

## Indice del capitolo

3.	SUOLO, SOTTOSUOLO E ACQUE SOTTERRANEE .....	2
3.1.	Premesse.....	2
3.2.	Aree di interesse .....	2
3.3.	Il suolo.....	3
3.3.1.	Usi del suolo.....	4
3.3.2.	La capacità d'uso dei suoli.....	7
3.3.3.	Valore naturalistico dei suoli .....	10
3.4.	Attività sismica ed elementi neotettonici e strutturali .....	12
3.5.	Le unità geologico-stratigrafiche affioranti.....	17
3.6.	Geomorfologia .....	19
3.6.1.	Morfogenesi ed evoluzione delle forme fluviali.....	24
3.7.	Successione stratigrafica e struttura idrogeologica generale .....	26
3.7.1.	Caratteristiche litostratigrafiche dell'area interessata dalla derivazione e dalla centrale idroelettrica in progetto.....	30
3.7.2.	Caratteristiche idrogeologiche dell'area di interesse .....	31
3.7.3.	Le criticità e le emergenze idriche rilevate .....	35
3.7.4.	Vulnerabilità degli acquiferi .....	36
3.8.	La modellazione idrogeologica .....	37
3.8.1.	Caratteristiche del modello di simulazione .....	37
3.8.2.	Descrizione del modello matematico.....	39
3.8.3.	Implementazione del modello di flusso.....	40
3.8.4.	Il dominio del modello.....	40
3.8.5.	La geometria del modello.....	42
3.8.6.	Le condizioni al contorno.....	43
3.8.7.	La mesh di calcolo.....	46
3.8.8.	I parametri interni al sistema .....	47
3.8.9.	Gli stress esterni al dominio.....	48
3.8.10.	Calibrazione del modello.....	48
3.9.	Risultati delle simulazioni e aspetti previsionali .....	51
3.9.1.	Assetto piezometrico in condizione di magra assoluta.....	51
3.9.2.	Assetto piezometrico ante operam.....	52
3.9.3.	Assetto piezometrico post-operam.....	55
3.10.	Pressioni attese dal progetto .....	58
3.11.	Impatti potenziali determinati dall'opera e risposte tecniche per la loro mitigazione .....	59
3.11.1.	Fase di cantiere .....	59
3.11.2.	Fase di esercizio .....	60
3.12.	Fonti .....	61
3.13.	ALLEGATO .....	63

### **3. SUOLO, SOTTOSUOLO E ACQUE SOTTERRANEE**

#### **3.1.Premesse**

Il contenuto del presente capitolo è rivolto alla valutazione degli aspetti relativi alle componenti suolo, sottosuolo e acque sotterranee in seno all'area interessata dal progetto di derivazione idroelettrica dal fiume Adda in Comune di Castelnuovo Bocca d'Adda immediatamente a monte della sua confluenza in Po.

Particolare attenzione è stata posta nella valutazione degli effetti dell'opera progettata sul locale assetto geomorfologico ed idrogeologico, direttamente o indirettamente influenzati dall'opera stessa.

Dal confronto tra l'attuale situazione dell'area e le specifiche pressioni sull'ambiente circostante che l'opera è destinata a produrre, sono stati individuati gli impatti che si prevede possano derivare dalla realizzazione e dall'esercizio della stessa, definendo le conseguenti variazioni che potrebbe subire la locale qualità ambientale.

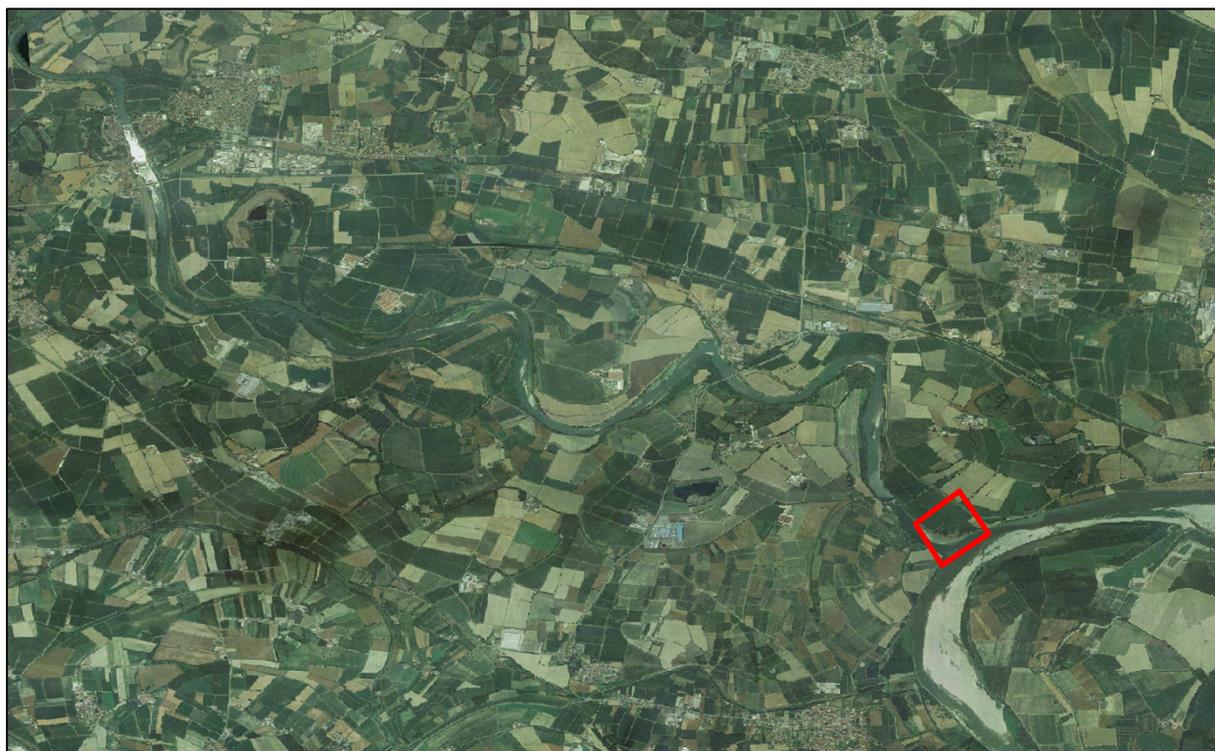
La finalità principe è stata anche quella di individuare ad ampia scala e alla scala dell'intervento gli impatti permanenti e temporanei del progetto, sia per operare secondo criteri di "compatibilità" con il naturale assetto territoriale dell'area, sia per prevedere interventi di mitigazione e di compensazione degli impatti risultanti.

#### **3.2.Aree di interesse**

L'area oggetto di studio si sviluppa lungo il corso del fiume Adda, dalla sezione di Pizzighettone fino alla confluenza in Po, allo scopo di valutare l'interazione di entrambi i corsi d'acqua con la falda, considerare l'influenza delle acque di superficie su quelle sotterranee e individuare le perturbazioni indotte nel sottosuolo dalle modifiche introdotte dal progetto.

Dal punto di vista territoriale, le analisi e le valutazioni sono state condotte a duplice scala: al fine di fornire un adeguato inquadramento territoriale dell'area in oggetto in un intorno significativamente esteso (da cui l'inquadramento geologico non può prescindere), è stato dapprima intrapreso uno studio dell'intera valle dell'Adda nei territori di Maleo e Pizzighettone (sezione di monte), di Maccastorna e Acquanegra Cremonese, di Castelnuovo Bocca d'Adda e Crotta d'Adda (sezione di valle).

A scala locale, invece, le indagini e il successivo studio di approfondimento sono stati centrati sull'area di stretto interesse della derivazione e relativa centrale in progetto.



*Figura 3. 1: Ortofoto 2012 AGEA (scaricata con QGIS). Nel rettangolo rosso è individuata l'area della centrale*

L'analisi territoriale è stata "adattata" alle esigenze e peculiarità del territorio in esame, entro il quale si svilupperà l'opera in progetto.

Per tale ragione è apparso utile approfondire problematiche di particolare rilevanza, quali gli aspetti della dinamica morfologica e l'assetto idrogeologico.

Una prima fase (analisi a larga scala) si è concretizzata con la raccolta dei dati bibliografici e delle informazioni territoriali esistenti e con l'analisi delle foto aeree disponibili; in un secondo momento, l'analisi ambientale è stata approfondita mediante specifici rilievi eseguiti direttamente a piano campagna.

Nella trattazione del presente capitolo verranno analizzati, secondo una "logica stratigrafica", dapprima i suoli, per passare al sottosuolo e alle caratteristiche geologiche e stratigrafiche del substrato e, infine, concludere l'analisi con le acque sotterranee.

### **3.3. Il suolo**

Il suolo è una componente ambientale di fondamentale importanza, che riveste un ruolo cruciale nell'equilibrio ecosistemico per le sue caratteristiche chimico-fisiche, per la sua capacità di assicurare il drenaggio, per la possibilità di stoccare CO<sup>2</sup>, ecc. Il suolo deve essere considerato come una risorsa preziosa, difficilmente rinnovabile e riproducibile.

Il comportamento del suolo e le risposte ambientali attese in funzione delle diverse forme di utilizzo dipendono dalla **tipologia di funzione ecologica ospitata**:

- *produttiva*: correlata con il concetto di fertilità e con la capacità dei suoli di sostenere e favorire la produzione di alimenti, foraggio e biomassa vegetale
- *protettiva*: connessa con la capacità dei suoli di agire da tampone e da filtro nei confronti di potenziali inquinanti. I suoli hanno un ruolo chiave nel controllare il trasporto e l'infiltrazione di inquinanti
- *naturalistica*: attinente al ruolo svolto dai suoli nella formazione degli habitat naturali, nel proteggere e salvaguardare la biodiversità e nel conservare importanti patrimoni culturali per l'umanità.

Gli strati informativi alla base delle elaborazioni del presente capitolo, predisposti da ERSAF e reperibili sul Geoportale di Regione Lombardia, sono stati elaborati con il software ArcGIS.

### **3.3.1. Usi del suolo**

Il DUSAF (Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e forestali) è una banca dati geografica di dettaglio nata nel 2000-2001 nell'ambito di un progetto promosso e finanziato dalle Direzioni Generali Territorio e Urbanistica, Agricoltura e Sistemi Verdi e Paesaggio di Regione Lombardia e realizzata dall'Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste (ERSAF) con la collaborazione dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia (ARPA). L'aggiornamento 2010 (DUSAF 4.0), da cui sono tratti i dati di seguito riportati, è stato ottenuto dalla foto interpretazione delle foto aeree Agea del 2012.

I livelli informativi DUSAF sono articolati in 3 livelli gerarchici principali coerenti con le specifiche CORINE LAND COVER, il primo dei quali comprende 5 classi generali di coperture (aree antropizzate, aree agricole, territori boscati e ambienti seminaturali, aree umide, corpi idrici), progressivamente dettagliate al 2° e 3° livello. Due ulteriori livelli (4° e 5°) di ambito locale rappresentano le specificità del territorio lombardo.

L'elaborazione dello strato informativo dell'uso del suolo (DUSAF 4) è stata effettuata su due scale di dettaglio differenti:

- *1° livello relativamente all'intero tratto fluviale d'interesse (dalla sezione di Pizzighettone alla foce dell'Adda in Po) distinguendo cinque macrocategorie di coperture.*

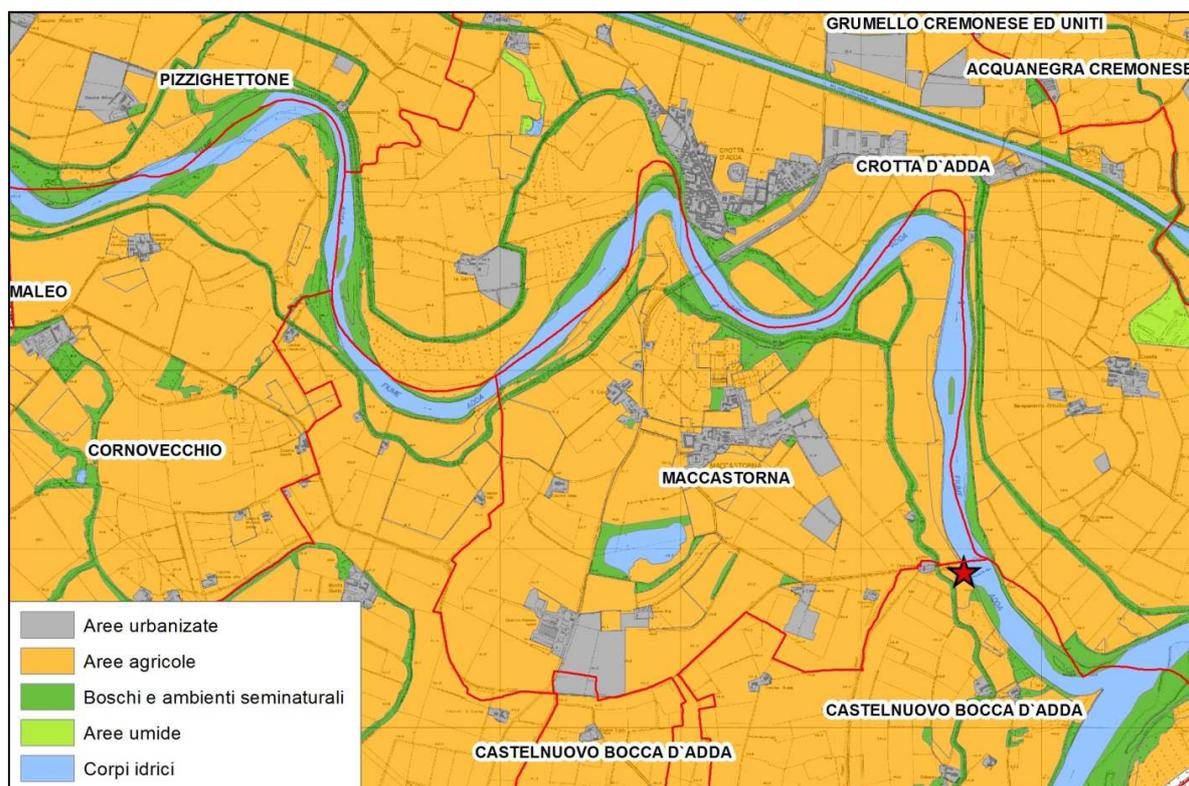


Figura 3. 2: Elaborazione dello strato informativo DUSAF 4, rappresentazione dei usi di suolo (1° livello) lungo il tratto di fiume interessato con indicazione della collocazione dell'impianto in progetto

E' evidente il contesto prevalentemente rurale con presenza predominante di aree agricole all'interno delle quali si snoda il fiume Adda. La vegetazione naturale e seminaturale si sviluppa in modo piuttosto sporadico e concentrata principalmente lungo i corsi d'acqua o in corrispondenza dei paleo meandri; a scala vasta sono inoltre presenti alcune aree umide, caratterizzate da una soggiacenza limitata della falda.

- 4° e 5° livello relativamente all'area in cui si colloca l'impianto in progetto (il 2° e 3° livello, a scala locale, non aggiungono ulteriori informazioni rispetto al 4° e 5° livello):

Le opere in progetto si collocano in aree agricole definite "seminativi semplici". A nord e a ovest della centrale sono indicate aree destinate all'arboricoltura da legno (pioppeti) e più a sud sono presenti formazioni di vegetazione ripariale e un'area estesa di pioppeti. In corrispondenza di quest'ultimi elementi, l'alveo è caratterizzato dalla presenza di "spiagge, dune o alvei ghiaiosi" e di una fascia di vegetazione dei greti.

Quadro di riferimento ambientale

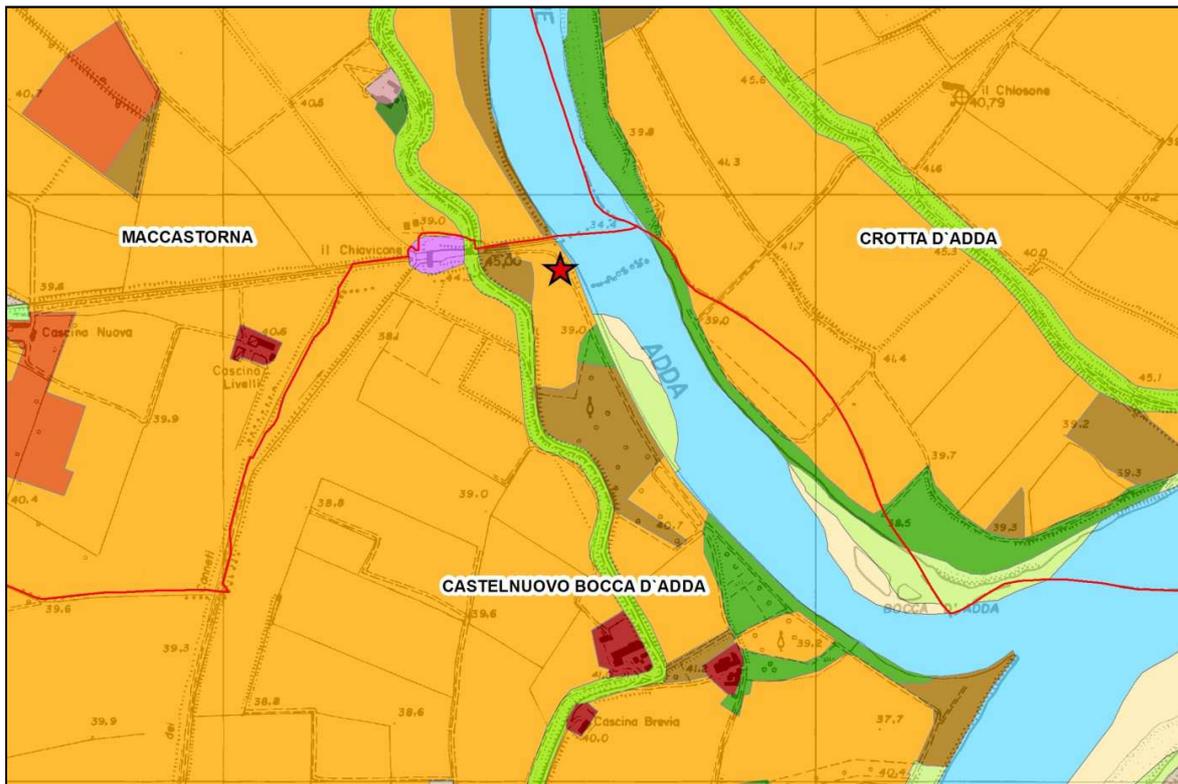


Figura 3. 3:: Elaborazione dello strato informativo DUSAF 4, rappresentazione dei usi di suolo (4° e 5° livello), dettaglio dei dintorni dell'impianto in progetto

- Alvei fluviali e corsi d'acqua artificiali
- Cascine
- Insediamenti produttivi agricoli
- Impianti tecnologici
- seminativi semplici
- pioppeti
- cespuglieti in aree di agricole abbandonate
- aree degradate non utilizzate e non vegetate
- spiagge, dune ed alvei ghiaiosi
- boschi di latifoglie a densità media e alta
- formazioni ripariali
- orti familiari
- vegetazione degli argini sopraelevati
- vegetazione dei greti

### 3.3.2. La capacità d'uso dei suoli

Il territorio regionale della Lombardia è stato classificato da ERSAF allo scopo di evidenziare i **rischi di degradazione** che possono derivare da usi inappropriati. La **capacità d'uso dei suoli** (Land Capability Classification, LCC) esprime le potenzialità produttive per utilizzazioni di tipo agro-silvo-pastorale sulla base di una gestione sostenibile, cioè conservativa, della risorsa suolo.

Per la valutazione secondo il modello interpretativo proposto sono stati considerati parametri sia fisici e chimici del suolo (profondità, pietrosità, fertilità), sia ambientali (pendenza, rischio di erosione, inondabilità, limitazioni climatiche) al fine di individuare i suoli agronomicamente più pregiati:

Parametro	Descrizione
Profondità utile	Esprime la profondità del volume di suolo esplorabile dalle radici delle piante
Tessitura superficiale	Esprime le situazioni di tessitura dell'orizzonte superficiale che limitano la lavorabilità dei suoli agricoli
Scheletro	Esprime il contenuto di scheletro (ghiaie, ciottoli e pietre) nell'orizzonte superficiale considerato limitante per le lavorazioni e l'approfondimento radicale
Pietrosità e rocciosità superficiale	Esprime il contenuto di pietre con diametro >7,5cm* e la classe di ingombro degli affioramenti rocciosi presenti alla superficie del suolo (*le pietre con dimensioni inferiori a 7,5 cm non ostacolano l'utilizzo delle macchine)
Fertilità	Intesa come fertilità chimica legata a caratteri del suolo solo in parte modificabili mediante l'apporto di correttivi e/o ammendanti. In particolare si considerano: pH, CSC, TSB valutati nell'orizzonte superficiale, CaCO <sub>3</sub> totale come valore medio ponderato nel 1° metro di suolo
Drenaggio	L'attitudine del suolo a smaltire l'acqua che contiene in eccesso; la presenza di falde poco profonde condiziona negativamente tale possibilità. Fornisce utili indicazioni sulla capacità del suolo di trattenere l'acqua di pioggia e/o di irrigazione. Esprime le classi di drenaggio considerate limitanti per gli usi agro-silvo-pastorali.
Inondabilità	Viene indicata la frequenza dell'evento e la sua durata; esprime le classi di inondabilità considerate limitanti per gli usi agro-silvo-pastorali.
Limitazioni climatiche	Esprime le classi di limitazioni climatiche capaci di condizionare la gamma delle colture praticabili o di determinare un fabbisogno o un numero maggiore delle stesse pratiche colturali richieste in altre parti della pianura
Pendenza media	Esprime le classi di pendenza che possono predisporre il suolo a fenomeni erosivi
Erosione	Esprime la suscettività all'erosione idrica superficiale e di massa (espressa come profonda); la percentuale indica la superficie dell'unità cartografica interessata da fenomeni erosivi.
AWC	Esprime i contenuti d'acqua che determinano limitazioni per le colture e richiedono pertanto apporti idrici per evitare stress alle piante

Quadro di riferimento ambientale

Oltre agli 11 parametri che concorrono alla definizione della classe di capacità d'uso dei suoli, il modello interpretativo individua quattro sottoclassi relative a possibili limitazioni legate ai fattori climatici, rischio di erosione, caratteristiche negative dei suoli o l'eccesso d'acqua nel profilo di suolo, indicate con una lettera minuscola a fianco della classe attribuita.

La classe di capacità d'uso è determinata da quella in cui ricade il fattore (parametro) più limitante										
codice limitazione	Classi LCC ▶	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	sotto classi
	Parametri ▼	Suoli adatti all'uso agricolo				Suoli adatti al pascolo e alla forestazione		Suoli inadatti ad usi agro-silvo-pastorali		
1	Prof. utile (cm)	>100	>60 e ≤100	≥25 e ≤60		<25				s <sup>(5)</sup>
2	Tessitura <sup>(1)</sup> orizzonte superficiale (%)	Argilla+Limo<70 Argilla<35 Limo<60; Sabbia<85	Argilla+Limo≥70 35≤Argilla<50 Limo<60; Sabbia<85			Argilla≥50 Limo≥60 Sabbia≥85				
3	Schel. orizzonte superficiale (%)	≤15	>15 e ≤35	>35 e ≤70		>70				
4	Pietrosità % <sup>(2)</sup>	≤0,1	>0,1 e ≤3	>3 e ≤15		>15 e ≤50		>50		
	Rocciosità %	≤2			>2 e ≤25		>25 e ≤50		>50	
5	Fertilità <sup>(3)</sup> Orizzonte superficiale	5,5<pH<8,5 TSB>50% CSC>10meq CaCO <sub>3</sub> ≤25%	4,5≤pH≤5,5 35<TSB≤50% 5<CSC≤10meq CaCO <sub>3</sub> >25%	pH<4,5 o pH>8,4 TSB≤35% CSC≤5meq						
6	Drenaggio	buono	mediocre moder. rapido	rapido lento	molto lento	impedito				w <sup>(6)</sup>
7	Inondabilità	assente	lieve	moderata	alta	molto alta				
8	Limitazioni climatiche	assenti	lievi	moderate		forti		molto forti		c
9	Pendenza (%)	≤2	>2 e ≤8	>8 e ≤15	>15 e ≤25	≤2	>25 e ≤45	>45 e ≤100	>100	e
10	Erosione	assente		debole	moderata	assente	moderata	forte	molto forte	
11	AWC (cm) <sup>(4)</sup>	>100		>50 e ≤100	≤50				s	

(1) è sufficiente una condizione; (2) Considerare solo la pietrosità maggiore o uguale a 7.5 cm.

