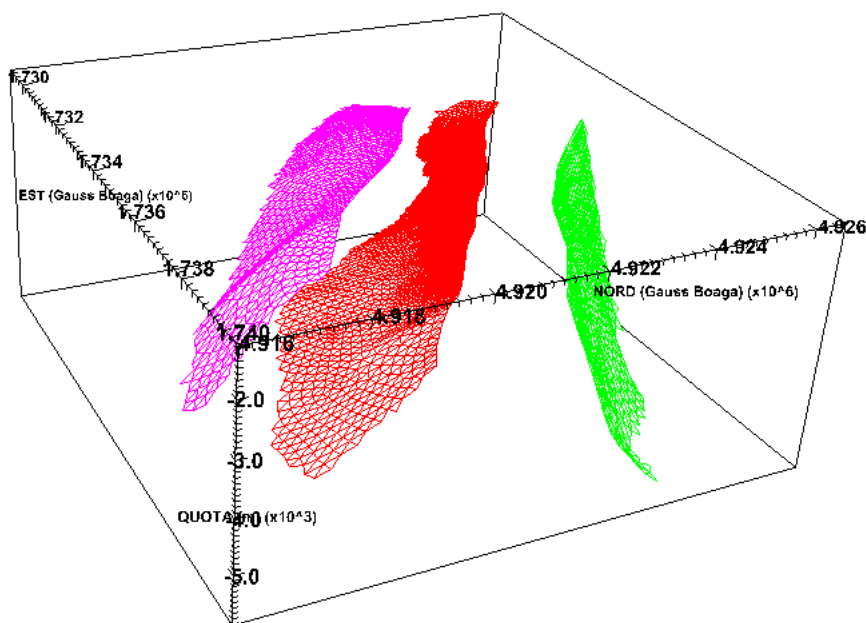


Commessa: M3E 06/17

**Modello dei processi geomeccanici derivanti dallo stoccaggio di gas naturale nel campo di San Potito.
Fase I.**



Committente: EDISON STOCCAGGIO S.p.A.

Elaborato: REV_00 Relazione Tecnica

Data: Settembre 2017

INDICE

| | | |
|---|--|-----------|
| 1 | INTRODUZIONE..... | 1 |
| 2 | GIACIMENTO DI SAN POTITO..... | 3 |
| 3 | MODELLO DI PRODUZIONE | 5 |
| 4 | MISURA DEGLI SPOSTAMENTI SULL'AREA DEL GIACIMENTO..... | 7 |
| 5 | MODELLO STATICO..... | 12 |
| 6 | MODELLO GEOMECCANICO E MODELLO IDRODINAMICO | 19 |
| | 6.1 Caratterizzazione geomeccanica..... | 19 |
| | 6.2 Calibrazione dei modelli idrodinamici..... | 20 |
| 7 | PREVISIONI MODELLISTICHE | 26 |
| | 7.1 Spostamenti della superficie del terreno | 26 |
| | 7.2 Confronto tra spostamenti misurati e spostamenti calcolati..... | 30 |
| | 7.3 Gradiente dello spostamento | 33 |
| | 7.4 Analisi tensionale | 34 |
| 8 | CONCLUSIONI..... | 47 |
| 9 | REFERENZE..... | 49 |
| | ALLEGATO A: isobate locali dei livelli mineralizzati..... | 51 |
| | ALLEGATO B: isobate regionali degli orizzonti geologici..... | 53 |
| | ALLEGATO C: isobate delle faglie in prossimità del campo | 56 |
| | ALLEGATO D: mappe di variazione di tensione | 61 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|--|----|
| Figura 1: Ubicazione del campo di San Potito. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento e in blu il perimetro del modello geomeccanico con estensione pari a $45 \times 45 \text{ km}^2$. | 3 |
| Figura 2: Ubicazione dei pozzi del catalogo VIDEPI utilizzati per costruire gli orizzonti geologici a scala regionale. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento, in verde la zona coperta dal rilievo sismico 3D e in blu il perimetro del modello geomeccanico. | 4 |
| Figura 3: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo dicembre 1988 - marzo 2017. | 5 |
| Figura 4: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo gennaio 2013 - marzo 2017. | 6 |
| Figura 5: Velocità verticale media (mm/anno) nei punti misura PS nel periodo 2013 – 2017. | 7 |
| Figura 6: Velocità orizzontale media (mm/anno) nei punti misura PS nel periodo 2013 – 2017. | 8 |
| Figura 7: Punti di misura scelti (PS) per il confronto tra spostamenti rilevati e pressione media in giacimento. In nero è evidenziata la traccia del giacimento. | 8 |
| Figura 8: Andamento temporale dello spostamento verticale nei PS di Figura 7 e della pressione media nei livelli mineralizzati tra il 2013 e il 2017. | 9 |
| Figura 9: Andamento temporale dello spostamento orizzontale nei PS di Figura 7 e della pressione media nei livelli mineralizzati tra il 2013 e il 2017. | 9 |
| Figura 10: Velocità verticale media (mm/anno) nei punti misura PS nel periodo di post-produzione dal 1992 al 2000. | 11 |
| Figura 11: Velocità media (mm/anno) nei punti misura PS in corrispondenza del campo di San Potito nel periodo di post-produzione dal 1992 al 2000. | 11 |
| Figura 12: Discretizzazione bidimensionale del dominio di calcolo utilizzata per la generazione del modello tridimensionale FEM. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in viola il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico 3D. | 12 |
| Figura 13: Vista prospettica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale. | 13 |
| Figura 14: a) Sezione geologica verticale a scala regionale dell'area interessata dal modello geomeccanico; b) sezione verticale del modello geomeccanico lungo l'ordinata Est 1,734,000 con | |

evidenziati gli orizzonti geologici principali; c) sezione verticale lungo la medesima coordinata Est con evidenziata la griglia di calcolo..... 14

