

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
EDILE E AMBIENTALE - ICEA**

**ANALISI DEGLI EVENTUALI EFFETTI DELLE
ATTIVITÀ UGS NEL CAMPO DI SETTALA SULLE
AREE URBANIZZATE E SUL RETICOLO FLUVIALE**

Relazione Tecnica

Massimiliano Ferronato
Pietro Teatini
Francesco Zucca

Padova, Dicembre 2021

Indice

1. Introduzione	1
2. Analisi geomorfologica.....	2
2.1 Analisi territoriale	2
2.2 Metodologia di indagine	7
2.3 Risultati dell'analisi	14
3. Simulazioni modellistiche della rete di drenaggio.....	17
3.1 Set-up del modello del canale Muzza	18
3.2 Inizializzazione del modello e simulazione della condizione “indisturbata”	22
3.3 Analisi dell'effetto delle attività UGS	23
3.3 Analisi in uno scenario di sensitivity	28
4. Conclusioni	32
Bibliografia	33



1. Introduzione

Il presente rapporto tecnico ha come oggetto l'attività svolta dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università degli Studi di Padova nell'ambito della valutazione dei possibili effetti delle attività di Underground Gas Storage (UGS) nella Concessione Settala Stoccaggio, provincia di Milano, su strutture, infrastrutture e rete di drenaggio ubicate al di sopra del giacimento. Più precisamente, l'area di interesse è quella per la quale le analisi interferometriche SAR hanno evidenziato spostamenti del suolo associabili alle attività minerarie di iniezione/erogazione di gas. Per sole ragioni di continuità morfologica e idraulica, nel presente studio si considererà un'area di estensione più ampia rispetto a quella effettivamente interessata dalle deformazioni riconducibili alle attività minerarie, pari a circa 13x15 km.

Le attività condotte possono essere suddivise lungo due linee principali di sviluppo:

- Analisi geomorfologica dell'area (nello specifico sulle strutture e sulla rete di drenaggio superficiale), condotta mediante rilievi in sito e indagini storiche atte ad evidenziare possibili anomalie riconducibili agli spostamenti del terreno causati dalle attività UGS;
- Analisi modellistica della rete di drenaggio, mediante la quale quantificare l'effetto degli spostamenti del terreno causati dalle attività UGS sull'efficienza idraulica del sistema scolante.

L'approccio metodologico e i risultati ottenuti in ciascuna delle due linee di attività sono descritti nei capitoli che seguono. Un capitolo conclusivo finale riassume i risultati principali ottenuti in relazione agli obiettivi dello studio.

2. Analisi geomorfologica

Il tema della ricerca consiste nell'evidenziare eventuali rapporti tra le deformazioni indotte dalle attività UGS, secondo quanto evidenziato dall'analisi dei dati InSAR rilevati nell'area della concessione di Settala nel periodo 2003-2020, e il sistema idrografico maggiore e minore. L'analisi viene condotta per mezzo di strumenti GIS e di survey geomorfologico, ponendo particolare attenzione al reticolo idrografico e alle sue dinamiche.

2.1 Analisi territoriale

Il territorio esaminato (Figura 1) è rappresentativo della tipica espressione morfologica della pianura lombarda-est milanese, con particolare riferimento all'unità fisiografica principale del cosiddetto "livello fondamentale della pianura" o "Piano Generale Terrazzato" (Figura 2).

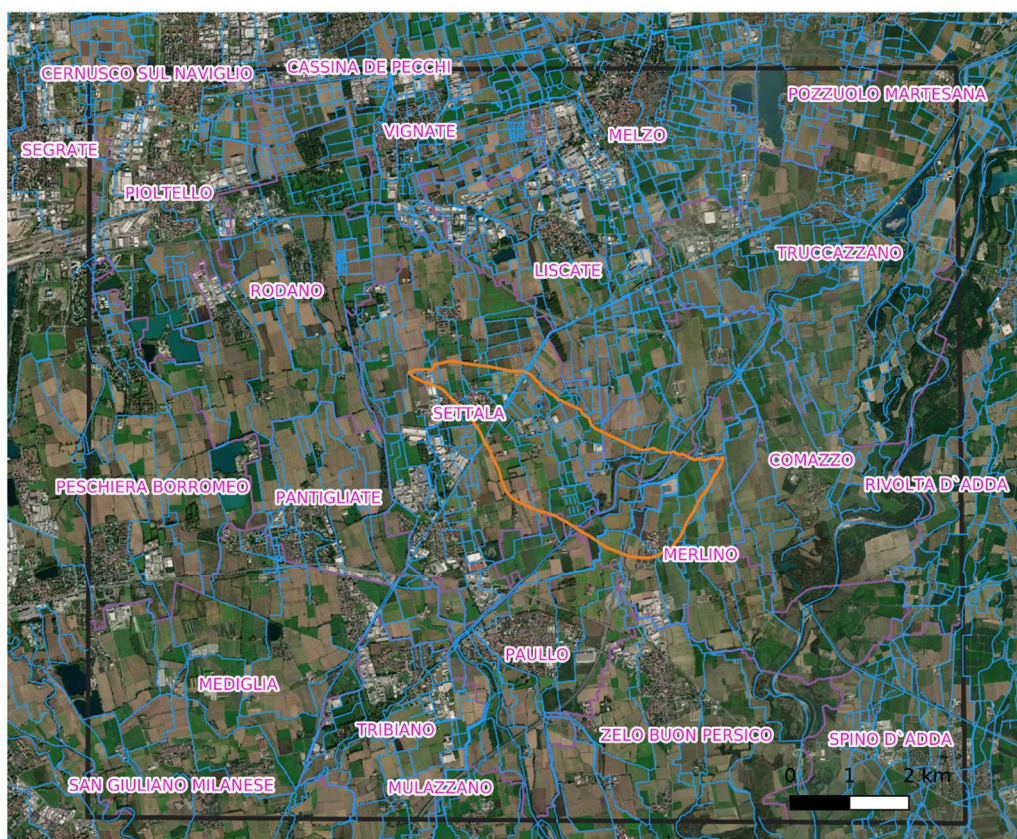


Figura 1 Area interessata all'analisi (outline nero) con proiezione in superficie del limite del giacimento di Settala, inteso come limite del contatto gas-acqua originario (outline arancione).

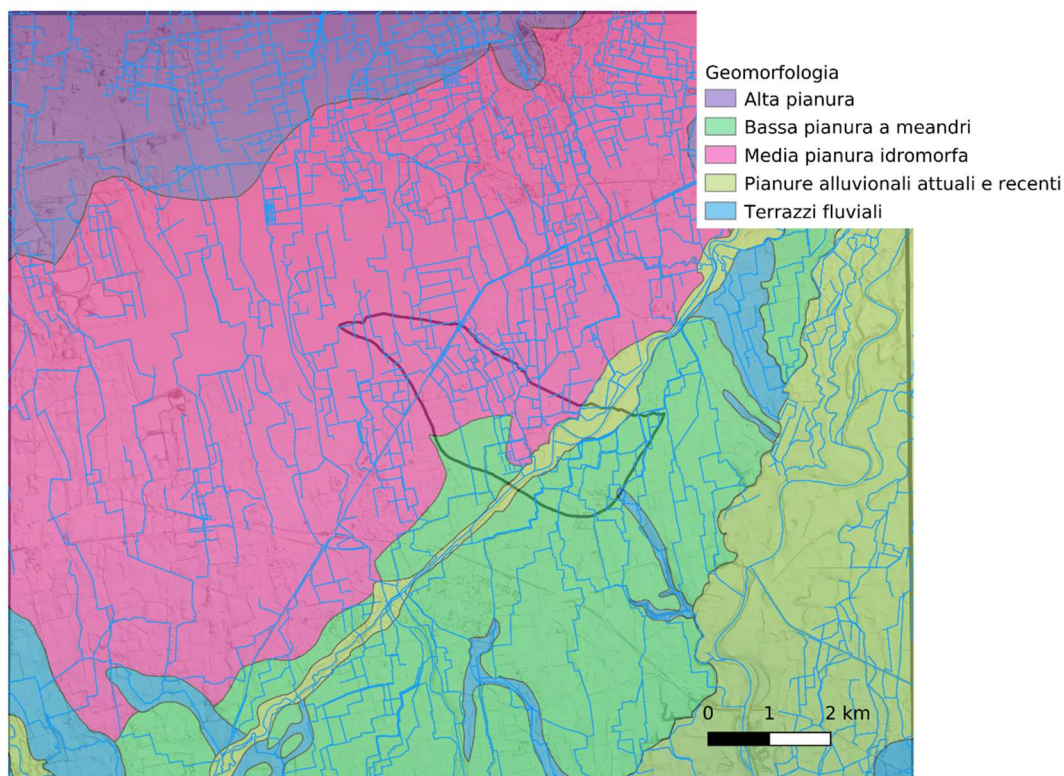


Figura 2 Geomorfologia schematica.

Più precisamente, l'area è situata nella fascia di transizione tra la media pianura idromorfa e la bassa pianura a meandri. La media pianura idromorfa (ERSAF & RL, 2004) è la zona della piana fluvio-glaciale in cui, per la diminuzione di permeabilità conseguente alla riduzione granulometrica dei sedimenti, la falda freatica emerge in superficie o permane a scarsa profondità. Tale pedopaesaggio coincide con la fascia delle risorgive, è delimitato a nord dalla linea ideale che congiunge i primi fontanili e termina a sud dove questi si organizzano in corsi d'acqua permanenti, originando un reticolo idrografico di tipo meandriforme. In questo ambiente, la pedogenesi è condizionata dai processi di rideposizione dovuti alle acque correnti o stagnanti e, soprattutto, dalla saturazione idrica del suolo a diverse profondità e per periodi più o meno lunghi. I fenomeni di idromorfia, legati alla presenza di una falda semipermanente prossima alla superficie, sono più marcati in corrispondenza delle depressioni delle testate dei fontanili, mentre assumono un minor rilievo nelle superfici sub pianeggianti e relativamente stabili che costituiscono il corpo principale di questo ambito morfologico. La bassa pianura a meandri, invece, è un pedopaesaggio che contraddistingue il basso milanese, ai confini con le province di Lodi e Pavia. Il suo limite settentrionale corrisponde alla zona in cui si osserva l'organizzazione delle acque di risorgiva in un reticolo fluviale a meandri, sempre più inciso nei terreni circostanti man mano che ci si avvicina alla

piana di divagazione del Po, che costituisce il suo limite meridionale. I sedimenti che caratterizzano la bassa pianura sono generalmente sabbiosi e secondariamente limosi. I suoli sono evoluti e fertili, generalmente ben drenati o con fenomeni di idromorfia di lieve o moderata entità, più equilibrati nella tessitura e nelle proprietà chimiche di quelli presenti nell'alta e media pianura. L'assenza di fattori di disturbo ha consentito in questo ambiente una prolungata pedogenesi sui materiali d'origine, con presenza di orizzonti d'alterazione o di illuviazione d'argilla in profondità.

La superficie morfologica di interesse, evidenziata in Figura 3, presenta una topografia sostanzialmente pianeggiante con quote medie tra 130 m (Nord) e 70 m s.l.m. (Sud-Est) e pendenze intorno al 3 – 5 ‰ con debole inclinazione verso SSE e verso il Po. Si tratta di un ambito soggetto a interventi antropici a carico della componente morfologica e del reticolo di drenaggio, realizzati a partire dall'epoca storica sino ad oggi, con azioni di livellamento delle aree agricole e costruzione della rete di canali artificiali con sostanziale modifica del reticolo naturale (canale Muzza, colatore Addetta).



Figura 3 Rilievo topografico dell'area di interesse.

