione dei solidi precipitati avviene mediante decantatore a pacchi lamellari, con sistema di raschiamento di fondo, realizzato in acciaio inox AISI 316L.

Le caratteristiche geometriche assunte per la verifica sono:

- lunghezza: 2.150 mm

- larghezza: 1.350 mm
- altezza: 2.700 mm
- portata nominale: 5 m³/h

Sulla superficie in pianta pari a circa 2,90 m², il carico idraulico superficiale risulta pari a circa 1,72 m³/(m²·h), inferiore al campo massimo di riferimento indicato dal fornitore per decantatori lamellari (4–6 m³/(m²·h)).

A valle del decantatore è prevista una vasca di raccolta delle acque chiarificate, completa di:

- pompa di rilancio alla filtrazione;
- pompa di ricircolo ed estrazione fanghi.

### 7.2.5 Sezione di filtrazione e affinamento

L'affinamento finale è realizzato mediante filtrazione in pressione su quarzite e carbone attivo.

**Filtro a quarzite:**

- diametro: 1.000 mm
- altezza totale: 2.800 mm
- portata: 5 m³/h
- velocità di filtrazione calcolata: circa 6,37 m/h

**Filtri a carbone attivo (n. 1+1):**

- diametro: 1.200 mm
- altezza totale: 2.500 mm
- portata: 5 m³/h
- velocità di filtrazione calcolata: circa 4,42 m/h

La velocità di filtrazione sulla quarzite rientra nel campo di riferimento indicato dal fornitore per i filtri rapidi (5–10 m/h). Per il carbone attivo, il tempo effettivo di contatto del letto sarà verificato sulla configurazione definitiva del materiale filtrante installato.

La configurazione 1+1 dei filtri a carbone consente l'esercizio alternato e la necessaria flessibilità gestionale.

### 7.2.6 Sezione reagenti e sistemi ausiliari

La sezione reagenti comprende:

- serbatoio da 500 L per soda caustica;
- serbatoio da 500 L per coagulante e preparatore di polielettrolita;
- pompe dosatrici dedicate per soda, coagulante e polielettrolita.

Le connessioni idrauliche a bordo macchina sono previste in:

- acciaio inox AISI 316L;
- polietilene idoneo al servizio.

Il dimensionamento del dosaggio della soda è sviluppato sulla base del carico di Alluminio e Ferro assunto per il progetto; i consumi sono riportati al successivo capitolo 8.

### 7.2.7 Sistema di automazione e controllo

L'impianto è dotato di:

- quadro elettrico generale in esecuzione IP55;
- PLC con pannello operatore;
- predisposizione alla supervisione remota.

Il sistema consente il comando e il controllo delle principali apparecchiature e l'acquisizione dei parametri di processo disponibili, secondo quanto descritto al capitolo 8.

## 7.3 Verifica del dimensionamento dell'impianto in relazione al carico inquinante in ingresso e ai limiti allo scarico

La verifica processistica è stata sviluppata assumendo come condizione cautelativa una concentrazione di Alluminio pari a 71 mg/L e una concentrazione di Ferro pari a 45 mg/L, alla portata giornaliera di progetto di 50 m³/giorno.

- portata giornaliera di progetto: 50 m³/giorno;
- portata nominale della linea: 5 m³/h;
- tempo di esercizio necessario al trattamento del volume giornaliero: 10 h/giorno.

Per l'Alluminio il carico giornaliero di progetto risulta pari a circa 3,55 kg/giorno (71 mg/L × 50.000 L/giorno). Tale parametro rappresenta il principale riferimento per il dimensionamento del trattamento chimico-fisico.

Per Boro e Solfati, il campione PZ1N prelevato isolatamente presenta valori superiori ai limiti richiamati dal fornitore; la miscela reale delle acque di spurgo dei piezometri, assunta quale refluo effettivamente equalizzato e alimentato al trattamento, presenta invece tali parametri entro i limiti di emissione considerati.

Per i Nitriti, il valore rilevato nel PZ1N pari a 1.894 µg/L come $NO_2^-$, corrispondente a circa 1,894 mg/L come $NO_2^-$, equivale a circa 0,58 mg/L come N e risulta inferiore al limite assunto pari a 0,60 mg/L come N.