Figura 15: a) Particolare della sezione di Figura 14-b in corrispondenza dei livelli mineralizzati; b) Particolare della sezione di Figura 14-c in corrispondenza dei livelli mineralizzati. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale..... 15

Figura 16: Particolare della sezione di Figura 14-b 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. 16

Figura 17: Vista in pianta delle faglie e della loro discretizzazione mediante elementi di interfaccia. Le Faglie 2, 4 e 5 sono evidenziate in verde, rosso e viola, rispettivamente. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico 3D. 17

Figura 18: Vista prospettica delle faglie e della loro discretizzazione mediante elementi di interfaccia. Le Faglie 2, 4 e 5 sono evidenziate in verde, rosso e viola, rispettivamente. 17

Figura 19: Vista in pianta dei modelli idrodinamici per i livelli BBIU (a sinistra) e BBIL (a destra). In blu è evidenziata la frontiera esterna su cui è imposto flusso nullo. L'area colorata in azzurro identifica la zona a spessore nullo (acquifero non presente) corrispondente all'alto strutturale di Cotignola. Quest'area delimita la frontiera interna dei modelli su cui è stato imposto flusso nullo. 18

Figura 20: Grafico doppio logaritmico che riporta l'andamento della compressibilità verticale in I ciclo di carico in funzione tensione verticale efficace secondo la legge dell'Alto Adriatico [Baù et al., 2002; Ferronato et al., 2013]..... 19

Figura 21: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIU nel momento di massima depressurizzazione nel dicembre 1991. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.....23

Figura 22: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIU durante una prova di stoccaggio tra aprile 2016 e settembre 2016. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.....23

Figura 23: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIU durante una prova di erogazione tra novembre 2016 e marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.24

Figura 24: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIL durante una prova di erogazione tra novembre 2016 e marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.24

Figura 25: Variazione di pressione (bar) fornita dal modello Eclipse nel livello BBIU nel momento di massima depressurizzazione nel dicembre 1991. Da notare la zona a Nord (a destra nella presente rappresentazione) dove la variazione di pressione è limitata circa 10 par nella parte più profonda del pool.....25

Figura 26: Permeabilità orizzontale (mD) fornita dal modello Eclipse nel livello BBIU. Nel cerchio nero è evidenziata la zona interessata dalle prove di erogazione/stoccaggio.....25

Figura 27: Subsidenza (cm) simulata al 1991, anno di fine coltivazione del campo. In blu è evidenziata la traccia del giacimento. Il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.....26

Figura 28: Spostamento verticale (cm) in corrispondenza del punto di massima subsidenza.....27

Figura 29: Subsidenza (cm) simulata al 2016. In blu è evidenziata la traccia del giacimento.....27

Figura 30: Spostamento verticale (cm) simulato durante il periodo 1991 - 2016. In blu è segnata la traccia del giacimento.....28

Figura 31: Spostamento verticale (cm) simulato durante la prova stoccaggio aprile 2016 – settembre 2017. In blu è segnata la traccia del giacimento.....29

Figura 32: Spostamento verticale (cm) simulato durante la prova erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In blu è segnata la traccia del giacimento.....29

Figura 33: Spostamenti verticali (mm) in termini di double difference rispetto al PS AGF7G8X di Figura 7, evidenziato con il simbolo +. L'intervallo temporale corrisponde a quello della prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017: a) misure SAR; b) risultanti dal modello geomeccanico.30

Figura 34: Spostamenti verticali (mm) in termini di double difference rispetto al PS AGUOPLZ di Figura 7, evidenziato con il simbolo +. L'intervallo temporale corrisponde a quello della prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017: a) misure SAR; b) risultanti dal modello geomeccanico.31

Figura 35: Spostamenti verticali (mm) in termini di double difference rispetto al PS AE3URQC di Figura 7, evidenziato con il simbolo +. L'intervallo temporale corrisponde a quello della prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017: a) misure SAR; b) risultanti dal modello geomeccanico.31

Figura 36: Velocità media (mm/anno) nella fase di post produzione dal 1993 al 2000 rispetto al punto evidenziato dal simbolo +: a) misure SAR; b) risultante dal modello geomeccanico.....32

Figura 37: Mappa del gradiente dello spostamento verticale (mm/m) durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2016. In blu è segnata la traccia del giacimento.33

Figura 38: Mappa del gradiente dello spostamento verticale (mm/m) durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In blu è segnata la traccia del giacimento.34

Figura 39: Variazione di tensione σ_z (bar) nel livello BBIU durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento. In rosso si riporta la traccia delle sezioni verticali riportate nelle figure che seguono.....35

