

Procedimento di Verifica di assoggettabilità a VIA per l'esecuzione di prove di iniezione nel giacimento BB1 di San Potito finalizzate all'ampliamento della capacità di stoccaggio

**Controdeduzioni alle osservazioni della
Sig.ra Ilaria Ricci Piccioni**

Ottobre 2018

Contenuti

| | |
|--|---|
| Osservazione 1 – Tipologia di stoccaggio a San Potito | 2 |
| Osservazione 2 – Sorgenti sismiche nell’area di San Potito e Cotignola | 6 |

Allegati

| |
|---|
| Allegato 1 – Pericolosità sismica e sismicità storica area di San Potito e Cotignola (SOLGEO, 2018) |
| Allegato 2 – Analisi integrative dei processi geomeccanici nel campo di San Potito (M3E, 2018) |
| Allegato 3 – Verifica Sorgente sismica ITIS 100 Bagnacavallo (GEOPHI, 2018) |

Osservazione 1 – Tipologia di stoccaggio a San Potito

La presente osservazione intende prendere in analisi la tipologia di stoccaggio in oggetto per evidenziare come per lo stesso, a seguito di fatti che ne hanno determinato anche un arresto di progetto ed un dimezzamento delle capacità di stoccaggio, si potrebbe configurare la tipologia dello stoccaggio di gas in acquifero profondo.

Risposta

Lo stoccaggio nel livello BB1 di San Potito è senza ombra di dubbio classificabile come “stoccaggio di gas in giacimento depletato”, in quanto il gas viene iniettato ed estratto esclusivamente all’interno della calotta di gas residua dalla produzione primaria del campo, così come accertato dai due pozzi di stoccaggio realizzati nel 2011 e nel 2017.

La presenza di una zona franca a gas, utile per lo stoccaggio, nella parte sommitale del livello BB1 è stata accertata mediante misure dirette e prove di erogazione/iniezione condotte dal 2011 ad oggi, come riportato qui di seguito.

Il giacimento a gas metano di San Potito è stato scoperto nel 1984, con il pozzo SP-1, e messo in produzione nel dicembre 1988 attraverso sei pozzi. Con riferimento al livello BB1, attualmente utilizzato per lo stoccaggio, la mineralizzazione si sviluppava per 66 metri tra le profondità di 1792 m s.l.m. (quota più elevata del livello individuata dal pozzo SP-2d) e 1858 m s.l.m. (quota del contatto gas-acqua originario).

La profondità del contatto originario gas-acqua è stata rilevata nei pozzi SP-2 e SP-4 per mezzo di log elettrici, in corrispondenza di una riduzione di resistività sino a valori che sono tipici di rocce con saturazione in acqua del 100% (acquifero). L’acquifero che sottende il giacimento di San Potito presenta una salinità (NaCl) di 68 g/l, circa il doppio della salinità dell’acqua di mare.

Nel corso della produzione primaria, il contatto gas-acqua nel livello BB1 si è spostato verso l’alto a seguito della progressiva estrazione del gas. A fine produzione (febbraio 2000) la tavola d’acqua aveva raggiunto l’intervallo produttivo strutturalmente più alto (pozzo SP-7). Dai modelli di giacimento realizzati con i dati resi disponibili nella Data Room ENI (marzo 2001) è risultato che il contatto gas-acqua a fine produzione si era spostato di 45 m dalla sua posizione originaria, risalendo a 1813 m s.l.m., per cui lo spessore della mineralizzazione a gas originaria si era ridotto a 21 metri.

Il giacimento di San Potito è rimasto successivamente chiuso sino all’avvio delle attività di conversione a stoccaggio, che si sono svolte come di seguito riassunto.

Nel 2011 è stato perforato il primo pozzo di stoccaggio “SPT A1dir” che ha rinvenuto il livello BB1 a gas, come da previsioni, ma in posizione strutturalmente più alta (+15 metri) rispetto a quella accertata dai pozzi di sviluppo.

Il tetto del livello di stoccaggio BB1 è stato rinvenuto a 1777 m s.l.m., con uno spessore totale mineralizzato a gas di 53 metri. Nell’intervallo superiore (BB1 Upper) sono presenti 18 metri di colonna a gas, da 1777 m s.l.m. sino al contatto gas-acqua che è stato rinvenuto a 1795 m s.l.m.. L’intervallo inferiore (BB1 Lower) è risultato completamente mineralizzato a gas per uno spessore di 35 metri.

L’intervallo inferiore non è stato direttamente completato per la produzione primaria per cui il movimento della tavola d’acqua è stato limitato a qualche metro e non ha raggiunto il fondo del pozzo “SPT A1dir”. Al contrario, l’intervallo superiore è stato completato su tutti i pozzi e ha realizzato il grosso della produzione con conseguente maggior risalita della tavola d’acqua.

L'evoluzione del contatto gas-acqua nel tempo sino all'avvio delle attività di stoccaggio è rappresentato in **Figura 1**.

La presenza di gas residuo nel livello BB1, prima dell'avvio dello stoccaggio, è stata accertata mediante misure indirette (logs e pressioni di formazione) e prove di erogazione.

Le misure di pressione di formazione consentono di distinguere chiaramente le zone con gradiente a gas da quelle con gradiente ad acqua (**Figura 2**).

Il pozzo di stoccaggio "SPT A1dir" è stato completato nella parte alta delle zone a gas del BB1 Upper e del BB1 Lower e sottoposto a prove di estrazione nel secondo semestre del 2013.

Nel corso delle prove sono stati estratti oltre 6 MSm³ di gas senza alcuna traccia di acqua. L'assenza di acqua a giorno sta ad indicare che l'acqua non si è mossa dalla formazione in quanto, nelle zone provate, si trova ancora in condizioni di saturazione irriducibile (Swi), vale a dire nelle stesse condizioni di saturazione presenti alla scoperta del giacimento nel 1984, ma a pressione più bassa.

È opportuno ricordare che, secondo le leggi che regolano il moto dei fluidi nei mezzi porosi, **qualora le prove fossero state condotte nell'acquifero si sarebbe prodotto solo acqua**.

In **Figura 3** si riporta la mappa strutturale del livello di stoccaggio, basata sui dati dei nuovi pozzi e sull'interpretazione della sismica 3D acquisita nel 2013. In **Figura 4** si riporta una sezione trasversale al giacimento che mostra la posizione degli intervalli di prova/stoccaggio all'interno del livello BB1.

Nel 2017 è stato perforato il secondo pozzo di stoccaggio "SPT A2dir" che ha rinvenuto il livello BB1 nelle stesse condizioni di mineralizzazione viste nel pozzo "SPT A1dir". Il pozzo è stato quindi completato nella **parte alta delle zone a gas** presenti negli intervalli BB1 Upper e BB1 Lower.

Ad oggi, lo stoccaggio viene realizzato con due pozzi iniettando ed estraendo il gas dagli intervalli completati unicamente nella zona mineralizzata a gas del livello BB1. Nella fase di estrazione non viene prodotta acqua di formazione a dimostrazione del fatto che **la movimentazione del gas avviene esclusivamente all'interno di zone a gas preservate dalla produzione primaria, in cui l'acqua non è mobile, e quindi in zone non interessate dall'acquifero**.

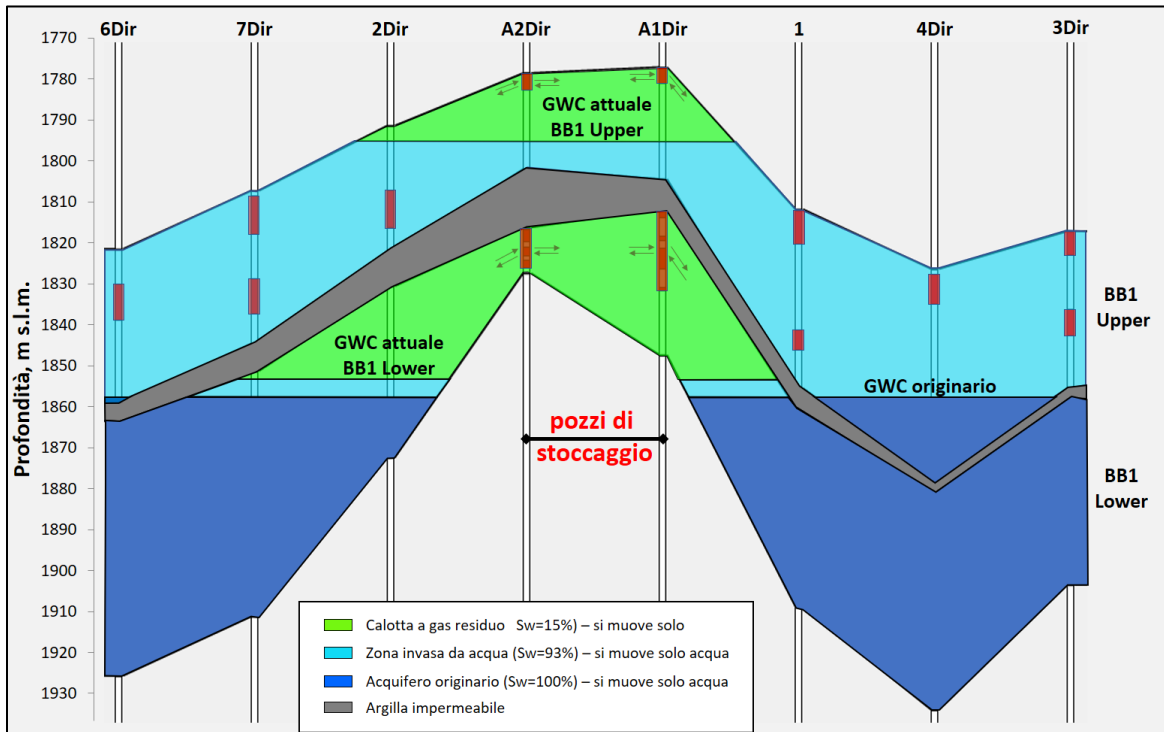


Figura 1: Sezione longitudinale del giacimento - Evoluzione del contatto gas-acqua dalla condizione iniziale (GWC originario - 1988) sino all'avvio dello stoccaggio (GWC attuale - 2013). In rosso, gli intervalli aperti nella formazione in ciascun pozzo.

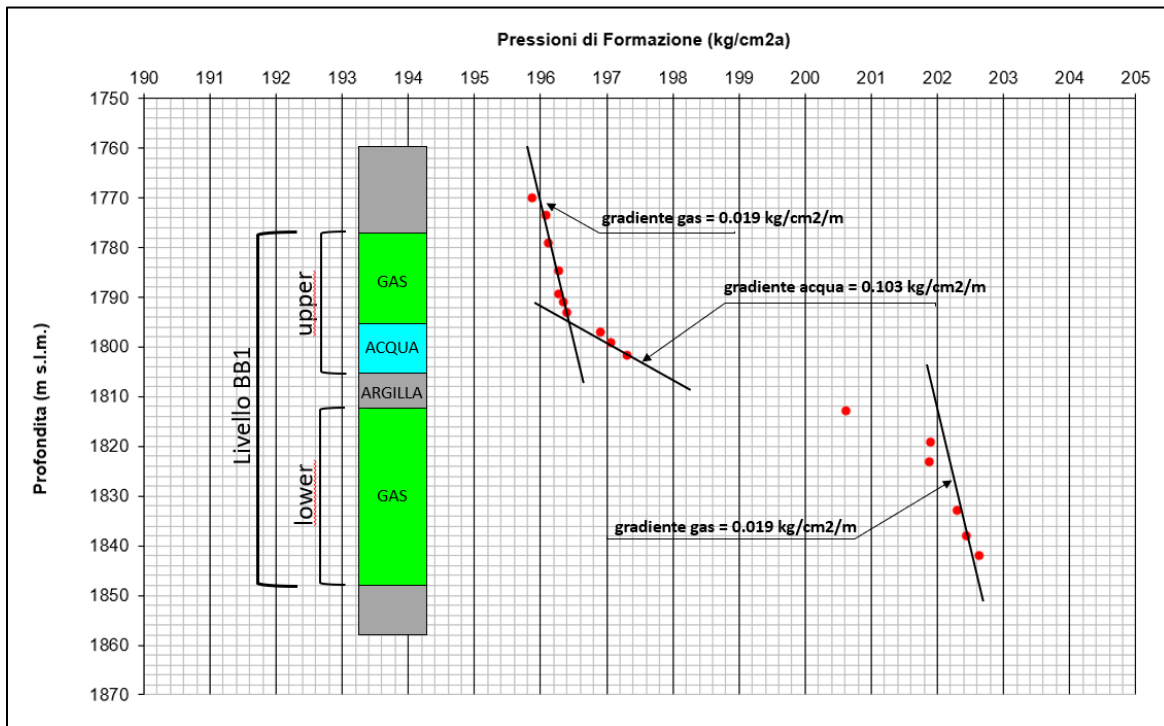


Figura 2: Pozzo di stoccaggio "SPT A1dir" – Pressioni di formazione nel livello BB1 in funzione della profondità. (punti rossi, pressioni misurate prima del tubaggio del foro).

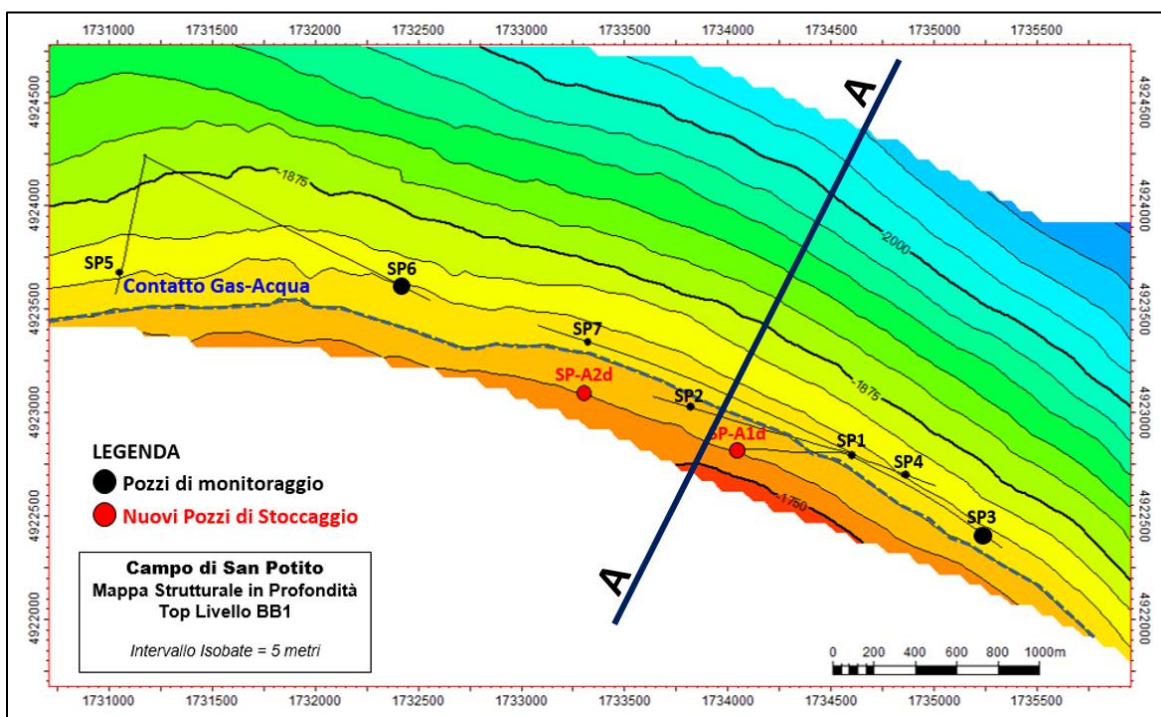


Figura 3: Mappa strutturale al tetto del livello BB1 di stoccaggio, dopo perforazione dei due nuovi pozzi SPT A1d e SPT A2dir e interpretazione sismica 3D del 2013. La traccia AA indica la sezione riportata in Figura 4.

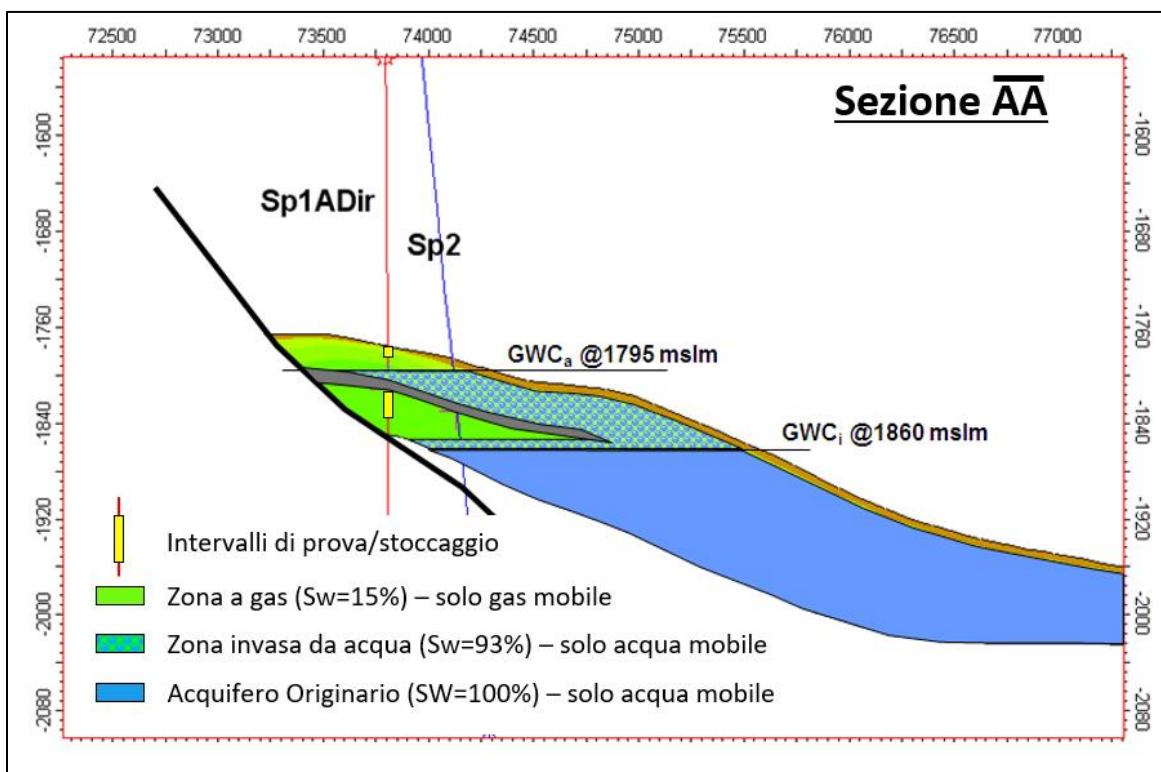


Figura 4: Sezione trasversale del livello BB1 di stoccaggio, con rappresentati gli intervalli aperti sul livello nel pozzo SPT A1dir e la distribuzione dei fluidi (gas e acqua) all'inizio dell'attività di stoccaggio (2013).

Osservazione 2 – Sorgenti sismiche nell'area di San Potito e Cotignola

Lo studio della documentazione evidenzia un grave problema che non è stato per niente affrontato da Edison Stoccaggio S.p.A. I giacimenti di San Potito e Cotignola si trovano nel sottosuolo interessato da due strutture sismogenetiche alle quali, in base alla letteratura scientifica di seguito evidenziata, è da attribuire il disastroso terremoto del 1688.

Risposta

Le considerazioni sulla sismicità naturale dell'area sono state sviluppate nell'ambito della progettazione della rete microsismica e qui proposte nell'Allegato 1.

La problematica dell'eventuale sismicità indotta/innescata dall'attività di stoccaggio a $P_{max}=240$ bar ($P_{max}=1.2 P_i$) è stata affrontata nello studio geomeccanico 3D allegato all'istanza (M3E, 2017 <http://www.va.minambiente.it/it-IT/Oggetti/Documentazione/1753/3104>, elaborati PRG-009 e PRG-010) e sua successiva integrazione (Allegato 2).

Alla data della redazione di questo documento, secondo il catalogo DISS dell'INGV, in prossimità del campo di San Potito è presente la sorgente sismogenetica individuale ITIS 100 Bagnacavallo facente parte della sorgente composta denominata ITCS 011 Ascensione – Armaia. Il catalogo DISS riporta nel dettaglio solo le caratteristiche della sorgente individuale ITIS 100 Bagnacavallo.

La struttura sismogenetica denominata "ITIS 100 Bagnacavallo" è stata oggetto di una verifica da parte della scrivente, alla luce dei dati disponibili e delle migliori conoscenze scientifiche pubblicate, allo scopo di confermare o emendare la sua presenza (Allegato 3).

Da quanto descritto nel database DISS – INGV, la struttura sismogenetica di Bagnacavallo, confinata tra 3 e 6 km di profondità e vergente a NE, è stata ipotizzata sulla base di vecchie sezioni geologiche ENI (Cassano et al. 1986, modificato) e di alcune considerazioni di carattere geomorfologico.

Le sezioni sismiche regionali e il volume di dati sismici 3D in possesso della scrivente mostrano alcuni back thrust vergenti a SO che tagliano (in quanto più recenti) e quindi disattivano cinematicamente le faglie vergenti a NE, inclusa la faglia indicata come sorgente sismogenetica Bagnacavallo.

Inoltre, la sequenza pleistocenica continentale dell'ultimo milione di anni, ben visibile sulla sismica 3D di Edison Stoccaggio, non risulta deformata dagli ipotetici movimenti associabili alla sinclinale di rampa sepolta in corrispondenza dell'Alto di Cotignola.

In sintesi, dai dati a nostra disposizione e dalle considerazioni esposte nell'Allegato 3, emerge la necessità di emendare la struttura sismogenetica "ITIS 100 Bagnacavallo" e di proseguire gli studi per la definizione della struttura responsabile del terremoto del 1688. Queste nostre considerazioni e perplessità circa la catalogazione della faglia Bagnacavallo come sorgente sismogenetica, sono state condivise in una riunione dedicata con tecnici dell'INGV i quali si sono resi disponibili a collaborare con la Proponente per approfondire lo studio delle strutture tettoniche dell'area romagnola che include la concessione di San Potito e Cotignola.

Si fa comunque presente che Edison Stoccaggio ha affrontato l'analisi degli effetti indotti dall'attività di stoccaggio a $P_{max}=240$ bar su alcune delle sopracitate discontinuità tettoniche vergenti a NE individuate nel volume sismico 3D in suo possesso, in prossimità sia del giacimento di San Potito che della struttura sismogenetica sopraindicata. Tali discontinuità tettoniche sono state geometricamente descritte nel modello geomeccanico 3D (M3E, 2017), con il quale è stato possibile verificare che a seguito dell'esercizio a $P_{max}=240$ bar (**$P_{max}=1.2 P_i$**), sulla faglia più prossima al giacimento (posta a circa 1 km) non si verificano variazioni di tensioni apprezzabili rispetto allo stato tensionale naturale.

A favore di sicurezza il sopracitato modello geomeccanico 3D (Allegato 2) è stato utilizzato per effettuare alcune analisi di sensitività, aumentando il valore di comprimibilità ed amplificando la sovrappressione prevista in giacimento. Anche nello scenario più gravoso, con una $P_{MAX} = 360$ bar, cioè **$P_{MAX}=1.8 P_i$** , le variazioni di tensione sulle faglie risultano trascurabili. Inoltre, con $P_{max}=360$ bar, assumendo che in passato le faglie siano state attivate, è stato verificato il loro grado di resistenza con angoli di attrito dinamici inferiori a quello statico di 30° assunto nel nostro caso base. In particolare, si è voluto verificare quale fosse il valore minimo dell'angolo di attrito tale da determinare la rottura degli elementi più sollecitati su ciascuna faglia. I valori ottenuti sono compresi tra 13° e 24° , ovvero significativamente minori del valore pari a 30° utilizzato nello scenario conservativo. Si tenga inoltre presente che valori così bassi sono poco realistici in quanto, data la giacitura delle discontinuità, lo stesso regime tensionale naturale supererebbe il limite a rottura.

Il fattore di sicurezza, definito come rapporto tra variazione di pressione massima necessaria a indurre rottura sulle faglie ($DP_{MAX}=360-200=160$ bar) e variazione di pressione nel caso $P_{max}=240$ bar ($DP=240-200=40$ bar) risulta pari a 4 (160/40). **A ulteriore vantaggio di sicurezza**, si tenga conto che il fattore di sicurezza sarebbe addirittura superiore a 4 se, come descritto, nelle condizioni di massima sollecitazione ($P_{max}=360$ bar), per destabilizzare le faglie occorre in aggiunta ipotizzare degli angoli di attrito molto bassi e poco realistici.

ALLEGATO 1

Pericolosità sismica e sismicità storica area di San Potito e Cotignola

Pericolosità sismica e sismicità storica nell'area di San Potito e Cotignola

Nell'area in cui la Concessione San Potito e Cotignola Stoccaggio è situata, la Rete Sismica Nazionale (RSN) consente di ottenere una magnitudo di completezza pari a 2 [1]: ciò significa che la RSN è in grado di rilevare e localizzare tutti i terremoti che accadono nell'area solo se hanno magnitudo maggiore di questa soglia. È quindi possibile che nell'area ci sia una microsismicità formata da eventi di magnitudo minore di 2 che l'attuale Rete Sismica Nazionale non riesce a rilevare. In Figura 1 è mostrata la magnitudo di completezza su tutto il territorio nazionale [1].

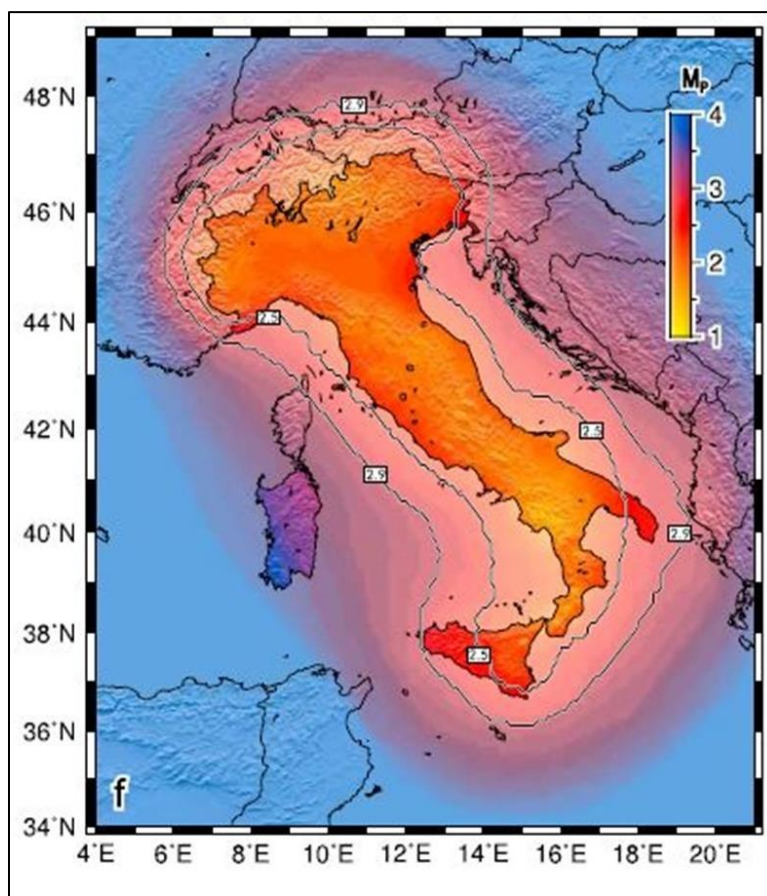


Figura 1: Soglie di detezione della RSN [1]

La mappa di pericolosità sismica del territorio (Figura 2) mostra per l'area di interesse un superamento del livello di scuotimento (accelerazione del suolo) di 0.175 - 0.2 g con una probabilità del 10% in 50 anni.

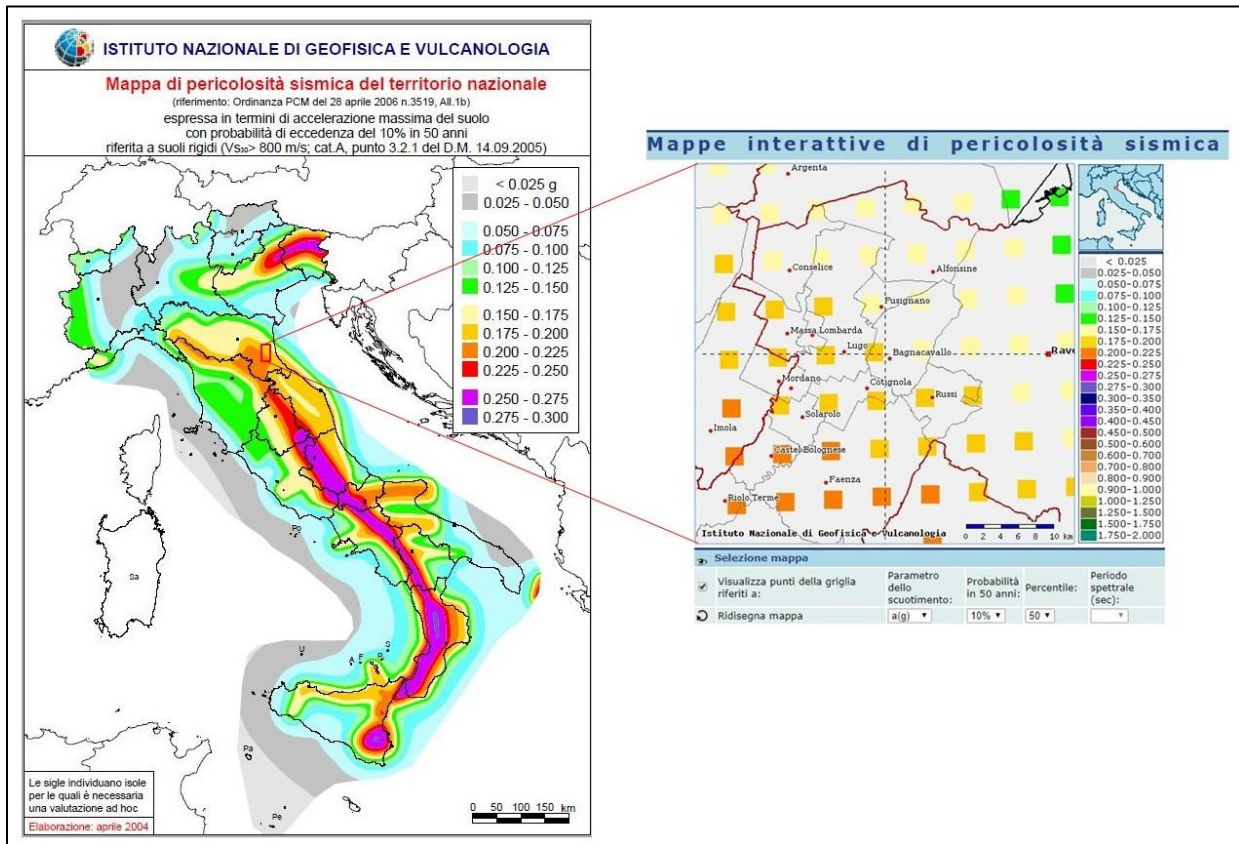


Figura 2: Mappa di pericolosità sismica nazionale (a sinistra) e ingrandimento sui comuni in cui ricade la concessione *San Potito e Cotignola Stoccaggio* e sui comuni limitrofi. Mappa estratta dal sito esse1-gis.mi.ingv.it

In Figura3 è mostrata la mappa degli epicentri dei terremoti catalogati nel Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI), versione 2015 [2]: il catalogo copre l'intero territorio nazionale e alcune aree immediatamente limitrofe, e riporta 4584 terremoti avvenuti nel periodo 1000-2014 e caratterizzati da $I_{max} \geq 5$ (I_{max} indica intensità massima), e eventi con magnitudo strumentale equivalente (secondo i metodi e le conversione descritte all'interno del documento stesso) $M_w \geq 4.0$. Sono inclusi anche alcuni terremoti con $M_w < 4.0$, nell'area dell'Etna e dei Campi Flegrei [2].

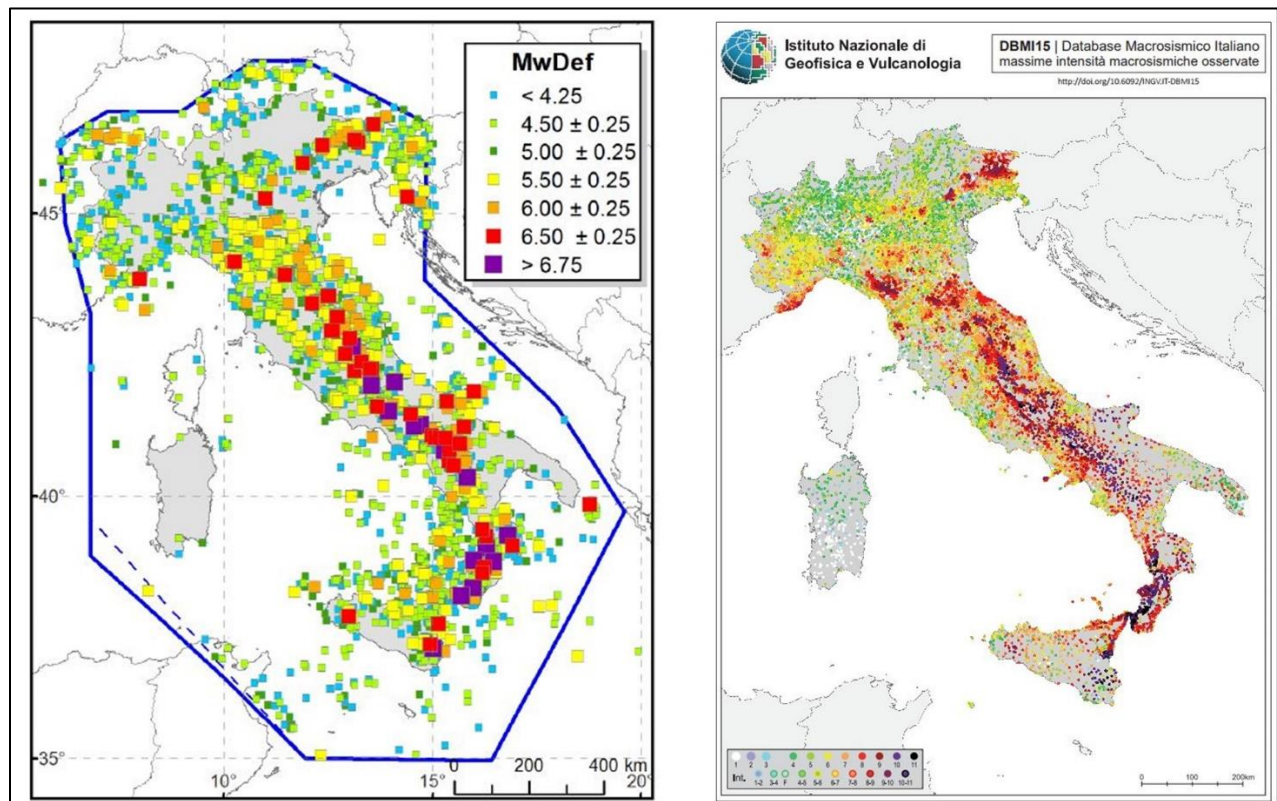


Figura 3: A sinistra: mappa degli epicentri dei terremoti verificatisi in Italia tra l'anno 1000 e il 2014, come catalogate nel DPTI15 [2]. A destra: massime intensità macrosismiche osservate nello stesso periodo su tutto il territorio nazionale.

La Figura4 mostra il dettaglio della Regione Emilia-Romagna e della provincia di Ravenna, estratto dal CPTI.

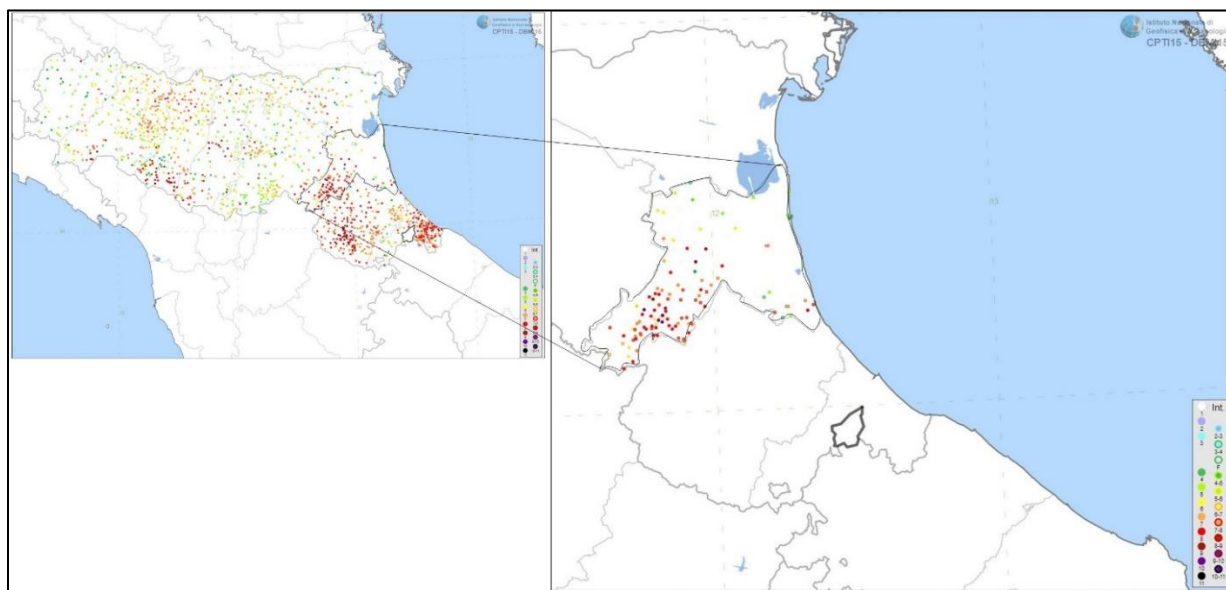


Figura 4: massime intensità macrosismiche osservate tra il 1000 e il 2014: dettaglio della regione Emilia-Romagna (a sinistra) e della provincia di Ravenna (a destra). [2]

I principali terremoti storici avvenuti in provincia di Ravenna sono elencati in Tabella 1

| Data | Tempo Origine UTC | Latitudine | Longitudine | M _w |
|------------|-------------------|------------|-------------|----------------|
| 19/04/1509 | --:--:-- | 44.323° | 11.864° | 5.02 |
| 10/07/1591 | --:--:-- | 44.401° | 12.035° | 5.13 |
| 22/06/1620 | --:--:-- | 44.517° | 12.017° | 4.86 |
| 11/04/1688 | 12:20:00 | 44.390° | 11.942° | 5.84 |
| 09/08/1732 | --:--:-- | 44.288° | 11.878° | 4.63 |
| 25/05/1780 | --:--:-- | 44.418° | 12.197° | 4.40 |
| 12/02/1881 | --:--:-- | 44.371° | 12.033° | 4.69 |
| 01/08/1891 | 13:32:22 | 44.353° | 11.896° | 4.36 |
| 05/06/1935 | 11:48:00 | 44.260° | 11.876° | 5.23 |
| 09/08/1963 | 06:05:00 | 44.416° | 11.977° | 5.23 |
| 11/01/1968 | 17:08:09 | 44.279° | 11.909° | 4.44 |
| 10/01/1969 | 16:17:32 | 44.390° | 11.983° | 4.38 |
| 08/05/2000 | 12:29:56 | 44.279° | 11.917° | 4.67 |
| 11/05/2000 | 11:57:16 | 44.274° | 11.904° | 4.16 |
| 12/05/2000 | 11:26:39 | 44.315° | 11.939° | 4.29 |

Tabella 1: principali terremoti storici in provincia di Ravenna [2]

Uno studio condotto da INGV ha individuato nel territorio nazionale alcune aree sismogenetiche, rappresentate da zone nelle quali sono attesi terremoti di magnitudo $M \geq 5$, e catalogate nel *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS) [3].

Questa zonazione (denominata Z69), mostrata in Figura 66, è il principale punto di riferimento per la valutazione della pericolosità sismica di un territorio.

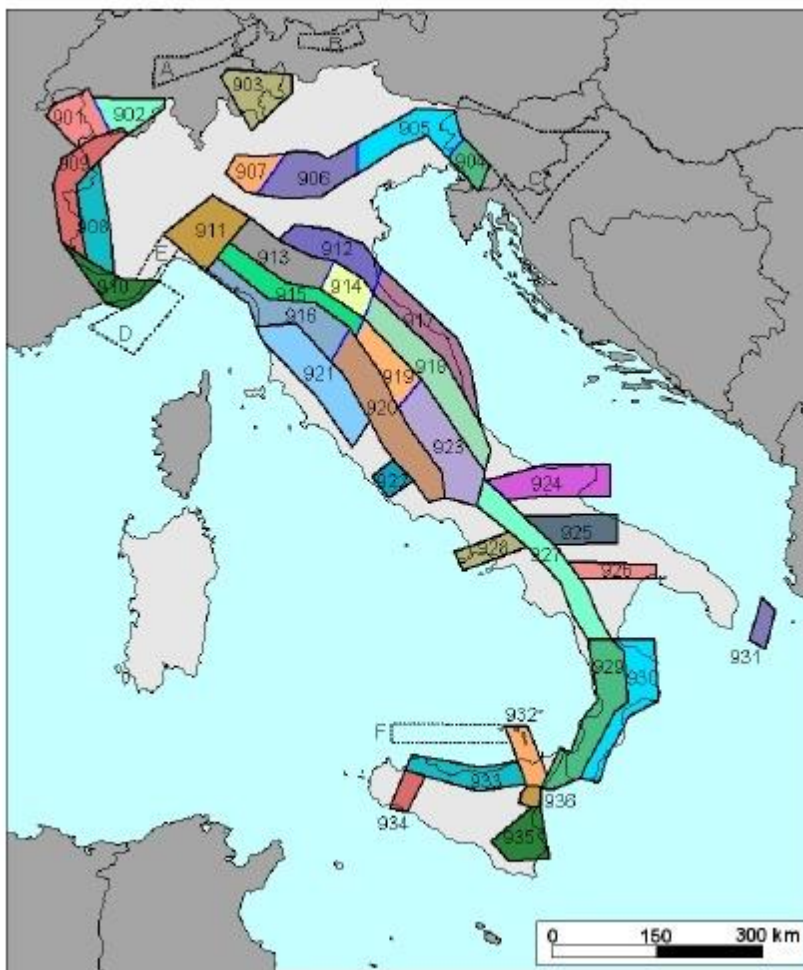


Figura 6: zonazione sismogenetica Z69

In base a questa zonazione, la Concessione San Potito e Cotignola Stoccaggio ricade in un'area (Zona sismogenetica 912) interessata dalle seguenti due sorgenti sismogenetiche [3] (figura 7), entrambe a **profondità superiori** a quelle dei giacimenti di San Potito e di Cotignola:

- struttura sismogenetica composta Ascensione-Armaia (DISS-ID ITCS011);
- sorgente sismogenetica individuale Bagnacavallo (DISS-ID ITIS100)

Si fa notare che la sorgente sismogenetica individuale ITIS 100 Bagnacavallo fa parte della sorgente composta denominata ITCS 011 Ascensione – Armaia. Le caratteristiche di quest'ultima non sono specificate nel dettaglio, che fa riferimento alla sorgente individuale ITIS 100.

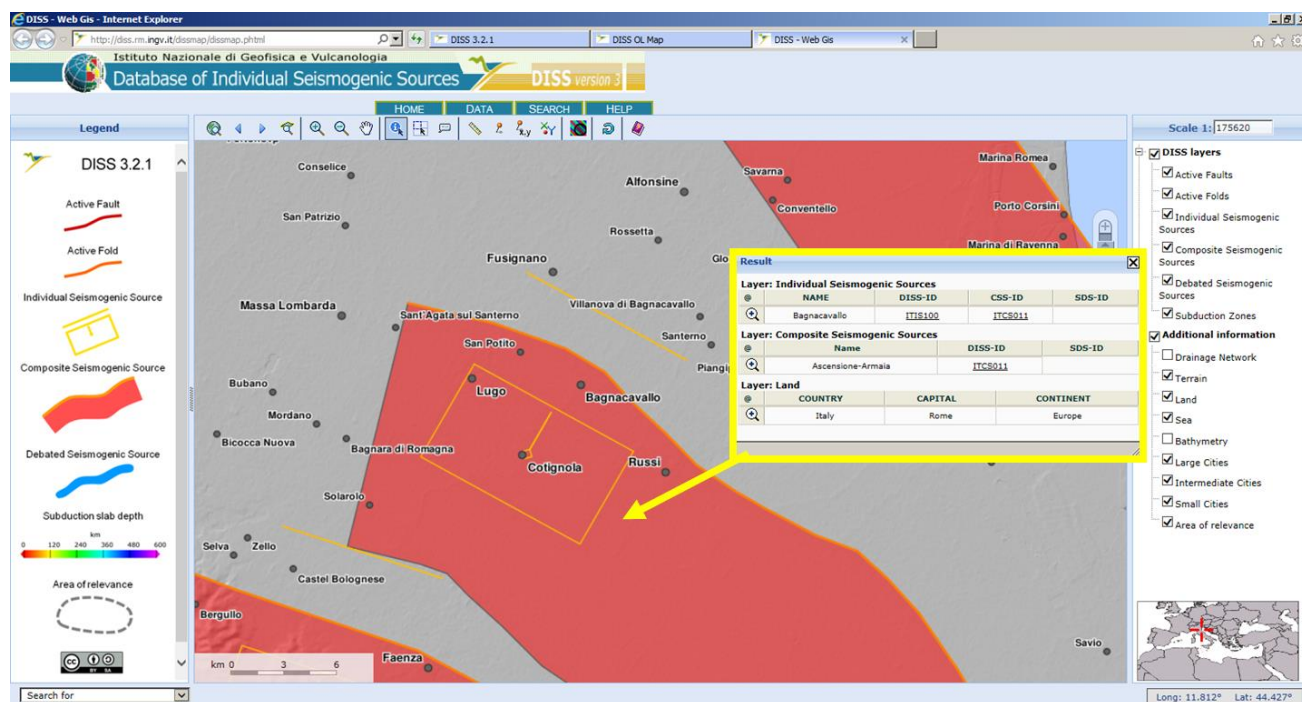


Figura 7. Estratto del database DISS (INGV) [3] con le sorgenti sismogenetiche presenti nell'area di San Potito e Cotignola. La sorgente composta Ascensione -Armaia (DISS-ID ITCS011) è rappresentata in rosso come un piano inclinato proiettato verticalmente sulla superficie terrestre.

La sismicità rilevata nella zona dalla rete sismica nazionale dal 1/4/2005 al 02/10/2017 [4] [5] è riportata nella seguente tabella 2: per l'evento più superficiale (profondità pari a 2 km), è indicata la distanza dal giacimento più vicino.

Si fa notare che, tranne in due soli casi (l'8/09/2007 alle 20:24:28 UTC a profondità 7.3 km, e il 16/07/2009 alle 14:24:12 UTC a profondità 2 km), gli ipocentri sono stati localizzati a profondità superiori a 10.0 km. Nello stesso periodo, la Rete Sismica Nazionale ha registrato un solo evento in corrispondenza dei giacimenti: il 13/01/2012 alle 01:14:44 UTC, a profondità 11.0 km, in corrispondenza del giacimento di Cotignola, livello B.

| Data | Tempo Origine UTC | Latitudine | Longitudine | MI | Profondità [km] | Distanza orizzontale da giacimento più vicino nella concessione S. Potito e Cotignola |
|------------|-------------------|------------|-------------|----------|-----------------|---|
| 20/04/2005 | 18:31:59 | 44.39° | 11.90° | 2.2 | 18.8 | 2.0 km da Cotignola CC1 |
| 31/08/2005 | 15:04:48 | 44.32° | 11.94° | 2.3 | 12.5 | |
| 14/02/2007 | 23:10:54 | 44.31° | 12.03° | 3.3 | 17.6 | |
| 14/02/2007 | 23:24:29 | 44.34° | 11.91° | 1.4 | 11.0 | |
| 14/02/2007 | 23:37:18 | 44.36° | 11.90° | 1.2 | 10.0 | 1.8 km da Cotignola CC1 |
| 15/02/2007 | 00:27:30 | 44.35° | 12.02° | 2.0 | 10.0 | |
| 15/02/2007 | 00:55:28 | 44.37° | 11.87° | 1.6 | 10.0 | |
| 15/02/2007 | 23:23:56 | 44.36° | 11.99° | 1.3 | 29.6 | 1.2 km da Cotignola B |
| 23/08/2007 | 04:52:36 | 44.33° | 11.87° | 1.9 | 10.0 | |
| 29/08/2007 | 23:47:16 | 44.40° | 11.91° | 2.3 | 10.0 | 1.8 km da Cotignola CC1 |
| 08/09/2007 | 20:24:28 | 44.40° | 11.86° | 2.2 | 7.3 | |
| 02/11/2007 | 22:26:46 | 44.36° | 11.91° | 2.1 | 10.0 | 1.0 km da Cotignola CC1 |
| 11/07/2008 | 10:30:20 | 44.33° | 11.89° | 1.2 | 10.0 | |
| 05/04/2009 | 20:29:55 | 44.3° | 12.03° | 2.0 (Md) | 34.0 | |
| 05/04/2009 | 23:42:04 | 44.31° | 11.98° | 1.6 | 25.0 | |
| 06/04/2009 | 01:03:34 | 44.33° | 12.04° | 1.4 | 10.0 | |
| 16/04/2009 | 14:01:31 | 44.31° | 11.95° | 1.8 | 10.3 | |
| 15/07/2009 | 14:47:21 | 44.36° | 11.91° | 0.9 | 11.0 | 0.7 km da Cotignola CC1 |
| 16/07/2009 | 14:24:12 | 44.30° | 11.93° | 1.4 | 2.0 | 7.0 km da Cotignola B |
| 10/12/2009 | 17:02:17 | 44.37° | 11.98° | 2.1 | 24.8 | 0.7 km da Cotignola B |
| 13/04/2010 | 07:11:22 | 44.34° | 11.94° | 1.2 | 10.0 | |
| 22/05/2010 | 18:32:35 | 44.33° | 11.88° | 1.2 | 10.0 | |
| 23/06/2010 | 18:08:59 | 44.32° | 11.96° | 1.4 | 18.6 | |
| 23/06/2010 | 18:41:21 | 44.31° | 11.96° | 1.5 | 24.4 | |
| 29/06/2010 | 08:05:30 | 44.36° | 12.08° | 1.7 | 15.0 | |
| 30/06/2010 | 02:06:15 | 44.29° | 11.99° | 2.2 | 26.0 | |
| 09/07/2010 | 11:36:44 | 44.33° | 11.90° | 1.3 | 10.0 | |
| 01/09/2010 | 14:09:14 | 44.50° | 11.95° | 2.3 | 44.3 | |
| 12/09/2010 | 03:46:51 | 44.32° | 11.84° | 1.7 | 10.0 | |
| 07/10/2010 | 06:00:49 | 44.33° | 11.87° | 1.6 | 10.0 | |
| 04/07/2011 | 15:34:42 | 44.39° | 11.93° | 2.1 | 24.0 | 1.1 km da Cotignola CC1 |
| 11/08/2011 | 06:34:55 | 44.38° | 12.02° | 1.4 | 10.0 | |
| 27/08/2011 | 02:10:27 | 44.35° | 11.88° | 1.3 | 35.0 | |
| 06/11/2011 | 19:06:41 | 44.35° | 11.91° | 1.9 | 24.0 | |
| 06/11/2011 | 20:12:07 | 44.37° | 12.04° | 1.9 | 25.0 | |
| 13/01/2012 | 01:14:44 | 44.36° | 11.96° | 2.1 | 11.0 | In corrispondenza del giacimento Cot. B |
| 27/01/2012 | 19:38:34 | 44.30° | 11.91° | 1.4 | 10.0 | |
| 05/12/2013 | 18:49:25 | 44.36° | 11.94° | 2.4 | 21.0 | 1.1 km da Cotignola CC1 |
| 15/01/2014 | 03:36:49 | 44.43° | 11.97° | 1.7 | 35.0 | |
| 16/05/2014 | 11:21:20 | 44.30° | 11.89° | 1.8 | 23.0 | |
| 14/06/2014 | 18:39:11 | 44.32° | 11.94° | 1.4 | 36.0 | |
| 14/06/2014 | 22:53:25 | 44.33° | 12.04° | 1.8 | 31.0 | |
| 30/05/2015 | 04:16:34 | 44.38° | 11.84° | 1.7 | 24.0 | |
| 24/08/2015 | 09:09:54 | 44.29° | 11.94° | 1.7 | 22.0 | |
| 24/08/2015 | 11:05:48 | 44.30° | 11.92° | 1.4 | 25.0 | |
| 15/09/2015 | 00:49:00 | 44.45° | 12.00° | 2.2 | 31.0 | |
| 04/11/2015 | 09:45:44 | 44.35° | 11.99° | 1.7 | 35.0 | 0.8 km da Cotignola B |
| 09/11/2015 | 18:10:41 | 44.31° | 11.98° | 1.3 | 29.0 | |
| 18/01/2016 | 11:32:51 | 44.29° | 11.96° | 1.8 (Md) | 21.0 | |
| 10/07/2016 | 21:53:37 | 44.46° | 11.98° | 1.8 | 11.0 | |
| 10/07/2016 | 21:55:34 | 44.46° | 11.98° | 1.6 | 11.0 | |
| 22/08/2016 | 06:49:10 | 44.32° | 11.85° | 2.5 | 25.0 | |
| 13/08/2017 | 20:54:05 | 44.43° | 12.05° | 1.8 | 24.0 | |

Tabella 2: sismicità registrata nell'area dal 1/04/2005 al 02/10/2017 [4]

Riferimenti bibliografici:

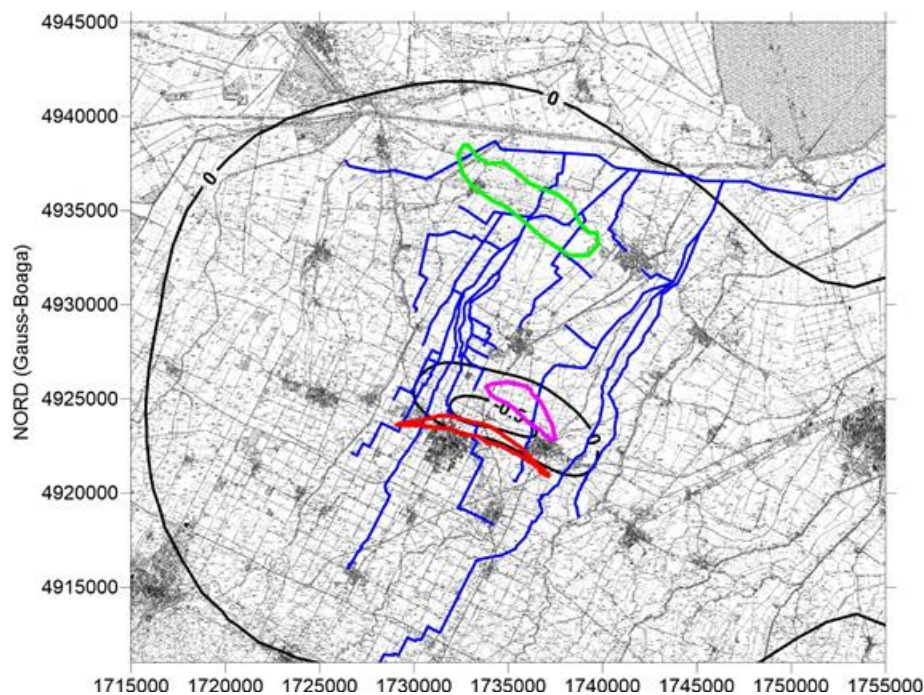
- [1] Schorlemmer D., Mele F., Marzocchi W. – *A completeness analysis of the National Seismic Network of Italy* – DOI: [10.1029/2008JB006097](https://doi.org/10.1029/2008JB006097) – 2010
- [2] Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. – CPTI, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>, DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI15 – 2016
- [3] DISS Working Group – *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0 A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas.* <http://diss.rm.ingv.it/diss> – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI: 10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0 – 2015
- [4] Bollettino online ISIDe – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia <http://info.terremoti.ingv.it/>
- [5] Gasperini P., Lolli B., Vannucci G. – *Empirical calibration of Local Magnitude Data Sets Versus Moment Magnitude in Italy* – Bull. Seism. Soc. Am., 103, 2227-2246, DOI: 10.1785/0120120356 – 2013

ALLEGATO 2

Analisi integrative dei processi geomeccanici nel campo di San Potito

Commessa: M3E 11/18

**Analisi integrative dei processi geomeccanici nel campo di San
Potito (RA) e analisi dell'impatto della subsidenza sulla rete
scolante nell'area del campo**



Committente: EDISON STOCCAGGIO S.p.A.

Elaborato: REV_3 Relazione Tecnica

Data: ottobre 2018

INDICE

| | | |
|-------|--|-----------|
| 1 | INTRODUZIONE..... | 11 |
| 2 | RICHIAMI AL MODELLO DI PRODUZIONE E AL MODELLO GEOMECCANICO | 12 |
| 3 | CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DELLE CONDIZIONI GEOMECCANICHE..... | 17 |
| 3.1 | Parametri geomeccanici | 17 |
| 3.2 | Parametri per la valutazione dell'integrità meccanica..... | 18 |
| 3.3 | Regime tensionale naturale | 18 |
| 4 | CRITICITÀ E SCENARI ANALIZZATI..... | 21 |
| 5 | QUANTIFICAZIONE DELLE CRITICITÀ: ANALISI CON IL MODELLO GEOMECCANICO 23 | |
| 5.1 | Spostamenti della superficie del terreno | 23 |
| 5.2 | Gradiente dello spostamento verticale | 27 |
| 5.3 | Integrità meccanica della roccia serbatoio e delle formazioni confinanti..... | 31 |
| 5.4 | Analisi tensionale sulle faglie prossime al giacimento | 35 |
| 5.5 | Valutazione dell'insieme degli scenari analizzati | 41 |
| 6 | QUANTIFICAZIONE DELLE CRITICITÀ: ANALISI CON MODELLO IDRAULICO DELLA RETE SCOLANTE..... | 45 |
| 6.1 | Modello idrologico | 47 |
| 6.1.1 | Definizione della geometria del sistema | 47 |
| 6.1.2 | Set-up del modello | 54 |
| 6.1.3 | Risultati delle simulazioni..... | 58 |
| 6.2 | Modello idraulico..... | 60 |
| 6.2.1 | Definizione della geometria del sistema | 60 |
| 6.2.2 | Set-up del modello | 62 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.2.3 | Scenari analizzati | 62 |
| 6.2.4 | Risultati del modello idraulico della rete scolante | 69 |
| 6.2.4.1 | Scenario B..... | 69 |
| 6.2.4.2 | Scenario C..... | 81 |
| 6.2.4.3 | Scenario D..... | 93 |
| 6.2.4.4 | Scenari estremi..... | 107 |
| 6.3 | Valutazione dell'insieme degli scenari analizzati | 112 |
| 7 | DEFINIZIONE DEI FATTORI DI SICUREZZA | 113 |
| 8 | CONCLUSIONI..... | 114 |
| 9 | REFERENZE..... | 116 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|--|----|
| Figura 1: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati fornita dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo dicembre 1988 - marzo 2017..... | 12 |
| Figura 2: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo gennaio 2018 - giugno 2028. | 13 |
| Figura 3: Vista prospettica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale..... | 13 |
| Figura 4: Particolare della sezione della griglia di calcolo in corrispondenza dei livelli mineralizzati. In nero sono evidenziati i profili delle faglie inserite nel modello geomeccanico e in rosso sono riportate le quote di chiusura della Faglia 2 sul livello BB1L e delle Faglie 4 e 5 sul Pliocene. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale..... | 15 |
| Figura 5: Vista in pianta delle faglie e della loro discretizzazione mediante elementi di interfaccia. Le faglie 2, 4 e 5 sono evidenziate rispettivamente in verde, rosso e viola. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico 3D che ha permesso di mappare con precisione la giacitura delle superfici di faglia..... | 16 |
| Figura 6: Pressione indisturbata P0 al variare della profondità in corrispondenza al pozzo SP-6d...20 | |
| Figura 7: Spostamento verticale (cm) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SG1: a) spostamento verticale sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) spostamento verticale in scala di colori (in blu la traccia del giacimento)..... | 24 |
| Figura 8: Spostamento verticale (cm) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SG2: a) spostamento verticale sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) spostamento verticale in scala di colori (in blu la traccia del giacimento)..... | 25 |
| Figura 9: Spostamento verticale (cm) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SG3: a) spostamento verticale sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) spostamento verticale in scala di colori (in blu la traccia del giacimento)..... | 26 |
| Figura 10: Gradiente dello spostamento verticale (mm/m) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SG1: a) gradiente sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) gradiente in scala di colori (in blu la traccia del giacimento)..... | 28 |

Figura 11: Gradiente dello spostamento verticale (mm/m) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SG2: a) gradiente sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) gradiente in scala di colori (in blu la traccia del giacimento).29

Figura 12: Gradiente dello spostamento verticale (mm/m) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SG3: a) gradiente sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) gradiente in scala di colori (in blu la traccia del giacimento).30

Figura 13. Rappresentazione dello stato tensionale nel piano σ - τ e spostamento dei cerchi di Mohr-Coulomb a seguito dello stoccaggio ($p > p_0$) o erogazione ($p < p_0$) di fluidi dal sottosuolo.....31

Figura 14: Variazione di pressione (bar) durante un ciclo di stoccaggio. In rosso/arancione è evidenziato il volume di roccia V_R in cui la variazione di pressione è superiore ai 60 bar.34

Figura 15: Variazione della tensione normale al piano di faglia $\Delta\sigma_N$ (bar) in un ciclo di stoccaggio nello scenario “base” TF1: a) vista in pianta; b) vista assonometrica.36

Figura 16: Variazione della tensione normale al piano di faglia $\Delta\tau$ (bar) in un ciclo di stoccaggio nello scenario “base” TF1: a) vista in pianta; b) vista assonometrica.37

Figura 17: Stato tensionale (σ_N , τ) nella zona più sollecitata di ogni faglia (F2, F4 e F5) in alcuni istanti significativi per lo scenario TF1: T0) stato iniziale indisturbato (2013); T1) termine della fase di stoccaggio; T2) termine della fase di erogazione38

Figura 18: Stato tensionale (σ_N , τ) nella zona più sollecitata di ogni faglia (F2, F4 e F5) in alcuni istanti significativi per lo scenario TF2: T0) stato iniziale indisturbato (2013); T1) termine della fase di stoccaggio; T2) termine della fase di erogazione.....39

Figura 19: Stato tensionale (σ_N , τ) nella zona più sollecitata di ogni faglia (F2, F4 e F5) in alcuni istanti significativi per lo scenario TF3: T0) stato iniziale indisturbato (2013); T1) termine della fase di stoccaggio; T2) termine della fase di erogazione.....39

Figura 20: Stato tensionale (σ_N , τ) nella zona più sollecitata di ogni faglia (F2, F4 e F5) in alcuni istanti significativi per lo scenario TF3: T0) stato iniziale indisturbato (2013); T1) termine della fase di stoccaggio; T2) termine della fase di erogazione. L’involuppo a rottura di Mohr-Coulomb con coesione nulla e $\phi = 30^\circ$ è evidenziato in nero. Per ogni faglia, il coefficiente di attrito minimo necessario per non oltrepassare l’involuppo di rottura è evidenziato in rosso.40

Figura 21: Velocità verticale media (mm/anno) nei PS nel periodo 2013 – 2017: a) misurata dal SAR, b) calcolata con c_M media; c) calcolata con $c_M +95\%$42

| | |
|---|----|
| Figura 22: Traccia del giacimento e sezione A-A evidenziate in verde e nero, rispettivamente. | 43 |
| Figura 23: Variazione di tensione verticale $\Delta\sigma_z$ (bar) in un ciclo di stoccaggio con $P_{MAX} = 360$ bar ($P_{MAX}=1.8Pi$), nella sezione verticale A-A di Figura 22. La scala verticale è amplificata due volte rispetto a quella orizzontale..... | 43 |
| Figura 24: Particolare 1 di Figura 23. La scala verticale è amplificata due volte rispetto a quella orizzontale..... | 44 |
| Figura 25: Particolare 2 di Figura 23. La scala verticale è amplificata due volte rispetto a quella orizzontale..... | 44 |
| Figura 26: Inquadramento territoriale con indicazione planimetrica della rete scolante e la traccia dei giacimenti di produzione primaria e UGS..... | 46 |
| Figura 27: Bacini idrografici principali del comprensorio di bonifica analizzato con HEC-HMS..... | 48 |
| Figura 28: Schematizzazione del Nuovo Tratturo nel modello HEC-HMS..... | 49 |
| Figura 29: Schematizzazione del Canal Vela nel modello HEC-HMS..... | 50 |
| Figura 30: Schematizzazione dello Scolo Alfonsine nel modello HEC-HMS..... | 52 |
| Figura 31: Schematizzazione del Fosso Vecchio nel modello HEC-HMS..... | 53 |
| Figura 32 Fosso Vecchio e Canal Vela: ietogramma utilizzato per la simulazione idrologica..... | 56 |
| Figura 33 Scolo Alfonsine: ietogramma utilizzato per la simulazione idrologica..... | 57 |
| Figura 34 Scolo Nuovo Tratturo: ietogramma utilizzato per la simulazione idrologica..... | 57 |
| Figura 35: Nuovo Tratturo: idrogramma risultante alla sezione di chiusura. | 58 |
| Figura 36: Canal Vela: idrogramma risultante alla sezione di chiusura. | 59 |
| Figura 37: Scolo Alfonsine: idrogramma risultante alla sezione di chiusura. | 59 |
| Figura 38: Fosso Vecchio: idrogramma risultante alla sezione di chiusura. | 60 |
| Figura 39: Schematizzazione del comprensorio di bonifica nel modello HEC-RAS. | 61 |
| Figura 40: Spostamenti (cm) in corrispondenza del giacimento di San Potito per gli scenari B e C. Gli spostamenti sono il risultato del modello geomeccanico con $c_{M\ media}$ e $P = 240$ bar ($P = 1.2 Pi$), ovvero lo scenario “base” analizzato nella precedente fase dello studio [M³E, 2017]..... | 63 |
| Figura 41: Spostamento (cm) considerato negli scenari B (a) e C (b) fornito dal modello geomeccanico di San Potito nel caso “base” con $P = 240$ bar ($P = 1.2 Pi$) e con $c_{M\ media}$. La traccia del giacimento di San Potito è riportata in rosso, assieme a quelle dei campi di Longanesi (in viola) e Alfonsine (in verde). La rete scolante nel modello HEC-RAS è evidenziata in blu. | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 42: Spostamento (cm) dovuto alle attività minerarie nel campo di Alfonsine (a) e Longanesi (b) corrispondente allo “scenario C”. Le mappe sono state desunte dai rapporti di Teatini et al. [2017] e dallo scenario “Cmed_Kdef” (interpolato all’anno 2030) in ENI [2010], rispettivamente. Le tracce dei giacimenti di San Potito, Longanesi e Alfonsine sono evidenziate rispettivamente in rosso, viola e verde. La rete scolante nel modello HEC-RAS è evidenziata in blu. | 65 |
| Figura 43: Spostamento (cm) considerato nello scenario D. Le tracce dei giacimenti di San Potito, Longanesi e Alfonsine sono evidenziate rispettivamente in rosso, viola e verde. La rete scolante nel modello HEC-RAS è evidenziata in blu. | 66 |
| Figura 44: Sezione Sud-Ovest – Nord-Est delle mappe di spostamento (cm) di Figura 41a, Figura 42a, Figura 42b e Figura 43, rispettivamente in rosso, verde, viola e nero. | 66 |
| Figura 45: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Destra Reno. | 69 |
| Figura 46: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Nuovo Tratturo. | 70 |
| Figura 47: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Traversagno. | 70 |
| Figura 48: Profilo dei livelli massimi lungo il Canal Vela. | 71 |
| Figura 49: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Tratturo. | 72 |
| Figura 50: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Casale. | 72 |
| Figura 51: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fossatone di San Bernardino. | 73 |
| Figura 52: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Lunga a Ponente. | 73 |
| Figura 53: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova nel Casale. | 74 |
| Figura 54: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Ascensione. | 74 |
| Figura 55: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Arginello. | 75 |
| Figura 56: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Runzi. | 75 |
| Figura 57: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Santa Lucia. | 76 |
| Figura 58: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Frassona Maggiore. | 76 |
| Figura 59: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Cocorre. | 77 |
| Figura 60: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Sant’Antonio. | 77 |
| Figura 61: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Fusignano. | 78 |
| Figura 62: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova. | 78 |
| Figura 63: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Alfonsine. | 79 |
| Figura 64: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vecchio. | 80 |
| Figura 65: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vetro. | 80 |

| | |
|--|----|
| Figura 66: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Munio..... | 81 |
| Figura 67: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Destra Reno..... | 81 |
| Figura 68: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Nuovo Tratturo..... | 82 |
| Figura 69: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Traversagno..... | 82 |
| Figura 70: Profilo dei livelli massimi lungo il Canal Vela..... | 83 |
| Figura 71: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Tratturo..... | 84 |
| Figura 72: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Casale..... | 84 |
| Figura 73: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fossatone di San Bernardino..... | 85 |
| Figura 74: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Lunga a Ponente..... | 85 |
| Figura 75: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova nel Casale..... | 86 |
| Figura 76: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Ascensione..... | 86 |
| Figura 77: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Arginello..... | 87 |
| Figura 78: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Runzi..... | 87 |
| Figura 79: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Santa Lucia..... | 88 |
| Figura 80: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Frassona Maggiore..... | 88 |
| Figura 81: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Cocorre..... | 89 |
| Figura 82: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Sant'Antonio..... | 89 |
| Figura 83: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Fusignano..... | 90 |
| Figura 84: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova..... | 90 |
| Figura 85: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Alfonsine..... | 91 |
| Figura 86: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vecchio..... | 92 |
| Figura 87: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vetro..... | 92 |
| Figura 88: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Munio..... | 93 |
| Figura 89: Variazione di livello idrico (cm) lungo la rete scolante nel modello HEC-RAS nello scenario D. Le tracce dei giacimenti di San Potito, Longanesi e Alfonsine sono evidenziate rispettivamente in nero, viola e arancione..... | 94 |
| Figura 90: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Destra Reno..... | 95 |
| Figura 91: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Nuovo Tratturo..... | 96 |
| Figura 92: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Traversagno..... | 96 |
| Figura 93: Profilo dei livelli massimi lungo il Canal Vela..... | 97 |
| Figura 94: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Tratturo..... | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura 95: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Casale. | 98 |
| Figura 96: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fossatone di San Bernardino. | 99 |
| Figura 97: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Lunga a Ponente. | 99 |
| Figura 98: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova nel Casale. | 100 |
| Figura 99: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Ascensione. | 100 |
| Figura 100: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Arginello. | 101 |
| Figura 101: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Runzi. | 101 |
| Figura 102: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Santa Lucia. | 102 |
| Figura 103: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Frassona Maggiore. | 102 |
| Figura 104: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Cocorre. | 103 |
| Figura 105: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Sant'Antonio. | 103 |
| Figura 106: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Fusignano. | 104 |
| Figura 107: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova. | 104 |
| Figura 108: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Alfonsine. | 105 |
| Figura 109. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vecchio. | 106 |
| Figura 110. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vetro. | 106 |
| Figura 111. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Munio. | 107 |
| Figura 112. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Tratturo per lo scenario E. | 108 |
| Figura 113. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Arginello per lo scenario E. | 108 |
| Figura 114. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Sant'Antonio per lo scenario E. | 109 |
| Figura 115. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Munio per lo scenario E. | 109 |
| Figura 116. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Tratturo per lo scenario F. | 110 |
| Figura 117. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Arginello per lo scenario F. | 110 |
| Figura 118. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Sant'Antonio per lo scenario F. | 111 |
| Figura 119. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Munio per lo scenario F. | 111 |

I INTRODUZIONE

Il presente rapporto tecnico descrive i risultati ottenuti dalle analisi integrative in relazione alla sicurezza geomeccanica dello stoccaggio di gas naturale nel giacimento di San Potito e dell'impatto degli spostamenti superficiali sulla rete scolante nell'area del campo.