Il dimensionamento della sezione chimico-fisica è pertanto riferito principalmente all'abbattimento dell'Alluminio e degli ulteriori metalli precipitabili, mediante correzione del pH, coagulazione, flocculazione e successiva separazione dei fanghi.

Il dosaggio di soda caustica è stato determinato dal fornitore per via stechiometrica sulla base delle concentrazioni di Alluminio e Ferro, applicando un fattore di sicurezza pari a 1,5.

Il dosaggio di progetto risultante è pari a circa 618 mg/L di NaOH puro.

Tale valore corrisponde a circa 1,55 L di soluzione commerciale di NaOH al 30% per ogni m³ di refluo trattato.

Alla portata di 50 m³/giorno il consumo risulta pari a circa 77 L/giorno e 2.010 L/mese, assumendo 26 giorni di esercizio.

La verifica dei principali parametri di progetto e delle modalità di trattamento è riepilogata nella tabella seguente.

| Parametro | Dato/campione | Valore assunto | Limite richiamato | Carico / conversione | Esito | Criterio progettuale |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Alluminio | Condizione cautelativa di progetto | 71 mg/L | 1 mg/L | 3,55 kg/g a 50 m³/g | Parametro critico | Trattamento chimico-fisico |
| Ferro | Condizione cautelativa di progetto | 45 mg/L | — | Considerato nel calcolo NaOH | Parametro di processo | Precipitazione con i metalli |
| Boro | PZ1N isolato / miscela spurghi | 3,113 mg/L nel PZ1N | 2 mg/L | Miscela reale: conforme | Controllo in esercizio | Nessun abbattimento specifico assunto |
| Solfati | PZ1N isolato / miscela spurghi | 2.413 mg/L nel PZ1N | 1.000 mg/L | Miscela reale: conforme | Controllo in esercizio | Nessun abbattimento specifico assunto |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nitriti | PZ1N | 1.894 µg/L come $NO_2^-$ | 0,60 mg/L come N | ≈0,58 mg/L come N | Conforme | Verifica in monitoraggio |

L'effettiva prestazione depurativa sarà verificata in fase di avviamento e di esercizio mediante il controllo analitico dell'acqua in ingresso e dell'effluente trattato, con regolazione dei dosaggi in funzione delle caratteristiche reali del refluo.

Per Boro e Solfati non viene assunta, allo stato, una specifica percentuale di abbattimento, in quanto i dati disponibili sulla miscela reale di spurgo risultano conformi ai limiti considerati.

La configurazione prevista – equalizzazione, trattamento chimico-fisico, decantazione lamellare, filtrazione su quarzite e carbone attivo – è quindi verificata rispetto alla portata di progetto e al carico di metalli assunto per il dimensionamento e garantisce il rispetto dei valori limite di emissione allo scarico in corpo idrico superficiale di cui alla Tabella 3 dell'Allegato 5 alla Parte Terza del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i. (cfr. capitolo "Conclusioni").

# 8 GESTIONE OPERATIVA DELL'IMPIANTO TAF E TELECONTROLLO INTEGRATO

## *8.1 Criterio di funzionamento del sistema*

L'impianto TAF è dimensionato per una portata giornaliera pari a 50 m³/giorno, con linea di trattamento da 5 m³/h. Il regime di riferimento assunto per il dimensionamento è pertanto pari a 10 h/giorno, per 26 giorni di esercizio mensili.

Le portate delle pompe dei pozzi costituiscono valori nominali delle apparecchiature. L'esercizio della rete di emungimento sarà coordinato con la disponibilità della vasca di equalizzazione e con la capacità della linea di trattamento, evitando che il volume complessivamente emunto ecceda la capacità giornaliera dell'impianto.

La vasca di equalizzazione, avente volume utile pari a 10 m³, svolge le funzioni di:

- accumulo temporaneo delle acque emunte;
- disaccoppiamento tra emungimento e trattamento;
- omogeneizzazione dei flussi provenienti dai diversi pozzi barriera;
- regolarizzazione della portata inviata alla linea chimico-fisica.