Figura 40: Variazione di tensione σ_z (bar) nella sezione A-A di Figura 39 a fine produzione nel 1992. In nero sono evidenziate le tracce delle faglie.....36

Figura 41: Variazione di tensione σ_z (bar) nella sezione A-A di Figura 39 durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2017. In nero sono evidenziate le tracce delle faglie.....37

Figura 42: Variazione di tensione σ_z (bar) nella sezione A-A di Figura 39 durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In nero sono evidenziate le tracce delle faglie.38

Figura 43: Tensione iniziale normale al piano di faglia σ_N (bar): a) vista in pianta; b) vista assonometrica. NB: il modello non fornisce in output la soluzione in termini di tensione sui nodi perimetrali della faglia e il visualizzatore attribuisce a tali nodi un valore nullo.....39

Figura 44: Tensione iniziale tangenziale al piano di faglia τ (bar): a) vista in pianta; b) vista assonometrica. NB: il modello non fornisce in output la soluzione in termini di tensione sui nodi perimetrali della faglia e il visualizzatore attribuisce a tali nodi un valore nullo.....40

Figura 45: Variazione di tensione normale al piano di faglia σ_N (bar) a fine produzione nel 1992: a) vista in pianta; b) vista assonometrica.....41

Figura 46: Variazione di tensione tangenziale al piano di faglia τ (bar) a fine produzione nel 1992: a) vista in pianta; b) vista assonometrica.....42

Figura 47: Variazione di tensione normale al piano di faglia σ_N (bar) durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2016: a) vista in pianta; b) vista assonometrica.43

Figura 48: Variazione di tensione tangenziale al piano di faglia τ (bar) durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2016: a) vista in pianta; b) vista assonometrica.44

Figura 49: Variazione di tensione normale al piano di faglia σ_N (bar) durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017: a) vista in pianta; b) vista assonometrica.45

Figura 50: Variazione di tensione normale al piano di faglia τ (bar) durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017: a) vista in pianta; b) vista assonometrica.....46

I INTRODUZIONE

Il presente rapporto tecnico descrive i risultati ottenuti dalla modellazione numerica dei processi geomeccanici indotti dallo stoccaggio di gas naturale nell'ambito del programma di esercizio del campo di San Potito.

L'analisi dei processi geomeccanici è stata condotta attraverso un modello numerico agli elementi finiti (FEM) con i seguenti obiettivi: (1) prevedere gli spostamenti superficiali; (2) analizzare il disturbo del regime tensionale naturale indotto dalle attività di erogazione/stoccaggio sulle faglie pre-esistenti in prossimità del giacimento e dell'acquifero in connessione idraulica. In questa prima fase del progetto, il modello FEM è stato applicato per l'intera durata della vita produttiva dei vari livelli a partire dal dicembre 1988 fino alle prove di erogazione/stoccaggio eseguite tra il 2016 e il 2017.

Il rapporto è strutturato come segue. Nei capitoli 2 e 3 sono riportati i dati forniti da EDISON STOCCAGGIO con riferimento alla geologia dell'area e al modello fluidodinamico di giacimento. Il capitolo 4 analizza le misure di spostamento del suolo disponibili sull'area soprastante e circostante il giacimento, ottenute tramite interferometria SAR satellitare. Il capitolo 5 descrive la metodologia applicata per la generazione del modello statico a partire dagli orizzonti geologici e dalle mappe delle isobate e isopache dei pool mineralizzati. La previsione degli spostamenti superficiali dovuti alla coltivazione del campo richiede anche la valutazione del contributo fornito dalla compattazione dell'acquifero connesso al giacimento ("waterdrive"). Poiché l'acquifero è stato incluso solo parzialmente nel modello fluidodinamico di produzione, l'andamento spaziotemporale della pressione di strato in acquifero è simulato con un modello FEM idrodinamico calibrato in modo da soddisfare il bilancio di massa in giacimento. La descrizione della calibrazione del modello idrodinamico dell'acquifero è riportata nel capitolo 6. Le pressioni in giacimento e in acquifero sono quindi utilizzate come dati di input nel modello geomeccanico. È stata quindi analizzata la possibilità di calibrare i parametri geomeccanici del campo utilizzando gli spostamenti forniti dalle misurazioni SAR. Tuttavia, poiché nessun evidente spostamento attribuibile alle attività su San Potito è rilevabile dai dati SAR - coerentemente con l'entità assai limitata della subsidenza/rebound ottenuta dal modello al di sopra del campo - i valori dei parametri meccanici sono stati imposti sulla base di studi geomeccanici precedenti effettuati su altri campi del bacino padano. Il capitolo 7 riassume i risultati del modello FEM in relazione agli spostamenti superficiali

(e.g. la subsidenza) e alla propagazione del disturbo tensionale sul sistema di faglie poste in prossimità del giacimento durante la produzione primaria e le prove di erogazione/stoccaggio. Le considerazioni conclusive sono presentate nel capitolo 8.