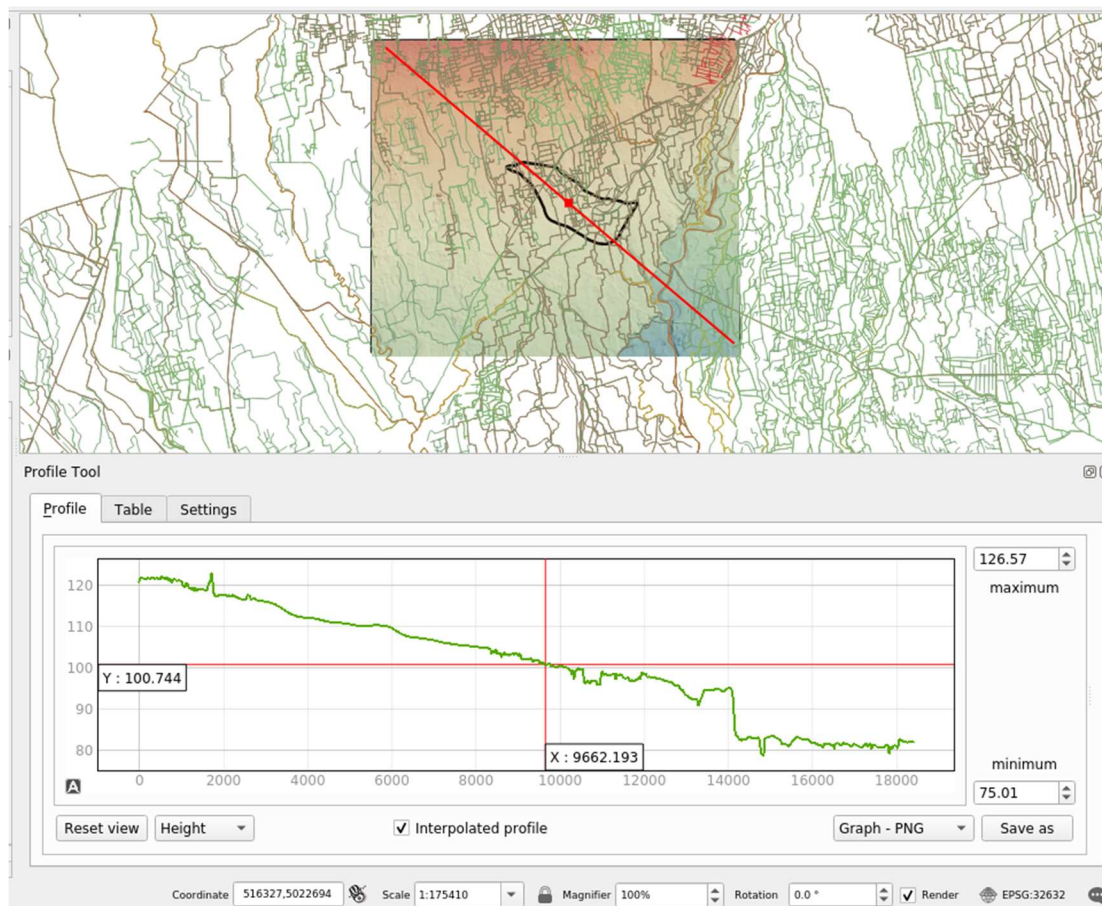


Figura 4 Profilo topografico NW-SE.

L'area si presenta pianeggiante (Figura 3, Figura 4 e Figura 5) e priva di particolari caratteri morfologici, se si esclude la valle dell'Adda a Est, che, seppure marginale a questo studio, separa in maniera evidente con un insieme di terrazzi la fascia della media-bassa pianura dall'alveo del fiume Adda (pianure alluvionali attuali e recenti). Nello stesso ambito morfologico va collocato l'asse della Muzza-Addetta (NE-SW) che ben si evince anche da una lettura del DEM. L'area è segnata in maniera pervasiva da un fitta rete di corsi d'acqua, per lo più a carattere artificiale, che costituiscono il complesso sistema di rogge tra il Naviglio della Martesana, che scorre in direzione est-ovest e delimita verso settentrione l'area di studio, e la Muzza, che scorre da Truccazzano (Nord Est) verso Paullo (Sud). Tale fitta rete di corsi d'acqua rappresenta l'elemento caratterizzante dell'area di interesse all'interno della quale è ricompresa l'area del giacimento ove si manifestano le deformazioni in superficie a effetto dello stoccaggio di gas.

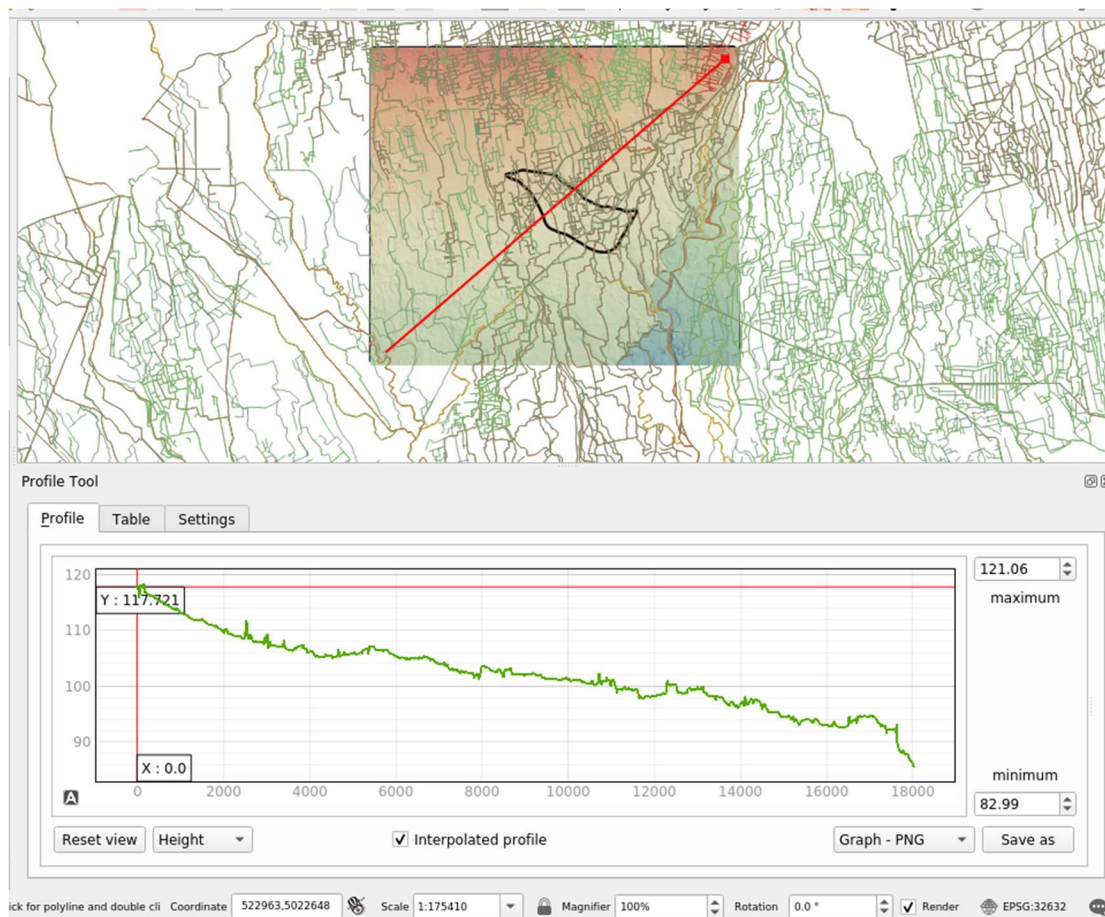


Figura 5 Profilo topografico NE-SW.

Il sistema idrografico è caratterizzato da una estesa artificialità legata all'attività antropica a fini agricoli, dovuti alla pratica dell'irrigazione a scorrimento e di bonifica dei territori. Tra le aste fluviali e torrentizie, vanno segnalate per naturalità il torrente Molgora, che attraversa l'area Nord-Est dalla zona di Melzo fino alla sua confluenza nella Muzza (Comazzo-Truccazzano), e appunto la Muzza. In tempi pre-storici, la Muzza era un ramo naturale del sistema dell'Adda, che si allontanava dal corso principale a Cassano d'Adda sviluppandosi in maniera dispersiva nel territorio in analisi fino verso l'attuale Paullo. Probabilmente qui si esauriva, anche se è possibile che attraverso il corso dell'attuale colatore Addetta arrivasse nel Lambro a Melegnano. Successivamente, in epoca romana e seguenti, la Muzza è stata oggetto di attività di modifica del corso soprattutto per scopi di bonifica. Attualmente si presenta come un sistema monocursale a fondo mobile, anche se alcuni elementi lungo il corso, come lanche e meandri, ne ricordano l'origine naturale.

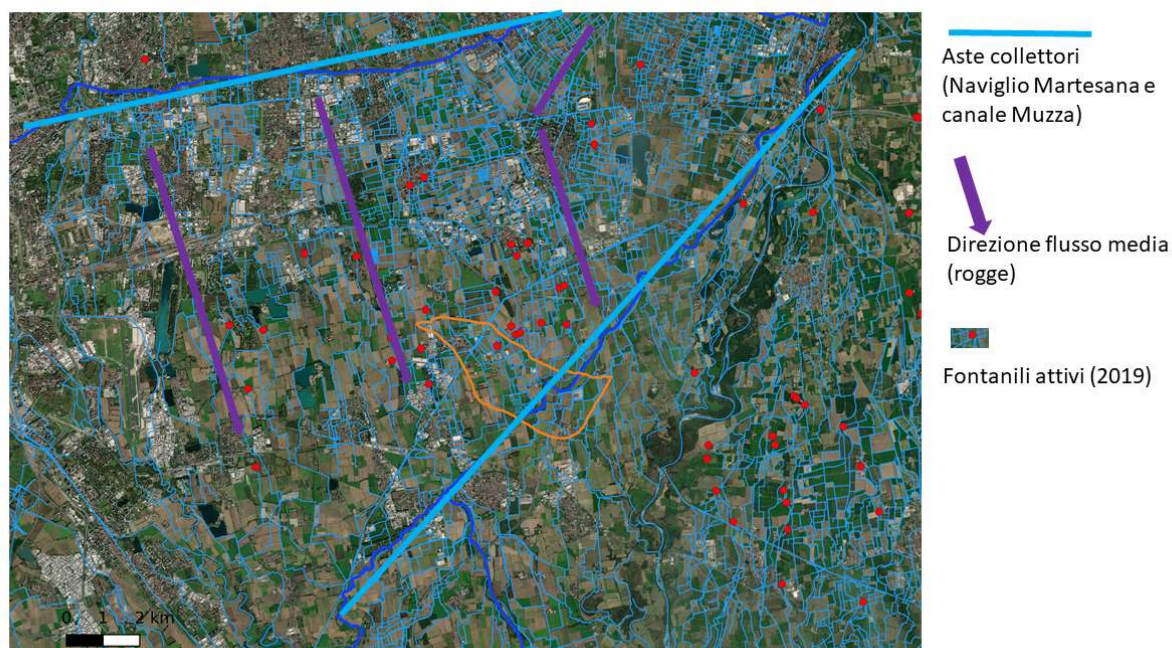


Figura 6 Schema idrografico e localizzazione dei fontanili attivi.

Dal punto di vista idrogeologico, il territorio è caratterizzato dalla presenza in senso longitudinale della cosiddetta fascia dei fontanili (Figura 6), che costituiscono l'emergenza diretta della falda superficiale al di sopra della superficie topografica. Insieme a Naviglio Martesana e Muzza, i fontanili (esistenti ed estinti) alimentano, o alimentavano, rogge e sistemi di canalizzazione a fini irrigui. Alcuni dei fontanili dell'area, come Roggia Muzzetta e Rile, rappresentano attualmente ambiti di protezione a carattere regionale e danno l'idea del ruolo fondamentale che questi sistemi avevano nella pratica agricola dell'area, oltre che per la caratterizzazione paesaggistica e l'impatto sulla biodiversità.

2.2 Metodologia di indagine

La prima parte dell'analisi è stata condotta mediante la raccolta di informazioni di varia natura relativamente all'assetto topografico e idrologico dell'area in esame, al fine di descrivere l'evoluzione recente del territorio, sottolineare eventuali modifiche al suo assetto e costituire la base di un sistema di database spaziale (GIS) da utilizzare per incrociare informazioni e produrre cartografia.