(3) pH, TSB e CSC riferiti all'orizzonte superficiale; CaCO<sub>3</sub> al 1°m di suolo (media ponderata); è sufficiente una condizione

(4) Riferita al 1°m di suolo o alla prof utile se < a 1m; AWC non si considera se il drenaggio è lento, molto lento o impedito

(5) Quando la prof utile è limitata esclusivamente dalla falda (orizz. idromorfo) indicare la sottoclasse w.

(6) Quando la limitazione è dovuta a drenaggio rapido o moderatamente rapido, indicare la sottoclasse s

Significato delle sottoclassi (tipo di limitazione)	Regole nella designazione delle sottoclassi
c = limitazioni dovute a sfavorevoli condizioni climatiche	Quando uno o più tipi di limitazioni concorrono in modo equivalente a determinare la classe, si assegna un doppio suffisso alla sottoclasse (non più di 2), osservando queste priorità: e, w, s, c
e = limitazioni dovute al rischio di erosione	
s = limitazioni dovute a caratteristiche negative de suolo	
w = limitazioni dovute all'eccesso di acqua nel profilo di suolo (interferenza negativa sugli apparati radicali delle piante)	

Figura 3. 4: Modello interpretativo della Capacità d'uso dei suoli (fonte: ERSAF)

La classificazione prevede una suddivisione in 8 classi, distinte ulteriormente in suoli adatti (classi 1-4), adatti con limitazioni (classi 5-7) e non adatti (classe 8) all'uso agricolo:

**Suoli adatti all'agricoltura**

1	Suoli che presentano pochissimi fattori limitanti il loro uso e che sono quindi utilizzabili per tutte le colture.
2	Suoli che presentano moderate limitazioni che richiedono una opportuna scelta delle colture e/o moderate pratiche conservative.
3	Suoli che presentano severe limitazioni, tali da ridurre la scelta delle colture e da richiedere speciali pratiche conservative.
4	Suoli che presentano limitazioni molto severe, tali da ridurre drasticamente la scelta delle colture e da richiedere accurate pratiche di coltivazione.

### Suoli adatti al pascolo ed alla forestazione

5	Suoli che pur non mostrando fenomeni di erosione, presentano tuttavia altre limitazioni difficilmente eliminabili tali da restringere l'uso al pascolo o alla forestazione o come habitat naturale.
6	Suoli che presentano limitazioni severe, tali da renderli inadatti alla coltivazione e da restringere l'uso, seppur con qualche ostacolo, al pascolo, alla forestazione o come habitat naturale.
7	Suoli che presentano limitazioni severissime, tali da mostrare difficoltà anche per l'uso silvo pastorale.

### Suoli inadatti ad utilizzazioni agro-silvo-pastorali

8	Suoli che presentano limitazioni tali da precludere qualsiasi uso agro-silvo-pastorale e che, pertanto, possono venire adibiti a fini creativi, estetici, naturalistici, o come zona di raccolta delle acque. In questa classe rientrano anche zone calanchive e gli affioramenti di roccia.
---	--

L'area che ospiterà la centrale e le opere di derivazione ricade (come l'intero tratto fluviale dall'ultimo meandro nei pressi di Crotta d'Adda fino alla confluenza Adda-Po) in **classe 4** di capacità d'uso dei suoli (**suoli che presentano limitazioni molto severe**, tali da ridurre drasticamente la scelta delle colture e da richiedere accurate pratiche di coltivazione).

Per quanto riguarda il segmento fluviale interessato dal rigurgito dovuto alla traversa, un breve tratto a valle dell'abitato di Crotta d'Adda ricade in classe 2 e in sponda sinistra in classe 3: si tratta di aree esterne alla golena o rialzate rispetto ai ripiani alluvionali, come tali preservati dalla dinamica morfologica e da quella deposizionale che, in occasione delle ricorrenti piene, altera negativamente le caratteristiche dei suoli. Il restante tratto di golena a monte della sezione Crotta d'Adda-Maccastorna ricade interamente in classe 5.

A tutti i suoli nell'area d'interesse, inoltre, è stata associata la sottoclasse W (limitazioni dovute all'eccesso di acqua nel profilo di suolo; interferenza negativa sugli apparati radicali delle piante), evidenziando quanto verrà meglio descritto nei capitoli sull'idrogeologia in relazione alla soggiacenza della falda e alle scarse capacità di drenaggio di un'ampia area di valle alluvionale. Il tratto a valle di Crotta d'Adda, inoltre, presenta limitazioni dovute a caratteristiche negative del suolo (sottoclasse S).

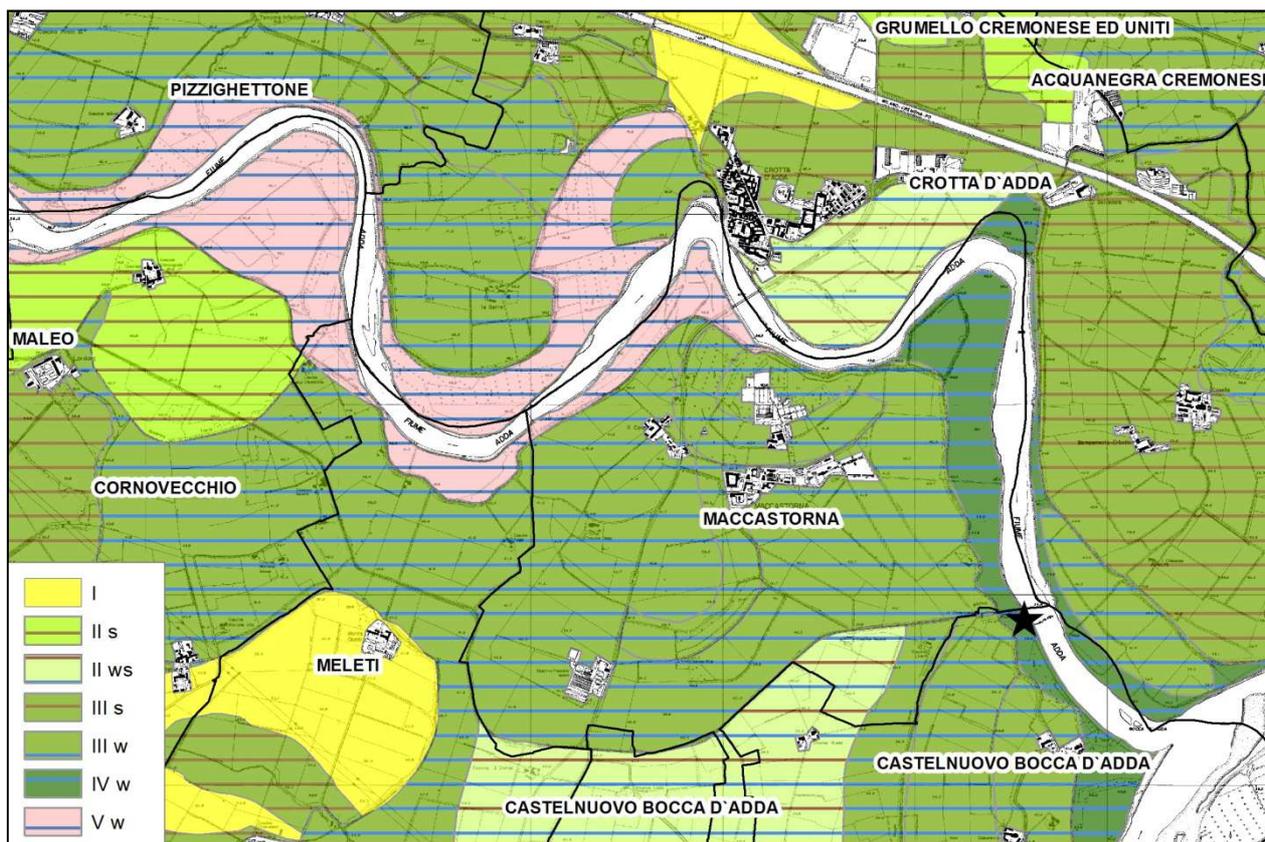


Figura 3. 5: Capacità d'uso dei suoli (fonte: Geoportale Regione Lombardia - Basi informative dei suoli)

### 3.3.3. Valore naturalistico dei suoli

Il **valore naturalistico** è correlato con il ruolo che hanno i suoli nel formare degli habitat naturali, nel proteggere la biodiversità e nel conservare importanti patrimoni culturali per l'umanità.

Questa interpretazione classifica i suoli in funzione della presenza di caratteri riconducibili alla pedogenesi, i quali determinano l'appartenenza a determinate classi tassonomiche del sistema classificativo americano Soil Taxonomy.

La collocazione dei suoli entro tali, specifici, gruppi tassonomici rivela che essi si sono formati, in tempi molto lunghi, per l'azione di processi pedogenetici non più attivi e pertanto si trovano in disequilibrio sotto le attuali condizioni ambientali. In quanto testimoni di passate epoche la loro perdita sarebbe irreversibile e comporterebbe una perdita della qualità del paesaggio. Altri caratteri del suolo, non direttamente collegati al passato, rivelano tuttavia ambienti significativi per la biodiversità e lo stoccaggio del carbonio organico nel suolo.

La presenza o meno di questi peculiari caratteri pedogenetici comporta l'attribuzione dei suoli ad una delle tre classi di valore naturalistico, segnalando così il livello di attenzione opportuno.

CLASSI VALORE NATURALISTICO	GRUPPI DI SUOLI E LORO CARATTERI
<b>ALTO</b>	Suoli appartenenti ai grandi gruppi <b>Frag-</b> o <b>Plinth-</b> o ai sottogruppi <b>Fragic</b> o <b>Plinthic</b> degli Alfisols e Ultisols
	Suoli con orizzonte a <b>fragipan</b> , con <b>plinthite</b> o <b>pseudo plinthite</b> , con <b>orizzonte glossico</b>
	<b>Histosols</b> e suoli appartenenti ai grandi gruppi <b>Hist-</b>
	Suoli appartenenti a un sottogruppo " <b>Pachic humic</b> " (ex Pachic o Cumulic Haplumbrepts)
	<b>Spodosols</b>
<b>MODERATO</b>	Suoli appartenenti ai grandi gruppi <b>Pale-</b> o <b>Rhod-</b> degli Alfisols e Ultisols
	Suoli appartenenti ai sottordini <b>Aqu-</b>
	Suoli appartenenti al sottogruppo <b>Argic</b> degli Psammenti
	Suoli con orizzonte argillico appartenenti a uno dei sottogruppi: <b>psammentic</b> , <b>arenic</b> , <b>grossarenic</b>
	Suoli appartenenti al sottogruppo <b>petrocalcic</b> dei GG Calciustepts, Calcixerepts, Calciclusterts, Calcixererts, Haplusterts
	Suoli con orizzonte <b>umbrico</b> (SG " <b>humic</b> " -ex Umbrepts) e <b>Humults</b>
	<b>Vertisols</b>
<b>BASSO</b>	Altri suoli

Figura 3. 6: Modello interpretativo del valore naturalistico dei suoli (fonte: ERSAF)

L'area interessata dal progetto e l'intero tratto fluviale considerato è *classificata con valore naturalistico basso*; si tratta, infatti, di suoli generalmente poco evoluti, formati sui depositi alluvionali recenti e, in parte, ancora coinvolti nella dinamica fluviale.

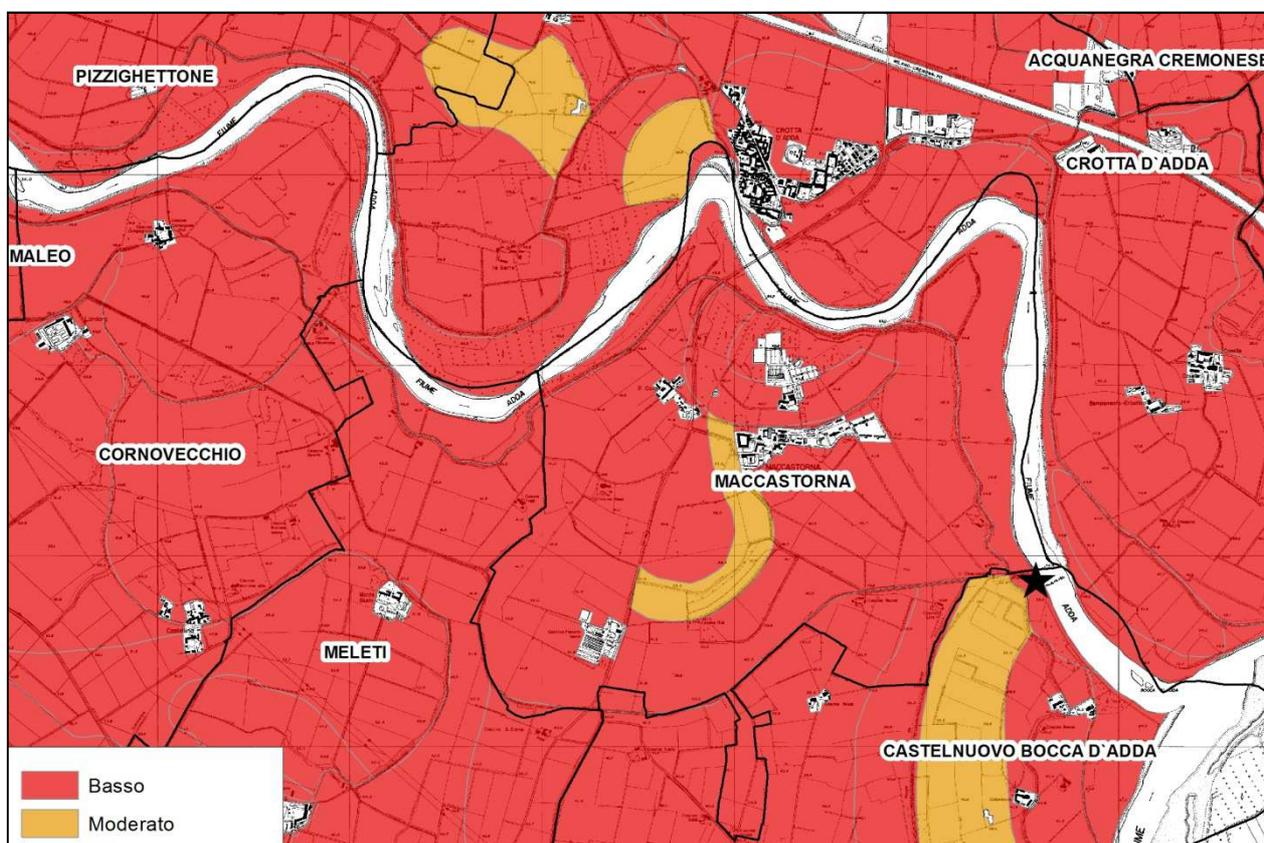


Figura 3. 7: valore naturalistico (fonte: Geoportale Regione Lombardia - Basi informative dei suoli)

### **3.4. Attività sismica ed elementi neotettonici e strutturali**

Il territorio in questione si inserisce nelle ampie strutture regionali della pianura: nel raggio di alcuni chilometri affiorano infatti solo depositi continentali di origine fluviale che, in questa zona, sono caratterizzati da condizioni di giacitura decisamente uniformi.

Tuttavia, al di sotto dei depositi sciolti che affiorano nell'ambito di indagine (dello spessore di migliaia di metri), è presente un substrato di origine marina, di cui le prospezioni geofisiche, eseguite nei decenni scorsi a scopo di ricerca petrolifera, hanno permesso di rilevare una situazione strutturale complessa e non priva di significato neotettonico.

Lo sviluppo della coltre alluvionale, sulla quale agisce la dinamica morfologica, è influenzato dalla vicinanza del margine appenninico e dalla presenza di particolari strutture sepolte, coinvolte nella tettonogenesi terziaria e quaternaria appenninica: la pianura rappresenta il risultato della fase di riempimento (dapprima marino e poi continentale) dei bacini ampiamente subsidenti delle avanfosse padane.

Lo sviluppo geologico di questo lembo di Pianura Padana, infatti, è strettamente legato all'evoluzione della catena appenninica in una fase tardiva della sua storia tettonogenetica e rappresenta il risultato del riempimento cominciato nel Pliocene, dapprima marino e poi continentale, dei bacini ampiamente subsidenti delle avanfosse padane: il materasso alluvionale è il risultato della fase di riempimento dei bacini di piggy-back, ospitati sui thrust embriciati che costituiscono la struttura del substrato sepolto.

In linea generale, l'evoluzione geologica della Pianura Padana deriva dalla convergenza della placca Africana e di quella Europea; il bacino sedimentario corrispondente alla Pianura Padana si colloca nell'estremità settentrionale della microplacca Adria (un promontorio della zolla africana). Sin dal tardo Cretacico, la Pianura Padana ha rappresentato la parte frontale di due catene di opposta convergenza: l'Appennino settentrionale (N-vergente) e le Alpi meridionali (S-vergenti). Lo scontro tra le due catene ha strutturato la serie di bacini di piggy-back sopra menzionati, ospitati sul fronte della placca Adria, dove una potente successione sin-orogenetica è andata progressivamente depositandosi.

Studi sulla base della sequenza plio-quaternaria nella porzione centrale e meridionale della Pianura Padana (Pieri e Groppi, 1981) mostrano lo sviluppo di tre grandi archi costituiti da thrust ciechi N-vergenti che costituiscono il fronte più avanzato della struttura appenninica settentrionale: l'Arco del Monferrato (Elter e Pertusati, 1973), l'Arco Emiliano e l'Arco Ferrarese-Romagnolo.

In tale contesto, l'area d'interesse si sviluppa sul fronte settentrionale dell'Arco Emiliano; in particolare, il sottosuolo a N dell'Adda è interessato da un sistema compressivo modellato nei terreni pre-quaternari sepolti (un classico thrust costituito da un'anticlinale e da una sinclinale

Quadro di riferimento ambientale

separate da una faglia inversa) ad orientamento WNW-ESE e chiara vergenza settentrionale, caratterizzato da fenomeni di ondulazione assiale.

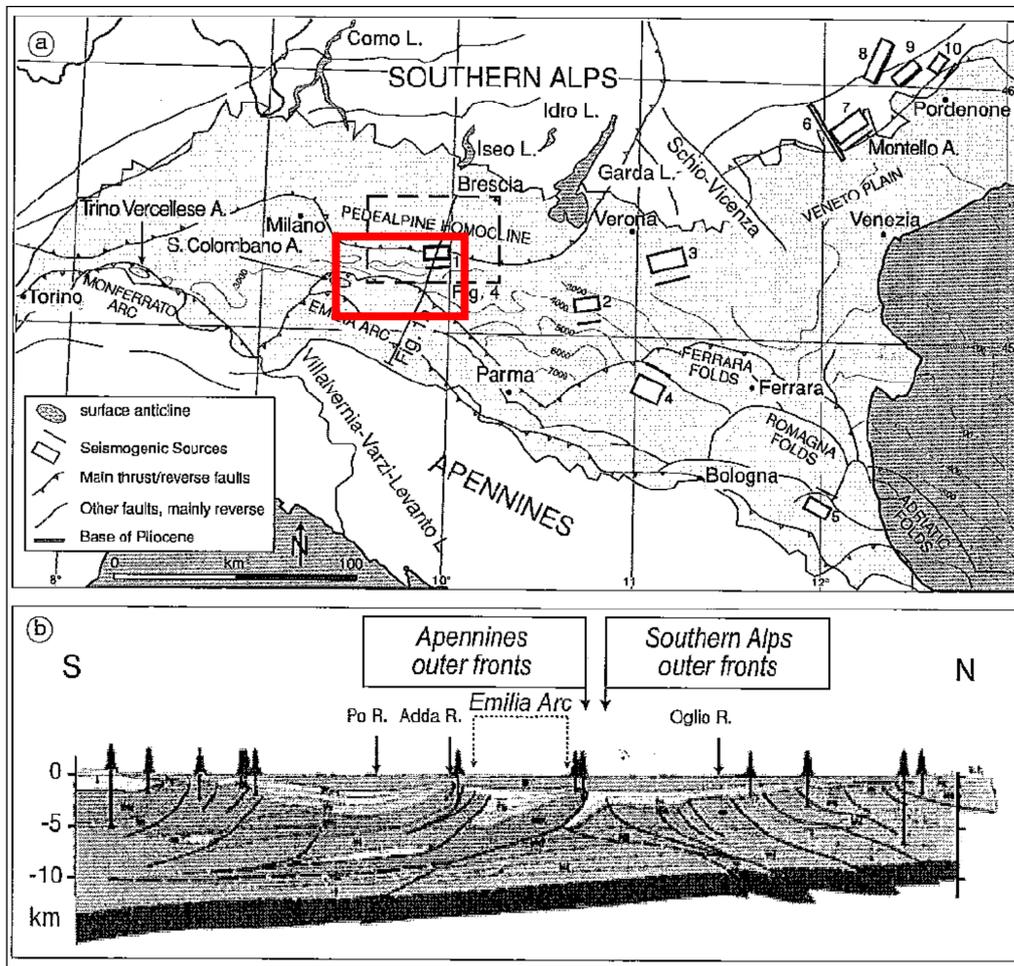


Figura 3. 8: Schema tettonico del substrato della Pianura Padana ("Pieri and Groppi, 1981" in "Burrato et al.", 2003)

Sebbene la definitiva strutturazione del substrato sepolto venga tradizionalmente associata a una fase tettonica pliocenica media-inferiore (databile dalla discordanza esistente tra i sedimenti plio-pleistocenici marini ed il substrato più antico), è opinione sempre più diffusa che i depositi alluvionali quaternari siano stati coinvolti in fasi neotettoniche, condizionando così anche la morfogenesi più recente (Braga et al., 1976; Pieri e Groppi, 1981; Burrato et. al., 2003).

A sostegno di questo fatto, molti Autori indicano sia gli affioramenti di sedimenti pre-würmiani che emergono sul "Livello Fondamentale della Pianura" in prossimità degli assi di alcune strutture positive del substrato, sia alcune sintomatiche "anomalie" che si manifestano in taluni tratti dei principali corsi d'acqua.

Tra i condizionamenti strutturali, il più noto ed evidente è l'antico percorso del Serio, noto anche come "Serio di Grumello": nell'Olocene inferiore il Serio sfociava direttamente in Po ad Acquanegra Cremonese percorrendo una direzione N-S sino a giungere a monte di Roggione, ove piegava verso E per assumere un percorso sub-parallelo alla struttura tettonica sepolta innanzi citata (fenomeno interpretabile come una "diversione" fluviale, condizionata dal substrato sepolto).

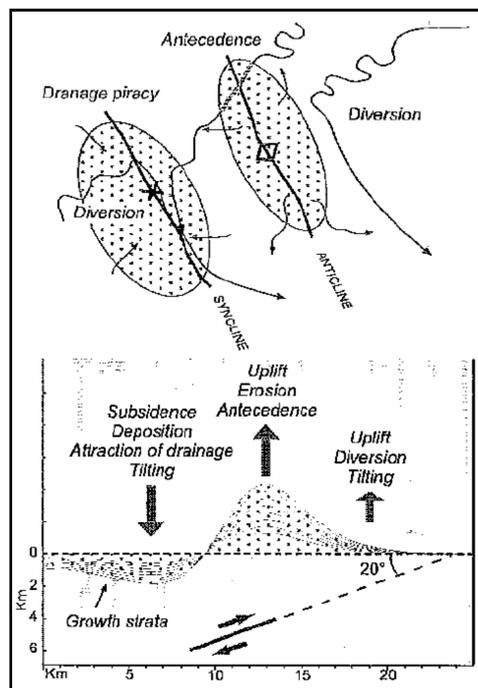


Figura 3. 9: Meccanismi di condizionamento tettonico della rete idrografica (Burrato et al., 2003)

In una fase successiva il corso d'acqua è riuscito a superare l'ostacolo morfologico (grazie anche alla complicità dei fenomeni di sovralluvionamento che caratterizzano i fiumi di pianura del tipo a meandri, quali il Serio, l'Adda e il Po), accorciando il proprio percorso sino a sfociare in Adda nei pressi di Pizzighettone: del Serio di Grumello è rimasta così una valle "sospesa" sulla più recente valle dell'Adda e del Serio Morto, all'interno della quale si leggono ancora taluni percorsi fluviali e le marcate scarpate di erosione ai margini dell'antica valle che conserva il tipico connotato "a cassetta".