Il volume di 10 m³ corrisponde a circa 4,8 h rispetto alla portata media giornaliera di progetto e a circa 2 h rispetto alla portata nominale della linea. Ai fini della valutazione qualitativa del refluo, il riferimento operativo è costituito dalla miscela effettivamente equalizzata dei flussi provenienti dai pozzi.

## *8.2 Parametri significativi e prestazioni del trattamento*

I dati disponibili evidenziano che il campione PZ1N, considerato isolatamente, presenta concentrazioni di Boro e Solfati superiori ai limiti richiamati per lo scarico, mentre nella miscela reale delle acque di spurgo dei piezometri tali parametri risultano conformi. Per essi è pertanto previsto il controllo analitico in esercizio, senza assumere una specifica efficienza di abbattimento nella configurazione base.

Per i Nitriti, il valore rilevato nel PZ1N pari a 1.894 µg/L come $NO_2^-$, equivalente a circa 0,58 mg/L come N, risulta inferiore al limite assunto pari a 0,60 mg/L come N.

Il parametro critico assunto per il dimensionamento del processo è l'Alluminio, considerato nella condizione cautelativa di 71 mg/L; nel calcolo del fabbisogno di soda è inoltre considerato il Ferro alla concentrazione di progetto di 45 mg/L. Alla portata di 50 m³/giorno il carico di Alluminio risulta pari a circa 3,55 kg/giorno.

Il processo chimico-fisico prevede:

- dosaggio di soda caustica per la regolazione del pH, indicativamente nell'intervallo 8,5–9,0, e la precipitazione dell'Alluminio e degli altri metalli sotto forma di idrossidi;
- dosaggio del coagulante per la destabilizzazione delle particelle e la formazione dei microfiocchi;
- dosaggio del polielettrolita per l'accrescimento dei fiocchi e il miglioramento della sedimentabilità;
- separazione dei fanghi mediante decantatore lamellare;
- filtrazione su quarzite per la rimozione del particolato residuo;
- affinamento finale su carbone attivo.

La conformità dell'effluente sarà verificata mediante i controlli analitici previsti in fase di avviamento e di esercizio.

## *8.3 Reagenti, fanghi e costi di gestione*

Il dosaggio della soda caustica è stato determinato dal fornitore per via stechiometrica sulla base delle concentrazioni di progetto di Alluminio (71 mg/L) e Ferro (45 mg/L), applicando un fattore di sicurezza pari a 1,5. Il fabbisogno risultante è pari a circa 618 mg/L di NaOH puro, corrispondente a circa 1,55 L/m³ di soluzione commerciale al 30%, ossia circa 77 L/giorno e 2.010 L/mese per 26 giorni di esercizio.

| Voce | Quantità / valore di progetto |
|---|---|
| **Soda caustica soluzione 30%** | 1,55 L/m³; circa 77 L/giorno; circa 2.010 L/mese |
| **NaOH puro equivalente** | circa 618 mg/L; circa 31 kg/giorno |
| **Coagulante** | circa 30–100 kg/mese |
| **Polielettrolita** | circa 10–50 kg/mese |
| **Fanghi – sostanza secca** | circa 16,5 kg SS/giorno; circa 430 kg SS/mese |
| **Fango estratto tal quale** | circa 14 m³/mese al 2–4% SS |
| **Costo di gestione** | circa 3.000–4.000 €/mese |

La produzione di fanghi è stimata in circa 16,5 kg SS/giorno, pari a circa 430 kg SS/mese e a circa 14 m³/mese di fango estratto tal quale al 2–4% di sostanza secca. I fanghi saranno caratterizzati e conferiti come rifiuto presso impianto autorizzato; l'eventuale filtropressa costituisce dotazione opzionale per la riduzione dei volumi da smaltire.

Il costo complessivo di gestione è stimato in circa 3.000–4.000 €/mese, comprensivo di reagenti, smaltimento fanghi ed energia elettrica, da confermare sulla base dei consumi effettivi e delle condizioni economiche degli impianti di destinazione.