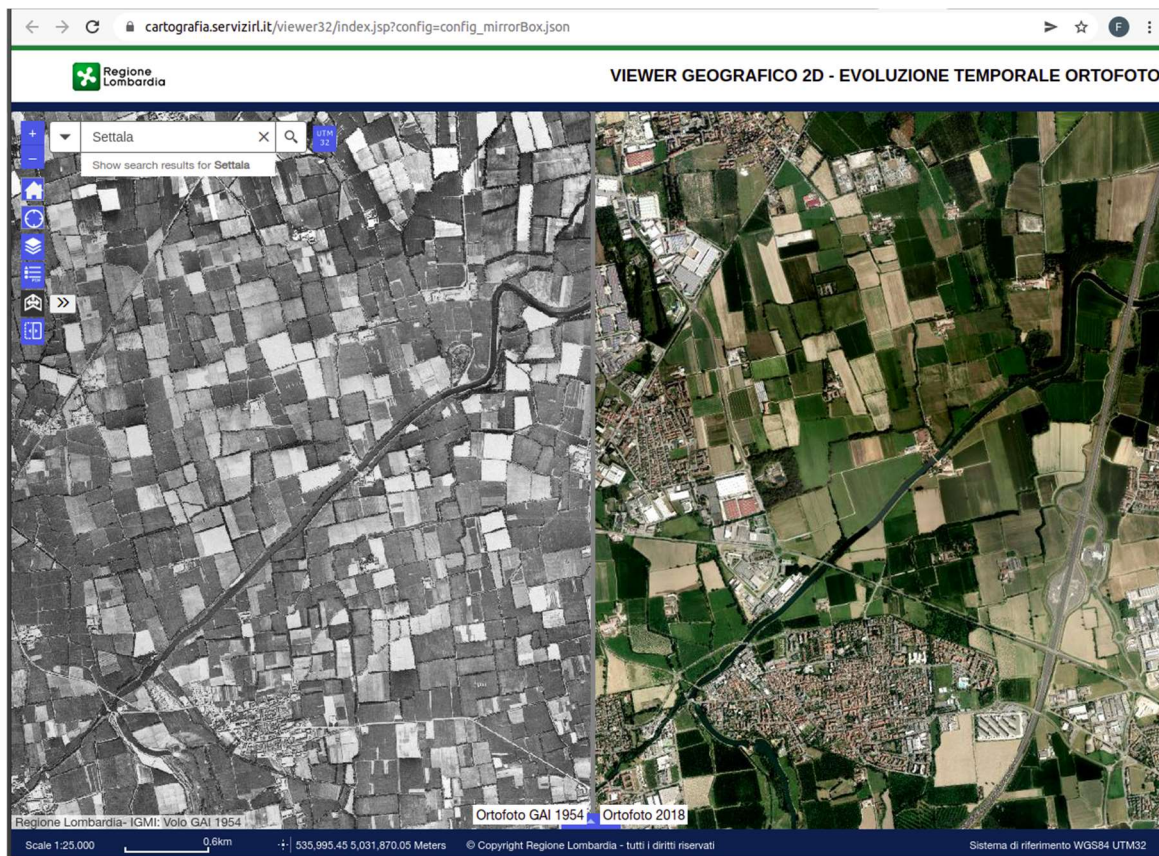


Figura 7 Viewer geografico 2D per analisi evoluzione temporale ortofoto.

Allo scopo si sono utilizzati preliminarmente servizi di osservazione e comparazione, come il visualizzatore pubblico di Regione Lombardia disponibile al link (Figura 7):

https://www.cartografia.servizirl.it/viewer32/index.jsp?config=config_mirrorBox.json.

Contestualmente è stato sviluppato un progetto GIS, su piattaforma QGIS, per il contenimento dei dati cartografici e strutturati che Regione Lombardia e altre fonti, come il Geoportale Cartografico Nazionale del Ministero dell’Ambiente e il comune di Settala, mettono a disposizione attraverso servizi OGC (Open Geospatial Consortium) di portale cartografico. Sono state inoltre inserite tutte le informazioni prodotte durante le attività di terreno. Il GIS rappresenta, infatti, un fondamentale collettore di dati, spesso a carattere eterogeneo tra di loro, per lo svolgimento di attività di analisi, visualizzazione e condivisione.

La tipologia di dato, utilizzato per la creazione del database spaziale, è principalmente costituita da diversi stage temporali di ortofoto messe a disposizione da Regione Lombardia con il meccanismo WMS (Web Map Service) dell’OGC. In particolare, sono state utilizzate le ortofoto appartenenti alle seguenti collezioni:

- Volo GAI 1954 ^{1*}
(https://www.cartografia.servizirl.it/arcgis2/services/BaseMap/Lombardia_GAI_UTM32N/MapServer/WmsServer)
- ortofoto 1975 *
(<https://www.cartografia.servizirl.it/arcgis2/services/BaseMap/ortofoto1975/ImageServer/WMServer>)
- ortofoto 1998 *
(<https://www.cartografia.servizirl.it/arcgis2/services/BaseMap/ortofoto1998/ImageServer/WMServer>)
- ortofoto 2007 *
(<https://www.cartografia.servizirl.it/arcgis2/services/BaseMap/ortofoto2007UTM/ImageServer/WMServer>)
- ortofoto 2015 *
(<https://www.cartografia.servizirl.it/arcgis2/services/BaseMap/ortofoto2015UTM32N/ImageServer/WMServer>)
- ortofoto 2018 *
(<https://www.cartografia.servizirl.it/arcgis2/services/BaseMap/Ortofoto2018/ImageServer/WMServer>)

All'interno del GIS, questi elementi possono essere gestiti in stack, ovvero layer tra di loro sovrapposti e coordinati spazialmente. Questo offre la possibilità di operare analisi di comparazione e valutazione di modifiche degli elementi del paesaggio. A queste informazioni sono stati integrati:

- dati cartografici relativi al Reticolo Idrografico Regionale Unificato (Regione Lombardia):
https://www.geoportale.regione.lombardia.it/metadati?p_p_id=detailSheetMetadata_WAR_gptmetadataportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&detailSheetMetadata_WAR_gptmetadataportlet_uuid=%7B279640CD-39AD-4437-8B6C-65E2A915096B%7D
- il DTM 5X5 - Modello digitale del terreno (ed. 2015)
https://www.geoportale.regione.lombardia.it/metadati?p_p_id=detailSheetMetadata_WAR_gptmetadataportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&detailSheetM

¹ * questi link non sono da utilizzare in un browser, ma sono riferimenti a servizi OGC-WMS (<https://www.ogc.org/standards/wms>) da utilizzare in un GIS (es. QGIS & ARCMAP) attraverso meccanismi specifici di aggiunta di strati WMS/WMTS. L'utilizzo direttamente da browser non produce output significativi.

[etadata_WAR_gptmetadataportlet_uuid=%7BFC06681A-2403-481F-B6FE-5F952DD48BAF%7D](https://www.geoportale.regione.lombardia.it/metadati?detailSheetMetadata_WAR_gptmetadataportlet_uuid=%7BFC06681A-2403-481F-B6FE-5F952DD48BAF%7D)

- il DEM da LiDAR 1x1 m del PCN-Min. Ambiente, laddove arealmente disponibile <https://www.geoportale.regione.lombardia.it/consultazione-e-distribuzione>
- il quadro delle “Esondazioni storiche tra Ticino e Adda” di Regione Lombardia https://www.geoportale.regione.lombardia.it/metadati?p_p_id=detailSheetMetadata_WAR_gptmetadataportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&detailSheetMetadata_WAR_gptmetadataportlet_uuid=%7B6DFB1E06-B183-4835-A922-D91D7AE680CE%7D
- altri dataset spaziali, come ad esempio fontanili e uso del suolo.

Questo sistema integrato di dati ha fornito la base su cui sovrapporre gli output dell’analisi InSAR e selezionare i siti di survey. Tale procedura è stata realizzata in maniera prioritaria su ambiti che vedessero la contemporanea presenza di sistema idraulico (rete idrografica maggiore o minore) ed evidenze dal dato InSAR di movimenti del terreno riferibili alle attività di stoccaggio, al fine di individuare eventuali stati di alterazione rispetto agli stage temporali forniti dalle ortofoto. Il rilievo di terreno si è concentrato in particolare sulle arginature e sui pendii del sistema idraulico, ma anche sugli alvei, laddove possibile, e su opere di derivazione e innesto.

Il reperimento del dato è stato ottenuto mediante rilievi fotografici e misure topografiche di dettaglio con GPS differenziale (Topcon Hiper-Pro) del profilo trasversale. Alcuni esempi del rilievo fotografico svolto nell’area e integrato nell’analisi QGIS sono riportati in Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11, con quadro di riferimento in Figura 12. Lo scopo primario di queste attività è quello di individuare eventuali anomalie comportamentali, come alterazioni del profilo trasversale e della forma della sezione del canale o danni alle opere, collegate a processi erosivi e di sottoescavazione.



Figura 8 Roggia Fontanile Catanino (comune di Settala – area est del giacimento): esempio di mancata manutenzione del sistema idraulico, con evidenti intrusioni in alveo di tappeti erbosi consistenti a produrre occlusioni alla continuità del flusso.



Figura 9 Roggia Calca Calchera A (comune di Pioltello – area nord-ovest del giacimento).



Figura 10 Canale Muzza – Ponte di Lavagna (area est del giacimento).



Figura 11 Cavo Fontanile Quattro Ponti (comune di Settala – area est del giacimento): tipica situazione spondale con sponde vegetate e albero in fregio alla roggia al limite del ribaltamento.



Figura 12 Quadro di ubicazione dei siti rappresentati dalle fotografie 8-9-10-11

Infine, sono state utilizzate anche informazioni derivate da catasti storici presenti presso l'archivio di stato di Milano e disponibili anche in formato digitale. Si sono, in particolare, cercati segnali di eventuali sistemi idrici attualmente dismessi che in qualche maniera potessero rappresentare elementi di rilevanza rispetto all'analisi in corso. Tali dati sono recuperabili dal sito web:

<http://asmilano.it/Divenire/collezione.htm?idColl=10657105&&viewMode=list&noPages=1>

2.3 Risultati dell'analisi

Il processo di analisi delle fonti storiche, unitamente all'attività di rilievo di dettaglio del terreno, è stato condotto alla ricerca di eventuali relazioni tra le deformazioni superficiali indotte dall'attività di stoccaggio, e misurate tramite InSAR, e l'instaurarsi di processi morfodinamici a carico del sistema idrologico superficiale, costituito dai collettori principali e dal reticolo minore, come fenomeni di erosione, deposito o modifica del percorso. Per evidenziare cambiamenti nel regime del sistema fluviale, sono stati monitorati gli elementi della geometria idraulica insieme a evidenze di anomalie di comportamento, come ad esempio la direzione di flusso.

Per la parte geometrica, l'indagine si è basata su due approcci:

1. l'analisi planimetrica via GIS e visori di cartografia storica e ortofoto;
2. il rilievo di terreno diretto, alla ricerca di evidenze di processi in atto.

Per individuare le priorità di ricerca e di caratterizzazione del territorio, è stato utilizzato come riferimento il rilievo InSAR del periodo 2003-2020, analizzando nel GIS le componenti di velocità media annua e di ampiezza delle variazioni stagionali. Questo ha permesso di identificare le zone a diverso comportamento dinamico e, in particolare, di distinguere l'area che evidenzia spostamenti monitorati riferibili allo stoccaggio da quelle in cui gli spostamenti non sono riconducibili alle attività minerarie. A tali zone sono state sovrapposte informazioni di diversa natura, come quelle relative ai fenomeni di flooding avvenuti nel comune di Settala, che avrebbero potuto rappresentare elementi in grado di segnalare un'eventuale modifica topografico-geomorfologica. Inoltre, l'attività di rilievo, condotta nell'area degli spostamenti riferibili allo stoccaggio e, per continuità, nelle zone limitrofe, ha riguardato anche la ricerca di eventuali sistemi fessurativi in edificato, viabilità e in opere in fregio a corsi d'acqua.

Il complesso di analisi non rivela la presenza di trend evolutivi anomali legati alle attività di stoccaggio gas. Il sistema del reticolo minore, infatti, non presenta variazioni planimetriche e della larghezza in nessuna delle analisi realizzate, pur nei limiti della capacità di lettura offerta dalle ortofoto e dalle foto aeree. I rilievi di terreno, effettuati sia in fregio al sistema idraulico, sia, quando possibile, anche direttamente nel canale, non hanno evidenziato fenomeni a carico delle sponde, come

ad esempio erosioni o sottoescavazioni. Tali sponde risultano in condizioni stabili su tutta la rete investigata. Si segnalano solamente alcuni rari, e comunque locali, fenomeni di degradazione, non legati a variazioni topografiche indotte, ma chiaramente imputabili a scarsa o nulla manutenzione della flora arborea del sistema spondale, che nel progredire degli anni tende a formare occlusioni e micro-invasi.

Relativamente alla flora ripariale, per quanto non oggetto di analisi, va segnalata la presenza ubiquitaria nella rete idraulica minore di vegetazione emergente e sommersa, con locale presenza di flora flottante. Questi elementi sono rappresentativi di una buona qualità del sistema idraulico, in termini sia di qualità delle acque, che di continuità del drenaggio, in quanto il flusso continuo risulta in grado di smaltire il deposito dall'erosione dei campi.