Lo studio costituisce un'integrazione alle analisi modellistiche condotte in precedenza [M³E, 2017]. Le finalità principali dell'integrazione sono le seguenti: (1) validare la caratterizzazione geomeccanica adottata nelle simulazioni modellistiche alla luce delle recenti misure *in situ* e prove di laboratorio condotte da EDISON STOCCAGGIO; (2) verificare le possibili criticità geomeccaniche e idrauliche a seguito del previsto progetto di stoccaggio a $P = 240$ bar, cioè $P = 1.2 P_i$ (P_i , pressione iniziale), con particolare riferimento al gradiente di spostamento in superficie, la tenuta strutturale del caprock, l'attivazione delle faglie e l'efficienza idraulica della rete di bonifica; (3) quantificazione dei fattori di sicurezza per ciascuna delle criticità sopra elencate.

L'analisi dei processi geomeccanici è stata condotta attraverso il modello numerico agli elementi finiti (FEM) sviluppato nelle fasi precedenti dello studio; la valutazione dell'impatto degli spostamenti superficiali sulla rete scolante è stata eseguita sviluppando un modello di deflusso superficiale con il codice HEC-RAS.

Il rapporto è strutturato come segue. Un breve riepilogo del modello fluidodinamico di giacimento fornito da EDISON STOCCAGGIO e del modello geomeccanico messo a punto da M³E negli studi precedenti è riportato al capitolo 2. Nel capitolo 3 sono le analisi eseguite con misure *in situ* e prove di laboratorio per la caratterizzazione geomeccanica dell'area del giacimento, confrontandone i risultati con le ipotesi adottate nella modellizzazione numerica. Nel capitolo 4 sono esposte le criticità analizzate e gli scenari investigati. Il capitolo 5 riassume i risultati del modello geomeccanico FEM in relazione agli spostamenti superficiali (e.g. la subsidenza), al gradiente di spostamento, all'integrità meccanica del giacimento e delle formazioni confinanti e alla propagazione del disturbo tensionale sul sistema di faglie poste in prossimità del giacimento. Il capitolo 6 riassume i risultati del modello idraulico in relazione alla variazione del livello idrico rispetto allo stato attuale in seguito alle operazioni di stoccaggio/erogazione previste. Nel capitolo 7 vengono definiti i fattori di sicurezza per ciascuna delle criticità analizzate. Infine, alcune considerazioni conclusive sono presentate nel capitolo 8.

2 RICHIAMI AL MODELLO DI PRODUZIONE E AL MODELLO GEOMECCANICO

EDISON STOCCAGGIO ha fornito il modello dinamico di giacimento, sviluppato mediante il software Eclipse, utilizzato per la gestione di produzione e stoccaggio nei livelli del giacimento di San Potito. Da tale modello si è ricavato l'andamento nel tempo e nello spazio della pressione di strato durante la fase di produzione primaria del campo, la seguente ripressurizzazione fino al 2017 (Figura 1) e la prevista fase di stoccaggio/erogazione di gas naturale dal 2017 al 2028 (Figura 2). La variazione di pressione in giacimento durante ciascun ciclo di stoccaggio/erogazione è pari a 60-70 bar.

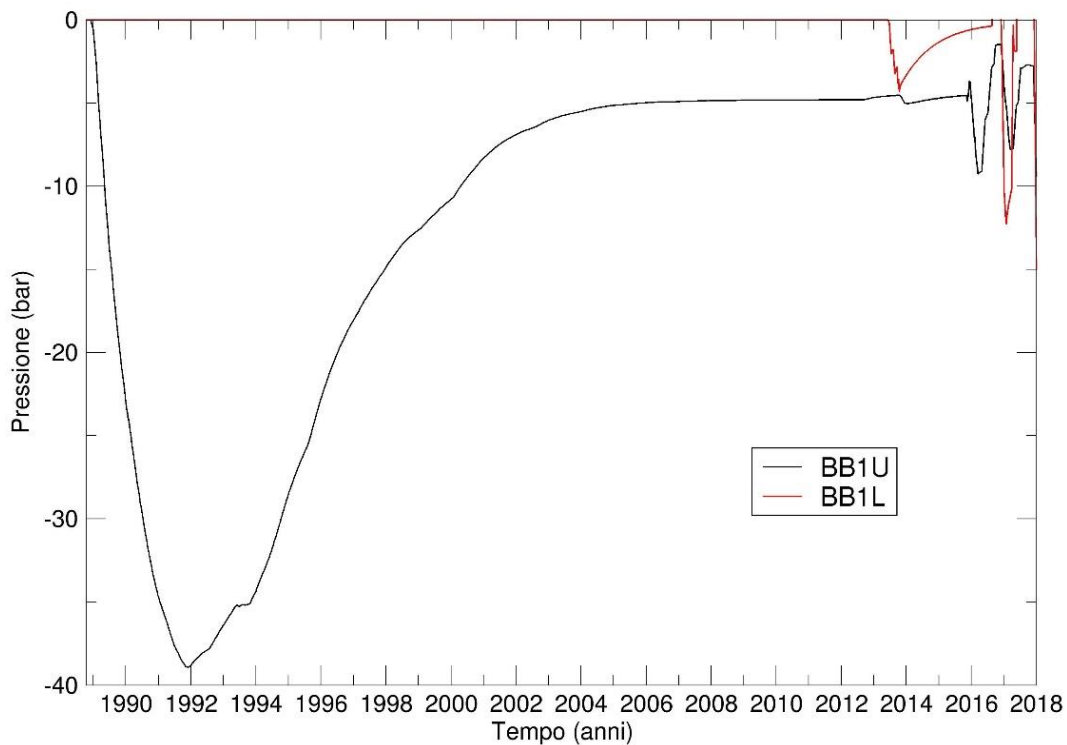


Figura 1: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati fornita dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo dicembre 1988 - marzo 2017.

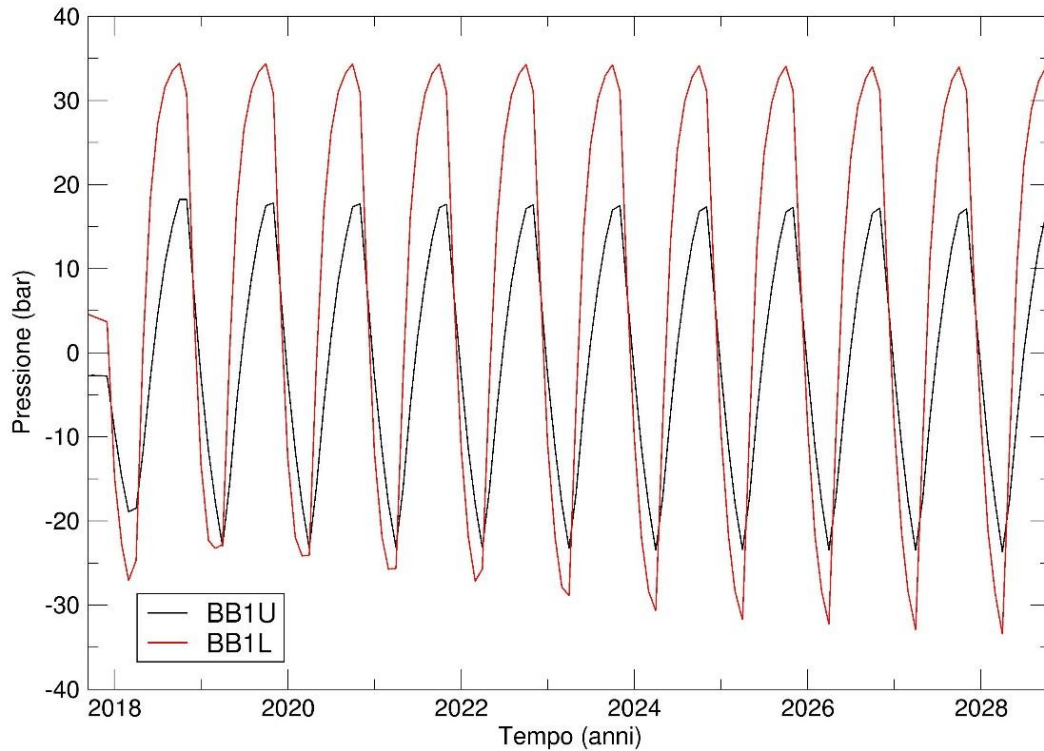


Figura 2: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo gennaio 2018 - giugno 2028.

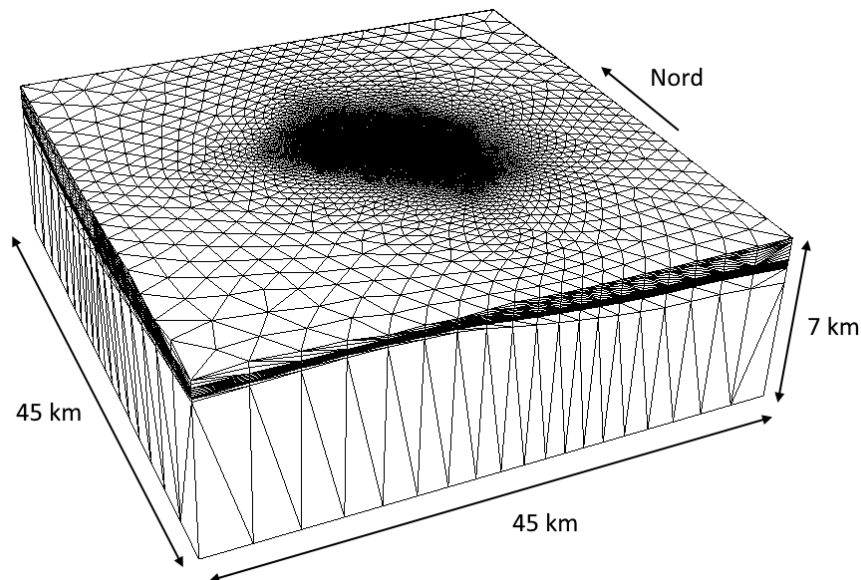


Figura 3: Vista prospettica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale.

Il modello geomeccanico sviluppato nello studio precedente [M³E, 2017] utilizza un dominio di calcolo con estensione areale 45x45 km in cui il giacimento di San Potito è collocato in posizione baricentrica. La griglia di calcolo 3D è stata ottenuta utilizzando il generatore automatico di griglie TetGen [Si, 2008], con l'accortezza di vincolare i vari layer di elementi finiti alla geometria degli orizzonti geologici. È stato così generato un dominio parallelepipedo che ha il basamento posto a 7 km di profondità, è limitato superiormente dalla superficie del terreno ed è discretizzato in modo tale da riprodurre con accuratezza le chiusure a pinch-out dei livelli geologici, i volumi dei pool mineralizzati, le quote dei GWC e le geometrie dell'acquifero connesso idraulicamente al giacimento. La vista prospettica dell'intera griglia del modello geomeccanico è mostrata in Figura 3. Le tre faglie più vicine al giacimento (faglie 2, 4 e 5), e conseguentemente interessate da un maggior disturbo tensionale a seguito delle operazioni di produzione e erogazione/stoccaggio, sono state inserite nel modello geomeccanico (Figura 4 e Figura 5). Tali discontinuità strutturali sono state rappresentate inserendo all'interno della griglia ad elementi finiti degli appropriati elementi detti "elementi d'interfaccia" che, raddoppiando i nodi giacenti sulla superficie lungo la quale la faglia si sviluppa, permettono la simulazione della possibile riattivazione della discontinuità qualora lo stato tensionale raggiunga un valore critico definito, ad esempio, attraverso un criterio alla Mohr-Coulomb [Franceschini *et al.*, 2016]. Sono stati utilizzati 4,939 elementi di interfaccia per simulare il comportamento delle tre faglie. La griglia così generata consiste complessivamente di 1,078,733 nodi e 6,629,877 elementi.

La caratterizzazione geomeccanica del modello è stata eseguita utilizzando una relazione costitutiva che fornisce la compressibilità verticale c_M del mezzo poroso in funzione della tensione verticale efficace σ_z . Nel caso in esame, è stata utilizzata come relazione costitutiva quella ricavata per l'Alto Adriatico attraverso l'analisi statistica delle misure di compattazione in situ attraverso la tecnica dei marker radioattivi [Baù *et al.*, 2002] e poi validata attraverso l'interpretazione di misure InSAR su alcuni campi di stoccaggio già in esercizio nella Pianura Padana [Ferronato *et al.*, 2013]. In particolare, il valor medio $c_{M \text{ media}}$ e il limite superiore dell'intervallo di confidenza al 95% $c_{M +95\%}$ risultano essere:

$$c_{M \text{ media}} = 0.01004 \times \sigma_z^{-1.1347} \quad (1)$$

$$c_{M +95\%} = 0.01959 \times \sigma_z^{-1.1347} \quad (2)$$

con c_M espressa in MPa^{-1} e σ_z espressa in MPa.

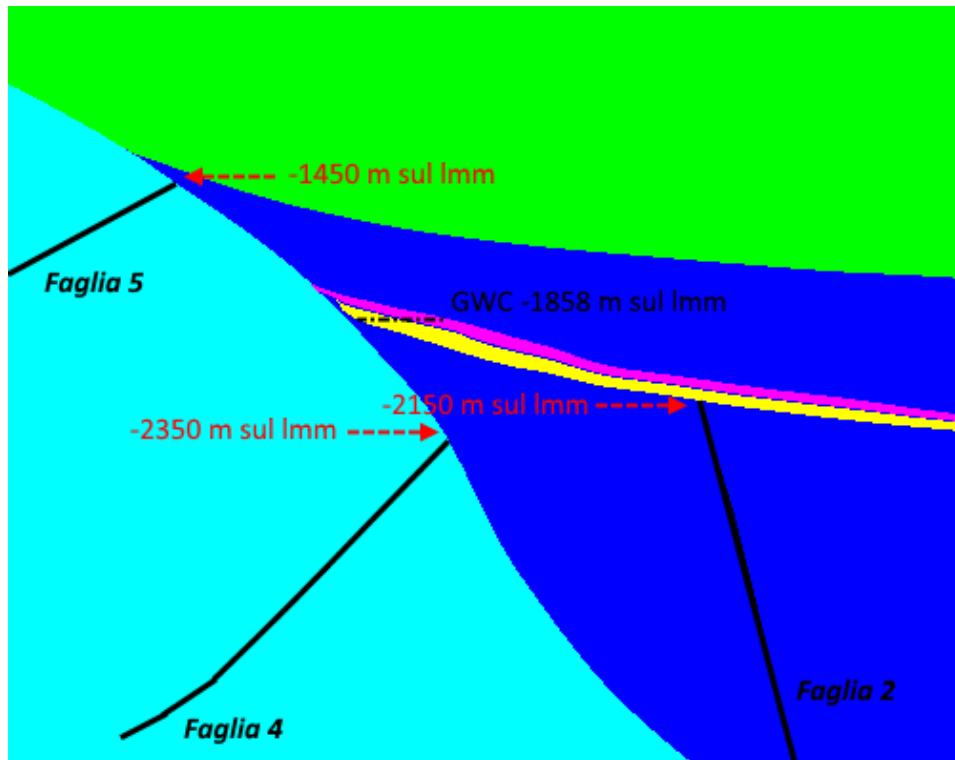


Figura 4: Particolare della sezione della griglia di calcolo in corrispondenza dei livelli mineralizzati. In nero sono evidenziati i profili delle faglie inserite nel modello geomeccanico e in rosso sono riportate le quote di chiusura della Faglia 2 sul livello BBIL e delle Faglie 4 e 5 sul Pliocene. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale.

Durante i cicli di erogazione/stoccaggio la deformazione del mezzo poroso è governata dalla compressibilità verticale c_M in II ciclo di carico. Per determinarne il valore, è necessario conoscere il rapporto s tra la compressibilità verticale in I e in II ciclo al momento dell'inversione del carico. Una volta transitata in II ciclo, la c_M può ancora essere descritta da una funzione esponenziale di σ_z utilizzando la procedura riportata in Baù et al. [2000]. Per il parametro s si è utilizzato un valore pari a 3 come adottato per altri campi del bacino padano [Teatini et al., 2011; Janna et al., 2012]. Per il modulo di Poisson è stato utilizzato il valore $\nu = 0.3$ sulla base dei dati di bibliografia. Infine, per il calcolo dello stato tensionale verticale iniziale è stato utilizzato il gradiente di overburden già utilizzato per ricavare la legge dell'Alto Adriatico ottenuto dal density log del pozzo Amelia-21:

$$\text{obg}(z) = 10^{-6} \times (3270.8771 + 2415.588 \times \ln z)$$

con obg espresso in MPa/m e la profondità z in m.

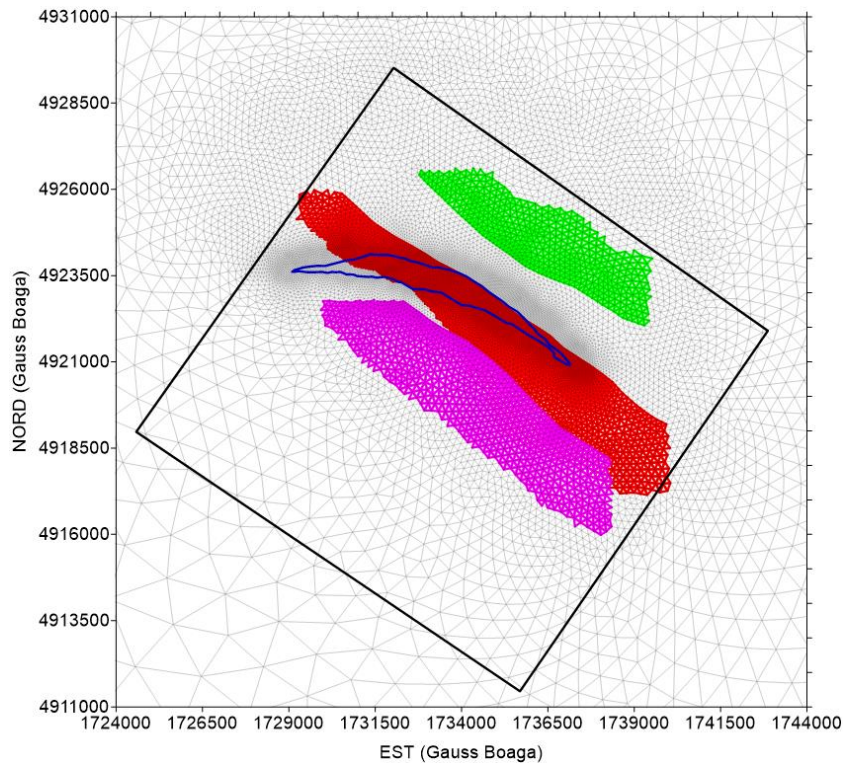


Figura 5: Vista in pianta delle faglie e della loro discretizzazione mediante elementi di interfaccia. Le faglie 2, 4 e 5 sono evidenziate rispettivamente in verde, rosso e viola. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico 3D che ha permesso di mappare con precisione la giacitura delle superfici di faglia.

3 CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DELLE CONDIZIONI GEOMECCANICHE

EDISON STOCCAGGIO ha recentemente condotto delle prove *in situ* e in laboratorio sulle rocce del reservoir e del caprock di San Potito, con l'obiettivo di caratterizzare dal punto di vista geomeccanico le formazioni geologiche interessate dalle operazioni di stoccaggio. In particolare sono stati eseguiti:

- test di laboratorio su 29 m di carote prelevate dal pozzo “San Potito A1dir” (SP-A1d) tra le profondità 1921 m (caprock) a 1950 m (reservoir) [GEOSTOCK, 2012];
- test di laboratorio su 20.35 m di carote prelevate dal pozzo “San Potito A2dir” (SP-A2d) da 2551 m MD a 2275 m MD (caprock) [EDISON EDF GROUP, 2018];
- stress test MDT al pozzo “San Potito 6dir” (SP-6d) [Schlumberger, 2018].

Nel seguito sono analizzati i parametri geomeccanici desunti dalle prove di laboratorio e dai test *in situ*, confrontandoli con quelli utilizzati nel modello geomeccanico e nelle verifiche strutturali dello studio modellistico condotto da M³E [2017]. Nel dettaglio, i parametri presi in considerazione sono i seguenti: la compressibilità verticale edometrica del mezzo poroso c_M , la coesione, l'angolo d'attrito e il regime tensionale naturale.

3.1 Parametri geomeccanici

La caratterizzazione geomeccanica del modello di simulazione è stata eseguita utilizzando la relazione costitutiva che fornisce la c_M del mezzo poroso in funzione della tensione verticale efficace σ_z (eq. 1) mentre per il modulo di Poisson è stato utilizzato il valore $\nu = 0.3$ sulla base dei dati di bibliografia.

Dalle prove triassiali sui campioni prelevati ai pozzi SP-A1d e SP-A2d è stato misurato il modulo di Young E al variare della pressione di confinamento. Il valore di E è legato alla compressibilità edometrica dalla ben nota relazione $c_M = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)}$, con il coefficiente di Poisson ν stimato in 0.3.

In Tabella I sono riportati i valori di E misurati (E_M) e derivati dalla relazione $c_M - \sigma_z$ utilizzata nello studio modellistico (E_{GM}) per diversi valori rispettivamente della pressione di confinamento e della tensione verticale efficace. Il confronto tra i due set di valori evidenzia come la caratterizzazione geomeccanica utilizzata nel modello sia in linea con i valori ricavati dalle prove di laboratorio.

| Pressione di confinamento / Tensione verticale (Mpa) | E_{MI} (GPa) | E_{MG} (GPa) |
|--|-------------------|-------------------|
| 5 | 0.57 | 0.46 |
| 7.5 | 0.48 | 0.72 |
| 10 | 1.39 | 1.00 |

Tabella 1: Modulo di Young E misurato (E_{MI}) e derivato dalla relazione costitutiva $c_M - \sigma_z$ adottata nel modello geomeccanico (E_{MG}), per diversi valori di pressione di confinamento e tensione verticale.

| | Prova di taglio diretto | Prova a trazione diretta | Utilizzati nella verifica strutturale |
|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---|
| Resistenza a trazione (bar) | 0 | 0.7 - 1.3 | 0 |
| Coesione (bar) | 0 - 0.56 | - | 0 |
| Angolo d'attrito ($^\circ$) | 31 - 37 | - | 30 |

Tabella 2: Parametri costitutivi del modello di Mohr-Coulomb misurati e adottati nelle verifiche strutturali.

3.2 Parametri per la valutazione dell'integrità meccanica

Per quanto riguarda la valutazione dell'integrità meccanica della roccia serbatoio, delle formazioni confinanti e la possibile attivazione delle faglie, il criterio di rottura adottato è quello di Mohr-Coulomb. In Tabella 2 sono riportati i valori dei parametri costitutivi del modello di Mohr-Coulomb (resistenza a trazione, coesione e angolo d'attrito) misurati dalle prove di taglio diretto e trazione diretta (brasileana) e quelli implementati nel modello geomeccanico 3D: i valori utilizzati sono consistenti con quelli ricavati in laboratorio, e comunque conservativi.

3.3 Regime tensionale naturale

Lo stato tensionale naturale considerato nel modello geomeccanico è di tipo normale: le tensioni principali orizzontali sono pari alla tensione verticale moltiplicata per il coefficiente di confinamento M . Data la peculiarità generale del bacino padano di essere in condizioni di normal-consolidazione fino a profondità relativamente elevate [Montone et al., 2004], il coefficiente di confinamento

utilizzato è pari a quello fornito dalla relazione $M = \frac{\nu}{1-\nu} = 0.43$. Secondo analisi più recenti [Carminati et al., 2010], tale valore di M risulta essere particolarmente cautelativo alla luce di quanto riportato dagli autori citati per la profondità del giacimento di San Potito in una zona non distante dal campo oggetto del presente studio: si evidenzia infatti la presenza di una zona di transizione da un regime "shallow tensional" ($\sigma_h < \sigma_H < \sigma_z$), con σ_h e σ_H le tensioni principali orizzontali rispettivamente minima e massima, a "strike-slip" ($\sigma_h < \sigma_z < \sigma_H$), se non addirittura "compressivo" ($\sigma_z < \sigma_h < \sigma_H$). Per il calcolo dello stato tensionale verticale è stato utilizzato il gradiente di overburden ottenuto dal density log del pozzo Amelia-21.

Al pozzo SP-6d sono stati eseguiti 2 stress test MDT per determinare il valore della tensione principale orizzontale (minima). In Tabella 3 sono riportati i valori della tensione principale orizzontale misurati e utilizzati nel modello geomeccanico 3D: il confronto evidenzia come i valori utilizzati nel modello geomeccanico siano in linea con quelli misurati *in situ*, e comunque conservativi.

| Quota (TVD m) | P0 (bar) | CP (bar) | σ_h MDT (bar) = CP – P0 | σ_z MG (bar) | σ_h MG (bar) = M x σ_z |
|------------------|-------------|-------------|--------------------------------------|------------------------|--|
| -1773 | 195 | 284 | 89 | 180 | 77 |
| -1927 | 207 | 321 | 114 | 195 | 84 |

Tabella 3: Pressione indisturbata P0 ottenuta dalle misure riportate in Figura 6, Closure Pressure CP e tensione orizzontale σ_h misurata (MDT) e assunta nel Modello Geomeccanico (MG) in corrispondenza alle quote dove è stato condotto lo stress test.

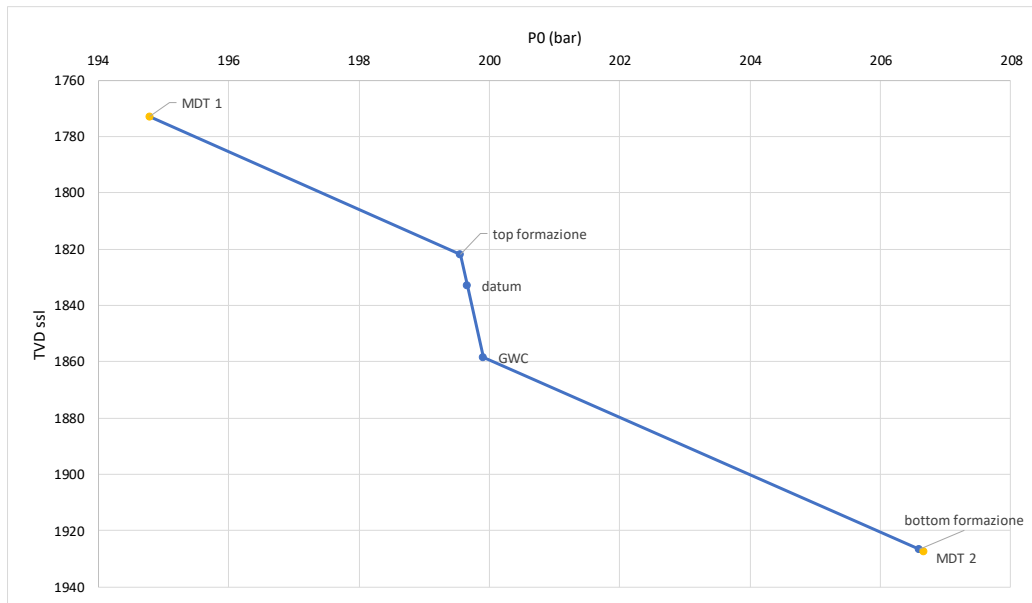


Figura 6: Pressione indisturbata P_0 al variare della profondità in corrispondenza al pozzo SP-6d.

4 CRITICITÀ E SCENARI ANALIZZATI

Le attività di stoccaggio/erogazione inducono variazioni di tensione e di deformazione, con la perturbazione della tensione che rimane sostanzialmente confinata all'interno della roccia serbatoio mentre le deformazioni si propagano fino in superficie. In questo ambito, una valutazione esaustiva del possibile impatto delle attività UGS previste deve considerare i seguenti elementi di possibile criticità:

- il gradiente dello spostamento verticale in superficie (C1): la generazione di cedimenti e/o spostamenti differenziali può indebolire la capacità portante di manufatti e/o infrastrutture sovrastanti il giacimento e le aree limitrofe, causando l'innescio di fessurazioni o deformazioni inaccettabili in relazione all'integrità della struttura;
- l'integrità meccanica della roccia serbatoio e delle formazioni confinanti (C2): la generazione di fratture/fessurazioni per rottura a taglio può causare micro-sismicità o compromettere la tenuta idraulica del caprock;
- la riattivazione delle faglie prossime al giacimento (C3): la riattivazione delle faglie in prossimità del campo può causare sismicità indotta;
- l'efficienza idraulica della rete di bonifica (C4): la generazione di spostamenti del piano campagna modifica le quote altimetriche della rete idraulica naturale e artificiale con una possibile riduzione dell'efficienza idraulica della stessa e, di conseguenza, maggiori rischi di esondazioni / allagamenti (minore sicurezza idraulica) o la necessità di un utilizzo più massivo degli impianti di sollevamento idrico.

Mantenendo inalterato il campo di pressione a seguito dello stoccaggio/erogazione a $P = 240$ bar, cioè $P = 1.2 P_i$, nelle analisi che seguono le criticità C1 – C4 sono state valutate per diversi scenari ottenuti variando alcuni dei parametri di configurazione del modello geomeccanico sviluppato nello studio precedente [M³E, 2017]. La finalità è quella di analizzare quale è il grado di sicurezza dello sviluppo proposto a $P = 1.2 P_i$ in relazione a possibili conseguenze di origine geomeccanica. Nel dettaglio, sono stati presi in considerazione i seguenti scenari:

- una diversa compressibilità edometrica verticale c_M : è stato considerato sia il valor medio $c_{M, media}$ fornito per il bacino padano dalla letteratura specialistica [Baù et al., 2002; Ferronato et al., 2013], sia il limite superiore dell'intervallo di confidenza al 95% $c_{M, +95\%}$ - ovvero una compressibilità assai elevata sulla base dei dati a disposizione - come definito in Baù et al.,

[2002]. Si fa presente che il bacino padano è una delle zone con la migliore caratterizzazione geomeccanica a livello mondiale visti i numerosissimi studi condotti sulla tematica della subsidenza a partire dagli anni 1980;

- una maggiore variazione di pressione: la variazione di pressione generata dalle attività di stoccaggio/erogazione come previste dal modello Eclipse $P = 240$ bar ($P = 1.2 P_i$) (Figura 2) è stata amplificata fino a $P_{MAX} = 360$ bar ($P_{MAX} = 1.8 P_i$).

5 QUANTIFICAZIONE DELLE CRITICITÀ: ANALISI CON IL MODELLO GEOMECCANICO

Per i diversi scenari sopra delineati, di seguito sono riportati i risultati del modello FEM geomeccanico in termini di spostamenti e spostamenti differenziali in superficie, nonché variazione di tensione in un ciclo di stoccaggio standard (primavera 2023 – autunno 2023). Tali movimenti e variazioni di tensione si ripetono ad ogni ciclo in modo sostanzialmente identico in modulo e di segno opposto in fase di erogazione in quanto i) la variazione di pressione attesa in giacimento si ripete in modo sostanzialmente identico in tutti i cicli di stoccaggio ed erogazione e ii) il comportamento geomeccanico della roccia serbatoio in fase di scarico/ricarico (Il ciclo di carico) è sostanzialmente elastico [Teatini et al., 2011].

5.1 Spostamenti della superficie del terreno

In Tabella 4 sono riassunti i parametri di configurazione degli scenari analizzati; da notare che lo scenario SG1 corrisponde allo scenario “base” già esaminato nella fase precedente dello studio geomeccanico. In Figura 7, Figura 8 e Figura 9 si riportano le mappe degli spostamenti verticali durante un ciclo di stoccaggio, con i valori massimi ΔU_{MAX} che sono riassunti in Tabella 5: rispetto allo scenario base SG1, gli scenari SG2 e SG3 hanno spostamenti che risultano moltiplicati per un fattore pari rispettivamente a circa 2 e 5.

| Scenario | c_M | P_{MAX} |
|----------|-----------------------|------------------|
| SG1 | $c_{M \text{ media}}$ | 240 bar = 1.2 Pi |
| SG2 | $c_{M +95\%}$ | 240 bar = 1.2 Pi |
| SG3 | $c_{M \text{ media}}$ | 360 bar = 1.8 Pi |

Tabella 4: Parametri di configurazione degli scenari investigati in relazione agli spostamenti in superficie e al gradiente dello spostamento verticale.

| Scenario | ΔU_{MAX} (cm) |
|----------|-----------------------|
| SG1 | 1.2 |
| SG2 | 2.7 |
| SG3 | 6.3 |

Tabella 5: Spostamenti massimi durante un ciclo di stoccaggio U_{MAX} per i diversi scenari investigati.

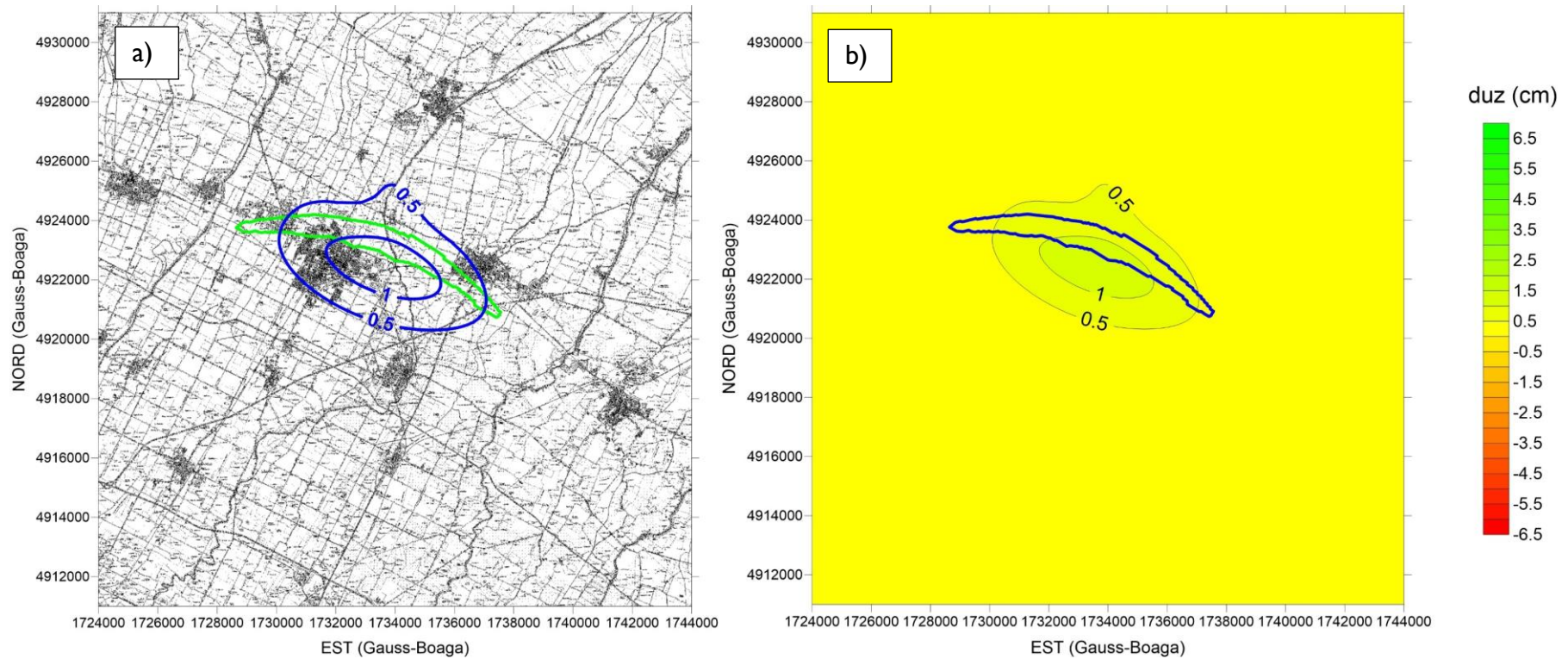


Figura 7: Spostamento verticale (cm) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SGI: a) spostamento verticale sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) spostamento verticale in scala di colori (in blu la traccia del giacimento).

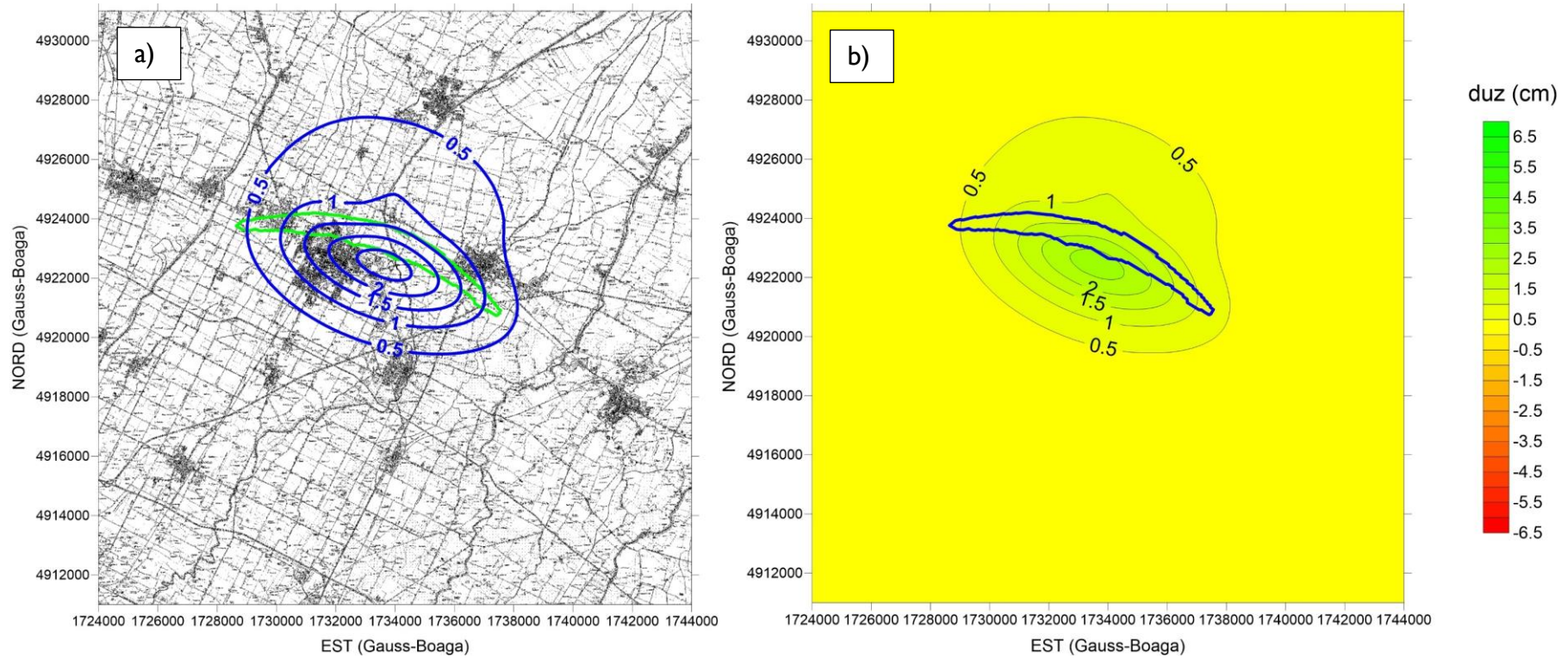


Figura 8: Spostamento verticale (cm) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SG2: a) spostamento verticale sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) spostamento verticale in scala di colori (in blu la traccia del giacimento).

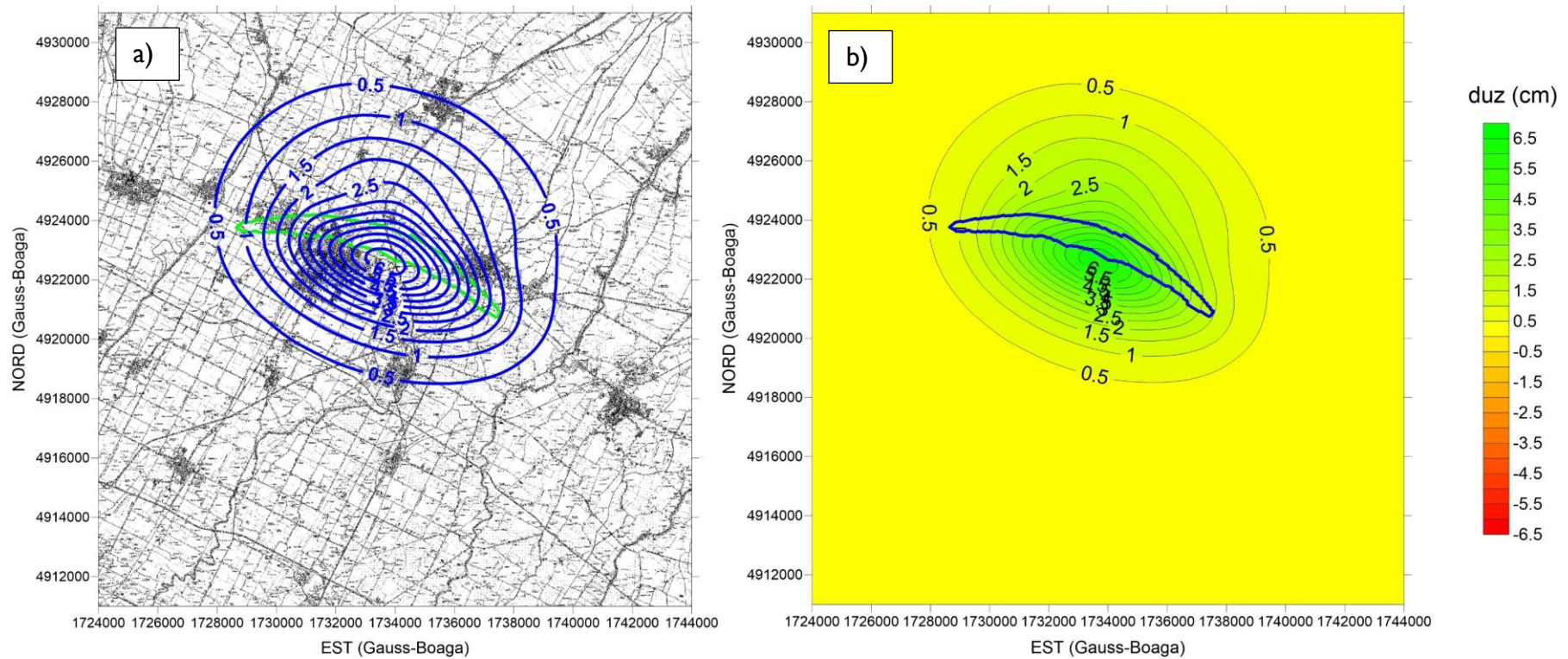


Figura 9: Spostamento verticale (cm) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SG3: a) spostamento verticale sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) spostamento verticale in scala di colori (in blu la traccia del giacimento).

5.2 Gradiente dello spostamento verticale

A partire dal campo di spostamento fornito dal modello, il calcolo degli spostamenti differenziali si esegue con una semplice operazione “gradiente”. In Figura 10, Figura 11 e Figura 12 sono riportati i risultati ottenuti durante il ciclo di stoccaggio per gli stessi scenari riportati in Tabella 4.

Tali gradienti assumono significato qualora vengano confrontati con le distorsioni massime ammissibili per strutture di superficie. Le strutture multipiano in muratura sono le più sensibili agli spostamenti differenziali, con il limite più cautelativo per il gradiente di deformazione verticale fissato in $50e-5$, vale a dire 5 cm su 100 m [Viggiani, 2003]. I limiti ammissibili consigliati per tutti gli altri tipi di struttura sono superiori a quest’ultimo [Simeoni et al., 2017], anche di 100 volte per fabbricati flessibili come quelli realizzati in acciaio. In Tabella 6, per ogni scenario, è riportato il gradiente massimo G_{Max} e il rapporto in termini percentuali tra il gradiente massimo e il gradiente limite G_L per strutture multipiano in muratura: nel caso più gravoso, SG3, il gradiente massimo è inferiore al 6% del valore limite.

| Scenario | G_{Max} | G_{Max}/G_L (%) |
|----------|-----------|-------------------|
| SG1 | 0.7e-5 | 1.3 |
| SG2 | 1.3e-5 | 2.6 |
| SG3 | 2.8e-5 | 5.6 |

Tabella 6: Gradiente massimo G_{Max} e rapporto tra il gradiente massimo e il gradiente limite G_L per strutture multipiano in muratura ($50e-5$) per ogni scenario investigato.

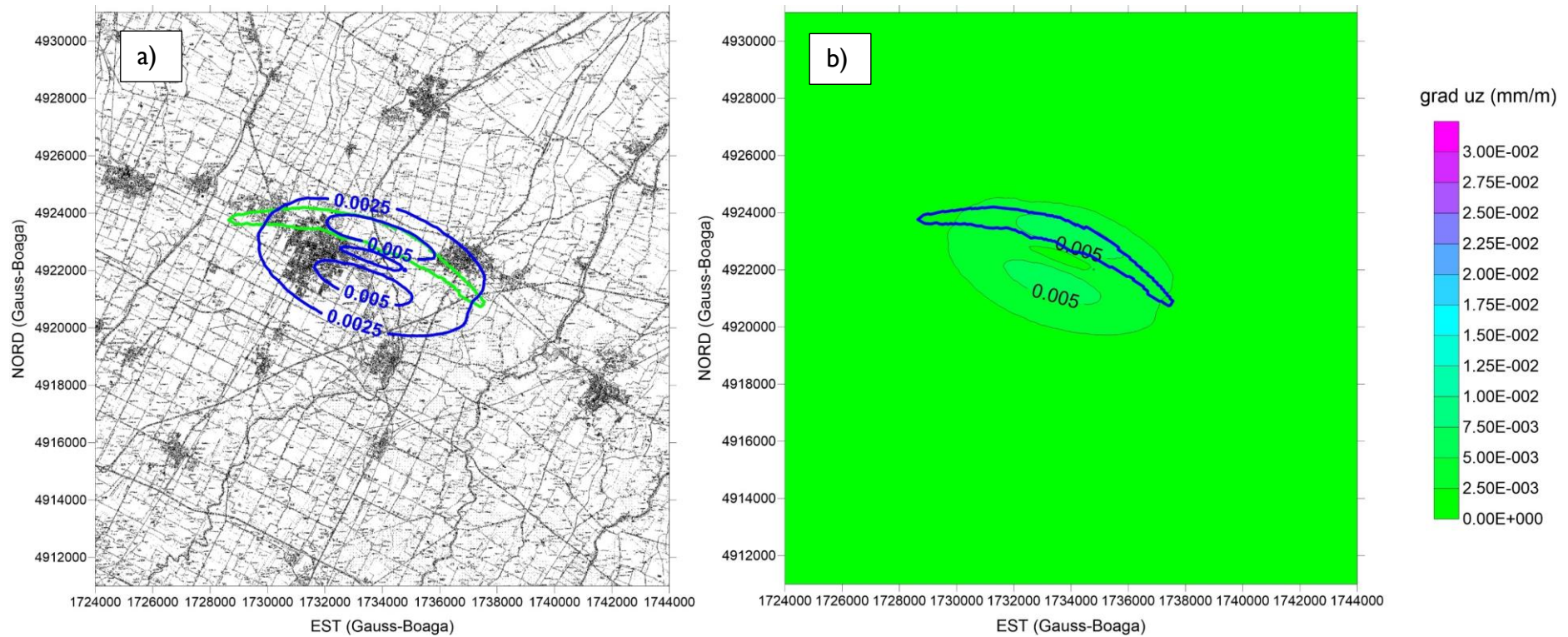


Figura 10: Gradiente dello spostamento verticale (mm/m) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SGI: a) gradiente sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) gradiente in scala di colori (in blu la traccia del giacimento).

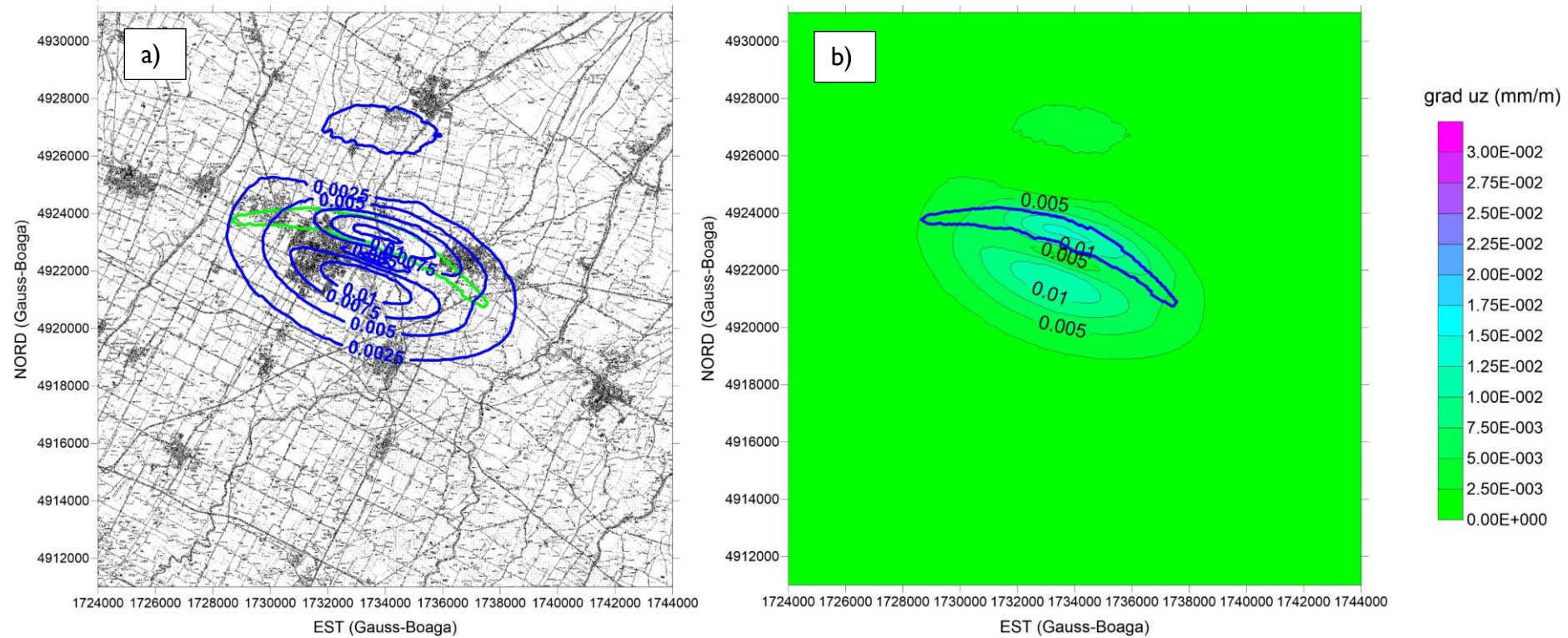


Figura 11: Gradiente dello spostamento verticale (mm/m) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SG2: a) gradiente sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) gradiente in scala di colori (in blu la traccia del giacimento).

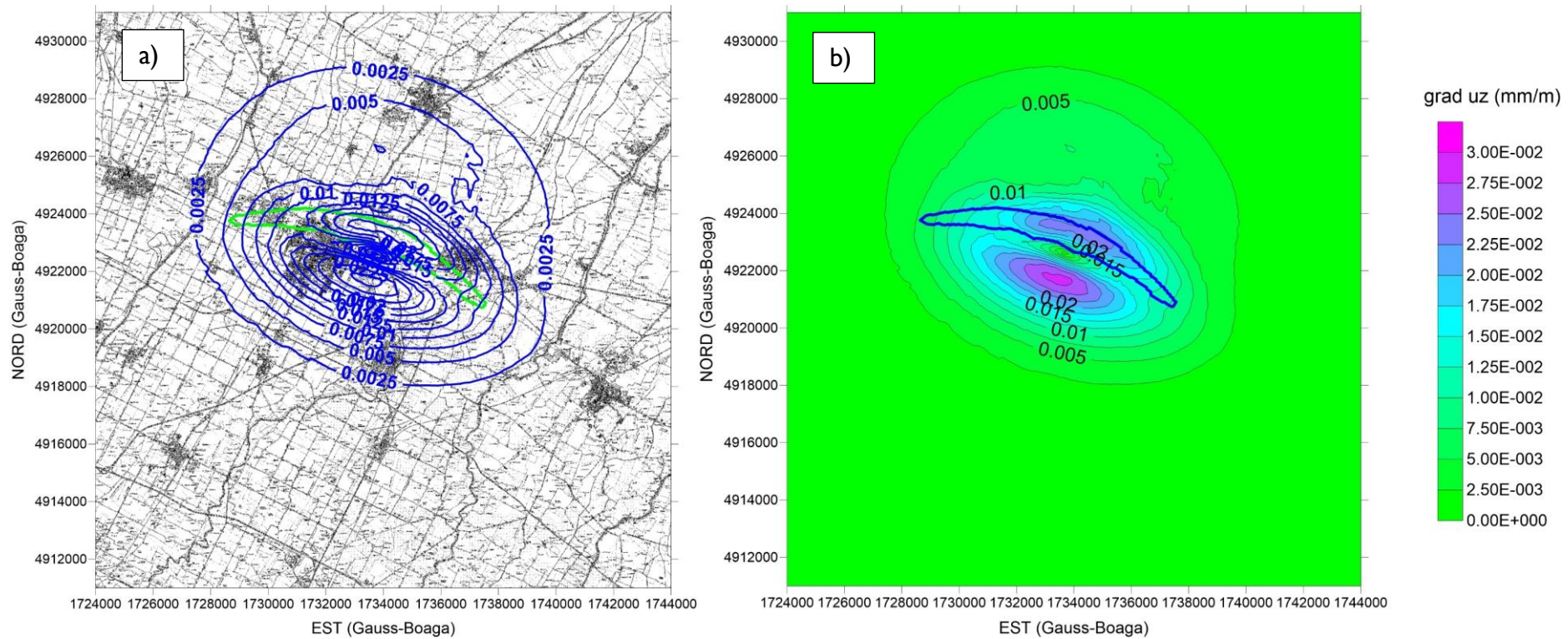


Figura 12: Gradiente dello spostamento verticale (mm/m) simulato durante un ciclo di stoccaggio per lo scenario SG3: a) gradiente sovrapposto alla CTR25000 (in verde la traccia del giacimento); b) gradiente in scala di colori (in blu la traccia del giacimento).

5.3 Integrità meccanica della roccia serbatoio e delle formazioni confinanti

L'attività di stoccaggio/erogazione di gas induce una variazione del regime tensionale naturale in giacimento e, in parte, nelle formazioni confinanti. Risulta quindi importante valutare se tale perturbazione possa compromettere l'integrità meccanica di questi orizzonti geologici, generando fratture che possano potenzialmente causare micro-sismicità o limitare la tenuta idraulica del caprock. I meccanismi di rottura che possono innescarsi sono legati al tipo di sollecitazione esercitata sulle rocce; ciò è usualmente analizzato attraverso la rappresentazione grafica e i criteri limite di rottura tipo quello di Mohr-Coulomb. Uno schema indicativo di come i cerchi di Mohr-Coulomb varino in funzione della pressione neutra è riportato in Figura 13, ove si è utilizzata la convenzione di indicare come verso crescente di σ quello corrispondente ad un aumento della compressione, in coerenza con le notazioni tipicamente utilizzate nella letteratura geomeccanica. Si individuano con σ_1 la tensione principale massima e con σ_3 quella minima.

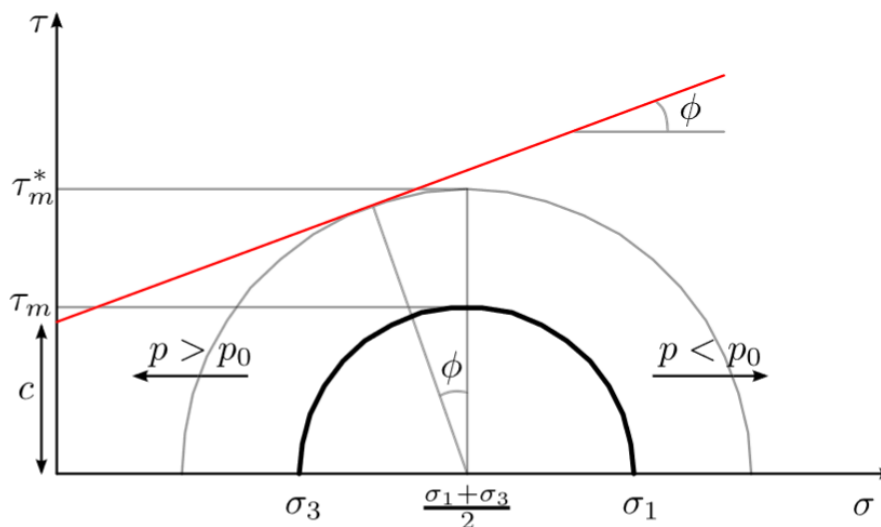


Figura 13. Rappresentazione dello stato tensionale nel piano σ - τ e spostamento dei cerchi di Mohr-Coulomb a seguito dello stoccaggio ($p > p_0$) o erogazione ($p < p_0$) di fluidi dal sottosuolo.

Durante l'erogazione di fluidi la pressione di strato diminuisce con un progressivo trasferimento di stress alla matrice porosa. Lo stato tensionale viene quindi descritto da un cerchio di Mohr che nel piano σ - τ di Figura 13 tende a spostarsi verso destra, cioè tende ad allontanarsi dall'involucro a rottura secondo Mohr-Coulomb.

Per tale motivo, in fase di produzione la roccia non presenta generalmente problemi di rottura per taglio o per trazione se non quando le variazioni di σ_1 e σ_3 siano molto diverse (con $\sigma_1 \gg \sigma_3$) per cui il diametro del cerchio di Mohr aumenta in modo così significativo che toccando la superficie limite può generarsi rottura a taglio. Viceversa, durante l'iniezione di fluidi, la pressione di strato aumenta ed il cerchio di Mohr nel piano σ - τ tende a spostarsi verso sinistra (Figura 13), cioè tende ad avvicinarsi all'involuppo a rottura secondo Mohr-Coulomb ed al limite tensionale ammesso in trazione. Possono pertanto insorgere più facilmente stati tensionali che avvicinano la roccia a condizioni di rottura. Le rocce di copertura del giacimento risultano particolarmente sensibili a questi rischi, in quanto la generazione di punti di debolezza nel materiale potrebbe indurre una diminuzione della capacità di tenuta del serbatoio.

La distanza dello stato tensionale generato nella formazione mineralizzata e nel caprock dalle condizioni limite di rottura per trazione e per taglio viene quantificata utilizzando due appropriati coefficienti [Castelletto et al., 2013; Teatini et al., 2014]. Il coefficiente ψ rispetto alla rottura a trazione viene definito come:

$$\psi = \frac{\sigma_3}{\sigma_{3,0}} \quad (3)$$

dove $\sigma_{3,0}$ rappresenta la tensione di minima compressione in condizioni indisturbate. Tanto più il coefficiente ψ si avvicina a 0, tanto più sono prossime le condizioni di rottura per trazione. Si noti che, poiché la coesione c in bacini sedimentari è generalmente limitata, nell'equazione (3) si assume $c = 0$ a favore di sicurezza. Pertanto il coefficiente ψ non cambia al variare di c .

Il coefficiente χ rispetto alla rottura a taglio viene definito come:

$$\chi = 1 - \frac{\tau_m}{\tau_m^*} \quad (4)$$

dove τ_m è la tensione tangenziale massima che si sviluppa in un determinato regime tensionale e τ_m^* è la tensione tangenziale massima a rottura, cioè la distanza minima del centro del cerchio di Mohr corrente dall'involuppo a rottura. In funzione delle tensioni principali, τ_m e τ_m^* risultano:

$$\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (5)$$

$$\tau_m^* = c \cos \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi \quad (6)$$

dove ϕ è l'angolo d'attrito della formazione. L'interpretazione grafica nel piano σ - τ delle (5) e (6) è fornita in Figura 13.

In Tabella 7 sono riportati i valori dei parametri di resistenza c e ϕ utilizzati nella valutazione dell'integrità meccanica: la configurazione *conservativa* coincide con quella analizzata nella fase precedente dello studio (definita sulla base di informazioni di letteratura e di altri studi pregressi condotti sulla stessa area); i valori della configurazione *realistica* sono in accordo con le misure *in situ* e le prove di laboratorio (Capitolo 3).