2 GIACIMENTO DI SAN POTITO

Il campo di San Potito (concessione “San Potito e Cotignola Stoccaggio”) è situato nella pianura padana meridionale, 25 km a Ovest di Ravenna (Figura 1). Il campo, posto a una profondità di circa 1900 m TVD ss, è stato scoperto nel 1984 da ENI a seguito della perforazione del pozzo San Potito 1. Il giacimento comprende sei unità mineralizzate (dall’alto verso il basso): livelli A, A1 (appartenenti alla zona di transizione tra la Formazione Porto Garibaldi e la sovrastante Formazione Argille del Santerno), livello BBI (suddiviso nei livelli BBI upper e BBI lower), livelli C, D, E (appartenenti alla Formazione Porto Corsini/Fusignano). I livelli interessati dalle operazioni di stoccaggio sono BBI upper e lower, nel seguito chiamati BBIU e BBIL, rispettivamente.

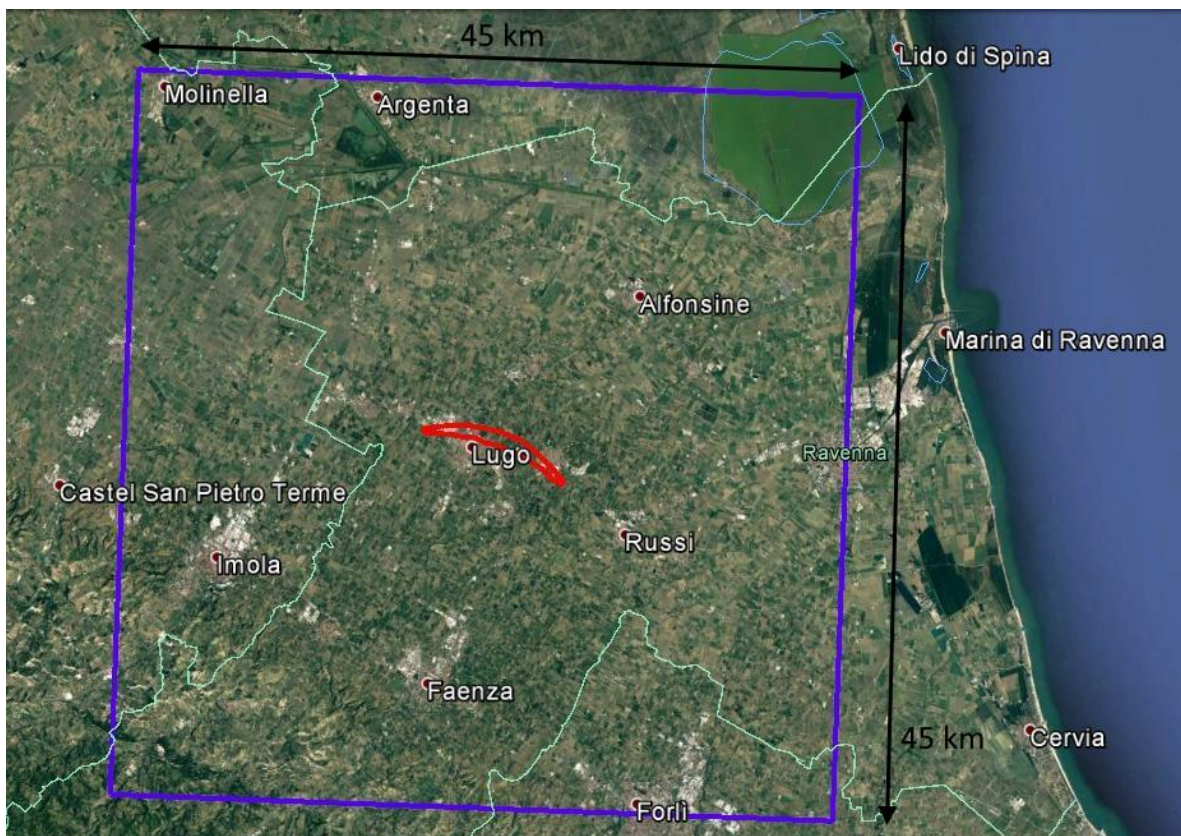


Figura 1: Ubicazione del campo di San Potito. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento e in blu il perimetro del modello geomeccanico con estensione pari a $45 \times 45 \text{ km}^2$.

La caratterizzazione geologico/strutturale dell'area prossima al giacimento è stata ottenuta da un rilievo sismico 3D acquisito da EDISON STOCCAGGIO, mentre a scala regionale si è fatto riferimento all'archivio pozzi esplorativi del progetto VIDEPI (FIGURA, <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/videpi/videpi.asp>). Da queste informazioni è stato possibile estrarre le mappe delle isobate locali dei livelli mineralizzati (Allegato A), delle isobate dei principali orizzonti geologici a scala regionale (Allegato B) e della giacitura delle faglie poste in prossimità del campo (Allegato C).