Per quanto riguarda eventi di flooding, le fonti recuperate sono variegata e includono articoli di giornali locali, video in rete, il Piano-Emergenza-Comunale del comune di Settala nell'edizione del 2019 e i dati "Esondazioni storiche tra Ticino e Adda" di Regione Lombardia, che riportano per l'area est Milanese eventi significativi nel 1947, 1951, 1976, 2014 e 2015 (Figura 13, Figura 14 e Figura 15).

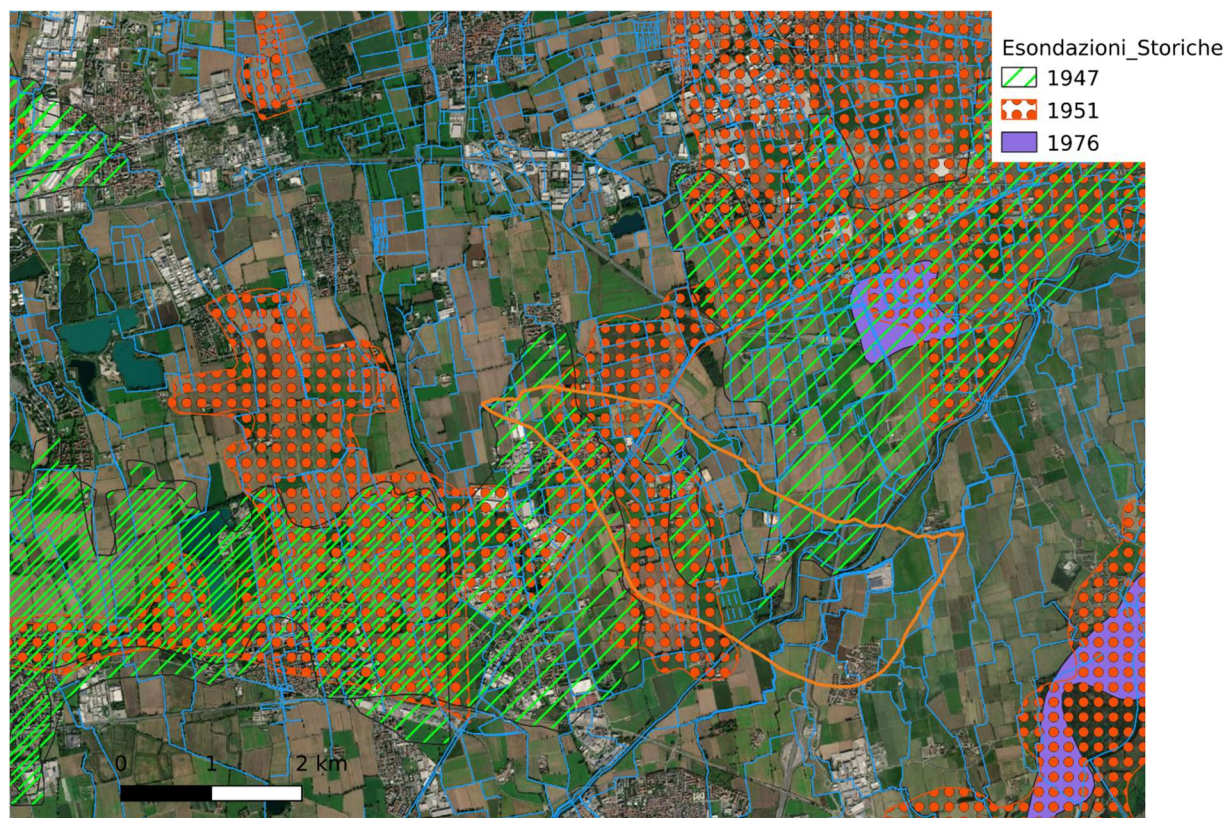


Figura 13 Aree esondate negli eventi del 1947, 1951 e 1976 (fonte Regione Lombardia),

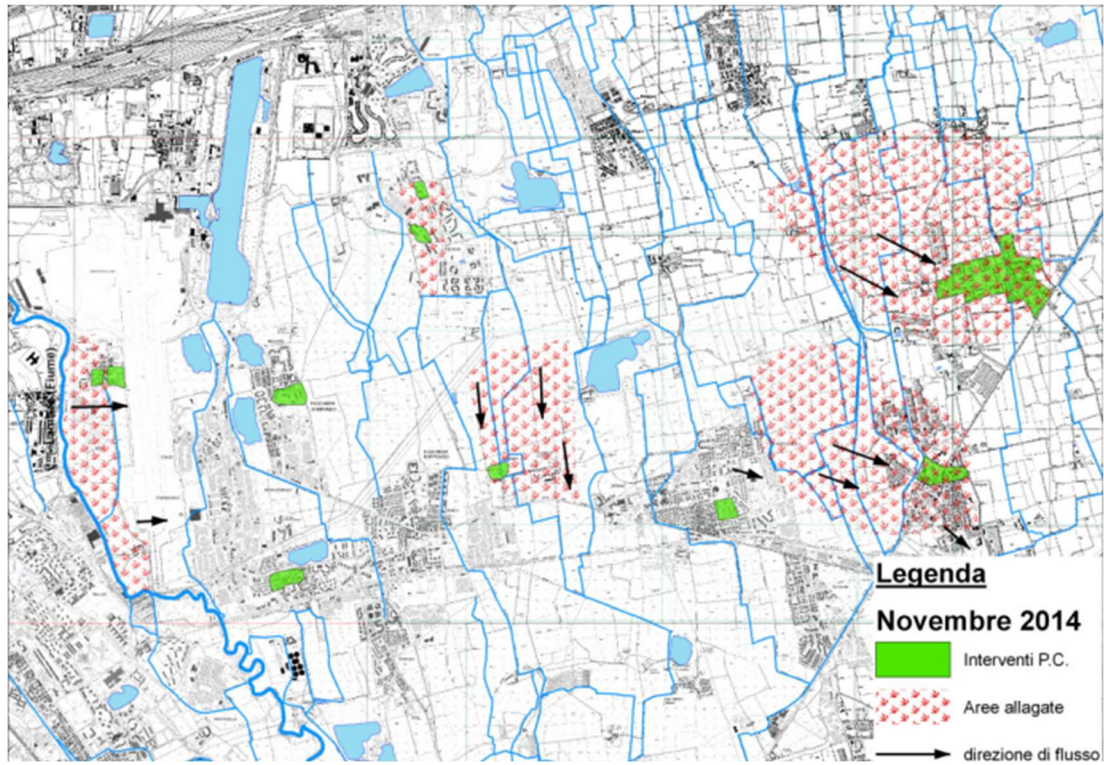


Figura 14 Aree alluvionate nell'evento del 2014 (da Rampolla et al 2015, fonte Regione Lombardia).

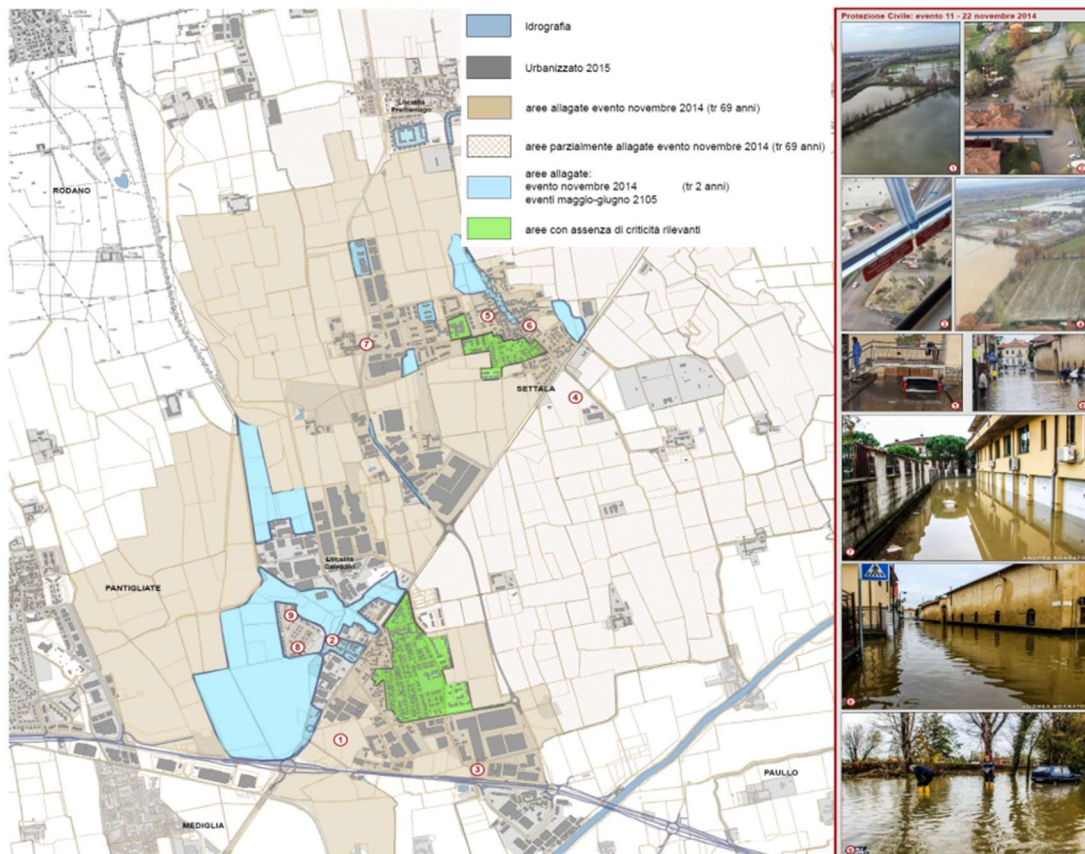


Figura 15 Aree esondate negli eventi del 2014 e 2015 (da Chiesa, 2019).

Si tratta di eventi che in parte pre-datano l'attività di sfruttamento del campo e che non appaiono legati spazialmente alla configurazione dell'area principalmente interessata dagli spostamenti rilevati mediante InSAR. Tali eventualità sono quindi da riportare a problematiche di gestione del territorio e di mancata invarianza idraulica, e non all'attività di stoccaggio.

Per quanto riguarda, infine, elementi di fratturazione in edifici e opere, è possibile segnalare alcuni fenomeni individuati nella zona di Cascina Briavacca, Marzano e nella frazione di Conterico (Paullo) in prossimità del ponte sulla Muzza. Tuttavia, la mancanza di correlazione spaziale fra gli eventi, la qualità del costruito e l'assenza di conferme da altri elementi del monitoraggio, come le deformazioni InSAR, fanno risalire la causa a problemi infrastrutturali e/o geotecnici locali legati alla presenza di depositi con scarsa qualità portanti, e non a stati deformativi indotti da sorgente profonda.

La conclusione di questa analisi è che non esistono nell'area in esame evidenze di modifiche geomorfologiche legate a variazioni dell'assetto del terreno dovute all'attività di stoccaggio condotta nel campo di Settala. È dunque plausibile concludere che le deformazioni indotte dall'attività di stoccaggio e riscontrate dal monitoraggio InSAR non abbiano capacità di indurre modifiche al comparto idraulico. Peraltro, va evidenziato come il dato InSAR utilizzi come riflettori elementi minuti della rete idrografica, come paratoie metalliche di chiusura e derivazione, consentendo, quindi, un monitoraggio di dettaglio di tratti della rete.

3. Simulazioni modellistiche della rete di drenaggio

È stata condotta una serie di simulazioni idrodinamiche della rete di drenaggio presente nell'area di studio. La finalità dell'applicazione modellistica sviluppata in questa analisi non è quella di verificare il grado di efficienza idraulica della rete di fossi e canali presente nell'area di Settala, bensì di quantificare l'effetto degli spostamenti del terreno causati dalle attività UGS nel campo di Settala sulla stessa efficienza idraulica.

Le simulazioni sono state focalizzate sul canale Muzza. Come evidenziato dall'analisi geomorfologica, questo corso d'acqua rappresenta, infatti, il corpo idrico principale che attraversa l'area di studio scorrendo con direzione Nord-Est – Sud-Ovest al di sopra del giacimento di Settala (Figura 6). La rete di drenaggio è caratterizzata dalla presenza di altri corsi d'acqua minori che, ubicati tra il naviglio Martesana a Nord e il canale Muzza a Sud, attraversano l'area di studio con direzione principale Nord-Sud, seguendo sostanzialmente la direzione di massima pendenza del piano campagna (Figura 6). Data la dimensione limitata della loro sezione idraulica e, di conseguenza, della portata idrica che defluisce in esse, tali rogge sono di interesse limitato. I risultati che si sono ottenuti per il canale Muzza sono da ritenersi sostanzialmente validi anche per questi corpi idrici minori.