Si deve far presente che una valutazione locale della rottura a livello di singolo elemento risulta poco significativa: un modello FEM con elementi tetraedrici permette di ricostruire in modo molto accurato il campo degli spostamenti (che vengono calcolati su ciascun nodo della griglia) mentre il campo delle tensioni (che è calcolato a livello di ciascun elemento) può presentare delle oscillazioni locali in presenza di elementi molto distorti dal punto di vista geometrico, come quelli in prossimità della chiusura a pinch-out dei livelli mineralizzati sull'alto strutturale di Cotignola (Figura 4). Pertanto, risulta più significativo adottare una valutazione globale in due step: (1) calcolo dei valori ψ e χ locali per ogni elemento del modello FEM al termine della fase di stoccaggio; (2) calcolo del volume di roccia che giunge a rottura (cioè nella quale si realizzano le condizioni $\psi = 0$ e/o $\chi = 0$) V_F in termini percentuali rispetto al volume complessivo del serbatoio V_R , cioè il volume di roccia che subisce una variazione di pressione maggiore di una certa soglia durante un ciclo di stoccaggio (Figura 2 e Figura 14). Fissata tale soglia in 60 bar, risulta $V_R = 89 \text{ Mm}^3$. Per eliminare gli effetti locali di concentrazione delle tensioni, si è assunto che l'integrità meccanica risulti globalmente soddisfatta se $V_F/V_R < 0.1 \%$. In Tabella 8 sono riassunti i parametri di configurazione degli scenari investigati, da notare che lo scenario TCI corrisponde allo scenario "base" già investigato nello studio precedente.

| Valutazione | c (bar) | ϕ (°) |
|---------------------|-----------|------------|
| <i>Conservativa</i> | 0.0 | 30 |
| <i>Realistica</i> | 0.2 | 34 |

Tabella 7: Parametri di resistenza utilizzati nella valutazione dell'integrità meccanica della roccia serbatoio e delle formazioni confinanti.

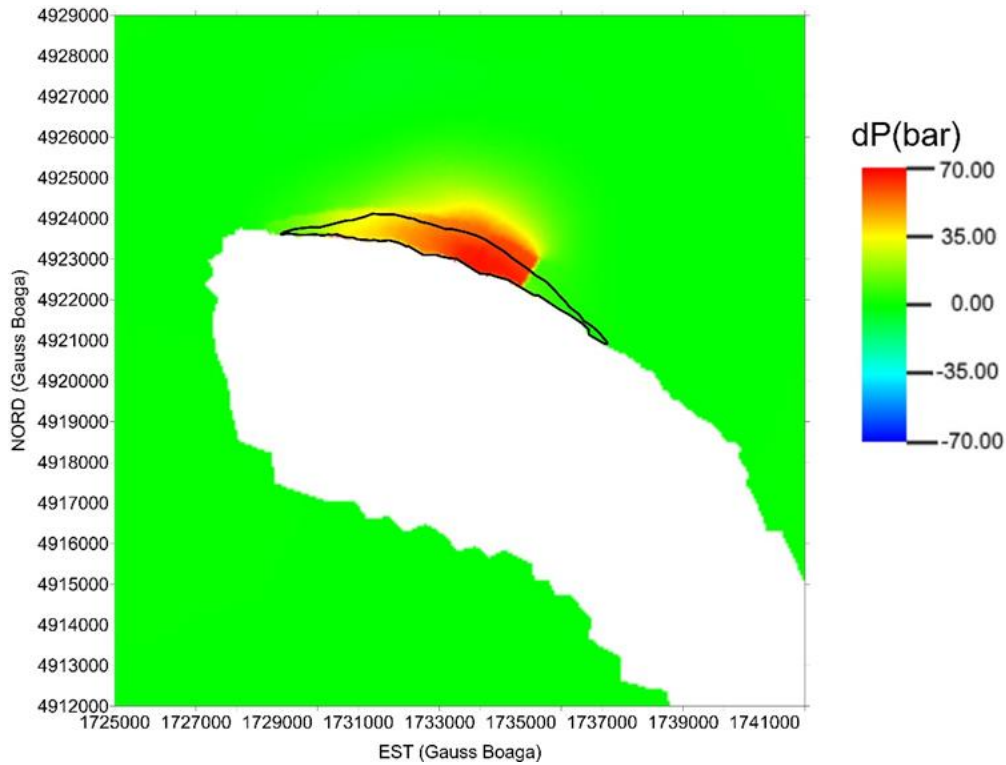


Figura 14: Variazione di pressione (bar) durante un ciclo di stoccaggio. In rosso/arancione è evidenziato il volume di roccia V_R in cui la variazione di pressione è superiore ai 60 bar.

| Scenario | C_M | P_{MAX} |
|----------|-------------|-------------------|
| TC1 | C_M media | 240 bar = 1.20 Pi |
| TC2 | $C_M +95\%$ | 240 bar = 1.20 Pi |
| TC3 | C_M media | 244 bar = 1.22 Pi |
| TC4 | C_M media | 248 bar = 1.24 Pi |
| TC5 | C_M media | 260 bar = 1.30 Pi |
| TC6 | C_M media | 264 bar = 1.32 Pi |
| TC7 | C_M media | 268 bar = 1.34 Pi |

Tabella 8: Parametri di configurazione degli scenari investigati in relazione alla valutazione dell'integrità meccanica della roccia serbatoio e delle formazioni confinanti.

I risultati della valutazione dell'integrità meccanica della roccia al termine della fase di stoccaggio (ovvero nella situazione di maggiore criticità) sono riassunti in Tabella 9. Utilizzando parametri di resistenza conservativi, negli scenari TC1 – TC4 l'integrità meccanica risulta globalmente soddisfatta (il volume che giunge a rottura è inferiore allo 0.5% del volume del reservoir): la variazione di pressione prevista durante i cicli di stoccaggio/erogazione (Figura 2) può essere amplificata fino a 248 bar, cioè $P_{MAX} = 1.24 P_i$, senza indurre problemi meccanici significativi nelle formazioni coinvolte. Con parametri di resistenza realistici, l'integrità meccanica non risulta globalmente soddisfatta solamente nello scenario TC7: la variazione di pressione prevista durante i cicli di stoccaggio/erogazione (Figura 2) può essere amplificata fino a 264 bar, cioè $P_{MAX} = 1.32 P_i$, senza indurre alcun problema meccanico di rottura nelle formazioni coinvolte.

| Scenario | Valutazione <i>conservativa</i> | | Valutazione <i>realistica</i> | |
|----------|---------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| | n° elementi giunti a rottura | V_F/V_R (%) | n° elementi giunti a rottura | V_F/V_R (%) |
| TC1 | 3 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| TC2 | 3 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| TC3 | 10 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| TC4 | 306 | 0.4 | 0 | 0.0 |
| TC5 | 14,537 | 21.2 | 2 | 0.0 |
| TC6 | 24,848 | 36.1 | 239 | 0.3 |
| TC7 | 45,289 | 64.9 | 2460 | 3.0 |

Tabella 9: Risultati della valutazione globale dell'integrità meccanica della roccia serbatoio e delle formazioni confinanti.

5.4 Analisi tensionale sulle faglie prossime al giacimento

Come anticipato al Paragrafo 3.3, lo stato tensionale naturale considerato nel modello geomeccanico è di tipo normale: le tensioni principali orizzontali sono pari alla tensione verticale moltiplicata per il coefficiente di confinamento M pari a 0.43.

La fase precedente dello studio ha evidenziato come le faglie in prossimità del campo (Figura 4) siano interessate da una variazione tensionale dovuta alle operazioni di stoccaggio/erogazione previste con $P = 240$ bar ($P = 1.2 P_i$) assai limitata: nelle zone più sollecitate, la variazione di tensione è pari allo

0.29% e 0.44% delle tensioni iniziali, rispettivamente per la tensione normale $\Delta\sigma_N$ (Figura 15) e la tensione tangenziale $\Delta\tau$ (Figura 16) al piano di faglia.

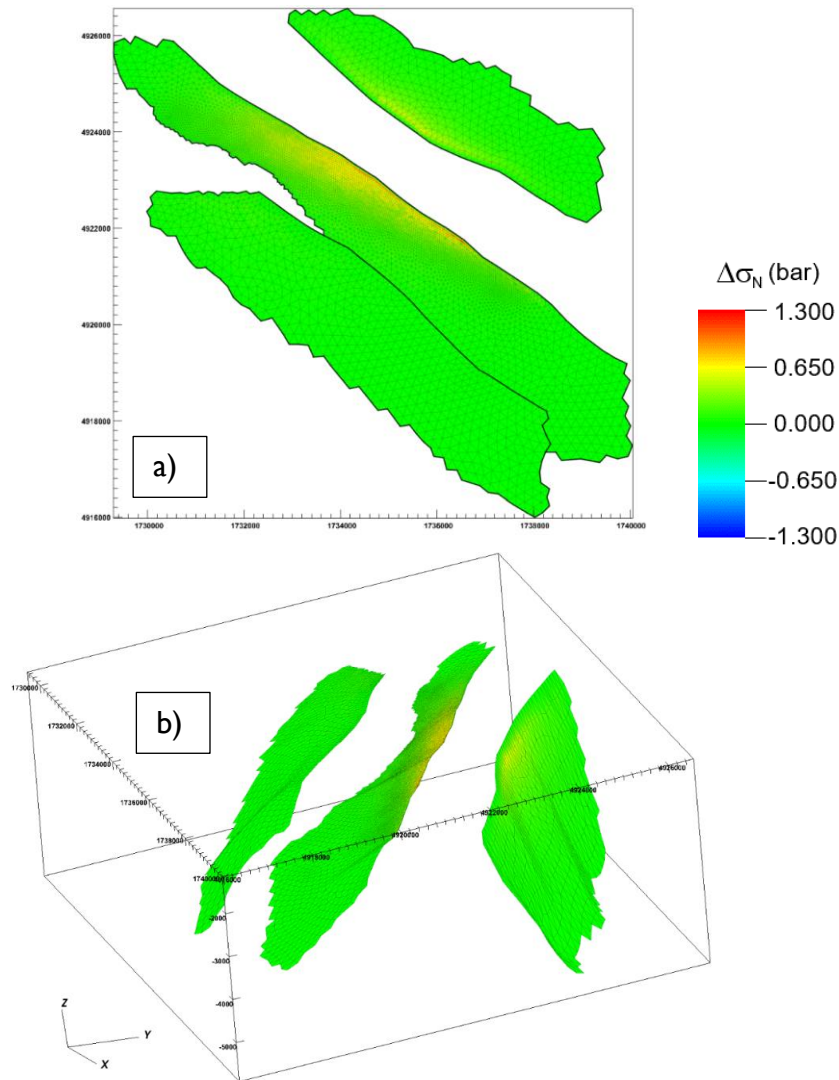


Figura 15: Variazione della tensione normale al piano di faglia $\Delta\sigma_N$ (bar) in un ciclo di stoccaggio nello scenario “base” TFI: a) vista in pianta; b) vista assometrica.

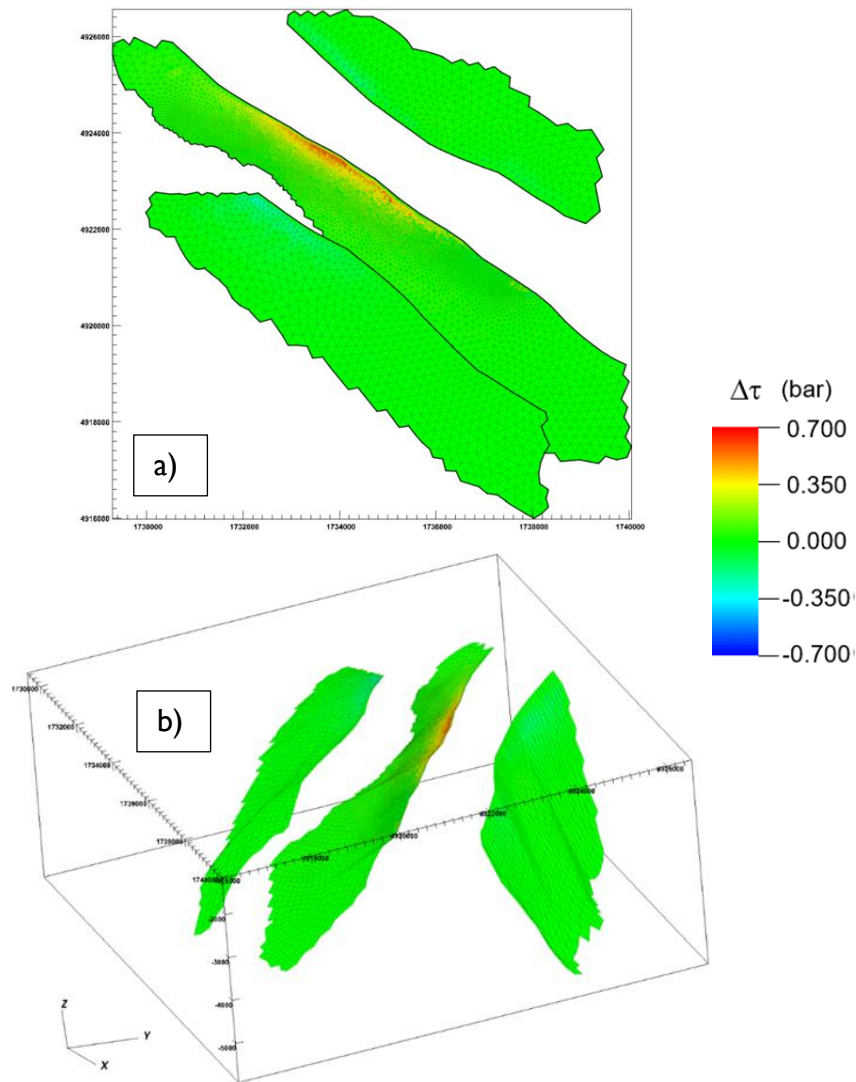


Figura 16: Variazione della tensione normale al piano di faglia $\Delta\tau$ (bar) in un ciclo di stoccaggio nello scenario “base” TFI: a) vista in pianta; b) vista assonometrica.

Di seguito sono stati analizzati ulteriori scenari, amplificando la compressibilità del mezzo poroso e la variazione di pressione prevista in esercizio. In Tabella 10 sono riassunti i parametri di configurazione degli scenari analizzati; da notare che lo scenario TFI corrisponde allo scenario “base” già esaminato nello studio precedente. Per ognuna delle faglie considerate nel modello geomeccanico è stato analizzato lo stato tensionale (σ_N , τ) nelle zone più sollecitate in alcuni istanti significativi: T0) stato iniziale indisturbato (2013); T1) termine della fase di stoccaggio; T2) termine della fase di erogazione. In Figura 17, Figura 18 e Figura 19 sono evidenziati i risultati rispettivamente per gli scenari TFI, TF2 e TF3. I parametri di resistenza adottati per tracciare l’involuppo di rottura

di Mohr-Coulomb sono quelli *conservativi* definiti in precedenza in Tabella 7. Anche nello scenario più gravoso TF3, amplificando la variazione di pressione fornita da Eclipse fino a $P_{MAX} = 360$ bar, cioè $P_{MAX} = 1.8 P_i$, le variazioni di tensione sono trascurabili. Inoltre, le stesse figure evidenziano come il regime tensionale sia in condizioni di sicurezza rispetto all'involuppo a rottura di Mohr-Coulomb.

| Scenario | C_M | $f_{\Delta P}$ | P_{MAX} |
|----------|-------------|----------------|---------------------|
| TF1 | C_M media | 1.0 | 240 bar = 1.2 P_i |
| TF2 | $C_M +95\%$ | 1.0 | 240 bar = 1.2 P_i |
| TF3 | C_M media | 4.0 | 360 bar = 1.8 P_i |

Tabella 10: Parametri di configurazione degli scenari investigati in relazione all'analisi tensionale sulle faglie in prossimità del campo.

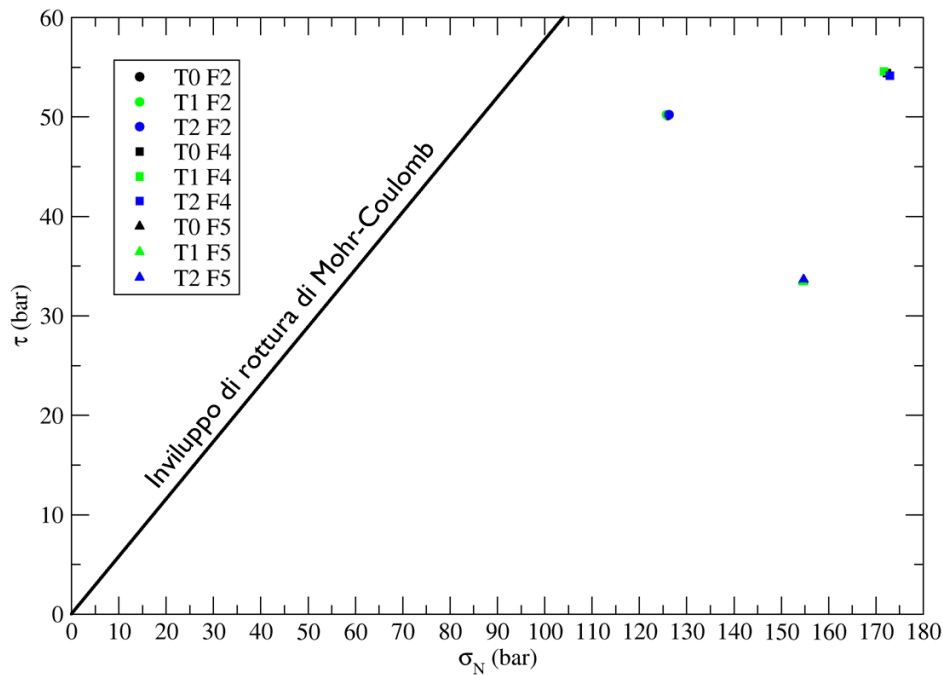


Figura 17: Stato tensionale (σ_N , τ) nella zona più sollecitata di ogni faglia (F2, F4 e F5) in alcuni istanti significativi per lo scenario TF1: T0) stato iniziale indisturbato (2013); T1) termine della fase di stoccaggio; T2) termine della fase di erogazione

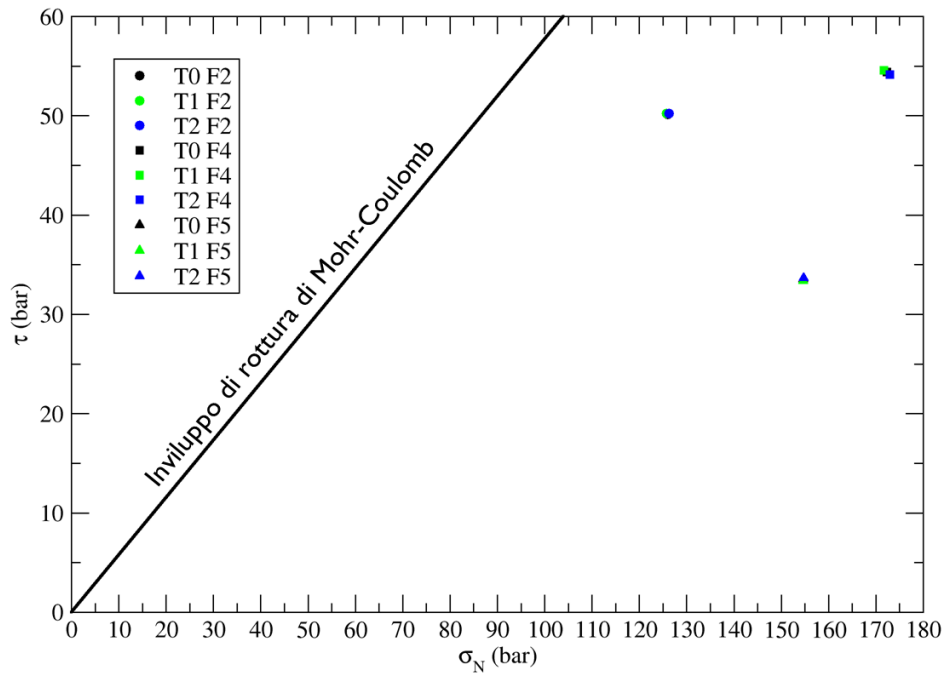


Figura 18: Stato tensionale (σ_N , τ) nella zona più sollecitata di ogni faglia (F2, F4 e F5) in alcuni istanti significativi per lo scenario TF2: T0) stato iniziale indisturbato (2013); T1) termine della fase di stoccaggio; T2) termine della fase di erogazione.

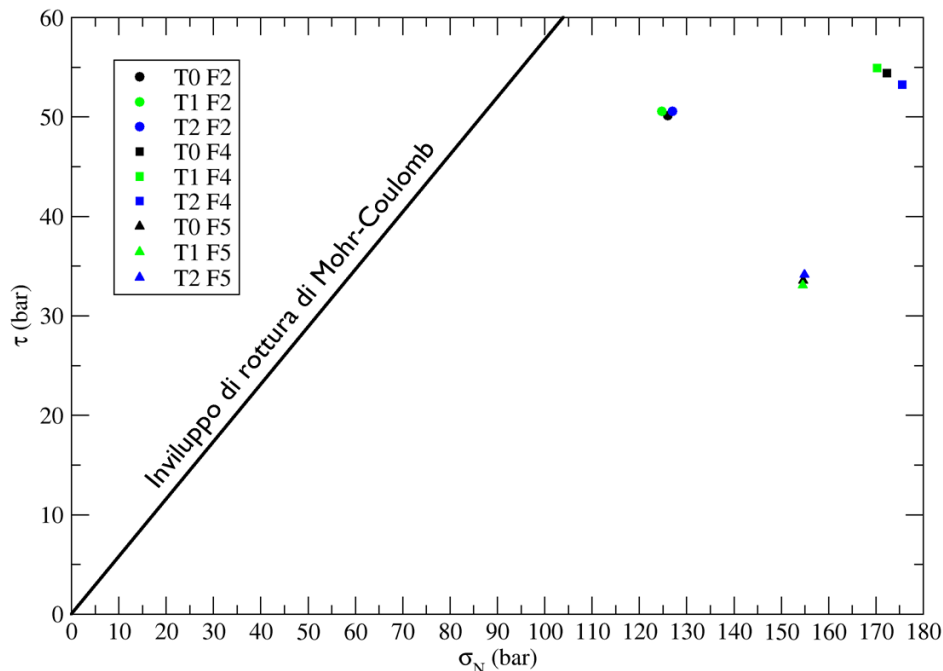


Figura 19: Stato tensionale (σ_N , τ) nella zona più sollecitata di ogni faglia (F2, F4 e F5) in alcuni istanti significativi per lo scenario TF3: T0) stato iniziale indisturbato (2013); T1) termine della fase di stoccaggio; T2) termine della fase di erogazione.

Come ulteriore analisi, in Figura 20 si riporta per lo scenario estremo TF3 il valore minimo che deve assumere il coefficiente di attrito ϕ perché gli elementi di ciascuna faglia più sollecitati arrivino a rottura. I valori ottenuti sono compresi tra 13° e 24° , ovvero significativamente minori del valore pari a 30° utilizzato nello scenario conservativo. Si tenga inoltre presente che valori così bassi sono poco realistici in quanto, data la giacitura delle discontinuità, lo stesso regime tensionale naturale supererebbe il limite a rottura.

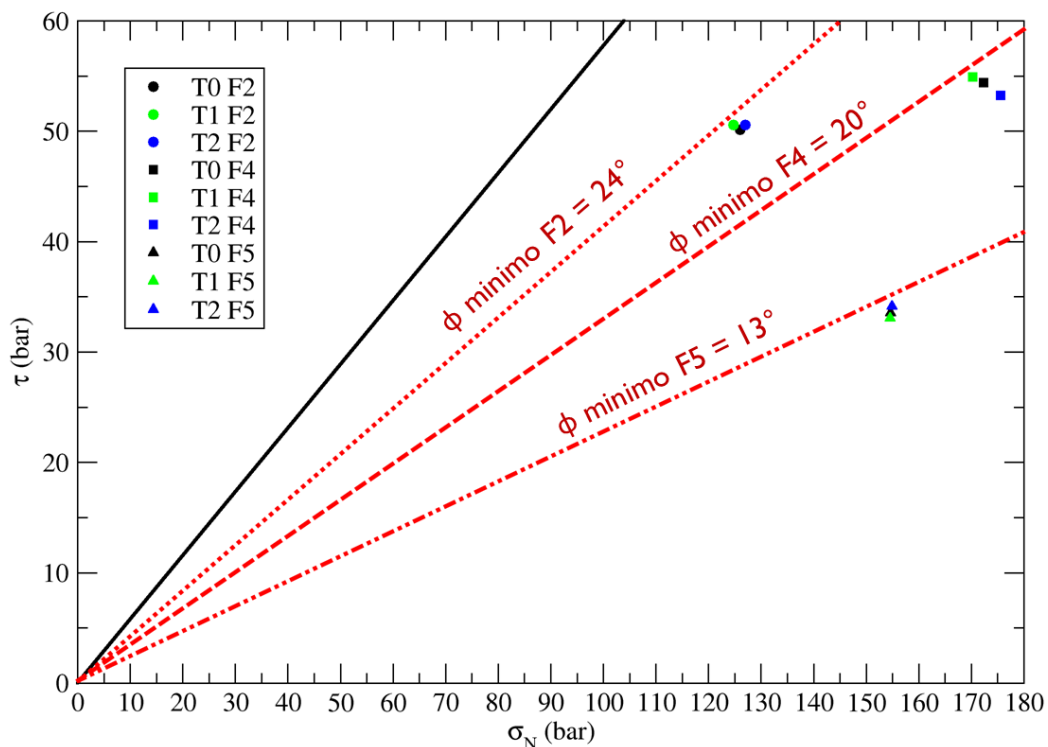


Figura 20: Stato tensionale (σ_N , τ) nella zona più sollecitata di ogni faglia (F2, F4 e F5) in alcuni istanti significativi per lo scenario TF3: T0) stato iniziale indisturbato (2013); T1) termine della fase di stoccaggio; T2) termine della fase di erogazione. L'involuppo a rottura di Mohr-Coulomb con coesione nulla e $\phi = 30^\circ$ è evidenziato in nero. Per ogni faglia, il coefficiente di attrito minimo necessario per non oltrepassare l'involuppo di rottura è evidenziato in rosso.

5.5 Valutazione dell'insieme degli scenari analizzati

L'insieme degli scenari analizzati risulta particolarmente conservativo in relazione all'intervallo di variabilità della compressibilità edometrica verticale e alla pressione massima prevista durante i cicli di stoccaggio/erogazione.

Quanto la compressibilità $c_{M+95\%}$ sia conservativa (ovvero sovrastimi un valore realistico) può essere evidenziato confrontando i risultati del modello con le misurazioni SAR a disposizione. In Figura 21 è mostrato il confronto tra le misure SAR fornite da EDISON STOCCAGGIO in termini di velocità verticale tra il 2013 e il 2017 e i risultati del modello geomeccanico con compressibilità verticale rispettivamente $c_{M\ media}$ e $c_{M+95\%}$. I valori misurati della velocità media verticale misurate per i diversi PS sono contenuti entro +/- 1 mm/anno coerentemente con lo scenario con $c_{M\ media}$; mentre le velocità calcolate nello scenario con $c_{M+95\%}$ raggiungono i -4 mm/anno, un valore molto superiore rispetto a quello fornito dalle misure.

La variazione di pressione prevista con $P = 240$ bar ($P = 1.2 P_i$) è stata amplificata fino a $P_{MAX} = 360$ bar, cioè è stato valutato il caso con $P_{MAX} = 1.8 P_i$: una amplificazione maggiore avrebbe comportato la situazione non fisica in cui la roccia di giacimento è soggetta a uno sforzo di trazione. In Tabella 11 e Tabella 12 sono riportate le variazioni di tensione verticale $\Delta\sigma_z$ durante la fase di stoccaggio con $P_{MAX} = 1.8 P_i$, in alcuni punti significativi del giacimento e delle formazioni confinanti evidenziati rispettivamente in Figura 24 e Figura 25. Anche nello scenario più gravoso, la variazione di tensione durante i cicli di stoccaggio/erogazione rimane confinata negli strati interessati dallo stoccaggio e si smorza in poche decine di metri.

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|------------------------|------|-----|-------|------|-----|-------|-------|------|
| $\Delta\sigma_z$ (bar) | -0.4 | 7.0 | 225.0 | -0.1 | 6.0 | 242.0 | 237.0 | -5.0 |

Tabella 11: Variazione di tensione verticale $\Delta\sigma_z$ (bar) in un ciclo di stoccaggio con $P_{MAX} = 360$ bar ($P_{MAX}=1.8P_i$), in corrispondenza dei punti riportati in Figura 24.

| | I | L | M | N | O | P | Q | R |
|------------------------|-----|------|------|-----|-----|------|------|-----|
| $\Delta\sigma_z$ (bar) | 0.2 | 84.0 | 50.0 | 0.6 | 0.6 | 33.0 | 67.0 | 0.1 |

Tabella 12: Variazione di tensione verticale $\Delta\sigma_z$ (bar) in un ciclo di stoccaggio con $P_{MAX} = 360$ bar ($P_{MAX}=1.8P_i$), in corrispondenza dei punti riportati in Figura 25.

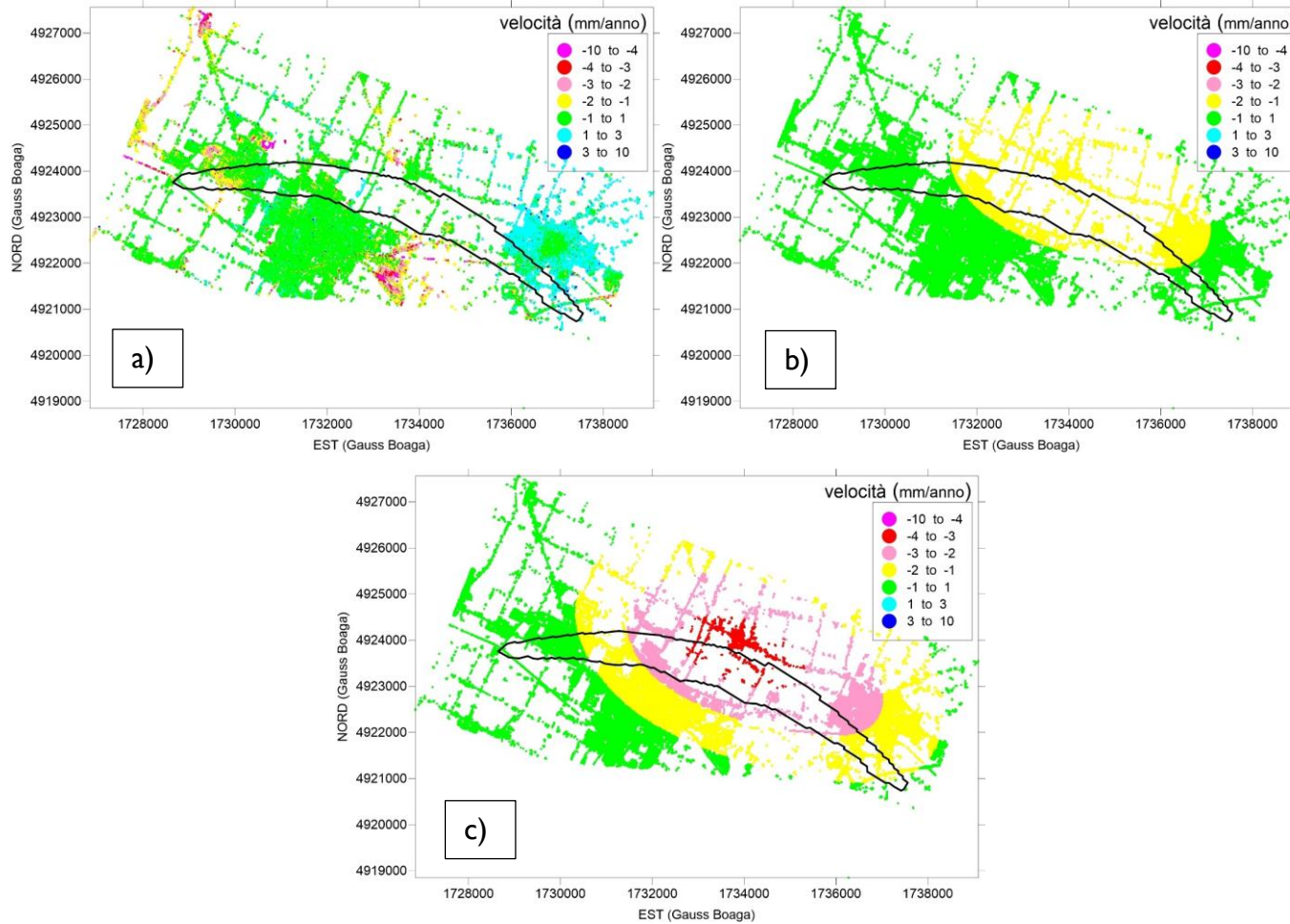


Figura 21: Velocità verticale media (mm/anno) nei PS nel periodo 2013 – 2017: a) misurata dal SAR, b) calcolata con CM_{media} ; c) calcolata con $CM_{+95\%}$.

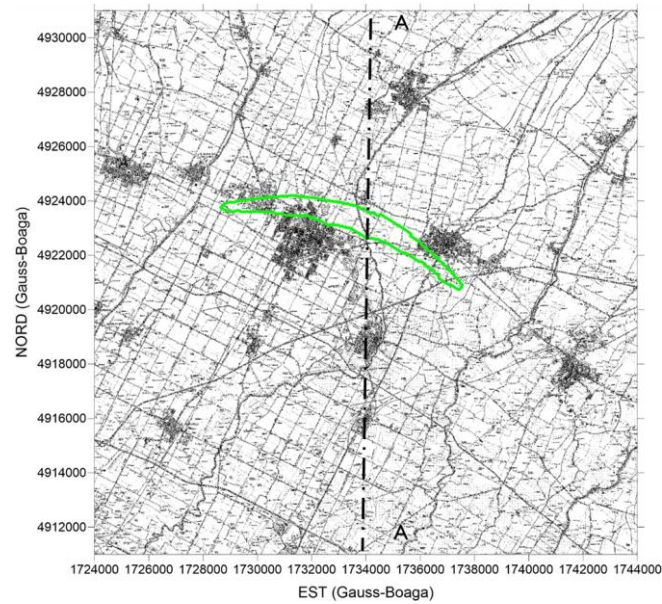


Figura 22: Traccia del giacimento e sezione A-A evidenziate in verde e nero, rispettivamente.

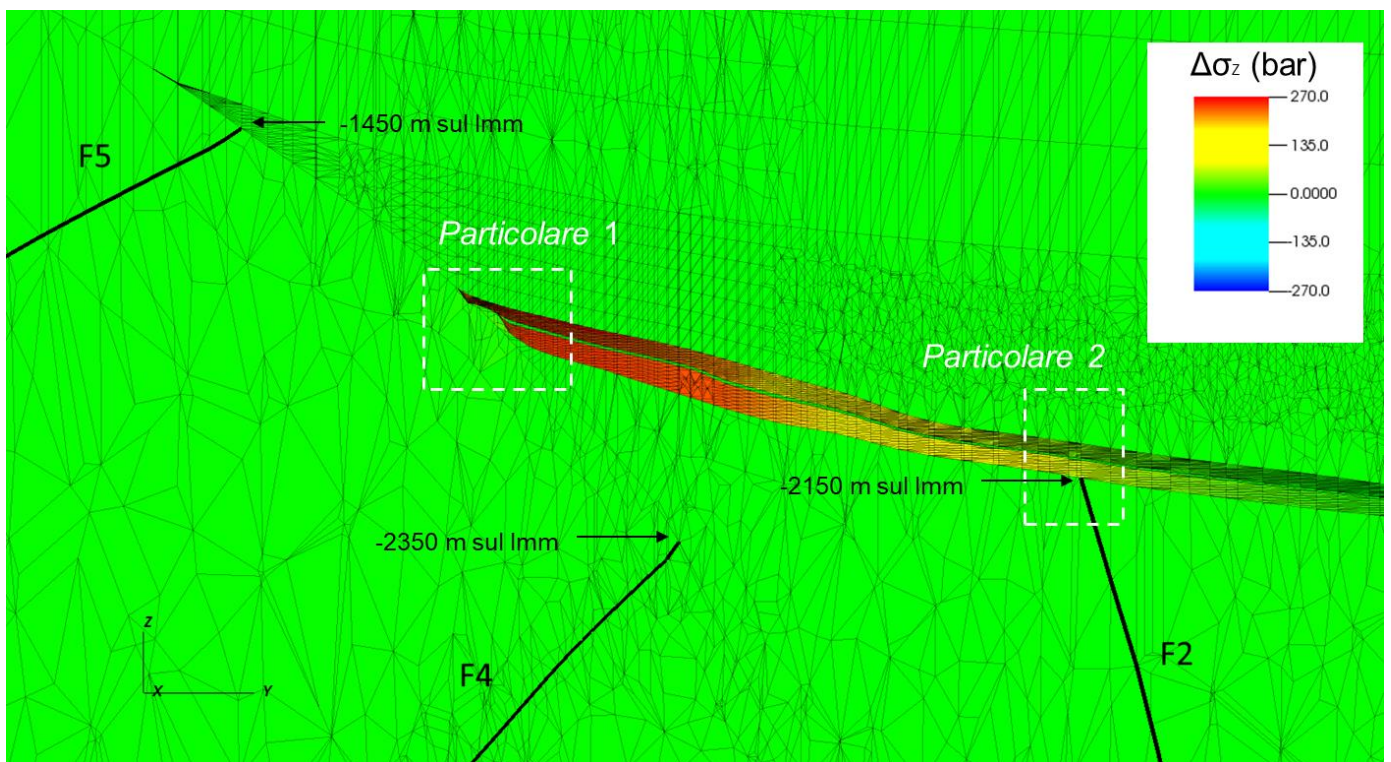


Figura 23: Variazione di tensione verticale $\Delta\sigma_z$ (bar) in un ciclo di stoccaggio con $P_{MAX} = 360$ bar ($P_{MAX} = 1.8P_i$), nella sezione verticale A-A di Figura 22. La scala verticale è amplificata due volte rispetto a quella orizzontale.

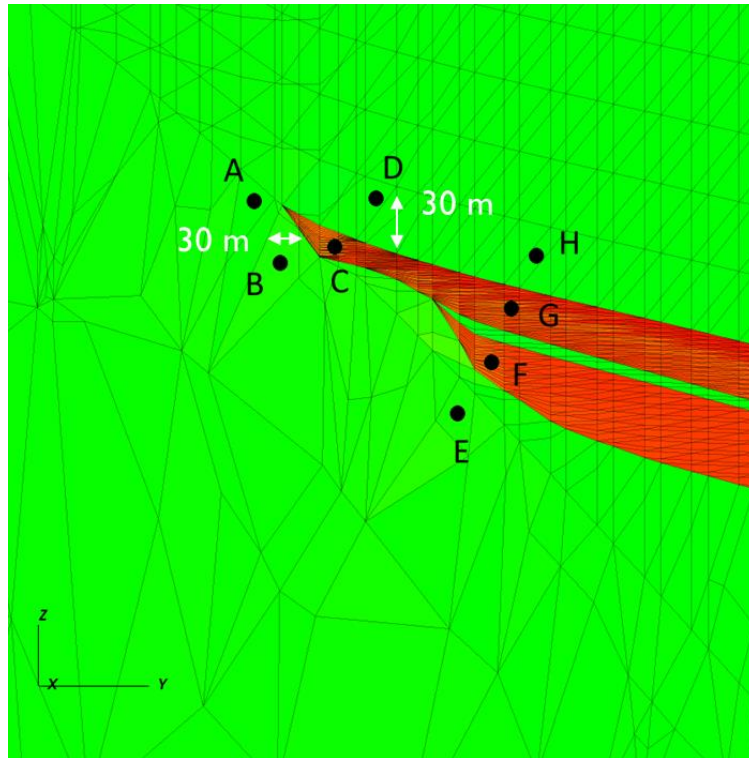


Figura 24: Particolare 1 di Figura 23. La scala verticale è amplificata due volte rispetto a quella orizzontale.

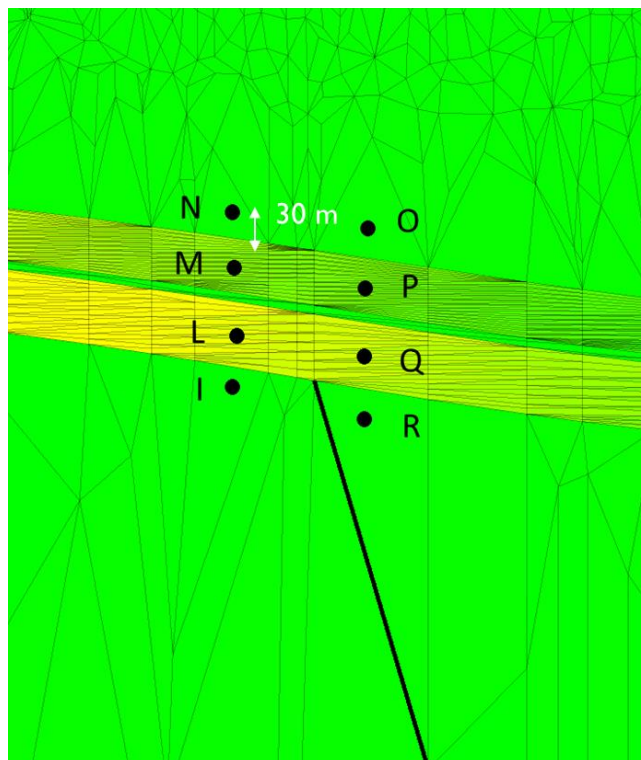


Figura 25: Particolare 2 di Figura 23. La scala verticale è amplificata due volte rispetto a quella orizzontale.

6 QUANTIFICAZIONE DELLE CRITICITÀ: ANALISI CON MODELLO IDRAULICO DELLA RETE SCOLANTE

Il modello idrologico-idraulico della rete di deflusso superficiale interessata dagli spostamenti indotti dalle attività UGS è stato realizzato con il codici HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) [USACE-HEC, 2010] e HEC-RAS (River Analysis System) [USACE-HEC, 2016] sviluppati dall'U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

La descrizione della topografia del corso d'acqua è fatta attraverso la definizione delle sue sezioni trasversali. I dati di base per lo studio sono stati i rilievi topografici d'alveo messi a disposizione dal Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale (planimetrie, profili e sezioni dei canali, schede impianti idrovori). Le sezioni di rilievo coprono la maggior parte dei tratti da modellare; tuttavia alcuni tratti sono mancanti, altri non completamente sviluppati, per cui si è reso necessario un lavoro di interpolazione e di ricostruzione delle sezioni sulla scorta dei dati cartografici e di fotointerpretazione di immagini satellitari. In Figura 26 è riportato un inquadramento territoriale dell'area oggetto di indagine con gli assi dei canali esaminati mediante modello idrologico-idraulico, e indicati i nomi dei canali principali del sistema investigato. Sono rappresentate anche le tracce dei giacimenti San Potito, Longanesi e Alfonsine presenti nell'area.

Per i tratti per i quali i rilievi topografici sono disponibili, si deve evidenziare che questi sono stati eseguiti in un intervallo temporale che va dagli anni 1970 agli anni scorsi; pertanto molte informazioni sono quantomeno datate e, con ogni probabilità, non rappresentative della situazione attuale reale. Tuttavia, poiché lo scopo di questa analisi è quello di mettere a confronto il sistema nelle configurazioni pre/post-avvio delle attività di stoccaggio/erogazione, la non-contemporaneità dei rilievi a disposizione ha un effetto marginale.

I risultati della presente analisi devono dunque essere interpretati non tanto come verifica idraulica del sistema di drenaggio dal punto di vista dell'officiosità idraulica o meno, ma piuttosto una ordinaria messa a confronto dei profili idrici nei diversi scenari.

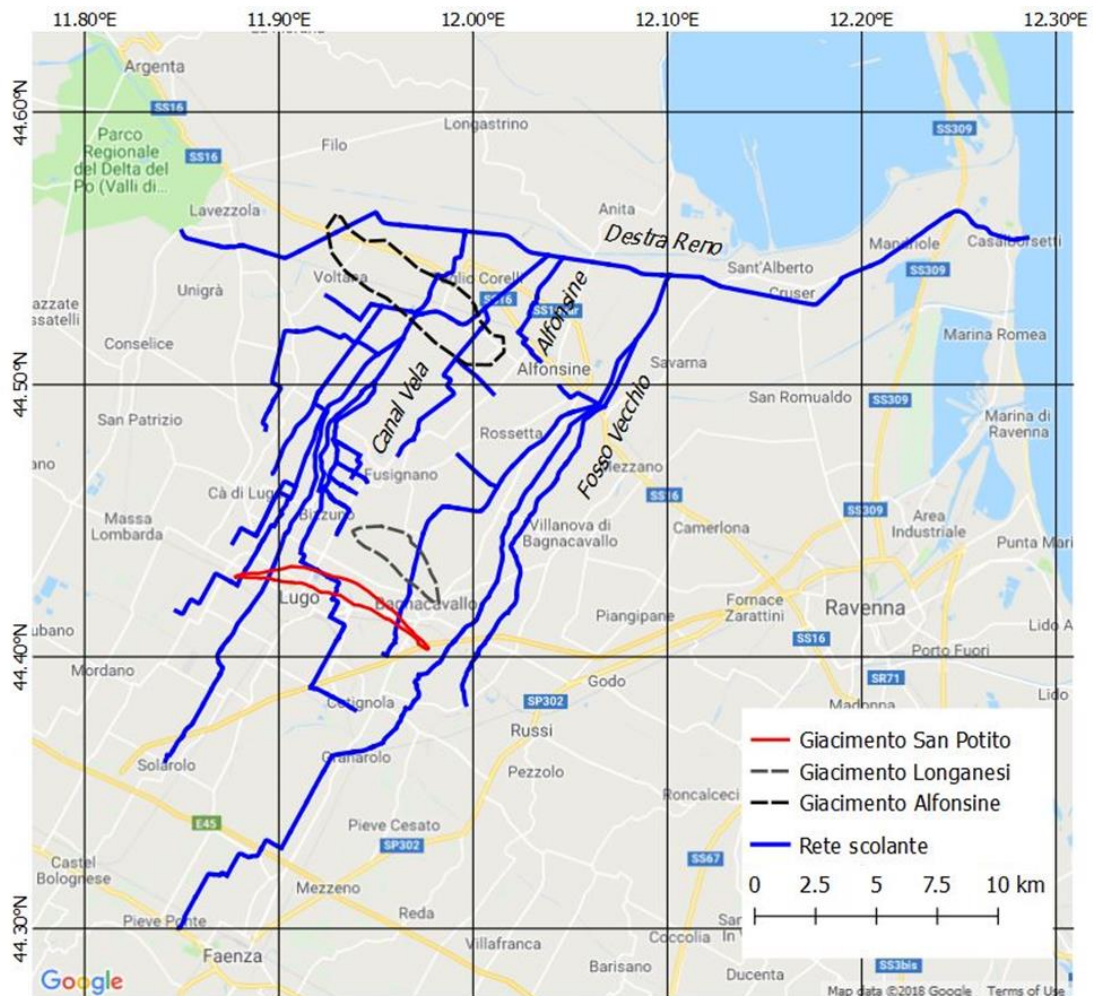


Figura 26: Inquadramento territoriale con indicazione planimetrica della rete scolante e la traccia dei giacimenti di produzione primaria e UGS

Nel modello sono stati schematizzati i seguenti canali:

- Canale Destra Reno,
- Scolo Nuovo Tratturo,
- Scolo Traversagno,
- Canal Vela,
- Tratturo,
- Casale,
- Fossatone di San Bernardino,
- Via Lunga a Ponente,
- Via Nuova nel Casale,

- Ascensione,
- Arginello,
- Menata di Runzi,
- Santa Lucia,
- Frassona Maggiore,
- Cocorre,
- Sant'Antonio,
- Menata di Fusignano,
- Via Nuova,
- Scolo Alfonsine,
- Fosso Vecchio,
- Fosso Vetro,
- Fosso Munio.

6.1 Modello idrologico

6.1.1 Definizione della geometria del sistema

La suddivisione in sottobacini è stata fatta sulla base della rete di bonifica, considerando i quattro principali scoli affluenti al canale collettore Destra Reno, asse portante del sistema di drenaggio della Bonifica. Secondo i dati forniti dal Consorzio, la Figura 27 riportata la suddivisione in sottobacini, per gli scoli Nuovo Tratturo, Canal Vela, Alfonsine, e Fosso Vecchio.

Ognuno dei quattro bacini è stato schematizzato in HMS, ottenendo quattro modelli indipendenti, in grado di fornire le condizioni al contorno per il successivo modello idraulico. Le immagini che seguono (Figura 28 - Figura 31) mostrano la schematizzazione dei quattro bacini, evidenziando l'ulteriore suddivisione in sottobacini principali, canali e sezioni di chiusura, confrontata con l'immagine satellitare dell'area corrispondente; le tabelle (Tabella 13 - Tabella 16) riportano la suddivisione in sottobacini, secondo la nomenclatura del consorzio, e le rispettive estensioni.

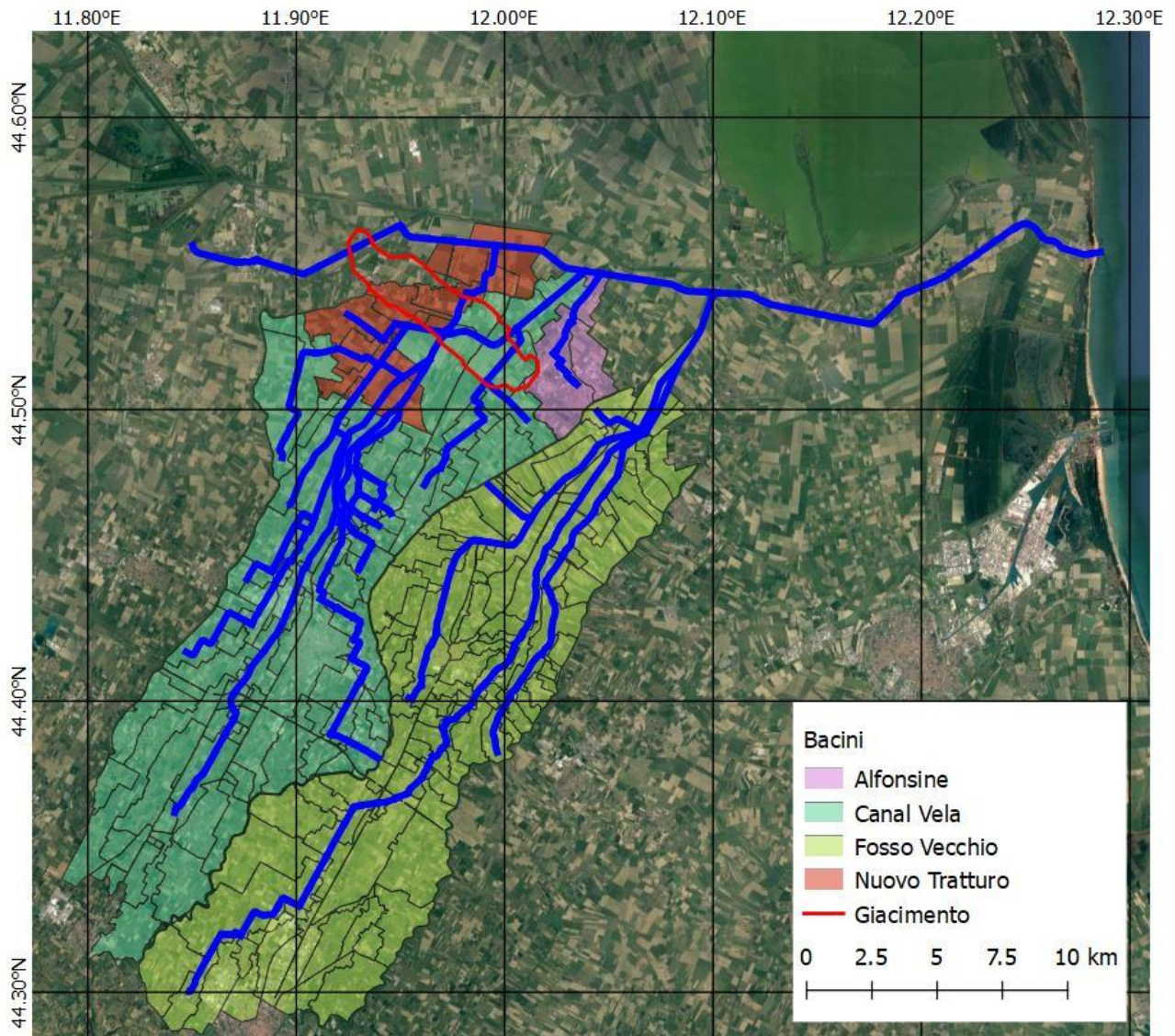


Figura 27: Bacini idrografici principali del comprensorio di bonifica analizzato con HEC-HMS.

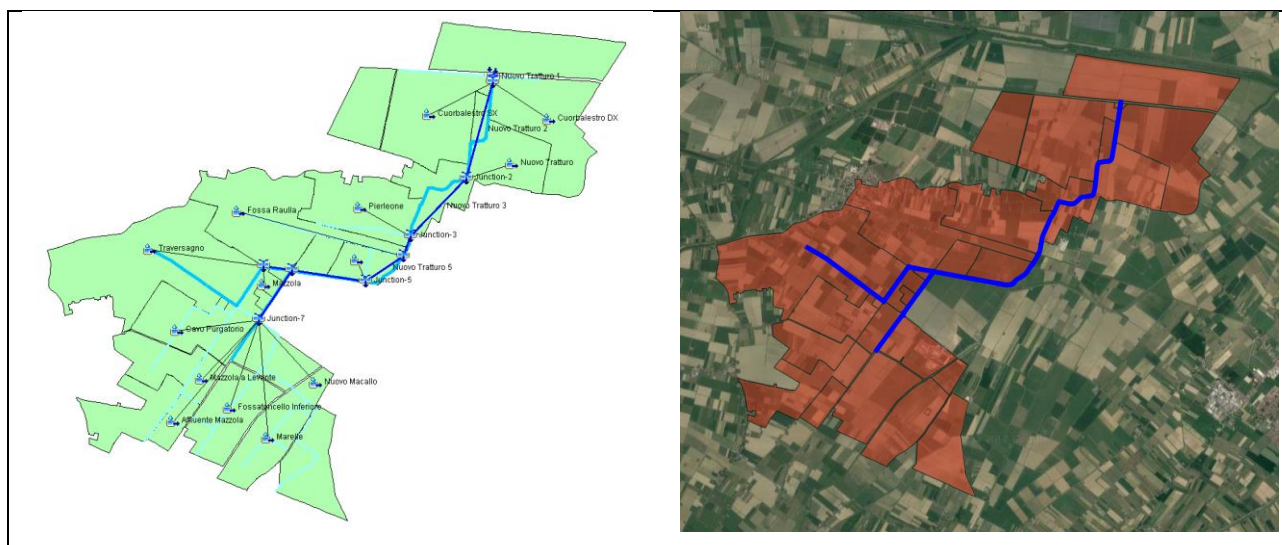


Figura 28: Schematizzazione del Nuovo Tratturo nel modello HEC-HMS.

| NOME SOTTOBACINO | Area [km²] | NOME SOTTOBACINO | Area [km²] |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| AFFLUENTE MAZZOLA | 0.34 | MAZZOLA | 0.24 |
| CAVO PURGATORIO | 1.84 | MAZZOLA A LEVANTE | 1.64 |
| CUORBALESTRO DESTRA | 1.99 | NUOVO MACALLO | 2.10 |
| DIVERSIVO RAULLA | 0.50 | NUOVO TRATTURO | 2.65 |
| FOSSA RAULLA | 2.53 | PIERLEONE | 1.55 |
| FOSSATONCELLO INFERIORE | 1.34 | TRAVERSAGNO | 3.97 |
| MARELLE | 1.11 | CUORBALESTRO SINISTRA | 5.02 |
| | | TOTALE | 26.82 |

Tabella 13: Estensione areale dei sottobacini del bacino Nuovo Tratturo.

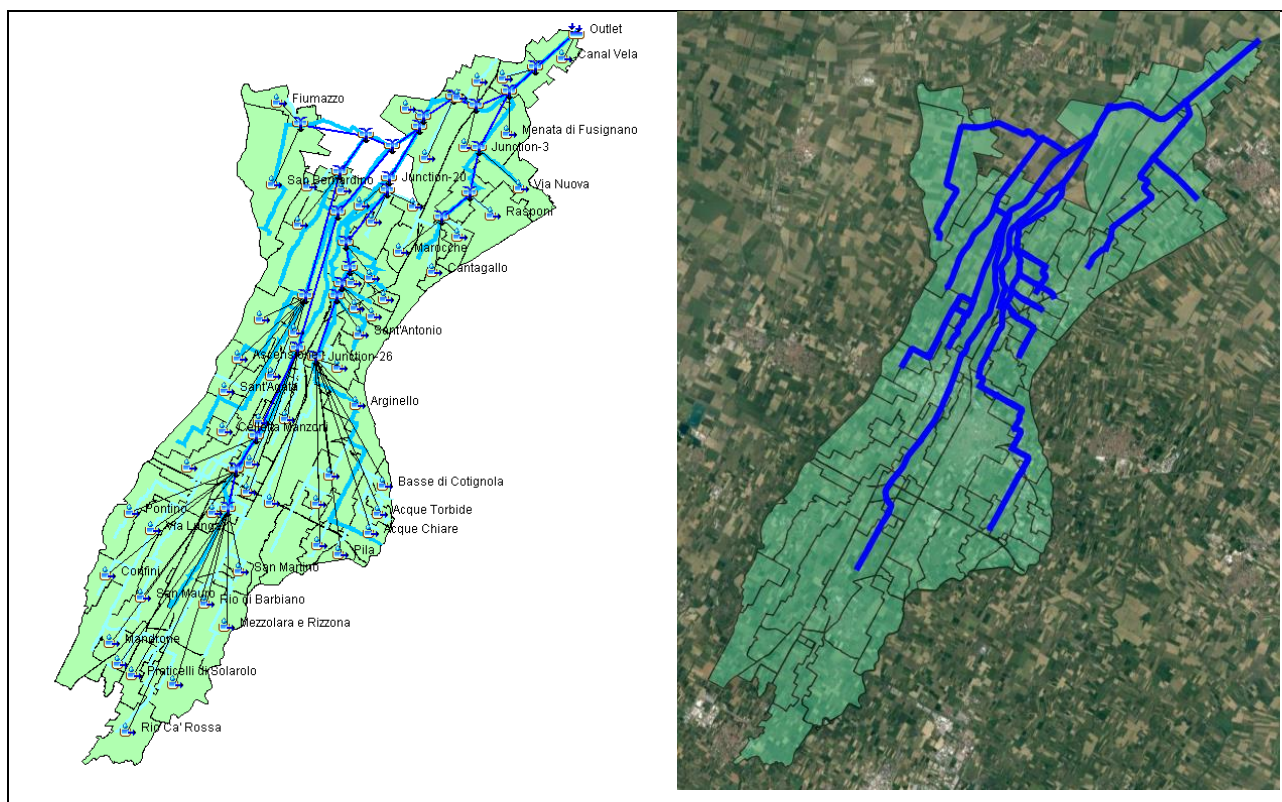


Figura 29: Schematizzazione del Canal Vela nel modello HEC-HMS.

| NOME SOTTOBACINO | Area [km ²] | NOME SOTTOBACINO | Area [km ²] |
|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| ACQUE CHIARE | 1.7 | MANDRONE | 1.0 |
| ACQUE TORBIDE | 0.6 | MAROCCHE | 1.5 |
| AFFLUENTE DESTRA DANE | 3.9 | MAZZOLA A PONENTE | 1.1 |
| ARGINELLO | 10.1 | MENATA DI FUSIGNANO | 7.7 |
| ASCENSIONE | 1.9 | MENATA DI RUNZI | 1.9 |
| BALLIRANA | 4.6 | MEZZOLARA E RIZZONA | 2.5 |
| BASSE DI COTIGNOLA | 0.9 | PILA | 0.8 |
| BEDAZZO | 1.3 | PONTINO | 3.9 |
| BRIGNANI VIVO | 9.6 | PRATI DI SOLAROLO | 1.8 |
| CANAL VELA | 3.8 | PRATICELLI DI SOLAROLO | 1.7 |
| CANAL VELA ABBANDONATO | 1.4 | RASPONI | 4.0 |
| CANALETTA DI BUDRIO | 6.5 | RIO CA' ROSSA | 4.9 |
| CANALETTA DI ZAGONARA | 3.2 | RIO DI BARBIANO | 3.5 |
| CANALETTO | 1.7 | SAN MARTINO | 1.0 |
| CANTAGALLO | 1.1 | SAN MAURO | 5.0 |
| CASALE | 11.7 | SAN SAVINO | 1.4 |
| CAVALLINE | 0.8 | SANT'AGATA | 0.8 |
| CELLETTA MANZONI | 0.8 | SANT'ANTONIO | 2.1 |
| COCORRE | 1.1 | SANTA LUCIA | 1.9 |
| COCORRETTO | 0.2 | SECHEZZO | 1.7 |

| NOME SOTTOBACINO | Area [km²] | NOME SOTTOBACINO | Area [km²] |
|-----------------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|
| CONFINI | 1.7 | TAGLIO CORELLI | 2.1 |
| FIUMAZZO | 1.4 | TAGLIO CORELLI INFERIORE | 0.3 |
| FONDAGNOLO | 3.4 | TOMBA A LEVANTE | 1.7 |
| FOSSATONCELLO A PONENTE | 1.1 | TRATTURO | 8.4 |
| FOSSATONE DI SAN BERNARDINO | 9.9 | VIA DI BUDRIO | 0.8 |
| FRASSONA MAGGIORE | 0.6 | VIA LUNGA A PONENTE | 2.8 |
| FRASSONA MINORE | 0.5 | VIA LUNGA O CONDOTTELLO DI BAGNARA | 8.2 |
| GAIANO | 4.5 | VIA NUOVA | 3.1 |
| GESUITA | 0.8 | VIA NUOVA NEL CASALE | 3.0 |
| MACALLO | 2.4 | ZAGONARA | 0.5 |
| MACERI | 1.4 | TOTALE | 175.97 |

Tabella 14: Estensione areale dei sottobacini del bacino Canal Vela.

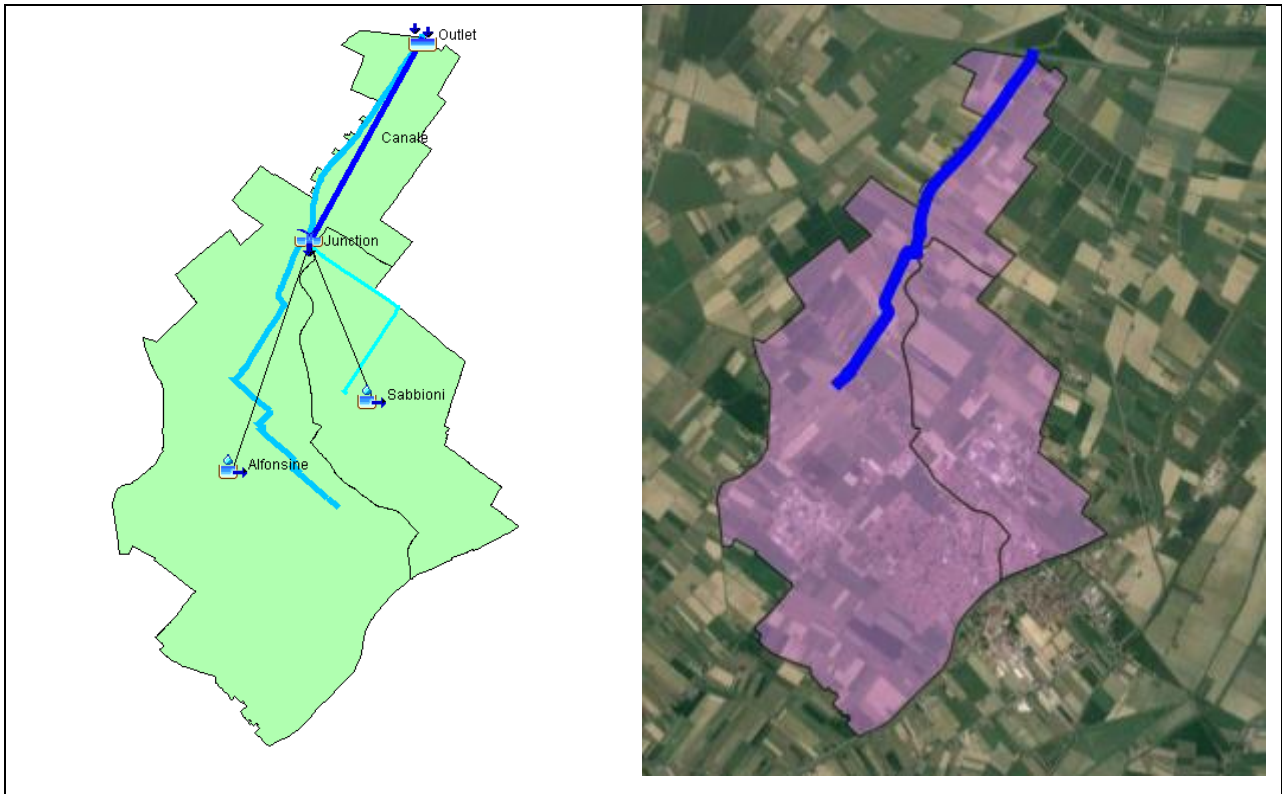


Figura 30: Schematizzazione dello Scolo Alfonsine nel modello HEC-HMS.

| NOME SOTTOBACINO | Area [km²] |
|-------------------------|------------------------------|
| ALFONSINE | 8.62 |
| SABBIONI | 3.01 |
| TOTALE | 11.63 |

Tabella 15: Estensione areale dei sottobacini del bacino Alfonsine.