Dopo una certa persistenza all'interno della nuova valle con direzione circa NNE-SSW (la quale conduceva il Serio alla propria foce nei pressi di Pizzighettone), il corso d'acqua ha abbandonato il suo percorso (anche in questo caso si può ipotizzare un fenomeno di condizionamento neotettonico) per sfociare in Adda molto più a N, nei pressi di Montodine, lasciando come testimone l'attuale Serio Morto e numerosi paleo-alvei.

Anche la stessa direzione dell'Adda potrebbe essere il risultato sinergico fra eventi neotettonici e fenomeni morfogenetici e sedimentari: sovrapponendo il Fiume e la carta tettonica del substrato sepolto si può osservare come la direzione media sino a Formigara sia sub-parallela agli assi strutturali sepolti, deviando bruscamente verso S all'ingresso in Comune di Pizzighettone. Alla latitudine di Maleo, l'Adda assume nuovamente una direzione verso quadranti orientali, sub-parallelo agli assi strutturali profondi.

Non si esclude che la stessa serie di ripiani terrazzati olocenici (in corrispondenza della culminazione assiale della struttura profonda) presenti nella zona di Tencara, tra Pizzighettone e Crotta d'Adda, sia il prodotto di un progressivo ringiovanimento del territorio: letto in quest'ottica, il fiume Adda potrebbero essersi progressivamente "incassato" nei depositi pleistocenici a seguito di successivi innalzamenti del substrato sotto spinte tettoniche recenti, databili tra il Pleistocene superiore (in una fase wurmiana tardiva) e l'Olocene medio.

Nonostante le esili dimensioni, nel quadro di condizionamenti neotettonici assume un particolare significato la scarpata morfologica (di altezza massima pari a 1,5-2,0 m) sviluppata nella porzione di Livello Fondamentale tra Roggione e C.na Tencara Superiore. Lo sviluppo della scarpata, infatti, è pressoché coincidente e parallelo alla faglia inversa sepolta: questa scarpata, che si delinea immediatamente a E di C.na Macallè, presenta andamento WNW-ESE e una marcata continuità sino all'incrocio con il Canale Navigabile (evidente elemento di disturbo antropico). Con la stessa direzione, poche centinaia di metri più a S, si sviluppano gli stretti e antichi ripiani terrazzati dell'Adda, nuovamente sospesi sulle alluvioni medio-recenti del Fiume.

Altrettanto interessante, in termini neo-tettonici, è lo sviluppo della scarpata morfologica su cui sorge l'abitato di Crotta d'Adda, in corrispondenza di uno "sperone" del terrazzo wurmiano in prossimità della riva concava di un meandro "anomalo" dell'Adda: pare evidente anche in questo caso un condizionamento del substrato sepolto, in grado di spingere il fiume Adda, in corrispondenza degli assi strutturali di una dorsale sepolta, in una posizione così asimmetrica rispetto alla propria ampia valle olocenica.

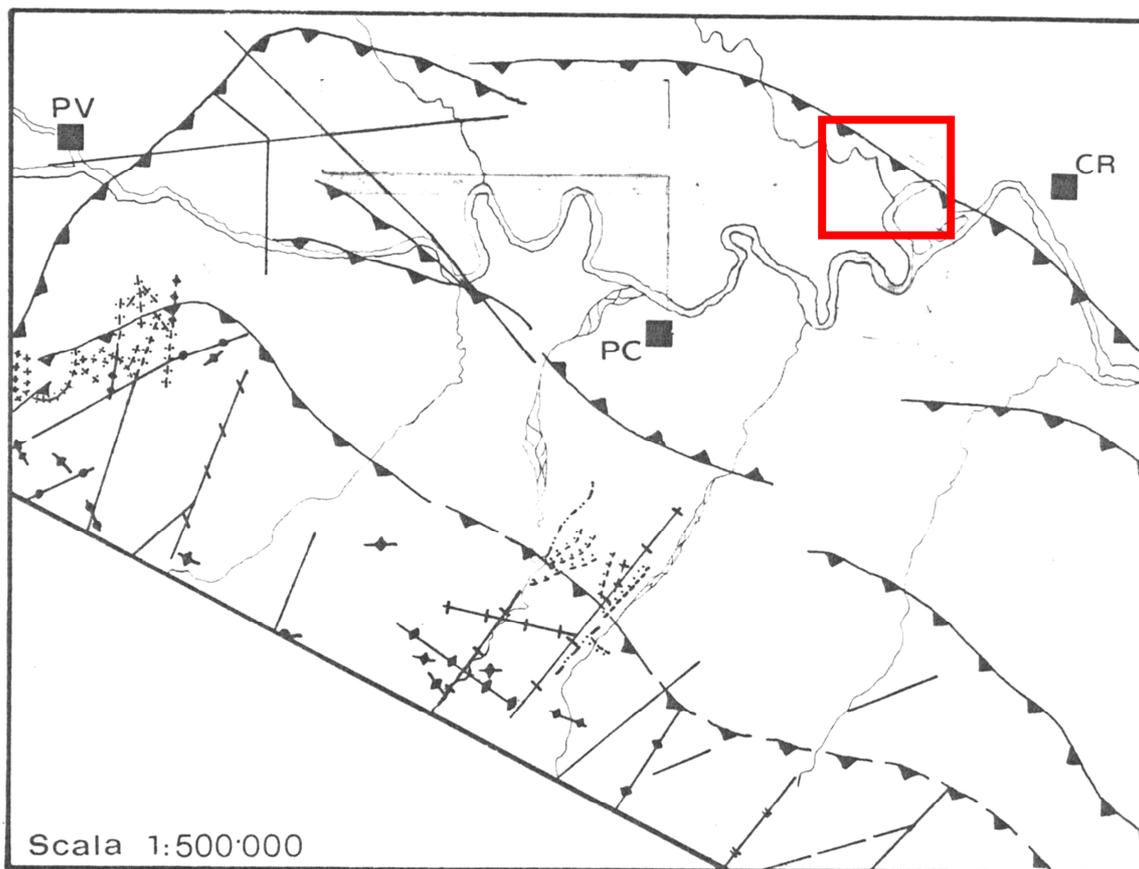


Figura 3. 10: "Carta delle faglie e delle lineazioni classificate" redatta per conto dell'ENEL dalla GEOTECNECO (allegata alla "Carta della Neotettonica d'Italia, 1976") in "Cremonini Bianchi, A.A. 1980-81"

Nonostante ciò, non si rilevano concrete situazioni di rischio derivanti da sismi di superficie; a tal proposito va considerato come anche nelle aree sismicamente più attive della penisola italiana, i tempi di ritorno per i grandi terremoti siano superiori a 1000 anni, mentre l'attuale catalogo storico dei terremoti (considerato completo per eventi di magnitudo superiore a 5.5 solo dopo il 17° secolo) potrebbe non coprire adeguatamente il ciclo sismico della maggior parte delle aree sismogenetiche padane. Tuttavia, il confronto tra le deformazioni verticali a lungo termine (a partire dal Pleistocene superiore) e quelle a breve termine, calcolato utilizzando correlazioni geomorfologiche e misure geodetiche (De Martini et al., 1998), dimostra come per molti dei thrust attivi una buona parte dell'energia venga rilasciata in modo asismico: tale fattore giustificerebbe comunque l'attività neotettonica e il condizionamento della sedimentazione e dei lineamenti morfologici di superficie (Burrato et al., 2003), pur riducendo il rischio sismico a cui è esposta la Pianura Padana.

### 3.5. Le unità geologico-stratigrafiche affioranti

Come evidenziato dalla cartografia geologica ufficiale (Carta Geologica della Lombardia scala 1:250.000 e Foglio n. 60 "Piacenza" della C.G.I. alla scala 1:100.000), le unità affioranti in un intorno significativo dell'area di analisi sono tutte di origine continentale (figura 3.11).

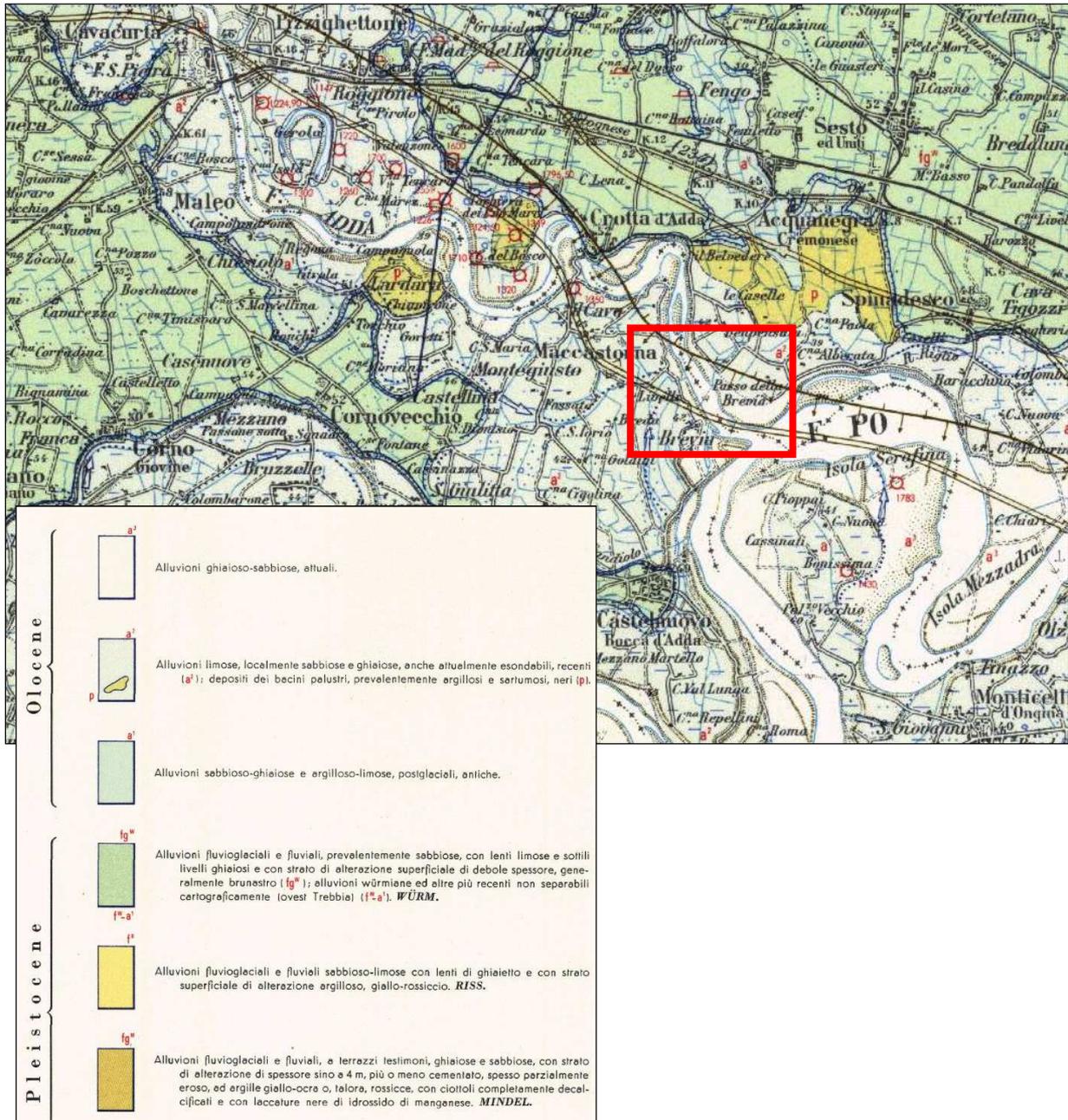


Figura 3. 11: Carta Geologica della Lombardia scala 1:250.000 e Foglio n. 60 "Piacenza" della C.G.I. alla scala 1:100.000

Tali unità, caratteristiche di ambienti deposizionali fluviali e di età compresa tra il Pleistocene superiore e l'Olocene, vengono descritte dagli Autori della Carta Geologica d'Italia nel seguente modo:

- **Alluvioni attuali:** coincidono con i depositi presenti all'interno dell'alveo inciso (barre di accrescimento spondale, isole, ecc.); in genere sono costituiti da depositi sabbiosi o sabbioso-ghiaiosi del greto dei corsi d'acqua, in particolare dell'Adda e del Po.
- **Alluvioni medio-recenti** (Olocene): corrispondono ai depositi affioranti con continuità lungo fasce più o meno ampie sulle sponde dei fiumi Adda e Po e sono costituiti da sedimenti sabbiosi, talora ghiaiosi, terrazzati (lungo le sponde) sugli alvei attuali, anche attualmente esondabili, fissati e coltivati. Costituiscono una sintomatica anomalia le aree vallive comprese tra la località Belvedere di Crotta d'Adda e Acquanegra Cr.se, in corrispondenza dell'antica foce del Serio (noto anche come "Serio di Grumello") in cui sono diffusamente presenti depositi argillosi e siltuosi (caratteristici dei bacini palustri) che fungono da copertura metrica ai sottostanti depositi alluvionali granulari. L'informazione, particolarmente evidente nella cartografia geologica ufficiale (figura 3.11), trova un suo riscontro nella stratigrafia dei sondaggi (successivamente allestiti a piezometri) commissionati da AIPo nell'area compresa fra C.na Belvedere e C.na Caselle, resi disponibili dall'Agenzia Interregionale per lo sviluppo del presente studio (riprodotti in allegato), tratti in stralcio da "*Studio di identificazione e coordinamento delle indagini geognostiche necessarie a valutare le caratteristiche del terreno in prossimità del tratto pensile del Canale navigabile Pizzighettone-Cremona*", ottobre 2012).
- **Alluvioni antiche** (Olocene inferiore): si tratta dei depositi sabbioso-argillosi, con lenti a ciottoli minuti, costituenti un basso e ristretto terrazzo lungo gli alvei dei corsi d'acqua principali. Insieme alle alluvioni attuali e recenti costituiscono l'intervallo cronostratigrafico olocenico del territorio cremonese, sebbene non affiorino nell'area oggetto dell'intervento.
- **Fluvioglaciale Würm** (Pleistocene superiore): corrispondono ai depositi sabbioso-argillosi, con lenti a ciottoli minuti, caratterizzati da suolo bruno o brunastro, talora rossastro per dilavamento di paleosuoli preesistenti a monte. Esso forma l'esteso livello fondamentale della Pianura, separato da alte scarpate rispetto ai corsi d'acqua principali.

Il materiale che costituisce i depositi alluvionali ha una provenienza alpina per l'area a nord del Po e appenninica per quella a sud, anche se, a causa delle frequenti divagazioni del Fiume, non è possibile definire una netta linea di demarcazione fra le aree a diversa alimentazione.

### **3.6. Geomorfologia**

L'ossatura della pianura lombarda è costituita da depositi fluvio-glaciali tardo pleistocenici che definiscono un piano caratterizzato da una marcata omogeneità planoaltimetrica noto in letteratura con il nome di "Livello fondamentale della Pianura (L.F.d.P.)" o "Piano Generale Terrazzato (P.G.T.)". Non più interessato dall'idrografia principale e caratterizzato da tracce di idrografia abbandonata, il Livello Fondamentale della Pianura è indubbiamente il prodotto di eventi polifasici e la sua superficie (continua ed arealmente estesa) testimonia l'arresto di ogni fase di aggradazione fluviale verificatasi un momento prima dell'instaurarsi di condizioni fortemente erosive da parte degli affluenti alpini del Po (tra cui l'Adda): quest'ultimi, infatti, scorrono entro larghe e caratteristiche "valli a cassetta", la cui origine va collegata ai fenomeni di ringiovanimento (che ha dato origine all'infossamento dei fiumi) nell'Olocene. Nella realtà, il quadro morfologico si complica alcuni chilometri a monte della confluenza dell'Adda in Po, essendo il territorio il prodotto morfologico e deposizionale ora di un fiume, ora dell'altro, i quali, durante l'Olocene, potevano variare il loro punto di confluenza, divagando ampiamente entro le proprie alluvioni.

Dal punto di vista fisiografico, infatti, l'area esaminata è imperniata sull'esistenza della depressione nella quale scorre il Po: a grandi linee, quest'ultima funge da asse di simmetria fra la pianura cremonese e quella piacentina. La prima degrada infatti verso sud, mentre la seconda si comporta in maniera esattamente opposta. La valle fluviale all'interno della quale scorre il Po, comunque, non presenta un unico asse morfologico coincidente con il corso del fiume, bensì numerosi avvallamenti e rilievi (dell'ordine del metro): questi sono il prodotto morfogenetico e sedimentario di ripetute divagazioni fluviali (paleovalvei).

Il paesaggio fisico è quindi caratterizzato da una serie di terrazzi morfologici a forma di ripiani fra loro sfalsati, separati da scarpate con altezza variabile dovuti ad una successione spazio-temporale di episodi di alterna erosione e sedimentazione.

Le caratteristiche geometriche della valle dell'Adda e del Po, delimitate da evidenti scarpate di terrazzo fluviale, hanno mantenuto nel tempo i propri connotati geomorfologici, anche in considerazione del fatto che i corsi d'acqua responsabili dell'infossamento hanno ormai perso la capacità di divagare all'interno delle proprie alluvioni a causa di importanti opere di difesa spondale ed idraulica (tra cui i rilevati arginali).

Derivanti dai citati fenomeni di progressivo infossamento, si riconoscono le seguenti unità morfologiche caratterizzanti il paesaggio fisico :

1. *l'alveo attivo* dei corsi d'acqua e le forme ad esso associate (barre, isole, sponde in erosione ecc.);

2. **il sistema dei terrazzi sospesi sull'alveo attivo**, modellato nelle alluvioni medio-recenti dei principali corsi d'acqua;
3. **i ripiani antichi**, sviluppati in modo discontinuo ai margini della valle olocenica dell'Adda;
4. **il "Livello Fondamentale della Pianura"** (o "Piano Generale Terrazzato"), modellato nei depositi terrazzati tardo-pleistocenici costituenti un piano debolmente immergente verso S.

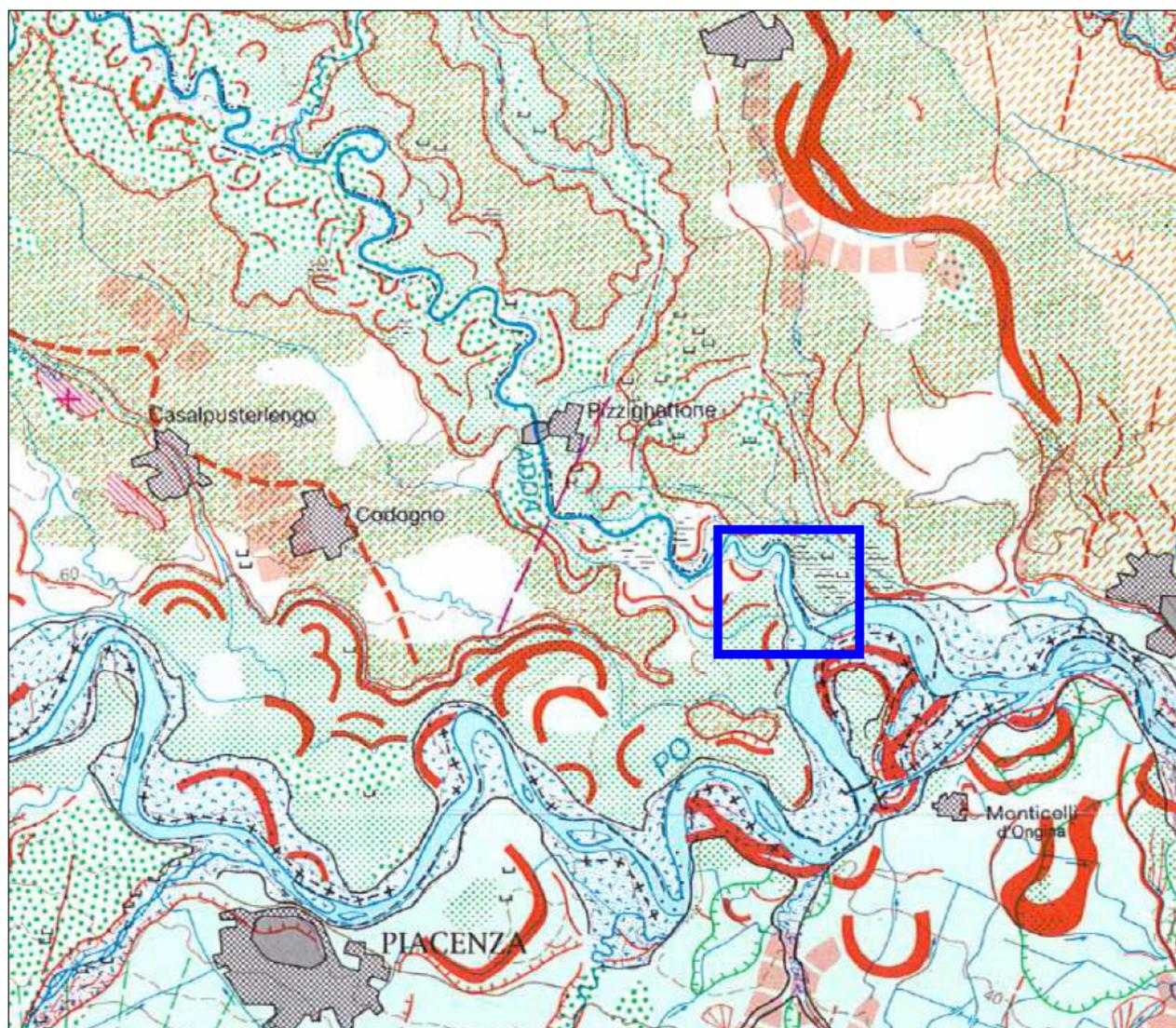


Figura 3. 12: Carta geomorfologica della Pianura Padana (Castiglioni et. Al., 1997) (nel riquadro blu l'area interessata dal progetto della centrale idroelettrica)

A scala locale, nel tratto interessato dalla derivazione e dalle opere in progetto, è stata realizzata una carta geomorfologica di dettaglio (figura 3.13), nella quale vengono evidenziate sia le scarpate principali (sviluppate ai margini dei principali ripiani morfologici), sia quelle secondarie, generalmente associate a forme caratteristiche entro i depositi olocenici che caratterizzano il paesaggio fisico. Nel dettaglio del ripiano alluvionale più recente dell'Adda e del Po, infatti, si

Quadro di riferimento ambientale

riconoscono numerosi elementi di origine fluviale; si tratta in genere di piccoli ripiani, dossi e depressioni che rivelano una situazione non priva di una complessa articolazione, caratteristica di ripetuti fenomeni di divagazione compiuti dai corsi d'acqua in un recente passato: essi sono il risultato di un sistema fluviale estremamente dinamico, legato ad eventi meteo-climatici ad alta ciclicità (regimi di morbida e di piena dei fiumi).



Quadro di riferimento ambientale

Per meglio interpretare i processi morfologici e sedimentari fluviali che hanno dato vita a questo lembo di territorio, si ricorda come il Fiume Adda e Po presentino, nel tratto di interesse, alvei del tipo a meandri di pianura alluvionale. Quest'ultimi sono forme fluviali in rapida evoluzione a causa della facile erodibilità delle sponde sabbiose: è noto come il meandro di pianura mostri una spiccata tendenza ad accentuarsi, la quale conduce al fenomeno indicato come "salto di meandro"; la forma relitta che ne deriva è un ramo del corso d'acqua noto come "lanca" o "mortizza", successivamente soggetto a interrimento.

Letto in chiave dinamica, il modello morfogenetico aiuta ad interpretare le forme presenti sul territorio, siano esse attive o inattive; i fenomeni morfogenetici, infatti, assumono significato sia come elemento di pericolosità in corrispondenza delle rive attuali del corso d'acqua, sia come agenti responsabili delle forme inattive (i paleoalvei).

Nella stessa cartografia di figura 3.13, con specifico colore è stato evidenziato anche lo stato di attività dei singoli lineamenti: tra quelli quiescenti vanno evidenziate le tracce canaliformi (depressioni morfologiche di forma allungata) che si sviluppano nell'area golenale dell'Adda lungo la sponda destra (a monte e a valle della centrale in progetto) che, con ogni probabilità, si riattivano in occasione degli eventi idrometrici che conducono all'allagamento della golena. Tuttavia, tali lineamenti non costituiscono un fattore di pericolo per la centrale in progetto, la cui compatibilità è già stata valutata nella specifica relazione idraulica allegata al progetto.