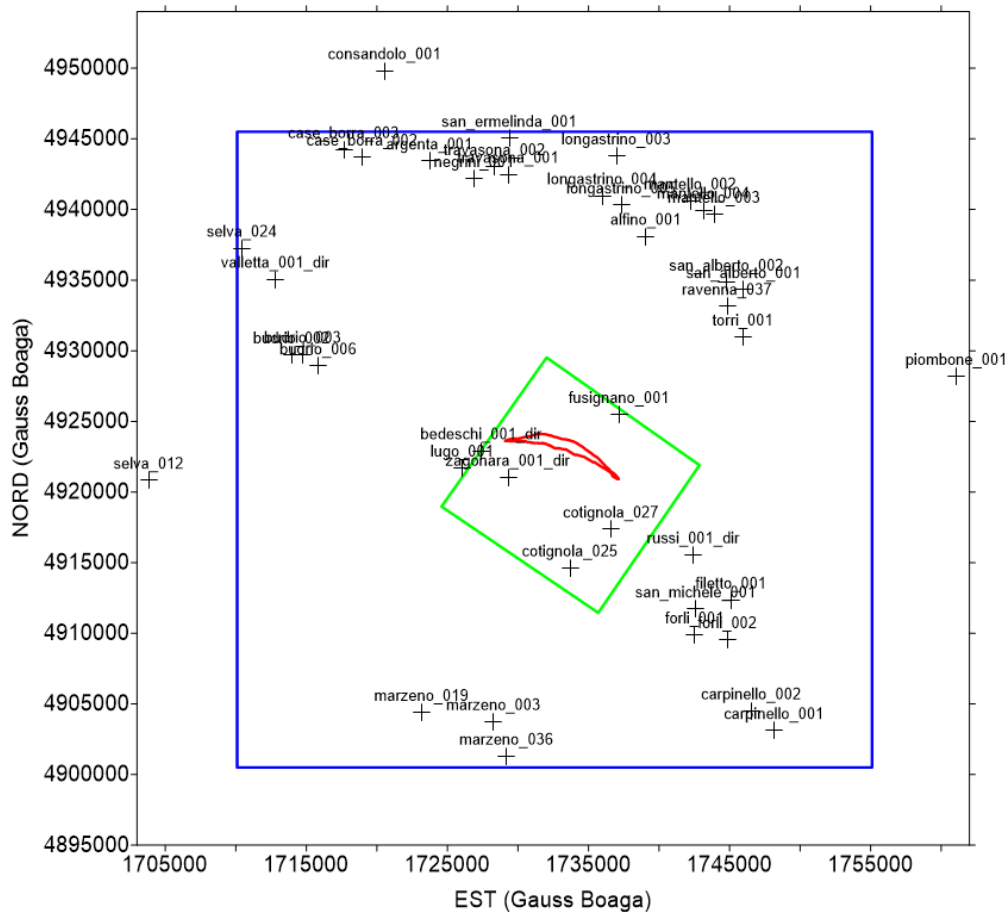


Figura 2: Ubicazione dei pozzi del catalogo VIDEPI utilizzati per costruire gli orizzonti geologici a scala regionale. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento, in verde la zona coperta dal rilievo sismico 3D e in blu il perimetro del modello geomeccanico.

3 MODELLO DI PRODUZIONE

EDISON STOCCAGGIO ha fornito il modello dinamico di giacimento, sviluppato mediante il software Eclipse, utilizzato per la gestione dei livelli produttivi. Da tale modello si è ricavato l'andamento nel tempo e nello spazio della pressione di strato durante la coltivazione primaria del campo e le prove di erogazione/stoccaggio di gas naturale, per complessivi 29 anni dal 1988 al 2017 (Figura 3 e Figura 4). La produzione del livello BBIU è iniziata nel dicembre 1988 e si è protratta fino al dicembre del 1991. Nel maggio del 2010 la pressione statica media nel livello BBIU è di poco inferiore (5 bar) alla pressione di scoperta. Ad aprile 2011 è iniziata la perforazione del pozzo San Potito Al dir (SPTOAl dir), completato in singolo selettivo nel livello BBIU e BB1L. Nel periodo giugno-dicembre 2013 il pozzo SPTOAl dir è stato impiegato per condurre delle prove di produzione in entrambi i livelli. Successivamente, tra la fine del 2015 e il 2017 sono state eseguite delle prove di erogazione/stoccaggio con $P = 100\% P_i$ (P_i = pressione iniziale).

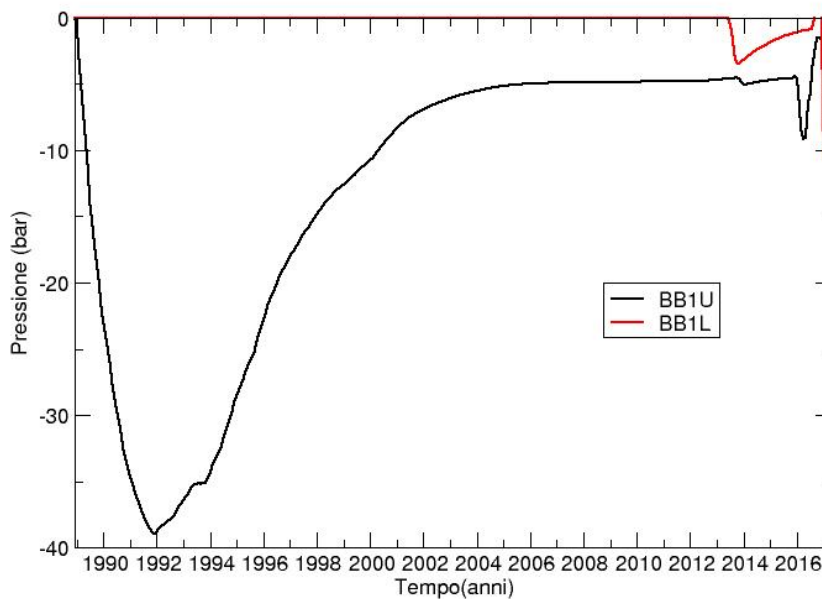


Figura 3: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo dicembre 1988 - marzo 2017.