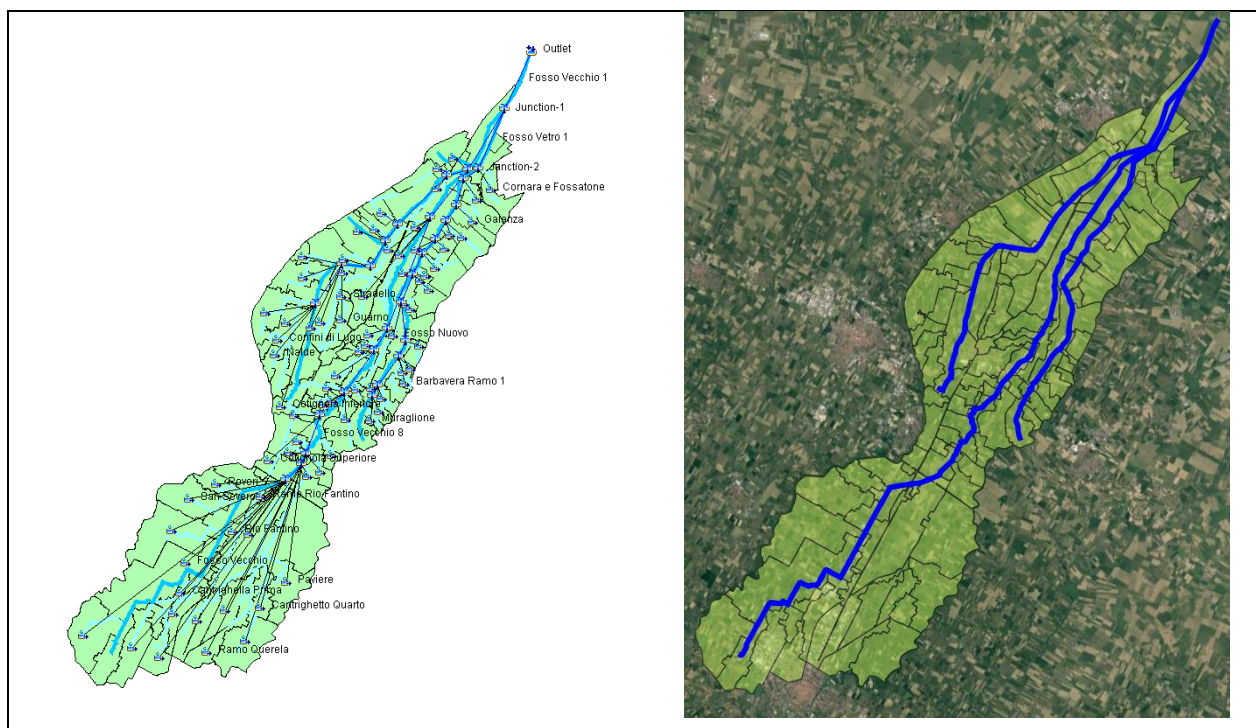


Figura 31: Schematizzazione del Fosso Vecchio nel modello HEC-HMS.

| NOME SOTTOBACINO | Area [km ²] | NOME SOTTOBACINO | Area [km ²] |
|--|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| AGUTA INFERIORE | 0.04 | GABINA A DESTRA | 0.71 |
| AGUTA SUPERIORE | 0.37 | GABINA A SINISTRA | 0.61 |
| ALBERGONE | 0.65 | GALANZA | 1.51 |
| ALFONSINE | 2.37 | GUARNO | 1.61 |
| BARBAVERA | 1.20 | MADRARA A DESTRA | 0.89 |
| BARBAVERA 1 RAMO | 0.29 | MADRARA A SINISTRA | 0.41 |
| BARBAVERA 2 RAMO | 0.14 | MASIERA INFERIORE | 0.80 |
| BONCELLINO | 2.36 | MASIERA SUPERIORE | 1.87 |
| BRUNELLO INFERIORE | 0.89 | MONTANARI | 0.43 |
| BRUNELLO SUPERIORE | 2.32 | MURAGLIONE | 0.48 |
| CANALA DI CASSANIGO | 6.07 | NALDE | 0.92 |
| CANTRIGHELLA PRIMA O TABACCA | 0.65 | PARADOSSO | 2.48 |
| CANTRIGHELLA SECONDA O DI MERLASCHIO | 9.07 | PARTITA GRANDE O VIAZZA NUOVA | 1.08 |
| CANTRIGHETTO PRIMO | 4.74 | PAVIERE | 3.57 |
| CANTRIGHETTO QUARTO | 1.00 | PIEVE | 2.41 |
| CANTRIGHETTO QUINTO DI GRANAROLO | 6.51 | PRIMO DELLA ROSSETTA | 1.26 |
| CANTRIGHETTO SECONDO | 3.46 | PUNTA DI FUSIGNANO | 0.40 |
| CANTRIGHETTO TERZO O CANTRIGHELLA DI SAN | 3.03 | RAMO FORMELLINO | 4.33 |

| NOME SOTTOBACINO | Area [km ²] | NOME SOTTOBACINO | Area [km ²] |
|-----------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| SILVESTRO | | | |
| CAPUCCINI | 1.63 | RAMO MEZZENO | 2.68 |
| CERCHIA | 1.43 | RAMO QUERELA | 1.90 |
| COCCHI INFERIORE DESTRO | 0.03 | RAMO REDA | 0.11 |
| COCCHI SUPERIORE A DESTRA | 1.50 | RAMO RIO FANTINO | 0.10 |
| COCCHI SUPERIORE A SINISTRA | 0.14 | RAMO STRADELLO | 0.20 |
| COLOMBARONE | 2.02 | REDA | 0.73 |
| CONFINI DI LUGO | 0.75 | REDINO | 1.79 |
| CORNARA E FOSSATONE | 1.98 | RIO FANTINO | 1.94 |
| CORSINI | 1.95 | ROVERI | 1.42 |
| COTIGNOLA | 1.95 | SAN GERVASIO | 0.74 |
| COTIGNOLA INFERIORE | 0.61 | SAN POTITO | 2.99 |
| COTIGNOLA SUPERIORE | 0.81 | SAN SEVERO | 3.79 |
| ERCOLINE | 0.39 | SANT'ANTONIO | 3.02 |
| FIUME VETRO | 3.75 | SECONDO DELLA ROSSETTA | 1.31 |
| FOSETTA A DESTRA | 3.05 | STRADELLO | 0.71 |
| FOSETTA A SINISTRA | 2.90 | TRATURO | 1.75 |
| FOSETTE RIUNITE | 0.32 | TRAVERSARA | 0.54 |
| FOSSO MUNIO | 9.29 | VALLETTA | 0.79 |
| FOSSO NUOVO | 1.56 | VIA CHIARA | 2.48 |
| FOSSO VECCHIO | 26.64 | VIAZZA INFERIORE | 2.23 |
| FOSSO VETRO | 9.89 | VIAZZA SUPERIORE | 0.32 |
| FUMAROLO | 0.50 | ZIA | 0.42 |
| | | TOTALE | 175.97 |

Tabella 16: Estensione areale dei sottobacini del bacino Fosso Vecchio.

6.1.2 Set-up del modello

Per il calcolo del volume efficace è stato utilizzato il metodo del Curve Number, sviluppato dal Soil Conservation Service (SCS) del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti [Soil Conservation Service, 1972]. Per la determinazione dell'idrogramma del deflusso superficiale è stato utilizzato il metodo dell'idrogramma unitario di Clark [1945]. Sono state trascurate le perdite per evapotraspirazione ed il deflusso profondo in quanto gli eventi di piena hanno luogo principalmente durante i mesi invernali quando le temperature sono limitate e il grado di saturazione (falda freatica) relativamente elevato. Per la traslazione dell'onda di piena all'interno dei canali è stato utilizzato il metodo cinematico, implementato sulla base delle caratteristiche fisiche del tratto di canale specifico (lunghezza, pendenza, sezione, scabrezza).

Per la generazione dell'evento su cui valutare le variazioni indotte dalla subsidenza si è partiti dalla portata massima nominale delle elettropompe installate presso l'impianto idrovoro di Tratturo a servizio del comprensorio di Bonifica, strutturato su sei elettropompe, per una portata massima

nominale complessiva pari a 10.8 m³/s. Le acque sollevate dalle idrovore vengono convogliate dal Nuovo Tratturo nel canale Destra Reno, secondo livelli di avvio e spegnimento forniti dal Consorzio. Ipotizzando che, come usualmente avviene nell'ambito della gestione della bonifica nell'area costiera padana, la portata delle pompe sia stata dimensionata per un evento con tempo di ritorno 30 anni, si è quindi cercato di generare un evento pluviometrico con Tr=30 anni che determinasse una portata al colmo di 10.8 m³/s, utilizzata come riferimento per la taratura del parametro CN per la definizione della pioggia efficace. Il parametro CN così identificato (CN=63) è stato poi applicato anche agli altri bacini presi in esame.

Il tempo di corrivazione dei bacini simulati è stato calcolato con la formula di Pasini [Da Deppo et al., 2004]:

$$t_c = \frac{0.0045}{\sqrt{i}} \sqrt[3]{SL}$$

$$\sqrt{i} = \frac{\sum l}{\sum \frac{l_n}{\sqrt{i_n}}}$$

dove t_c è il tempo di corrivazione in giorni, S la superficie del bacino in km² ed L la lunghezza del collettore in km, l_n e i_n rispettivamente lunghezza e pendenza dei diversi tratti del collettore. La Tabella 17 mostra i tempi di corrivazione ottenuti per ciascun bacino:

| Bacino | Tempo di corrivazione [ore] |
|----------------|-----------------------------|
| Fosso Vecchio | 72 |
| Alfonsine | 24 |
| Canal Vela | 72 |
| Nuovo Tratturo | 48 |

Tabella 17 Tempi di corrivazione per bacino.

Per l'intensità di pioggia si è fatto riferimento allo studio del Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale [2001] e allo studio di Todini [1990]. Questi lavori hanno fornito la curva di possibilità pluviometrica per il tempo di ritorno di interesse, ottenuta sulla base di studi di regionalizzazione comprendenti il territorio indagato focalizzati alla determinazione della precipitazione intensa per eventi di varia durata. La Tabella 18 mostra la precipitazione per il tempo di ritorno di 30 anni in funzione della durata di interesse (pari ai tempi di corrivazione sopra identificati).

| Durata [ore] | Precipitazione [mm] |
|--------------|---------------------|
| 24 | 105 |
| 48 | 130 |
| 72 | 135 |

Tabella 18 Precipitazione per il tempo di ritorno di 30 anni.

Per ogni bacino, è stato quindi creato un evento pluviometrico della durata pari al tempo di corrivazione e precipitazione cumulata pari a quella di Tabella 18 come mostrato dai grafici di Figura 32- Figura 34.

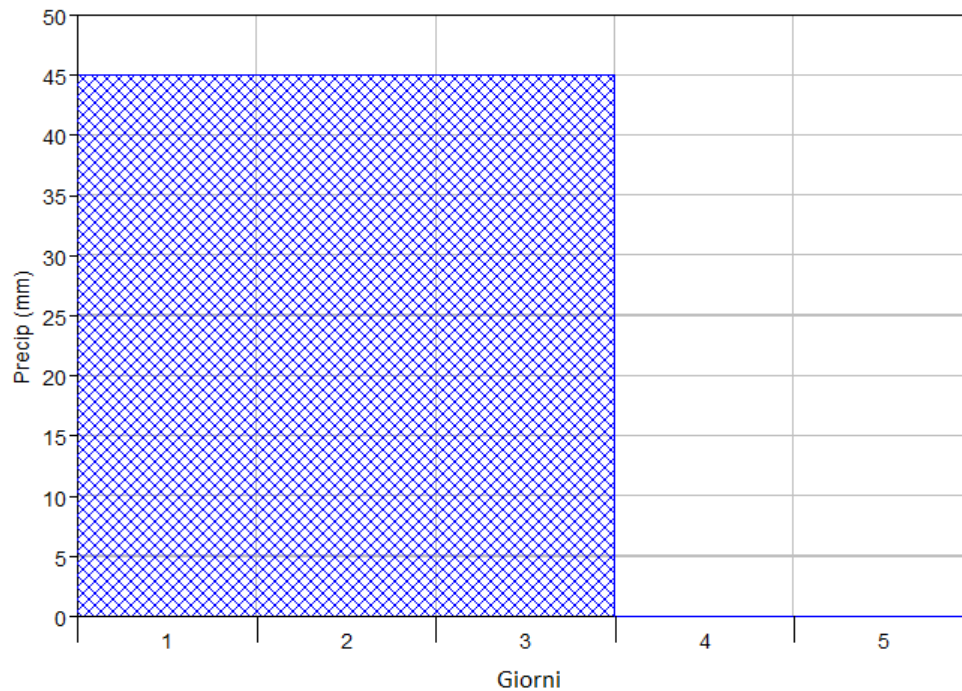


Figura 32 Fosso Vecchio e Canal Vela: ietogramma utilizzato per la simulazione idrologica.

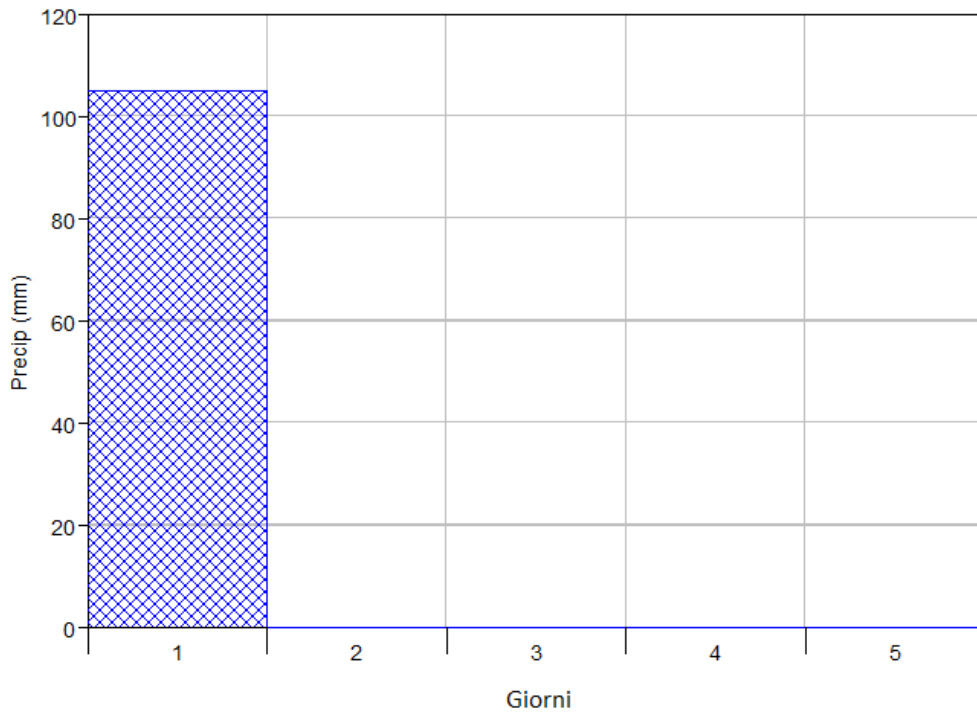


Figura 33 Scolo Alfonsine: ietogramma utilizzato per la simulazione idrologica.

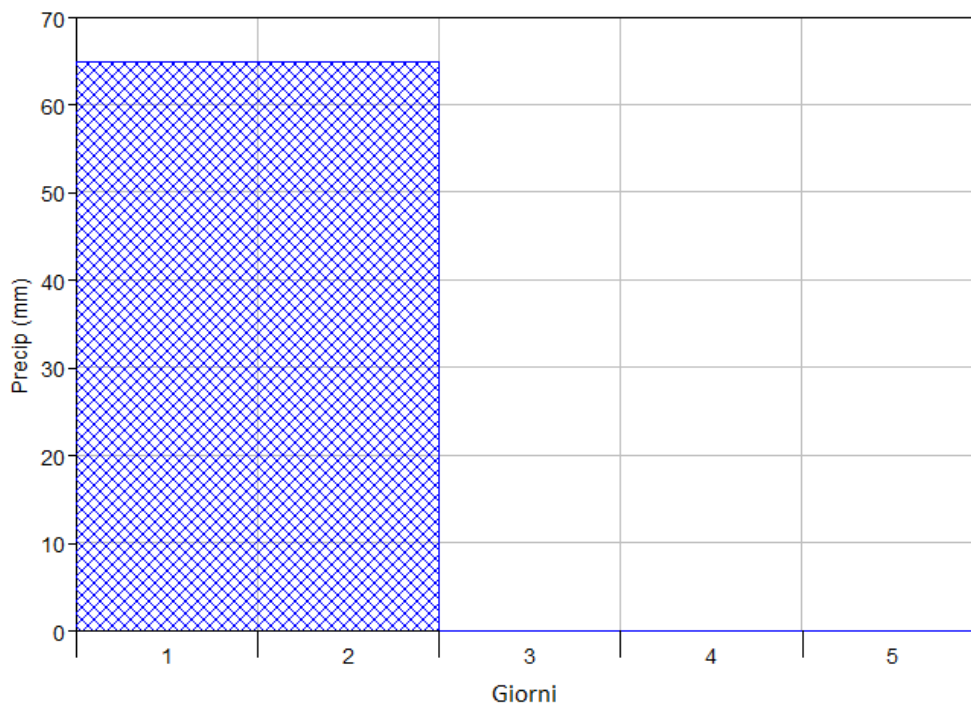


Figura 34 Scolo Nuovo Tratturo: ietogramma utilizzato per la simulazione idrologica.

6.1.3 Risultati delle simulazioni

Le simulazioni effettuate hanno fornito il calcolo dell'idrogramma di piena per ognuno dei sottobacini in cui sono stati discretizzati i quattro sistemi analizzati. Tali idrogrammi, distribuiti lungo la rete, costituiscono la condizione al contorno per la successiva modellazione idraulica.

A titolo esemplificativo, in Figura 35 - Figura 38 sono riportati gli idrogrammi risultanti alla sezione di chiusura dei quattro modelli.

Da notare che la forma degli idrogrammi mostra per i bacini più estesi il ramo di discesa più ripido della parte di salita, il che rappresenta un comportamento inusuale; tale andamento è diretta conseguenza delle assunzioni fatte che prevedono, come sopra menzionato, che il deflusso profondo sia trascurato. La forma dell'idrogramma risulta pertanto impattata dall'impostazione seguita, che tuttavia non inficia la bontà dei risultati ottenuti, che, per il tipo di analisi richiesta, sono focalizzati sull'entità del picco di piena. Il valore dei picchi di piena ottenuti risulta essere in linea con quelli calcolati nel già citato Studio idrologico ed idraulico del Canale di Bonifica in Destra di Reno: per il Canal Vela e il Fosso Vecchio, che sono i bacini più significativi, i risultati delle simulazioni idrologiche condotte mostrano portate al colmo di circa $51 \text{ m}^3/\text{s}$ per entrambi, da confrontare con le portate calcolate dal Consorzio, pari rispettivamente a 48 e $52 \text{ m}^3/\text{s}$.

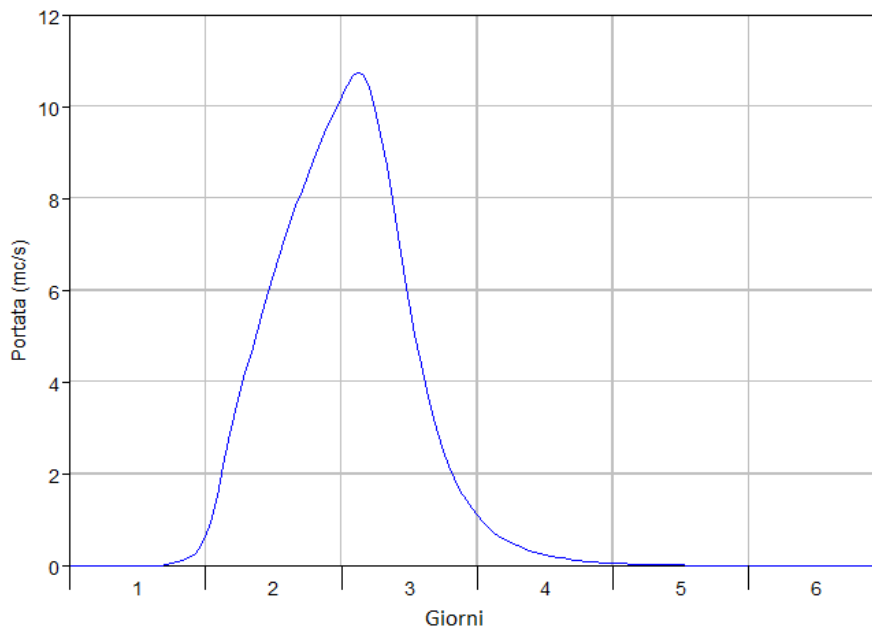


Figura 35: Nuovo Tratturo: idrogramma risultante alla sezione di chiusura.

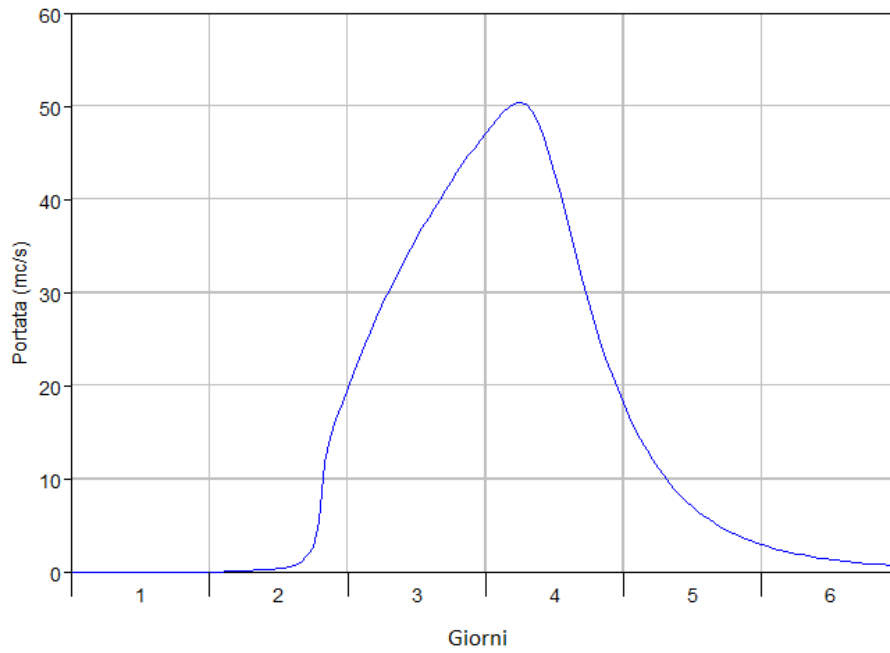


Figura 36: Canal Vela: idrogramma risultante alla sezione di chiusura.

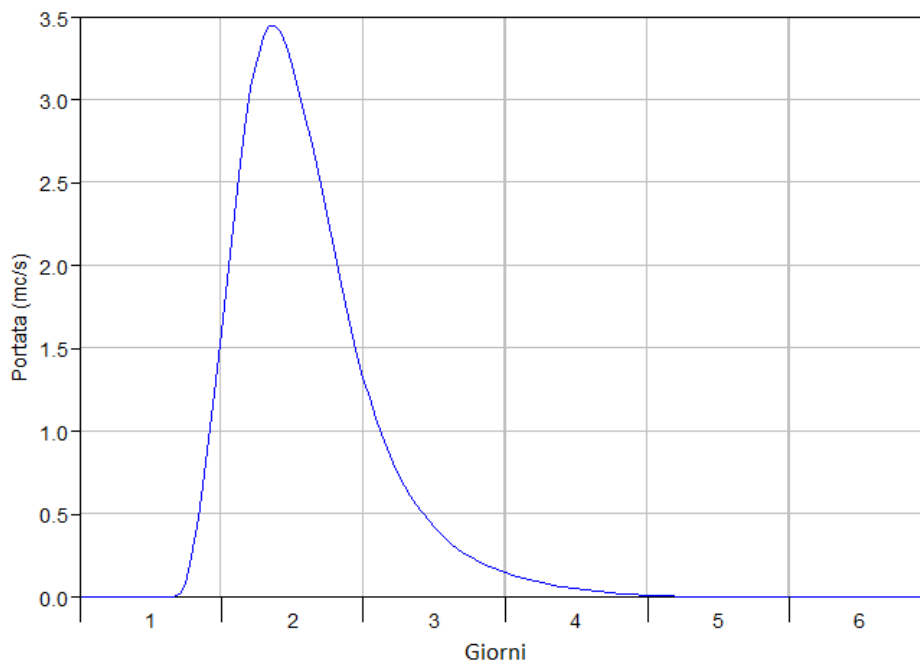


Figura 37: Scolo Alfonsine: idrogramma risultante alla sezione di chiusura.

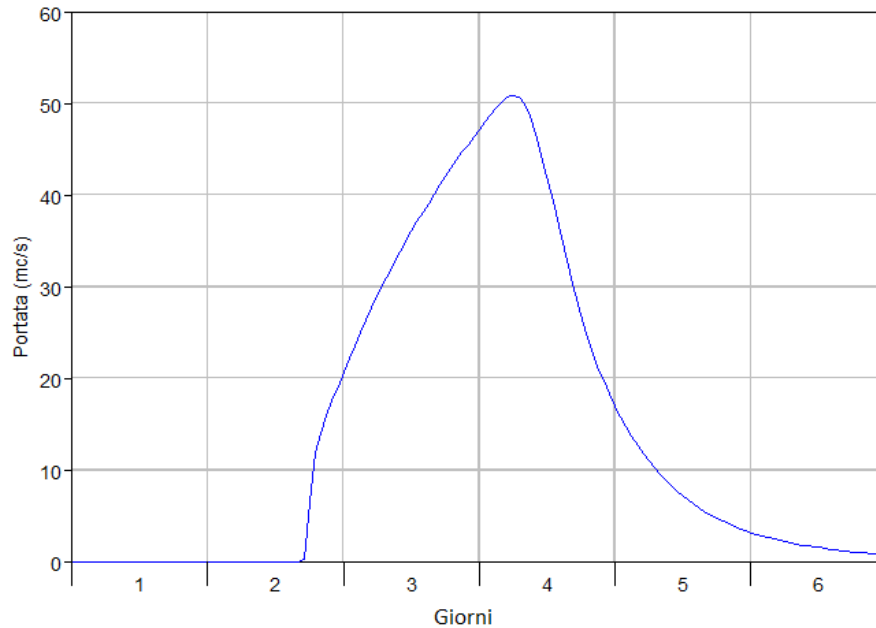


Figura 38: Fosso Vecchio: drogramma risultante alla sezione di chiusura.

6.2 Modello idraulico

6.2.1 Definizione della geometria del sistema

In Figura 39 è riportato lo schema idraulico utilizzato in HEC-RAS.

Per l'impianto idrovoro Tratturo sono a disposizione il numero e la portata delle pompe, con indicazione delle quote di avviamento e arresto. Sulla base di queste informazioni si è ipotizzato un funzionamento dell'impianto idrovoro come schematizzato in Tabella 19. Gli altri tre canali principali (Canal Vela, Scolo Alfonsine e Fosso Vecchio) confluiscono le acque in Destra Reno a semplice gravità.

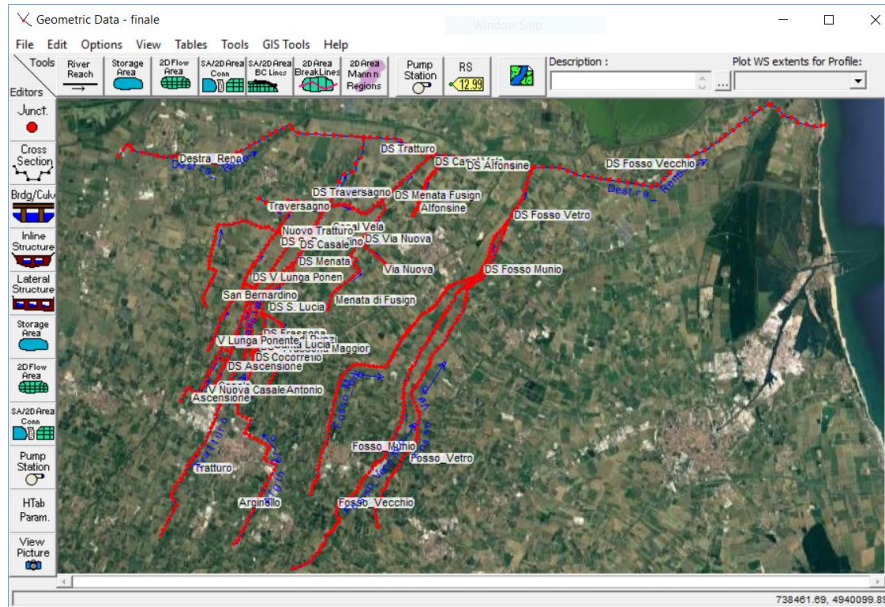


Figura 39: Schematizzazione del comprensorio di bonifica nel modello HEC-RAS.

| Pompa n. | portata | Quota avvio | Quota arresto |
|----------|-----------------------|-------------|---------------|
| 1 | 2.5 m ³ /s | -0.43 | -0.65 |
| 2 | 2.5 m ³ /s | -0.38 | -0.53 |
| 3 | 2.5 m ³ /s | -0.23 | -0.43 |
| 4 | 2.5 m ³ /s | 0.02 | 0.12 |
| 5 | 0.5 m ³ /s | -0.48 | -0.73 |
| 6 | 0.3 m ³ /s | -0.88 | -0.68 |

Tabella 19: Schema di funzionamento dell'impianto idrovoro Tratturo simulato nel modello.

6.2.2 Set-up del modello

L'input al modello idraulico è determinato dai risultati del modello idrologico: ogni sottobacino schematizzato in HMS determina la portata di input per il relativo canale, portata che viene distribuita come afflusso di testa o laterale lungo i tratti di canale modellati. Alcuni contributi laterali relativi a scoli minori non inclusi nella rete idraulica modellata sono gestiti mediante idrovore; per tali contributi, pur considerati tra le condizioni al contorno, gli impianti idrovori sono stati trascurati nell'implementazione del modello, considerando la porta recapitata immediatamente al ricettore di valle.

Per quanto riguarda il Canale Destra Reno, è stata imposta una portata di 50 m³/s a monte delle immissioni considerate nel modello. A valle, in foce del canale Destra Reno, è stato posto un livello medio mare pari a 0.5 m s.l.m.

Per il coefficiente di scabrezza, secondo la formulazione di Manning, sono stati considerati i seguenti valori:

- $n=0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}^{-1}$ per la parte golenale;
- $n=0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}^{-1}$ per le parti di alveo attivo del canale Destra Reno;
- $n=0.030 \text{ m}^{-1/3}\text{s}^{-1}$ per le parti di alveo attivo per gli altri canali consortili.

6.2.3 Scenari analizzati

Il modello HEC-RAS è stato utilizzato per verificare le seguenti configurazioni geometriche:

1. Scenario A: stato "attuale", ovvero quello definito sulla base delle quote dei rilievi topografici a disposizione.
2. Scenario B: termine della fase di erogazione nel caso $P = 240 \text{ bar}$, cioè $P = 1.2 P_i$ (Figura 40). Lo spostamento considerato è quello corrispondente al passaggio dallo stato attuale alla minima pressione di esercizio prevista, ottenuto nello scenario "base" ovvero con $c_{M \text{ media}}$. La distribuzione degli spostamenti imposti sulle sezioni dei diversi canali è riportata in Figura 41a.
3. Scenario C: termine della fase di stoccaggio nel caso $P = 240 \text{ bar}$, cioè $P = 1.2 P_i$ (Figura 40). Lo spostamento considerato è quello corrispondente al passaggio dallo stato attuale alla massima pressione di esercizio prevista, ottenuto nello scenario "base" ovvero con $c_{M \text{ media}}$.

La distribuzione degli spostamenti imposti sulle sezioni dei diversi canali è riportata in Figura 40b.

4. Scenario D: sovrapposizione degli effetti de campi di San Potito al termine della fase di stoccaggio (Figura 41a), di Alfonsine al termine della fase di stoccaggio (Figura 42a) e di Longanesi al termine della produzione primaria (Figura 42b). La distribuzione degli spostamenti imposti sulle sezioni dei diversi canali è riportata in Figura 43: il contributo del solo campo di San Potito è quello considerato nello scenario B, per quanto riguarda i campi di Alfonsine e Longanesi si è fatto riferimento alle mappe di spostamento fornite da EDISON STOCCAGGIO e desunte da Teatini et al. [2017] e ENI [2010]. In Figura 44 è mostrata una sezione della mappa di spostamento dello scenario D: è evidente come l'effetto delle attività di stoccaggio nel campo di San Potito sia trascurabile rispetto a quello degli altri giacimenti.

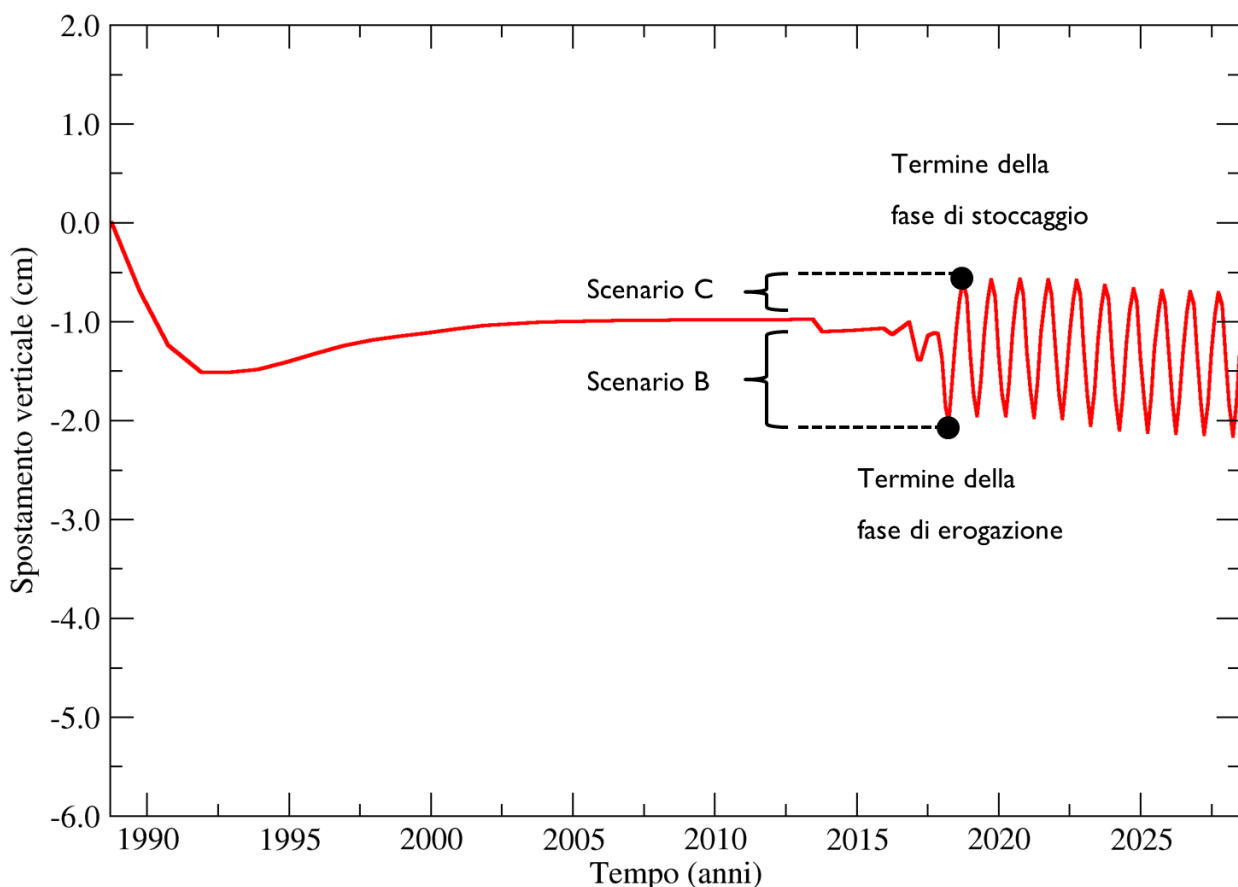


Figura 40: Spostamenti (cm) in corrispondenza del giacimento di San Potito per gli scenari B e C. Gli spostamenti sono il risultato del modello geomeccanico con C_M media e $P = 240$ bar ($P = 1.2$ Pi), ovvero lo scenario “base” analizzato nella precedente fase dello studio [M³E, 2017].

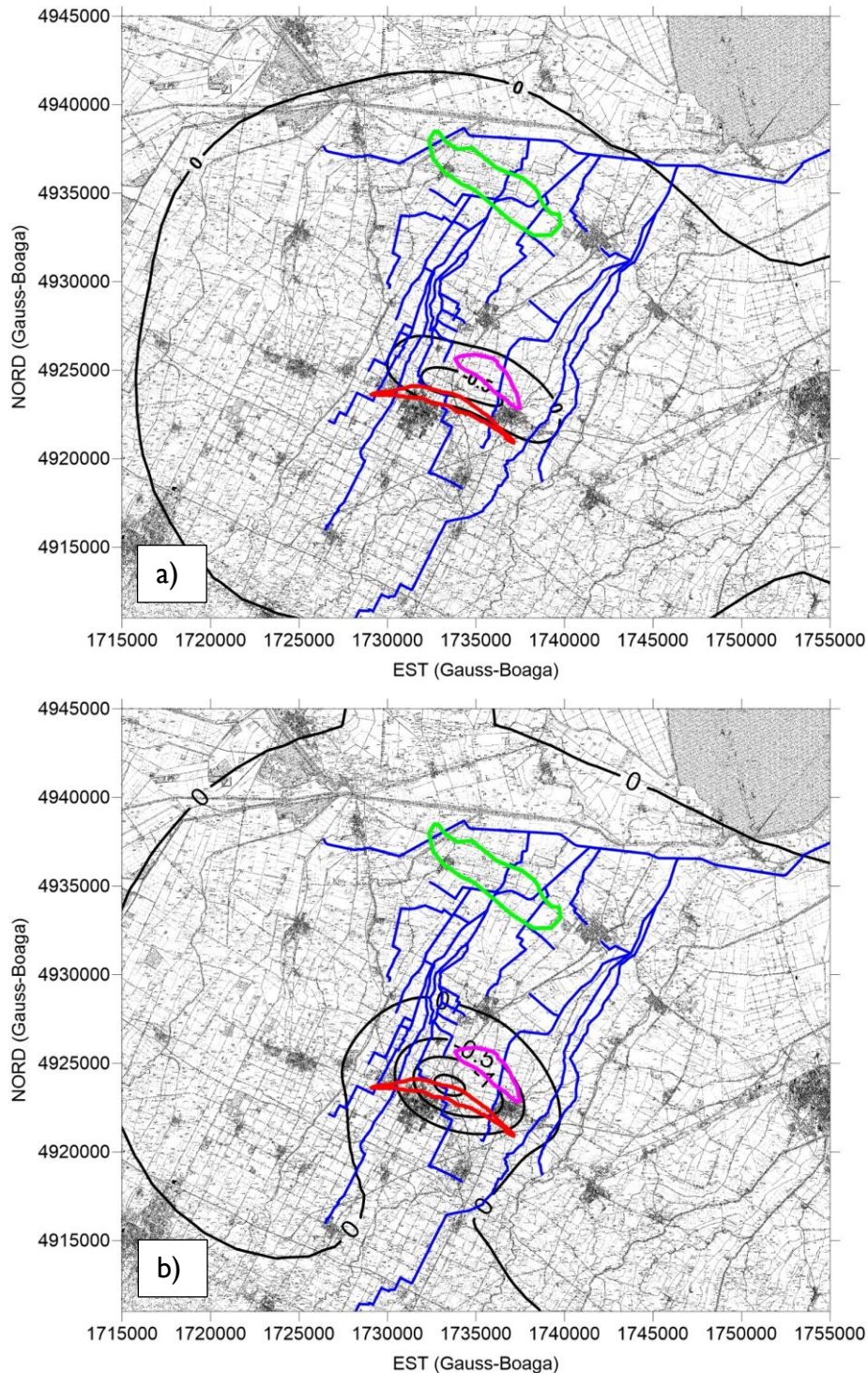


Figura 41: Spostamento (cm) considerato negli scenari B (a) e C (b) fornito dal modello geomeccanico di San Potito nel caso “base” con $P = 240$ bar ($P = 1.2 P_i$) e con c_M media. La traccia del giacimento di San Potito è riportata in rosso, assieme a quelle dei campi di Longanesi (in viola) e Alfonsine (in verde). La rete scolante nel modello HEC-RAS è evidenziata in blu.

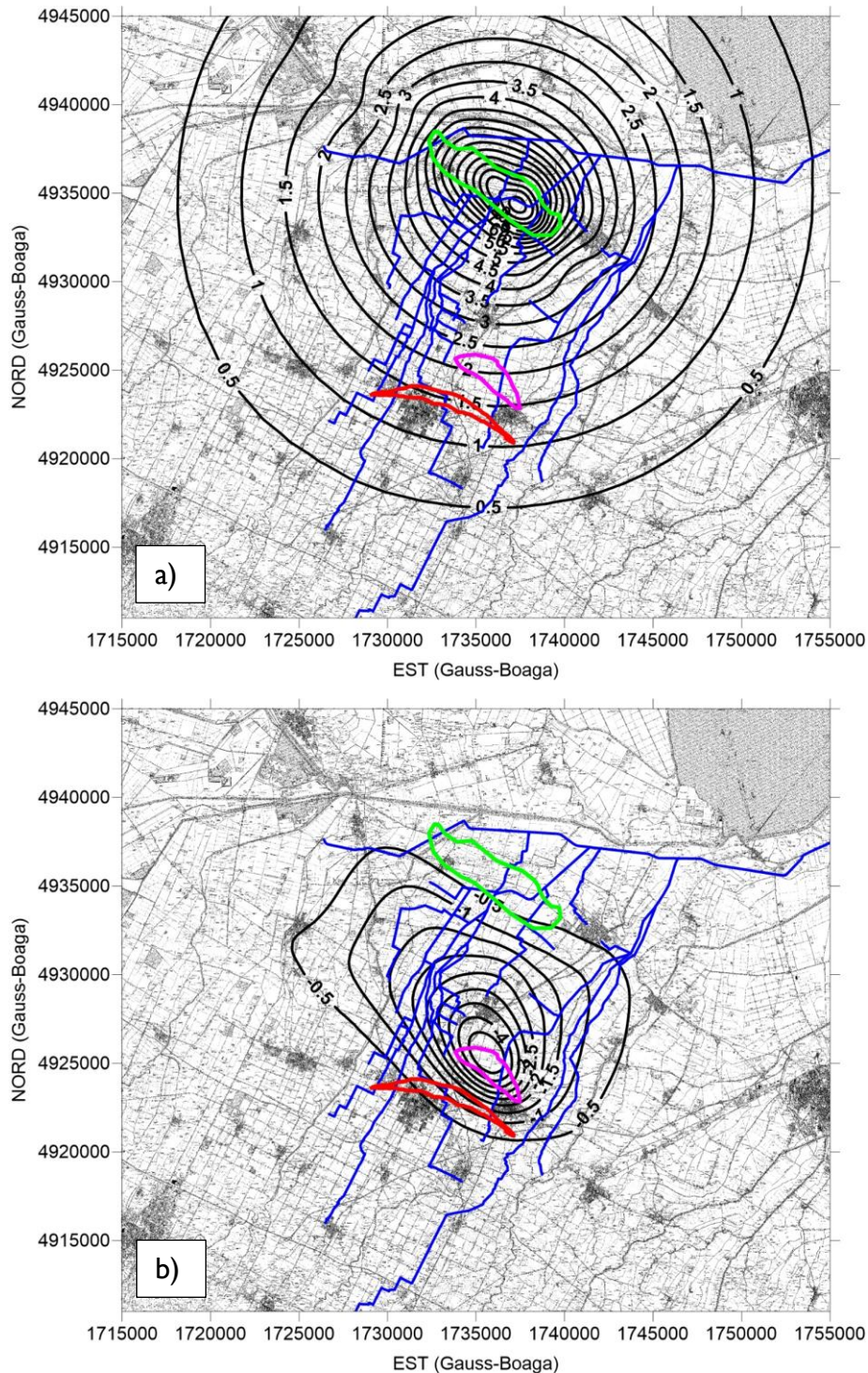


Figura 42: Spostamento (cm) dovuto alle attività minerarie nel campo di Alfonsine (a) e Longanesi (b) corrispondente allo “scenario C”. Le mappe sono state desunte dai rapporti di Teatini et al. [2017] e dallo scenario “Cmed_Kdef” (interpolato all’anno 2030) in ENI [2010], rispettivamente. Le tracce dei giacimenti di San Potito, Longanesi e Alfonsine sono evidenziate rispettivamente in rosso, viola e verde. La rete scolante nel modello HEC-RAS è evidenziata in blu.

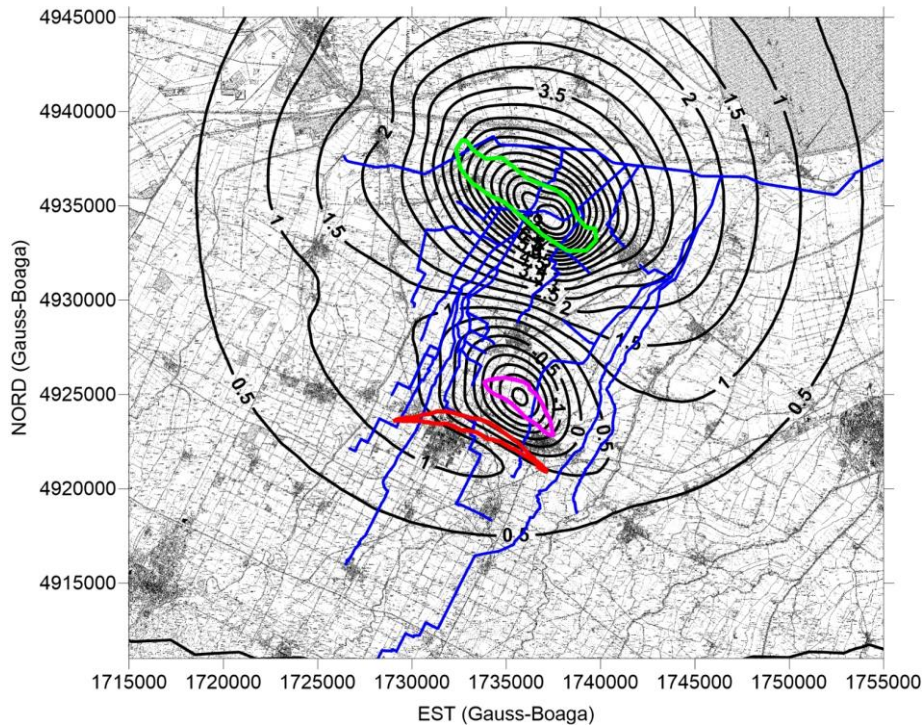


Figura 43: Spostamento (cm) considerato nello scenario D. Le tracce dei giacimenti di San Potito, Longanesi e Alfonsine sono evidenziate rispettivamente in rosso, viola e verde. La rete scolante nel modello HEC-RAS è evidenziata in blu.

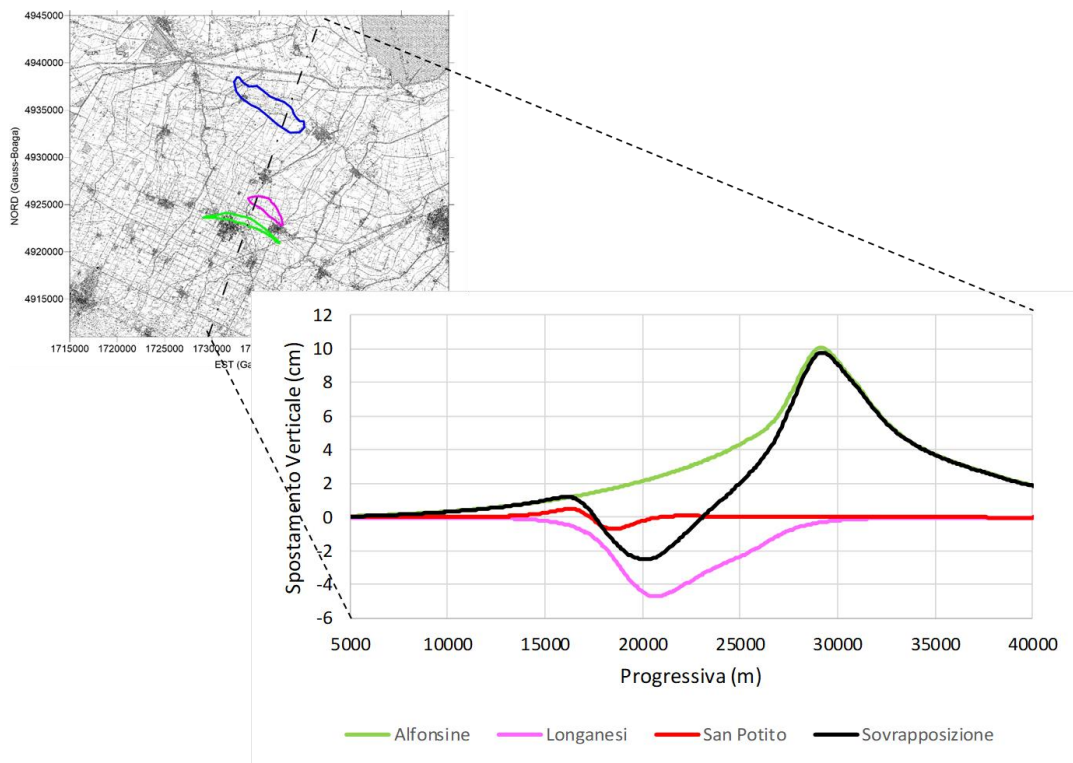


Figura 44: Sezione Sud-Ovest – Nord-Est delle mappe di spostamento (cm) di Figura 41a, Figura 42a, Figura 42b e Figura 43, rispettivamente in rosso, verde, viola e nero.

Il massimo abbassamento e il massimo innalzamento del fondo dei canali di ogni bacino considerato nel modello idraulico sono riportati in Tabella 20 - Tabella 24. Negli scenari B e C le variazioni massime sono dell'ordine del centimetro. Variazioni maggiori di un ordine di grandezza si hanno per lo scenario D, che indica come l'impatto delle attività minerarie negli altri due giacimenti (Longanesi e Alfonsine) sia superiore a quello di San Potito.

| Canale | Scenario B | | Scenario C | | Scenario D | |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | max abb. [cm] | max inn. [cm] | max abb. [cm] | max inn. [cm] | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
| Destra Reno | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.8 |

Tabella 20: Variazioni altimetriche (cm) dei canali del bacino Canale Destra Reno (rispetto alla situazione attuale – scenario A).

| Canale | Scenario B | | Scenario C | | Scenario D | |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | max abb. [cm] | max inn. [cm] | max abb. [cm] | max inn. [cm] | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
| Nuovo Tratturo | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 9.3 |
| Traversagno | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 7.2 |

Tabella 21: Variazioni altimetriche (cm) dei canali del bacino Nuovo Tratturo (rispetto alla situazione attuale – scenario A).

| Canale | Scenario B | | Scenario C | | Scenario D | |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | max abb. [cm] | max inn. [cm] | max abb. [cm] | max inn. [cm] | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
| Alfonsine | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.5 |

Tabella 22: Variazioni altimetriche (cm) dei canali del bacino Alfonsine (rispetto alla situazione attuale – scenario A).

| Canale | Scenario B | | Scenario C | | Scenario D | |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | max abb. [cm] | max inn. [cm] | max abb. [cm] | max inn. [cm] | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
| Canal Vela | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 9.6 |
| Tratturo | -0.7 | 0.1 | -0.2 | 0.2 | 0.0 | 6.8 |
| Casale | -0.4 | 0.1 | -0.1 | 0.1 | 0.0 | 4.6 |
| Fossatone di San Bernardino | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4.2 |
| Via Lunga a Ponente | -0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 1.8 |
| Via Nuova nel Casale | -0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 1.1 |
| Ascensione | -0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 1.2 |
| Arginello | -1.4 | 0.1 | -0.5 | 0.5 | -0.3 | 6.9 |
| Menata di Runzi | -0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | -0.1 | 3.3 |
| Santa Lucia | -0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | -0.6 | 1.0 |
| Frassona Maggiore | -0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | -0.6 | 0.2 |
| Cocorre | -0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | -0.7 | -0.1 |
| Sant'Antonio | -1.0 | 0.0 | -0.4 | 0.0 | -1.2 | -0.2 |
| Menata di Fusignano | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 8.7 |
| Via Nuova | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 7.8 |

Tabella 23: Variazioni altimetriche (cm) dei canali del bacino Canal Vela (rispetto alla situazione attuale – scenario A).

| Canale | Scenario B | | Scenario C | | Scenario D | |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | max abb. [cm] | max inn. [cm] | max abb. [cm] | max inn. [cm] | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
| Fosso Vecchio | -0.2 | 0.1 | -0.1 | 0.2 | 0.0 | 2.6 |
| Fosso Vetro | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 2.5 |
| Fosso Munio | -1.1 | 0.1 | -0.5 | 0.3 | -2.7 | 2.6 |

Tabella 24: Variazioni altimetriche (cm) dei canali del bacino Fosso Vecchio (rispetto alla situazione attuale – scenario A).

6.2.4 Risultati del modello idraulico della rete scolante

I risultati della modellizzazione idraulica sono presentati in termini di confronto tra gli Scenari B, C e D con lo Scenario A di riferimento. I risultati delle simulazioni, riportati nei paragrafi seguenti, evidenziano come l'impatto dell'attività di stoccaggio/erogazioni nel giacimento di San Potito sulla rete idraulica di superficie risulti trascurabile.

6.2.4.1 Scenario B

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|-------------|------------------|------------------|
| Destra Reno | 0.0 | 0.1 |

Tabella 25: Variazioni rispetto ai livelli massimi lungo il canale Destra Reno.

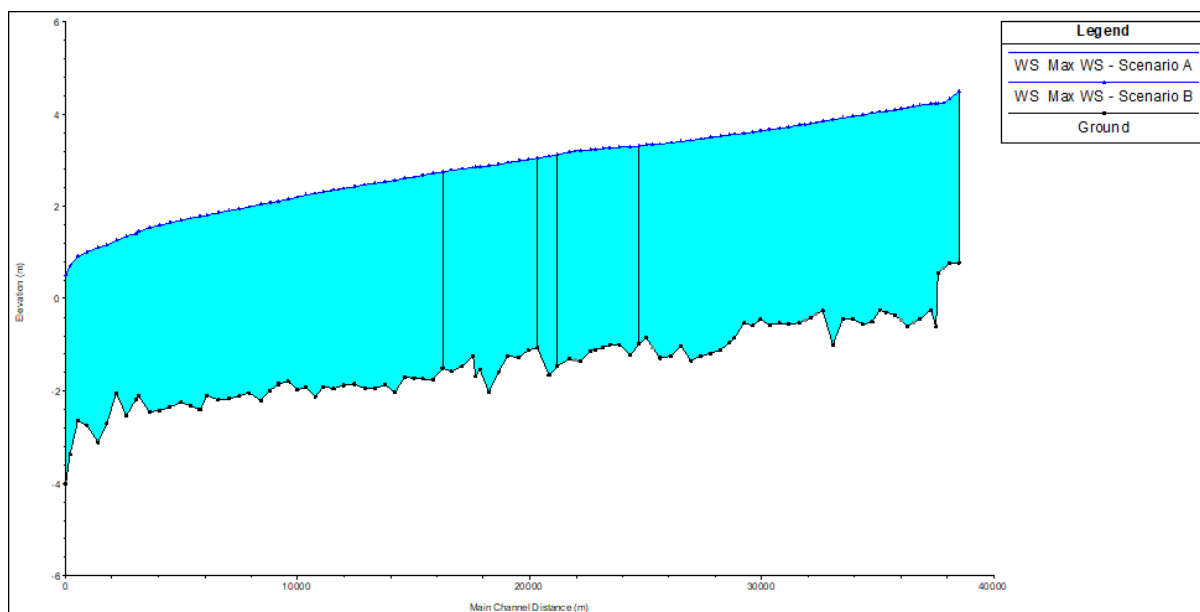


Figura 45: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Destra Reno.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|----------------|------------------|------------------|
| Nuovo Tratturo | -0.2 | 0.1 |
| Traversagno | 0.0 | 0.1 |

Tabella 26: Variazioni rispetto ai livelli massimi nei canali del bacino Nuovo Tratturo.

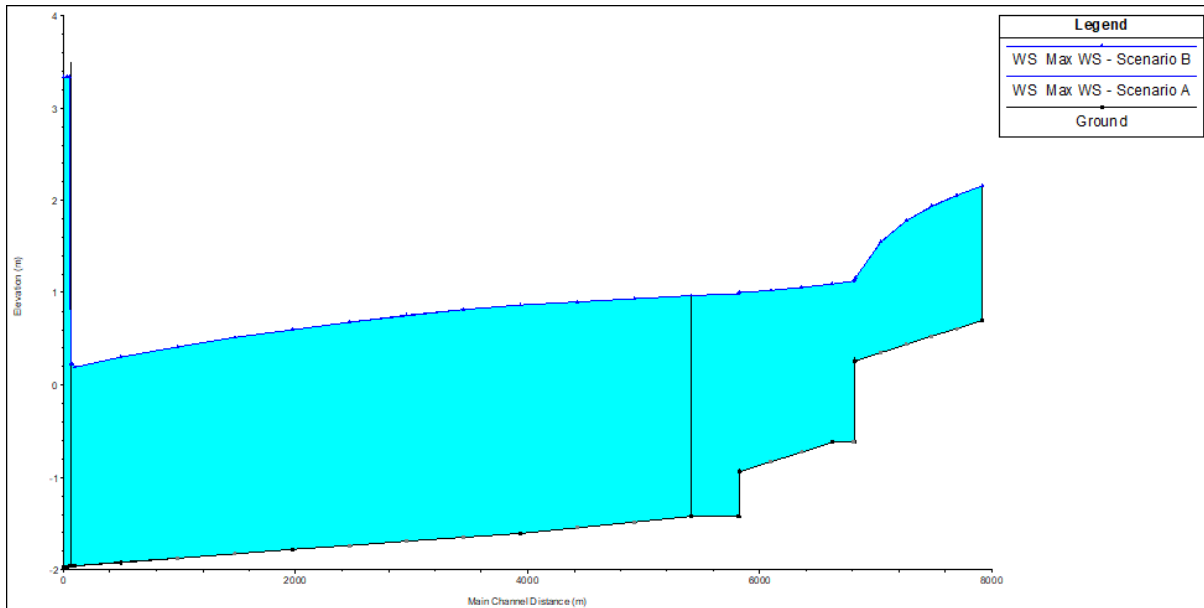


Figura 46: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Nuovo Tratturo.

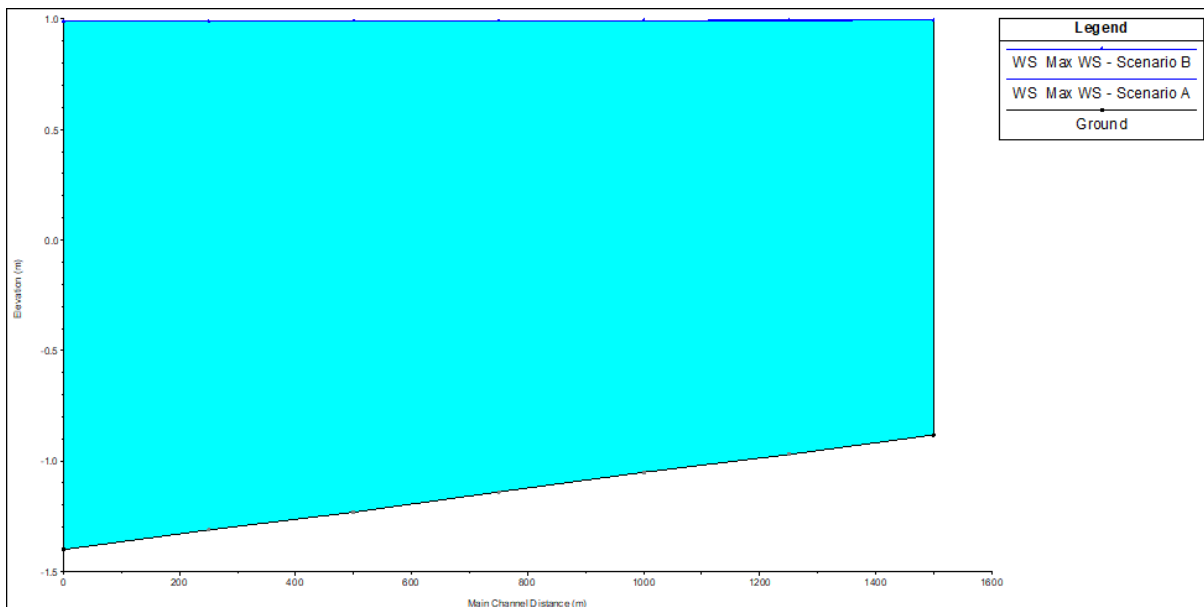


Figura 47: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Traversagno.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|-----------------------------|------------------|------------------|
| Canal Vela | 0.0 | 0.1 |
| Tratturo | -0.7 | 0.1 |
| Casale | -0.4 | 0.2 |
| Fossatone di San Bernardino | 0.0 | 0.2 |
| Via Lunga a Ponente | 0.0 | 0.1 |
| Via Nuova nel Casale | -0.3 | 0.0 |
| Ascensione | -0.3 | 0.0 |
| Arginello | -1.3 | 0.1 |
| Menata di Runzi | -0.2 | 0.2 |
| Santa Lucia | -0.2 | 0.0 |
| Frassona Maggiore | -0.2 | 0.0 |
| Cocorre | -0.2 | 0.0 |
| Sant'Antonio | -1.0 | 0.0 |
| Menata di Fusignano | 0.0 | 0.2 |
| Via Nuova | 0.0 | 0.1 |

Tabella 27: Variazioni rispetto ai livelli massimi nei canali del bacino Canal Vela.

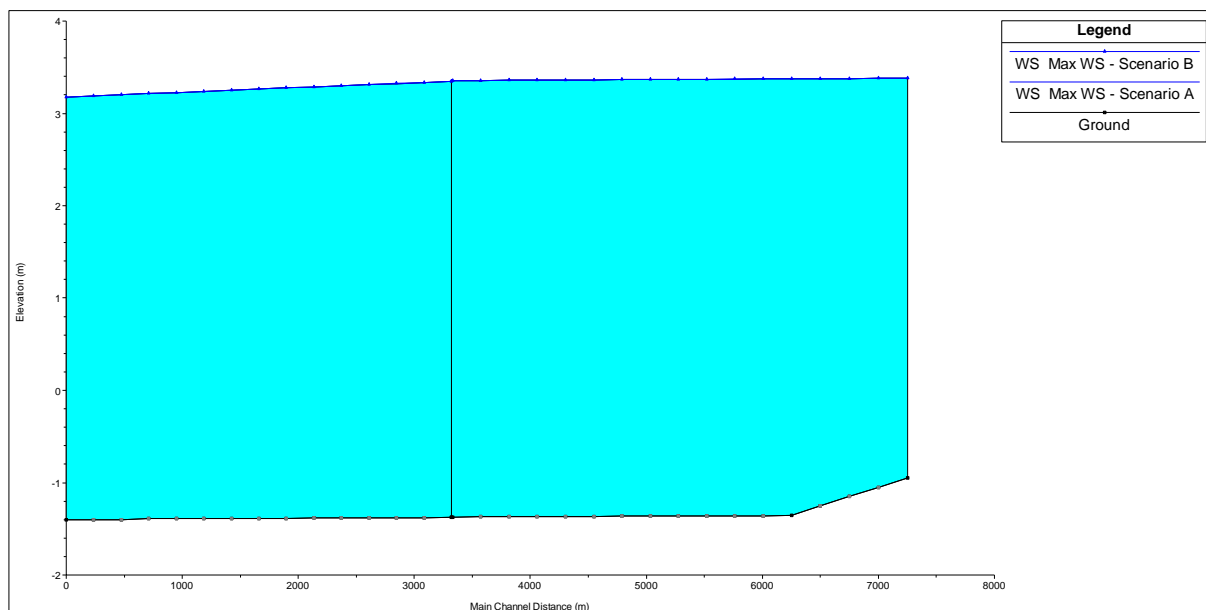


Figura 48: Profilo dei livelli massimi lungo il Canal Vela.

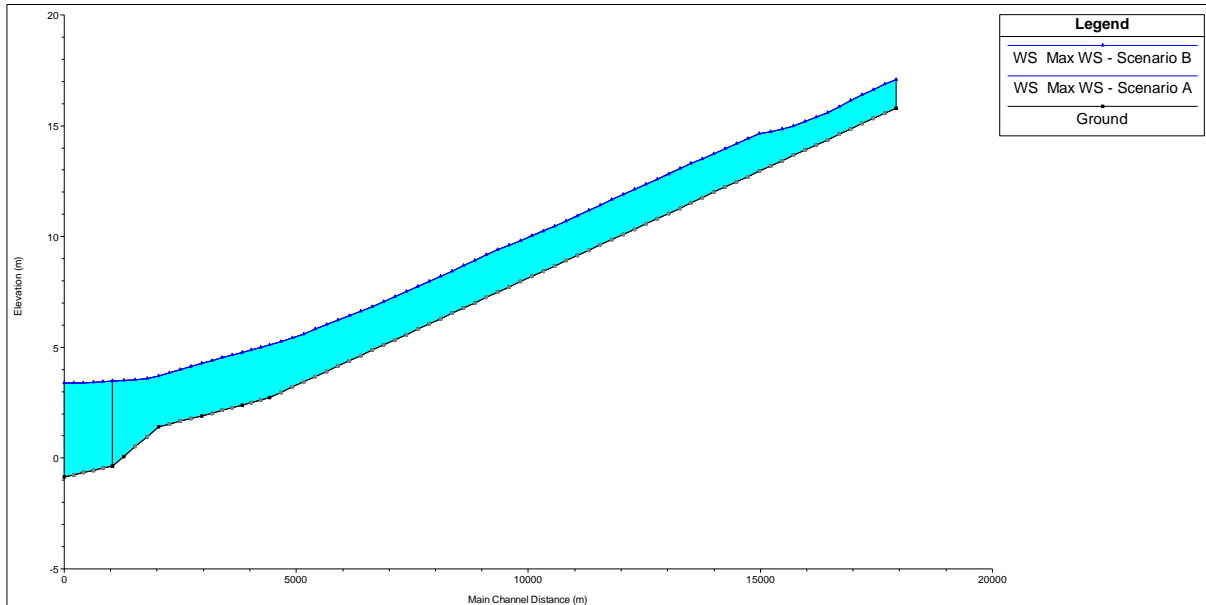


Figura 49: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Tratturo.