## *8.4 Sistema integrato di automazione e telecontrollo*

La rete di emungimento e l'impianto TAF sono predisposti per la gestione mediante PLC e pannello operatore, con possibilità di supervisione centralizzata e accesso remoto.

Il sistema è concepito con architettura aperta e protocollo di comunicazione standard non proprietario Modbus TCP/RTU, in modo da consentire l'integrazione della rete di emungimento con l'impianto di trattamento e con eventuali ulteriori punti di monitoraggio.

- livelli e pressioni presso i pozzi di emungimento;
- stato delle pompe di emungimento;
- portate emunte e portata alimentata al trattamento;
- livelli delle vasche dell'impianto TAF;
- valori di pH delle sezioni di processo;
- stato delle principali apparecchiature e dei sistemi di dosaggio.

I segnali acquisiti sono resi disponibili alla supervisione su PLC/pannello operatore e, ove attivato, al sistema di accesso remoto, consentendo il controllo coordinato delle principali condizioni operative.

L'architettura aperta consente inoltre:

- integrazione di ulteriori punti di misura;
- estensione del sistema di supervisione;
- collegamento con sistemi di monitoraggio già presenti sul sito;
- adeguamento delle logiche di gestione alle condizioni di esercizio rilevate.

Il sistema di telecontrollo costituisce pertanto il supporto operativo per la gestione integrata tra rete di emungimento, equalizzazione e linea di trattamento.

# 9 MONITORAGGIO E GESTIONE DEL SISTEMA DI EMUNGIMENTO

Il sistema di messa in sicurezza operativa della falda, basato sulla combinazione tra barriera idraulica e trattamento delle acque emunte, richiede una gestione di tipo adattivo, strettamente supportata da un adeguato sistema di monitoraggio.

In considerazione delle caratteristiche idrogeologiche del sito, contraddistinto da una falda superficiale discontinua, a bassa trasmissività e fortemente influenzata dagli apporti meteorici, il comportamento del sistema non può essere considerato statico, ma deve essere verificato e regolato nel tempo sulla base delle effettive condizioni di esercizio.

Il monitoraggio è pertanto finalizzato non solo alla verifica dell'efficacia dell'intervento, ma anche alla gestione operativa del sistema di emungimento, consentendo di calibrare le portate, ottimizzare il funzionamento dei pozzi e garantire nel tempo il contenimento della contaminazione.

A tal fine, il controllo del sistema sarà basato sull'integrazione tra monitoraggio piezometrico e monitoraggio qualitativo delle acque, utilizzando sia la rete di piezometri esistenti sia quelli di nuova realizzazione. Le misure dei livelli idrici consentiranno di valutare l'estensione dei coni di depressione indotti dall'emungimento e di verificare la continuità della fascia di intercettazione lungo il margine di valle, mentre il monitoraggio chimico permetterà di seguire l'evoluzione delle concentrazioni degli inquinanti e di verificare l'efficacia complessiva del sistema.

In fase iniziale, il sistema sarà gestito secondo condizioni cautelative, con frequenze di monitoraggio più elevate, al fine di acquisire un quadro conoscitivo dettagliato della risposta dell'acquifero. Successivamente, sulla base dei dati raccolti, sarà possibile stabilizzare il regime di controllo e procedere a una gestione più ottimizzata delle portate di emungimento.

La regolazione del sistema avverrà mediante la modulazione delle portate dei singoli pozzi, con l'obiettivo di garantire la continuità del richiamo idraulico senza determinare sovra-emungimenti non necessari, particolarmente critici in un contesto a bassa trasmissività. Tale approccio consente di mantenere l'efficacia del contenimento limitando al contempo i consumi energetici e l'impatto gestionale del sistema.

Il sistema sarà inoltre dotato di dispositivi di controllo e telemonitoraggio, che permetteranno la supervisione in continuo dei principali parametri di esercizio (livelli, portate, stato delle pompe), facilitando la gestione operativa e la tempestiva individuazione di eventuali anomalie.