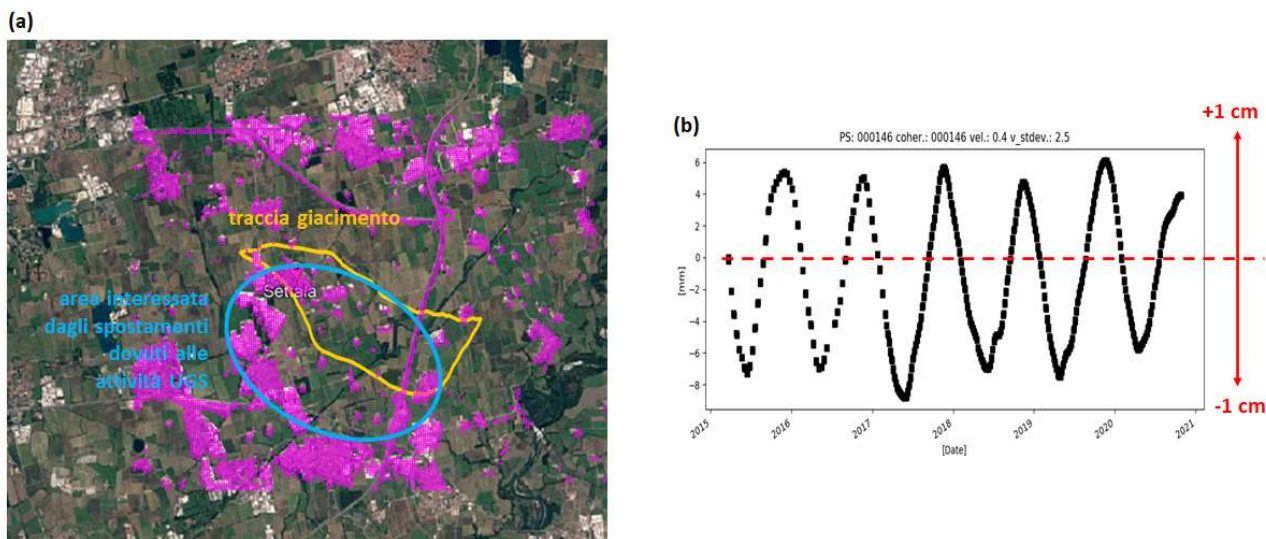


Figura 16 Spostamenti del terreno al di sopra del campo di Settala rilevati tramite interferometria satellitare su immagini Sentinel-1: (a) distribuzione areale dei riflettori con evidenziata la zona in cui si riconosce l'effetto dello stoccaggio in superficie; (b) andamento temporale dello spostamento misurato per un riflettore ubicato in corrispondenza al culmine del campo.

Le analisi interferometriche SAR eseguite su stack di immagini radar hanno permesso di individuare le caratteristiche principali degli spostamenti del terreno associati alle attività UGS. La Figura 16a mostra l'estensione della zona dove vengono misurati spostamenti in superficie legati alle attività UGS. Tale zona si estende verso Sud-Ovest rispetto al baricentro della traccia del giacimento a causa della chiusura degli strati mineralizzati verso Nord-Est. La massima oscillazione misurata rispetto alla condizione media di esercizio (Figura 16b) è pari a circa ± 1 cm al centro del giacimento, con ampiezza tra quota minima e massima pari a circa 15 mm, e diminuisce di entità fino a diventare trascurabile allontanandosi dal centro del giacimento stesso. Questi due elementi (estensione massima e oscillazione massima) sono stati utilizzati per perturbare lo stato di fatto (ovvero il profilo altimetrico del canale in assenza di attività minerarie) del canale Muzza, consentendo così di valutare gli effetti delle attività UGS sull'idraulica del corso d'acqua.

3.1 Set-up del modello del canale Muzza

La modellazione del deflusso idrico in un corso d'acqua richiede la disponibilità di informazioni quali:

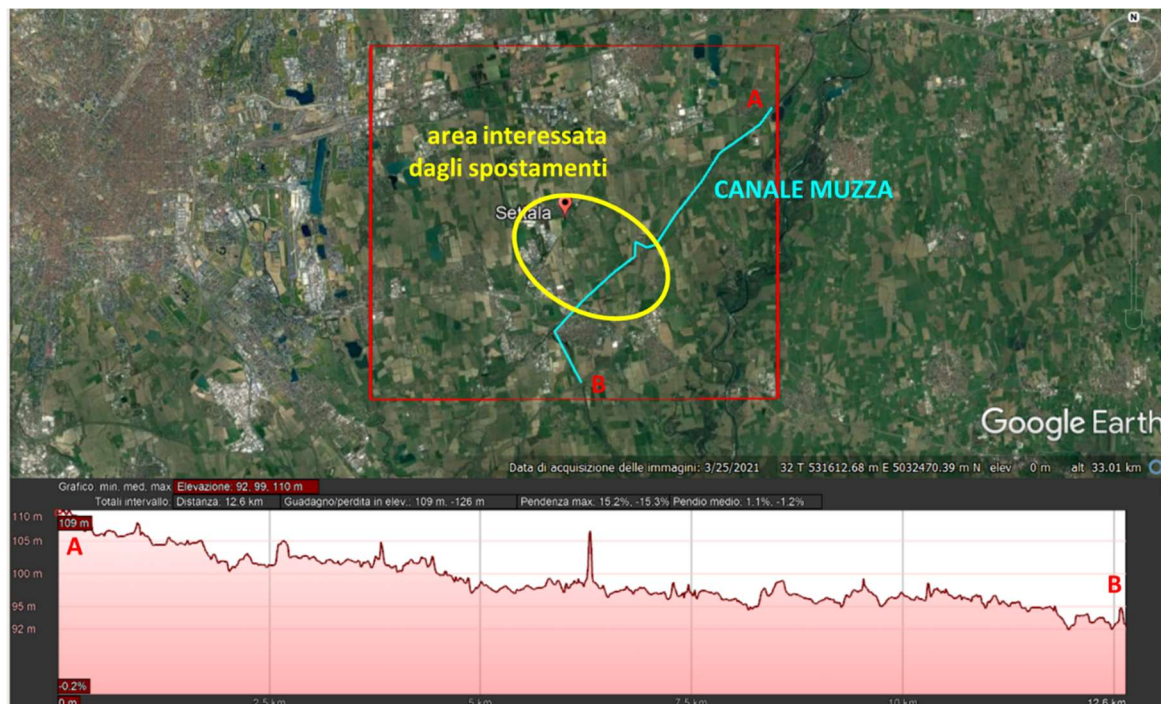


Figura 17 Traccia del canale Muzza rispetto all'area interessata dagli spostamenti del terreno indotti dalle attività UGS a Settala. In basso è riportato l'andamento dell'altimetria dedotta da Google Earth lungo la traccia AB corrispondente al percorso del canale.

- sviluppo altimetrico e planimetrico dell'alveo;
- geometria delle sezioni dell'alveo;
- tipologia dei materiali che costituiscono l'alveo fluviale;
- portata che defluisce nel corso d'acqua.

L'andamento planimetrico e il profilo altimetrico dell'alveo sono stati ottenuti da Google Maps (Figura 17). La tratta di canale Muzza di interesse si estende tra Cassano d'Adda, da cui il canale ha origine derivando le acque del fiume Adda, e Paullo, per una lunghezza complessiva di poco superiore a 12 km. L'altimetria del fondo del canale segue, in media, quella del piano campagna, con una quota che nel tratto di interesse varia tra 110 m e 92 m s.l.m. La pendenza media è pari a circa 1.5%.

Dati specifici relativi alle altre caratteristiche di interesse del corso d'acqua sono stati ottenuti da una monografia pubblicata dal Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana (2018). La Figura 18 mostra la sezione tipica che assume il canale lungo la tratta di interesse: la forma è trapezoidale, con ampiezza al fondo pari 41 m e pendenza delle sponde 2:3. Le sponde sono tutte rivestite. Il paramento più comune è costituito da materiale ghiaioso pressato, con pietrame lungo alcune curve e materassi tipo "Reno" lungo alcuni tratti rettilinei. Il fondo è generalmente naturale, difeso con pietrame in corrispondenza a salti di fondo e repentini cambi di pendenza.

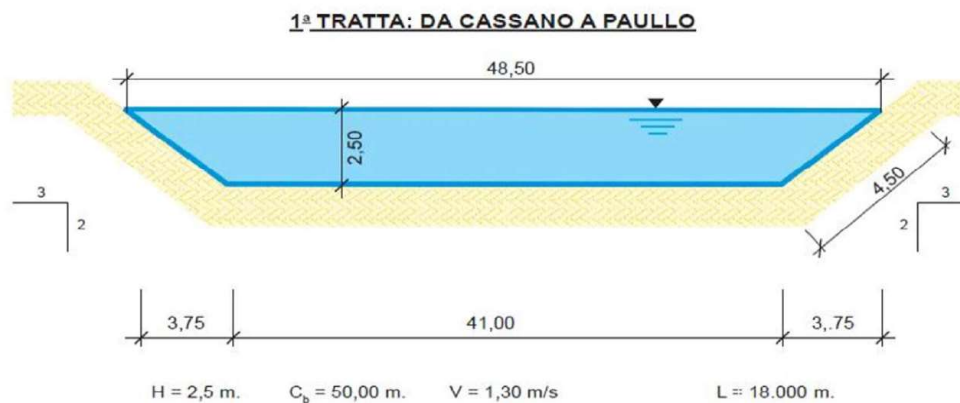


Figura 18 Sezione tipica del canale Muzza nel tratto compreso tra Cassano a Paullo (da Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana, 2018).

Sulla base di tali informazioni, è stata attribuita all'alveo una scabrezza di Manning n pari a $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$ (Tabella 1). La pendenza del fondo è variabile, così come il tirante idrico che di norma varia tra 2.0 e 3.0 m. Il canale deriva le acque dall'Adda fino a $110 \text{ m}^3/\text{s}$.

La modellazione idraulica del deflusso nel corso d'acqua è stata condotta per mezzo del simulatore SWMM (Storm Water Management Model) sviluppato da United States Environmental Protection Agency (2015). SWMM è un software gratuito, liberamente disponibile al download e installazione dal sito <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>, ed è utilizzato in tutto il mondo nell'ambito della progettazione di sistemi di drenaggio a sezione chiusa e aperta.

Tabella 1 Coefficiente di scabrezza di Manning ($\text{s/m}^{1/3}$) per canali con rivestimento comparabile con quelli utilizzati lungo il canale Muzza (da Chow, 1959).

Tipo di superficie	Minimo	Normale	Massimo
Canali rivestiti in pietrame con giunti stilati	0.018	0.025	0.030
Canali rivestiti in scogliera	0.023	0.032	0.035

In Figura 19 è rappresentato il modello del canale implementato in SWMM: il tratto di interesse è stato individuato attraverso 16 sezioni (da N1 a N15 a cui si aggiunge la sezione di uscita OUT1) e 15 tratte. Le tratte hanno una lunghezza di circa 0.5 km in corrispondenza alla traccia del giacimento (tra N7 e N13); la lunghezza aumenta a 1 km circa a monte e a valle del tratto centrale. Il profilo del fondo dell'alveo e del piano campagna è riportato in Figura 20; la profondità del canale è stata posta pari a 3 m come indicato dalla rappresentazione della sezione tipo di Figura 18.