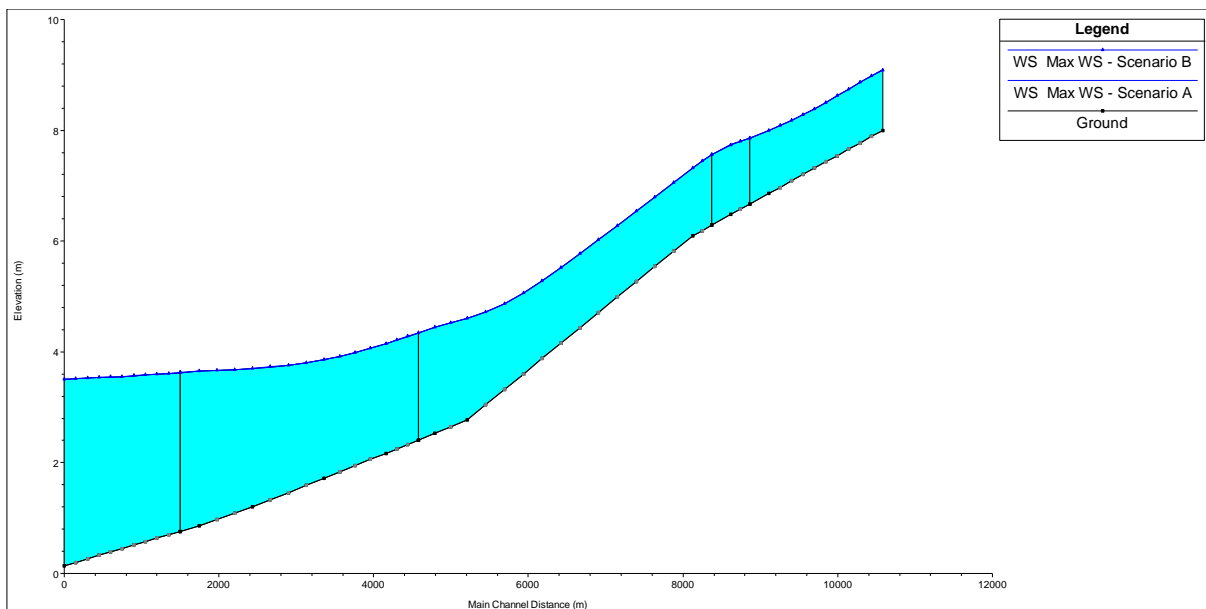


Figura 50: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Casale.

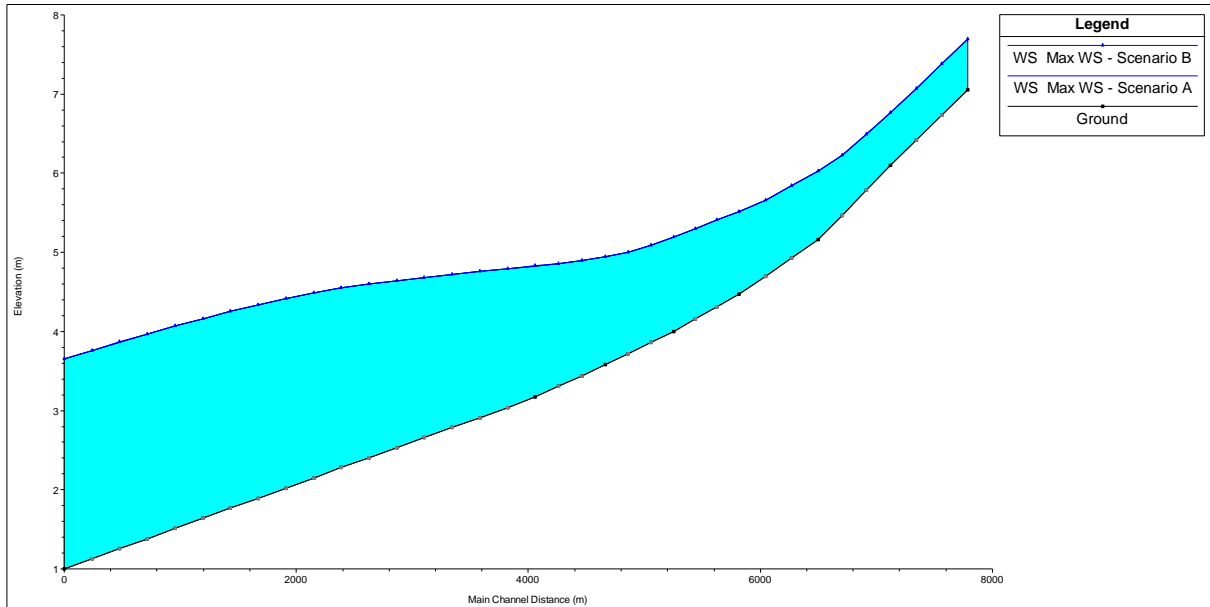


Figura 51: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fossatone di San Bernardino.

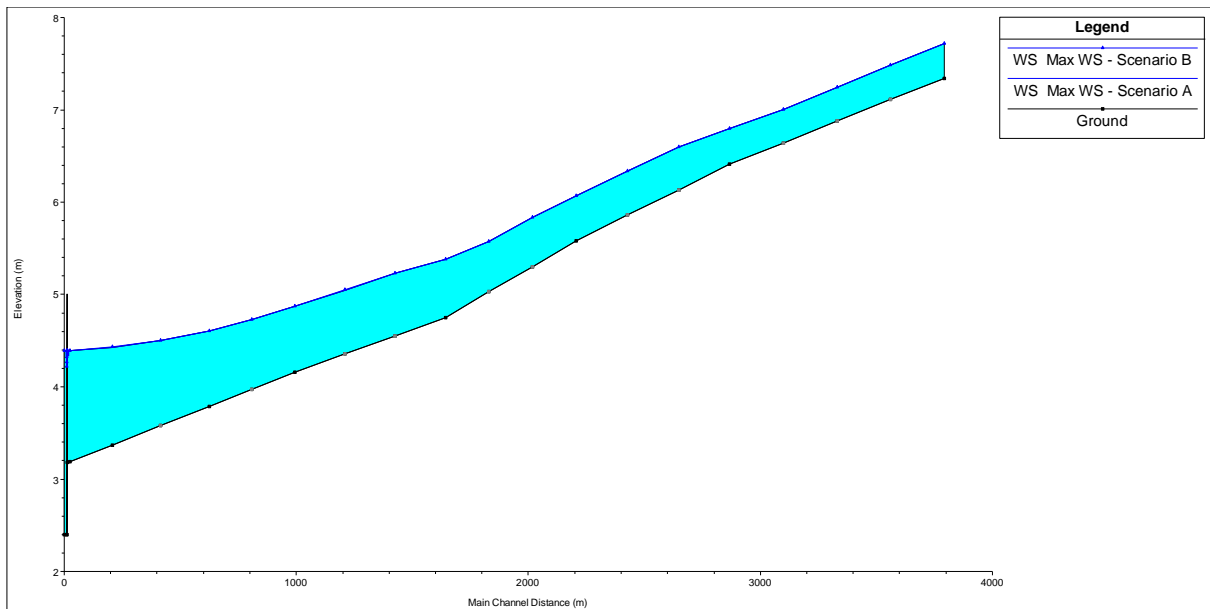


Figura 52: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Lunga a Ponente.

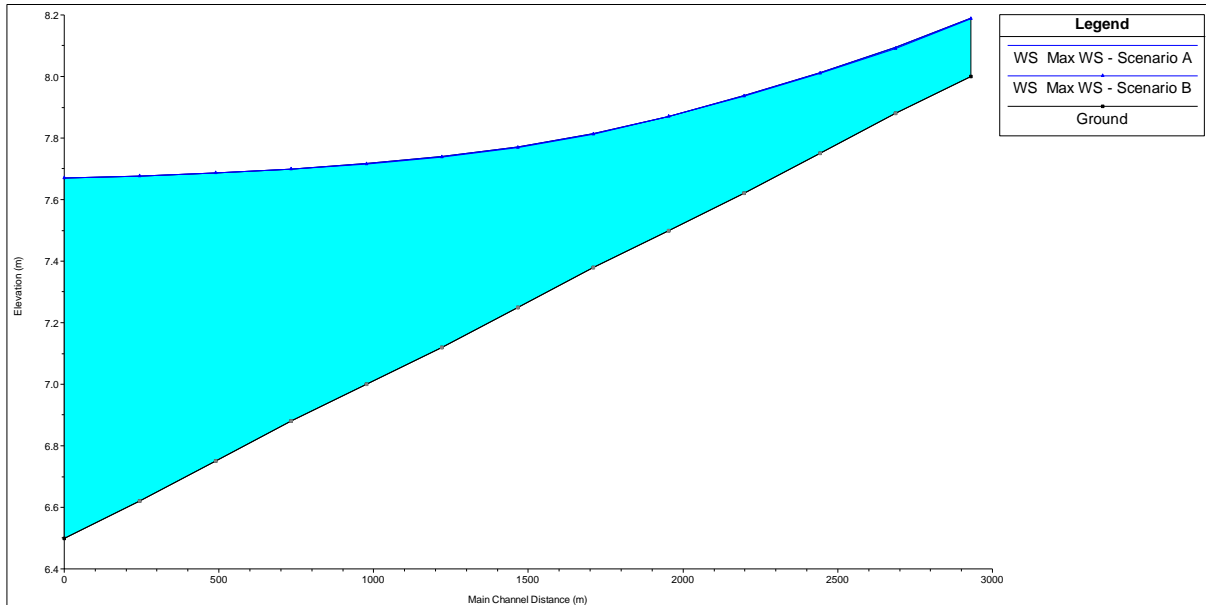


Figura 53: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova nel Casale.

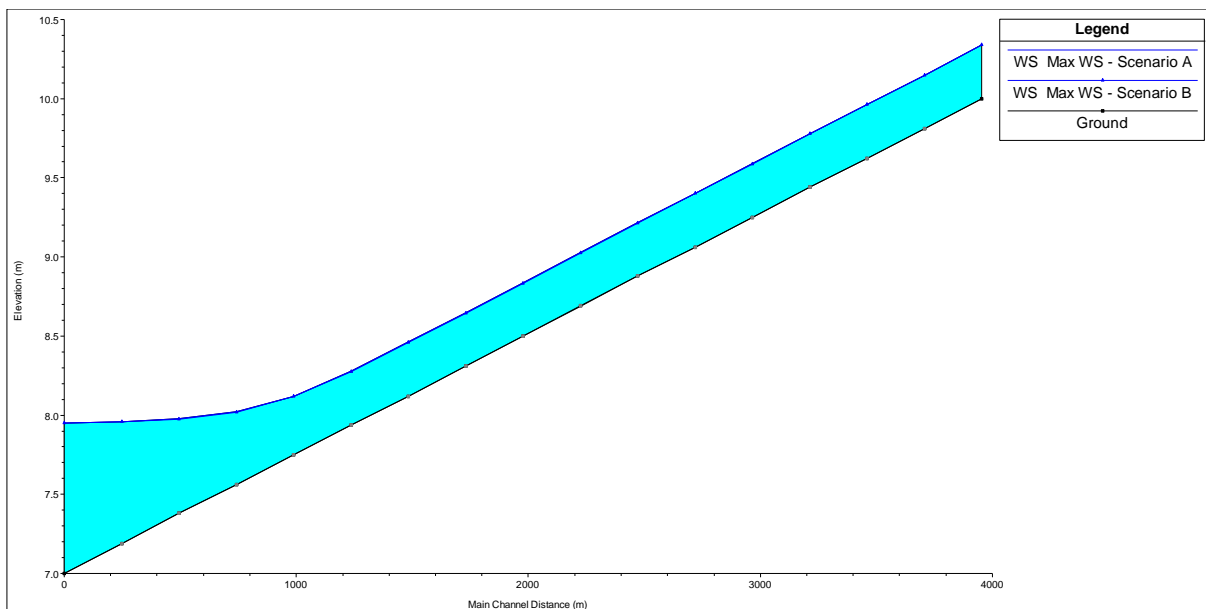


Figura 54: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Ascensione.

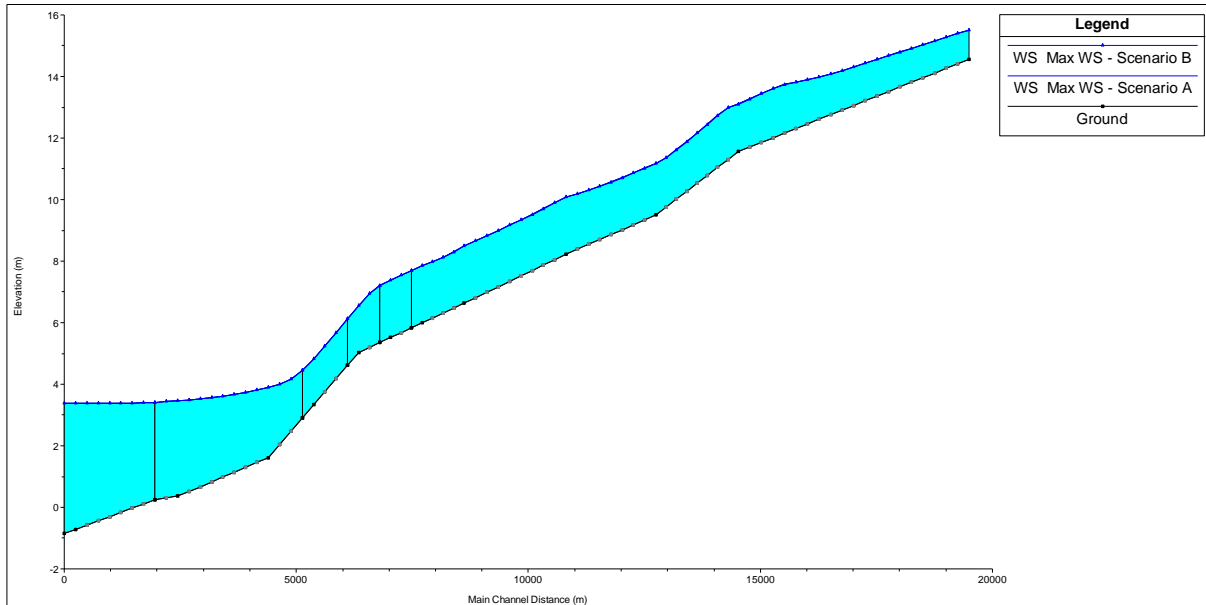


Figura 55: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Arginello.

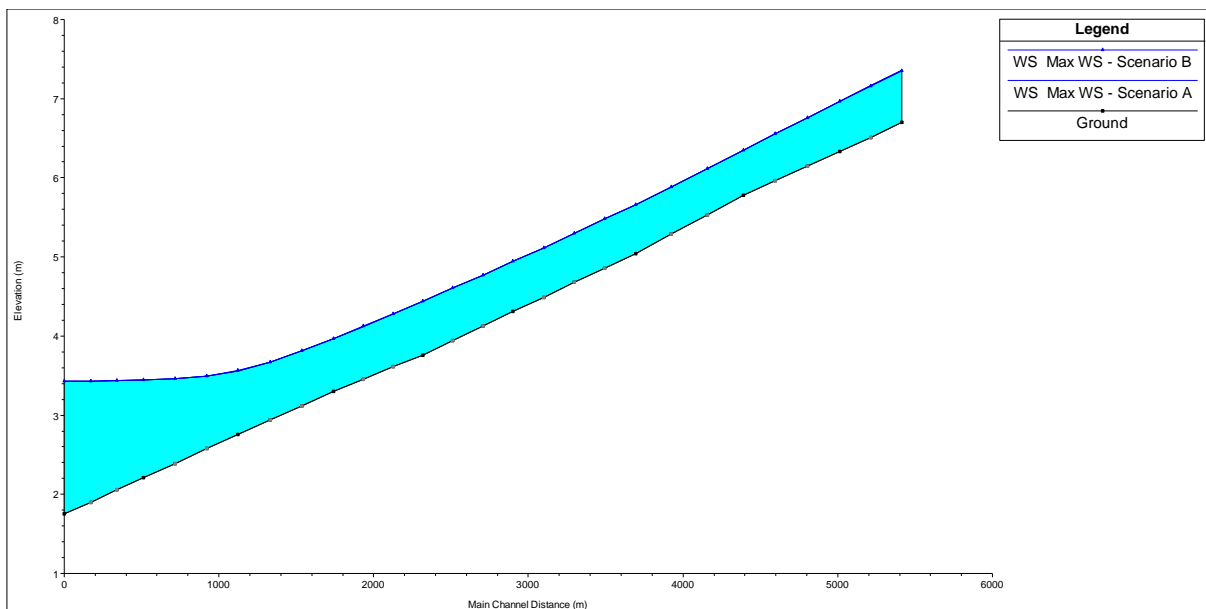


Figura 56: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Runzi.

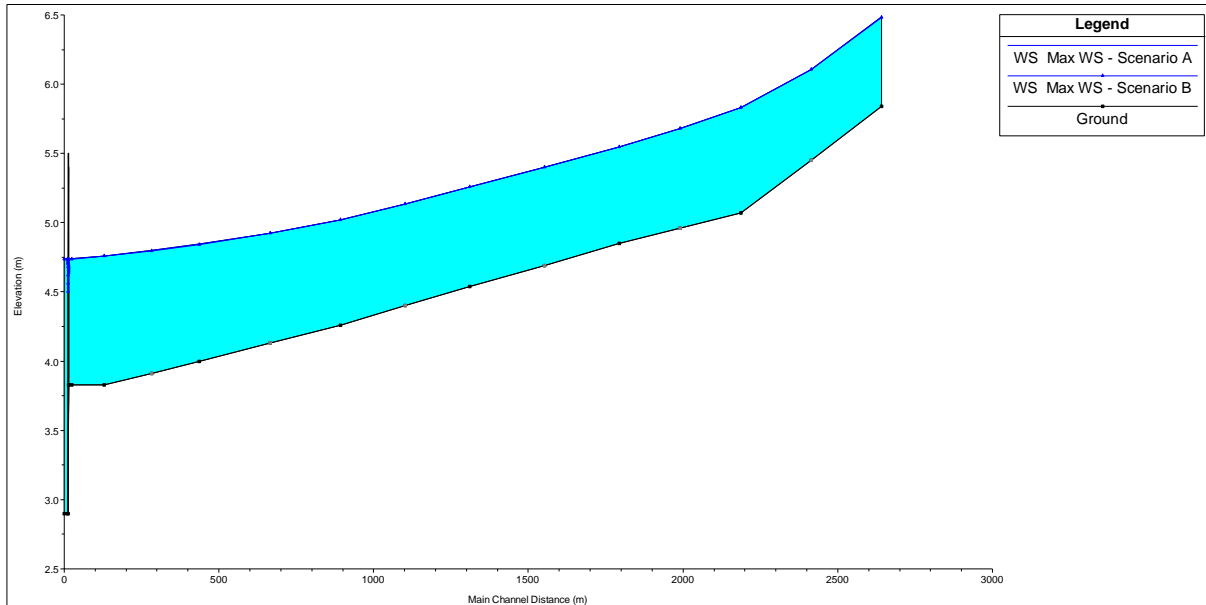


Figura 57: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Santa Lucia.

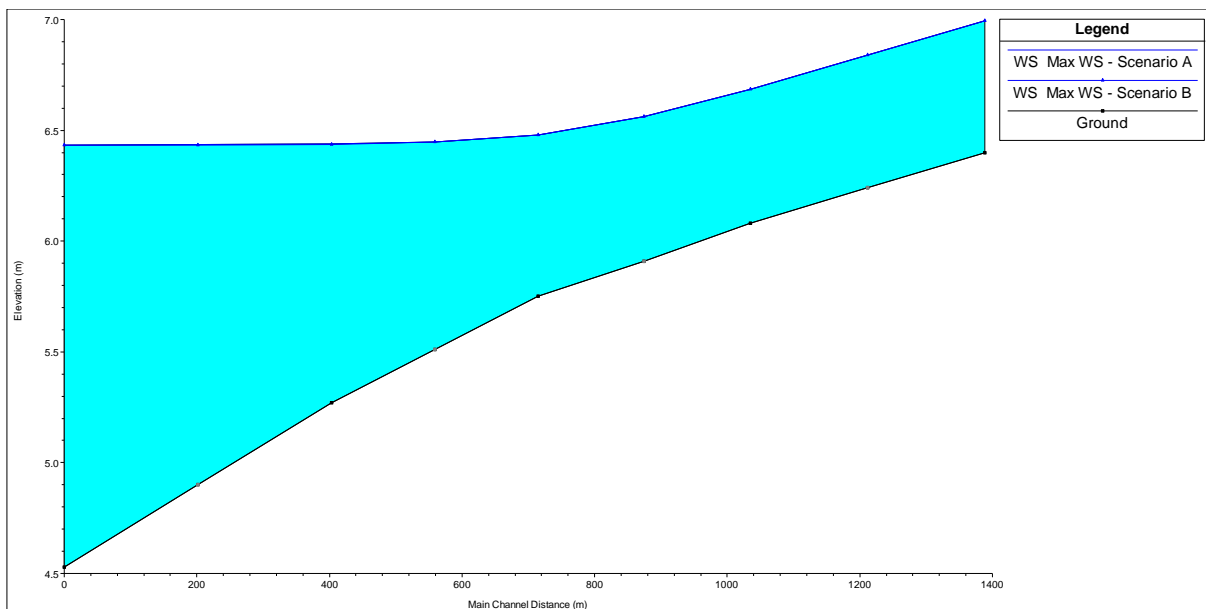


Figura 58: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Frassona Maggiore.

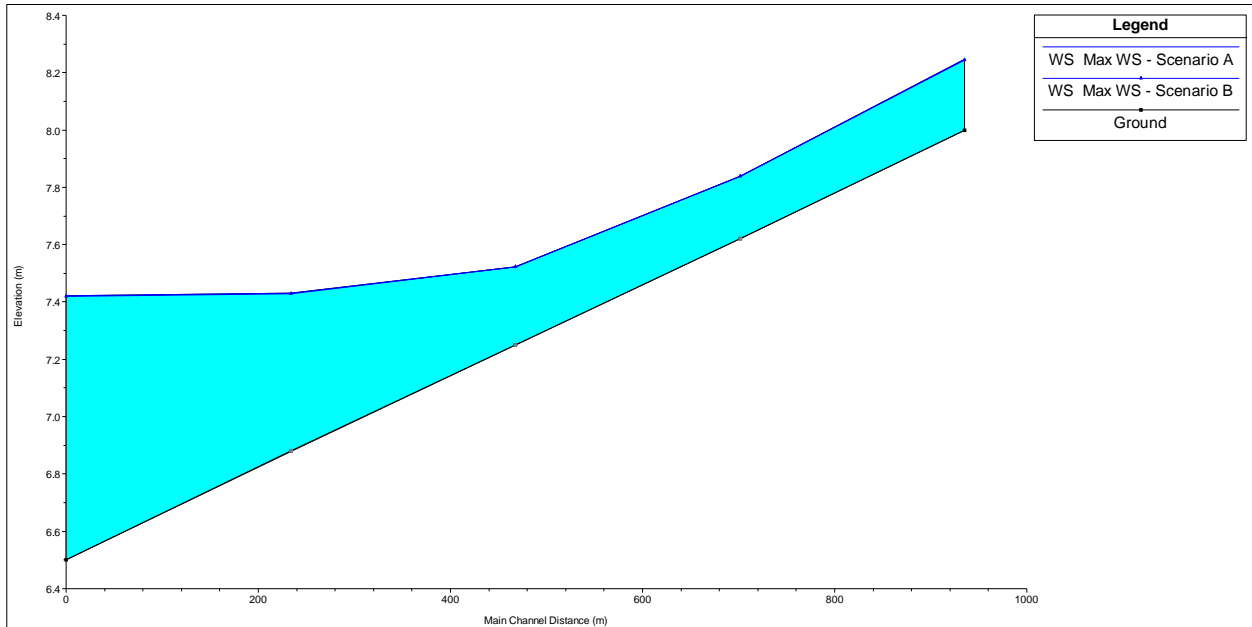


Figura 59: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Cocorre.

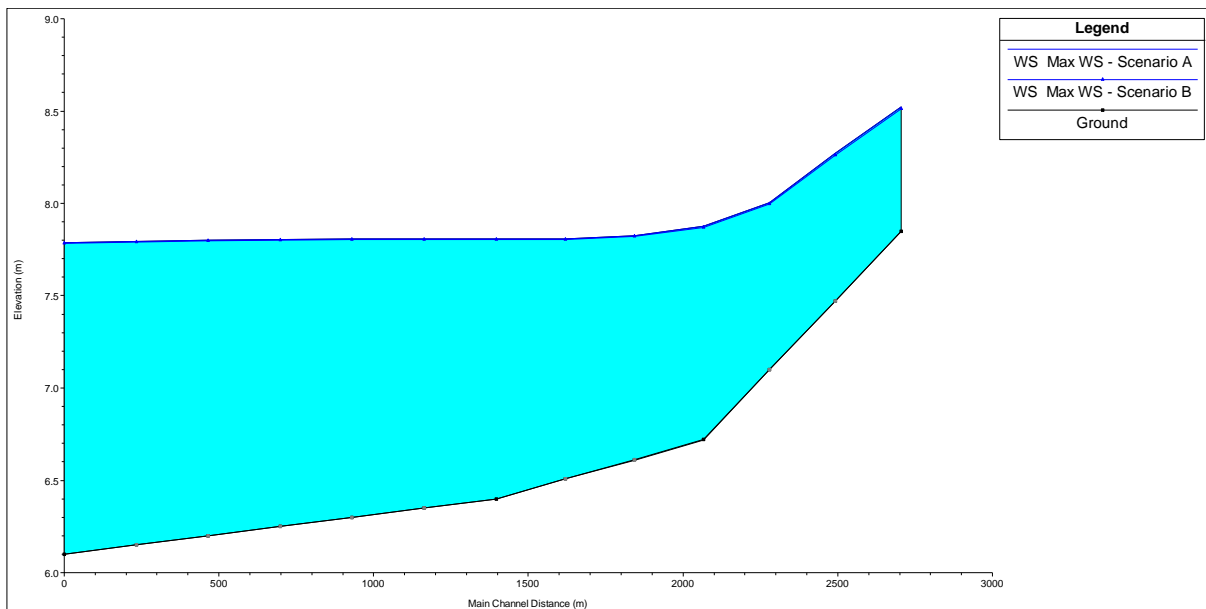


Figura 60: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Sant'Antonio.

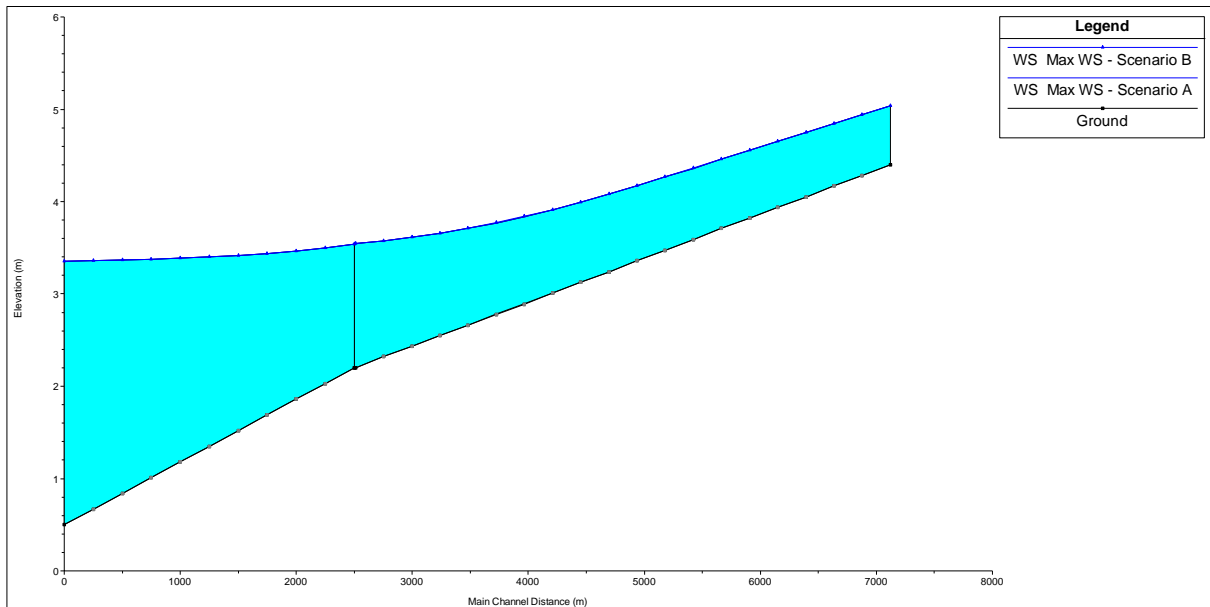


Figura 61: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Fusignano.

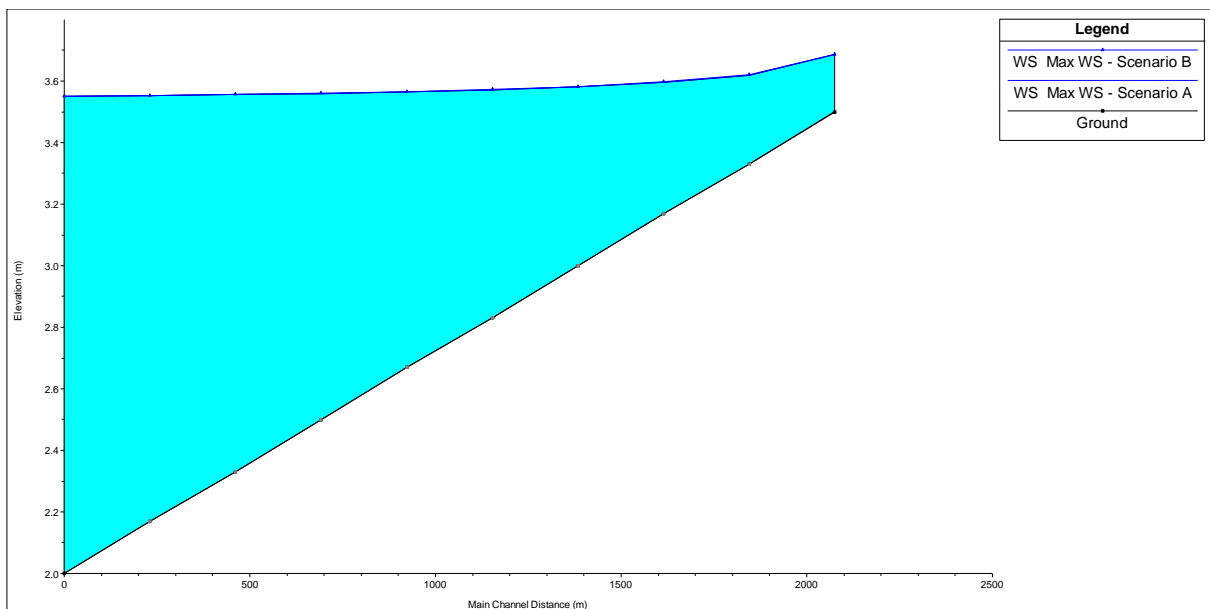


Figura 62: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|-----------|------------------|------------------|
| Alfonsine | -0.1 | 0.0 |

Tabella 28: Variazioni rispetto ai livelli massimi lungo il canale Alfonsine.

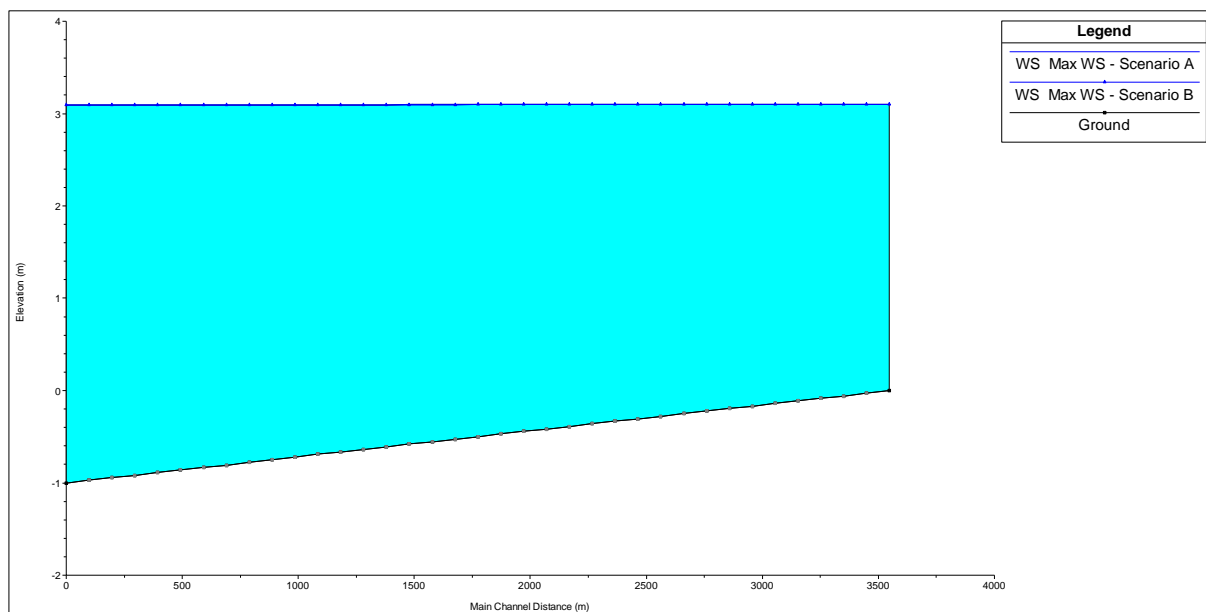


Figura 63: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Alfonsine.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|---------------|------------------|------------------|
| Fosso Vecchio | -0.2 | 0.2 |
| Fosso Vetro | 0.0 | 0.2 |
| Fosso Munio | -1.2 | 0.2 |

Tabella 29: Variazioni rispetto ai livelli massimi nei canali del bacino Fosso Vecchio.

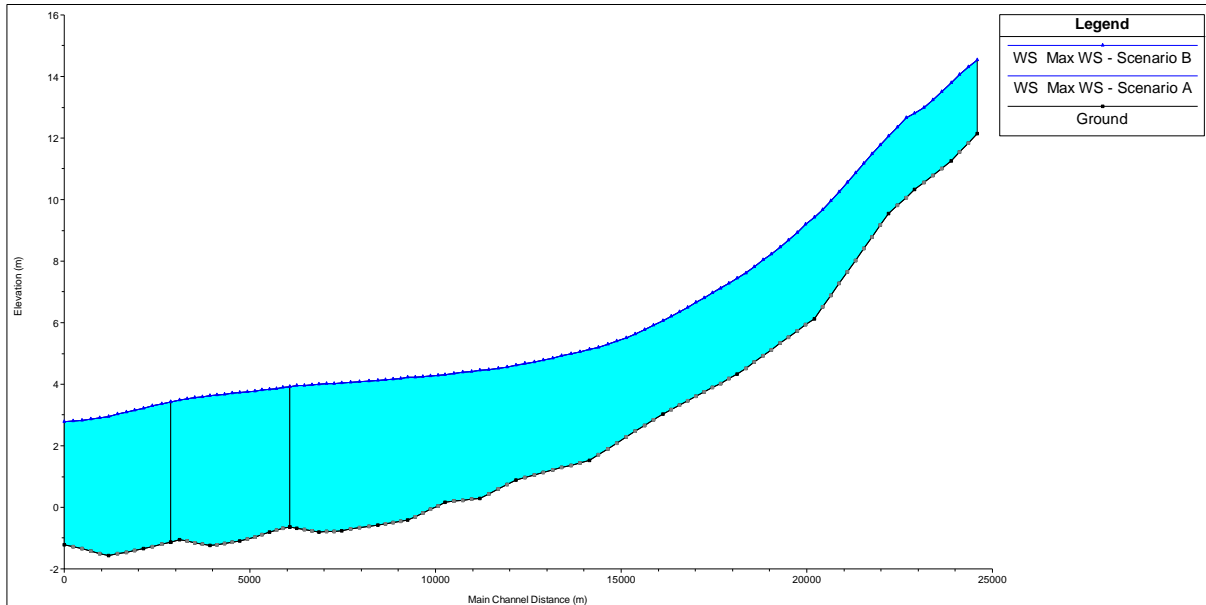


Figura 64: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vecchio.

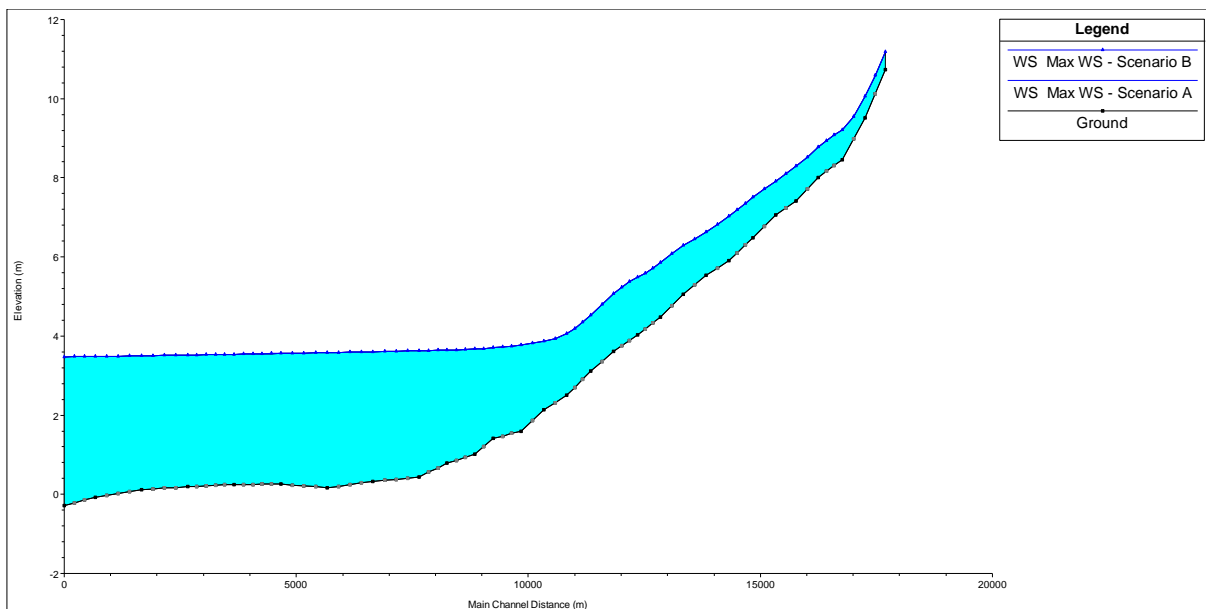


Figura 65: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vetro.

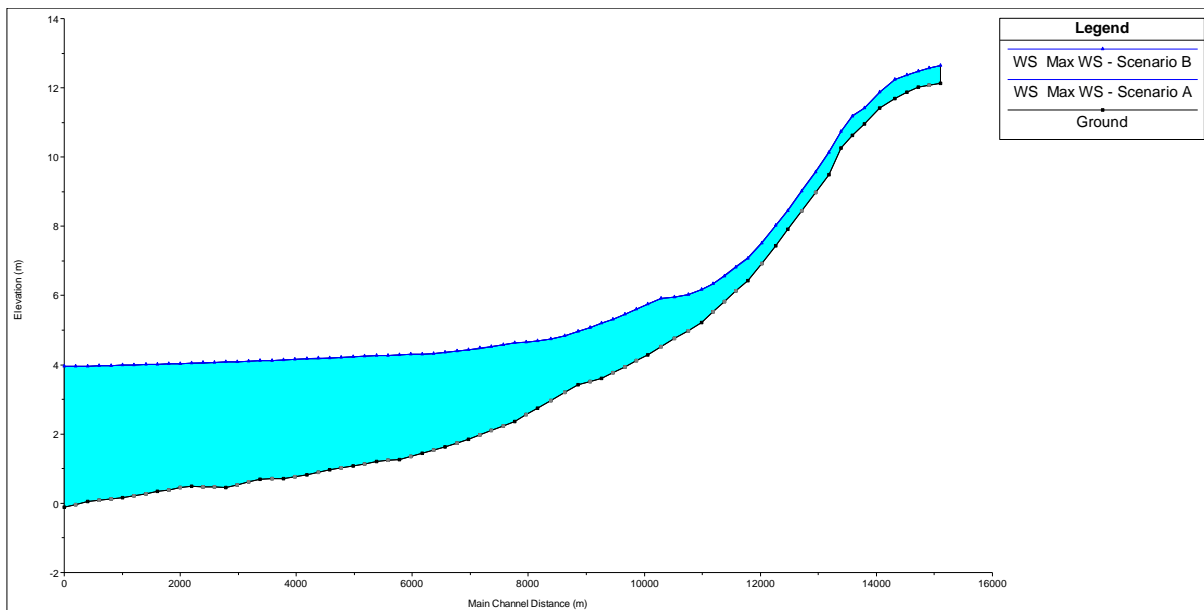


Figura 66: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Munio.

6.2.4.2 Scenario C

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|-------------|------------------|------------------|
| Destra Reno | 0.0 | 0.1 |

Tabella 30: Variazioni rispetto ai livelli massimi lungo il canale Destra Reno.

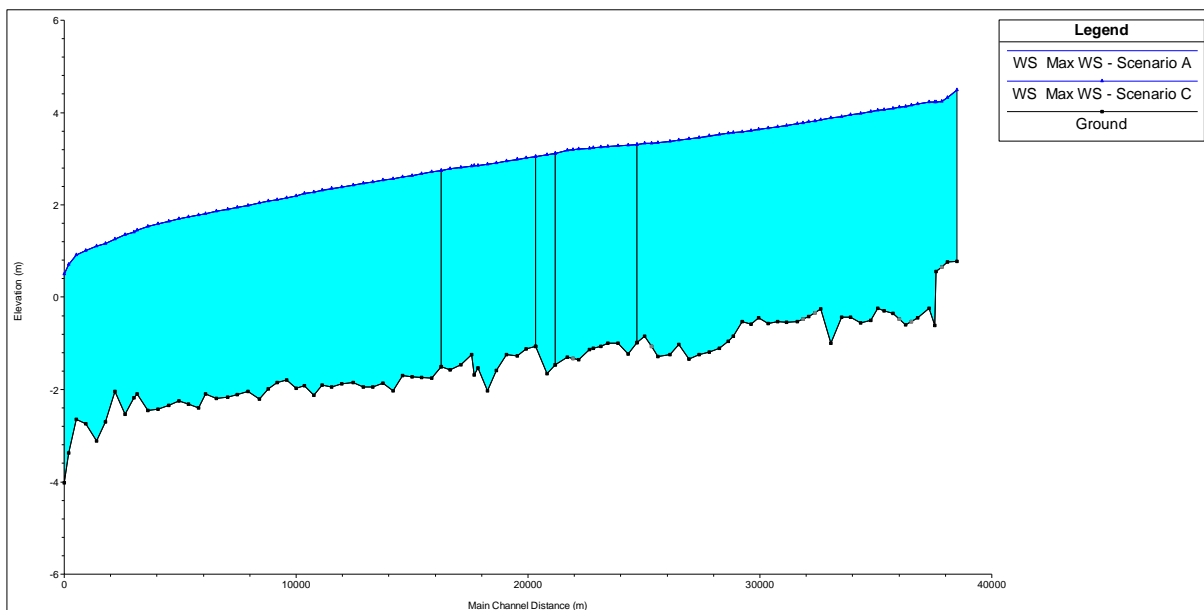


Figura 67: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Destra Reno.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|----------------|------------------|------------------|
| Nuovo Tratturo | -0.1 | 0.1 |
| Traversagno | -0.1 | 0.0 |

Tabella 31: Variazioni rispetto ai livelli massimi nei canali del bacino Nuovo Tratturo.

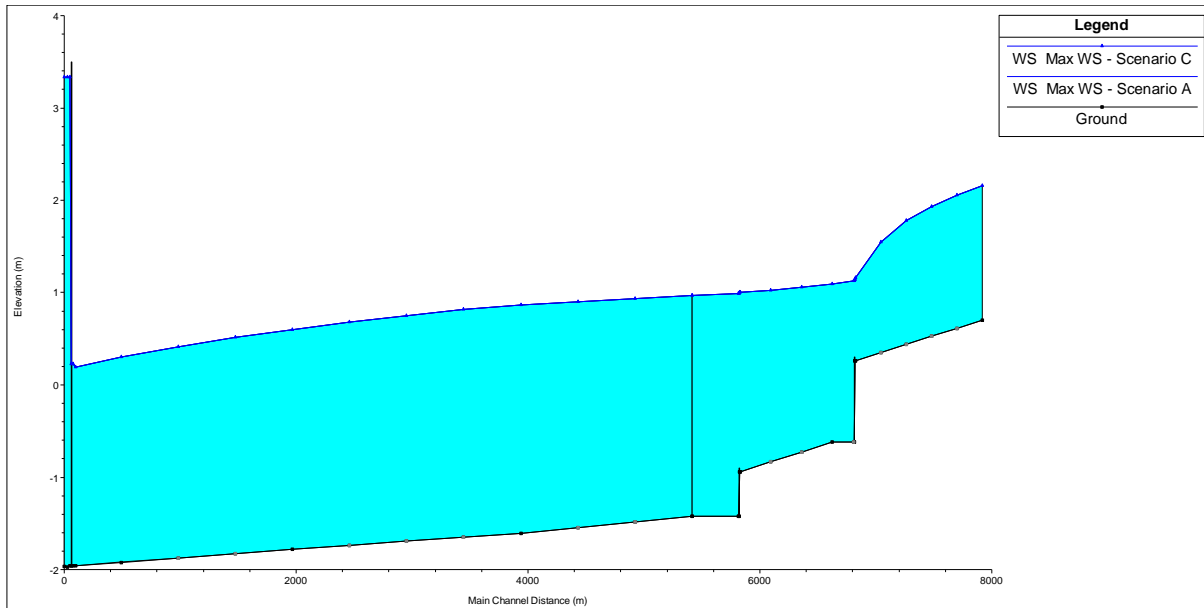


Figura 68: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Nuovo Tratturo.

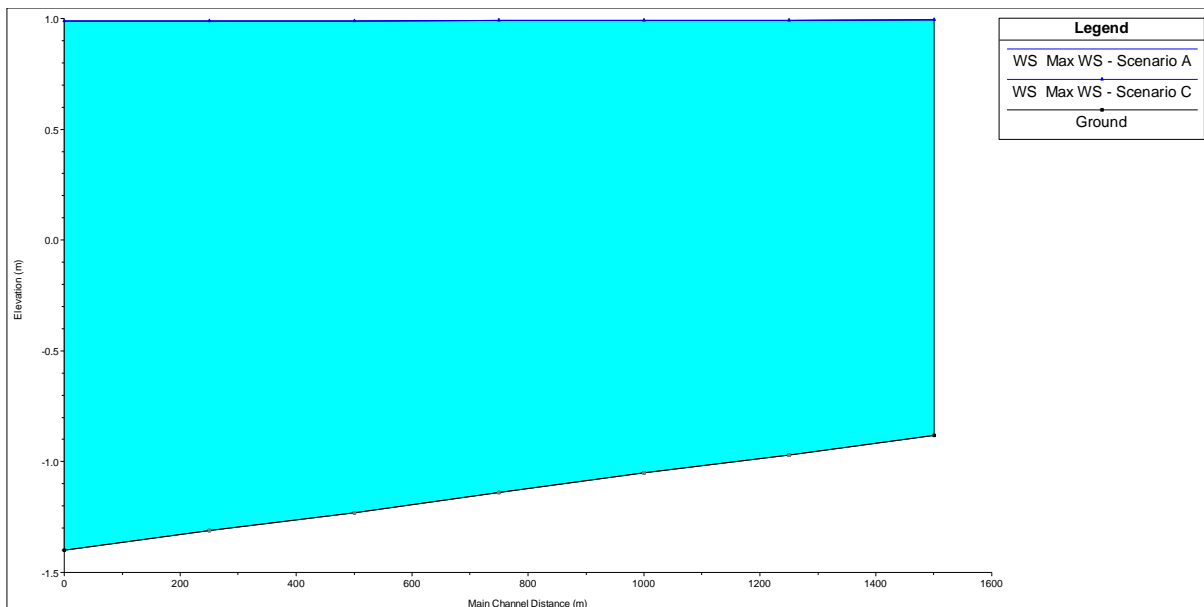


Figura 69: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Traversagno.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|-----------------------------|------------------|------------------|
| Canal Vela | 0.0 | 0.1 |
| Tratturo | -0.2 | 0.3 |
| Casale | -0.1 | 0.2 |
| Fossatone di San Bernardino | 0.0 | 0.1 |
| Via Lunga a Ponente | 0.0 | 0.1 |
| Via Nuova nel Casale | 0.0 | 0.1 |
| Ascensione | 0.0 | 0.1 |
| Arginello | -0.5 | 0.5 |
| Menata di Runzi | 0.0 | 0.1 |
| Santa Lucia | 0.0 | 0.1 |
| Frassona Maggiore | 0.0 | 0.2 |
| Cocorre | 0.0 | 0.1 |
| Sant'Antonio | -0.4 | 0.1 |
| Menata di Fusignano | 0.0 | 0.1 |
| Via Nuova | 0.0 | 0.1 |

Tabella 32: Variazioni rispetto ai livelli massimi nei canali del bacino Canal Vela.

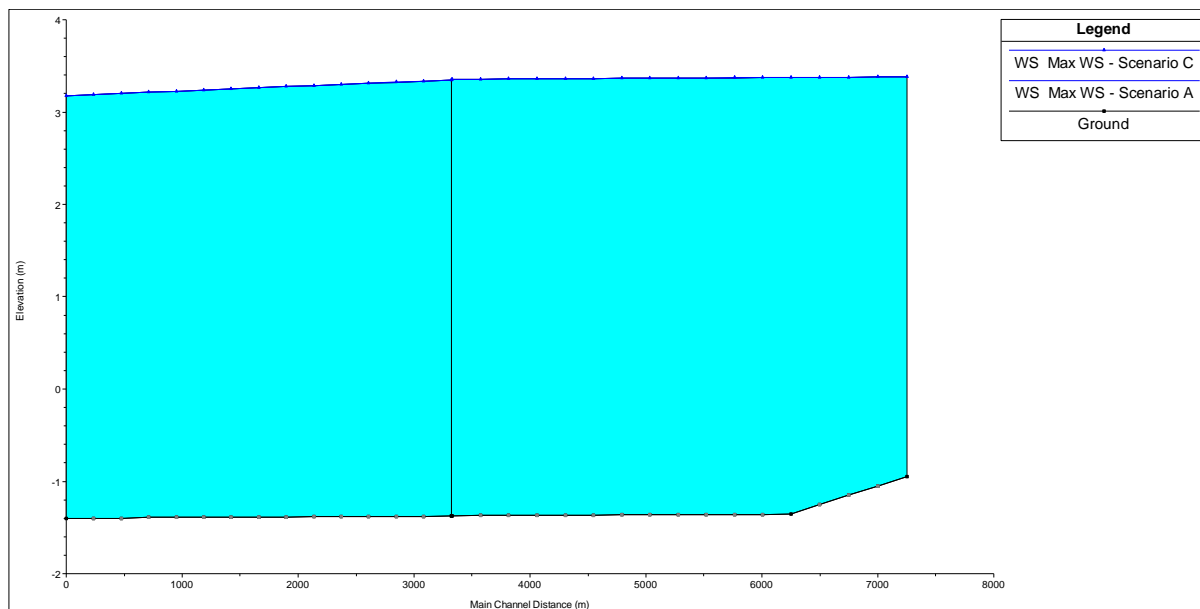


Figura 70: Profilo dei livelli massimi lungo il Canal Vela.

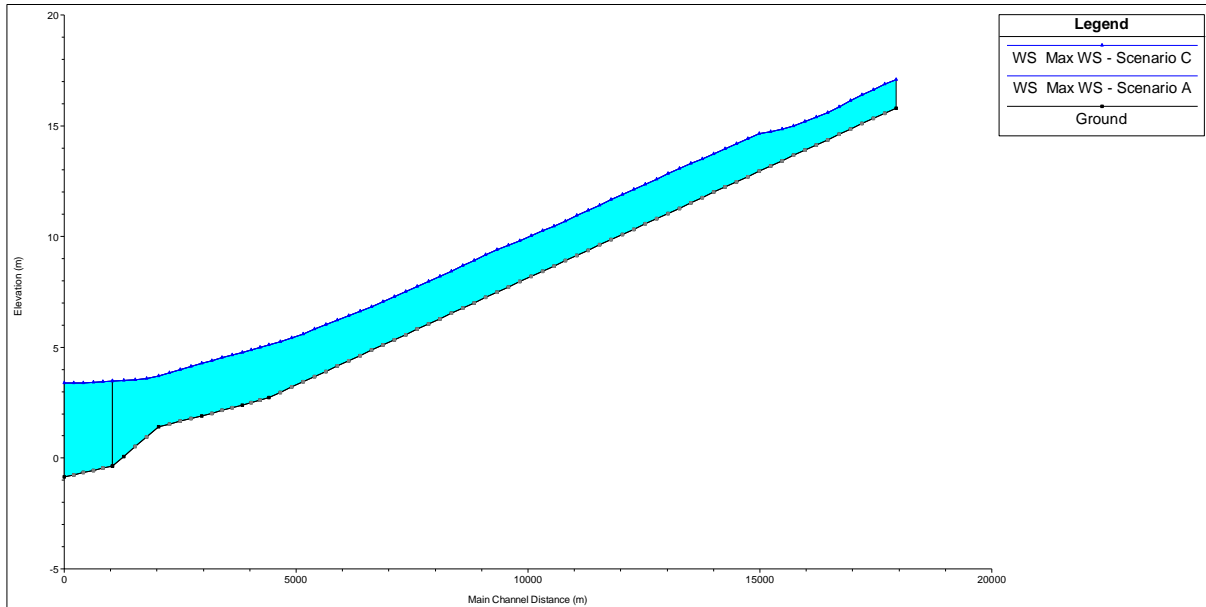


Figura 71: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Tratturo.

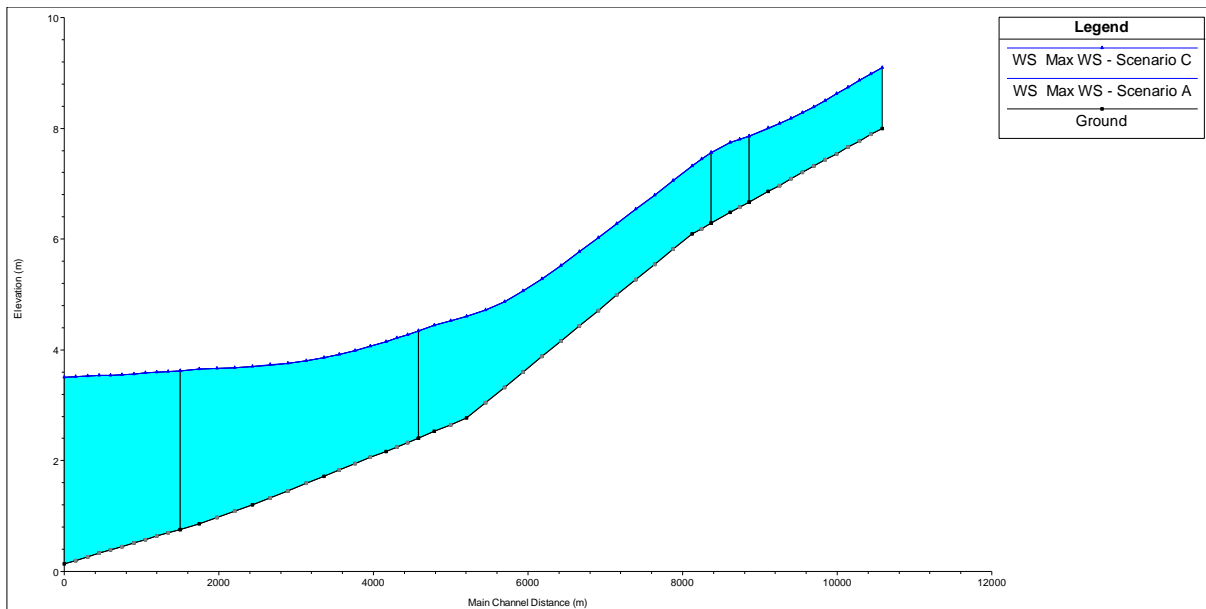


Figura 72: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Casale.

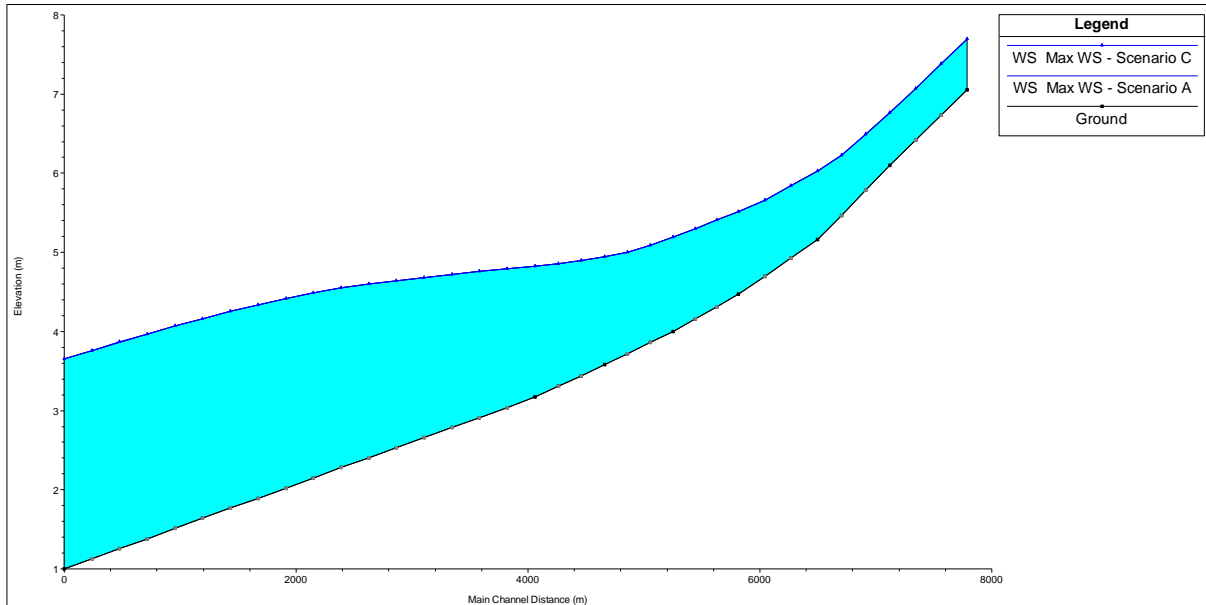


Figura 73: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fossatone di San Bernardino.

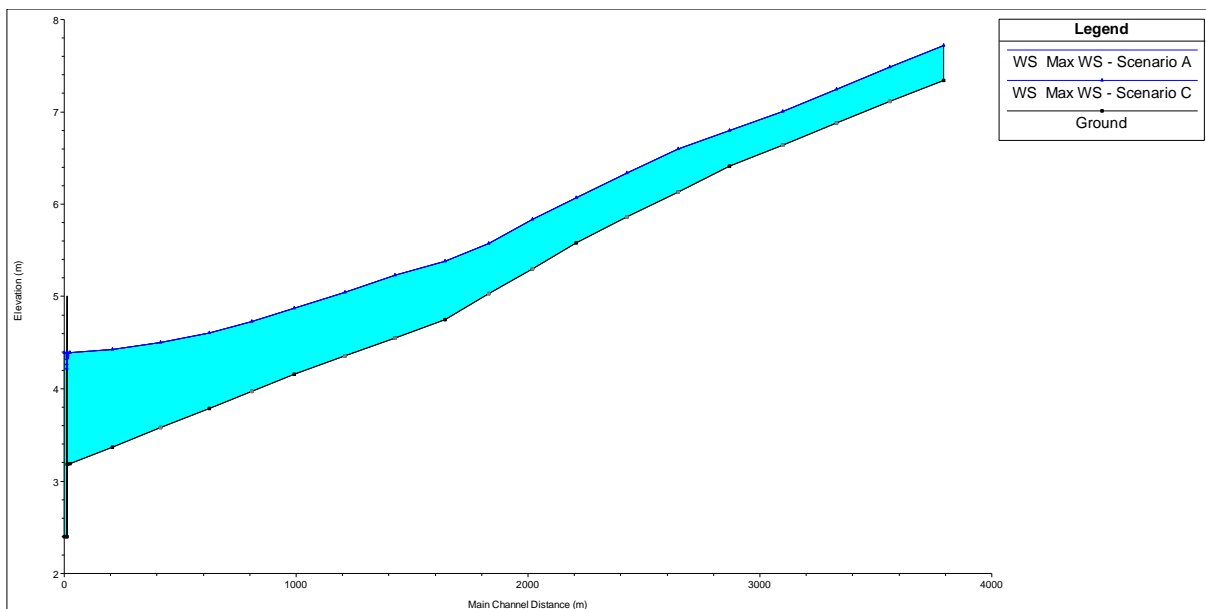


Figura 74: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Lunga a Ponente.

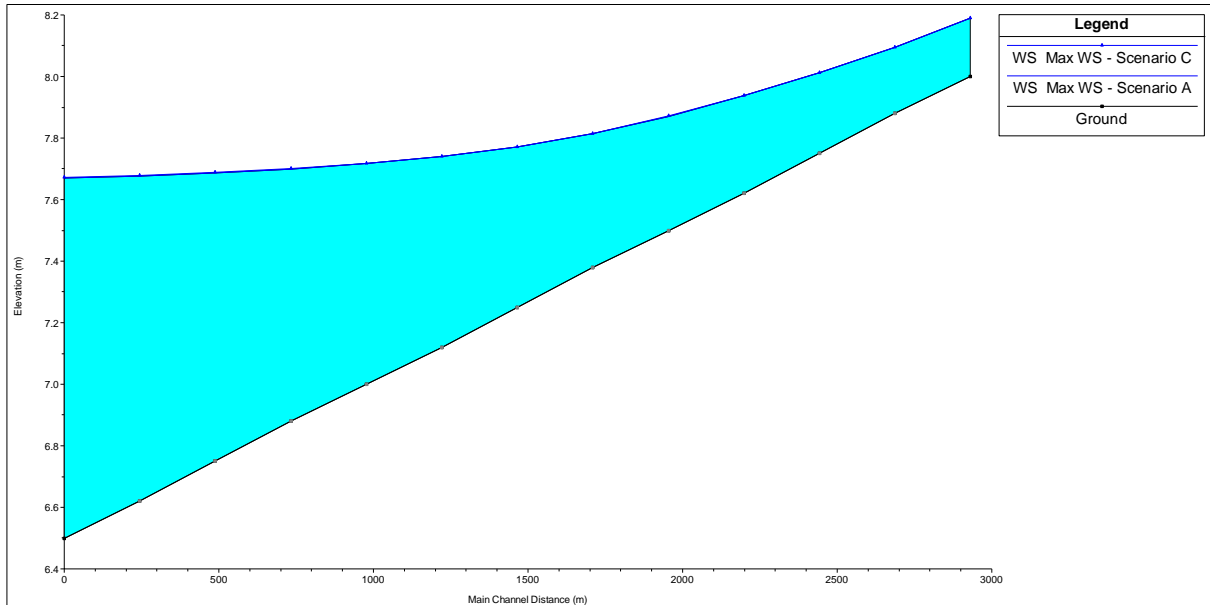


Figura 75: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova nel Casale.

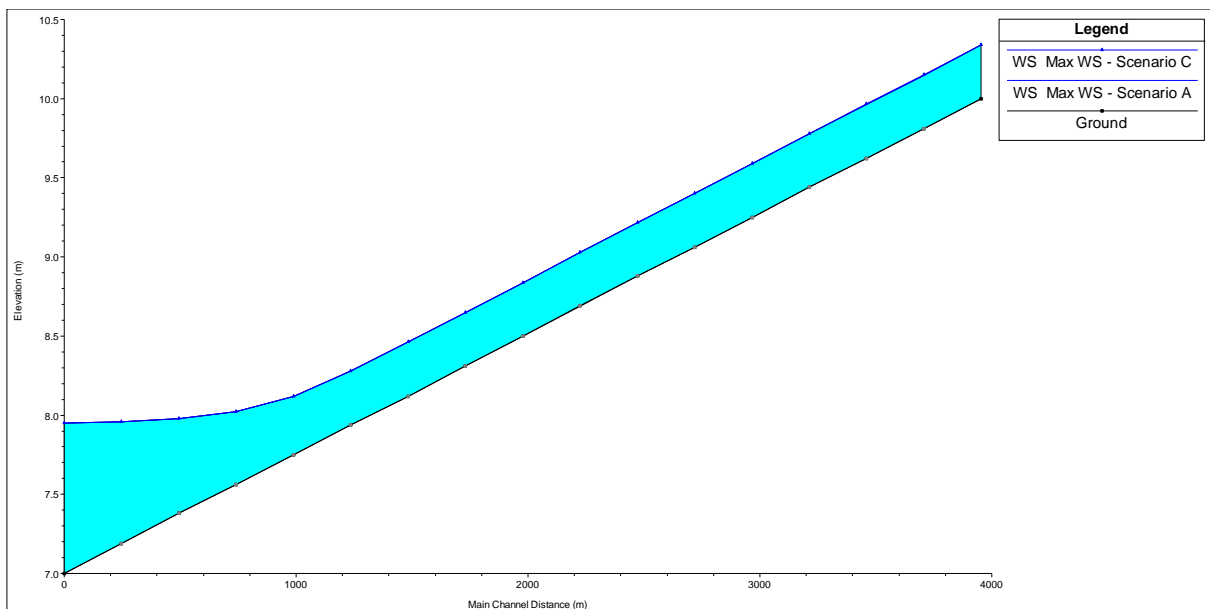


Figura 76: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Ascensione.