All'interno dell'alveo attivo nella zona di interesse, inoltre sono stati cartografati:

1. i tratti di sponda fluviale maggiormente interessati da erosione, già parzialmente protetti da opere di difesa (massicciate);
2. la traversa fluviale, il cui salto verrà sfruttato a scopi idroelettrici;
3. i principali depositi presenti in alveo attivo (isole e barre laterali).

In relazione a quest'ultimi elementi, si segnala la presenza di un'ampia barra di depositi lungo la sponda destra dell'Adda (deposito derivante dalla diminuzione della corrente causata dal rigurgito del Po in Adda), la quale sarà solo minimamente rimaneggiata per consentire la formazione del canale di scarico della derivazione.

### **3.6.1. Morfogenesi ed evoluzione delle forme fluviali**

Secondo uno schema ormai consolidato, la morfologia di un alveo fluviale dipende dai processi di trasformazione attuali e da quelli passati: ogni variazione di pendenza in un tronco può determinare variazioni di velocità della corrente fino a modificare il comportamento e l'aspetto morfologico del fiume per un lungo tratto sia a monte che a valle.

Secondo lo schema introdotto in origine da Trevisan (1968), l'Adda, nel tratto interessato dal progetto di derivazione idroelettrica, e il Po, presentano la classica morfologia a meandri, forme fluviali in rapida evoluzione a causa della facile erodibilità delle sponde (concave) sabbiose. La pianura circostante, per effetto dei depositi abbondanti durante le inondazioni, tende ad innalzarsi, aumentando nel tempo il dislivello tra il fondo dell'alveo ed il piano di inondazione. L'innalzamento degli argini limita a sua volta le esondazioni, cosicchè i materiali solidi, deposti in alveo durante le fasi di decrescita delle piene, determinano la pensilità del fiume sulla pianura circostante.

In relazione alla morfogenesi fluviale, è anche noto come il meandro di pianura mostri una spiccata tendenza ad accentuarsi. Il filone centrale della corrente infatti, si sposta verso la parte esterna del meandro e corre in vicinanza della sponda concava, contrariamente a quanto avviene su quella convessa. In una successione di meandri, la corrente lambisce successivamente la riva destra e la sinistra, descrivendo delle sinuosità maggiori di quelle mostrate dall'alveo: la capacità erosiva del filone principale della corrente tende perciò ad aumentare la sinuosità del fiume in ogni ansa. La riva concava quindi, subisce un'erosione progressiva, mentre sulla sponda convessa la corrente, troppo lenta per il carico trasportato, abbandona una parte di questo e deposita la cosiddetta "barra di meandro". Il risultato morfometrico è pertanto quello di una riva concava generalmente più ripida di quella convessa, soggette a continua erosione da parte del filone principale della corrente.

Il fenomeno trova riscontro proprio in corrispondenza dell'ampio meandro del Po entro il quale sfocia l'Adda e quello dell'Adda stesso sulla cui sponda concava sorge l'abitato di Crotta. Nel tratto sul quale si svilupperà la centrale (con relativo sbarramento e opere di derivazione), tuttavia, è presente un unico canale attivo con una sinuosità molto blanda, frutto anche della presenza di numerose e continue difese spondali che impediscono le tipiche divagazioni.

Premesso ciò è difficile individuare un trend evolutivo naturale, in quanto questi corsi d'acqua (Adda e Po), sono "costretti" all'interno di importanti arginature che impediscono la tracimazione durante le piene più importanti e di difese spondali che guidano la corrente.

Vanno inoltre segnalate sia in Adda che in Po alcune traverse, tra cui quella di Pizzighettone (realizzata decenni or sono per proteggere il ponte ferroviario della linea Cremona-Codogno e già

interessata in sponda destra da una centrale idroelettrica) e quella su cui sorge il progetto di derivazione proposto da VIS S.r.l.. La traversa in questione è stata realizzata negli anni '60 dopo la costruzione della centrale ENEL di Isola Serafini per limitare l'erosione regressiva del fiume Adda: poiché a seguito del taglio di meandro del Po la centrale ENEL spostò i rilasci idrici del Fiume in corrispondenza del tratto artificiale di Fiume (detto "Po Nuovo"), nell'originario sedime ("Po Vecchio", nel quale sfocia l'Adda) i livelli idrometrici si abbassarono notevolmente innescando fenomeni erosivi regressivi sull'Adda.

In tema di evoluzione morfologica, recenti studi condotti sulla conca del Porto di Cremona (Lamberti, 1994-2001) individuano una costante e progressiva evoluzione dell'alveo, ipotizzando un abbassamento dei fondali con un trend dell'ordine di 5 cm /anno. Sebbene sulle cause del fenomeno di abbassamento dell'alveo di magra esistano numerose pubblicazioni, è sicuramente difficile parlare di "evoluzione naturale" del fiume Po, in quanto la corrente risulta "guidata" dalla serie ormai continua di difese spondali ed arginature entro le quali il Po stesso scorre. Questi interventi infatti implicano generalmente la variazione di alcuni parametri geomorfologici ed idraulici (pendenza, larghezza, profondità, scabrezza, ecc.) ai quali il corso d'acqua reagisce adeguandosi con la variazione di altri parametri idraulici (velocità di flusso, capacità di trasporto, ecc.).

Proprio le difese spondali vengono indicate frequentemente come una delle cause relative all'abbassamento progressivo dell'alveo, unitamente a interventi di escavazione di inerti che, soprattutto in passato, hanno interessato i fondali del Fiume: in generale, le opere di protezione spondale comportano un incremento dell'erosione di fondo a carico dell'energia netta del fiume che assume valori positivi (nel bilancio dei sedimenti in transito viene a mancare il contributo dovuto all'erosione delle sponde) con conseguente tendenza all'abbassamento dell'alveo.

Tra le cause non si esclude anche la centrale ENEL di "Isola Serafini" che, con il suo bacino a monte della diga di sbarramento, rallenta la corrente fluviale e determina l'abbandono di buona parte del carico solido trasportato dal corso d'acqua: l'acqua rilasciata dalla diga, ritornando alla sua velocità originale, assumerebbe a valle un significativo potere erosivo, causando l'erosione del fondo.

Tra le cause del trend di abbassamento degli alvei vengono avanzate anche quelle di natura tettonica: l'innalzamento del substrato prequaternario in corrispondenza delle dorsali anticlinali sepolte (come avviene nei pressi di Crotta d'Adda), infatti, favorirebbe una progressiva erosione al fondo degli alvei dei corsi d'acqua

### **3.7. Successione stratigrafica e struttura idrogeologica generale**

Come accennato in precedenza, la geologia del sottosuolo comprende notevoli variazioni laterali e verticali in funzione degli eventi che hanno interessato l'area nel corso del Quaternario.

Le condizioni idrogeologiche vigenti nel sottosuolo delle province di Lodi e Cremona risultano estremamente eterogenee a causa delle notevoli complicazioni strutturali che hanno interessato il basamento marino e delle dirette ripercussioni sullo sviluppo dei sovrastanti sedimenti alluvionali. Il territorio, infatti, è suddivisibile in aree in cui la coltre alluvionale raggiunge potenti spessori (ricche di acquiferi) e da altre relativamente meno potenti (più povere di acquiferi); a grandi linee, le prime coincidono con gli assi delle sinclinali sepolte, mentre le altre coincidono con gli assi delle strutture positive, il cui orientamento generale è ONO-ESE. Situazioni sfavorevoli allo sviluppo di potenti orizzonti acquiferi, pertanto, si verificano lungo l'allineamento S. Colombano-Somaglia che coincide con l'asse di una struttura anticlinalica sepolta. All'interno di tali fasce, le alluvioni permeabili (alternate a setti argillosi) sono numericamente ridotte e male alimentate poiché le dorsali sepolte, modellate per la massima parte in rocce non permeabili (coincidenti con il basamento marino), contrastano e deviano il flusso idrico proveniente dall'alta pianura. Il caso limite di questa situazione si riscontra in corrispondenza del Colle di S. Colombano, in cui la struttura modellata in rocce del Terziario, emergendo oltre la quota del Livello Fondamentale della Pianura, funge da barriera idrogeologica e modifica sostanzialmente la direzione di deflusso delle acque presenti nel sottosuolo.

La successione idrogeologica a scala regionale è definita, sulla base delle attuali conoscenze, dalle seguenti unità, distinte dalla più recente (e superficiale) alla più antica in:

- unità ghiaioso-sabbiosa: è costituita nella parte più settentrionale del territorio padano dalle formazioni moreniche, sfumanti verso sud alle coltri fluvio-glaciali e fluviali recenti. Questa unità è costituita da depositi alluvionali (recenti ed antichi) e da quelli fluvioglaciali wurmiani, in cui le frazioni limose e argillose risultano più limitate. Essa rappresenta la litozona più superficiale con ambiente di sedimentazione tipicamente continentale, fluviale e fluvio-glaciale. E' costituita da granulometrie progressivamente più fini da N a S; il colore dei sedimenti fini denota condizioni ossidanti tipiche di un ambiente di sedimentazione sub-aereo. L'Unità ghiaioso-sabbiosa è la sede della struttura idrica più importante e tradizionalmente utilizzata in quanto caratterizzata da valori di trasmissività molto elevati. L'elevata permeabilità consente la ricarica dell'acquifero da parte delle acque meteoriche e di quelle di infiltrazione da corsi d'acqua o canali artificiali; la conducibilità idraulica che caratterizza questa unità è compresa tra valori di  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  m/s mentre la trasmissività è, in linea generale, superiore a  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

Quadro di riferimento ambientale

- unità sabbioso-argillosa: sottostante alla litozona ghiaioso-sabbiosa, è da questa separata da un contatto graduale e di difficile ubicazione. E' suddivisibile in due sub-unità, la prima costituita da argille, limi e sabbie con frequenti livelli torbosi o lignitosi e caratteristica di ambienti fluvio-palustri, la seconda indica invece condizioni marine costiere ed è costituita da alternanze di ghiaie e sabbie con argille e limi. Ovviamente la permeabilità è molto variabile nelle due sub-unità in funzione delle differenze granulometriche. Trattandosi di litotipi a granulometria estremamente fine, i valori di conducibilità idraulica sono piuttosto bassi e dell'ordine di  $10^{-5} - 10^{-6}$  m/s nei livelli più produttivi; anche la trasmissività risulta mediocre ed in genere inferiore a  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Per quanto riguarda le acque sotterranee, questa unità rappresenta il substrato dell'acquifero tradizionale; l'acqua è contenuta in livelli sabbiosi o sabbioso-ghiaiosi; si tratta principalmente di falde confinate con presenza talora di sostanze tipiche di ambiente riducente.
- unità argillosa: è l'unità più profonda e più antica nell'ambito dei sedimenti quaternari e corrisponde a condizioni di sedimentazione tipicamente marine. Presenta permeabilità scarsa o nulla con rari livelli acquiferi; viene generalmente considerata il substrato idrogeologico delle unità soggette ad eventuali captazioni.

L'intera successione quaternaria, dunque, viene interpretata come fase terminale del progressivo riempimento del bacino padano, con condizioni di sedimentazione da marine a continentali.

Sulla scorta di tale osservazione ed applicando i criteri della Sequence Stratigraphy, la Regione Lombardia, in collaborazione con ENI (Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia, 2002), ha recentemente classificato le unità acquifere del sottosuolo sotto forma di "Sequenze Deposizionali" (sensu Mitchum et Al., 1977).

Il bacino padano viene così ridefinito in nuove Unità Idrostratigrafiche ("Gruppi Acquiferi"), secondo quanto schematizzato nella seguente figura 3.14.

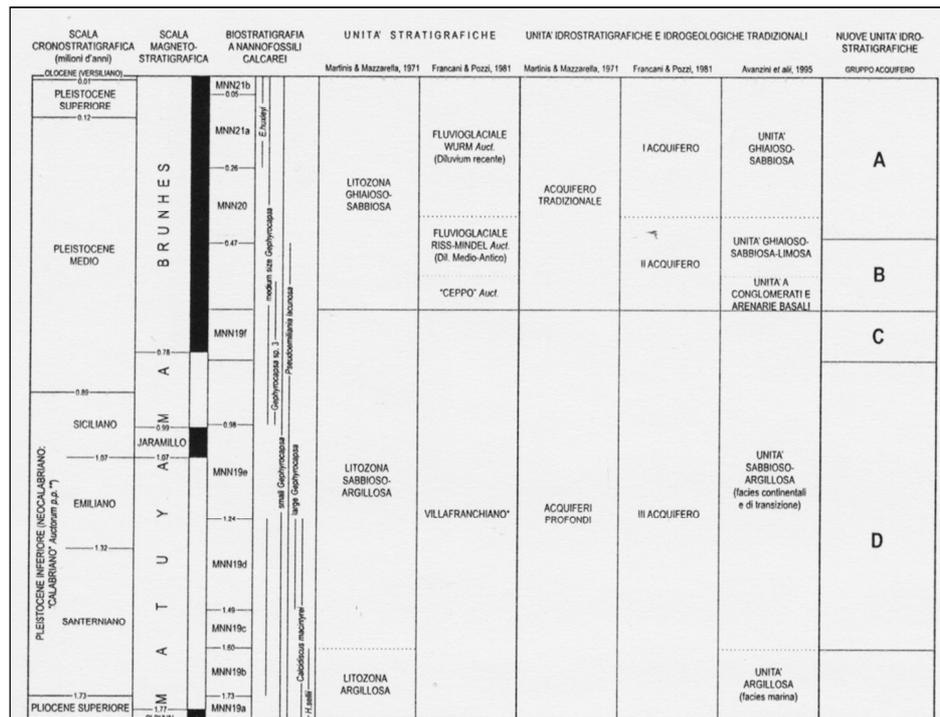


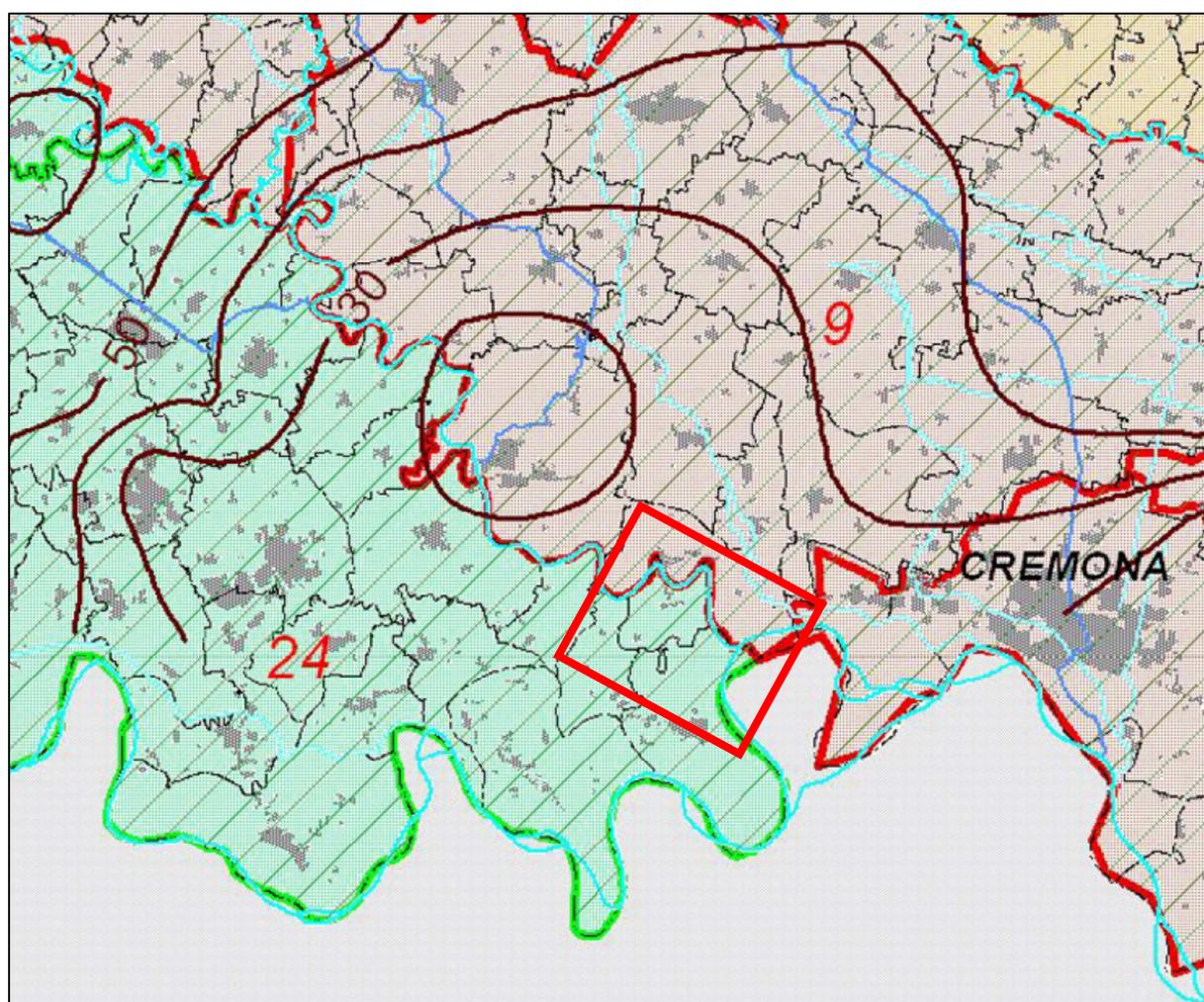
Figura 3. 14: Schema dei rapporti stratigrafici (Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia, 2002)

L'esame delle stratigrafie a disposizione (ricavate dall'Atlante ambientale della Provincia di Cremona, dal SIF della Provincia di Lodi e da un nutrito archivio stratigrafico a disposizione di Geolambda Engineering S.r.l.) evidenzia come l'assetto geometrico-strutturale del sottosuolo sia assimilabile ad un materasso alluvionale nel quale i corpi acquiferi di natura prevalentemente sabbiosa o sabbioso-ghiaiosa si alternano a livelli impermeabili. Si definiscono in questo modo due ambienti sostanzialmente differenti (circuiti idrogeologici):

- un circuito superficiale, con caratteristiche prevalentemente freatiche, alimentato sia da monte (secondo la direzione di deflusso idrogeologico), sia per infiltrazione diretta (a seguito di precipitazioni meteoriche o durante la pratica irrigua);
- un circuito profondo (o artesiano) sottostante uno o più livelli argillosi caratterizzati da un consistente spessore e da estensione laterale. Contrariamente al circuito più superficiale, nel circuito profondo l'alimentazione avviene esclusivamente in senso sub-orizzontale, ovvero da monte secondo la direzione di flusso idrogeologico.

Il limite di separazione tra i due circuiti idrogeologici in prossimità dell'area si sviluppa a profondità di alcune decine di metri ma non è così linearmente individuabile come accade in aree più settentrionali (media pianura), causa il complesso alternarsi di depositi erosivi e deposizionali che si sono succeduti in prossimità delle aree di influenza dei grandi fiumi (Adda e Po) durante l'Olocene.

Lo stesso P.T.U.A. della Regione Lombardia assume il modello interpretativo sopra descritto, già proposto da vari Autori (Martinis & Mazzarella, 1971; Francani & Pozzi, 1981), secondo il quale la struttura acquifera viene suddivisa in acquifero tradizionale (Unità ghiaioso-sabbiosa) e in acquifero profondo (Unità sabbioso-argillosa). Nell'acquifero tradizionale si riconosce una struttura superficiale (o primo acquifero) localmente separata da una sottostante (o "secondo acquifero", anch'esso appartenente all'acquifero tradizionale). In corrispondenza dell'area d'interesse (e in più in generale in corrispondenza della bassa valle dell'Adda, in prossimità della confluenza del Po), il P.T.U.A. non distingue più il limite basale dell'acquifero tradizionale, causa i complessi meccanismi alluvionali quaternari, così come innanzi premesso.



*Figura 3. 15: Base dell'acquifero superficiale (Tavola 3 – Programma di tutela e Uso delle Acque)*

### 3.7.1. **Caratteristiche litostratigrafiche dell'area interessata dalla derivazione e dalla centrale idroelettrica in progetto**

In seno allo stretto areale d'interesse su cui si svilupperà la centrale idroelettrica è stata sviluppata una dettagliata campagna geognostica (sondaggi a carotaggio continuo, prove penetrometriche e indagini geofisiche, ubicate in figura 3.16), descritta nella "Relazione geologica, geotecnica e sismica" allegata al progetto, attraverso la quale è stato ricostruito il modello di sottosuolo sito-specifico.

Nel dettaglio, la successione stratigrafica appare costituita da un primo orizzonte metrico di limo sabbioso-argilloso, seguito in profondità da un deposito di natura prevalentemente sabbiosa fino a circa 28-29 m, quota alla quale compare un letto limoso correlabile fra entrambe le sponde del fiume Adda.

Tale successione è caratterizzata dalla presenza di una frazione più fine di natura limosa nella porzione superficiale, la quale scompare rapidamente con la profondità per lasciare il posto ad una componente più grossolana di natura ghiaiosa.

In sponda destra, ad una profondità compresa tra 9 e 13 m, la successione sabbiosa è interrotta dalla presenza di una lente di natura limoso-argillosa che trova il suo massimo spessore nel sondaggio S6 (sulla verticale del canale di scarico). Assumendo una geometria lentiforme, tuttavia, il deposito più fine appare come il semplice prodotto deposizionale di un ambiente a bassa energia, non correlabile con altre informazioni stratigrafiche presenti nello stretto intorno della derivazione e della centrale in progetto.

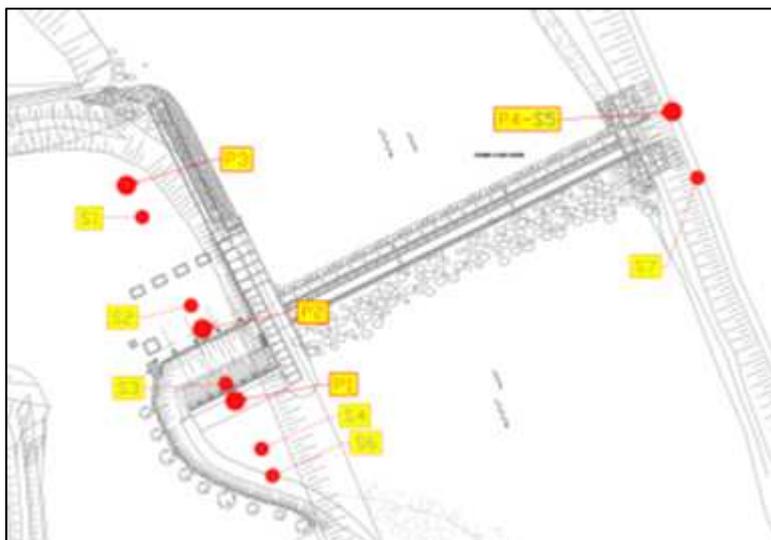


Figura 3. 16: Ubicazione indagini geognostiche

### 3.7.2. Caratteristiche idrogeologiche dell'area di interesse

Vista la tipologia di opera in progetto, che prevede una modifica dell'assetto idraulico del corso d'acqua con l'innalzamento dei livelli idrici a monte della traversa, nel corso dello studio è stata eseguita una campagna di rilievi finalizzata a ricostruire l'assetto piezometrico locale e le linee di deflusso della falda più superficiale (il c.d. acquifero tradizionale) per valutarne sia le interferenze con il progetto che le modifiche da esso derivanti.

Le informazioni idrogeologiche disponibili dalla letteratura specifica evidenziano come i grandi fiumi (Adda e Po in particolare) costituiscano gli assi di drenaggio principali della pianura cremonese, condizionando in modo sostanziale le linee di flusso sotterraneo sia in sponda lodigiana che cremonese (figura 3.17 e figura 3.18) A scala regionale, tuttavia, il fiume Po costituisce il livello di base di tutte le acque, superficiali e sotterranee.