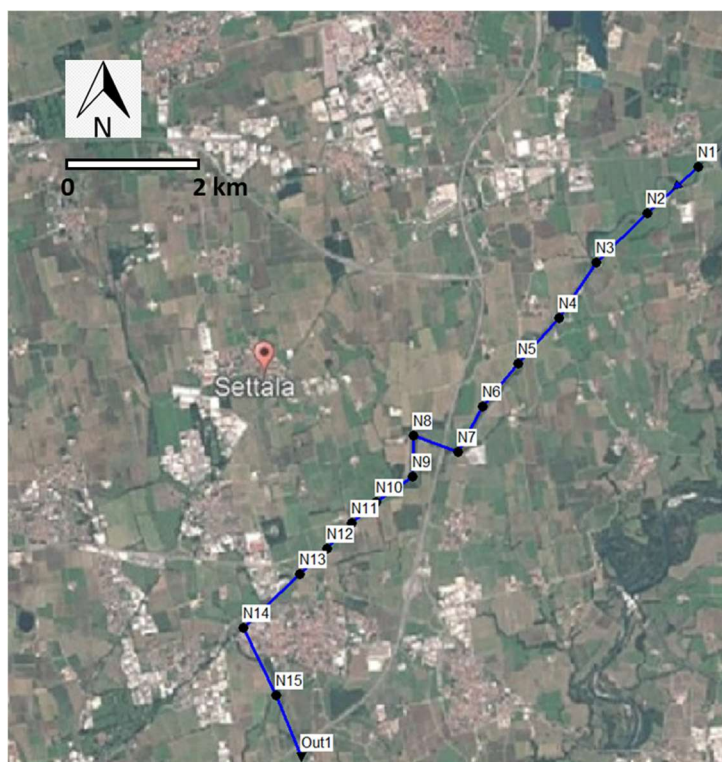


Figura 19 Modello SWMM del canale Muzza: planimetria e ubicazione delle sezioni.

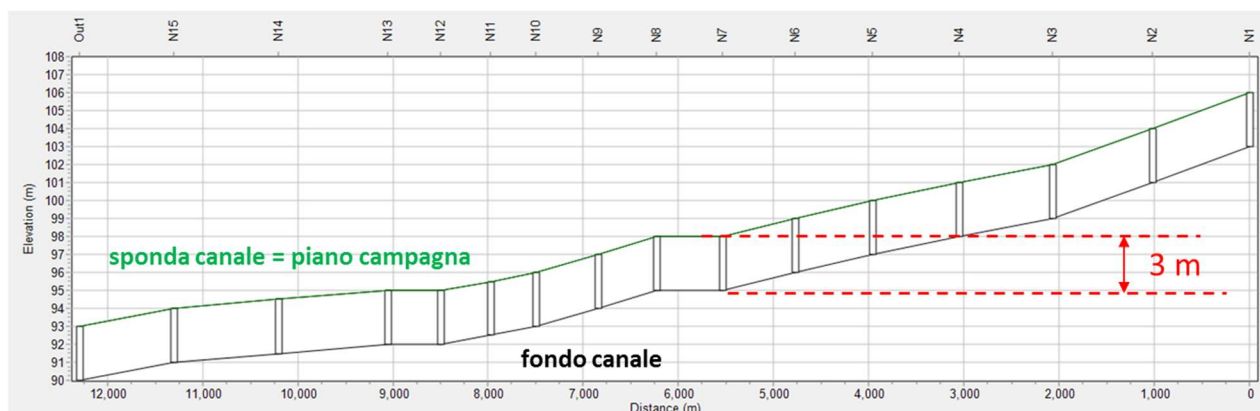


Figura 20 Modello SWMM del canale Muzza: profilo altimetrico del fondo e delle sponde del canale.

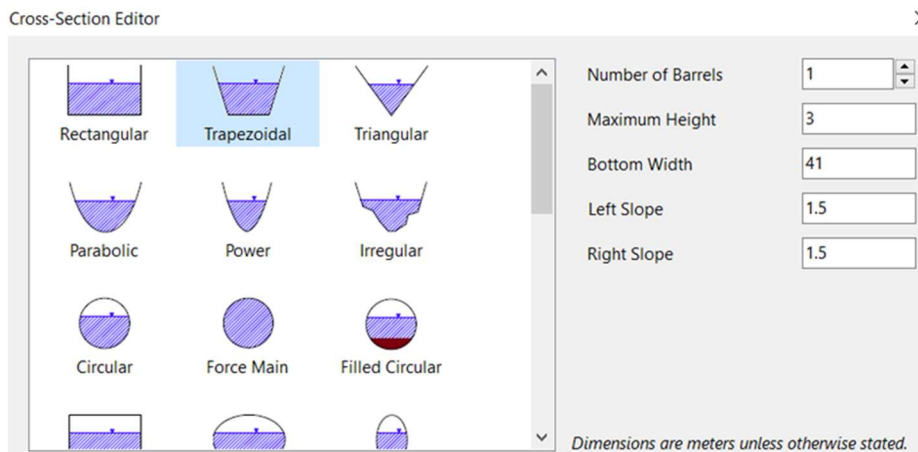


Figura 21 Modello SWMM del canale Muzza: sezione trapezoidale adottata e relative misure caratteristiche.

Un dettaglio del pannello di SWMM che permette di selezionare la sezione di interesse e di specificarne le caratteristiche geometriche è riportato in Figura 21. In corrispondenza alla sezione di chiusura è stata imposta una condizione di deflusso libero.

3.2 Inizializzazione del modello e simulazione della condizione “indisturbata”

La simulazione è stata condotta utilizzando il “Dynamic Wave Approach” e calibrando un evento meteorico che consenta di far defluire nell’alveo una portata di 110 m³/s.

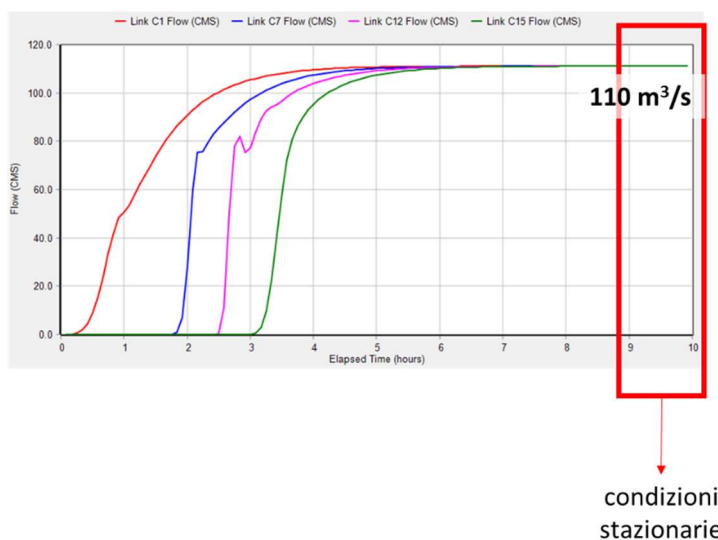
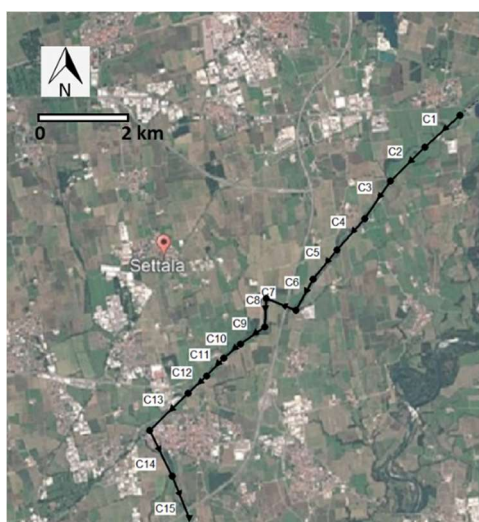


Figura 22 Inizializzazione del modello SWMM del canale Muzza: la condizione stazionaria di riferimento (deflusso pari a 110 m³/s) si ottiene dopo 9-10 ore di forzante pluviometrica.

Figura 22 mostra l'andamento temporale della portata calcolata dal modello in corrispondenza a 4 tratte del canale (C1, C7, C12 e C15). Sono necessarie circa 7 ore di precipitazione perché si raggiunga una condizione di stazionarietà della portata defluita pari a $110 \text{ m}^3/\text{s}$. I risultati riportati nel seguito fanno quindi riferimento alla soluzione stazionaria che si realizza a $t=10$ ore.

SWMM permette di visualizzare i risultati della simulazione con diverse modalità. I risultati ottenuti nelle condizioni "indisturbate", ovvero utilizzando il profilo altimetrico di Figura 20, sono:

- andamento del profilo liquido lungo il corso d'acqua (Figura 23);
- velocità di deflusso nelle tratte dell'alveo (Figura 24, sinistra);
- tirante idrico in corrispondenza alle sezioni con cui si schematizza l'alveo (Figura 24, destra).

Le figure evidenziano come la portata di $110 \text{ m}^3/\text{s}$ defluisca nell'alveo del canale Muzza con un tirante idrico variabile tra 1.4 e 2.5 m circa, in buon accordo con i dati a disposizione. La velocità di deflusso è compresa tra 1.0 e 1.8 m/s.

3.3 Analisi dell'effetto delle attività UGS

L'effetto dalle attività UGS in termini di variazione dell'efficienza idrodinamica del canale Muzza è stato quantificato modificando le quote della porzione dell'alveo fluviale posta al di sopra del giacimento. In particolare, ciascuna sezione della griglia di calcolo è stata traslata di un valore pari a una determinata percentuale dello spostamento massimo misurato con l'interferometria satellitare SAR.

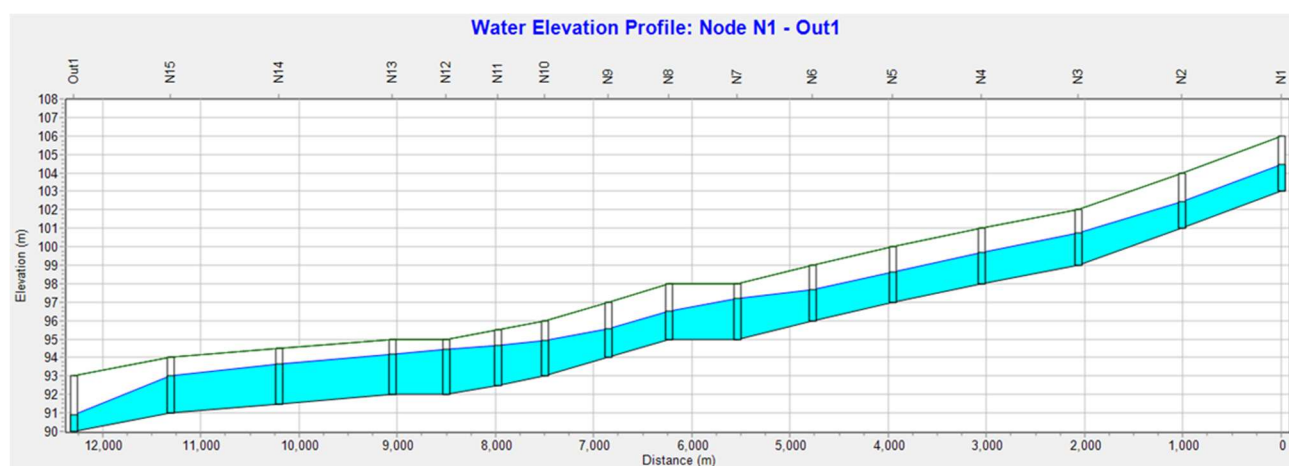


Figura 23 Risultati del modello SWMM del canale Muzza in condizioni "indisturbate": andamento del profilo idrico.

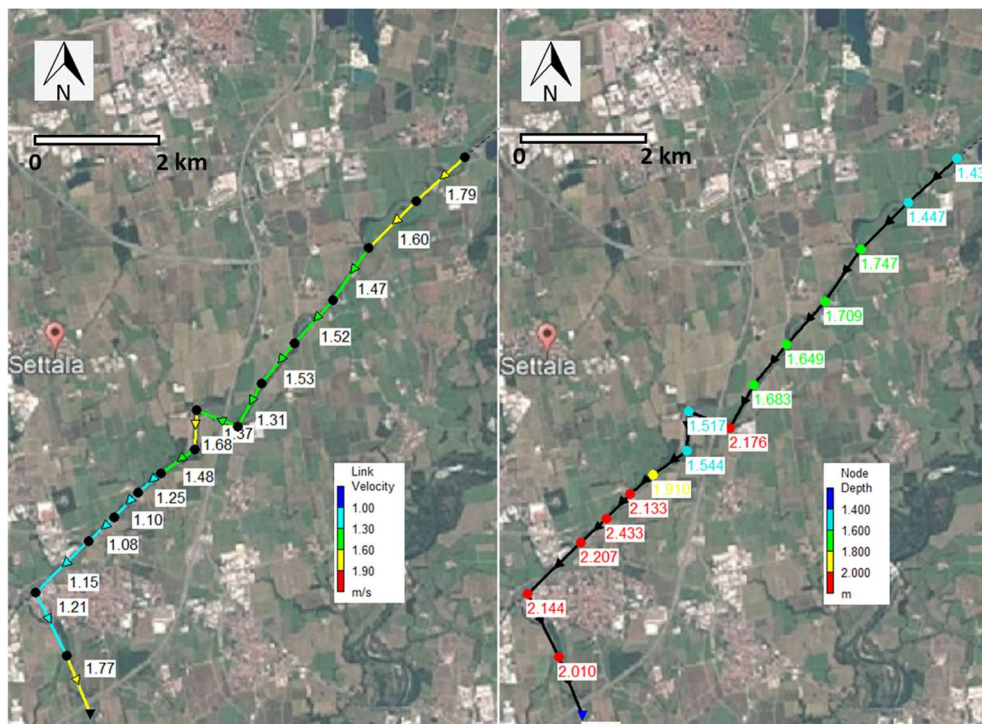


Figura 24 Risultati del modello SWMM del canale Muzza in condizioni “indisturbate”: velocità di deflusso in alveo (sinistra) e tirante idrico (destra) calcolate rispettivamente per ciascuna tratta e nodo del modello.