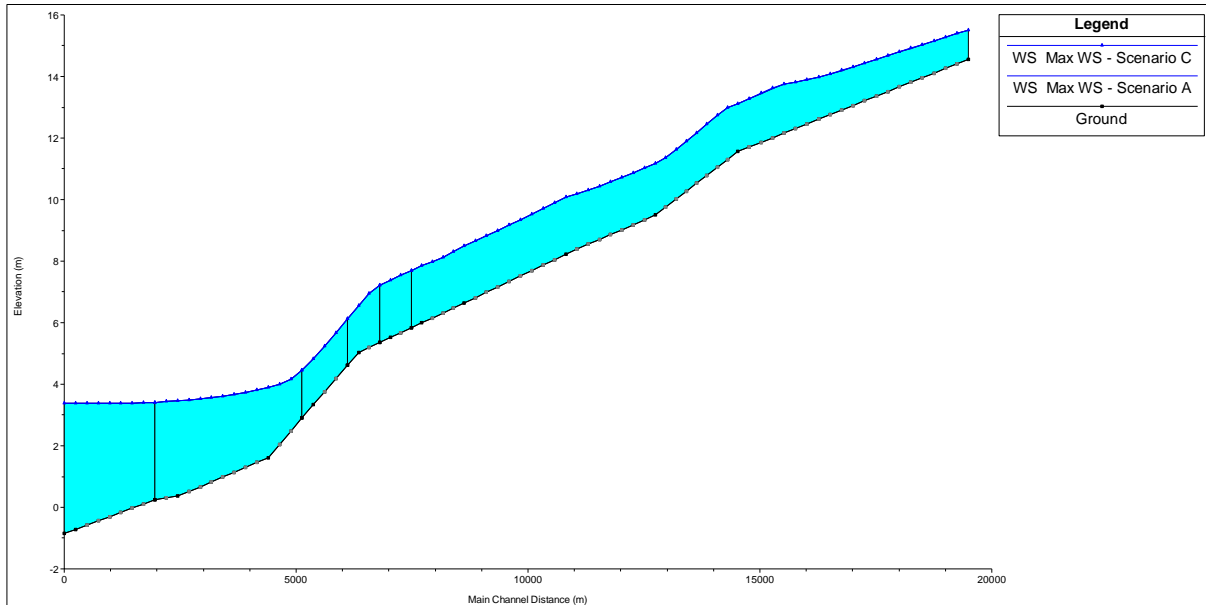


Figura 77: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Arginello.

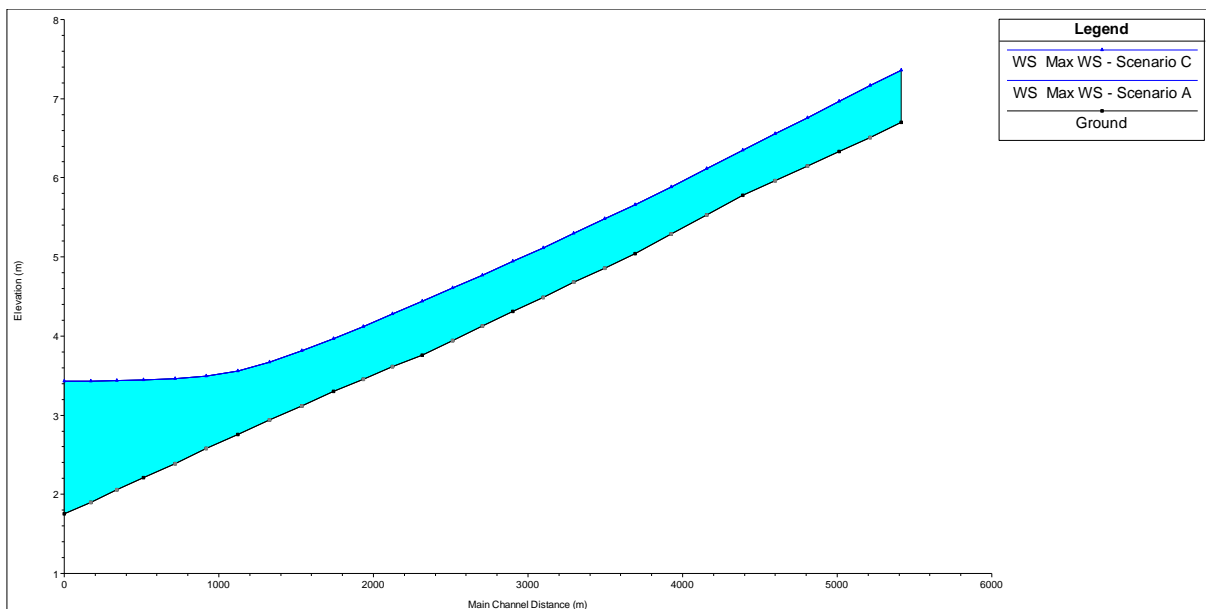


Figura 78: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Runzi.

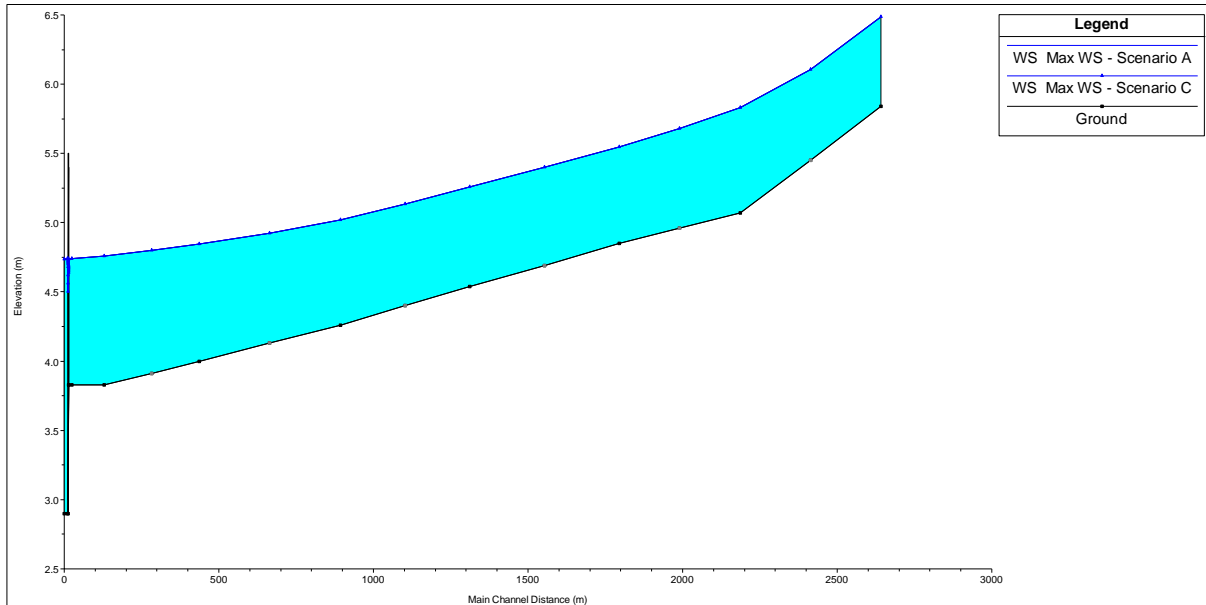


Figura 79: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Santa Lucia.

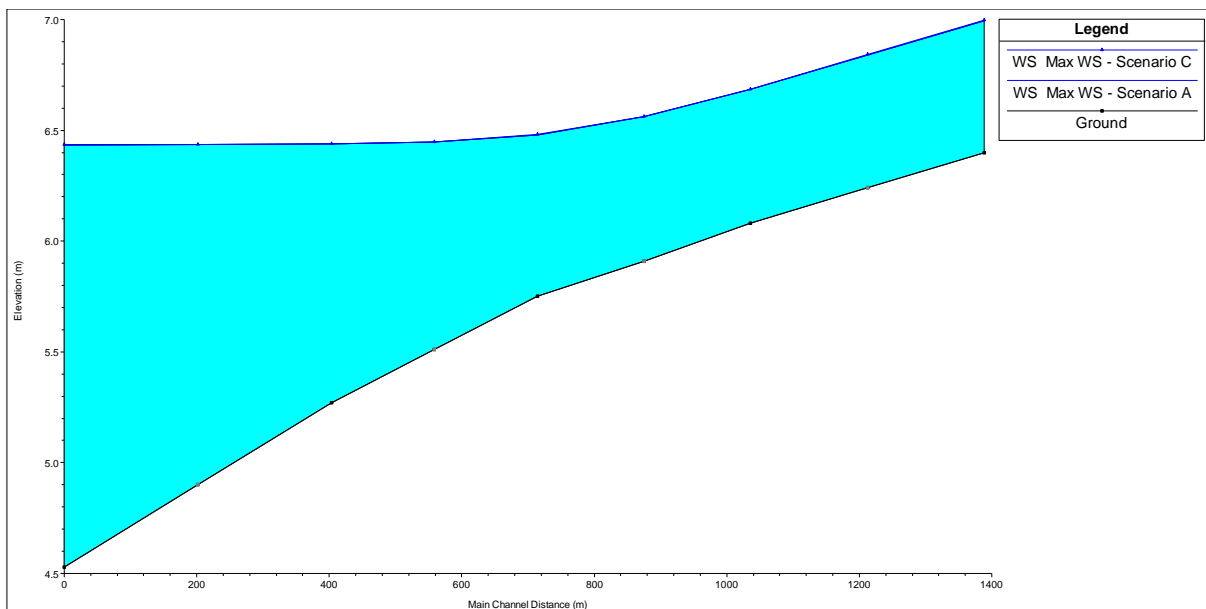


Figura 80: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Frassona Maggiore.

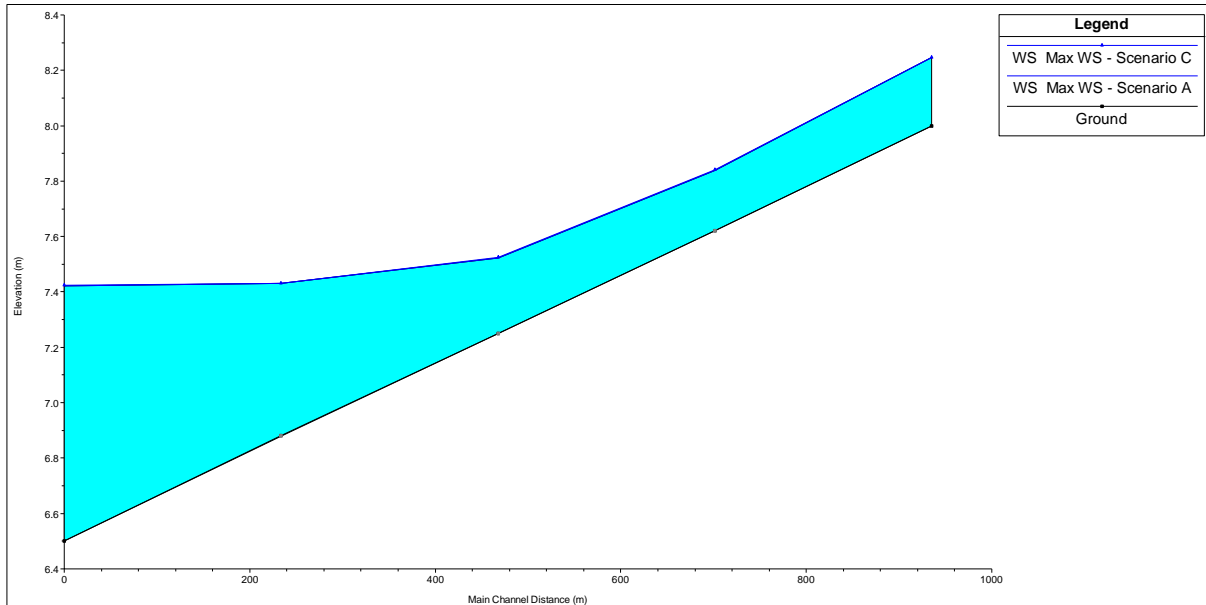


Figura 81: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Cocorre.

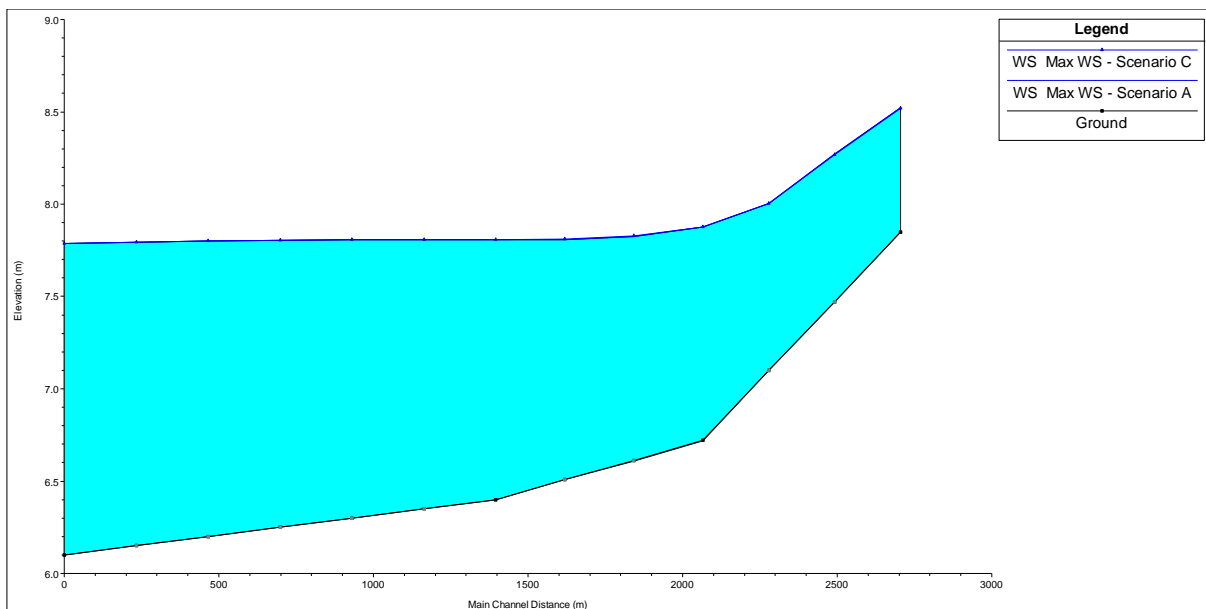


Figura 82: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Sant'Antonio.

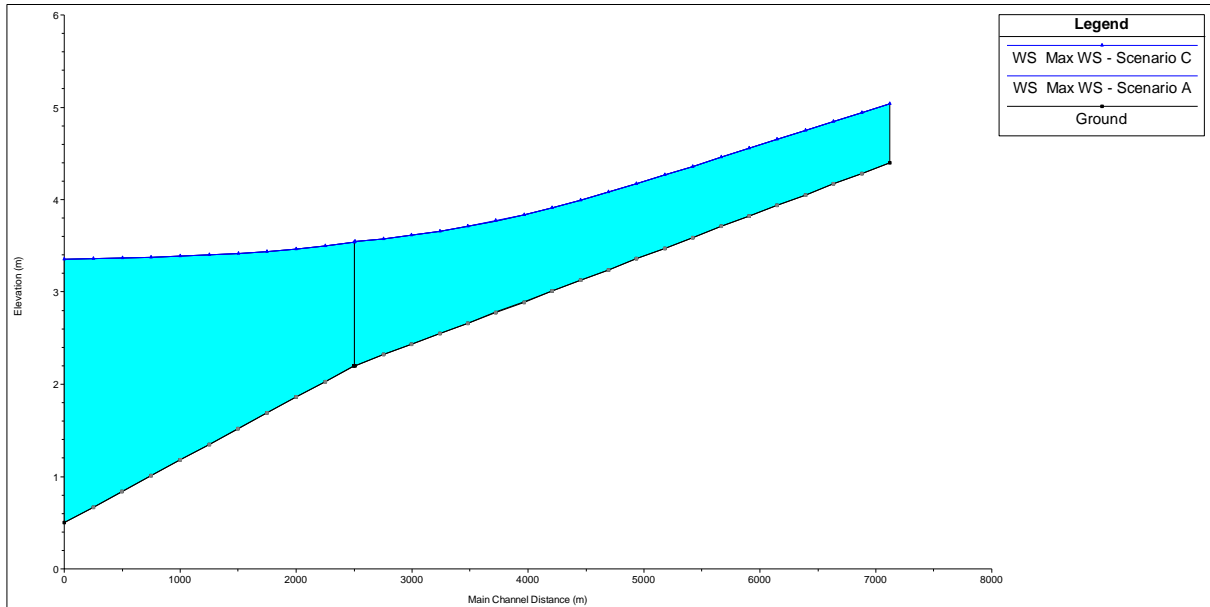


Figura 83: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Fusignano.

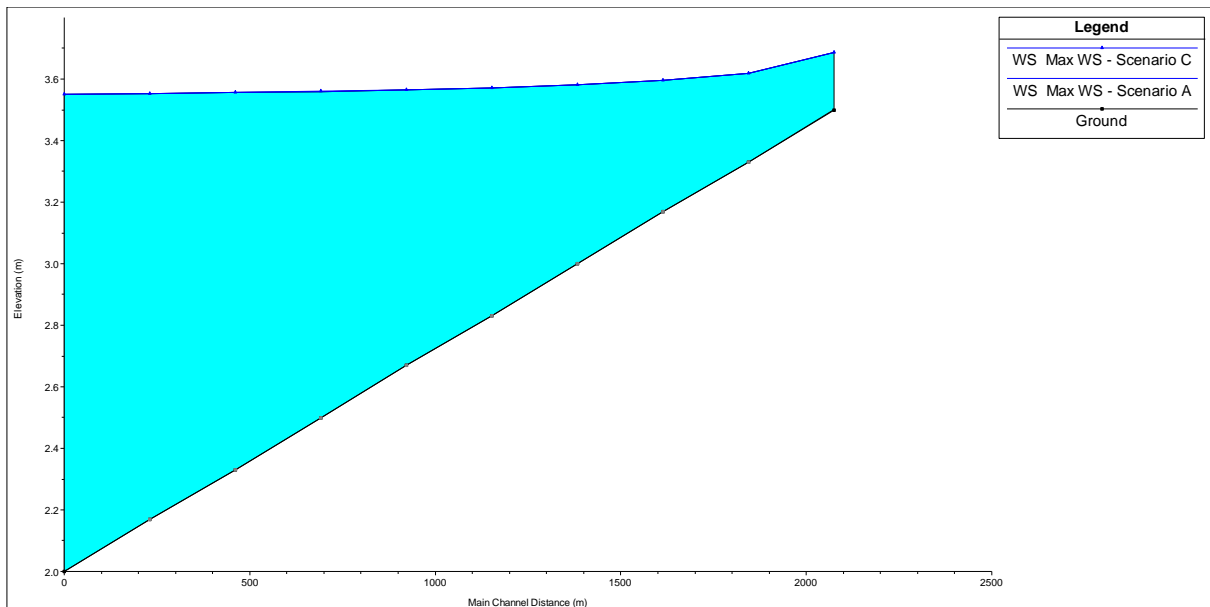


Figura 84: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|-----------|------------------|------------------|
| Alfonsine | -0.1 | 0.0 |

Tabella 33: Variazioni rispetto ai livelli massimi lungo il canale Alfonsine.

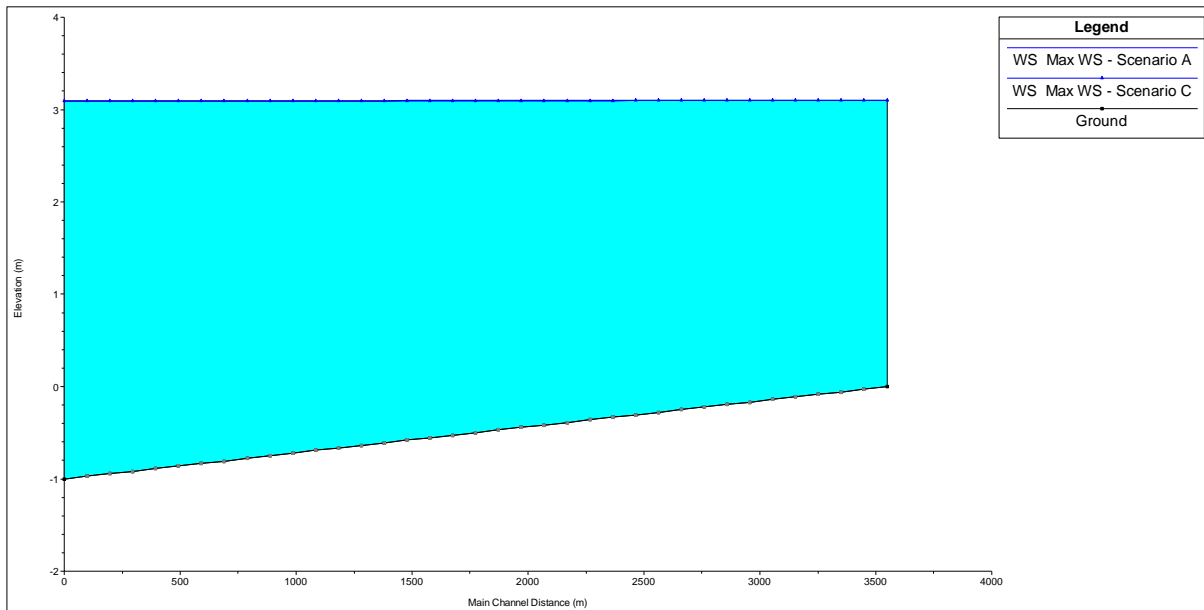


Figura 85: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Alfonsine.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|---------------|------------------|------------------|
| Fosso Vecchio | -0.1 | 0.2 |
| Fosso Vetro | 0.0 | 0.2 |
| Fosso Munio | -0.6 | 0.3 |

Tabella 34: Variazioni rispetto ai livelli massimi nei canali del bacino Fosso Vecchio.

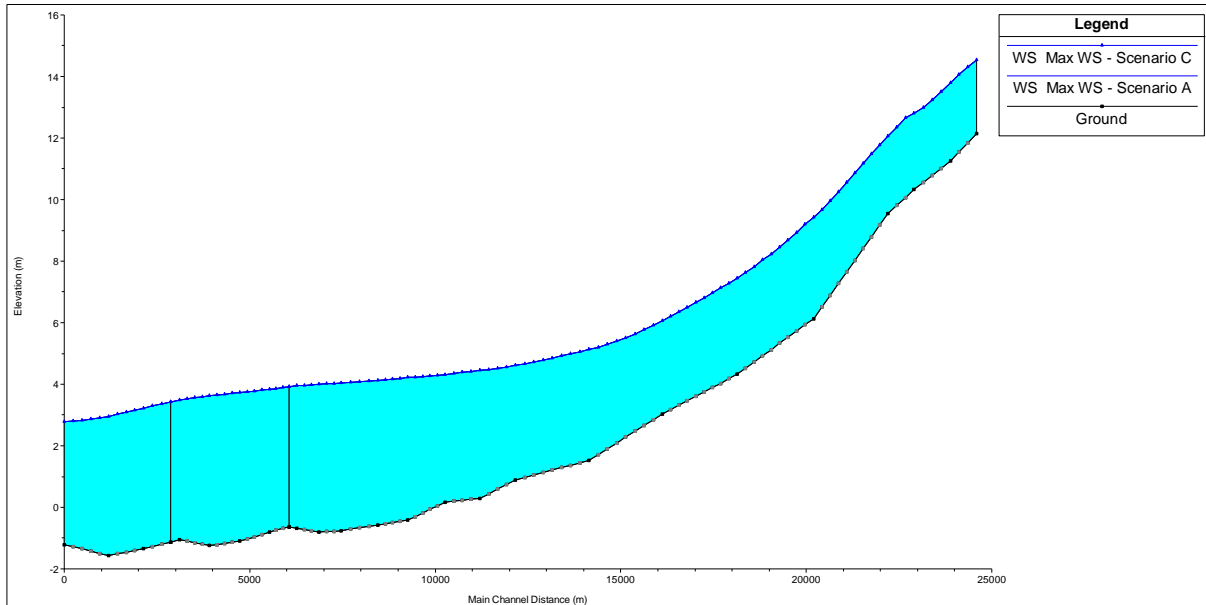


Figura 86: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vecchio.

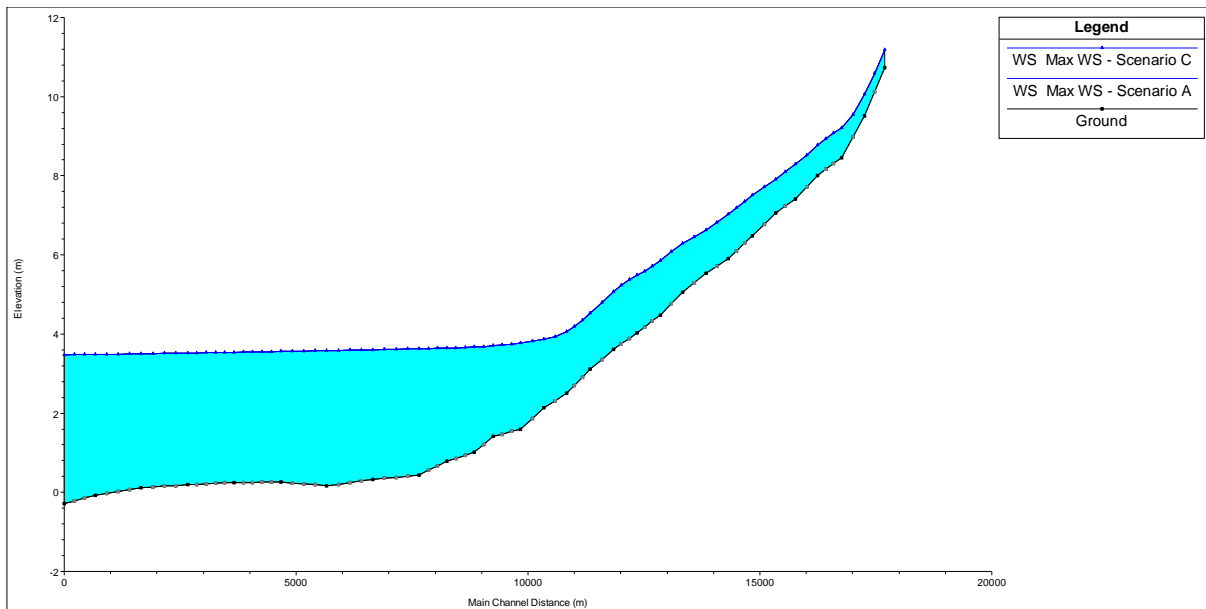


Figura 87: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vetro.

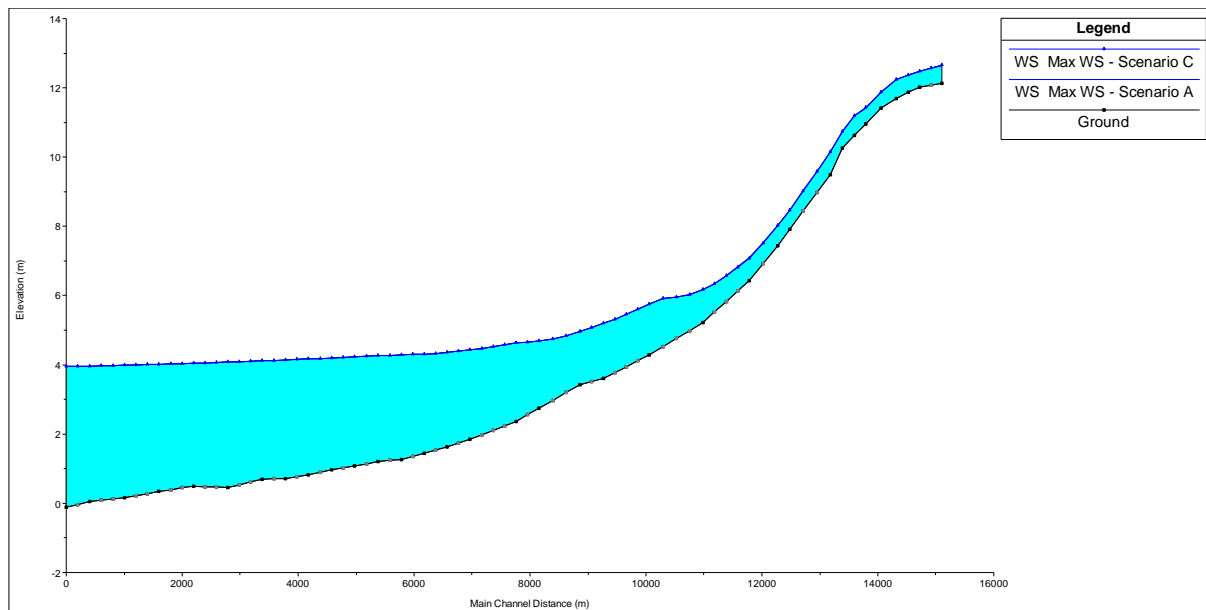


Figura 88: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Munio.

6.2.4.3 Scenario D

In Figura 89 sono riportate le variazioni di livello idrico lungo la rete scolante: l'innalzamento dei livelli idrici è pari, o inferiore, all'innalzamento del suolo, per cui il franco di bonifica rimane invariato o al più aumenta. In particolare, gli innalzamenti e abbassamenti massimi sono localizzati in corrispondenza dei campi di Alfonsine e Longanesi, rispettivamente: l'effetto del solo campo di San Potito è trascurabile.

Le velocità massime all'interno dei canali hanno variazioni non apprezzabili, inferiori a 1 cm/s, in seguito alle modifiche indotte dalla subsidenza.

L'impianto idrovoro si muove solidamente con il terreno, per cui il livello di avvio e stacco delle pompe si alza di 5 cm, come i livelli monte valle impianto durante l'evento di piena, per cui non si hanno apprezzabili variazioni di funzionamento delle pompe. L'effetto della subsidenza non modifica i volumi d'acqua in arrivo all'impianto idrovoro, non modificandosi sostanzialmente nemmeno i dislivelli tra monte e valle, il consumo di energia si può ritenere del tutto simile a quello della situazione attuale.

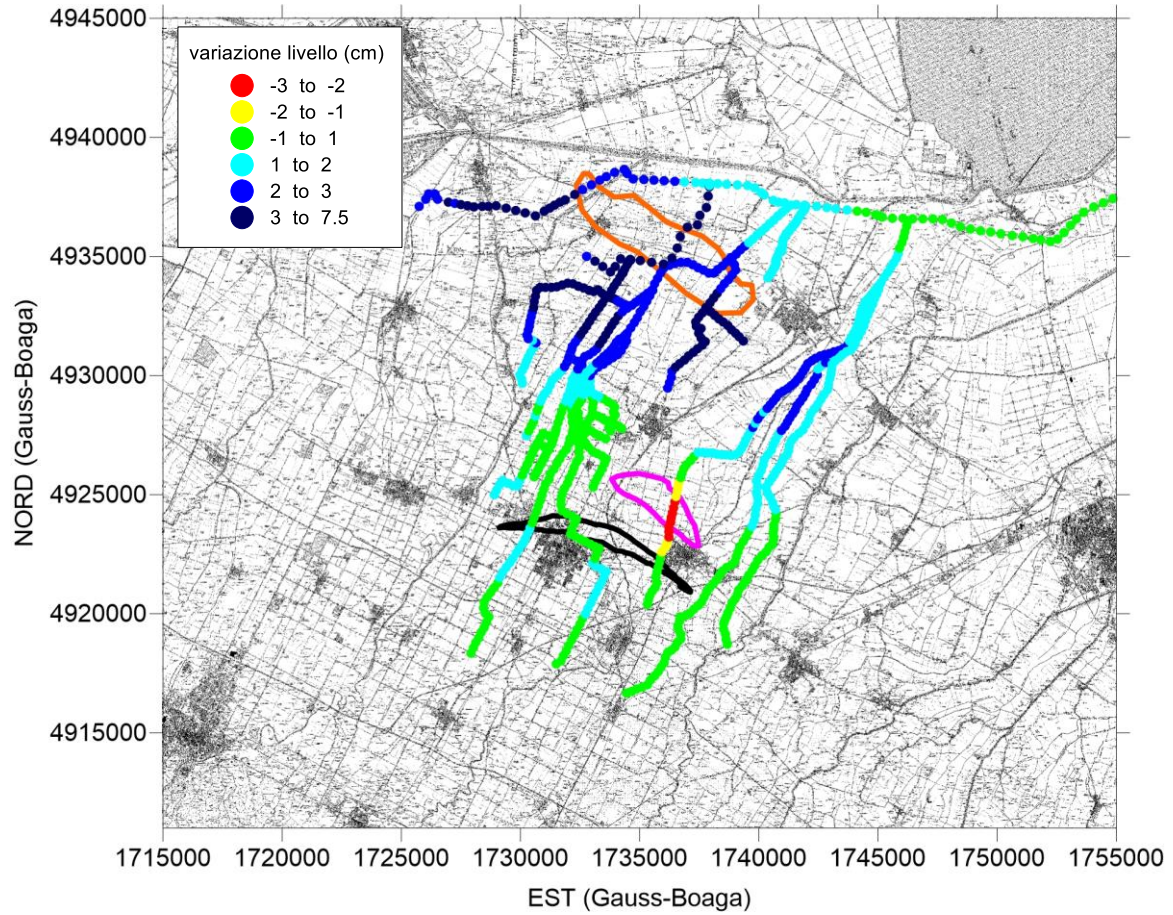


Figura 89: Variazione di livello idrico (cm) lungo la rete scolante nel modello HEC-RAS nello scenario D. Le tracce dei giacimenti di San Potito, Longanesi e Alfonsine sono evidenziate rispettivamente in nero, viola e arancione.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|-------------|------------------|------------------|
| Destra Reno | 0.0 | 3.2 |

Tabella 35: Variazioni rispetto ai livelli massimi lungo il canale Destra Reno.

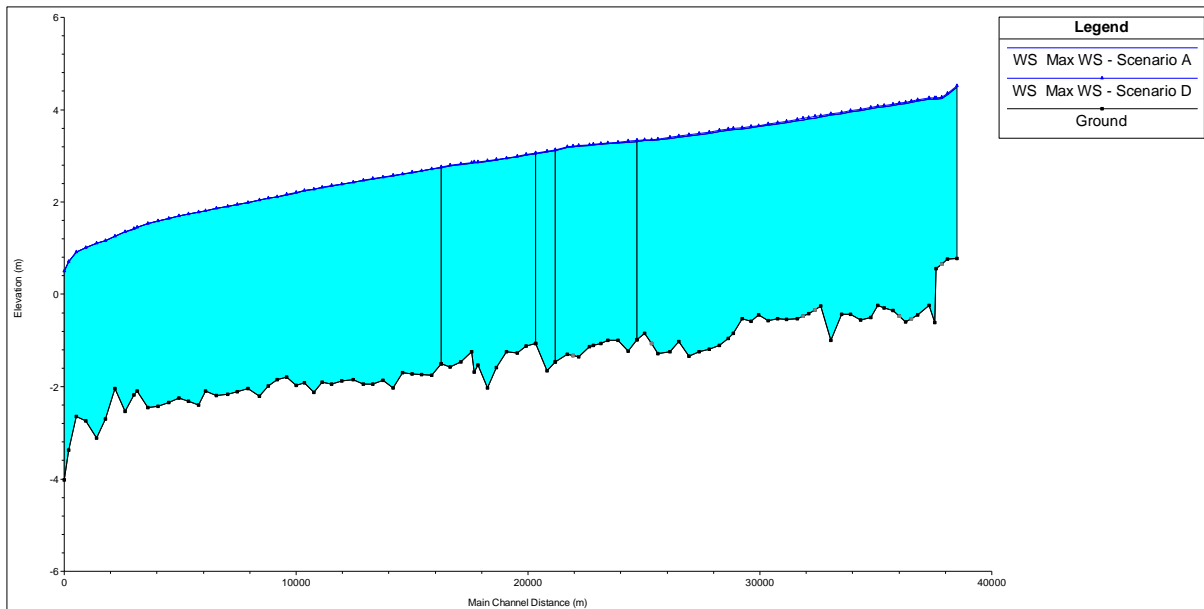


Figura 90: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Destra Reno.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|----------------|---------------|---------------|
| Nuovo Tratturo | 0.0 | 7.1 |
| Traversagno | 0.0 | 7.1 |

Tabella 36: Variazioni rispetto ai livelli massimi nei canali del bacino Nuovo Tratturo.

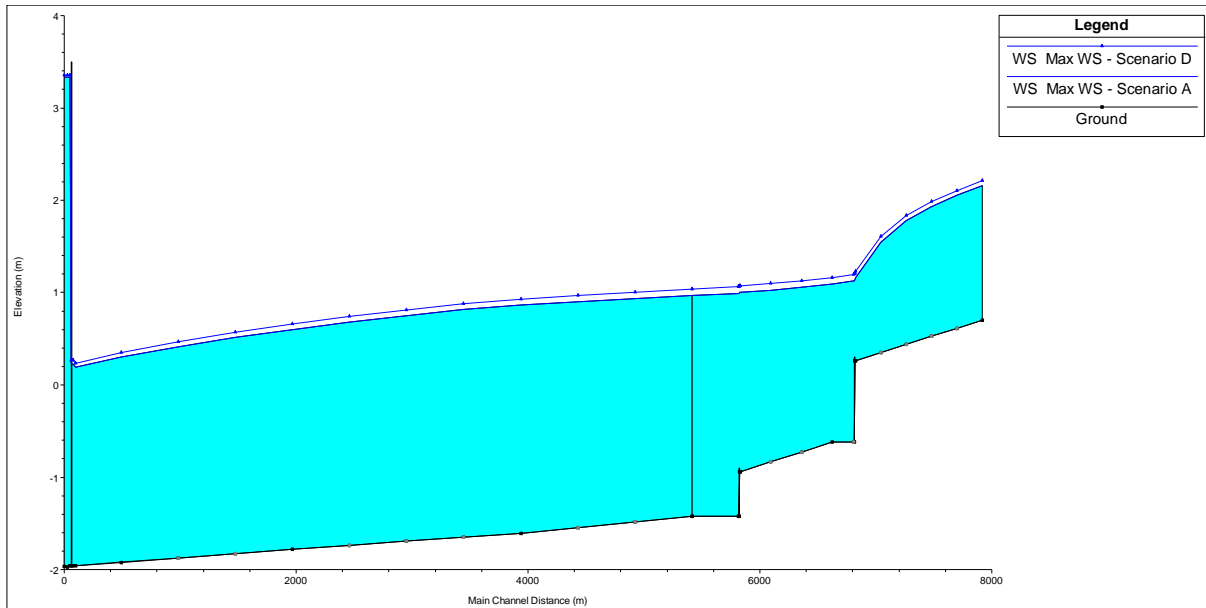


Figura 91: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Nuovo Tratturo.

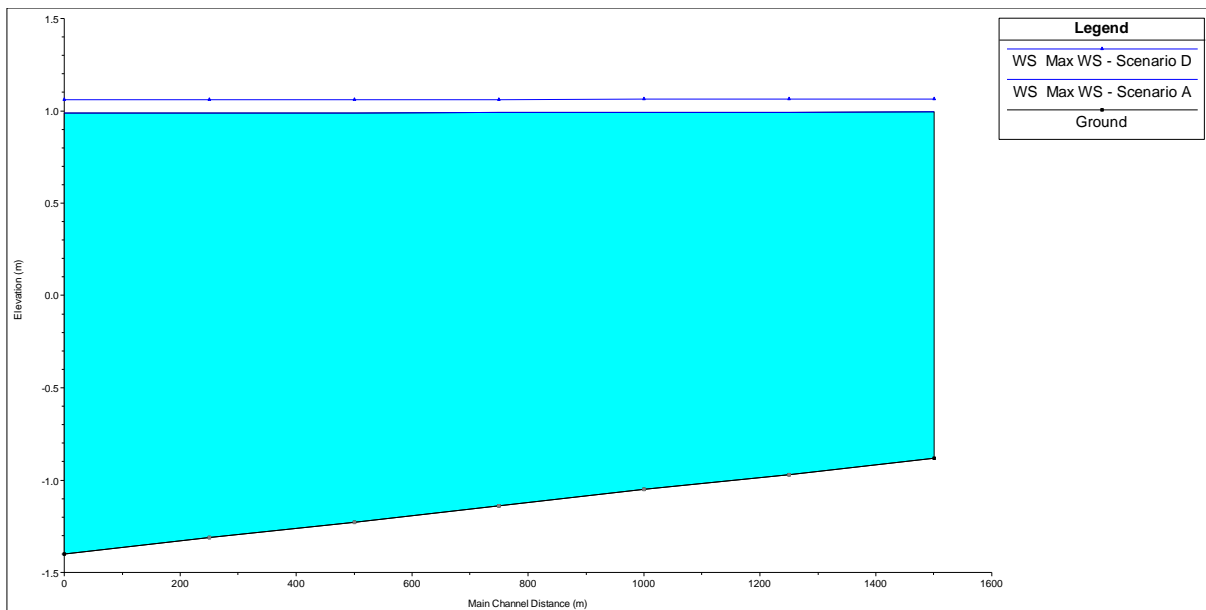


Figura 92: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Traversagno.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|-----------------------------|------------------|------------------|
| Canal Vela | 0.0 | 2.4 |
| Tratturo | 0.0 | 3.3 |
| Casale | 0.0 | 3.2 |
| Fossatone di San Bernardino | 0.0 | 3.7 |
| Via Lunga a Ponente | 0.0 | 2.5 |
| Via Nuova nel Casale | 0.0 | 1.1 |
| Ascensione | 0.0 | 1.2 |
| Arginello | -0.3 | 2.5 |
| Menata di Runzi | 0.0 | 2.5 |
| Santa Lucia | -0.6 | 1.1 |
| Frassona Maggiore | -0.4 | 0.3 |
| Cocorre | -0.7 | 0.0 |
| Sant'Antonio | -0.9 | 0.0 |
| Menata di Fusignano | 0.0 | 5.6 |
| Via Nuova | 0.0 | 4.8 |

Tabella 37: Variazioni rispetto ai livelli massimi nei canali del Bacino Canal Vela.

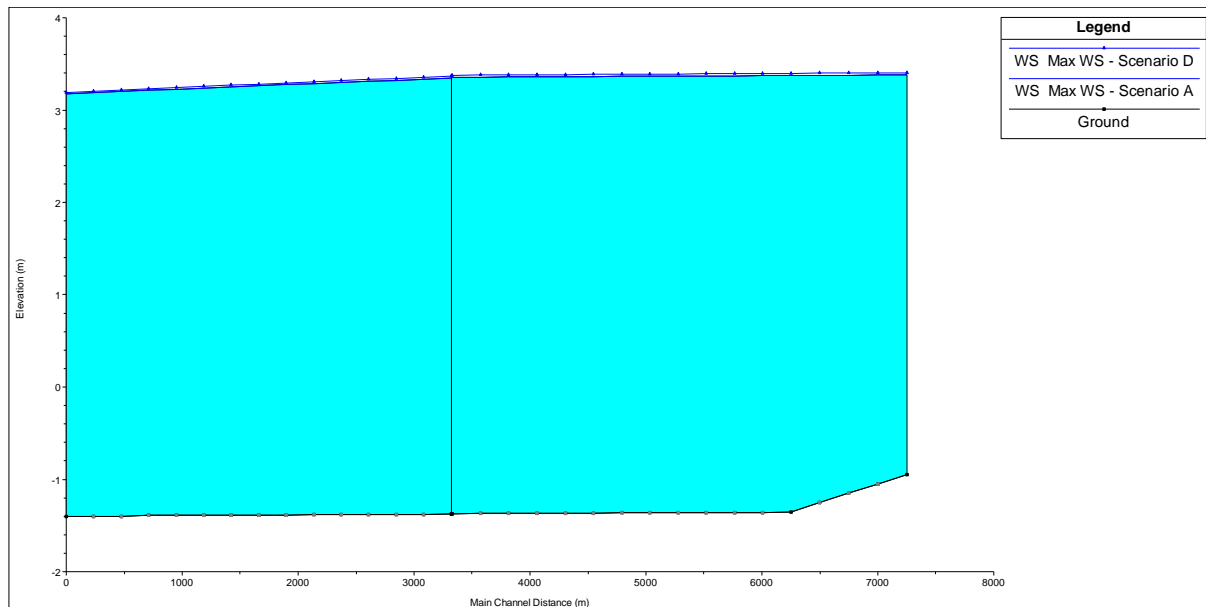


Figura 93: Profilo dei livelli massimi lungo il Canal Vela.

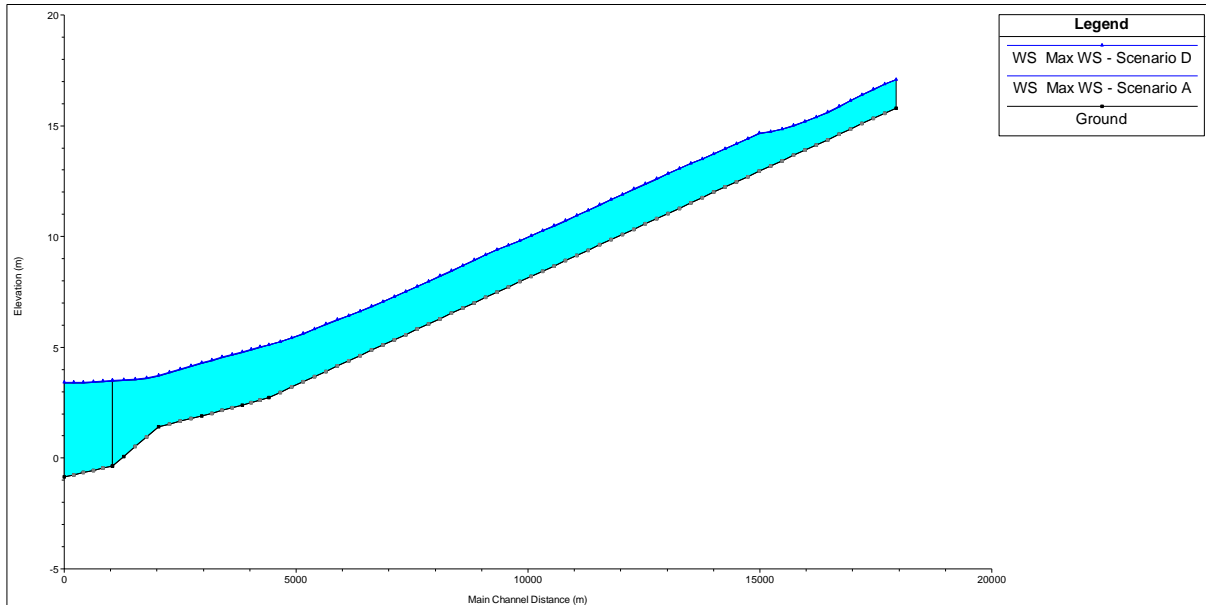


Figura 94: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Tratturo.

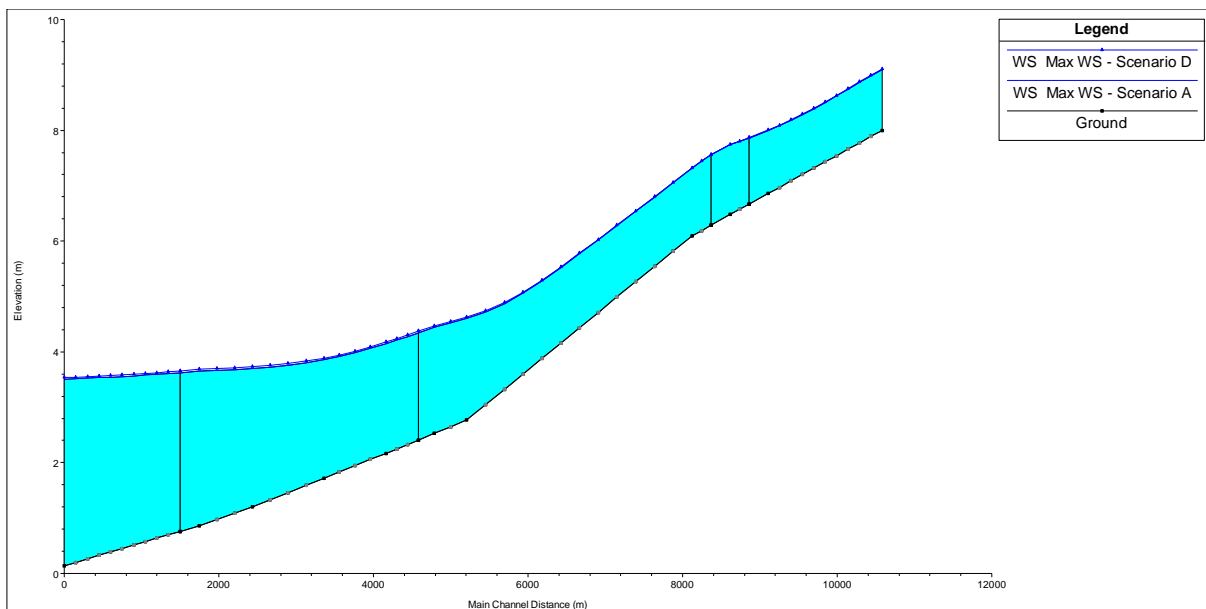


Figura 95: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Casale.

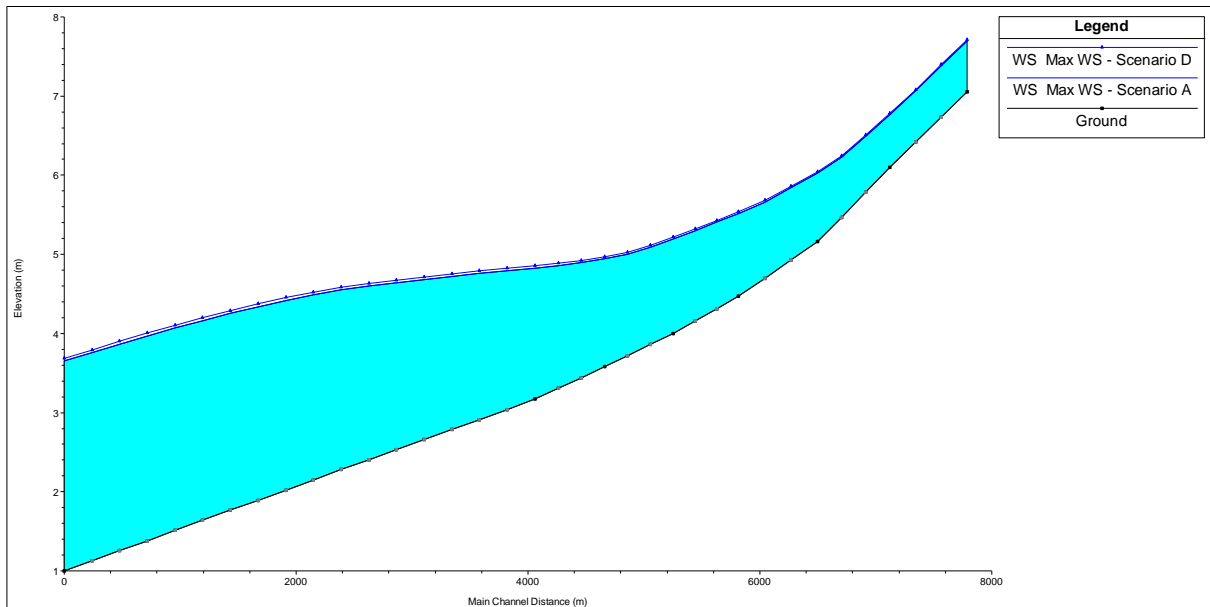


Figura 96: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fossatone di San Bernardino.

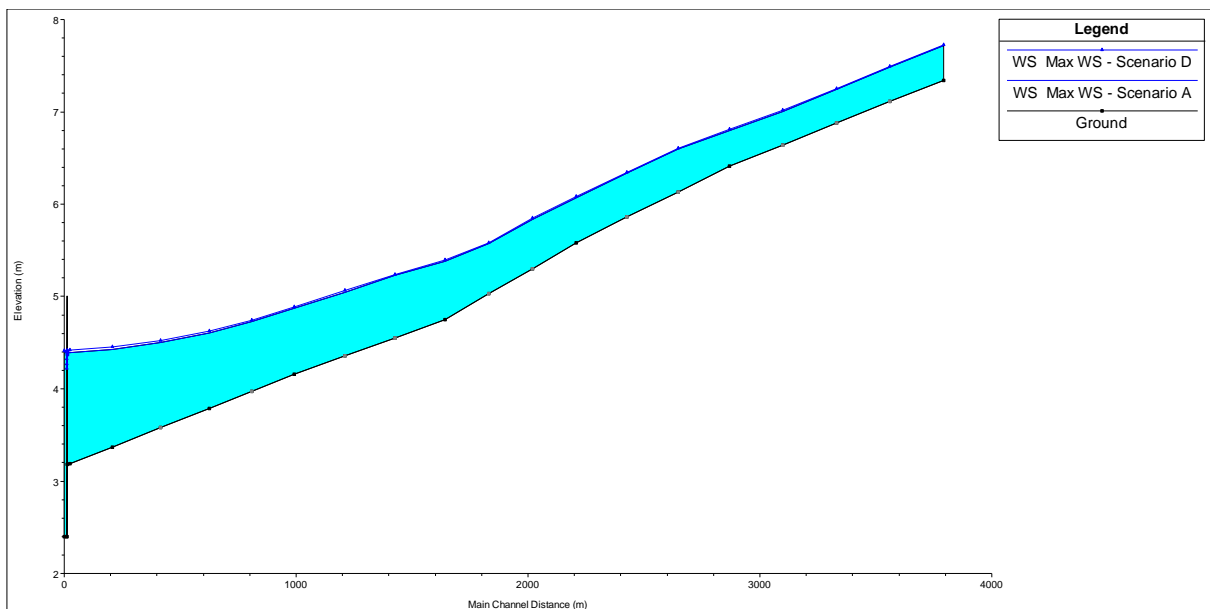


Figura 97: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Lunga a Ponente.

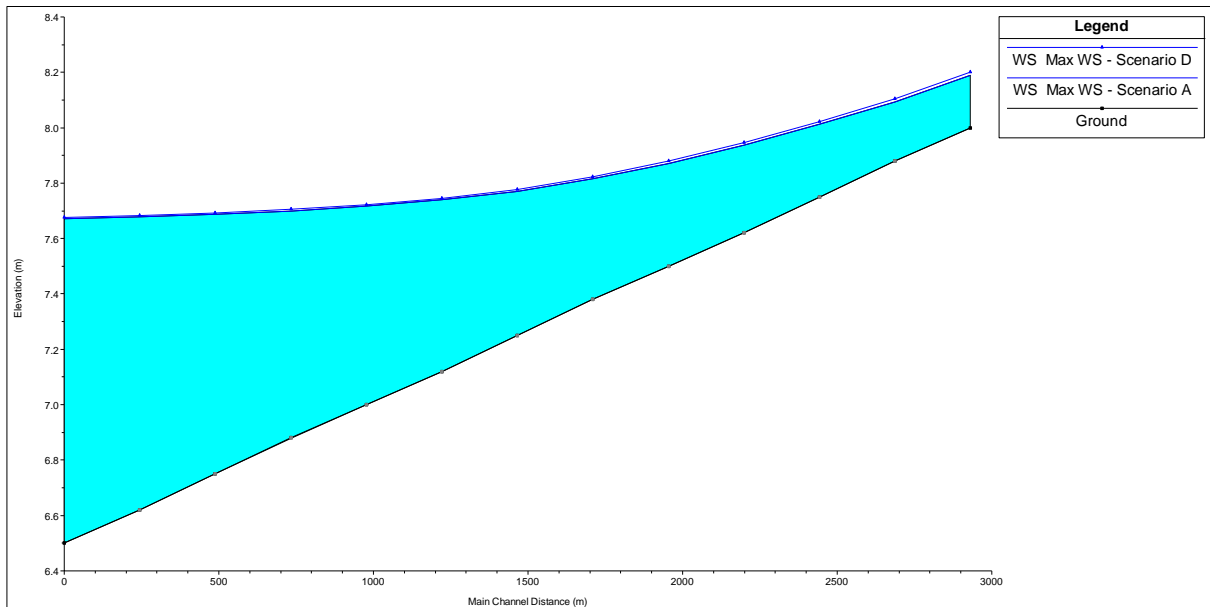


Figura 98: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova nel Casale.

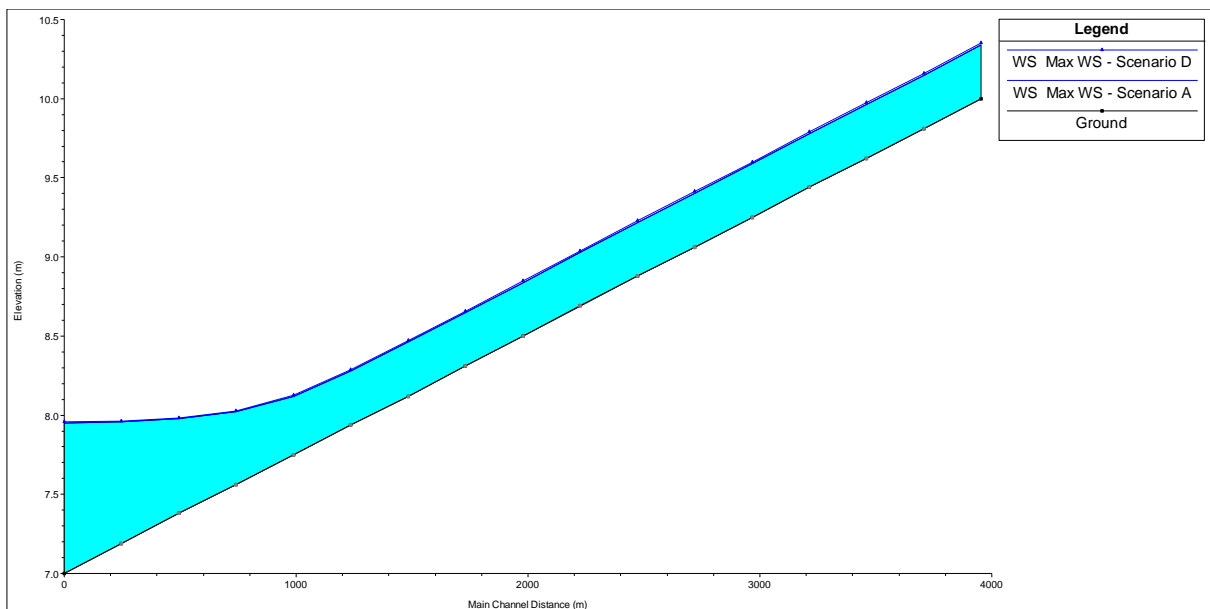


Figura 99: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Ascensione.

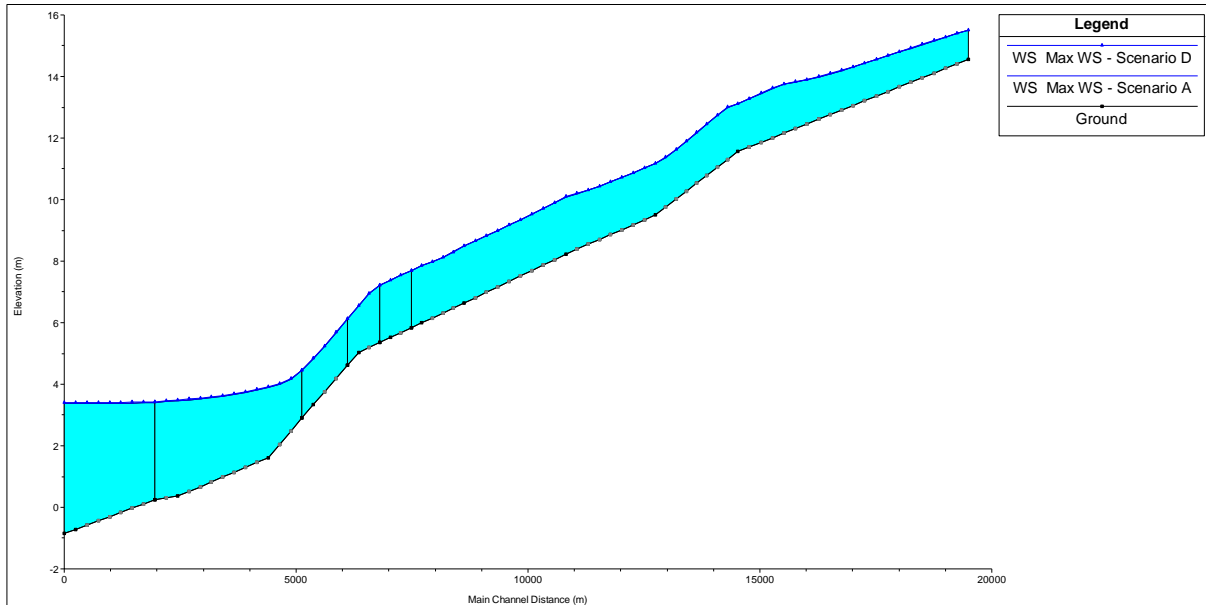


Figura 100: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Arginello.

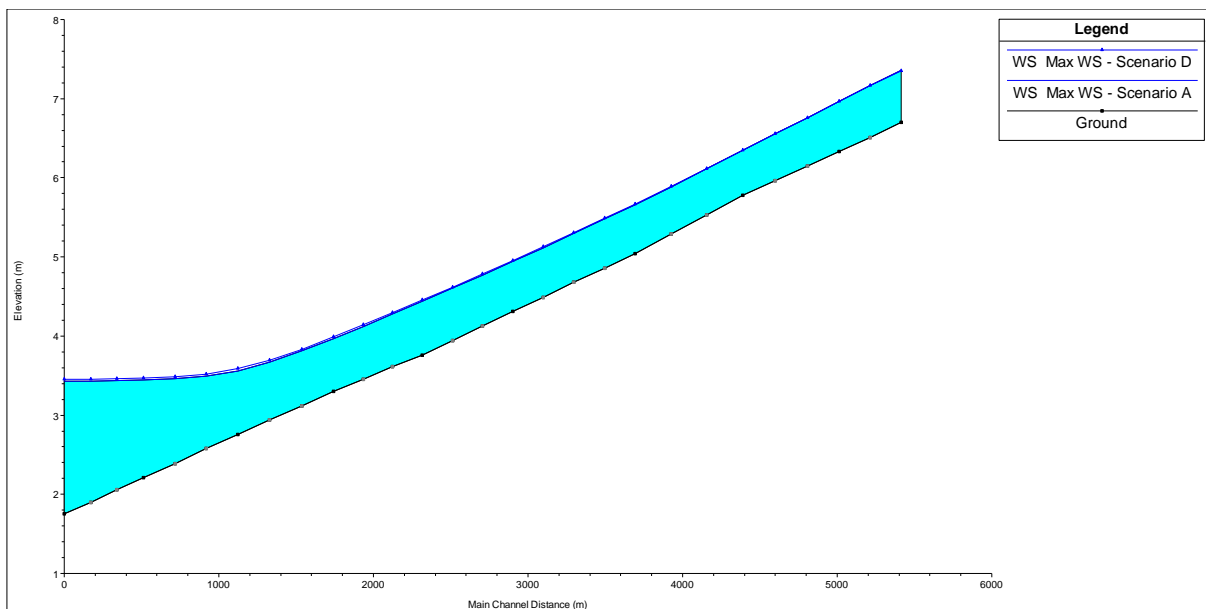


Figura 101: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Runzi.

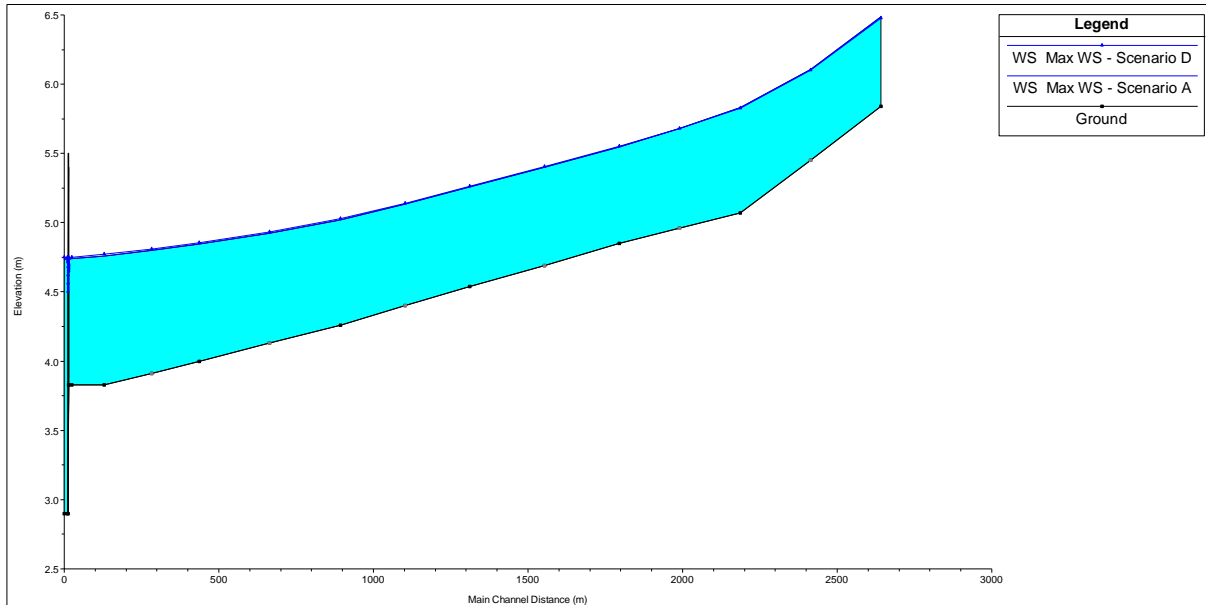


Figura 102: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Santa Lucia.