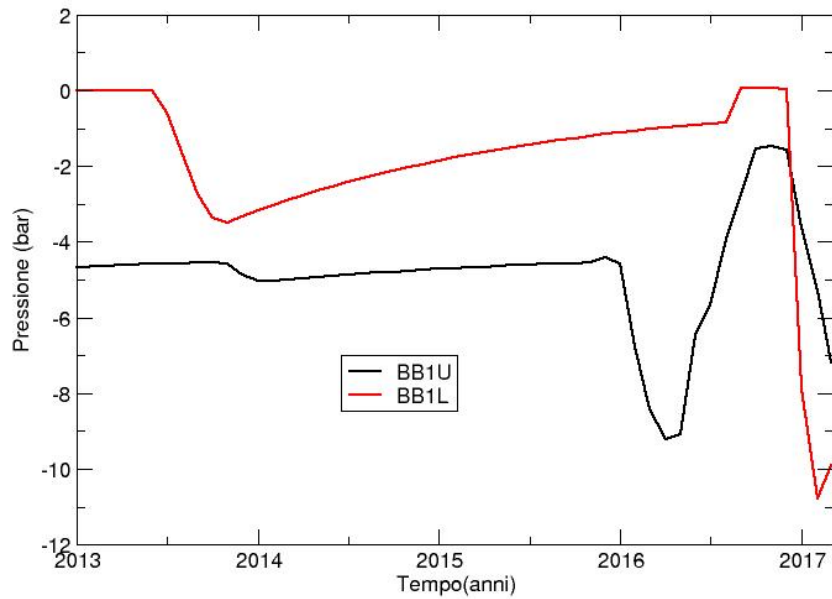


Figura 4: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo gennaio 2013 - marzo 2017.

4 MISURA DEGLI SPOSTAMENTI SULL'AREA DEL GIACIMENTO

EDISON STOCCAGGIO ha fornito un monitoraggio integrato degli spostamenti del suolo nell'area sovrastante il giacimento registrati tra il 2013 e il 2017. I dati a disposizione sono ottenuti dall'analisi interferometrica PS su immagini radar satellitari acquisite dal satellite TerraSAR-X (TSX) [Giannico, 2017]. I valori di velocità media verticale e orizzontale per i diversi PS (Figura 5 e Figura 6) sono contenuti entro pochi mm/anno (± 1 mm/anno); vista la loro distribuzione spaziale rispetto alla traccia del campo, i valori più elevati legati appaiono connessi ad effetti localizzati, di probabile origine antropica, non connessi alle attività minerarie. Per altro, nell'intervallo temporale coperto dalle misure interferometriche, le operazioni di stoccaggio sono state di limitata entità, come evidenziato dall'andamento della pressione media in Figura 4.

In Figura 7 è riportata l'ubicazione di alcuni PS per i quali è stato analizzato in dettaglio l'andamento temporale degli spostamenti verticali e orizzontali (Figura 8 e Figura 9). Non è individuabile nessuna correlazione tra le curve di spostamento dei punti e l'andamento di pressione media in giacimento.

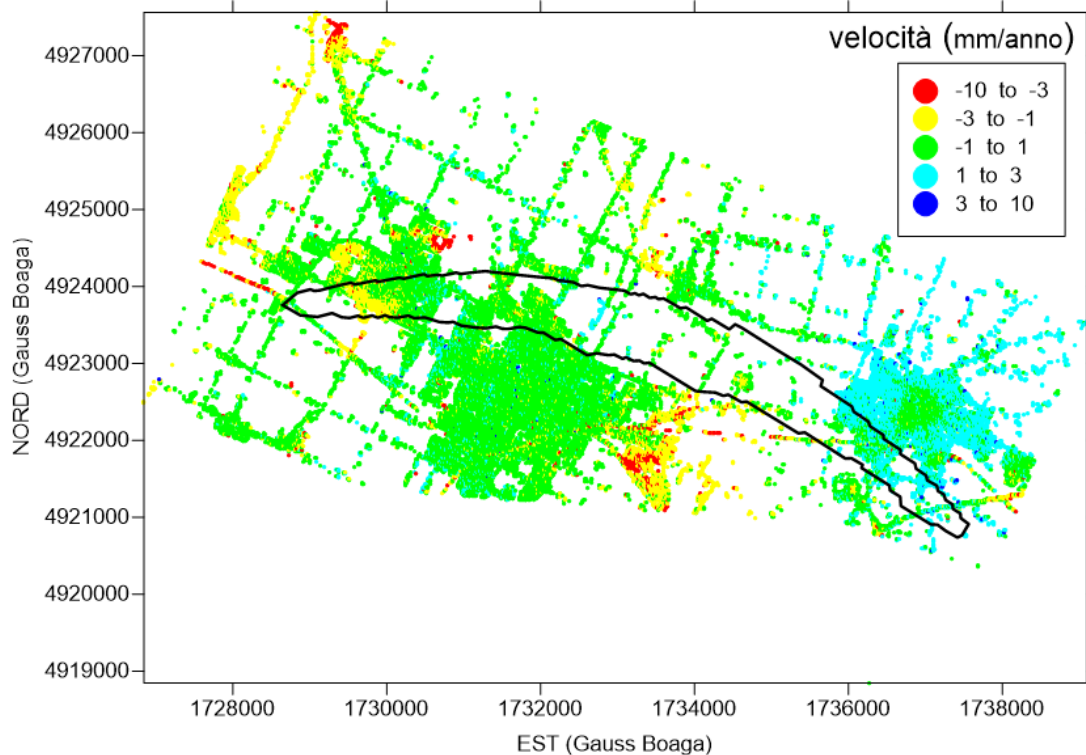


Figura 5: Velocità verticale media (mm/anno) nei punti misura PS nel periodo 2013 – 2017.