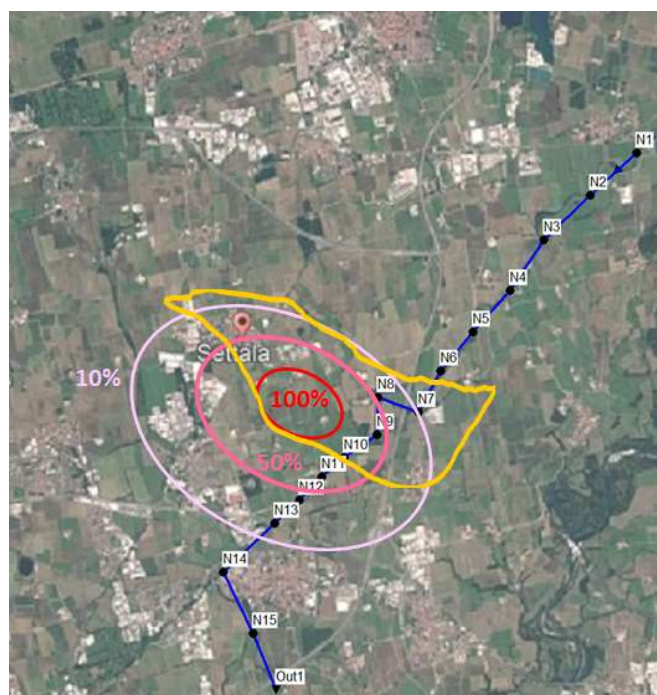


Figura 25 Isolinee di variazione altimetrica percentuale rispetto al valore massimo desunte dalle misurazioni di interferometria satellitare SAR e associate alle attività UGS nel campo di Settala. Si riportano la traccia del giacimento e la posizione delle sezioni del modello SWMM del canale Muzza.

Tabella 2 Variazione altimetrica percentuale rispetto al valore massimo in corrispondenza alle sezioni del modello SWMM del canale Muzza.

Sezione #	Variazione (% di MAX)
N7	10
N8	50
N9	60
N10	80
N11	65
N12	40
N13	10

La posizione relativa tra sezioni di calcolo e isolinee di eguale spostamento è riportata in Figura 25. La Tabella 2 riassume i valori numerici desunti dalla figura. Sulla base dei dati di Figura 16b, le simulazioni sono state condotte considerando per spostamento_{MAX} i valori 0.01 m e -0.01 m, ovvero lo spostamento massimo al termine di una fase di iniezione e di erogazione. Pertanto, ad esempio, la sezione N10 è stata alzata e abbassata di 0.008 m rispetto al profilo “indisturbato” di Figura 20.

I risultati ottenuti con SWMM sono riportati in Figura 26 (spostamento_{MAX} = 0.01 m) e Figura 27 (spostamento_{MAX} = -0.01 m). Analogamente al caso “indisturbato” si riportano la velocità di deflusso in ciascuna tratta e il tirante idrico in corrispondenza alle sezioni. Un confronto tra i valori ottenuti in condizioni “indisturbate” e con il profilo dell’alveo modificato è riportato in Tabella 3 (tirante idrico) e Tabella 4 (velocità di deflusso). Si osservano delle variazioni inferiori a 0.2% sul tirante idrico e 0.9% sulle velocità. Ancorché modeste, tali variazioni sono (evidentemente) consistenti con il comportamento atteso del corso d’acqua in condizioni di moto stazionario:

- quando l’alveo si solleva, nelle tratte a monte del sollevamento la velocità di deflusso si riduce e il tirante aumenta; in quelle immediatamente a valle la velocità dell’acqua aumenta ed il tirante diminuisce;
- al contrario, quando l’alveo si abbassa, nelle tratte a monte la velocità di deflusso aumenta ed il tirante si riduce e in quelle immediatamente a valle la velocità dell’acqua diminuisce ed il tirante aumenta.

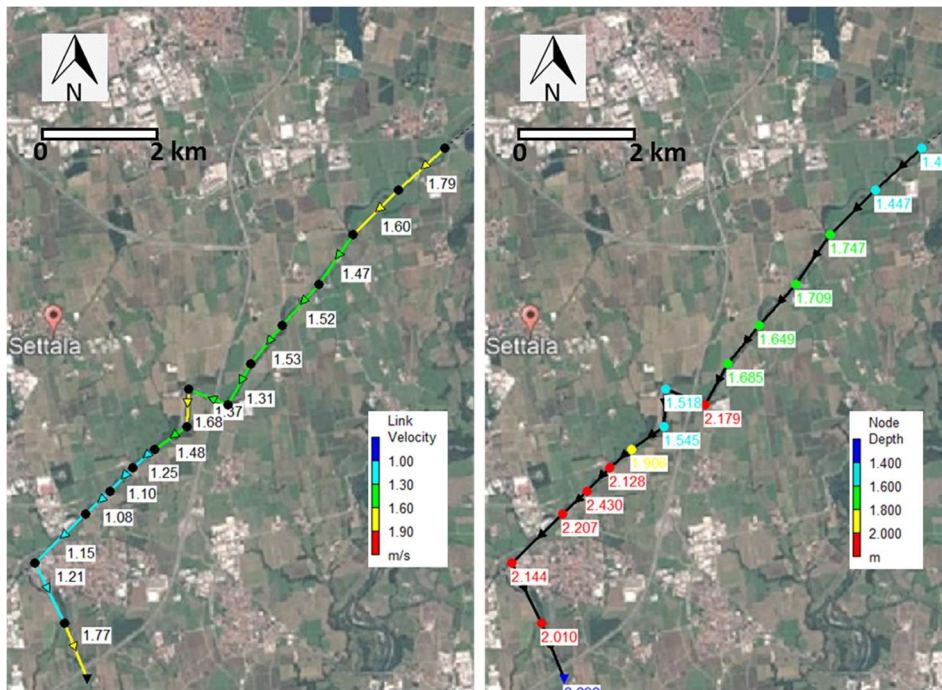


Figura 26 Risultati del modello SWMM del canale Muzza nello scenario realistico spostamento_{MAX} = 0.01 m, cioè al termine di una fase di iniezione: velocità di deflusso in alveo (sinistra) e tirante idrico (destra) calcolate rispettivamente per ciascuna tratta e nodo del modello.

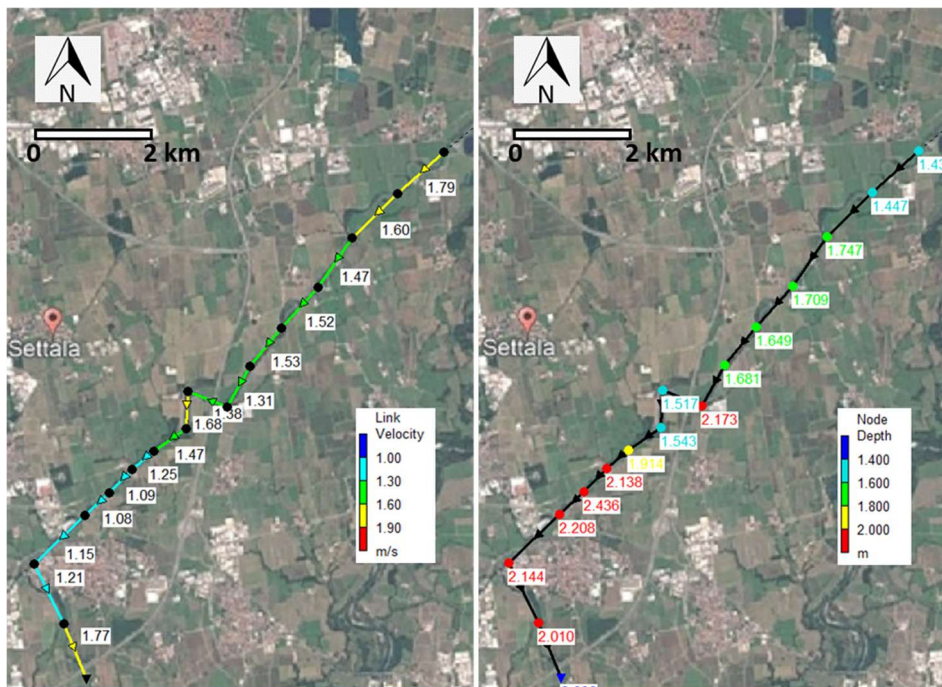


Figura 27 Risultati del modello SWMM del canale Muzza nello scenario realistico spostamento_{MAX} = -0.01 m, cioè al termine di una fase di erogazione: velocità di deflusso in alveo (sinistra) e tirante idrico (destra) calcolate rispettivamente per ciascuna tratta e nodo del modello.

Tabella 3 Risultati delle simulazioni modellistiche SWMM del canale Muzza: tirante idrico alle sezioni di calcolo in condizioni “indisturbate” e con spostamento_{MAX} = ±0.01 m. Tra parentesi la variazione percentuale tra scenario con spostamento e quello “indisturbato”.

SEZIONE #	TIRANTE (m) E VARIAZIONE SU INDIST. (%)		
	INDIST.	MAX=+0.01	MAX=-0.01
N1	1.434	1.434	1.434
N2	1.447	1.447	1.447
N3	1.747	1.747	1.747
N4	1.709	1.709	1.709
N5	1.649	1.649	1.649
N6	1.683	1.685 (+0.12%)	1.681 (-0.12%)
N7	2.176	2.179 (+0.14%)	2.173 (-0.14%)
N8	1.517	1.518 (+0.07%)	1.517
N9	1.544	1.545 (+0.07%)	1.543 (-0.06%)
N10	1.910	1.906 (-0.21%)	1.914 (+0.21%)
N11	2.133	2.128 (-0.23%)	2.138 (+0.23%)
N12	2.433	2.430 (-0.12%)	2.436 (+0.12%)
N13	2.207	2.207	2.208 (+0.04%)
N14	2.144	2.144	2.144
N15	2.010	2.010	2.010
OUT	0.808	0.808	0.808

Tabella 4 Risultati delle simulazioni modellistiche SWMM del canale Muzza: velocità di deflusso nelle tratte di calcolo in condizioni “indisturbate” e con $\text{spostamento}_{\text{MAX}} = \pm 0.01$ m. Tra parentesi la variazione percentuale tra scenario con spostamento e quello “indisturbato”.

TRATTA #	VELOCITÀ (m/s) E VARIAZIONE SU INDIST. (%)		
	INDIST.	MAX=+0.01	MAX=-0.01
C1	1.79	1.79	1.79
C2	1.60	1.60	1.60
C3	1.47	1.47	1.47
C4	1.52	1.52	1.52
C5	1.53	1.53	1.53
C6	1.31	1.31	1.31
C7	1.37	1.37	1.37
C8	1.68	1.68	1.68
C9	1.48	1.48	1.47 (-0.67%)
C10	1.25	1.25	1.25
C11	1.10	1.10	1.09 (-0.91%)
C12	1.08	1.08	1.08
C13	1.15	1.15	1.15
C14	1.21	1.21	1.21
C15	1.77	1.77	1.77

3.3 Analisi in uno scenario di sensitivity

È stata, infine, condotta una serie di simulazioni per uno scenario di sensitivity sul dato di spostamento massimo. Si è ipotizzato un valore di $\text{spostamento}_{\text{MAX}}$ pari a ± 0.10 m, ovvero amplificando gli spostamenti reali prodotti dalle attività UGS di un fattore 10. Va sottolineato che tale valore è, ovviamente, del tutto irrealistico. Esso viene utilizzato solamente per esaminare la situazione ipotetica che si verificherebbe nei confronti dell’attesa variazione di efficienza della rete idraulica in una configurazione estrema.