In sintesi:

| Componente | Obiettivo | Parametri controllati | Finalità operativa |
|---|---|---|---|
| **Monitoraggio piezometrico** | Verifica comportamento falda | Livelli idrici, variazioni nel tempo | Controllo coni di depressione e continuità barriera |

| Componente | Obiettivo | Parametri controllati | Finalità operativa |
|---|---|---|---|
| **Monitoraggio qualitativo** | Controllo contaminazione | Parametri chimici acque falda ed emunte | Verifica efficacia captazione e trattamento |
| **Gestione emungimento** | Regolazione sistema | Portate pozzi, regime di esercizio | Ottimizzazione captazione e contenimento |
| **Telecontrollo** | Supervisione impianto | Stato pompe, allarmi, funzionamento | Continuità operativa e gestione anomalie |

In tale configurazione, il sistema di monitoraggio e gestione rappresenta parte integrante dell'intervento di messa in sicurezza operativa, in quanto consente di trasformare la barriera idraulica da sistema statico a sistema controllato e adattivo, in grado di rispondere alle variazioni delle condizioni idrogeologiche del sito e di garantire nel tempo l'efficacia del contenimento della contaminazione.

# 10 CONCLUSIONI

Il sistema di messa in sicurezza operativa della falda previsto in progetto è costituito dalla barriera idraulica di pozzi di emungimento e dall'impianto di trattamento delle acque di falda (TAF) di tipo chimico-fisico, dimensionato per una portata giornaliera di 50 m³/giorno e una portata nominale della linea di 5 m³/h, con scarico finale dell'effluente trattato in corpo idrico superficiale.

Le verifiche riportate ai §§ 7.3 e 8.2 sono state condotte nelle condizioni di carico inquinante più gravose tra quelle disponibili e sono riferite ai valori limite di emissione in acque superficiali di cui alla Tabella 3 dell'Allegato 5 alla Parte Terza del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i. In particolare:

- **Alluminio:** parametro critico del dimensionamento, assunto nella condizione cautelativa di 71 mg/L (carico di circa 3,55 kg/giorno), è abbattuto mediante correzione del pH con soda caustica (dosaggio di progetto pari a circa 618 mg/L di NaOH, con fattore di sicurezza 1,5), precipitazione come idrossido, coagulazione e flocculazione, separazione dei fanghi nel decantatore lamellare (carico idraulico superficiale 1,72 m³/(m²·h)) e successiva filtrazione su quarzite (6,37 m/h) e affinamento su carbone attivo (4,42 m/h), fino al rispetto del limite di 1 mg/L;
- **Ferro:** assunto pari a 45 mg/L e considerato nel calcolo del fabbisogno di soda, è rimosso per precipitazione insieme all'Alluminio nella medesima sezione chimico-fisica, nel rispetto del limite di 2 mg/L;
- **Boro e Solfati:** nella miscela reale delle acque di spurgo, che costituisce il refluo effettivamente equalizzato e alimentato all'impianto, risultano conformi ai limiti di 2 mg/L e di 1.000 mg/L; la vasca di equalizzazione, con volume utile di 10 m³ (circa 4,8 h sulla portata media giornaliera), assicura l'omogeneizzazione dei flussi provenienti dai diversi pozzi della barriera;
- **Nitriti:** il valore rilevato, pari a circa 0,58 mg/L come N, risulta inferiore al limite di 0,6 mg/L come N;
- **pH:** il valore di esercizio della sezione di reazione, indicativamente compreso tra 8,5 e 9,0, rientra nell'intervallo ammesso allo scarico (5,5–9,5).

Sulla base delle verifiche svolte si conclude che il sistema di trattamento proposto è efficace e garantisce il raggiungimento dei limiti di legge allo scarico in corpo idrico superficiale per tutti i parametri di interesse, alla portata di progetto e nelle condizioni di carico inquinante assunte per il dimensionamento.

Il rispetto dei limiti sarà documentato mediante i controlli analitici sull'acqua in ingresso e sull'effluente trattato previsti in fase di avviamento e di esercizio, mentre il sistema di automazione e telecontrollo consentirà la gestione coordinata della rete di emungimento e della linea di trattamento, a garanzia della continuità delle prestazioni nel tempo.