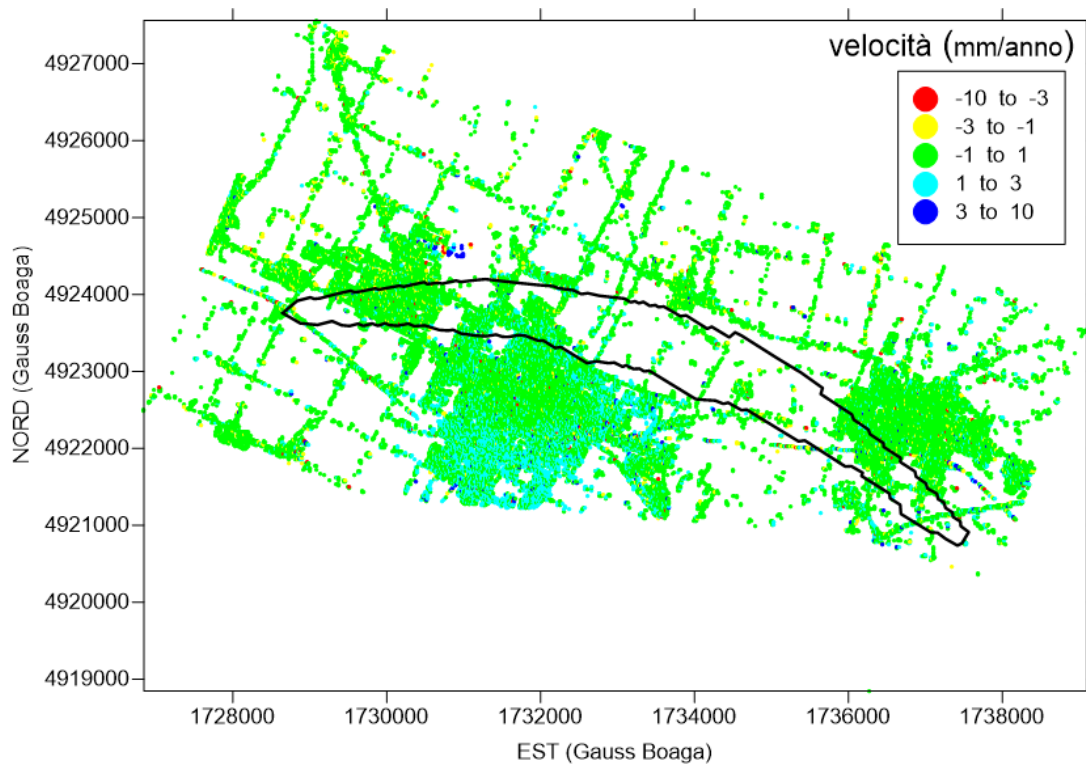


Figura 6: Velocità orizzontale media (mm/anno) nei punti misura PS nel periodo 2013 – 2017.