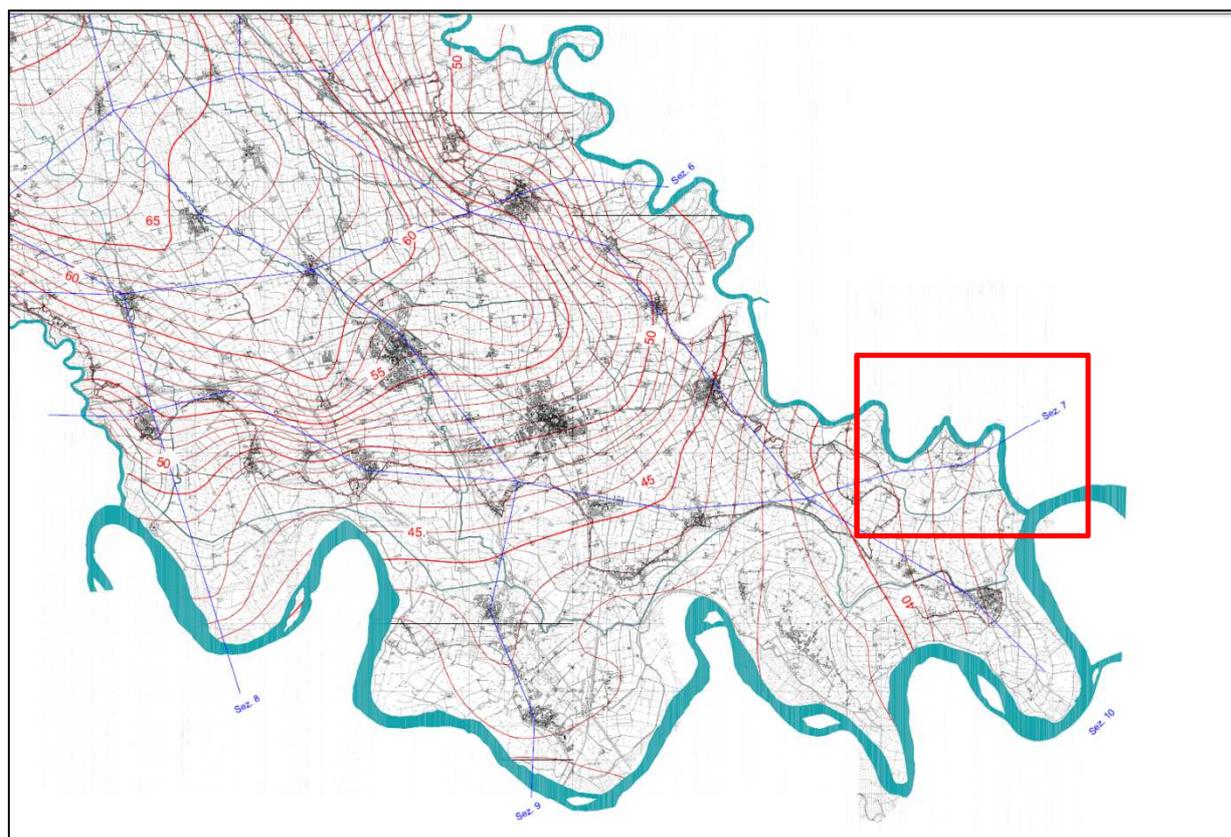


Figura 3. 17: Carta idrogeologica della Provincia di Lodi (nel riquadro l'area d'interesse), tratta in stralcio da Piano Cave della Provincia di Lodi (2003)

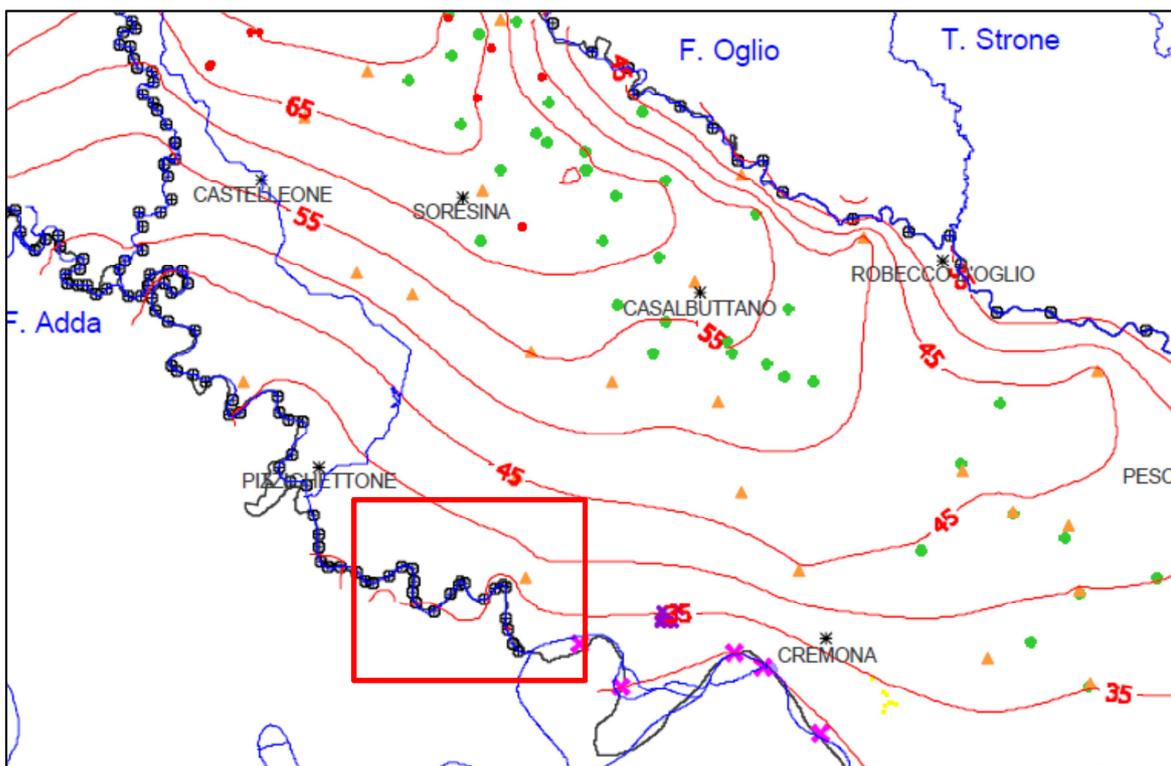


Figura 3. 18: Carta idrogeologica della Provincia di Cremona (nel riquadro l'area d'interesse), tratta in stralcio da Gandolfi, 2007 – Tavola 3a)

A scala locale, l'assetto piezometrico generale viene confermato dal modello tarato sulla base di una campagna di misure effettuate in pozzi e piezometri già presenti sull'area d'interesse. Vista l'esistenza di un sistema acquifero multistrato, nella rielaborazione dei dati piezometrici sono state utilizzate solo le misure effettuate in opere (pozzi e piezometri) la cui profondità è nota, limitando così la possibilità di correlare erroneamente quote piezometriche di orizzonti acquiferi verticalmente separati.

La carta idrogeologica di dettaglio (figura 3.19), tratta in stralcio dalla tavola 05 evidenzia come la falda superficiale assuma una generale direzione di flusso orientata verso l'Adda, chiaro effetto dell'azione drenante del fiume a monte della sezione di Maccastorna; verso E, in prossimità della confluenza dell'Adda in Po, le isopieze ruotano verso quadranti meridionali (in sponda lodigiana) e orientali (in sponda cremonese), richiamate dal livello idrometrico del Po. Va comunque precisato che le linee isopiezometriche descrivono una situazione media dei potenziali piezometrici tutt'altro che statica, in quanto esposta a perturbazioni idrodinamiche di superficie: durante i periodi di piena dell'Adda e del Po, la falda subisce oscillazioni verso l'alto, con localizzate e temporanee rotazioni o, addirittura, inversioni del deflusso sotterraneo (alimentazione fiume-falda in una limitata fascia perifluviale durante gli eventi di piena più gravosi).

Quadro di riferimento ambientale

Il particolare assetto piezometrico si riflette anche sui gradienti e sulla soggiacenza della superficie piezometrica: le soggiacenze maggiori, superiori a 10 m, si rilevano sul Livello Fondamentale della Pianura in prossimità dei suoi bordi terrazzati; quelle minori si misurano ai margini esterni della valle dell'Adda e del Serio Morto (il cui antico alveo è oggi in parte percorso dal Colatore Riglio). Avvicinandosi ai fiumi Adda e Po, la piezometria si approfondisce progressivamente; tuttavia, in prossimità delle sponde si manifestano anche le maggiori escursioni piezometriche, direttamente correlabili alle quote idrometriche dei due fiumi.

Quanto sopra conferma come il sistema idrografico di superficie, centrato sulla presenza del sistema Adda-Po, e il complesso delle acque sotterranee siano fra loro interconnessi secondo un delicato equilibrio. In tale contesto, l'area di studio coincide con quella che, negli anni '60 del secolo scorso, ha risentito maggiormente dei cambiamenti piezometrici quando, dopo la realizzazione della centrale ENEL di Isola Serafini in Po e il conseguente "taglio di meandro", venne creato l'invaso a monte e furono abbassati i livelli idrometrici nel ramo morto del Po, ove confluisce l'Adda. Analogamente, l'invaso che si formerà per rigurgito a monte della traversa in progetto aumenterà i livelli idrometrici e conseguentemente quelli piezometrici: su tale previsione è stato sviluppato un apposito studio mediante modellizzazione idrogeologica.

Quadro di riferimento ambientale

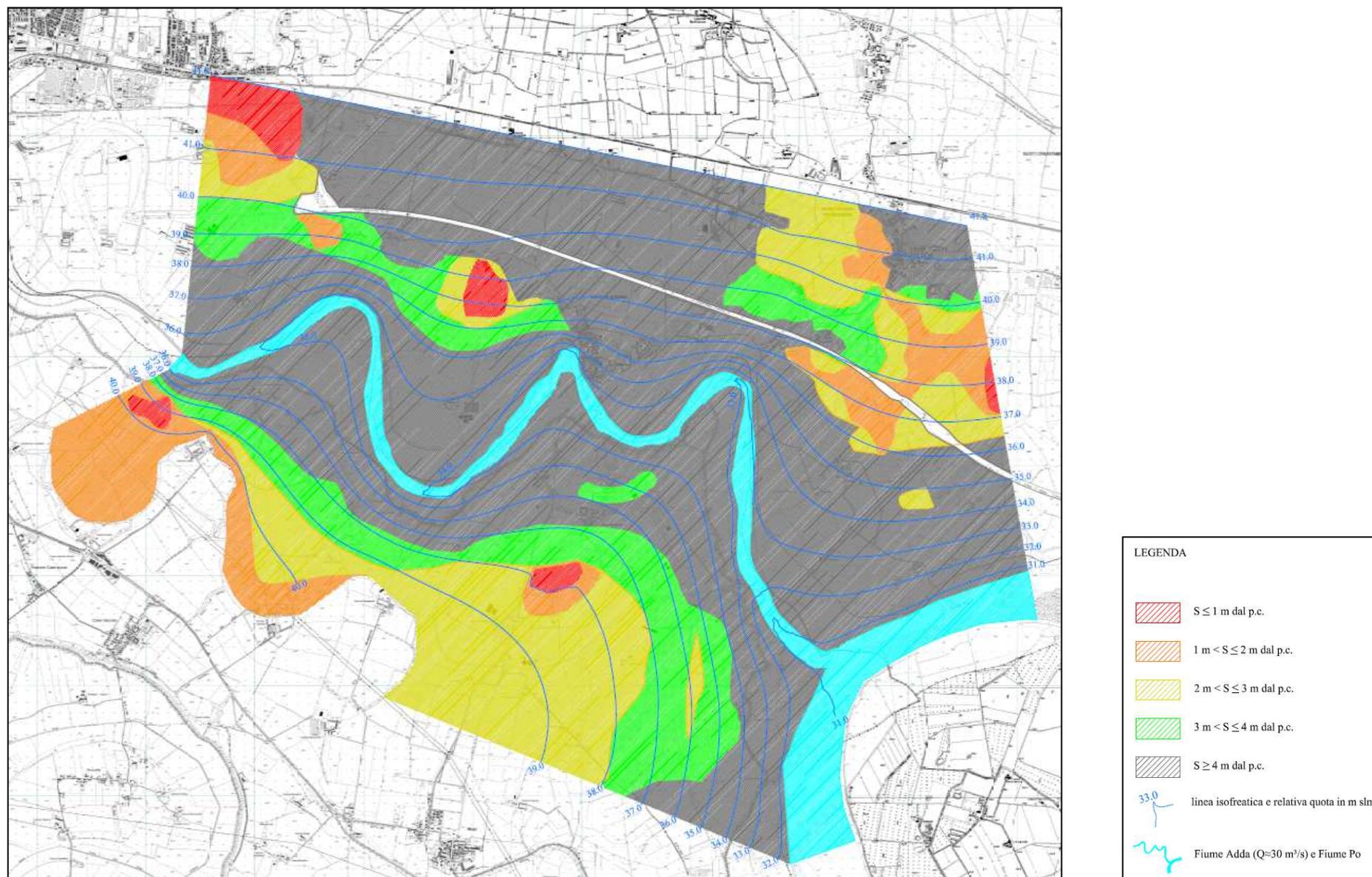


Figura 3. 19: Ricostruzione piezometrica rilevata il 30.12.2014, tratta in stralcio dalla tavola 05

### **3.7.3. Le criticità e le emergenze idriche rilevate**

Le evidenze di una scarsa soggiacenza della superficie piezometrica si riscontrano lungo il piede delle scarpate morfologiche, ove si manifestano fenomeni sorgentizi secondo il meccanismo noto delle "sorgenti di terrazzo". Il fenomeno è particolarmente evidente in sponda cremonese, lungo il tratto di scarpata morfologica principale (quella che terrazza il margine meridionale del Livello Fondamentale della Pianura) tra Roggione e l'abitato di Crotta d'Adda, ove sono note, e in parte censite dagli strumenti di pianificazione locale (PGT), caratteristiche emergenze idriche. Ai margini orientali del territorio di Crotta d'Adda e a S dell'abitato di Acquanegra Cremonese si sviluppano ampie aree morfologicamente depresse, caratterizzate da una piezometria scarsamente soggiacente che, nei periodi di intense precipitazioni meteoriche e/o durante piene prolungate dell'Adda, sono soggetta ad allagamento in quanto prive di un efficace sistema drenante e di smaltimento delle acque meteoriche.



*Figura 3. 20: Area depressa allagata a valle del Canale navigabile, in Comune di Crotta d'Adda (04.03.2015)*

A contribuire al fenomeno descritto per l'area citata tra C.na Belvedere e Acquanegra Cr.se a S della scarpata morfologica principale concorre un substrato scarsamente permeabile (argilla, argilla sartumosa, torba) a copertura (ad alcuni metri di profondità) di depositi granulari saturi (sabbia prevalente). La soggiacenza rappresentata nella cartografia derivante dalla modellizzazione (figura 3.19), pertanto, non rappresenta un reale stato di saturazione dei primi metri di profondità, bensì un semplice potenziale piezometrico laddove sono presenti consistenti coperture argillose che confinano l'orizzonte acquifero a quote ben più basse rispetto a quelle piezometriche, determinando un comportamento artesianesimo della falda.

Non si esclude altresì che i fenomeni di emergenza idrica citati siano correlabili ad un'esile falda sospesa, ospitata in orizzonti superficiali più permeabili, confinata alla base dal substrato argilloso.

I fenomeni sono noti da tempo immemore; a segnalare l'area paludosa (antica sede della foce del Serio in Po) ricorre lo stesso toponimo di "Acquanegra": secondo fonti storiche, il toponimo si attesta già nel X secolo nella forma di "Aquanigra", indicante la presenza di 'acqua morta, stagnante'.

L'assenza di un reticolo di canali di colò in un'area morfologicamente depressa è, in ogni caso, determinante per il suo allagamento: testimonianze locali, infatti, ricordano come alcuni decenni or sono esistesse un canale di raccolta delle acque della porzione di territorio a S di C.na Belvedere che, passando nei pressi di C.na Caselle, scaricava le acque in Adda, a valle della traversa sui cui sorge il progetto di VIS S.r.l.. L'attraversamento del rilevato arginale avveniva attraverso una chiavica regolata da una paratoia (tuttora esistente e governata manualmente), chiusa durante la piena dell'Adda/Po. Successivi interventi di ampliamento della C.na Caselle (costruzione di strutture zootecniche) hanno troncato l'originario canale di raccolta delle acque, impedendone lo smaltimento attraverso la rete di drenaggio esistente. Per consentire la coltivazione di dette superfici, allagate per lunghi periodi durante il periodo autunnale, invernale e primaverile, i relativi conduttori sono costretti a ricorrere a impianti di sollevamento che, rilanciando le acque stagnanti nella rete di canali limitrofi esistenti, ottengono l'emersione dei terreni e il loro impiego a scopi agronomici.

#### ***3.7.4. Vulnerabilità degli acquiferi***

La vulnerabilità degli acquiferi è definita come la possibilità di infiltrazione e propagazione degli agenti inquinanti provenienti dalla superficie a danno della matrice idrica sotterranea. Questo concetto implica uno stato di potenziale minaccia delle qualità originarie delle acque sotterranee, determinato unicamente dalle condizioni ambientali, sia naturali che antropiche, esistenti e indipendenti dalle sorgenti inquinanti. Considerando infatti la possibilità di accesso di potenziali agenti inquinanti verso le falde, appare evidente come i sedimenti permeabili offrano scarse difese, mentre per gli acquiferi più profondi si riscontrano buone condizioni di isolamento e protezione, in particolar modo per quelli in pressione confinati al tetto da materiali impermeabili. Hanno infatti un peso preponderante i seguenti fattori geologici e idrogeologici:

- la idro-litologia (ovvero il tipo e il grado di permeabilità verticale e orizzontale), che determina la velocità di percolazione dell'inquinante e l'azione di attenuazione insita nei diversi terreni;
- il tipo e lo spessore di un'eventuale copertura fine a bassa permeabilità, quale elemento di protezione per l'acquifero sottostante;

- la soggiacenza della superficie piezometrica media dell'acquifero, la quale definisce lo spessore della zona insatura, direttamente proporzionale all'azione di autodepurazione degli inquinanti operata dai terreni;
- le condizioni di interscambio da parte di corsi d'acqua naturali e di canali artificiali, veicoli di inquinanti.

Considerata la natura dei depositi permeabili, la generale assenza di significative coperture impermeabili e la modesta capacità protettiva dei suoli, nonché gli interscambi idrici tra sottosuolo e acque superficiali, gli acquiferi di questa zona presentano una generale condizione di alta vulnerabilità intrinseca (fatta eccezione per i limitati lembi di territorio caratterizzati da coperture scarsamente permeabili che mitigano il grado di esposizione della struttura acquifera sottostante).

A parità di altre condizioni, quindi, la diminuzione di soggiacenza indotta dall'effetto di bacinnizzazione per alcuni chilometri a monte dello sbarramento determina un sensibile incremento degli indici di vulnerabilità.

### **3.8.La modellazione idrogeologica**

Per studiare le variazioni indotte dal progetto sull'assetto idrogeologico dell'acquifero tradizionale (il più superficiale ed esposto alle pressioni dell'intervento) si è fatto ricorso ad un modello matematico tridimensionale appositamente sviluppato, in grado di simulare il flusso dell'acqua attraverso un mezzo poroso. Il modello, che è in grado di rappresentare l'acquifero e simulare la circolazione idrica sotterranea in esso contenuta, è stato implementato a partire da informazioni stratigrafiche in grado di rappresentare le geometrie sotterranee, da misure piezometriche e da informazioni idrogeologiche locali (misure in sito, data-base, letteratura specifica, ecc.).

Le equazioni che governano i fenomeni di flusso sotterraneo nel codice di calcolo utilizzato vengono risolte con il metodo alle differenze finite, il quale parte da una discretizzazione del dominio analizzato mediante una griglia di calcolo.

#### **3.8.1. Caratteristiche del modello di simulazione**

Nel bilancio idrogeologico del dominio analizzato vengono generalmente presi in considerazione numerosi fattori, naturali ed antropici, tra i quali i principali sono:

- le caratteristiche e l'uso dei suoli;
- la variabilità dei parametri idrogeologici che governano l'accumulo e il transito delle acque nel sottosuolo;
- la ricarica della falda in assenza di apporti irrigui;

Quadro di riferimento ambientale

- le caratteristiche del sistema irriguo che incide – soprattutto in aree agricole come quella d'interesse – sulla ricarica efficace della falda;
- le interazioni tra corpi idrici e acque sotterranee.

Il modello realizzato ha puntualmente considerato la variabilità dei parametri idrogeologici del sottosuolo e dei corsi d'acqua, mentre per le altre grandezze sono stati utilizzati dati di input provenienti dal PTUA della Regione Lombardia e da specifico studio della Provincia di Cremona (Gandolfi et al., 2007). In particolare, nella rappresentazione del modello, considerata la limitata estensione territoriale, si è assunto costante il valore di ricarica efficace dell'acquifero sull'intero dominio di interesse, ricorrendo al valore assunto dal PTUA che già contempla gli apporti del sistema irriguo e le caratteristiche/usi del suolo di questo lembo di pianura.

Ogni simulazione eseguita mediante modello – per scelta – è stata condotta in condizioni di regime stazionario, ovvero come se le condizioni idrometriche e idrologiche rimanessero costanti per un tempo infinito: dette condizioni, infatti, costituiscono quelle più cautelative, massimizzando gli effetti derivanti dall'opera in progetto (rigurgito e bacinizzazione a monte) rispetto a quelle che si osservano in condizioni naturali.

Nella sostanza, il massimo effetto della bacinizzazione si osserva tra le condizioni di magra del fiume Adda nello stato attuale e quelle di massima bacinizzazione/rigurgito dello stesso corso d'acqua; è ovvio, tuttavia, che il fiume Adda – allo stato attuale – modifica costantemente le sue altezze idrometriche in funzione della portata: considerare quindi un regime stazionario in condizioni di magra massimizza una situazione che non si verifica mai. Nello stato di progetto, invece, la quota idrometrica immediatamente a monte della traversa verrà imposta, fissandola definitivamente a un valore di 35,5 m s.l.m.. Quest'ultimo caso è quello meglio rappresentabile attraverso una situazione di regime stazionario, anche se pure esso è una condizione non realistica in quanto, occasionalmente (con portate che superano il valore derivabile), la quota idrometrica può variare, ritornando alle condizioni di altezza idrometrica naturale per la portata che transita in Adda in assenza delle opere in progetto.

Allo scopo di meglio rappresentare gli effetti indotti dalle opere in progetto sulla circolazione idrica di sottosuolo sono state verificate (e successivamente confrontate tra loro) le seguenti condizioni (che massimizzano lo stato attuale e quello di progetto):

Quadro di riferimento ambientale

1. condizione di magra assoluta registrata nel fiume Adda con portata  $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$ , situazione in cui la falda assume le quote minime, condizionata dalle quote idrometriche di Adda e Po;
2. condizione di magra con portata  $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$  nello stato di fatto;
3. condizione di magra con portata  $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$  nello stato di progetto, momento in cui si massimizza la bacinizzazione e il rigurgito si estende sino alla sezione AD019 (si veda al proposito lo studio idraulico allegato al progetto).

Richiamando quanto descritto in precedenza riguardo agli acquiferi sul lembo di pianura d'interesse, il modello è stato costruito tenendo unicamente conto dell'acquifero tradizionale, che rappresenta l'estensione verticale del dominio entro il quale si esaurisce l'influenza dell'opera di progetto.

### **3.8.2. Descrizione del modello matematico**

Per la formulazione del modello matematico, è stato usato Groundwater Vistas; il software implementa MODFLOW (*Modular Groundwater Flow Model*), codice di calcolo utilizzato per simulare il flusso dell'acqua attraverso un mezzo poroso mediante il metodo alle differenze finite, realizzato negli Stati Uniti negli anni '80 dal Servizio Geologico Nazionale e riconosciuto a livello internazionale.

Il modello prevede che, una volta definita l'area da modellizzare (*dominio*), questa venga discretizzata mediante una griglia tridimensionale a maglie poligonali che descrive efficacemente la geometria dell'acquifero dedotta dalle informazioni sito-specifiche. Ogni cella ha la forma di un parallelepipedo, le cui dimensioni possono essere variabili, caratterizzata attraverso il suo baricentro (*block-centred*). Ogni cella viene identificata mediante un indice di riga (i), colonna (j) e layer (k). Il layer rappresenta la numerazione delle celle nel piano verticale; ad ogni strato viene generalmente associato un layer al fine di quantificare numericamente le condizioni stratigrafiche del dominio secondo quanto meglio dettagliato nel manuale d'uso del programma, al quale si rimanda per ogni trattazione di dettaglio.