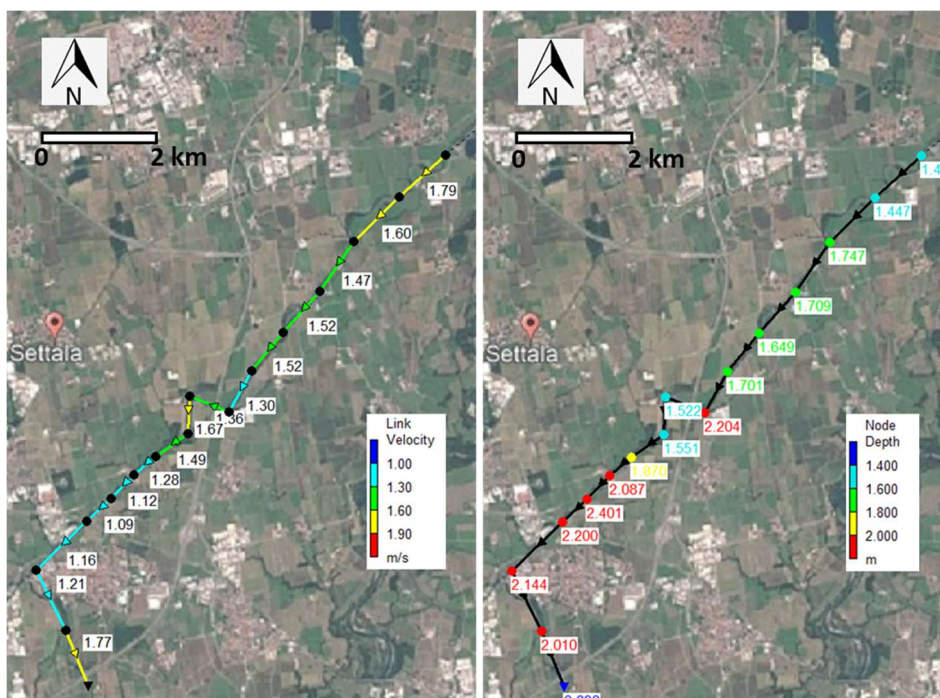


Figura 28 Risultati del modello SWMM del canale Muzza nello scenario di sensitivity con spostamento_{MAX} = 0.10 m: velocità di deflusso in alveo (sinistra) e tirante idrico (destra) calcolate rispettivamente per ciascuna tratta e nodo del modello.

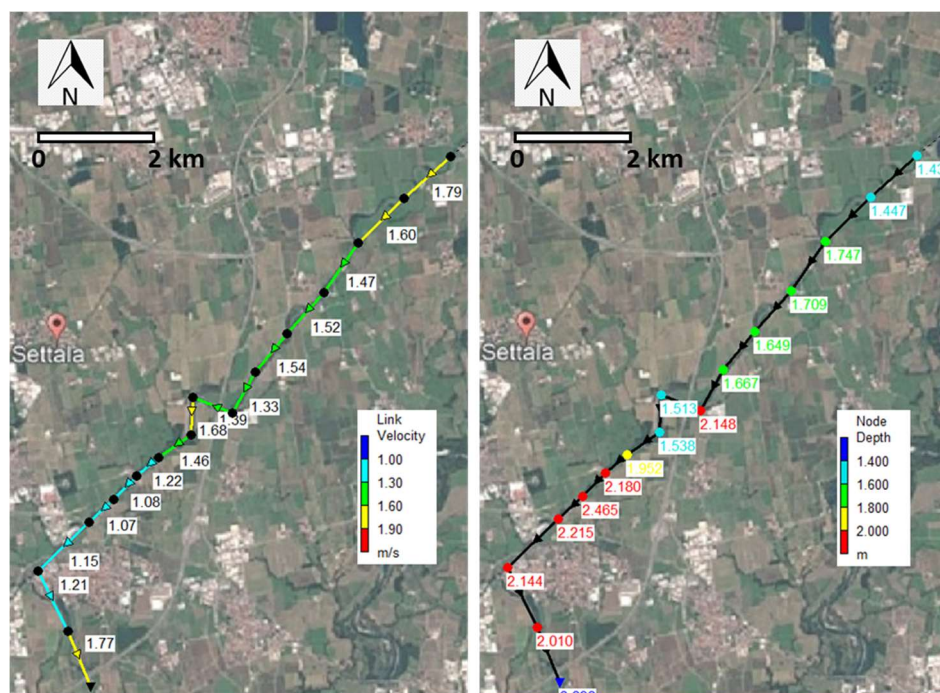


Figura 29 Risultati del modello SWMM del canale Muzza nello scenario di sensitivity con spostamento_{MAX} = -0.10 m: velocità di deflusso in alveo (sinistra) e tirante idrico (destra) calcolate rispettivamente per ciascuna tratta e nodo del modello.

I risultati ottenuti con SWMM in termini di velocità di deflusso e tirante idrico sono riportati in Figura 28 (spostamento_{MAX} = 0.10 m) e Figura 29 (spostamento_{MAX} = -0.10 m). Il confronto tra i valori ottenuti in condizioni “indisturbate” e con il profilo dell’alveo così modificato è riportato in Tabella 5 (tirante idrico) e Tabella 6 (velocità di deflusso). In questo caso le differenze nella risposta idraulica del canale rispetto alla condizione “indisturbata” sono inferiori a 2.3% sul tirante idrico e 2.9% sulle velocità, dunque tali da non compromettere comunque l’efficienza del sistema scolante.

Tabella 5 Risultati delle simulazioni modellistiche SWMM del canale Muzza nello scenario di sensitivity: tirante idrico alle sezioni di calcolo in condizioni “indisturbate” e con spostamento_{MAX} = ±0.10 m . Tra parentesi la variazione percentuale tra scenario con spostamento e quello “indisturbato”.

SEZIONE #	TIRANTE (m) E VARIAZIONE SU INDIST. (%)		
	INDIST.	MAX=+0.10	MAX=-0.10
N1	1.434	1.434	1.434
N2	1.447	1.447	1.447
N3	1.747	1.747	1.747
N4	1.709	1.709	1.709
N5	1.649	1.649	1.649
N6	1.683	1.701 (+1.07%)	1.667 (-0.95%)
N7	2.176	2.204 (+1.29%)	2.148 (-1.29%)
N8	1.517	1.522 (+0.33%)	1.513 (-0.26%)
N9	1.544	1.551 (+0.45%)	1.538 (-0.39%)
N10	1.910	1.870 (-2.09%)	1.952 (+2.20%)
N11	2.133	2.087 (-2.15%)	2.180 (+2.20%)
N12	2.433	2.401 (-1.31%)	2.465 (+1.31%)
N13	2.207	2.200 (-0.21%)	2.215 (+0.36%)
N14	2.144	2.144	2.144
N15	2.010	2.010	2.010
OUT	0.808	0.808	0.808

Tabella 6 Risultati delle simulazioni modellistiche SWMM del canale Muzza nello scenario di sensitivity: velocità di deflusso nelle tratte di calcolo in condizioni “indisturbate” e con spostamento_{MAX} = ±0.10 m . Tra parentesi la variazione percentuale tra scenario con spostamento e quello “indisturbato”.

TRATTA #	VELOCITÀ (m/s) E VARIAZIONE SU INDIST. (%)		
	INDIST.	MAX=+0.10	MAX=-0.10
C1	1.79	1.79	1.79
C2	1.60	1.60	1.60
C3	1.47	1.47	1.47
C4	1.52	1.52	1.52
C5	1.53	1.52 (-0.65%)	1.54 (+0.65%)
C6	1.31	1.30 (-0.76%)	1.33 (+1.52%)
C7	1.37	1.33 (-2.92%)	1.39 (+1.46%)
C8	1.68	1.67 (-0.60%)	1.68
C9	1.48	1.49 (+0.68%)	1.46 (-1.35%)
C10	1.25	1.28 (+2.40%)	1.22 (-2.40%)
C11	1.10	1.12 (+1.82%)	1.08 (-1.82%)
C12	1.08	1.09 (+0.93%)	1.07 (-0.93%)
C13	1.15	1.16 (+0.87%)	1.15
C14	1.21	1.21	1.21
C15	1.77	1.77	1.77

4. Conclusioni

Nel presente studio è stata condotta una valutazione dei possibili effetti delle attività UGS nella Concessione Settala Stoccaggio su strutture, infrastrutture e rete di drenaggio ubicate al di sopra del giacimento. L'area di interesse è quella per la quale le analisi interferometriche SAR hanno evidenziato spostamenti del suolo associabili alle attività di iniezione/erogazione di gas, la cui ampiezza è individuata in Figura 16. Oltre tale area, gli effetti derivati dalle attività UGS non sono più riscontrabili. Per sole ragioni di continuità morfologica e idraulica, si è comunque estesa l'area oggetto di indagine alla zona limitrofa a quella effettivamente interessata dalle deformazioni riconducibili allo stoccaggio di gas, fino a considerare un'area di circa 13x15 km.

L'analisi geomorfologica, sviluppata sia in GIS che attraverso una serie di survey di terreno con l'intento di individuare ed evidenziare eventuali modifiche dell'assetto del territorio, non ha rilevato fenomeni riconducibili alle attività di stoccaggio. Con i tassi di deformazione attualmente misurati, la rete idraulica evolve in maniera indipendente da tali attività e principalmente per cause esterne e naturali, legate alla gestione della stessa e alla prassi agronomica del territorio. Non sono stati individuati effetti sulle forme planimetriche, se non dovuti ad attività di manutenzione. Queste hanno talvolta portato alla scomparsa di un elemento della rete per colmamento volontario oppure per fenomeni di degrado legati al rapporto con alberi in fregio, che tendono a ridurre la sezione trasversale e generare fenomeni locali di erosione e/o sedimentazione non collegati all'attività industriale.

Infine, è stata condotta una valutazione tramite modello matematico dell'effetto dell'innalzamento e abbassamento stagionale causato dalle attività UGS a Settala sull'efficienza idraulica del canale Muzza, considerato rappresentativo della rete scolante distribuita sull'area di indagine. Gli spostamenti sono stati misurati con interferometria SAR. Il modello, sviluppato utilizzando le informazioni recentemente pubblicate dal Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana, ha quantificato in un fattore inferiore all'1% le variazioni di velocità di deflusso in alveo in concomitanza con il massimo innalzamento e abbassamento che si realizzano al termine della fase di iniezione ed erogazione dal giacimento. Ne consegue che le attività UGS non possono essere responsabili di accentuati fenomeni erosivi nella rete di canali e fossi presenti nell'area. Anche nel caso estremo di sensitivity con spostamenti ipotizzati fino a 10 volte superiori di quelli attualmente misurati con analisi interferometriche SAR, le variazioni delle caratteristiche di deflusso (velocità della corrente e tirante idrico) rispetto alle condizioni "indisturbate" sono inferiori al 3%. Ciò dimostra che, anche nel caso estremo e irrealistico di spostamenti di tale entità, gli effetti sull'efficienza della rete scolante sarebbero del tutto trascurabili.

Bibliografia

- M. Chiesa (2019). Invarianza idraulica, idrologica e rischio idraulico. Applicazione ai canali e all'idrografia di superficie, Presentazione all'Ordine degli Ingegneri di Cremona e Lodi, Crema (Cr), 23 maggio 2019, https://www.ording.cr.it/fileedit/files/Presentazione_Ing_Chiesa.pdf
- Chow, V.T. (1959). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York.
- Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana (2018). Piano Comprensoriale di Bonifica, di Irrigazione e di Tutela del Territorio Rurale, L.R. 5 dicembre 2008 n°31, art. 88 - D.G.R. 2 ottobre 2015 n° X/4110, edizione del giugno 2018, 637 pp.
- ERSAF & REGIONE LOMBARDIA (2004). Suoli e paesaggi della provincia di Milano <https://www.ersaf.lombardia.it/it/attachments/file/view?hash=e595f131619d552f28c92ff112665394&canCache=0>
- Rampolla C., Francani V., Barozzi A. (2015). Cause dei periodici allagamenti nella provincia di Milano fra Lambro e Adda, <https://www.engeology.eu/article/cause-dei-periodici-allagamenti-nella-provincia-di-milano-fra-lambro-e-adda>
- United States Environmental Protection Agency (2015). Storm Water Management Model - User's Manual Version 5.1. EPA- 600/R-14/413b.