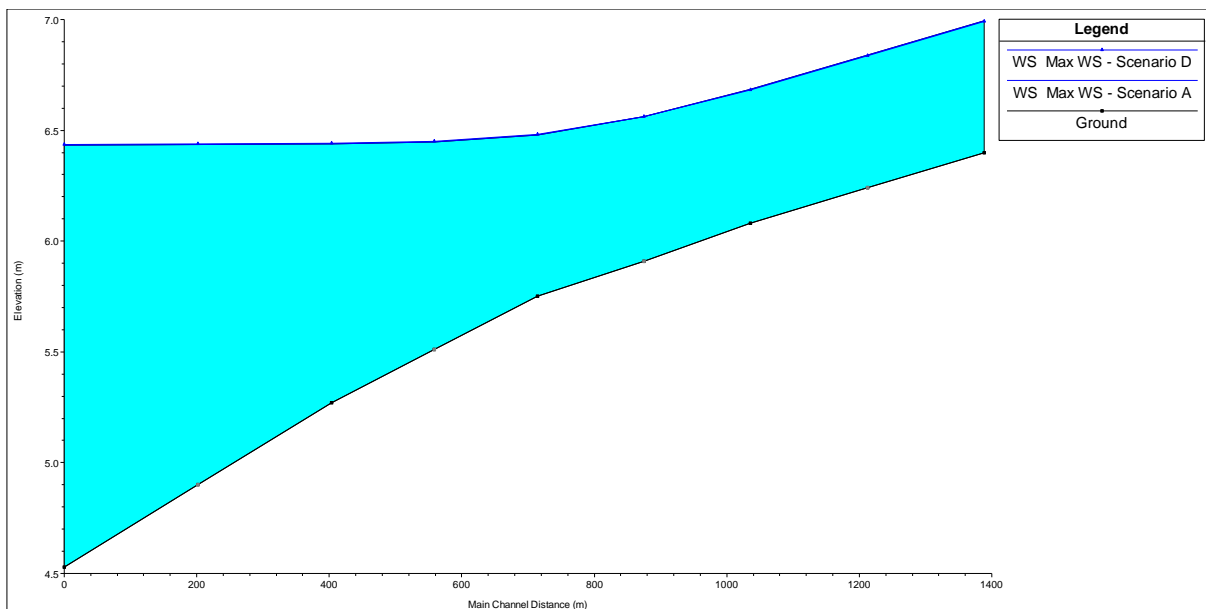


Figura 103: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Frassona Maggiore.

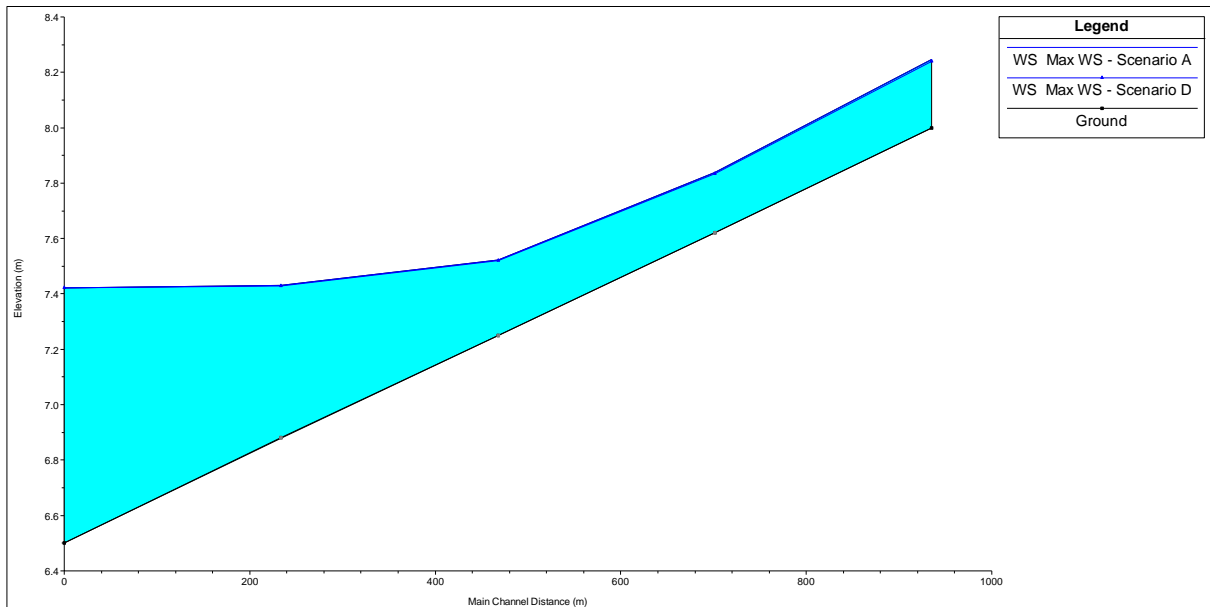


Figura 104: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Cocorre.

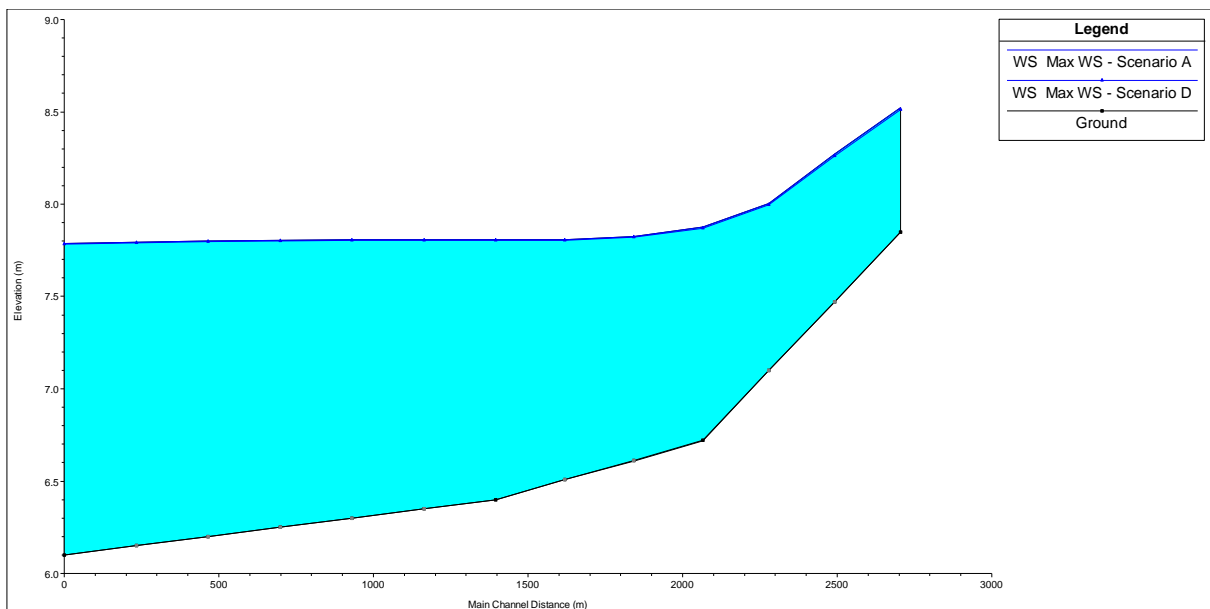


Figura 105: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Sant'Antonio.

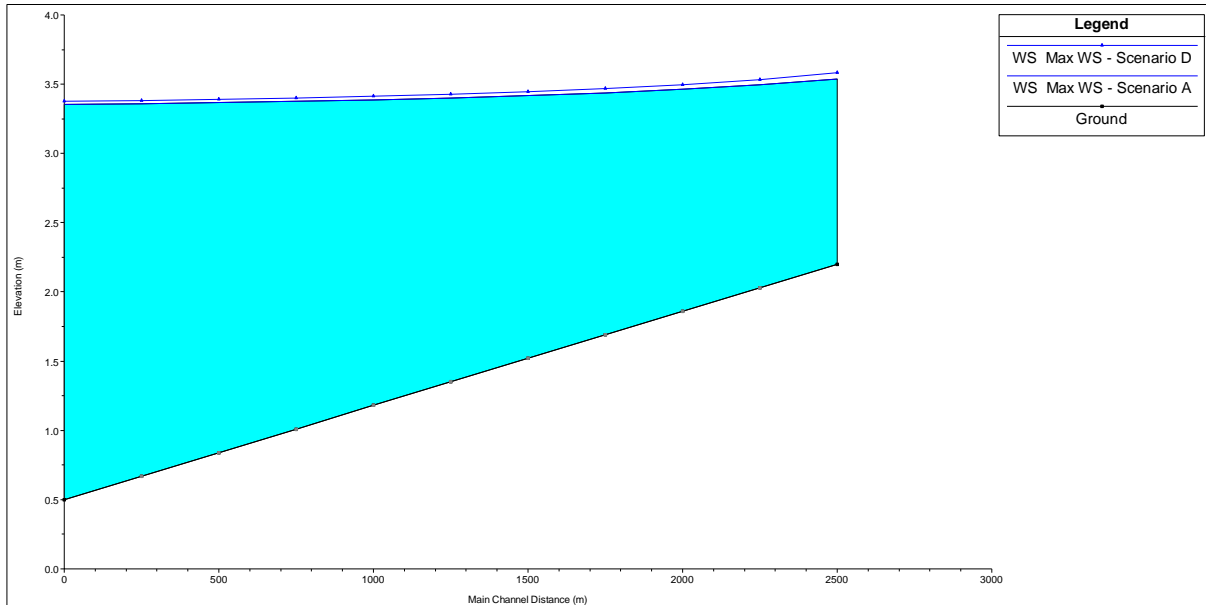


Figura 106: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Menata di Fusignano.

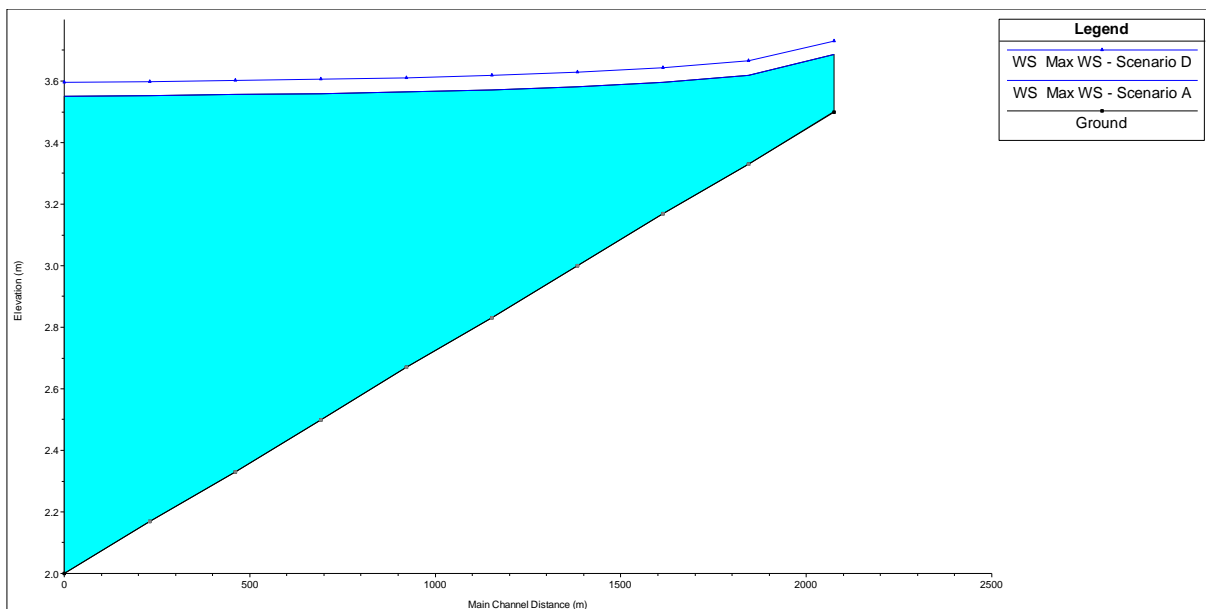


Figura 107: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Via Nuova.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|-----------|------------------|------------------|
| Alfonsine | 0.0 | 1.4 |

Tabella 38: Variazioni rispetto ai livelli massimi lungo il canale Alfonsine.

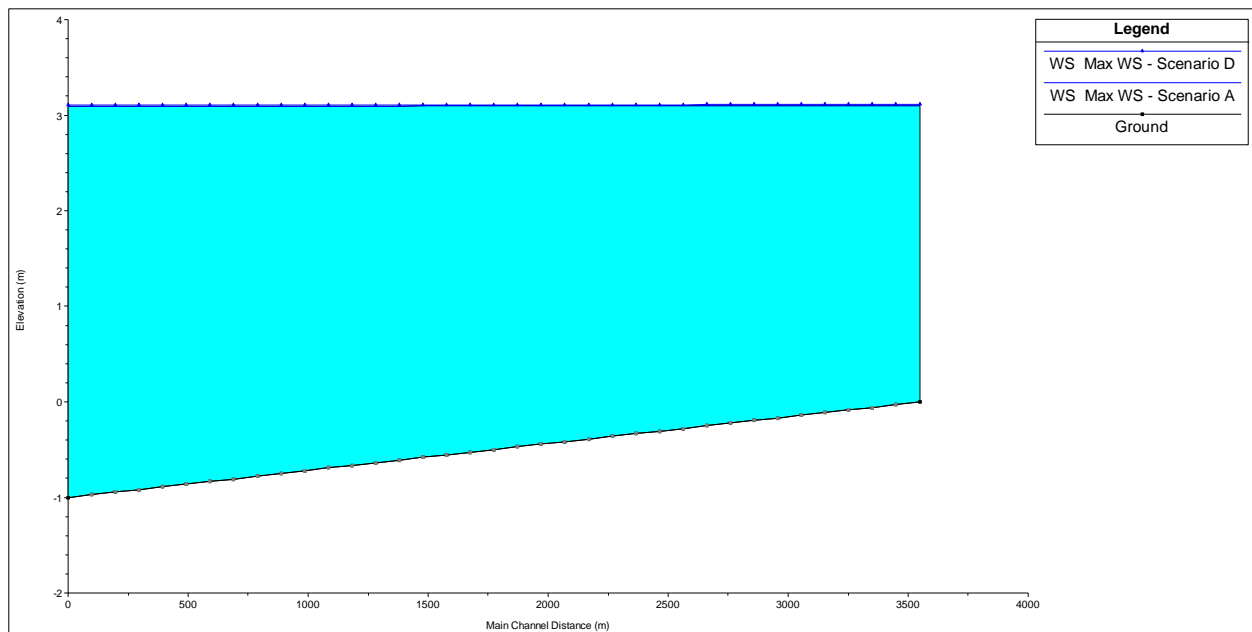


Figura I08: Profilo dei livelli massimi lungo il canale Alfonsine.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|---------------|------------------|------------------|
| Fosso Vecchio | 0.0 | 2.1 |
| Fosso Vetro | 0.0 | 1.7 |
| Fosso Munio | -2.7 | 2.1 |

Tabella 39: Variazioni rispetto ai livelli massimi lungo il canale Alfonsine.

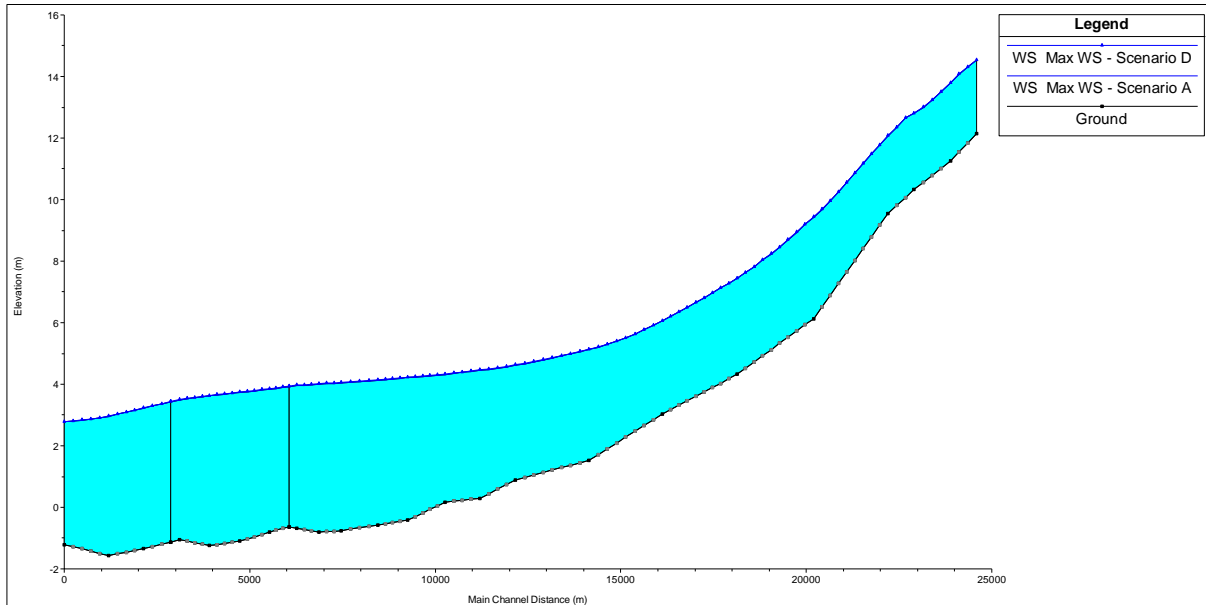


Figura I09. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vecchio.

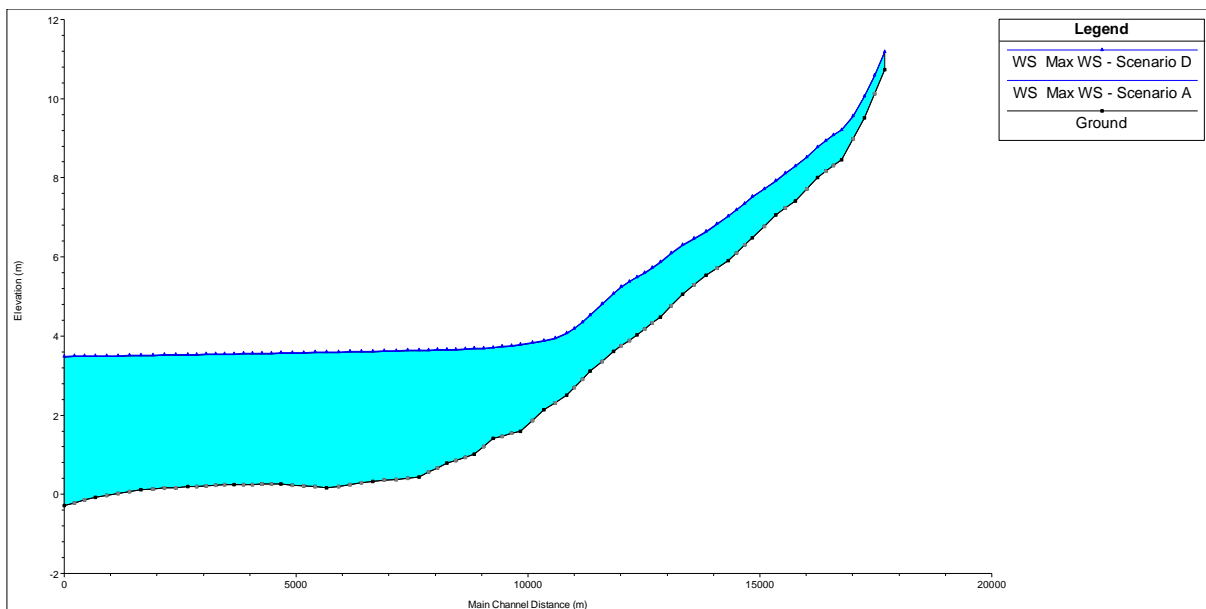


Figura I10. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Vetro.

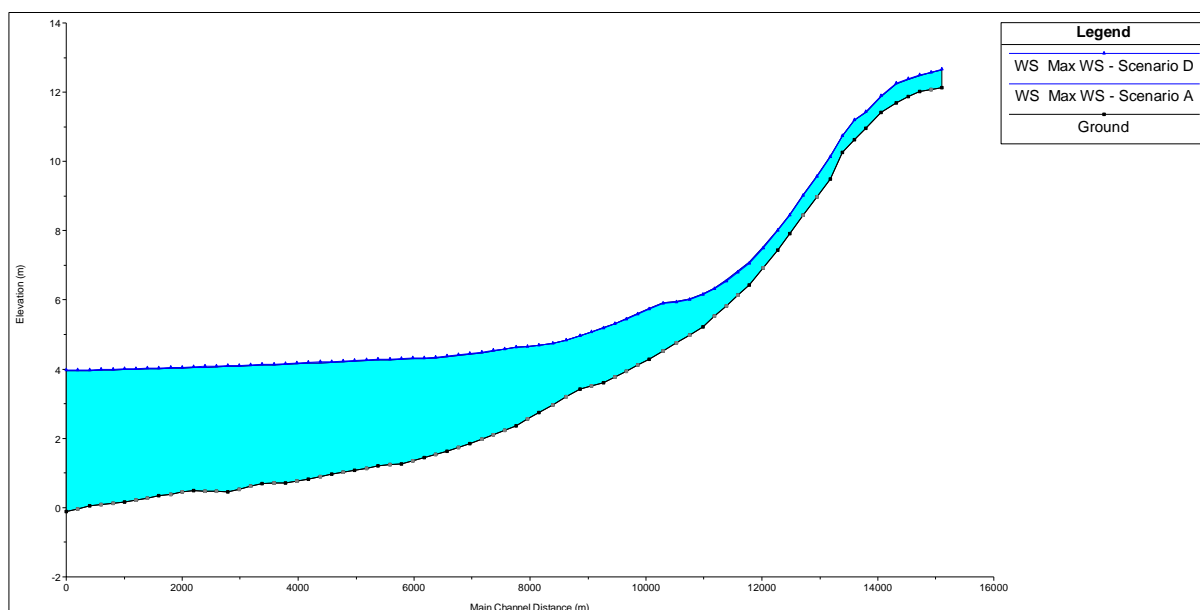


Figura 111. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Munio.

6.2.4.4 Scenari estremi

L'analisi idraulica ha evidenziato un impatto praticamente nullo sulla rete scolante delle variazioni indotte dalle attività di stoccaggio del giacimento San Potito (scenari B e C).

Per verificare con che grado di sicurezza si può ritenere che le variazioni altimetriche indotte non causino un impatto sulla rete di bonifica sono stati testati due ulteriori scenari amplificando la variazione di pressione prevista con $P = 240$ bar, cioè $P = 1.2 P_i$:

1. scenario E: termine della fase di erogazione con $P_{MAX} = 360$ bar, cioè $P_{MAX} = 1.8 P_i$;
2. scenario F: termine della fase di stoccaggio con $P_{MAX} = 360$ bar, cioè $P_{MAX} = 1.8 P_i$.

Per i canali maggiormente impattati dalle variazioni altimetriche, i risultati della modellizzazione idraulica sono presentati in termini di confronto con lo scenario A: per lo scenario E in Tabella 40 e Figura 112-Figura 115 e per lo scenario F in Tabella 41 e Figura 116-Figura 119. I risultati evidenziano come amplificando la variazione di pressione fino a $P_{MAX} = 360$ bar, cioè $P_{MAX} = 1.8 P_i$, localmente la variazione dei livelli idrici inizia ad essere sensibile, con abbassamenti che superano i 4 cm ed innalzamenti dell'ordine dei 2 cm.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|--------------|------------------|------------------|
| Tratturo | -2.6 | 0.4 |
| Arginello | -5.1 | 0.2 |
| Sant'Antonio | -3.4 | 0.0 |
| Fosso Munio | -4.6 | 0.4 |

Tabella 40: Variazioni rispetto ai livelli massimi nei canali maggiormente impattati dalle variazioni altimetriche per lo scenario E.

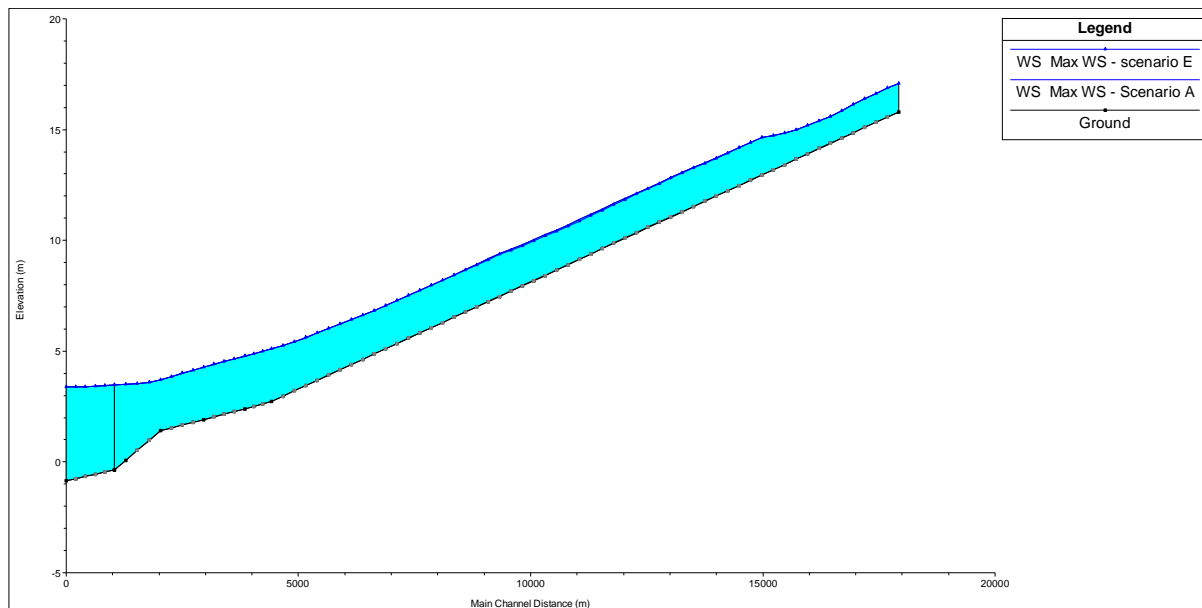


Figura I 12. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Tratturo per lo scenario E.

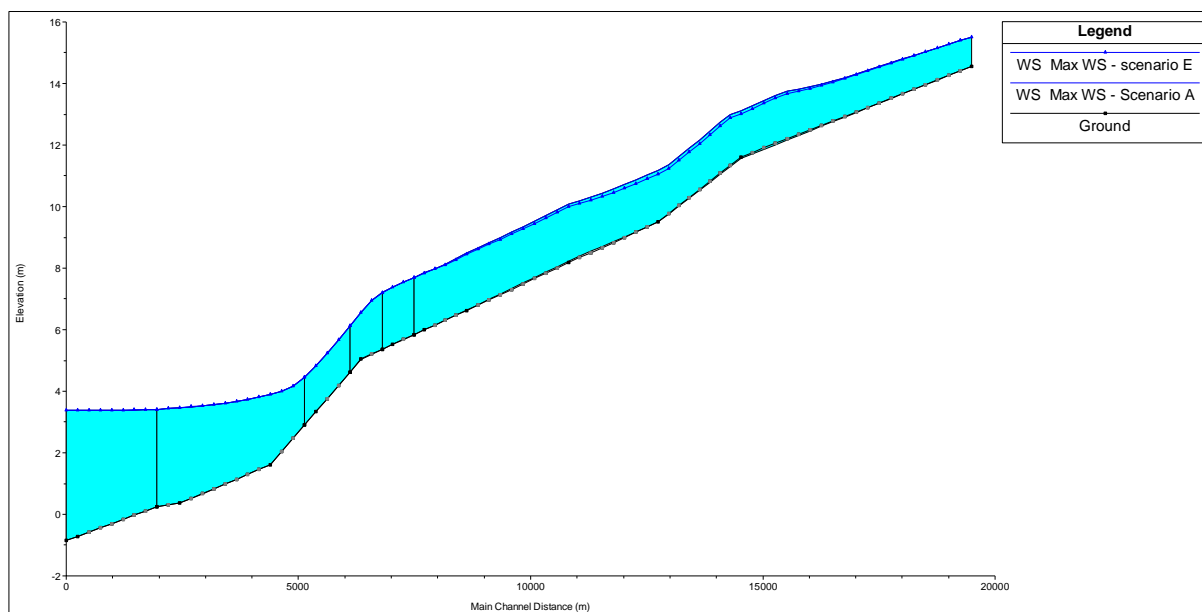


Figura I 13. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Arginello per lo scenario E.

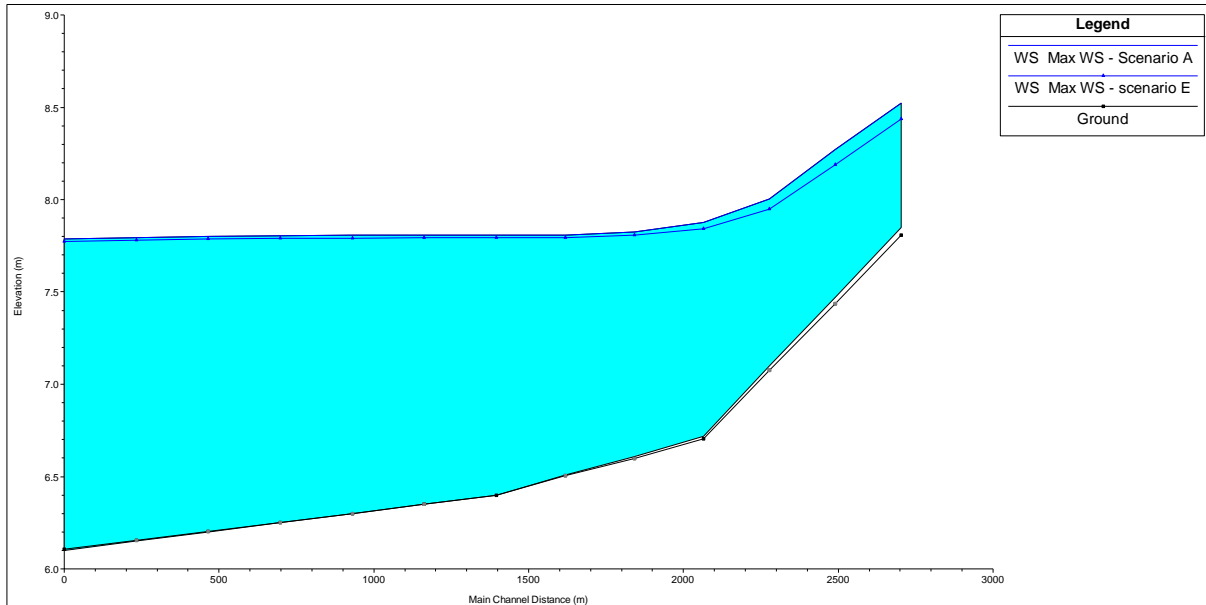


Figura 114. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Sant'Antonio per lo scenario E.

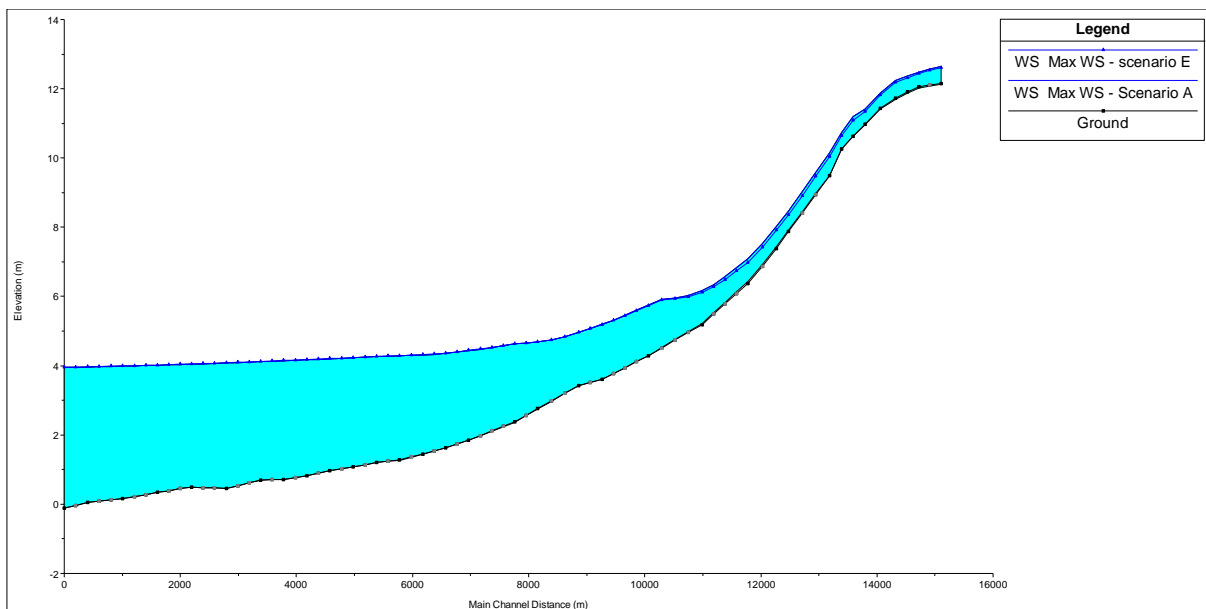


Figura 115. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Munio per lo scenario E.

| Canale | max abb. [cm] | max inn. [cm] |
|--------------|------------------|------------------|
| Tratturo | -0.7 | 0.8 |
| Arginello | -1.8 | 1.9 |
| Sant'Antonio | -1.6 | 0.2 |
| Fosso Munio | -2.2 | 1.3 |

Tabella 41: Variazioni rispetto ai livelli massimi nei canali maggiormente impattati dalle variazioni altimetriche per lo scenario F

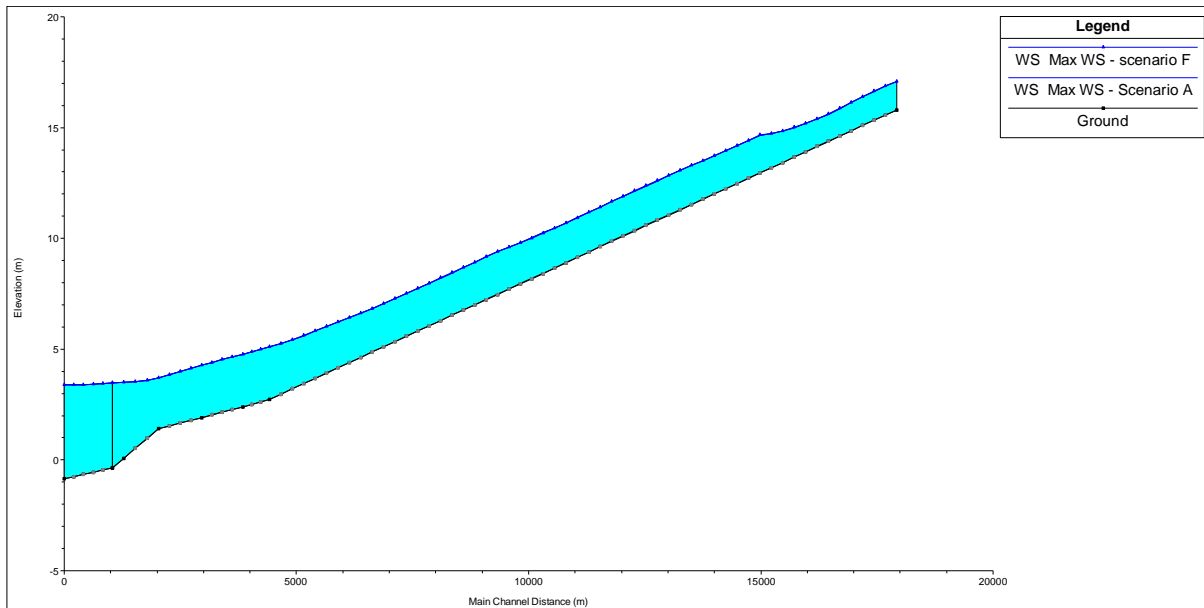


Figura I 16. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Tratturo per lo scenario F.

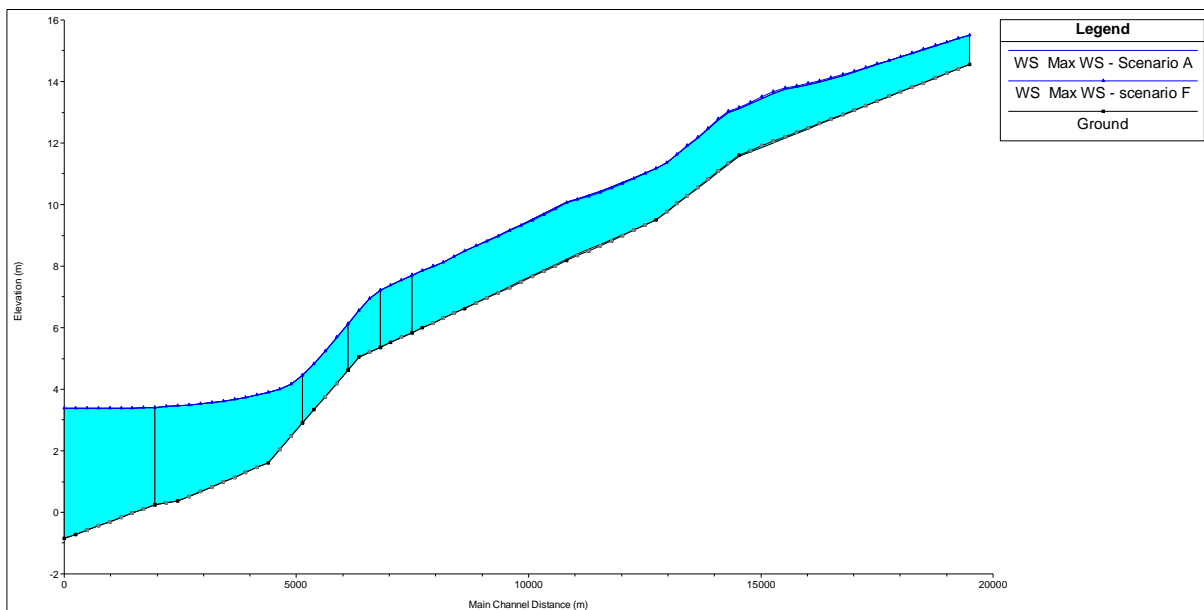


Figura I 17. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Arginello per lo scenario F.

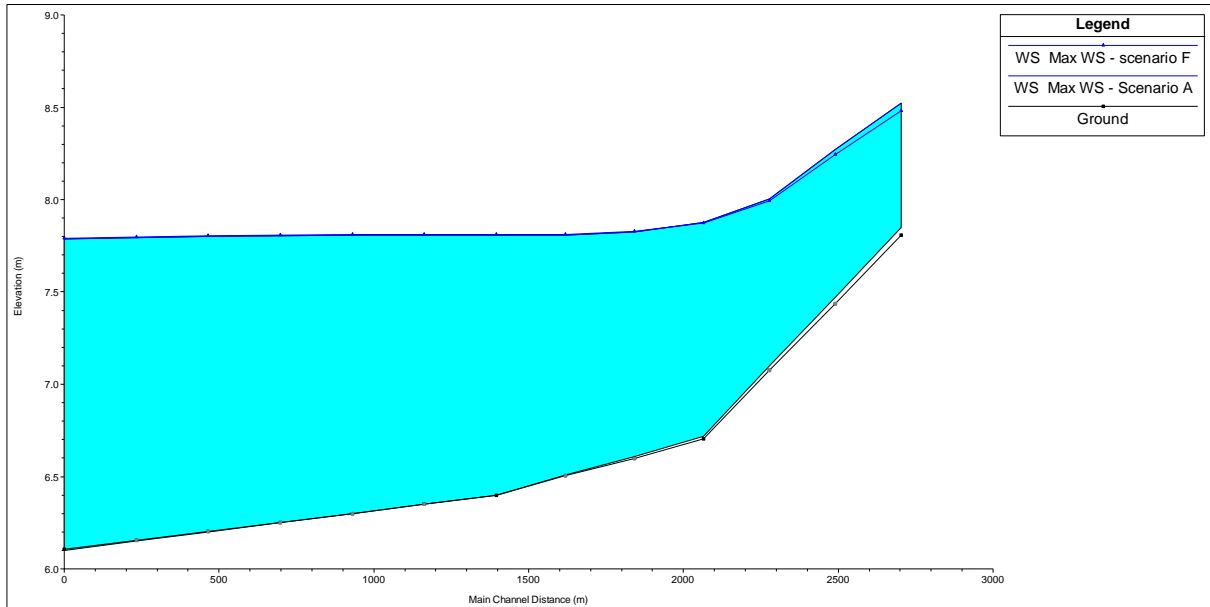


Figura 118. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Sant'Antonio per lo scenario F.

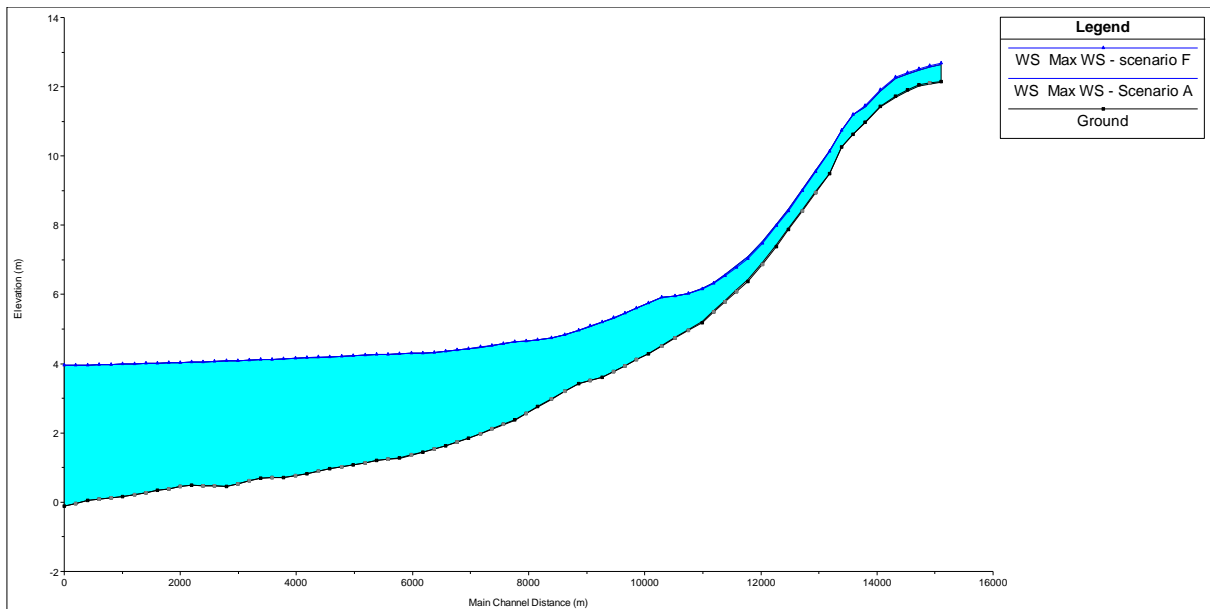


Figura 119. Profilo dei livelli massimi lungo il canale Fosso Munio per lo scenario F.

6.3 Valutazione dell'insieme degli scenari analizzati

L'insieme degli scenari analizzati risultano particolarmente conservativi. In particolare, la variazione di pressione prevista con $P = 240$ bar ($P = 1.2 P_i$) è stata amplificata fino a $P_{MAX} = 360$ bar (cioè è stato valutato il caso con $P_{MAX}=1.8 P_i$) che corrisponde al massimo possibile, come evidenziato al Paragrafo 5.5.

Inoltre, per quanto riguarda l'effetto di altre attività antropiche presenti nell'area, è stato valutato l'effetto combinato dei campi di stoccaggio di San Potito ed Alfonsine e del campo di produzione di Longanesi.

7 DEFINIZIONE DEI FATTORI DI SICUREZZA

In questa sezione le valutazioni effettuate ai Capitoli 5 e 6 vengono tradotte in termini di fattori di sicurezza. Il fattore di sicurezza viene definito come:

$$FS = \Delta P_{MAX} / \Delta P \quad (7)$$

dove ΔP è la variazione di pressione prevista dalle operazioni di stoccaggio/erogazione in condizioni di esercizio $P = 240$ bar, cioè $P = 1.2 P_i$ (Figura 2) e ΔP_{MAX} è la variazione di pressione massima ammissibile per cui non viene superato lo stato limite della criticità analizzata: gradiente di spostamento verticale in superficie (C1), integrità meccanica della roccia serbatoio e delle formazioni confinanti (C2), tenuta strutturale delle faglie (C3) e tenuta idraulica della rete scolante di bonifica (C4). In Tabella 42 sono riassunti i valori di FS ottenuti dalle analisi. Il fattore di sicurezza per le criticità C1, C3 e C4 è il massimo possibile: come evidenziato al Paragrafo 5.5, la variazione di pressione di pressione prevista può essere amplificata fino a $P_{MAX} = 360$ bar, cioè $P_{MAX} = 1.8 P_i$.

L'integrità meccanica della roccia, criticità C2, risulta essere la verifica più gravosa con $FS = 1.2$: la variazione di pressione prevista dalle attività di stoccaggio/erogazione con $P = 1.2 P_i$ può essere comunque amplificata del 10% ($P = 1.24 P_i$) senza indurre problemi significativi alla tenuta strutturale della roccia in giacimento nelle formazioni confinanti.

| Criticità | Valutazione | Scenario | P_{MAX} | FS |
|-----------|---------------------|----------|----------------------|-----|
| C1 | <i>conservativa</i> | SG3 | 360 bar = 1.80 P_i | 4.0 |
| C2 | <i>conservativa</i> | TC3 | 248 bar = 1.24 P_i | 1.2 |
| | <i>realistica</i> | TC5 | 264 bar = 1.32 P_i | 1.6 |
| C3 | <i>conservativa</i> | TF3 | 360 bar = 1.80 P_i | 4.0 |
| C4 | <i>conservativa</i> | E | 360 bar = 1.80 P_i | 4.0 |

Tabella 42: Fattori di sicurezza per le criticità analizzate.

8 CONCLUSIONI

L'analisi delle misure *in situ* e delle prove di laboratorio fornite da EDISON STOCCAGGIO hanno permesso di validare il modello geomeccanico e i criteri di resistenza adottati nella fase precedente dello studio modellistico su San Potito [M³E, 2017]. Le simulazioni geomeccaniche eseguite con tale modello hanno mostrato che le attività previste di stoccaggio/erogazione con $P = 240$ bar, cioè $P=1.2P_i$, non comportano problematiche per nessuna delle criticità analizzate, ovvero: C1) un gradiente dello spostamento verticale in superficie tale da causare danni strutturali; C2) l'integrità meccanica della roccia serbatoio e delle formazioni confinanti; C3) la riattivazione delle faglie riscontrate dalla sismica 3D nell'area prossima al giacimento; C4) l'efficienza idraulica della rete scolante di bonifica.

Per valutare quanto le attività minerarie previste in San Potito siano in condizioni di sicurezza, sono stati qui valutati alcuni scenari estremi: a) la compressibilità del mezzo poroso è stata ipotizzata pari al valore massimo dell'intervallo di confidenza al 95% del modello costitutivo ottenuto dall'analisi statistica dei marker radioattivi; b) la variazione di pressione prevista è stata amplificata fino a $P_{MAX}=360$ bar (equivalente a circa $P_{MAX} = 1.8 P_i$); c) sono stati sovrapposti gli effetti in termini di spostamenti in superficie previsti dagli sviluppi futuri dei campi di Alfonsine e Longanesi.

I risultati ottenuti dalle analisi integrative qui riportate possono essere così riassunti:

- Nello scenario più gravoso, corrispondente ad amplificare la variazione di pressione prevista fino a $P_{MAX} = 360$ bar ($P_{MAX}=1.8 P_i$), il gradiente dello spostamento verticale è circa $2.8e-5$ pari al 5.6% del valore limite fornito dalla normativa per le strutture in muratura.
- Con parametri di resistenza conservativi, la variazione di pressione prevista può essere amplificata del 20%, cioè $P_{MAX}=248$ bar ($P_{MAX}=1.24 P_i$), senza che l'integrità meccanica della roccia serbatoio venga compromessa. Considerando parametri di resistenza realistici, ovvero basati sui risultati delle misure *in situ* e delle analisi di laboratorio, la variazione di pressione può essere amplificata del 60%, cioè $P_{MAX} = 264$ bar ($P_{MAX}=1.32 P_i$), senza che il limite a rottura venga raggiunto.
- In tutti gli scenari, la variazione di tensione indotta dalle attività minerarie sulle faglie è trascurabile: la variazione di tensione rimane confinata all'interno delle formazioni mineralizzate e si dissipa nell'arco di poche decine di metri.

- Gli spostamenti in superficie indotti dallo stoccaggio in San Potito amplificando la variazione di pressione prevista fino a $P_{MAX}=360\text{bar}$ ($P_{MAX}=1.80\text{ Pi}$) producono variazioni locali del livello idrico rispetto allo stato attuali quantificati in circa 5 cm; la rete scolante rimane comunque funzionale.
- L'effetto sovrapposto delle attività minerarie in San Potito, Alfonsine e Longanesi genera variazioni locali del livello idrico rispetto allo stato attuale, con un massimo di 10 cm. La rete scolante rimane comunque funzionale. Va evidenziato come l'effetto dei campi di Alfonsine e Longanesi in termini di spostamento in superficie sia di un ordine di grandezza maggiore rispetto a quello del solo San Potito.

Infine, in Tabella 42 sono riportati i fattori di sicurezza FS per le criticità geomeccaniche analizzate. Tutte le criticità hanno un fattore di sicurezza strettamente maggiore dell'unità, per C1, C3 e C4 il valore di FS è il massimo possibile mentre il valore di FS minimo è quello legato all'integrità della roccia serbatoio e del caprock. A questo proposito, va sottolineato che:

- eventuali fenomeni di micro-sismicità, ovvero $M < I$, eventualmente causati dalla rottura della roccia serbatoio verrebbero rilevati dalla rete di monitoraggio prescritta dalle Linee Guida emesse dal MISE;
- eventuali fratture che limitano la tenuta idraulica dal caprock verrebbero rilevate dall'andamento nel tempo della pressione ai pozzi.

Di conseguenza, l'innescarsi di tali processi potrebbe essere tenuto sotto controllo prevenendone uno sviluppo più esteso.

9 REFERENZE

- Baù, D., Gambolati, G., Teatini, P. (2000). Waterdrive dynamics and enhanced land subsidence over productive gas fields: application to Dosso degli Angeli reservoir, Ravenna, Italy. In: Theory, Modeling and Field Investigation in Hydrology: A Special Volume in Honor of Shlomo P. Neuman's 60th Birthday, D. Zhang and C. L. Winter eds., Geological Society of America, Special Paper 348, 129-149.
- Baù, D., Ferronato, M., Gambolati, G., Teatini, P. (2002). Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique. *Geotechnique*, 52(8), 605-616.
- Carminati, E., D. Scrocca, and C. Doglioni (2010). Compaction-induced stress variations with depth in an active anticline: Northern Apennines, Italy. *J. Geophys. Res. - Solid Earth* 115 B02401 doi: 10.1029/2009JB006395.
- Castelletto, N., G. Gambolati and P. Teatini, Geological CO₂ sequestration in multi-compartment reservoirs: Geomechanical challenges, *J. Geophys. Res - Solid Earth*, 118, 2417-2428, doi:10.1002/jgrb.50180, 2013.
- Clark, C. O. Storage and the unit hydrograph. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 110(1), pp. 1419-1446. 1945.
- Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale (2001). Studio idrologico ed idraulico del Canale di Bonifica in Destra di Reno (collettore generale di tutti i Comparti di scolo del Consorzio) in condizioni di piena eccezionale: verifica del sistema nello stato di fatto attuale e delle configurazioni progettuali prospettate per il miglioramento della capacità di trasferimento idrico nel cavo.
- Da Deppo, L., Datei, C., Salandin, P. (2004). Sistemazione dei corsi d'acqua. Cortina (Padova).
- EDISON EDF GROUP (2018). Esecuzione e interpretazione di prove di laboratorio per la caratterizzazione geomeccanica di rocce di copertura, Pozzo San Potito A2dir. Relazione tecnica.
- ENI Exploration&Production Division (2010). Campo di Longanese-Abbadese, Modello elastoplastico di subsidenza. Management summary.
- Ferronato, M., Castelletto, N., Gambolati, G., Janna C., Teatini, P. (2013). Il cycle compressibility estimate from satellite measurements. *Geotechnique*, doi:10.1680/geot.11.P.149.

- Franceschini, A., Ferronato, M., Janna, C., Teatini, P. (2016). A novel Lagrangian approach for the stable numerical simulation of fault and fracture mechanics. *J. of Computational Physics*, 341, 503-521.
- GEOSTOCK (2012). Laboratory Tests – San Potito Project. Relazione tecnica.
- Janna, C., N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini (2012). A geomechanical transversely isotropic model of the Po River basin using PSInSAR derived horizontal displacement, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, 51, 105-118.
- Montone, P., M. T. Mariucci, S. Pondrelli, and A. Amato (2004). An improved stress map for Italy and surrounding regions (central Mediterranean). *J. Geophys. Res. - Solid Earth* 109 B10410 doi: 10.1029/2003JB002703.
- M³E S.r.l. (2017). Modellazione dei processi geomeccanici derivanti dallo stoccaggio di gas nel campo di San Potito – Fase 1 e 2. Relazione Tecnica.
- Schlumberger (2018): Pozzo San Potito 6 Dir – MDT Stress Test Casing 7”. Presentazione.
- Si, H. (2008). Adaptive tetrahedral mesh generation by constrained Delaunay refinement, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 75, 856-880.
- Simeoni, U., U. Tessari, C. Corbau, O. Tosatto, P. Polo, P. Teatini (2017). Impact of land subsidence due to residual gas production on surficial infrastructures: the Dosso degli Angeli field study (Ravenna, Northern Italy), *Engineering Geology*, doi:10.1016/j.enggeo.2017.09.008.
- SOIL CONSERVATION SERVICE, (1972) National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., U.S.A.
- Teatini, P., N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati, C. Janna, E. Cairo, D. Marzorati, D. Colombo, A. Ferretti, A. Bagliani and F. Bottazzi (2011). Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy, *J. Geophys. Res.*, 116, F02002, doi:10.1029/2010JF001793.
- Teatini, P., N. Castelletto, and G. Gambolati (2014). 3D geomechanical modeling for CO₂ geological storage in faulted formations. A case study in an offshore northern Adriatic reservoir, Italy, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 22, 63-76.

Teatini, P., M. Ferronato, C. Janna, P. Polo, G. Isotton (2017). Modello idrologico della rete scolante nell'area del campo di Alfonsine. Relazione Tecnica.

Todini, E. & Partners (1990). Indagine Statistica sulle piogge intense nel Comprensorio di Bonifica Renana.

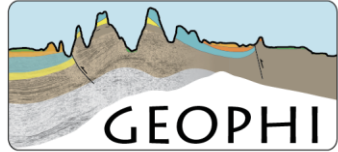
USACE-HEC (2010). Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v3.5 - User's Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Tech. Report CPD-74A.

USACE-HEC (2016). River Analysis System, HEC-RAS v5.0 - User's Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Tech. Report CPD-68.

Viggiani, C. (2003). Fondazioni. Helvelius Edizioni, Benevento, Italy.

ALLEGATO 3

Verifica della sorgente sismica ITIS 100 Bagnacavallo



SUBSURFACE
GEOLOGY AND
GEOPHYSICS

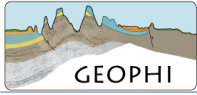


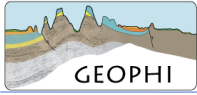
Verifica della sorgente sismica ITIS 100 Bagnacavallo

Redatto da Vincenzo Picotti e

A. Ponza

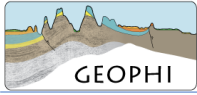
Bologna 25 luglio 2018





Indice

| | |
|---|----|
| Executive Summary | 4 |
| Premessa | 6 |
| Introduzione..... | 7 |
| 1 - Geometria della struttura Bagnacavallo | 9 |
| 2 - Osservazioni geomorfologiche a supporto della attività recente della struttura..... | 19 |
| 3 - Piene associate al terremoto..... | 30 |
| 4 - Slip rates | 32 |
| 5 - Conclusioni..... | 34 |
| Bibliografia..... | 35 |

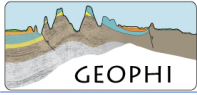


Executive Summary

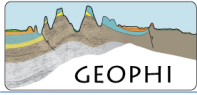
La struttura sismogenetica denominata "ITIS 100 Bagnacavallo" è stata oggetto di una verifica, alla luce dei dati disponibili e delle nostre migliori conoscenze, allo scopo di confermare o emendare la sua presenza. La società esercente lo stoccaggio "San Potito - Cotignola" aveva comunque cautelativamente indicato alcune discontinuità tettoniche nel volume sismico 3D in suo possesso in prossimità sia del giacimento di San Potito che della struttura sismogenetica sopraindicata ed ha utilizzato tali dati per la costruzione del modello geomeccanico 3D (FEM).

La struttura sismogenetica è stata ipotizzata sulla base di vecchie sezioni geologiche. La verifica su dati geofisici (linee sismiche) disponibili mostra una geometria molto diversa, associata ad una opposta vergenza della struttura principale di Cotignola. Inoltre, le linee sismiche più recenti mostrano che l'anticlinale di Cotignola non deforma i riflettori dell'ultimo milione di anni.

Anche la relazione tra le cosiddette "anomalie" del reticolo idrografico ed il terremoto di Cotignola 1688 è stata approfondita con una sintesi delle conoscenze storico-archeologiche e geologiche sull'evoluzione del drenaggio. I dati dimostrano che i tratti considerati "anomali", in realtà, sono frammenti preservati di antichi tracciati fluviali, e che molte delle diversioni visibili nel drenaggio sono antropiche. Inoltre, i tracciati dei fiumi attuali si sono stabilizzati tra il XIII ed il XV secolo, molto tempo prima del terremoto citato. Non è quindi possibile mettere in relazione il terremoto con l'evoluzione dei fiumi.



In sintesi si evidenzia la necessità di emendare la struttura sismogenetica "ITIS 100 Bagnacavallo" e di proseguire gli studi per la definizione della struttura responsabile del terremoto del 1688.



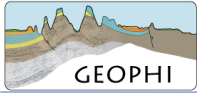
Premessa

La società Edison Stoccaggio, in qualità di titolare della concessione denominata "San Potito e Cotignola Stoccaggio" ha incaricato la società GEOPHI srl ad eseguire uno studio sulle strutture sismogenetiche presenti nell'area dei giacimenti di stoccaggio.

Lo studio è stato condotto utilizzando, oltre ai dati più recenti disponibili nella letteratura scientifica, anche il volume sismico 3D acquisito e processato da Edison Stoccaggio nel 2012-2013 su un'area di circa 110 km², ricoprente tutta la concessione di stoccaggio.

Per quanto riguarda le sorgenti sismogenetiche presenti nell'area in esame, si è fatto riferimento al database DISS dell'INGV dove sono riportate le strutture tettoniche potenzialmente capaci di generare terremoti superiori a M 5.5 in Italia e nelle aree circostanti. Dalla sua data di creazione, nel 2000, è stato aggiornato in 11 versioni, l'ultima delle quali (3.2.1) pubblicata online nell'aprile 2018. Si tratta di un prezioso strumento, di fondamentale importanza per la pianificazione territoriale e la protezione civile.

Nell'area dello stoccaggio San Potito e Cotignola il database DISS riporta le strutture sismogenetiche denominate "ITIS 100 Bagnacavallo" (sorgente sismogenetica individuale) e "ITCS 011 Ascensione - Armaia" (sorgente sismogenetica composita). Le caratteristiche di dettaglio di quest'ultima non sono presenti nel catalogo.



Introduzione

La scheda di presentazione della sorgente sismica "ITIS 100 Bagnacavallo" è stata creata da Burrato, Valensise, Maesano e Vannoli (tutti afferenti all'INGV) il 31/1/2001, ed aggiornata il 15/11/2013. Gli *slip rate* riportati nella scheda sono tratti da una pubblicazione di Maesano et al., (2015).

La scheda riporta le informazioni parametriche della struttura, che vengono riprodotte in Tabella 1.

PARAMETRIC INFORMATION

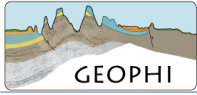
| PARAMETER | | QUALITY | EVIDENCE |
|-----------------------------|---------------|---------|--|
| Location [Lat/Lon] | 44.38 / 11.94 | OD | Based on macroseismic, geological and geomorphological data. |
| Length [km] | 9.1 | ER | Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). |
| Width [km] | 6.0 | ER | Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). |
| Min depth [km] | 2.5 | OD | Based on seismic profile and geomorphological observations. |
| Max depth [km] | 5.0 | OD | Based on seismic profile and geomorphological observations. |
| Strike [deg] | 119 | OD | Based on geological and geomorphological observations. |
| Dip [deg] | 25 | OD | Based on seismic profile and geomorphological observations. |
| Rake [deg] | 90 | OD | Inferred from geological data, constrained by orientation of T axes. |
| Slip Per Event [m] | 1.0 | ER | Calculated from M_0 using the relationship from Hanks and Kanamori (1979). |
| Slip rate [mm/y] min... max | 0.1...0.3 | LD | Based on geological data from Maesano et al. (2015). |
| Recurrence [y] min... max | 3333... 10000 | EJ | Inferred from slip rate and average displacement. |
| Magnitude [Mw] | 5.8 | LD | Value adopted from the historical earthquake catalogue CPT111. |

LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPIRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP; EJ=EXPERT JUDGEMENT;

Tabella 1 - Informazioni parametriche sulla sorgente sismica "ITIS 100 Bagnacavallo" nel catalogo DISS dell'INGV, tratte da:

http://diss.rm.ingv.it/dissnet/CadmoDriver?_action_do_single=1&_state=find&_token=NULLNULLNULLNULL&_tabber=0&_page=pGGsources_d&IDSource=ITIS100

Nei capitoli seguenti, discuteremo le informazioni contenute nella scheda, cercando di verificare i dati e le osservazioni sulla base delle quali sono state formulate le ipotesi di sorgente sismogenetica. A questo



scopo abbiamo svolto ricerche su materiale esistente in letteratura, arricchiti da dati liberi di provenienza industriale.

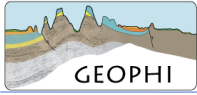
1 - Geometria della struttura Bagnacavallo

Di seguito (in lingua inglese come nell'originale) vengono riportati i commenti dei succitati autori alla scheda:

Current catalogues (CPTI, 2004) report a large event in 1688 (Me 5.9) that falls very close to this Source, having its epicentral area in Cotignola (Imax=IX). We associate this historical earthquake with the Bagnacavallo Source. Our preferred source model is consistent with the largest damage having been reported in Cotignola, Bagnacavallo, Solarolo, Russi and Lugo. A further constraint for the southeastern edge of the source could be represented by the occurrence of a large aftershock near Russi on 18 April 1688, a week after the mainshock (reported by Boschi et al., 1997)

This source belongs to the Romagna Folds the more internal folds of the Ferrara-Romagna Arc, that represents the outermost propagation of the Apennines compressional wedge.

Gli autori associano i terremoti dell'aprile 1688 alla sorgente Bagnacavallo. Questa sorgente sismogenetica viene definita come "preferita" in quanto consistente con i danni riportati in superficie. Si tratta dunque di una conclusione basata su informazioni bibliografiche dalle quali è possibile desumere

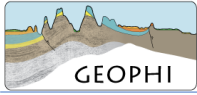


soltanto una posizione approssimativa dell'epicentro. Nella scheda, sebbene venga lasciato spazio ad alcune questioni aperte, non vengono fornite interpretazioni alternative circa la geometria in profondità della sorgente.

Based on the analysis of the subsurface data provided by the oil industry (Cassano et al., 1986; Pieri and Groppi, 1981) and on geomorphological observations provided by several investigators, we propose the existence of a major blind thrust having the following geometrical characteristics:

- *the strike is chosen according with the general orientation of mapped tectonic structures;*
- *the fault dips towards the SW, in agreement with subsurface evidence and based on the characteristic distance between the synclinal and anticlinal axes;*
- *the rake is assumed to be pure thrusting based on strike and on general geodynamic considerations;*
- *the down-dip width is based on the characteristic distance between the synclinal and anticlinal axes and on the assumptions made concerning the minimum and maximum faulting depth;*
- *the minimum and maximum depth are constrained by subsurface geology, by the symmetry of the anticline and by the general aspect-ratio of the anticline-syncline couple;*
- *the length is based on scaling with width and constrained by geomorphological observations.*

I due lavori strutturali, citati come base su cui è stata proposta la struttura sismogenetica di Bagnacavallo (da ora in poi struttura B), si basano fundamentalmente su sezioni geologiche interpretate, e come tali rappresentano un modello geologico. Nel caso di Cassano et al. (1986), si tratta di un lavoro



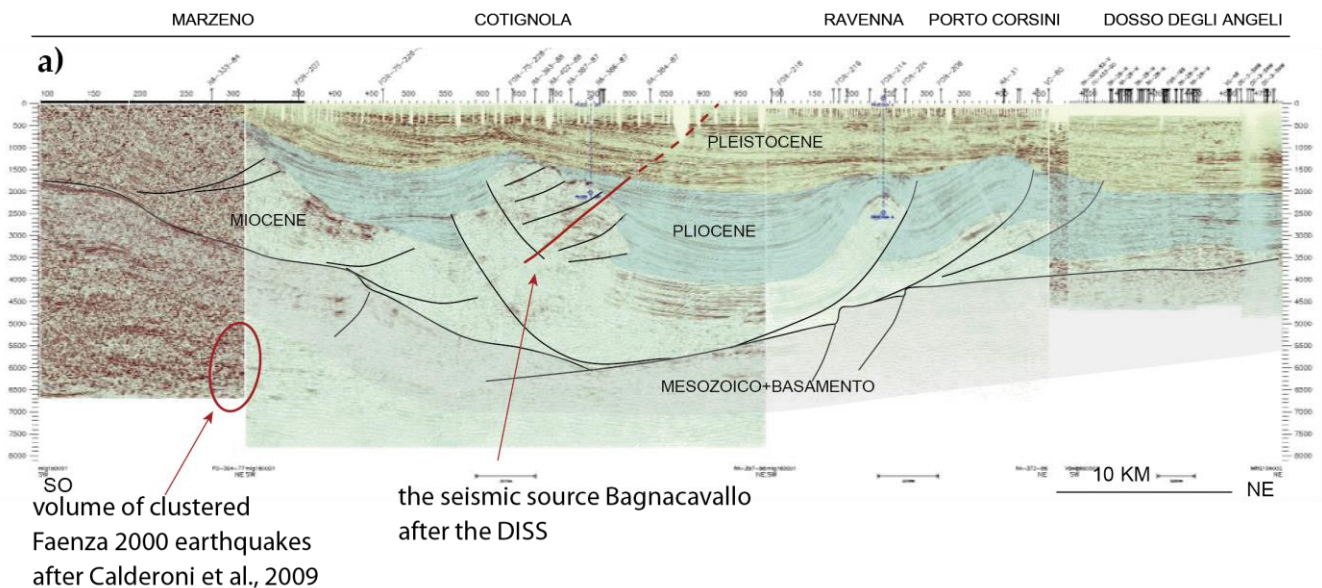
il cui scopo era far risaltare il basamento magnetico ricostruito in base a rilievi originali. Le strutture ad esso sovrastanti, come riportato dagli autori, sono state riprese e reinterpretate secondo lo stile corrente in quegli anni presso ENI Agip, senza tanta attenzione al dato originale, che infatti non viene riportato, sulla base di Pieri e Groppi (1981). Quest'ultimo lavoro, per quanto faccia vedere pochi dati originali (linee sismiche e pozzi di controllo), è formato da sezioni geologiche interpretative e schematiche. Pur essendo stato molto importante per l'epoca, il lavoro è molto datato, come evidenziano i numerosi e recenti lavori scientifici che presentano sezioni geologiche dal tracciato simile o identico, ma caratterizzate da faglie completamente differenti per geometria e localizzazione (e.g. Fantoni e Franciosi, 2010). Proprio in virtù del fatto che i successivi lavori scientifici hanno presentato sezioni geologiche molto differenti, il modello geologico presentato nella scheda deve essere verificato con dati sismici originali. Alcuni di questi sono pubblicati, altri sono presenti in relazioni presso i Ministeri, ma tutti sono disponibili presso l'industria (ENI, Edison), la quale non nega la visualizzazione, tantomeno per lavori di questo impatto sociale ed economico.