Nei paragrafi che seguono saranno illustrati i dati di input utilizzati, le caratteristiche e i passi di implementazione del modello, discutendone passo a passo i risultati ottenuti.

### **3.8.3. Implementazione del modello di flusso**

L'implementazione del modello è avvenuto come segue:

- definizione dello spazio di modellazione (c.d. *dominio* del modello);
- discretizzazione delle geometrie caratteristiche dell'area modellizzata (stratigrafia, geomorfologia);
- definizione dei limiti del sistema (c.d. *condizioni al contorno*);
- discretizzazione del dominio attraverso una griglia tridimensionale (c.d. *mesh di calcolo*);
- quantificazione delle variabili interne al sistema idrogeologico (grandezze idrogeologiche caratteristiche) per ciascuna delle celle che rappresentano l'acquifero e i corsi d'acqua all'interno del dominio;
- definizione degli stress esterni al sistema, ovvero della ricarica efficace che, come detto in precedenza, tiene conto sia delle precipitazioni meteoriche che dell'uso/caratteristiche dei suoli e degli apporti irrigui;
- definizione degli strumenti (metodi matematici, parametri di calcolo, procedure informatiche) da impiegarsi per sviluppare le simulazioni.

### **3.8.4. Il dominio del modello**

Per definire il dominio sono stati utilizzati i seguenti criteri:

1. le condizioni al contorno devono poter essere fissate e il dominio non deve risentire di perturbazioni derivanti da elementi esterni a quelli oggetto di valutazione (influenza delle condizioni poste al contorno);
2. il dominio deve avere dimensioni adeguate per valutare e rappresentare correttamente gli effetti indotti dalle opere in progetto.

#### **3.8.4.1. Definizione delle condizioni al contorno**

Come operazione preliminare, nell'anno antecedente lo studio di modellizzazione, è stata eseguita una serie di misurazioni freaticometriche in pozzi e piezometri presenti sul territorio cremonese e lodigiano in un intorno significativamente esteso nei comuni di Pizzighettone, Maleo, Crotta d'Adda, Meleti, Corno Vecchio, Maccastorna, Castelnuovo Bocca d'Adda e Acquanegra Cremonese; negli stessi giorni di rilievo freaticometrico venivano misurate le quote idrometriche del fiume Adda. Dall'operazione è emerso che, in corrispondenza del Piano Generale Terrazzato, a monte dell'alta scarpata morfologica che lo terrazza sulla piana olocenica dell'Adda, i livelli piezometrici non risentono delle escursioni idrometriche del fiume (con la probabile eccezione dello

stretto lembo su cui sorge l'abitato di Crotta d'Adda, il cui terrazzo è lambito al piede direttamente dal fiume).

La quota piezometrica pare quindi "fissata" in corrispondenza del piede della scarpata morfologica, fatto peraltro ben evidenziato dai numerosi fenomeni sorgentizi (c.d. "sorgenti di terrazzo") che costituiscono un "punto di equilibrio" idrogeologico tra le acque di sottosuolo provenienti da monte e quelle circolanti nei terrazzi alluvionali.

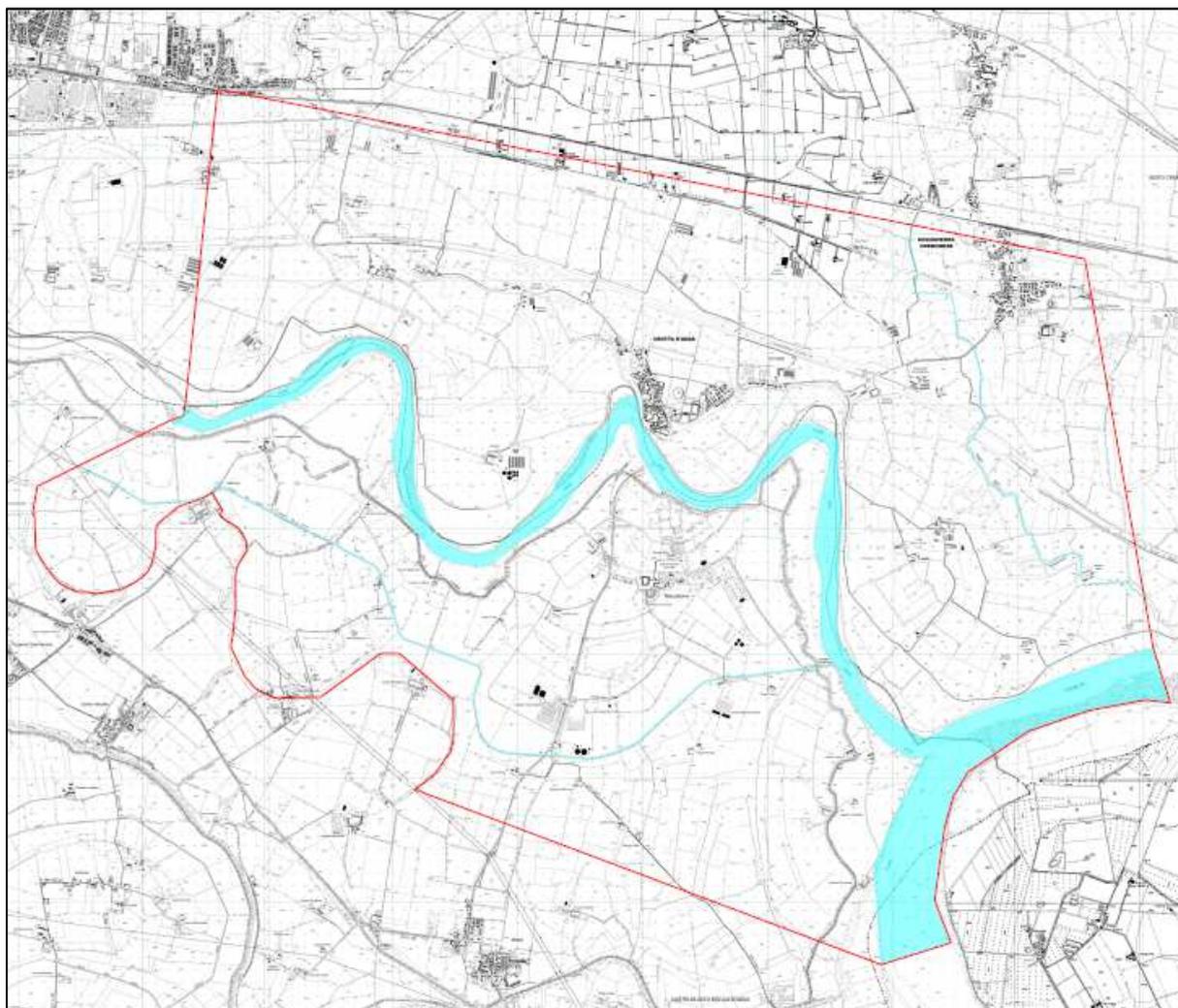
Quali condizioni al contorno, pertanto, sono state assunte le quote piezometriche rilevabili al piede del Livello Fondamentale della Pianura in sponda destra e sinistra, le quote idrometriche del fiume Po (che ovviamente non risentirà degli effetti dello sbarramento) e quelle del fiume Adda (che costituisce il livello di base dell'acquifero superficiale) laddove si esaurisce l'effetto della bacinnizzazione definito mediante studio idraulico.

La presenza del Canale navigabile a N dell'Adda è influente sui livelli piezometrici, trattandosi di una struttura artificiale impermeabile priva di significative interferenze sulla falda sottostante. Anche il Riglio (che coincide all'incirca con il limite orientale del dominio) pare influente sulla falda, con quote di fondo localmente superiori a quelle del limitrofo piano campagna nella zona di interesse.

#### *3.8.4.2. Dimensioni*

Arealmente il dominio si estende a N lungo la linea ferroviaria Codogno-Cremona, a E in corrispondenza del meridiano di Acquanegra Cremonese sino al Colatore Riglio, a SE lungo il fiume Po, a SW lungo la s.p. n. 243 sino al margine del terrazzo wurmiano in Comune di Meleti e da qui lungo la scarpata morfologica che terrazza il Livello Fondamentale della Pianura sino alla C.na Lardera, a W attraverso il fiume Adda sino ai margini meridionali di Roggione (in Comune di Pizzighettone). L'area così definita presenta una superficie di circa 38,4 km<sup>2</sup>.

Verticalmente il dominio si sviluppa sino al limite basale dell'acquifero tradizionale, ovvero una profondità variabile tra ca. 30 e 70 m come innanzi precisato.



*Figura 3. 21: Dominio del modello sul piano orizzontale sovrapposto a CTR Lombardia 1:10.000*

Come base cartografica è stata utilizzata la Carta Tecnica Regionale (C.T.R.) in scala 1:10.000.

### **3.8.5. La geometria del modello**

Le quote del terreno usate sono quelle dedotte dalla C.T.R. 1:10.000 della Regione Lombardia.

Sul piano verticale, la base dell'acquifero superficiale è stata definita utilizzando i dati desunti dai seguenti strumenti:

- Tavola 3 del P.T.U.A. (settore 24 del Bacino 3 Ticino–Adda e settore 9 del Bacino 4 Adda-Oglio);
- stratigrafie dei pozzi censiti in Provincia di Cremona e di Lodi;
- “Realizzazione di un modello preliminare del flusso idrico nel sistema acquifero della Provincia di Cremona” (Gandolfi et al. , Università degli Studi di Milano, 2007);

Quadro di riferimento ambientale

- Atlante ambientale della Provincia di Cremona consultabile sul sito <http://www.atlanteambientale.it/atlanteambientale/>;
- Studi geologici, idrogeologici e sismici dei PGT dei Comuni posti internamente al dominio.

Le quote della base dell'acquifero superficiale per ciascuna cella poligonale di discretizzazione del dominio variano tra 30 e 70 m di profondità.

### 3.8.6. Le condizioni al contorno

Le condizioni al contorno impongono il carico idraulico ed il flusso ai confini del sistema; le opzioni di MODFLOW utilizzate in questo modello sono:

- carico fissato (*specified head*): fissa il carico agli estremi di un tratto (*arc*) e lo distribuisce linearmente;
- flusso nullo (*no flow*): fissa la derivata del carico (flusso) attraverso il confine;
- fiume (*river*): simula l'azione dei fiumi e la loro interazione con la falda come lineamenti drenanti e/o alimentanti.

Le quote idrometriche utilizzate per la definizione delle condizioni al contorno sono quelle rilevate in data 30.12.2014 alle quali corrisponde una portata in Adda di circa 30 m<sup>3</sup>/s, ricavata da scala di deflusso calcolata nella sezione n. 01 (circa 400 m a monte della confluenza in Po).

Le quote piezometriche utilizzate per le condizioni al contorno derivano da un monitoraggio piezometrico prolungato circa un anno, durante il quale è stata osservata una certa costanza dei livelli; in particolare:

- in corrispondenza del confine N del dominio è stato imposto carico costante pari alla quota piezometrica di 41,75 m s.l.m.;
- nel tratto di confine E tra Acquanegra Cremonese e il Po è stata imposta la condizione di flusso nullo, ovvero linee isopiezometriche ortogonali al confine del dominio;
- lungo il confine E, nel tratto coincidente con il fiume Po, sono state fissate le quote dell'acqua e dell'alveo in tre nodi; la quota utilizzata per il nodo centrale (confluenza dell'Adda nel Po) è risultata dal rilievo del 30/12/2014, mentre le due quote restanti sono state ricavate dallo studio idraulico monodimensionale del tratto di Po prossimo alla confluenza dell'Adda (Relazione idraulica allegata al progetto);

Quadro di riferimento ambientale

Nodo	Portata in Po	Quota alveo	Quota acqua	Distanza
	m <sup>3</sup> /s	m s.l.m.	m s.l.m.	km
<b>MONTE - S24C AIPO</b>	220	28,86	31,58	3,58
<b>CONFLUENZA</b>	220	27,48	30,80*	2,29
<b>VALLE - S24E AIPO</b>	220	26,99	30,42	0,00

\* misurata il 30/12/2014

Tabella 3.1: Risultati del modello monodimensionale del fiume Po nelle sezioni implementate dal modello idrogeologico, desunti dallo studio idraulico di progetto

- lungo il confine SW (livello fondamentale della pianura in territorio lodigiano), si è fissato carico variabile linearmente tra 41 m s.l.m. e 39,5 m s.l.m. (quote piezometriche rilevate ai margini settentrionali e meridionali del confine), mentre lungo il rimanente confine Sud è stata imposta una condizione di flusso nullo.

Per i tratti di fiume Adda e fiume Po implementati nel modello, si è utilizzata la condizione "river", in modo da permettere al programma di riconoscere il fiume e considerare l'interscambio fiume/falda. La condizione *river* implica che vengano fissati:

- le quote dell'acqua e dell'alveo agli estremi del tratto individuato;
- la conducibilità idraulica dei sedimenti che costituiscono il letto del fiume lungo il tratto analizzato.

Per ottenere risultati il più possibile aderenti alla realtà, si è suddiviso il tratto di fiume in quattro segmenti, in modo da fissare le altezze d'acqua (note) in più punti, due dei quali coincidenti con sezioni monte e valle della traversa in modo da modellizzare il salto di fondo nella sezione di progetto. I segmenti individuati si sviluppano:

- da monte, sezione AD019, fino allo scivolo in cemento in sponda sinistra dell'Adda a Crotta d'Adda;
- da Crotta d'Adda alla sezione immediatamente a monte del salto di fondo;
- dalla sezione a monte del salto alla sezione immediatamente a valle dello stesso;
- dalla sezione a valle del salto alla confluenza dell'Adda nel Po.

Tale scelta deriva anche dalla disponibilità dei dati d'altezza d'acqua.

Come già menzionato, la condizione imposta implica che vengano fissate le quote dell'acqua e dell'alveo ai nodi (estremità) dei segmenti. Le quote idrometriche utilizzate nel modello sono quelle rilevate il 30.12.2014 ad eccezione di quella imposta nella sezione di monte (sez. n. 19) ricavata dal modello idraulico bidimensionale.

Quadro di riferimento ambientale

Sezione	Portata in Adda	Quota alveo	Quota acqua - misure del 30.12.2014	Distanza	Distanza parziale da valle
	m <sup>3</sup> /s	m s.l.m.	m s.l.m.	km	km
MONTE - AD019 PAI	30	34,50	35,27*	10,70	6,02
CROTTA D'ADDA	30	32,86	33,34	4,68	3,67
MONTE SALTO	30	32,02	32,67	1,01	0,005
VALLE SALTO	30	30,94	31,05	1,00	1,00
CONFLUENZA	30	27,48	30,80	0,00	0,00

\*valore calcolato assumendo le perdite nel tratto AD019 - Crotta d'Adda pari a quelle calcolate per Q=60 m<sup>3</sup>/s

Tabella 3.2: Condizioni al contorno fissate nei nodi di discretizzazione del tratto di Adda inserito nel modello

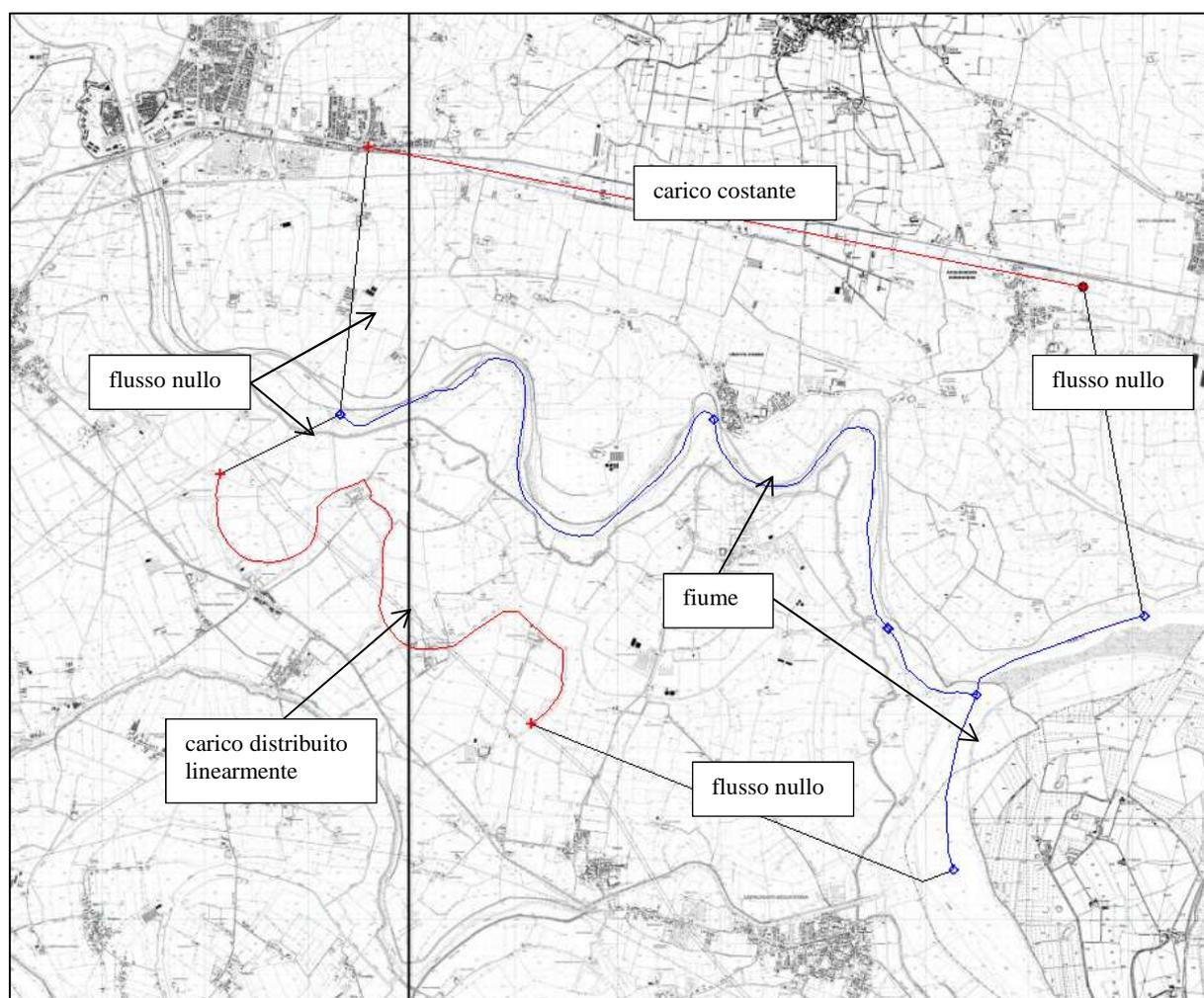
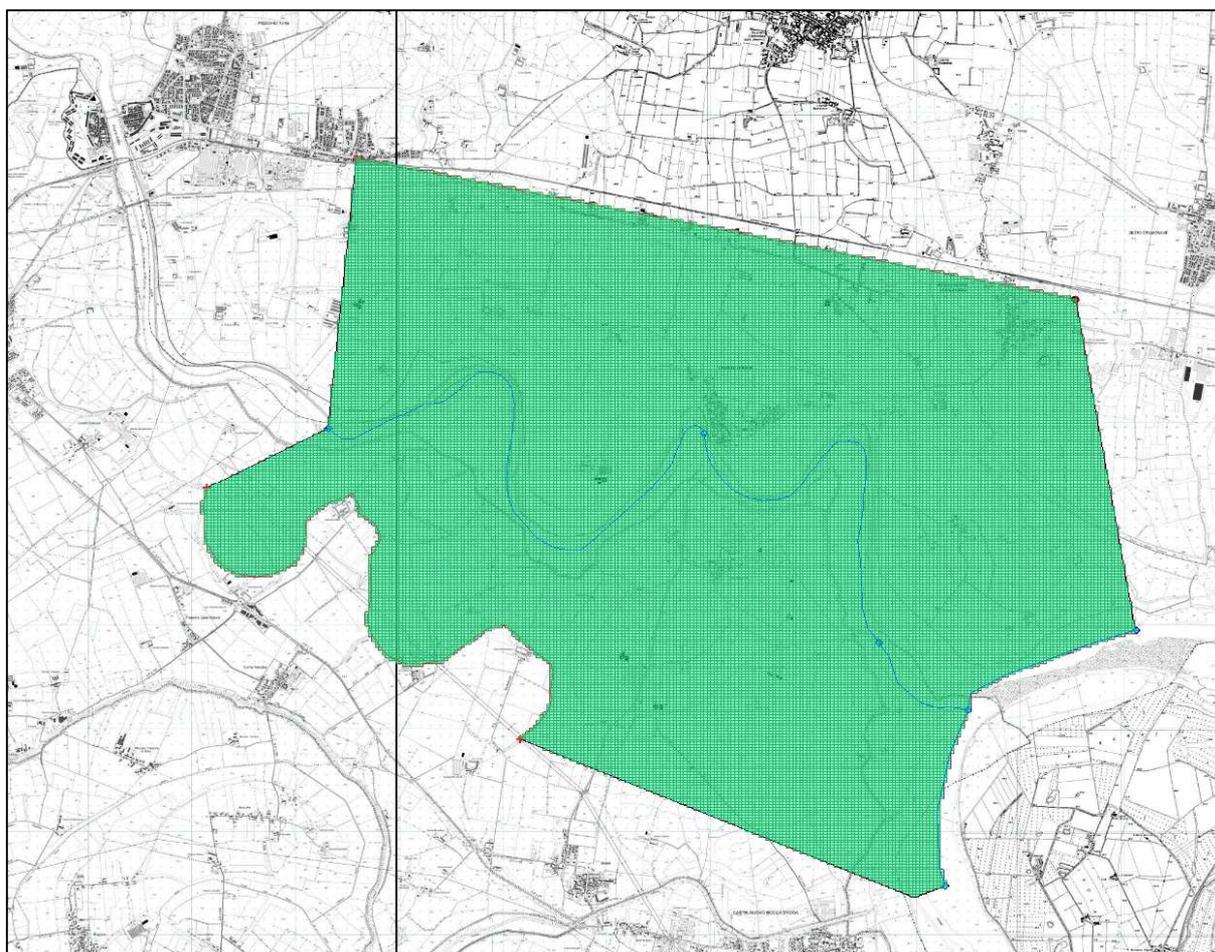


Figura 3. 22: Condizioni al contorno. In rosso la condizione di carico distribuito linearmente sul tratto, in nero le condizioni di flusso nullo ed in blu la condizione fiume (river)

### **3.8.7. La mesh di calcolo**

Per quanto riguarda la discretizzazione sul piano orizzontale, si è scelto di usare una griglia che permettesse di non appesantire il calcolo e fornire risultati correttamente approssimati per le finalità progettuali. La griglia scelta è a maglia costante con dimensioni delle celle di 30 m x 30 m per un totale di circa 90.000 celle attive (sui 2 layer).

L'estensione verticale coincide con lo sviluppo verticale del solo acquifero freatico, l'unico ad interferire con le opere in progetto. Lo strato di terreno inserito nel modello è stato discretizzato in 2 layer, separati da un piano a 15 m di profondità. La base impermeabile dell'acquifero freatico è stata posta a quote variabili, comprese tra 30 e 70 m di profondità, come illustrato in precedenza.



*Figura 3. 23: Vista in 2D della griglia di calcolo a maglie rettangolari 30x30 m*

### 3.8.8. I parametri interni al sistema

Il dominio del modello tridimensionale è stato suddiviso in 5 sub-aree omogenee in grado di considerare la variabilità del parametro di permeabilità sul piano orizzontale. In particolare le aree individuate sono le seguenti:

- il Livello Fondamentale della Pianura in territorio cremonese;
- i terrazzi alluvionali in sponda sinistra dell'Adda;
- gli alvei del fiume Adda e del fiume Po;
- i terrazzi alluvionali in sponda destra del fiume Adda;
- il lago di cava in Comune di Maccastorna.

Verticalmente sono stati discretizzati due layer: il più superficiale relativo ai primi 15 m di profondità e quello profondo da 15 m al limite basale del primo acquifero; in questo modo il modello ha potuto tenere in considerazione la variabilità verticale di permeabilità.

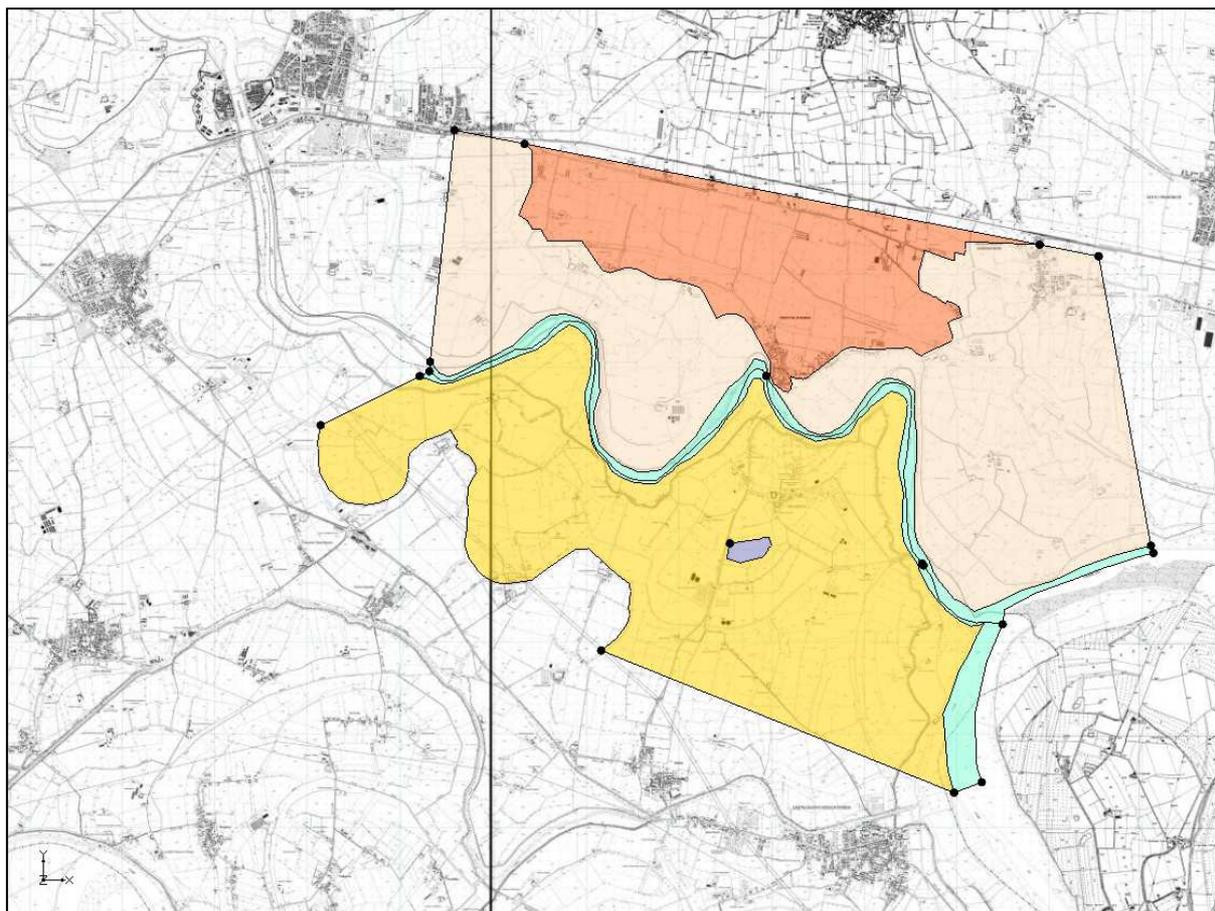


Figura 3. 24: Sub-aree individuate per tenere in considerazione la variabilità spaziale della permeabilità

### **3.8.9. Gli stress esterni al dominio**

Affinché il modello considerasse l'influenza degli apporti dovuti alle infiltrazioni efficaci (piogge e contributo irriguo), è stato quantificato il parametro denominato "ricarica".

Il valore utilizzato nel modello ( $2 \times 10^{-8}$  m/s), deriva dall'analisi dei valori riportati nell' All. 3 del P.T.U.A., il quale utilizza "un valore di ricarica (recharge) pari all'infiltrazione efficace del periodo aprile 2002 – marzo 2003, calcolata considerando il 70% del T.R.O. ( $U=100$ ). Alle piogge è stato sommato il contributo areale delle irrigazioni sulla base dei valori relativi all'anno 1996".

### **3.8.10. Calibrazione del modello**

Ultimata la fase di costruzione del modello, si è proceduto iterativamente alla sua calibrazione mediante la riproduzione dello stato di fatto, ossia la ricostruzione della piezometria sulla base delle letture piezometriche effettuate il 30.12.2014. Fissate quindi le condizioni al contorno, così come descritto precedentemente, si è assegnata una condizione iniziale (*starting heads*) da cui far partire la simulazione. Sulla base delle condizioni al contorno e delle ipotesi fissate, il software risolve l'equazione di diffusività e calcola il valore del carico idraulico all'interno di ogni singola cella, convergendo alla soluzione finale attraverso ripetute iterazioni. Mediante una procedura automatica di modellazione stocastica inversa realizzata attraverso il codice PEST (*Parameter Estimation*), i parametri assunti (permeabilità e conducibilità idraulica) sono stati ottimizzati in termini di raggiungimento degli obiettivi di calibrazione fissati sulla base dei dati di carico e di flusso a disposizione.

Sono stati inseriti 18 piezometri di controllo (*observation points*) per i quali è stata specificata l'altezza piezometrica osservata il 30.12.2014 ed in corrispondenza dei quali il programma ha fornito, di volta in volta, il confronto tra il valore di altezza piezometrica calcolata e quella osservata.

Quadro di riferimento ambientale

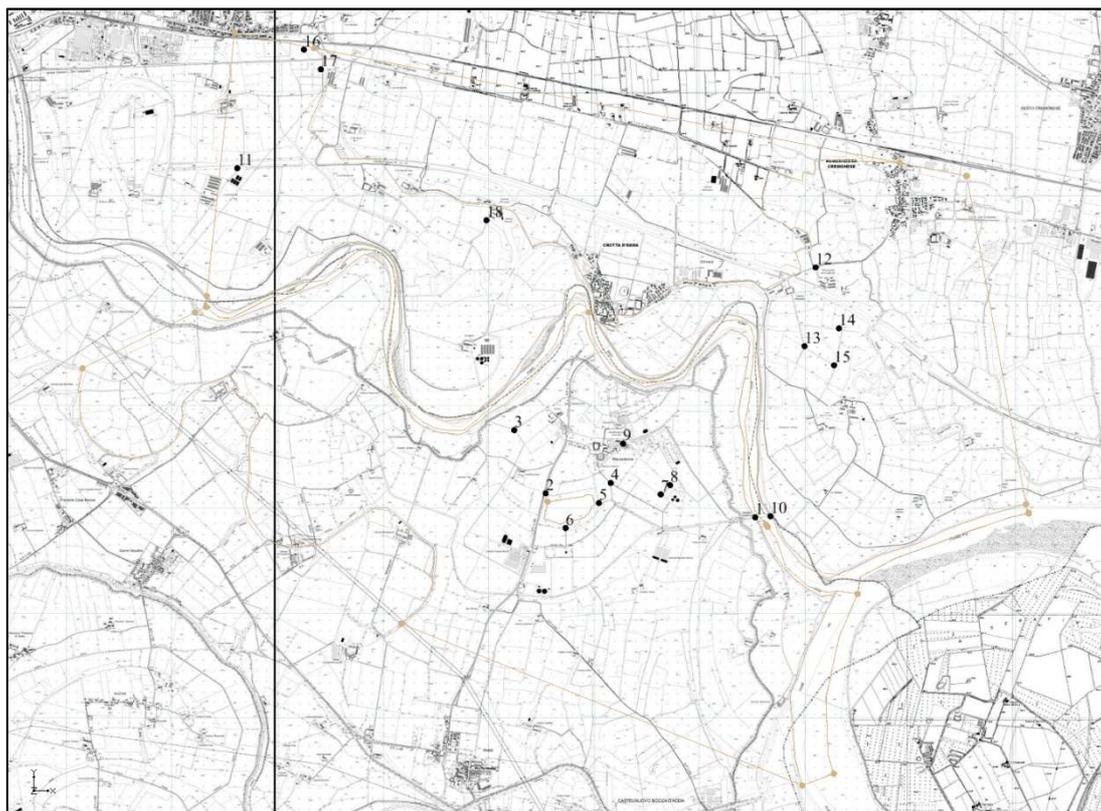


Figura 3. 25: Taratura del modello con PEST. In figura sono indicati i pozzi piezometrici di controllo (observation points) tramite i quali si è proceduto alla taratura dei parametri confrontando i livelli calcolati con quelli misurati

Al termine del processo di calibrazione, lo scostamento massimo del livello di falda calcolato rispetto a quello osservato è risultato inferiore a 0,3 m in 11 piezometri ed inferiore a 0,53 m nei restanti piezometri: l'approssimazione ottenuta è stata considerata accettabile e attribuibile agli artefatti numerici propri della formulazione.

Nodo	h	h	Differenza
	misurata	calcolata	$\Delta h$
	m s.l.m.	m s.l.m.	m
Sponda destra dell'Adda			
1	32,67	32,71	-0,038
2	37,49	37,80	-0,306
3	35,65	35,36	0,288
4	37,04	37,26	-0,218
5	37,46	37,84	-0,384
6	37,61	38,14	-0,526
7	36,54	36,29	0,248
8	36,23	35,87	0,356
9	36,35	35,98	0,373
Sponda sinistra dell'Adda			
10	32,67	32,32	0,352
11	39,64	39,46	0,176

Quadro di riferimento ambientale

12	38,42	38,69	-0,267
13	35,67	35,66	0,008
14	37,14	37,11	0,034
15	36,21	35,92	0,288
16	41,6	41,72	-0,121
17	41,15	41,57	-0,421
18	39,25	39,15	0,095

Tabella 3.3: Altezze piezometriche osservate il 30/12/2014 e calcolate dal modello in 16 piezometri di controllo

Nella seguente tabella vengono riassunti i valori dei parametri ottenuti dalla taratura.

Parametro	Area	Valore Layer 1	Valore Layer 2
<b>Permeabilità</b>	Livello Fondamentale della Pianura	7,02E-04 m/s	7,02E-04 m/s
	Sponda sinistra terrazzi alluvionali	2,70E-04 m/s	2,70E-04 m/s
	Alveo attivo Adda e Po	3,14E-03 m/s	6,27E-04 m/s
	Sponda destra terrazzi alluvionali	1,66E-04 m/s	1,66E-04 m/s
	Lago di cava di Maccastorna	1,00E+00 m/s	1,49E-04 m/s
<b>Conducibilità idraulica</b>	Fiume Adda	5,05E-02	(m <sup>2</sup> /s)/m
	Fiume Po	6,82E-02	(m <sup>2</sup> /s)/m

Tabella 3.4: Risultati della taratura del modello

Per una prima validazione dei risultati, la permeabilità ottenuta dal calcolo è stata confrontata sia con quella ottenuta nelle prove eseguite in foro di sondaggio in corrispondenza della sponda destra (ove verrà realizzata la centrale in progetto), sia con i dati di letteratura.

Le prove di permeabilità effettuate in foro di sondaggio hanno fornito valori variabili di  $1,1 \times 10^{-3}$  m/s nel banco di depositi più superficiali (primi 10 m) e di  $2,1 \times 10^{-4}$  m/s.

Per quanto concerne la letteratura specifica, invece, il P.T.U.A. della Regione Lombardia (settore 24 del Bacino 3 Ticino-Adda) indica una trasmissività di  $8 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s per la zona dei fiumi Adda e Po e  $3 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s per le altre aree. Rammentando il significato di trasmissività, è possibile ricavare il valore di permeabilità dalla relazione:

$$k = \frac{T}{s}$$

dove k è la permeabilità in m/s, T è la trasmissività in m<sup>2</sup>/s ed s è lo spessore dell'acquifero. Poiché lo spessore dell'acquifero varia tra 30 e 70 m, si ottiene una permeabilità k variabile tra  $2,6 \times 10^{-3}$  m/s e  $1,14 \times 10^{-3}$  m/s nelle aree limitrofe al fiume e prossimo a  $6 \times 10^{-4}$  in quelle più distanti dal fiume. I dati dalle prove di permeabilità e quelli di letteratura convergono ai valori tarati dal modello

### **3.9. Risultati delle simulazioni e aspetti previsionali**

Attraverso il modello elaborato sono state condotte tre simulazioni in regime stazionario (mantenendo ovviamente costanti i parametri idrogeologici del dominio):

- ricostruzione piezometrica nello stato di fatto (*ante-operam*), ipotizzando quote piezometriche e livelli idrometrici analoghi a quelli rilevati il 30.12.2014 (condizioni di magra assoluta dell'Adda); attraverso questa simulazione è stato possibile calibrare il modello, verificando il "fitting" tra i risultati rilevati e quelli simulati mediante codice di calcolo (tavola 01);
- ricostruzione piezometrica nello stato di fatto (*ante-operam*) con portata in Adda pari a  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  in Adda (tavola 02);
- ricostruzione piezometrica (*post-operam*) con massimizzazione della bacinizzazione (in termini di quota e di rigurgito) a monte della traversa in progetto, corrispondente a una portata di  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Quest'ultima è la situazione di progetto meglio rappresentata dalle condizioni di regime "stazionario": mentre è possibile un incremento di quota durante le piene del corso d'acqua (momento in cui la traversa si abbassa e risulta sostanzialmente ininfluenza sul regime idraulico fluviale), infatti, non potranno verificarsi quote idrometriche a monte della traversa inferiori a 35,5 m s.l.m. (tavola 03).

#### **3.9.1. Assetto piezometrico in condizione di magra assoluta**

La simulazione in condizioni di magra assoluta nello stato di fatto (*ante-operam*) è servita innanzitutto per la calibrazione del modello, come precisato in precedenza.

Le linee isopieze descrivono l'effetto drenante esercitato dal fiume Adda nei confronti dell'acquifero superficiale, con linee di flusso orientate circa N-S in sponda sinistra e orientate SSW-NNE in sponda destra. In prossimità dell'allineamento C.na Fossato Nuovo-Maccastorna – Acquanegra Cr.se le linee di flusso ruotano verso quadranti più orientali in sponda lodigiana per effetto di un richiamo del Po, il quale presenta livelli idrometrici più bassi (e probabilmente depositi più trasmissivi) rispetto a quelli dell'Adda.

I gradienti piezometrici aumentano progressivamente avvicinandosi ai due fiumi.

La Tavola 01 rappresenta sia le linee equipotenziali calcolate mediante il modello, sia le quote piezometriche rilevate nei pozzi e piezometri in data 30.12.2014 (per una verifica circa la bontà dei risultati ottenuti).

Le maggiori soggiacenze (ovviamente condizionate dal basso livello idrometrico dell'Adda e del Po) si registrano in prossimità delle sponde fluviali (con valori generalmente superiori a 5 m) e

quote piezometriche di circa 32 m s.l.m. in prossimità dell'impianto in progetto. I valori di soggiacenza minori, invece, competono alle aree marginali della valle alluvionale dell'Adda, in particolare al piede della scarpata morfologica a S di C.na Torbiera a Crotta d'Adda e a S di Roggione (in zona sono presenti fenomeni di emergenza idrica), oltre che a un'ampia fascia tra C.na Belvedere e Acquanegra Cr.se. In ogni caso, va precisato che la condizione di massima magra e maggior soggiacenza (con valori che di poco scendono sotto il piano campagna) corrisponde a una situazione che si verifica solamente durante il periodo tardo-primaverile ed estivo negli anni più siccitosi; nei restanti periodi dell'anno, infatti, le soggiacenze sono generalmente più ridotte e l'ampia fascia di territorio tra C.na Belvedere e il Riglio risulta allagata dalla presenza di acqua stagnante, la cui origine va ricercata in più cause, tra cui il substrato impermeabile, la morfologia depressa e la probabile presenza di una falda sospesa, oltre che all'assenza di qualsiasi canale di drenaggio e allontanamento delle acque ivi presenti.

In sponda destra le aree a minor soggiacenza sono quelle ai piedi del terrazzo wurmiano (anch'esse interessate da sorgenti di terrazzo) e nelle aree morfologicamente depresse (laghi di cava in Comune di Maleo e di Maccastorna).

Le soggiacenze in condizioni di magra assoluta sono rappresentate in Tavola 05.

### ***3.9.2. Assetto piezometrico ante operam***

Tarato e verificato il modello, si è proceduto al calcolo della falda con portata in Adda pari a 60 m<sup>3</sup>/s nella configurazione attuale (*ante-operam*).

Per svolgere questa simulazione è stato necessario definire le nuove altezze d'acqua, in riferimento alla portata transitante in Adda di 60 m<sup>3</sup>/s, mantenendo il livello idrometrico del Po alla confluenza dell'Adda in condizioni di magra ordinaria (ipotizzato pari 310 m<sup>3</sup>/s).

Quadro di riferimento ambientale

Sezione	Portata in Adda	Quota alveo	Quota acqua*	Distanza
	m <sup>3</sup> /s	m s.l.m.	m lm	km
MONTE - AD019 PAI	60	34,50	36,36	10,70
CROTTA D'ADDA	60	32,86	34,43	4,68
MONTE SALTO	60	32,02	32,59	1,01
VALLE SALTO	60	30,94	31,59	1,00
CONFLUENZA	60	27,48	31,27	0,00

\*altezze d'acqua calcolate mediante il modello 2D illustrato nella Relazione Idraulica

Tabella 3.5: Altezze d'acqua fissate nelle sezioni del fiume Adda ricostruite nel modello idrogeologico, desunte dal modello idraulico bidimensionale del tratto di Adda, illustrato nella Relazione Idraulica

Nodo	Portata in Po	Quota alveo	Quota acqua	Distanza
	m <sup>3</sup> /s	m s.l.m.	m s.l.m.	km
MONTE - S24C AIPO	310	28,86	32,09	3,58
CONFLUENZA ADDA	310	27,48	31,27*	2,29
VALLE - S24E AIPO	310	26,69	30,84	0,00

\* calcolata dal modello bidimensionale dell'Adda

Tabella 3.6: Altezze d'acqua fissate nelle sezioni del fiume Po ricostruite nel modello idrogeologico, desunte dal modello idraulico monodimensionale del tratto di Po, illustrato nella Relazione Idraulica.

I risultati della simulazione sono rappresentati in tavola 2, la quale conferma l'azione drenante dell'Adda e, a partire dalla direttrice Maccastorna-Acquanegra Cr.se, del Po.

Le linee di flusso assumono sostanzialmente le stesse orientazioni rispetto alla condizione di magra assoluta, ma diminuiscono i gradienti piezometrici (e ovviamente le soggiacenze) in prossimità delle sponde dell'Adda, causa un innalzamento del livello di base della falda (quota idrometrica dell'Adda).

Le soggiacenze in corrispondenza della sponda si mantengono sempre alte (superiori a 4-5 m) mentre si ampliano le superfici caratterizzate da scarsa soggiacenza, ai margini della valle olocenica dell'Adda (figura 3.26, tratta in stralcio dalla tavola 06).

Quadro di riferimento ambientale

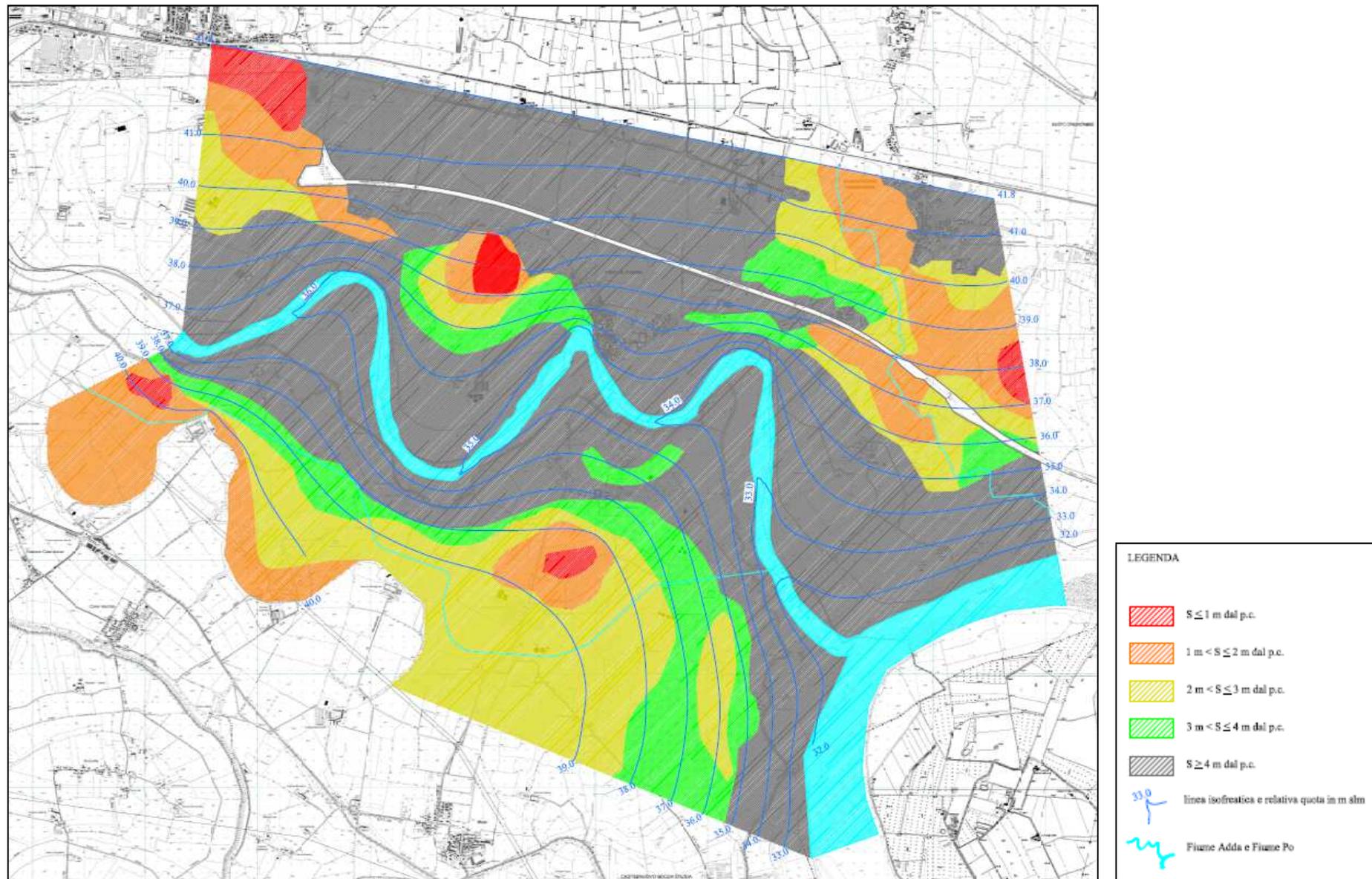


Figura 3. 26: Ricostruzione piezometrica nello stato di fatto per portata in Adda pari a 60 m<sup>3</sup>/s, tratta in stralcio dalla tavola 06

### 3.9.3. Assetto piezometrico post-operam

Per la definizione dell'assetto piezometrico *post-operam* si deve inevitabilmente considerare l'innalzamento del tirante idrico di 3 m in corrispondenza della traversa, con relativa bacinizzazione e rigurgito a monte. I livelli idrometrici a monte della traversa sono quindi stati aumentati come risulta da specifico studio idraulico (al quale si rimanda per ogni dettaglio).

Le portate e relativi livelli idrometrici di progetto in Adda utilizzati per la modellizzazione *post-operam* sono riassunti nella seguente tabella; quelli in Po sono rimasti inalterati rispetto alla modellizzazione *ante-operam* (in quanto non influenzati dalle opere in progetto).

Sezione	Portata in Adda	Quota alveo	Quota acqua - ricostruite con mod. 2D	Distanza
	m <sup>3</sup> /s	m s.l.m.	m s.l.m.	km
<b>MONTE - AD019 PAI</b>	60	34,50	36,65	10,70
<b>CROTTA D'ADDA</b>	60	32,86	36,05	4,68
<b>MONTE SALTO</b>	60	32,02	35,50	1,01
<b>VALLE SALTO</b>	60	30,94	31,59*	1,00
<b>CONFLUENZA</b>	60	27,48	31,27*	0,00

\*inalterato rispetto alla condizione dello stato di fatto

Tabella 3.7: Altezze d'acqua fissate nelle sezioni del fiume Adda ricostruite nel modello idrogeologico, desunte dal modello idraulico bidimensionale del tratto di Adda, illustrato nella Relazione Idraulica

I risultati della simulazione sono rappresentati in figura 3.27, tratta in stralcio dalla tavola 07, e in tavola 03, dalla quale si evince ancora l'effetto drenante esercitato dal sistema Adda-Po e un generale innalzamento dei livelli piezometrici; la massima escursione rispetto allo stato di fatto si rileva nella fascia prossima all'Adda immediatamente a monte della traversa e diminuisce progressivamente sia con l'esaurimento del rigurgito che verso i confini del dominio esaminato.