Di seguito presentiamo una sezione sismica composta, posta qualche km a est della ipotizzata struttura B, che permette di apprezzare lo stile strutturale della pianura romagnola (Fig. 1 e 2). Questa sezione, frutto dell'interpretazione congiunta di operatori ENI ed Edison in vista dell'apertura dello stoccaggio San Potito - Cotignola (Carcano et al., 2007), viene riportata in alcuni documenti recenti della società esercente, depositati presso il MISE.

Come si può chiaramente vedere (Fig. 1), la struttura di Cotignola è associata ad un importante retroscorrimento (faglia inversa vergente a sud), riconosciuto e cartografato anche da autori recenti (per

esempio: Boccaletti et al., 2011). Questa struttura, in Pieri e Groppi, 1981 e poi nel Modello Strutturale d'Italia (Bigi et al., 1990) era stata erroneamente interpretata come una faglia normale immergente a sudovest.

In corrispondenza dell'alto di Cotignola, la fig. 1 mette in evidenza una serie di faglie inverse immergenti verso SO, compatibili con l'ipotizzata sorgente sismogenetica Bagnacavallo (proiettata in tempi in fig.1), ma risultano tagliate da un successivo retroscorrimento che le disattiva cinematicamente. Tale retroscorrimento si collega in profondità alle strutture di Ravenna e Porto Corsini e, verso la catena appenninica, ad un'ampia anticlinale probabilmente a livello di basamento in cui sono stati localizzati i terremoti di Faenza 2000 (Calderoni et al., 2009), evidenziati in fig.1.



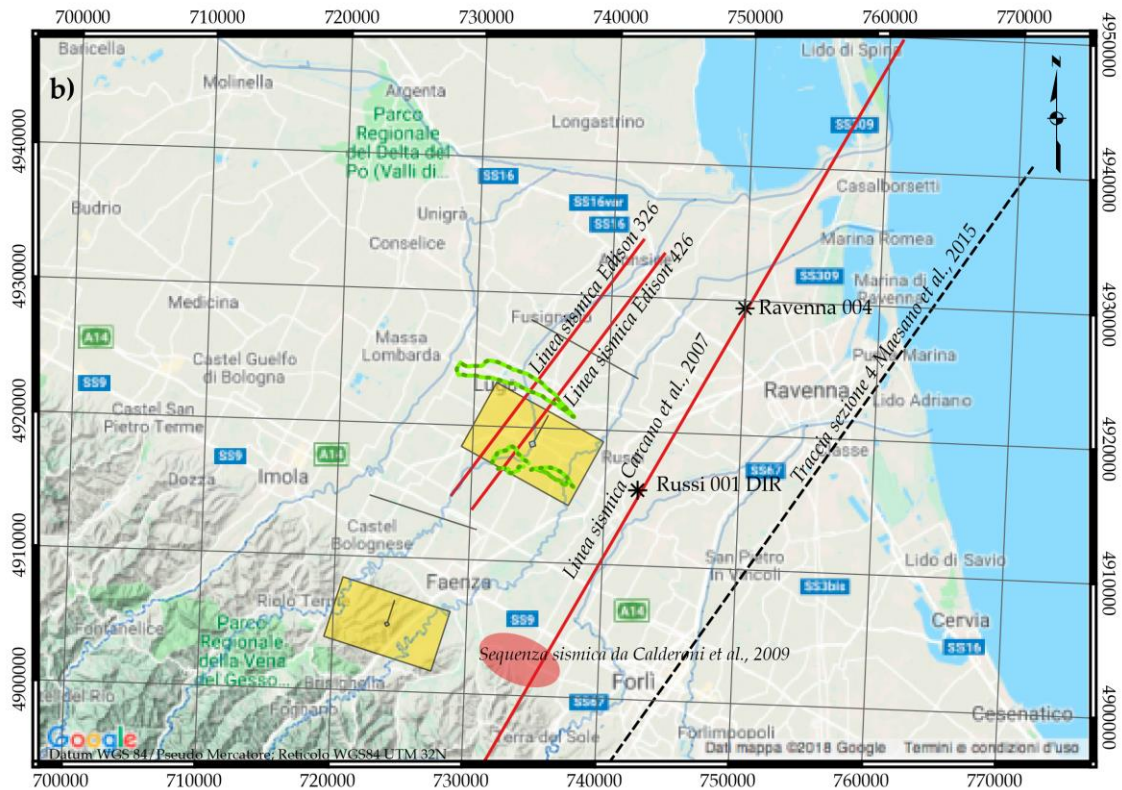


Figura 1a) - Sezione sismica composta in tempi doppi, da Carcano et al. 2007, con proiettata la sorgente Bagnacavallo definita da Burrato et al. nella scheda DISS. Evidenziato anche il volume di roccia interessato dagli eventi sismici di Faenza 2000, da Calderoni et al., 2009. Le velocità intervallari per la trasformazione in tempi delle informazioni spaziali sono prese da Molinari et al., 2015. 2 Index map delle sezioni sismiche.

Si noti infine che la sequenza sismica di Faenza 2000 (Calderoni et al., 2009), i cui ipocentri sono riportati in Fig. 1, ha generato sismi in un volume di roccia prossimo al sovrascorrimento più profondo visibile in sismica. Questo potrebbe suggerire che le strutture attive siano attualmente localizzate presso l'**anticlinale profonda** che si connette cinematicamente al retroscorrimento ed alle strutture di Ravenna-Porto Corsini. Ipotesi da confermare, che inevitabilmente porterebbe ad una differente geometria della sorgente sismica.

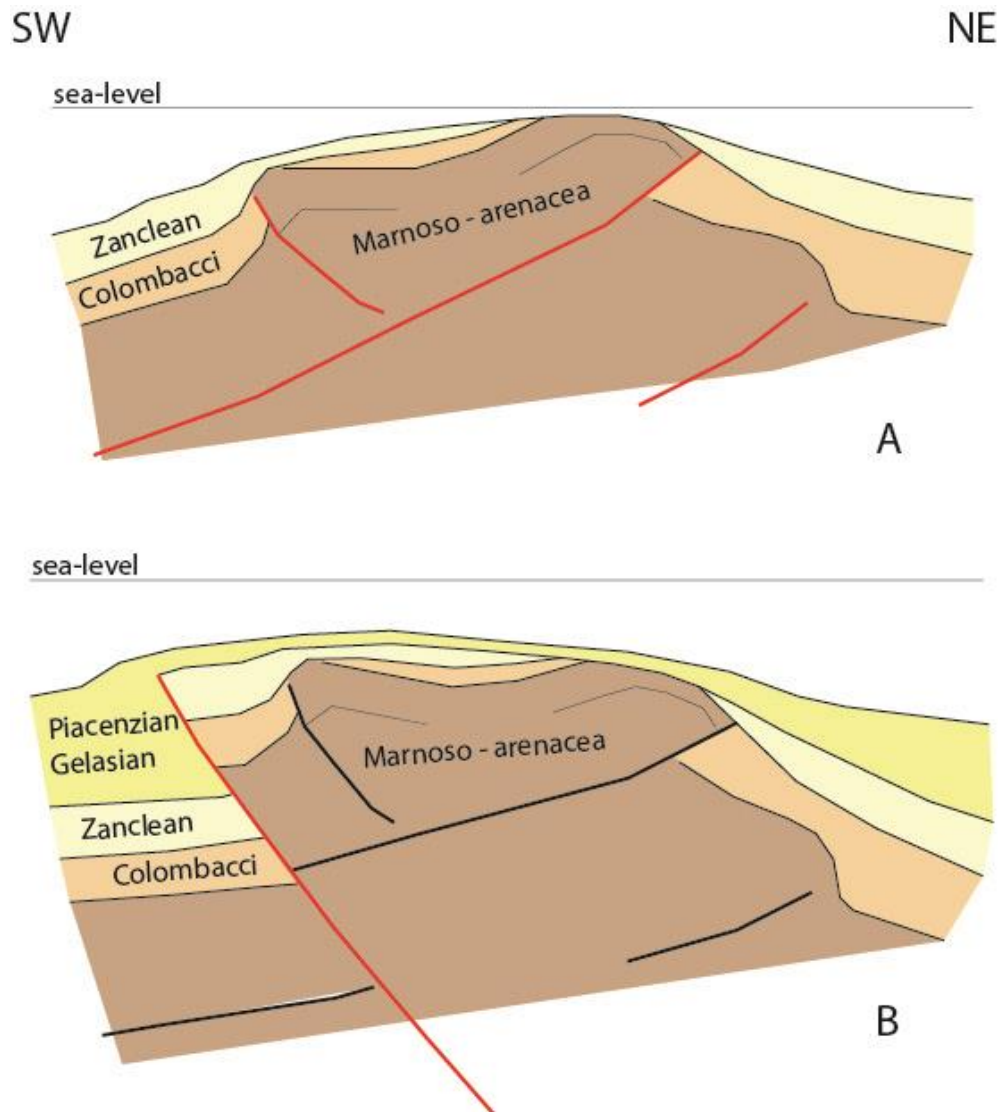
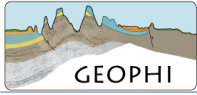
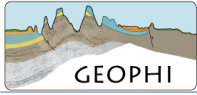


Figura 2 - Evoluzione dell'anticlinale di Cotignola. A) Zancleano (Pliocene inferiore). B) Piacenziano e Gelasiano (Pliocene superiore e Pleistocene inferiore). Si noti lo spostamento verso sudovest della culminazione assiale dell'anticlinale di Cotignola, che permette alle sabbie Zancleanee di slope di mineralizzarsi.

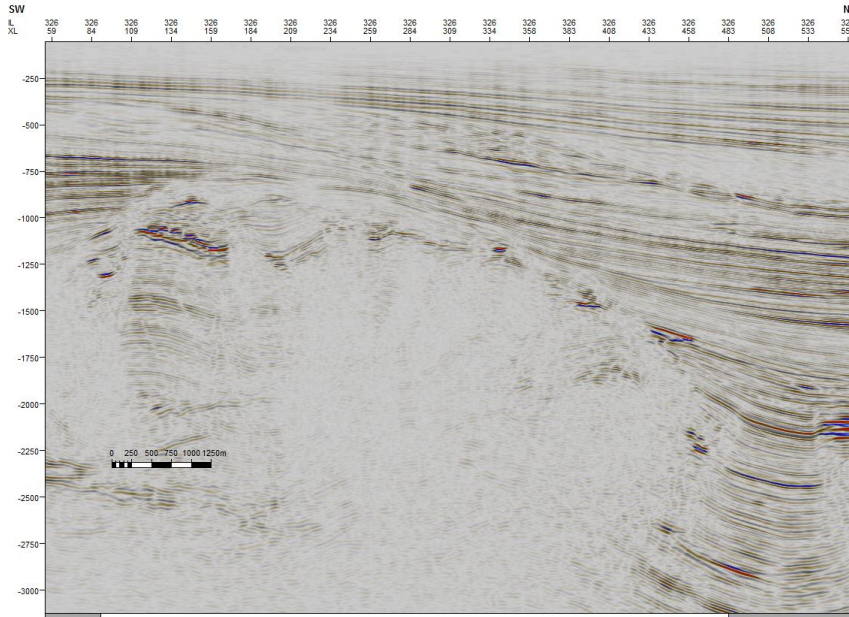


Anche i dati provenienti dai nuovi pozzi di Cotignola (Negri et al., 2014) dimostrano uno spostamento della culminazione assiale verso sudovest (Fig. 2). Infatti, nello Zancleano si formavano le sabbie di *slope* a causa dell'erosione dell'alto di Marnoso-arenacea, posizionato presso la culminazione assiale dell'anticlinale di rampa di un thrust vergente a nordest (struttura in rosso in figura 2A). A partire dal Piacenziano, e poi durante il Gelasiano, si assiste allo spostamento della culminazione assiale: le sabbie di *slope* Zancleane vengono a trovarsi presso la culminazione assiale e possono mineralizzarsi, grazie alle Argille azzurre emipelagiche che drappeggiano l'alto. Questo cambiamento di geometria si ottiene ad opera di un retroscorrimento (rosso in Figura 2B) che taglia e disattiva le precedenti strutture vergenti a nordest.

Analizzando i dati sismici recenti (volume sismico 3D acquisito e processato da Edison Stoccaggio), in figura 3 è possibile osservare due linee sismiche che tagliano trasversalmente la culminazione di Cotignola presso i cluster B e C. I riflettori dell'ultimo Milione di anni, sovrastanti l'intervallo meno riflettivo e cliniforme relativo alla progradazione dei corpi di spiaggia noti come Sabbie di Imola, non sono perfettamente orizzontali, ma tendono ad aprirsi verso nord, per effetto di una subsidenza differenziale. Resta da stabilire il ruolo relativo della tettonica e della compattazione nel generare queste geometrie. Tuttavia, al di sopra dell'anticlinale di Cotignola, ed in particolare nel suo lembo sud, si può osservare chiaramente l'assenza di deformazioni imputabili all'anticlinale nello stesso intervallo di riflettori. Le linee sismiche, di cui la figura 3 mostra solo un paio di esempi, non escludono la possibilità di deformazioni attive nell'ultimo Milione di anni, ma chiariscono che queste deformazioni non interessano l'anticlinale di

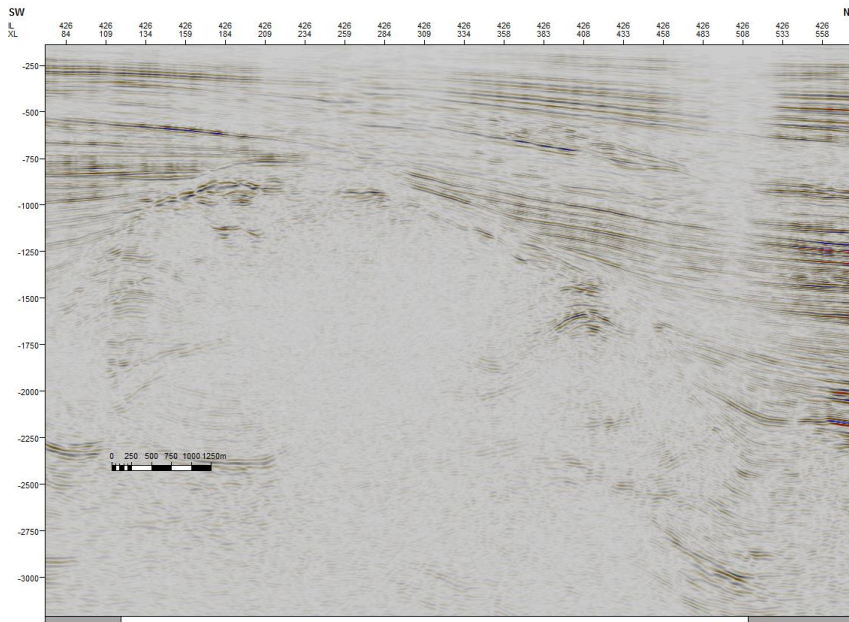


Cotignola. Una eventuale struttura attiva che possa spiegare la divergenza dei riflettori di figura 3 dovrebbe dunque essere cercata in altre posizioni.

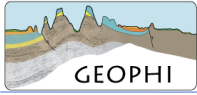


a)

Figura 3 - Profili sismici in tempi doppi attraverso l'anticlinale di Cotignola. a) Linea 326; b) Linea 426. Vedi Fig. 1b per la localizzazione.



b)



Sulla base dei dati sopra esposti, l'affermazione degli autori:

- *the fault dips towards the SW, in agreement with subsurface evidence and based on the characteristic distance between the synclinal and anticlinal axes;*
- *the minimum and maximum depth are constrained by subsurface geology, by the symmetry of the anticline and by the general aspect-ratio of the anticline-syncline couple;*

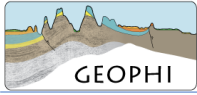
non è documentata, sia in termini di dimensioni che di direzione di immersione (vedi Fig. 1). Infatti, mancano di dati di qualità a supporto della ipotizzata struttura B; inoltre, la distanza tra sinclinale ed anticlinale non è in grado di discriminare la direzione di immersione della principale struttura attiva, né la sua profondità minima e massima.

Ancora gli autori:

- *the strike is chosen according with the general orientation of mapped tectonic structures;*
- *the rake is assumed to be pure thrusting based on strike and on general geodynamic considerations;*

queste due frasi si presentano come deboli ipotesi legate reciprocamente. Ovvero, viene ipotizzata una direzione della struttura B, basandosi su strutture tettoniche cartografate. In letteratura, si può notare che esiste un ben noto andamento arcuato delle strutture tettoniche in Pianura Padana. Dunque, quale direzione tra le tante visibili è stata scelta? e perchè? La scelta della direzione di rake è conseguente a quella precedente: in base alle precedenti considerazioni, se si scegliesse una direzione differente, anche la direzione di rake basata sulle stesse considerazioni geodinamiche cambierebbe...

- *the length is based on scaling with width and constrained by geomorphological observations.*



Anche quest'ultima frase è basata sulle ipotesi esposte e non dimostrate in precedenza. Per quanto riguarda la geomorfologia, si veda il prossimo capitolo 2.

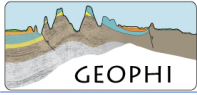
- *The position of the active anticline, located by means of geomorphological observations, is slightly shifted to the north-east with respect to the geological anticline mapped on the basis of geophysical exploration data. This observation may be the evidence of growth of the thrust fault along dip (the top of the fault plane becomes shallower).*

Questa frase non è molto chiara, e dipende dal modello proposto da Burrato et al., 2003 per la definizione di "anomalia del drenaggio" e per le sue relazioni con il movimento cosismico dell'anticlinale. Se abbiamo ben capito, nel caso di Cotignola queste non coincidono (?).

- *This Source is very well developed in the subsurface, but has a limited geomorphic expression. The frequent and substantial diversions and shifts of the rivers flowing around it suggest that this is a rather fast structure.*

Anche in questo caso, lo scopo e le parole degli autori non sono chiari. Definiscono la sorgente "molto ben sviluppata in profondità (tuttavia si veda Fig. 1), ma, d'altra parte, "di limitata espressione geomorfologica". Gli autori fanno riferimento a "sostanziali diversioni e spostamenti dei fiumi che scorrono attorno ad essa" per concludere che si tratta di una "struttura veloce". Non sappiamo a quale velocità si riferiscano gli autori, e pertanto non possiamo commentare ulteriormente.

In conclusione della parte sulla geometria, i dati sismici mostrano:



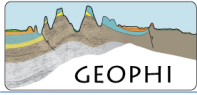
- a) che la struttura principale al di sotto dell'anticlinale di Cotignola è un thrust cieco immergente a NE (retroscorrimento), che rimaneggia precedenti, più piccole e più superficiali strutture immergenti a SW;
- b) che la struttura anticlinale di Cotignola non deforma gli strati più recenti di 1 Milione di anni;
- c) che esiste la possibilità che in zona siano attive strutture tettoniche associate a lunghezze d'onda maggiori dell'anticlinale di Cotignola, e dunque più profonde. Tale possibilità dovrebbe essere esplorata con studi specifici.

2 - Osservazioni geomorfologiche a supporto della attività recente della struttura

The reconstruction of the drainage system made by Gambi (1949) shows progressive attraction of the Senio and Lamone rivers towards each other in an area located around the town of Cotignola; downstream this area the two rivers are progressively shift sideways. The analysis of the rivers channel behaviour constrain (sic!) the position of the syncline and of the anticline.

Questo è un punto molto importante nella definizione della struttura B. Di conseguenza anche noi cercheremo di verificare queste affermazioni in modo approfondito.

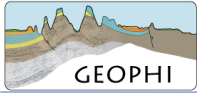
Nei commenti alla scheda, riportati qui sopra, gli autori dichiarano che l'analisi storica dei tracciati dei fiumi mostra un "progressiva attrazione di Senio e Lamone" presso Cotignola. Nel lavoro di Burrato et al. (2003), alcuni degli stessi autori definiscono questo movimento come una firma dell'attività cosismica



dell'anticlinale, in quanto se le strutture si muovessero costantemente (*creep*) di pochi decimi di millimetro l'anno non avrebbero il potenziale per deformare la superficie e quindi deviare il tracciato dei fiumi, dato il tasso di sedimentazione di un ordine di grandezza maggiore. Tanto è vero che la scelta della sorgente B viene fatta associando la ipotizzata "anomalia del drenaggio" dei fiumi Senio e Lamone ai terremoti del 1688. Dunque, nell'ipotesi di Burrato et al. (2003), ripresa nella scheda che stiamo commentando, si fa invece riferimento ad un "improvviso sollevamento cosismico dell'anticlinale e subsidenza della sinclinale" anche per spiegare una piena di poco successiva. Questo concetto risulta dunque in contraddizione con la "progressiva attrazione" dei due fiumi indicati nella scheda.

L'idea di fondo che ha permesso l'identificazione della struttura B da parte degli autori della scheda è la presenza sul Senio e Lamone di un'anomalia del drenaggio (Burrato et al., 2003).

Gli autori dicono di aver utilizzato la pendenza della topografia, anche se presentano solo un esempio a Nord del fiume Po in un contesto di assenza di sedimentazione Olocenica. Nel caso della Romagna la topografia è dominata dalla presenza di dossi fluviali e depressioni che sono l'espressione della sedimentazione recente dei fiumi (oltre 2 m documentati a Cotignola negli ultimi 1000 anni, Marconi et al., 2008). Dunque, nel caso in esame, è la sedimentazione che crea la topografia anche negli ultimi secoli, come si nota nel DEM ad alta risoluzione di figura 4a (da Perini et al., 2017). Qualunque direzione avesse preso un fiume, per motivi naturali o antropici, avrebbe creato una topografia (dosso fluviale) secondo quella direzione. Una successiva diversione secondo orientazioni differenti è destinata a creare una topografia orientata diversamente, e a mascherare i tracciati precedenti nel giro di qualche secolo. La



crescita della topografia fluviale, peraltro, compete con la subsidenza, che tende ad attenuare gli effetti topografici della sedimentazione.

Dalla figura 4a si nota che la maggior parte dei dossi fluviali, come tutta l'idrografia secondaria, sono orientati verso N15E, secondo l'asse dei cardini massimi della centuriazione, che è stata creata a partire dal II secolo a. C. in modo perpendicolare alla Via Aemilia. Alcuni tratti hanno direzione NW, come il Senio a nord di Cotignola. Tuttavia, un attento esame della micromorfologia permette di vedere tracce di drenaggi orientati più verso est. Per capire quale era la reale linea di massima subsidenza, si esamini la figura 5 (da Arca e Beretta, 1985). Si tratta della subsidenza calcolata sulla base delle livellazioni topografiche lungo le dorsali IGM nell'intervallo di tempo 1897 - 1957, sufficiente a minimizzare gli errori di misura. Si tratta di un periodo con scarsa o nulla subsidenza antropica, prima delle perturbazioni legate ad emungimento degli acquiferi e degli idrocarburi, che creano gli "occhi di bue" visibili in tutte le mappe di subsidenza più recenti (si veda Fig. 4b).

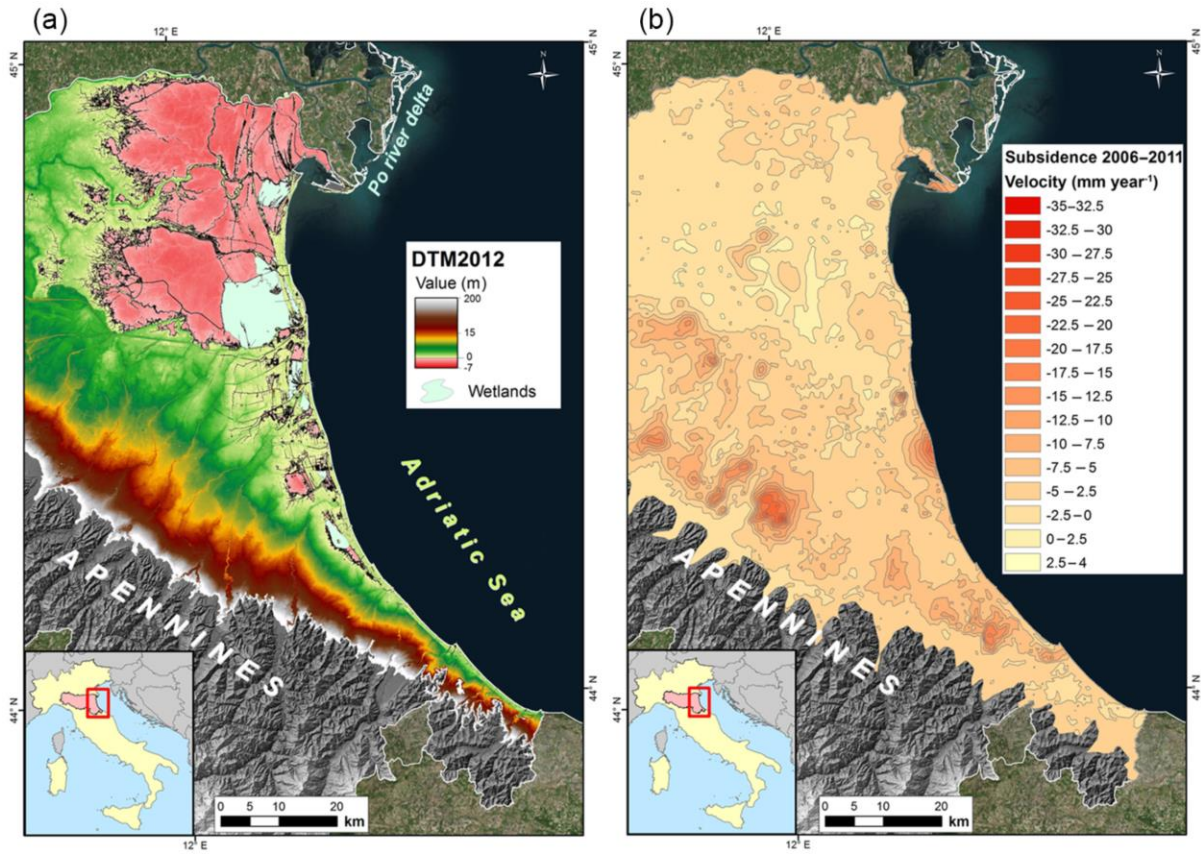
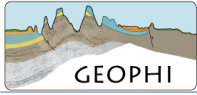


Figura 4a - Topografia e b) subsidenza della Pianura Romagnola da dati InSAR 2006 - 2011 (da Perini et al., 2017).

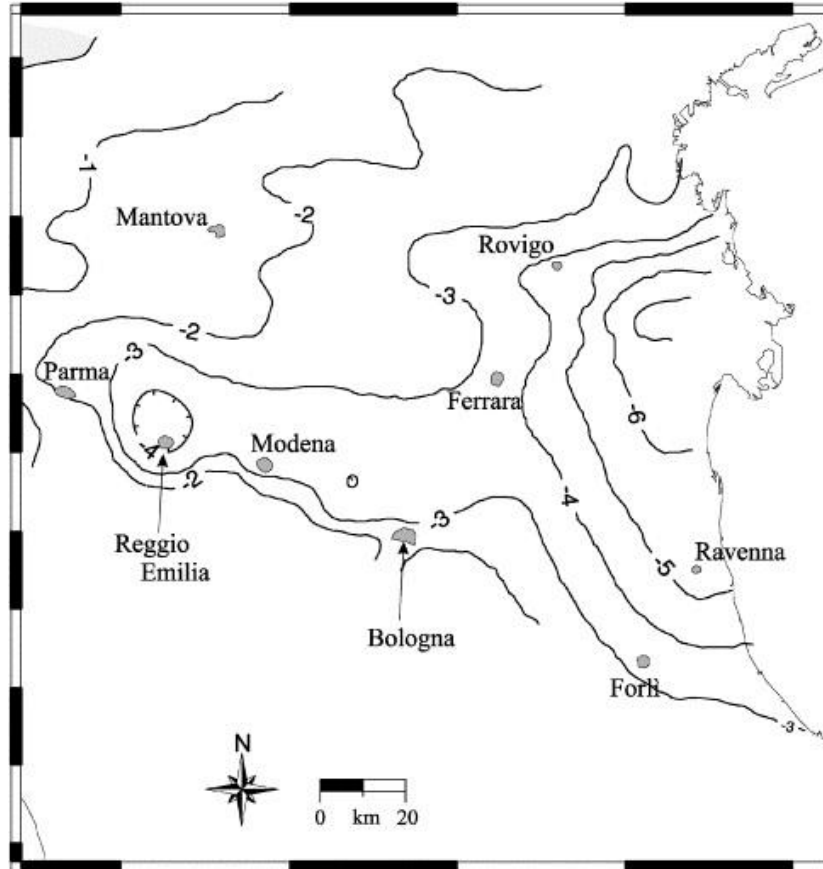


Fig. 5 - Velocità geodetiche in mm/anno basate sulla livellazione delle dorsali IGM nel periodo 1897-1957 (da Arca e Beretta, 1985)

In questa figura 5, i valori assoluti risentono della scelta degli autori di riferire le linee a caposaldo "fisso" posti in collina, dove sappiamo esserci un attivo sollevamento tettonico. Dunque i valori si presentano amplificati di circa 1 mm/anno, che è il valore di sollevamento misurato da GPS nella collina appenninica secondo Serpelloni et al. (2013). Si noti che la subsidenza crea un pendio nella pianura romagnola in direzione circa N55E.

Gli autori della scheda sulla struttura B si basano sull'evoluzione storica del drenaggio di Gambi (1949). Ancora, si tratta di letteratura molto vecchia, che non può tenere conto di tutte le conoscenze prodotte dai geologi e dagli archeologi che hanno lavorato nell'area nei 70 anni successivi. A titolo di esempio, gli antichi tracciati dei fiumi romagnoli sono stati investigati da Veggiani (1975) su basi storico-toponomastiche, da Franceschelli e Marabini (2007) su basi geologico-stratigrafiche ed archeologiche, e da Marconi et al. (2008) su basi sedimentologiche/provenienza delle sabbie.

Diventa fondamentale dunque definire le variazioni storiche del tracciato dei fiumi per capire soprattutto: 1) se i fiumi si sono spostati in seguito al terremoto del 1688, e 2) se si può parlare di "progressiva attrazione di Senio e Lamone".

Le figure successive sono state generate tramite sintesi delle fonti sopra citate e l'analisi dei dossi fluviali ancora visibili nel DEM ad alta risoluzione. I punti salienti di ogni quadro temporale sono riassunti in una serie di tabelle (in appendice) che chiariscono la distribuzione spaziale ed il tipo di dato utilizzato, nonché la fonte.

In figura 6 viene presentato il drenaggio della pianura romagnola in epoca Romana e Bizantina.

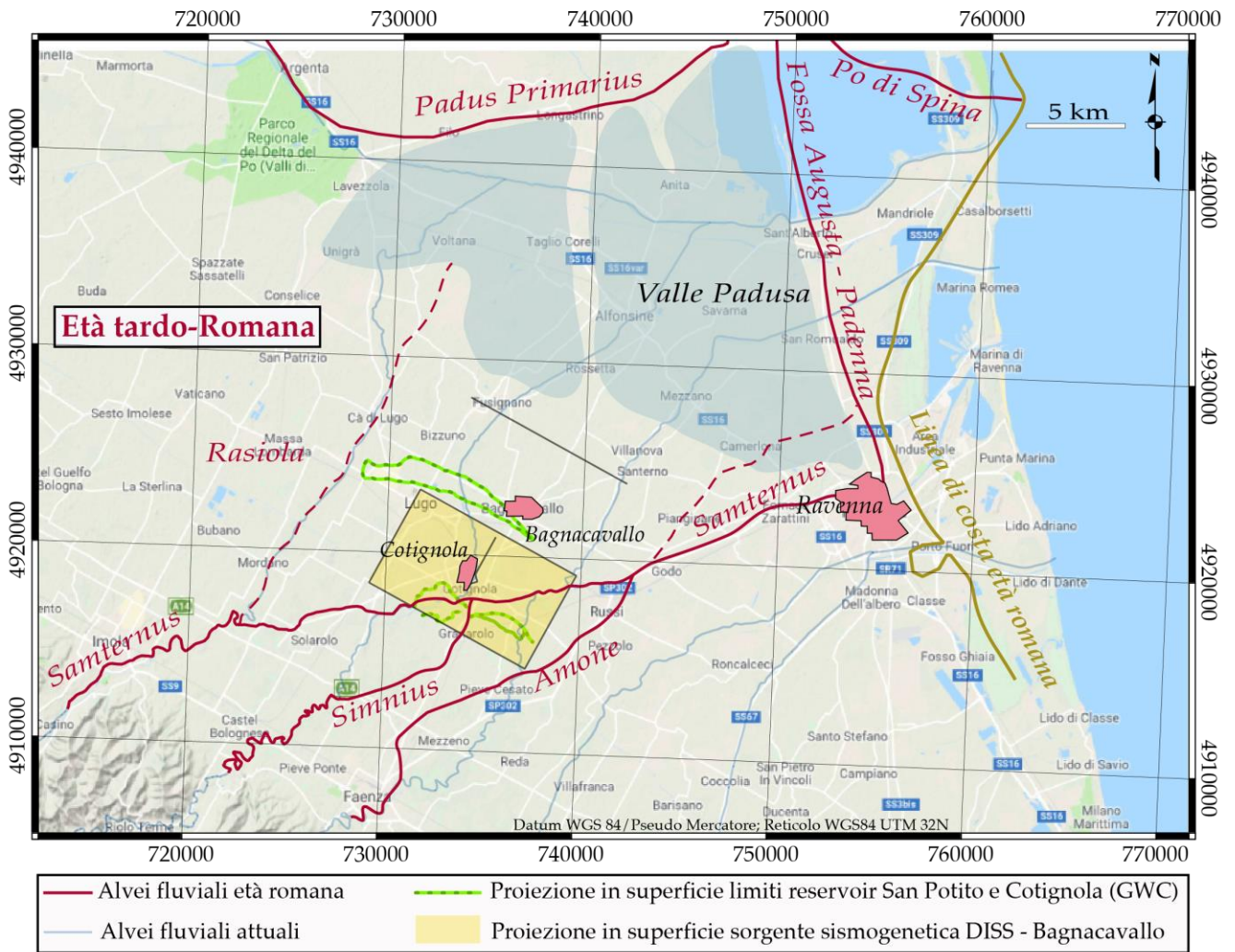
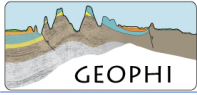


Figura 6 - Ricostruzione dell'andamento in pianta dei fiumi in età tardo Romana. In grigio le paludi. Compilata da varie fonti (vedi Tab. 2)



L'idrografia era dominata dalla presenza del Po di Spina associato a un dosso fluviale molto marcato che, insieme ai cordoni litorali, provocava il ristagno delle valli. Tra i fiumi appenninici, il Santerno, dotato del bacino più ampio e quindi delle portate maggiori, aveva un tracciato trasversale ai cardini massimi. Il Senio ed il Lamone, con tracciati differenti dagli attuali, costituivano affluenti di destra del Santerno, le cui acque arrivavano a lambire la città di Ravenna, ed erano canalizzate per il fossato delle mura e gli usi civili. Inoltre esisteva una connessione da nord (Po di Spina) ad opera di un canale artificiale, detto Fossa Augusta. Si noti come l'andamento dei fiumi fosse molto più orientato verso Est rispetto all'attuale, e come questa direzione si avvicini a quella di massima pendenza della subsidenza riportata in figura 5. In dettaglio su Cotignola, si può notare che il tratto orientato N50E dell'attuale Senio e Lamone corrisponda all'antico tracciato del Santerno romano. Alcuni autori (Franceschelli e Marabini, 2007) non concordano con la connessione tra Russi e Ravenna del Santerno, che ipotizzano più settentrionale. Il tracciato proposto in figura 6 si basa sulla presenza di un dosso fluviale relitto e su Veggiani (1975).

Nell'alto Medioevo (Fig. 7) la situazione geografica cambia notevolmente a causa dell'avulsione del Po, con la formazione del ramo chiamato Po di Primaro.

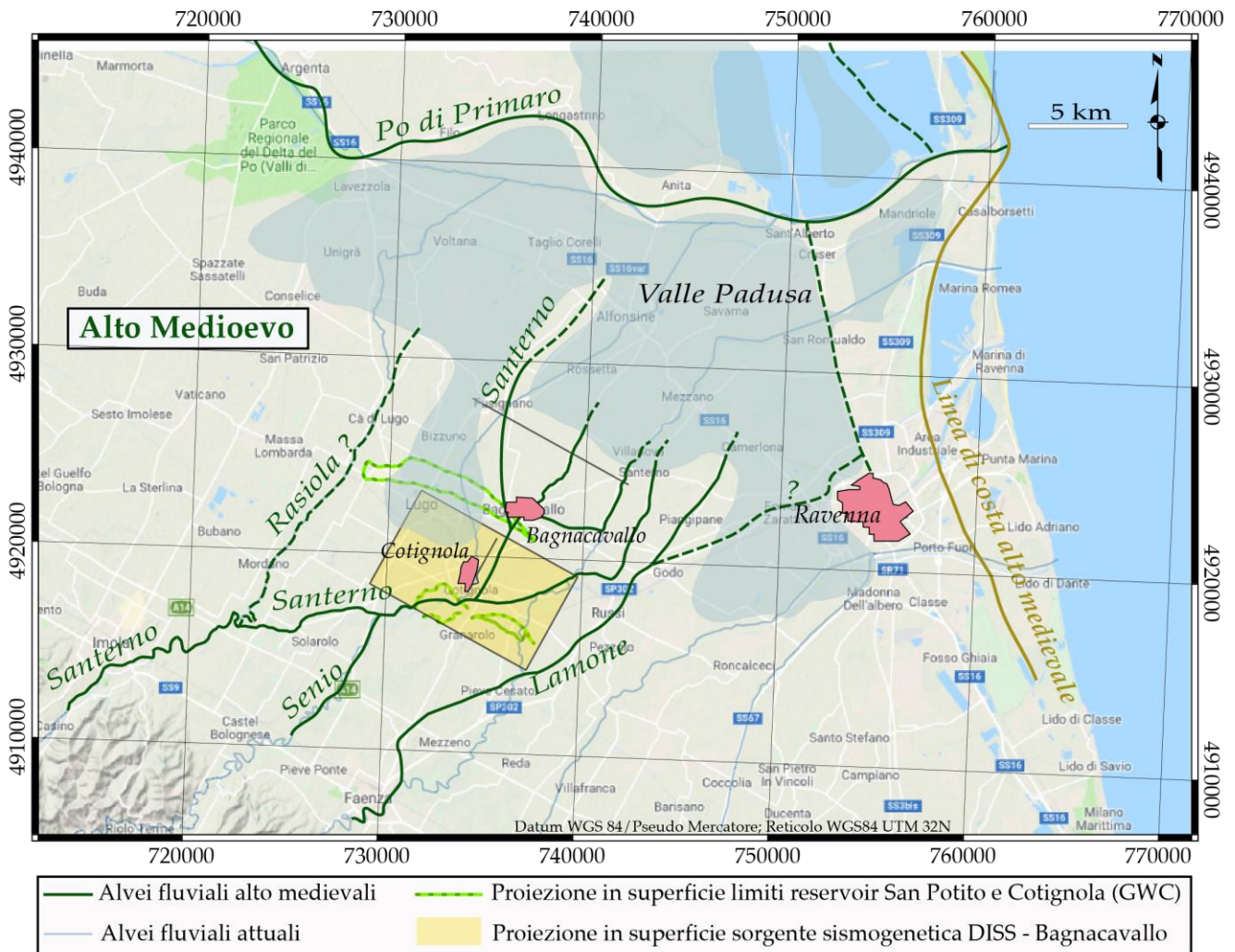
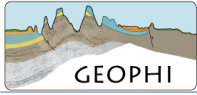


Figura 7 - Ricostruzione dell'andamento in pianta dei fiumi in età Alto Medioevo. In grigio le paludi. Compilata da varie fonti (vedi Tab. 3).

In conseguenza di questo fatto, la fascia delle paludi si sposta verso sud, andando ad impensierire gli antichi castra bizantini come castrum Tibericum, ancora chiamato così nel VIII secolo. Quest'ultimo viene invece chiamato Balneocaballum nel X secolo, come ancora oggi, per la presenza di un ramo del Santerno che attraversava il castrum e costringeva al guado. Questo fiume infatti viene deviato verso N15E



all'altezza di Cotignola, con la creazione di un canale che si diramava verso le paludi (Fig.7). L'analisi dei sedimenti (Marconi et al., 2008) documenta anche la presenza di un ramo del Santerno attivo anche ad ovest dell'attuale Fusignano (non ancora presente all'epoca in quanto fondata intorno al 1250). Il Santerno proseguiva ancora oltre Cotignola, ma veniva piegato in direzione dei cardini massimi fino al villaggio ancora oggi chiamato Santerno. Nell'insieme, queste diversioni verso N15E non hanno niente di naturale, seguono quasi tutte le direzioni dei cardini massimi (ad est di Bagnacavallo, si noti un tratto parallelo ai decumani) e permettono alle acque del Santerno di portare sedimento verso le paludi, in un efficace tentativo di contrastare lo spostamento delle paludi verso sud.

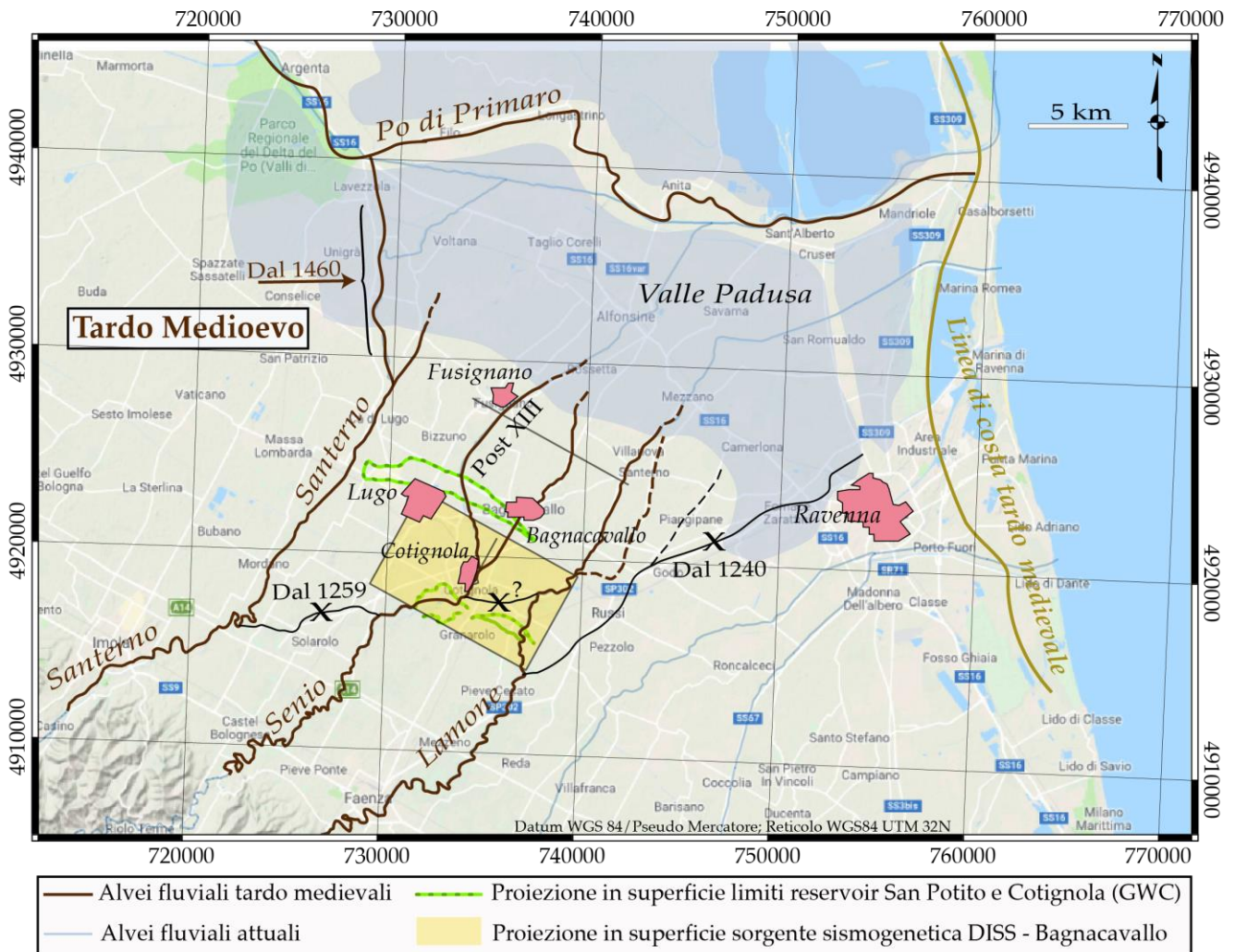
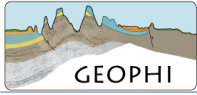


Figura 8 - Ricostruzione dell'andamento in pianta dei fiumi in età Tardo Medioevo. In grigio le paludi. Compilata da varie fonti (vedi Tab. 4).

In epoca tardo medievale (Fig. 8), a partire dal 1259, in seguito alla disastrosa piena con la distruzione dei villaggi a sud di Lugo (Tabanelli, 1972), viene disattivato il ramo est del Santerno che viene indirizzato lungo il corso NE detto Rasiola e, successivamente (1460), innestato nel Po di Primario. I vecchi tratti del Santerno sono utilizzati dal Senio, tra Solarolo e Cotignola, e dal Lamone tra Cotignola e Russi. Il bordo



meridionale delle paludi della Valle Padusia si sposta verso nord a dimostrazione dell'efficacia sedimentaria dei canali orientati N15E.

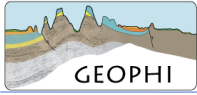
In conclusione della parte di geomorfologia fluviale possiamo affermare che i tracciati del Senio e del Lamone rappresentano una sintesi delle vicende naturali ed antropiche che hanno trasformato i tracciati dei fiumi romagnoli a partire da un corso di età romana verso N50E, di cui restano alcuni residui tratti, mentre i tratti in direzione N15E e NW rappresentano canalizzazioni altomedievali, probabilmente effettuate per colmare le paludi della Valle Padusia. Non si può dunque parlare di "progressiva attrazione" di Senio e Lamone. Inoltre, si può provare che i tracciati moderni del Senio e del Lamone furono acquisiti tra il XIII ed il XV secolo, dunque molto prima del terremoto del 1688. I dati presentati smentiscono una relazione tra spostamenti di tracciato dei fiumi Senio e Lamone ed il terremoto del 1688.

3 - Piene associate al terremoto

Ferrari et al. (1985) and Boschi et al. (1997) report the occurrence of floods of the Senio and Lamone rivers in the Cotignola area about ten days after the earthquake. These accounts are consistent with sudden coseismic uplift of the anticline and subsidence of the syncline driven by the blind thrust fault.

Gli autori ritengono questo dato "coerente" con un quadro di deformazione cosismica.

Secondo il nostro parere, non esiste alcuna coerenza o possibile correlazione tra il terremoto e la piena citata, dato che si tratta di singoli eventi di cui non si conosce la distribuzione statistica. Se dei



terremoti non conosciamo i tempi di ricorrenza, per le piene possiamo cercare una frequenza riferendoci ai dati del periodo 1937-1997 (60 anni), ove, in presenza di argini artificiali di quasi 10 m in pianura, il Senio ha esondato 7 volte in seguito a piene con portate di picco comprese tra 110 e 400 m³/s, che hanno creato ristagni in ampie aree attorno al fiume (Artina et al., 1997; si veda Fig. 9).

La piena citate dagli autori della scheda non è certo l'unica o la più importante tra quelle citate dalle fonti storiche. A titolo di esempio, il territorio a sud di Lugo, nei fondi dei conti Cunio, fu colpito da una devastante inondazione intorno al 1250, ben prima del terremoto, con la conseguente distruzione di villaggi ed il loro abbandono. La popolazione fu spostata a Nord dove fu fondata l'attuale Fusignano (Tabanelli, 1972; Fig. 8). Da notare il fatto che il territorio a sud di Lugo corrisponde alla culminazione dell'anticlinale di Cotignola nel sottosuolo. Dunque non sembra esserci una selettività areale delle inondazioni rispetto all'anticlinale sepolta di Cotignola.

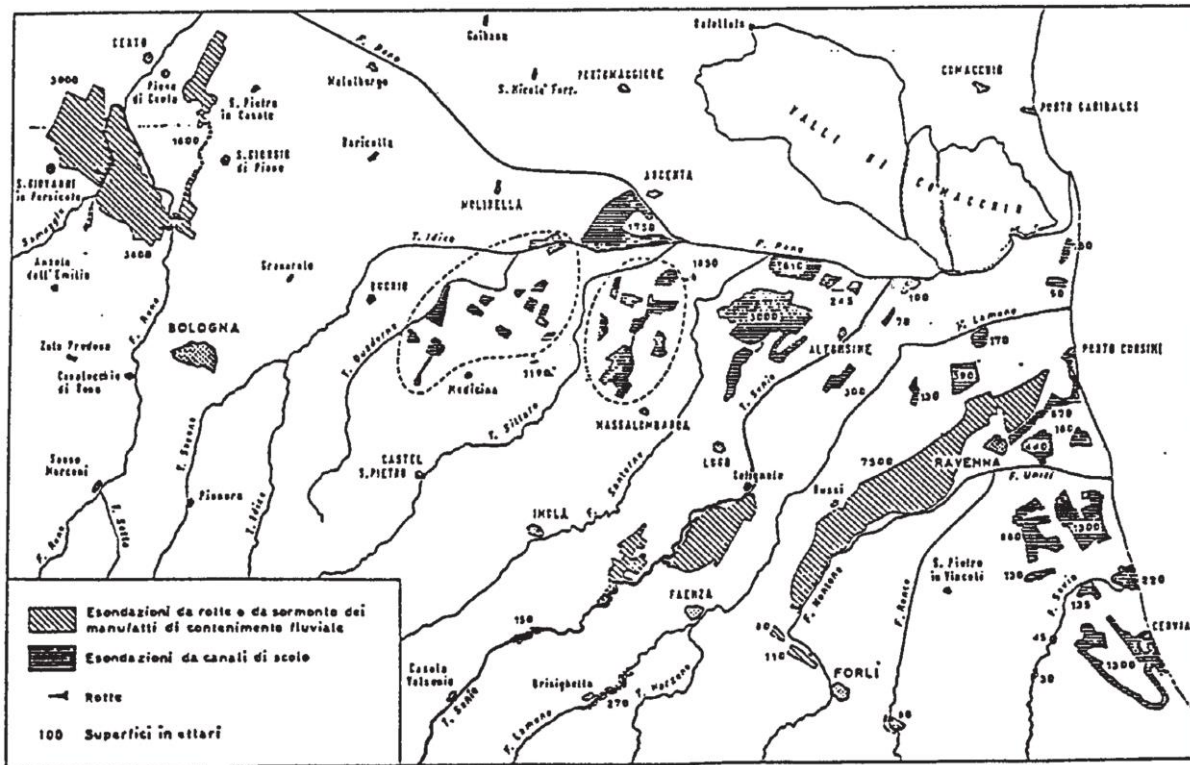
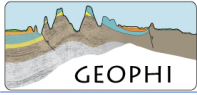


Figura 9 - Distribuzione aree alluvionate in seguito all'evento di novembre 1966 nel bacino del Fiume Reno (da Artina et al., 1997).

In conclusione di questo paragrafo, riteniamo non si possa parlare di coerenza o correlazione tra il terremoto e una piena fluviale. La frequenza delle piene recenti, circa ogni 10 anni, rende particolarmente improbabile una correlazione con i sismi, i cui tempi di ricorrenza non sono noti, ma sono ritenuti dagli stessi autori della scheda di $\approx 3333 - 10000$ anni.

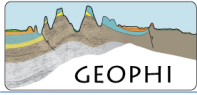
4 - Slip rates



Nelle informazioni parametriche riportate in tabella 1, gli autori propongono *slip rates* compresi tra 0.1 e 0.3 mm/anno, riferendosi a dati di letteratura provenienti da Maesano et al. (2015). Riteniamo alcuni aspetti di quest'ultimo lavoro particolarmente sfortunati, sia per l'imprecisione di localizzazione e/o di geologia delle sezioni geologiche, sia per la scelta di basare le stime deformative su sezioni idrogeologiche edite nel 1998, ancora una volta modelli interpretativi e non dati oggettivi. Ma il problema maggiore del lavoro di Maesano et al. (2015) è nella approssimazione dei parametri usati nella definizione della compattazione dei sedimenti. Infatti, la definizione litologica, invece di essere sito-specifica e basata su stratigrafie reali, è assunta a priori come una omogenea miscela di sabbia e fango al 50%, in spregio alle variazioni stratigrafiche laterali e verticali. Inoltre, la decompattazione è fatta solo per il Pliocene e Pleistocene, tralasciando il contributo del Miocene. Infine, Maesano et al. (2015) non hanno tenuto conto della mancata compattazione di orizzonti mineralizzati/pressurizzati presso le anticlinali, con conseguente sovrastima della componente tettonica nelle anticlinali.

Un problema altrettanto grave di questo lavoro, nella scelta fatta per definire gli *slip rates* di Bagnacavallo, è il fatto che la struttura sismogenetica per cui Maesano et al. (2015) hanno proposto una stima, non è la sorgente B, ma una differente posta a oltre 15 km verso SE (si veda Fig. 1b per la localizzazione).

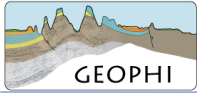
Per questi motivi, si ritiene che gli *slip rates* proposti per la struttura B non siano validi, a causa delle assunzioni arbitrarie e della mancanza di dati, nonché al riferirsi ad una struttura differente da quella dello studio Maesano et al. (2015).



5 - Conclusioni

In conclusione della verifica dei dati e delle affermazioni presenti nella scheda della sorgente sismica Bagnacavallo del DISS possiamo affermare i seguenti fatti:

- Al contrario di quanto ipotizzato da Burrato e coautori della scheda, la struttura principale al di sotto dell'anticlinale di Cotignola è un thrust cieco immergente a NE (retroscorrimento), che rimaneggia precedenti, più piccole e più superficiali strutture immergenti a SW.
- La struttura anticlinalica di Cotignola non deforma gli strati più recenti di 1 Milione di anni.
- Esiste la possibilità che nell'area siano attive strutture tettoniche associate a lunghezze d'onda maggiori dell'anticlinale di Cotignola, e dunque più profonde. Tale possibilità dovrebbe essere esplorata con studi specifici.
- Data la storia nota dei tracciati dei fiumi, non si può parlare di "progressiva attrazione" di Senio e Lamone. Inoltre, si può provare che i tracciati moderni del Senio e del Lamone furono acquisiti tra il XIII ed il XV secolo, dunque molto prima del terremoto del 1688.
- I dati presentati smentiscono una relazione tra gli spostamenti del tracciato dei fiumi Senio e Lamone ed il terremoto del 1688.
- Non riteniamo coerente proporre una correlazione tra il terremoto del 1688 e una piena fluviale ad esso successiva, in assenza di una valida distribuzione statistica di entrambi gli eventi.
- Gli *slip rates* proposti per la sorgente Bagnacavallo sono stati definiti per un'altra struttura, posta 15 km a sudest da un lavoro scientifico viziato da assunzioni generiche ed imprecisioni.



Bibliografia

Arca, S., Beretta, G.P., 1985. Prima sintesi geodetico-geologica sui movimenti verticali del suolo nell'Italia Settentrionale (1897- 1957). Boll. Geod. Sc. Aff. 44, 125-156.

Artina, S., Bizzarri, A., Lamberti, A., Todini, E., 1997. Studio idraulico del torrente Senio nel tratto compreso tra la localita' Isola e la foce in Reno: verifica delle condizioni di deflusso in piena e proposte di intervento. Università degli Studi di Bologna, DISTART, 200 pp.

Bigi, G., Cosentino, D., Parotto, M., Sartori, R., Scandone, P., 1990. Structural model of Italy 1:500000, sheet 1. SELCA, Firenze.

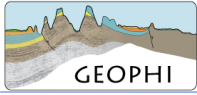
Boccaletti, M., Corti, G., Martelli, L., 2011. Recent and active tectonics of the external zone of the Northern Apennines (Italy). International Journal of Earth Sciences, 100 (6), pp. 1331-1348.

Burrato, P., Ciucci, F., Valensise, G., 2003. An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: Evidence for active blind thrust faulting. Annals of Geophysics, 46 (5), pp. 865-882

Cani, N., 2017. *Santi, guerrieri e contadini*, Il Ponte Vecchio, Cesena, pag. 111.

Calderoni, G., Di Giovambattista, R., Burrato, P., Ventura, G., 2009. A seismic sequence from Northern Apennines (Italy) provides new insight on the role of fluids in the active tectonics of accretionary wedges. Earth and Planetary Science Letters, 281 (1-2), pp. 99-109.

Carcano, C., Livraghi, L., Nerby, A., Rogledi, S., Terazzi, F., 2007 Campi di Cotignola e S. Potito. Interpretazione congiunta geologico - geofisica. Rel. ESEI n. 0/200, San Donato Milanese.



Cassano, E., Anelli A., Fichera R., Cappelli V., 1986. Pianura Padana: interpretazione integrata di dati geologici e geofisici, in *Proceedings of the 73° Meeting of the Società Geologica Italiana, September 29-October 4, 1986, Rome, Italy*, pp. 27.

Donati, L., 2008. Idrografia antica nella pianura ravennate, Faenza, Stefano Casanova Editore.

Fantoni R. and Franciosi R., 2010. Mesozoic extension and Cenozoic compression in Po Plain and Adriatic foreland. In: Sassi F.P. (Ed.). *Nature and Geodynamics of the Lithosphere in Northern Adriatic*, Rendiconti Fisica Accademia Lincei, **21** (Suppl. 1): 197-209, DOI: 10.1007/s12210-010- 0102-4.

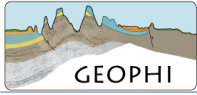
Franceschelli, C., Marabini, S., 2007. Lettura di un territorio sepolto. La pianura Lughese in età Romana. Studi e Scavi nuova serie n. 17, Ante Quem. 222 pp.

Molinari, I., Argnani, A., Morelli, A., Basini, P., 2015. Development and testing of a 3D seismic velocity model of the Po Plain sedimentary basin, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105 (2), pp. 753-764.

Maesano, F.E., D'Ambrogi, C., Burrato, P., Toscani, G., 2015. Slip-rates of blind thrusts in slow deforming areas: Examples from the Po Plain (Italy). *Tectonophysics*, 643, pp. 8-25.

Marconi, V., Franceschelli, C., Marabini, S., Vai, G., Zuffa, G.G., 2008. Provenance of the Cotignola quarry sands (Northern Apennines) as a tool for palaeogeographical studies on the action of Senio and Santerno rivers in the Romagna floodplain. *Alpine and Mediterranean Quaternary*, 21 (1), pp. 139-146.

Nanetti, A e Giberti, M, 2014. Viabilità e insediamenti nell'assetto territoriale di Imola nel Medioevo, Imola, La Mandragora, p. 87.



Negri, A., Sabbatini, A., Picotti, V. Ponza, A. e D'Oriano, F., 2014 Biostratigrafia integrata dei pozzi San Potito e Cotignola Cluster A, B e C. Implicazioni geologiche. Relazione Geophi - Edison, 68 pp.

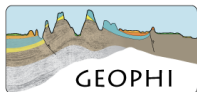
Pieri, M., Groppi G., 1981. Subsurface geological structure of the Po Plain, CNR, *P.F. Geodin.*, Publication n.414, 278-286.

Serpelloni, E., Faccenna, C., Spada, G., Dong, D., Williams, S.D.P., 2013 Vertical GPS ground motion rates in the Euro-Mediterranean region: New evidence of velocity gradients at different spatial scales along the Nubia-Eurasia plate boundary *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118 (11), pp. 6003-6024.

Tabanelli, M., *Romagna medievale. I conti di Cunio e di Barbiano*, Longo, Faenza 1972, p. 51.

Veggi, L., A. Roncuzzi, *Ricerche di topografia antica nei territori di Lugo e di Bagnacavallo*, in *Studi Romagnoli*, XXI, 1970, 3-18

Veggiani, A., 1975. Le vicende idrografiche del Santerno da Imola al mare nell'antichità. *Studi Romagnoli*, XXVI, 3 - 21.



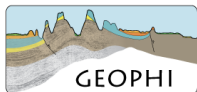
Tablee riassuntive

| GEOMORFOLOGIA DEL FIUME | FONTE | CONFERMA |
|---|--|--|
| Corso del ramo sud del Po, "Vatrenus" che si gettava nel Po di Spina | Plinio il Vecchio I. Sec. d. C. | - Evidenza topografica del dosso fluviale |
| Esistenza ramo est del Samternus | -Tavola Peutingeriana - Veggiani, 1975 -Marconi et al., 2008 | - Analisi stratigrafiche lungo la via San Bartolo (Castelnuovo di Solarolo) - Evidenza topografica del dosso fluviale - Provenienza sabbie a Cotignola e Fusignano |
| Esistenza ramo nord del Samternus detto Vatrenus o Rasiola | <i>Epigrammata</i> di Marziale (I sec d.C.) | Descrizione di un viaggio a nord di Imola |
| Ramo est del Santerno, riceve acque del Senio a sud di Cotignola, prosegue verso ENE e sfocia a lato di Ravenna. | Veggiani, 1975. | - evidenza topografica dei dossi fluviali a ENE di Russi |
| Esistenza della fossa Augusta (Padenna), canale di collegamento tra i fossati della città di Ravenna (in cui confluivano acque del Lamone) ed il Vatrenus, in zona valli di Comacchio, Po di Spina. | Veggiani, 1975 Franceschelli e Marabini, 2007 | |

Tabella 2. Fonti ed eventuali dati a supporto della ricostruzione dei fiumi in età tardo-Romana.

| GEOMORFOLOGIA DEL FIUME | FONTE | CONFERMA |
|---|---|--|
| Tratto del Santerno a nord di Cotignola e Bagnacavallo e spaglio nelle valli poco ad ovest di Fusignano; | -Franceschelli e Marabini, 2007. - Marconi et al., 2008. | Analisi stratigrafiche; evidenza di un canale fluviale assai sviluppato ad ovest di Fusignano. Provenienza sabbie a Cotignola e Fusignano |
| Rami del Santerno nell'attuale Canale Naviglio di Bagnacavallo, Fiumazzo di Russi ed in direzione nord attraverso l'abitato di Santerno (attestato tra il 942 ed il 1153; | -Franceschelli e Marabini, 2007. | |
| Lamone distolto dalle mura di Ravenna intorno all'anno Mille: passaggio a nord della città; | | |
| Tratto montano-pedecollinare del Senio fatto confluire nel ramo est del Santerno, tale da assumere, almeno fino all'altezza di Cotignola, andamento simile all'attuale; | -Franceschelli e Marabini, 2007; -Donati, 2008; | |
| | | |

Tabella 3 - Fonti ed eventuali dati a supporto della ricostruzione dei fiumi in età alto medievale.



| GEOMORFOLOGIA DEL FIUME | FONTE | CONFERMA |
|--|---|----------------------------------|
| Disattivazione del ramo est del Santerno nei pressi di San Prospero ed intera portata del fiume confluyente nell'alveo nord del Santerno (Rasiola in età romana); | -Cani, 2017; -Franceschelli e Marabini, 2007; - Tabanelli, 1972; - Donati, 2008 -Nanetti e Giberti, 2014; | Mappa in una pergamena del 1259. |
| 1460: deviazione del Santerno ad opera degli Estensi, facendolo confluire nel Po di Primaro a valle di Bastia, | Veggi e Roncuzzi, 1970; | |
| Chiusura del tratto del Lamone tra Russi a Ravenna attorno al 1240 (Federico II di Svevia?). All'altezza di Cotignola e Russi, il Lamone fu deviato e immesso nell'antico letto del Santerno, per poi entrare nel territorio di Bagnacavallo e proseguire in direzione nord, con andamento complessivo simile all'attuale. | Franceschelli e Marabini, 2007. | |
| | | |

Tabella 4 - Fonti ed eventuali dati a supporto della ricostruzione dei fiumi in età tardo medievale.