Ne consegue un addolcimento dei gradienti piezometrici, tranne che in corrispondenza della traversa, ove la falda verrà localmente alimentata dal fiume e i moti di filtrazione monte-valle assumeranno i valori più importanti, per contrastare i quali ed evitare fenomeni di sifonamento verranno realizzati specifici interventi strutturali (taglione antisifonamento), meglio descritti nel quadro progettuale.

Il confronto tra l'assetto piezometrico nello stato di fatto e in quello di progetto è rappresentato in tavola 04.

Quadro di riferimento ambientale

In relazione alle soggiacenze (rappresentate in tavola 07), esse si mantengono sempre superiori a 3-4 m lungo le sponde dell'Adda, nonostante in questa fascia si registrino le maggiori escursioni. Vengono invece ampliate le superfici già interessate da scarsa soggiacenza della piezometria con un risentimento maggiore per l'area depressa tra C.na Belvedere e l'abitato di Acquanegra Cr.se lungo il Riglio. In quest'area la soggiacenza della superficie piezometrica si ridurrà a valori minimi in modo permanente, contrariamente ad oggi in cui la piezometria oscilla raggiungendo la quota minima nei periodi più siccitosi (a cui corrisponde la magra dell'Adda).

Quadro di riferimento ambientale

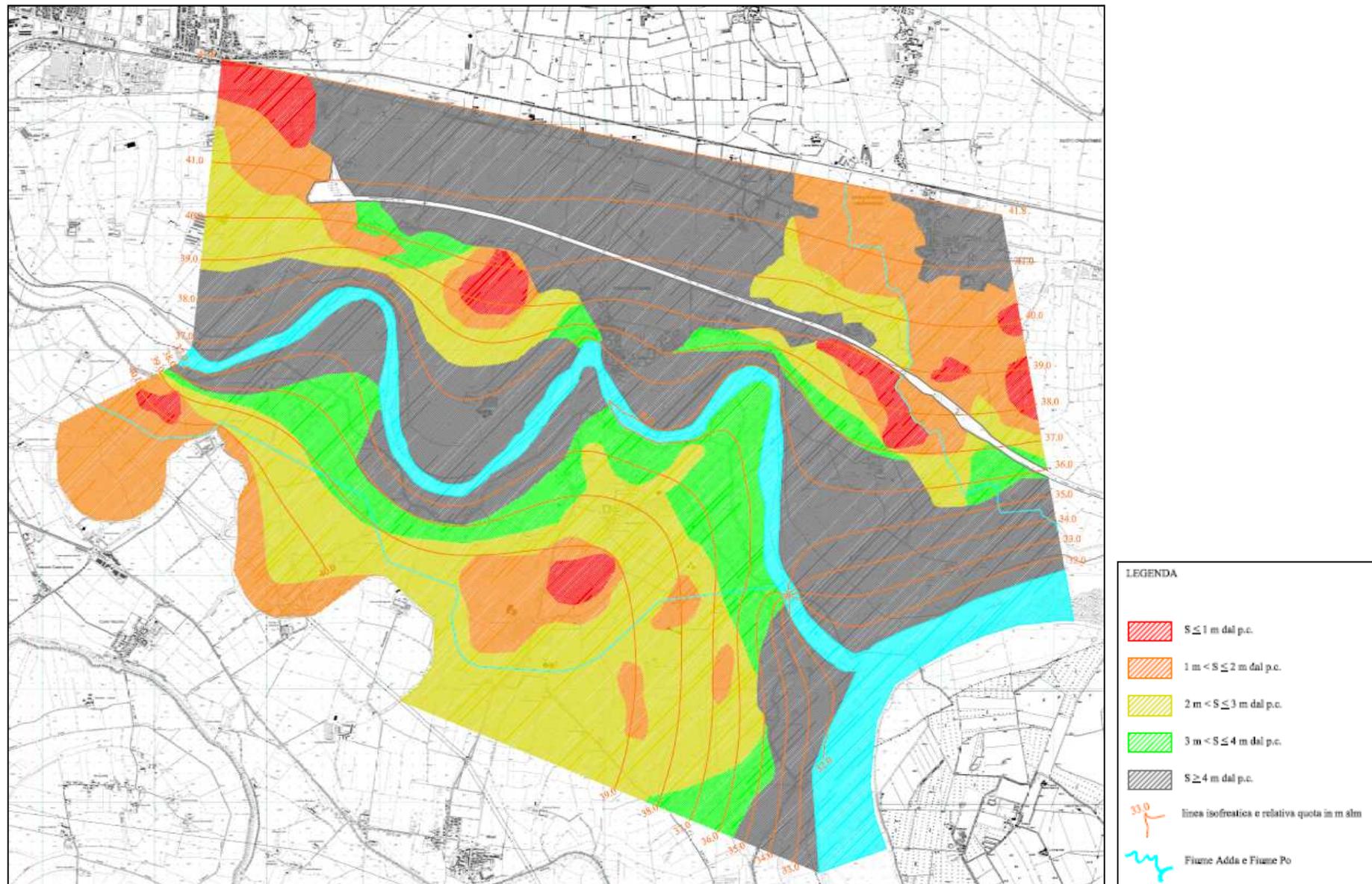


Figura 3. 27: Simulazione piezometrica nello stato di progetto per portata in Adda pari a 60 m³/s, tratta in stralcio dalla tavola 0

### **3.10. Pressioni attese dal progetto**

La realizzazione e l'esercizio dell'opera provocherà l'innalzamento della superficie piezometrica causato dall'effetto di bacinnizzazione a monte dello sbarramento in progetto. Su tale tema è stata sviluppata specifica previsione attraverso modellizzazione idrogeologica: il risultato atteso è quello di un marcato incremento piezometrico nella fascia immediatamente perfluviale, progressivamente inferiore sia con l'esaurimento del rigurgito alcuni chilometri a monte che verso i confini del dominio esaminato. Ciò nonostante sono possibili risentimenti anche nelle zone a valle delle scarpate morfologiche principali, tra cui la più estesa è quella tra la località Belvedere di Crotta d'Adda e Acquanegra Cr.se, corrispondente all'antica foce del Serio in Po. Quest'ultima è un'area morfologica depressa, modellata su un substrato scarsamente permeabile, frequentemente interessata dal ristagno di acqua causa anche l'assenza di un sistema di drenaggio superficiale. Si ipotizza, tuttavia, che la diffusa presenza di terreni argillosi di spessore metrico sia in grado di confinare l'acquifero sottostante e, conseguentemente, il potenziale espresso dalle linee isopieze non si traduca in un reale stato di saturazione dei terreni più superficiali. Nella sostanza, è opinione di chi scrive che l'acqua presente sui terreni per lunghi periodi non derivi da un affioramento della falda s.s., bensì dall'accumulo di acque meteoriche o dalla presenza di un'esile falda sospesa. Se l'ipotesi trovasse una conferma, l'innalzamento piezometrico in dette aree potrebbe non tradursi in un maggior allagamento ad opera delle acque di falda (in quanto confinata superiormente), se non dove la copertura è interrotta per cause naturali o artificiali.

Va tuttavia precisato che l'effetto di bacinnizzazione determinerà – a scala locale - condizioni idrogeologiche analoghe a quelle di alcuni decenni or sono, prima della realizzazione della centrale idroelettrica ENEL di Isola Serafini che, abbassando i livelli idrometrici del Po (il livello di base di tutte le acque superficiali e sotterranee lombarde), determinò una generale desaturazione dei terreni a danno anche delle vegetazione naturale, delle tradizionali colture agronomiche e degli ecosistemi ospitati nelle zone umide che un tempo (più di ora) caratterizzavano questa zona di valle alluvionale.

Certo è che, a parità di condizioni idrogeologiche, l'innalzamento piezometrico indurrà un incremento degli indici di vulnerabilità intrinseca dell'acquifero. In un territorio a destinazione agricola come quello in oggetto, tuttavia, la principale fonte di pressione per le acque sotterranee è rappresentata dall'infiltrazione (acqua meteorica o irrigua) che potrebbe veicolare eventuali inquinanti presenti a piano campagna. Una diminuzione di soggiacenza della falda, però, renderà disponibile alle colture agronomiche più acqua di sottosuolo, facendo proporzionalmente diminuire

il ricorso alla pratica irrigua, in una sorta di autocompensazione naturale, e ridurre il conseguente rischio di idroveicolazione di sostanze inquinanti.

### **3.11. Impatti potenziali determinati dall'opera e risposte tecniche per la loro mitigazione**

#### **3.11.1. Fase di cantiere**

- **SUOLO** - La fase di cantiere prevede un'area operativa esterna alla gola (dove saranno collocati i mezzi non in uso e verrà allestito un impianto di betonaggio, le baracche di cantiere ecc.). A mitigazione dell'impatto sul suolo del cantiere, gli orizzonti di terreno più superficiale verranno preventivamente asportati e accantonati per essere ristesati al termine delle operazioni; per velocizzare il loro riutilizzo agronomico sarà possibile apportare sull'area di cantiere dismessa del terreno vegetale di risulta dagli scavi dell'area della centrale e dei canali di presa e restituzione.
- **GEOMORFOLOGIA** - Le opere provvisorie e gli impianti di cantiere produrranno limitati impatti sull'attuale assetto geomorfologico, connessi con lo sviluppo di opere provvisorie presenti in alveo: questo fattore potrebbe determinare una locale alterazione della corrente fluviale, soprattutto durante un'eventuale piena, con lo sviluppo di possibili fenomeni erosivi sulle sponde. Nel caso si manifestassero detti eventi, sarà necessario risagomare le sponde, consolidandole mediante tecniche di ingegneria naturalistica.
- **SCAVI** - La realizzazione delle opere prevede significativi volumi di scavo, anch'essi minimizzati in fase progettuale. I terreni di risulta di composizione idonea saranno riutilizzati in sito per le opere provvisorie (ture), per il rimodellamento morfologico e per il confezionamento del calcestruzzo, prevenendo l'allontanamento della sola frazione in esubero o non idonea granulometricamente.
- **SCAVI SOTTO IL LIVELLO DI FALDA** - L'impiego di sistemi di impermeabilizzazione unitamente al ricorso a diaframmi e a tappi di fondo / colonne in jet-grouting compenetrato limiterà al minimo il ricorso a sistemi di pompaggio forzato che, nella sostanza, si ridurranno a pompe per l'agottamento delle acque di infiltrazione.
- **VARIAZIONI QUALITATIVE DELLE ACQUE SOTTERRANEE** - La realizzazione della centrale e delle opere annesse comporta l'utilizzo di "materiali da costruzione" dai quali deriva solo la teorica possibilità di fenomeni di cessione alle acque sotterranee di sostanze e composti generalmente non ritenuti inquinanti.

Quadro di riferimento ambientale

- **OPERE PER L'APPROVVIGIONAMENTO IDRICO** – Nell'area di cantiere esterna alla golena verrà realizzato un pozzo (limitato all'acquifero superficiale) per il confezionamento del calcestruzzo, per bagnare le piste di cantiere e di accesso (abbattimento polveri) e l'approvvigionamento idrico delle maestranze. Le portate prevedibilmente richieste per tali usi costituiscono un impatto limitato e reversibile sulle acque sotterranee. Al termine delle operazioni di cantiere, il pozzo potrebbe essere mantenuto attivo per alcuni anni ed impiegato per favorire il recupero agronomico dell'area utilizzata per il cantiere nonché per le irrigazioni di soccorso delle essenze vegetali messe a dimora quali interventi di mitigazione/compensazione.

**3.11.2. Fase di esercizio**

- **SUOLO** - La realizzazione della centrale e opere accessorie prevede lo scavo con rimozione definitiva del suolo su tutta la superficie d'intervento di dimensioni contenute. L'impatto è nel complesso piuttosto contenuto, trattandosi di suoli di scarso pregio.
- **GEOMORFOLOGIA** – Non è prevista alcuna alterazione di lineamenti costitutivi del paesaggio, se non limitatamente alla sponda nel tratto di realizzazione della centrale e dei canali di derivazione e resa. Nel passaggio tra progetto di massima e progetto definitivo, le dimensioni di tutte le opere sono state riviste per contenere ogni impatto paesaggistico e minimizzare l'alterazione della sponda fluviale.
- **INNALZAMENTO PIEZOMETRICO** – L'innalzamento piezometrico derivante dalla bacinnizzazione, qualora si traducesse nell'allagamento di nuove superfici (in particolare nella porzione compresa tra la località Belvedere di Crotta d'Adda e Acquanegra Cr.se in prossimità del Riglio), rappresenta un potenziale impatto, per mitigare il quale il proponente – se necessario – studierà il modo di riattivare il sistema di drenaggio e colo (in uso fino ad alcuni decenni or sono) utilizzato per allontanare le acque dalle superfici allagate e convogliarle in Adda a valle della traversa oggetto d'intervento. Se detto intervento non fosse più attuabile, come intervento compensativo si propone l'acquisizione delle superfici eventualmente allagate e la relativa destinazione a zona umida.

### **3.12. Fonti**

A.I.P.O. (Ottobre 2012) - *Studio di identificazione e coordinamento delle indagini geognostiche necessarie a valutare le caratteristiche del terreno in prossimità del tratto pensile del Canale navigabile Pizzighettone-Cremona*

AQUATER S.p.A., 1978 – *Interpretazione dei dati geofisici delle strutture plioceniche e quaternarie delle pianure padana e veneta.*

Avanzini M, Beretta GP, Francani V, Nespola M, 1995 – *Indagine preliminare sull'uso sostenibile delle falde profonde nella provincia di Milano. CAP Milano Consorzio per l'Acqua Potabile.*

Beretta G.P., Francani V., Fumagalli L., 1992 - *Studio idrogeologico della Provincia di Cremona - Pitagora ed.*

Braga G., Bellinzona G., Bernardelli L., Casnedi R., Castoldi E., Cerro A., Cotta Ramusino S., Gianotti R., Marchetti G. e Peloso G.F., 1976 - *Indagine preliminare sulle falde acquifere profonde della porzione di Pianura Padana Compresa nelle Province di Brescia, Cremona, Milano, Piacenza, Pavia e Alessandria - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ricerca sulle Acque, Roma.*

Carta Geologica della Lombardia scala 1:250.000 - Servizio Geologico Nazionale, Roma, 1990, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato.

C.N.R. – P.F.G. – Sottoprogetto Neotettonica, 1981 – *Contributi alla realizzazione della carta neotettonica d'Italia – parte II – pubblicazione n. 556*

Cremonini Bianchi M., a.a. 1980-1981 - *Indagini sulla tettonica recente del territorio del basso lodigiano - Università degli studi di Pavia*

Carta Geologica d'Italia alla Scala 1:100.000 e relative Note Illustrative, Foglio 60 "Cremona" - Ministero dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato, Direzione Generale delle Miniere, Servizio Geologico d'Italia.

Daguati M., 2012 - *Studio geologico, idrogeologico e sismico del Piano di Governo del Territorio del Comune di Maleo*

Daguati M., 2014 - *Studio geologico, idrogeologico e sismico del Piano di Governo del Territorio del Comune di Pizzighettone*

ERSAF – Ente regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle foreste; territorio suolo e ambiente; <http://www.ersaf.lombardia.it/>

Foster S.S.D., 1987 - *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy - Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundwater to Pollutants, RIVM Proc. and Inf. 38, p. 69-86.*

Gandolfi et al. (2007) - *Realizzazione di un modello preliminare del flusso idrico nel sistema acquifero della provincia di Cremona - Università degli Studi di Milano.*

Gruppo Nazionale Geografia Fisica e Geomorfologia, 1994 - *Proposta di legenda geomorfologica ad indirizzo applicativo - Estratto da: Geografia fisica e dinamica quaternaria, Vol. 16 (2), 1993; Comitato Glaciologico Italiano, Torino.*

Martinis B, Mazzarella S, 1971 – *Prima ricerca idrica profonda nella pianura lombarda. Mem .Ist. Geol. E Min. Univ. Padova, XXVIII*

Pieri M. Groppi G., 1981 – *Subsurface Geological Structure of the Po Plain, Italy. CNR Pubblicazione n. 414 del Progetto Finalizzato Geodinamica.*

Provincia di Lodi, 2003 - Piano Cave

Regione Lombardia (2003) - Allegato 3 del P.T.U.A. " Classificazione dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei di pianura"

Regione Lombardia, Geoportale, <http://www.cartografia.regione.lombardia.it/geoportale/>

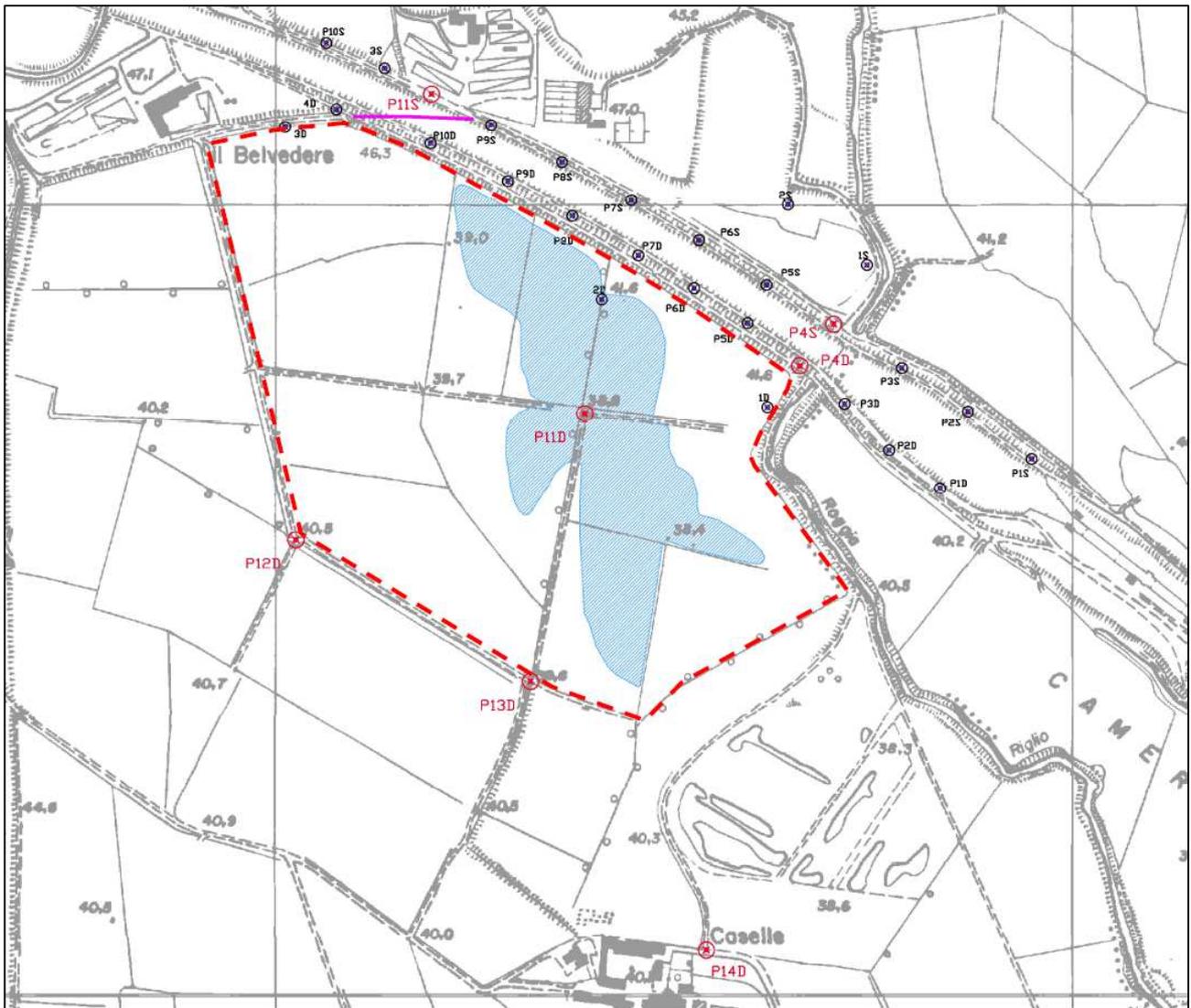
*Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), ai sensi del D.lgs. 152/2006 e s.m.i., relativa alla realizzazione dell'impianto idroelettrico "Budriese" sul Fiume Adda in Comune di Castelnuovo Bocca d'Adda (LO).*

Quadro di riferimento ambientale

Trevisan L., 1968 - *I diversi tipi di alvei fluviali e la loro evoluzione* - Accad. Naz. Lincei, Quaderno n. 112, Roma, pp. 531-561.

### 3.13. ALLEGATO

*Stratigrafie di sondaggi tratte in stralcio da “Studio di identificazione e coordinamento delle indagini geognostiche necessarie a valutare le caratteristiche del terreno in prossimità del tratto pensile del Canale navigabile Pizzighetone-Cremona”, ottobre2012”*



*Ubicazione dei piezometri/sondaggi di cui alle stratigrafie seguenti*

Montana		LOG STRATIGRAFICO		APPENDICE 1 sondaggi 2011	
conoscere, progettare, rispettare l'ambiente					
Località: Acquanegra cremonese (CR)		Sondaggio: P4D da 0 a 10 m			
Metodo perf: a carotaggio continuo		Data Inizio-Fine: 23/05/2011			
Prof. in metri	Piezometro	Prove	Profondità	DESCRIZIONE LITOLOGICA	
0,00					
1,00	Tubo cieco				
2,00					
3,00				Gabbia marrone	
4,00	Tubo frestrato				
5,00					
6,00			6,00		
7,00			7,00	Sabbia grigia umida	
8,00					
9,00	Tubo cieco		9,00	Limo argilloso e sabbioso di colore grigio	
10,00				Argilla torbosa nerastra	

Montana		LOG STRATIGRAFICO		APPENDICE 1 sondaggi 2011	
conoscere, progettare, rispettare l'ambiente					
Località: Acquanegra cremonese (CR)		Sondaggio: PD4 da 10 a 13 m			
Metodo perf: a carotaggio continuo		Data Inizio-Fine: 23/05/2011			
Prof. in metri	Piezometro	Prove	Profondità	DESCRIZIONE LITOLOGICA	
10,00					
11,00	Tubo cieco			Argilla torbosa nerastra	
12,00			12,00		
13,00	Tubo frestrato		13,00	Sabbia grigia	

Prof. in metri		Profondità	DESCRIZIONE LITOLOGICA
0,00			
1,00			Terrano agricolo con sabbia
2,00	Tratto cieco	1,80	Argilla grigia molto plastica
3,00		2,80	Argilla torbosa nerastra
4,00		4,00	
5,00	Tratto frestrak		
6,00			Sabbia grigia
7,00			
8,00		8,00	
9,00			
10,00			

APPENDICE 1  
sondaggi 2011

Prof. in metri		Profondità	DESCRIZIONE LITOLOGICA
0,00			
1,00			Mattoni e cemento
2,00	Tratto cieco	1,80	Limo argilloso marrone scuro
3,00		3,60	Argilla torbosa nerastra
4,00			
5,00	Tratto frestrak	5,00	
6,00			Sabbia umida di colore grigio
7,00			
8,00		8,00	
9,00			
10,00			

APPENDICE 1  
sondaggi 2011

Prof. in metri		Pressione	Profondità	DESCRIZIONE LITOLOGICA
0,00				
1,00				Terreno agricolo
2,00	Traito cieco		2,00	
3,00				Argille torbose nerastre
4,00			4,40	
5,00				
6,00	Traito lineare			Sabbia grigia
7,00				
8,00			8,00	
9,00				
10,00				

APPENDICE 1  
sondaggi 2011

Prof. in metri		Pressione	Profondità	DESCRIZIONE LITOLOGICA
0,00				
1,00				Terreno agricolo
2,00	Traito cieco			
3,00			3,50	
4,00			4,40	Argille torbose marrone-argiastre
5,00				
6,00	Traito lineare			Sabbia grigia umida
7,00				
8,00			8,00	
9,00				
10,00				

APPENDICE 1  
sondaggi 2011