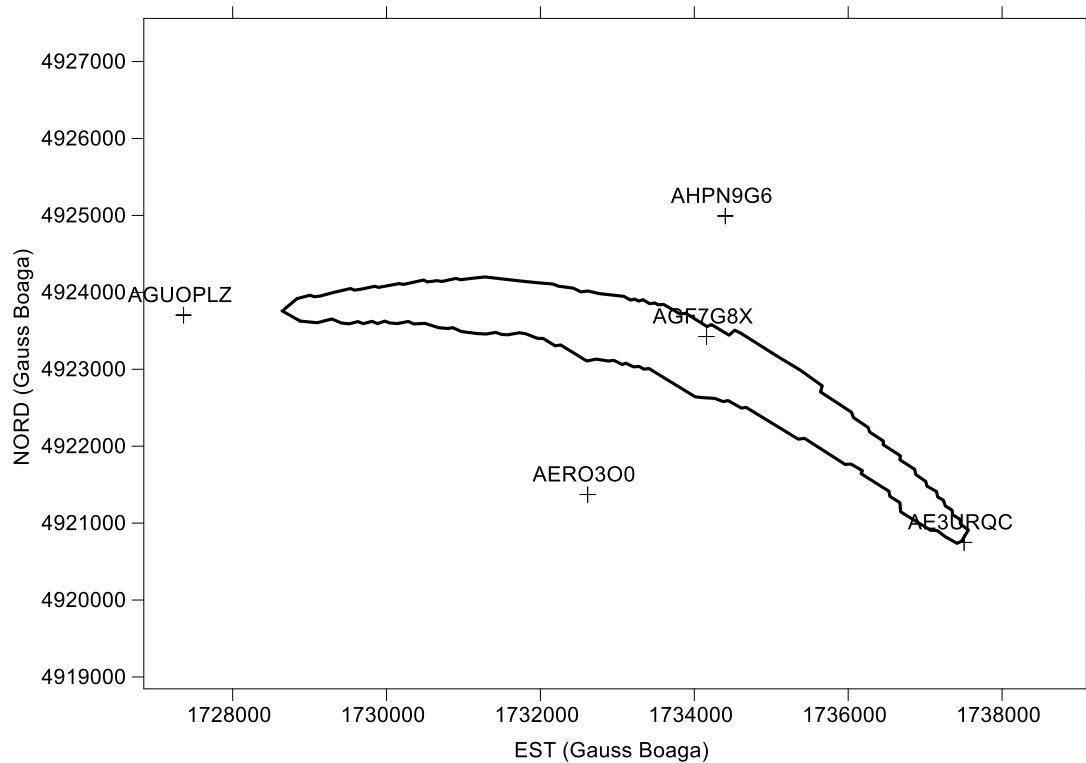


Figura 7: Punti di misura scelti (PS) per il confronto tra spostamenti rilevati e pressione media in giacimento. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

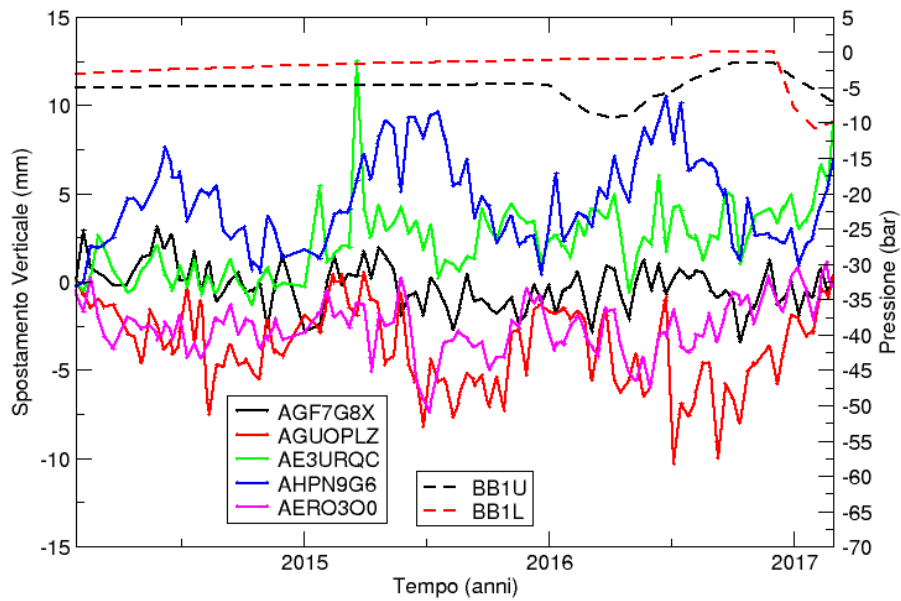


Figura 8: Andamento temporale dello spostamento verticale nei PS di Figura 7 e della pressione media nei livelli mineralizzati tra il 2013 e il 2017.

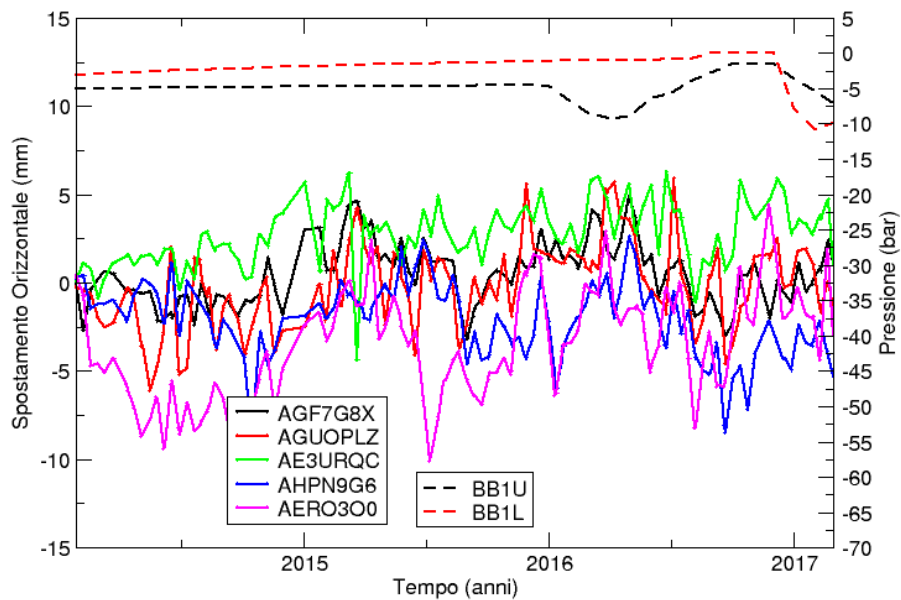


Figura 9: Andamento temporale dello spostamento orizzontale nei PS di Figura 7 e della pressione media nei livelli mineralizzati tra il 2013 e il 2017.

Oltre al monitoraggio fornito da EDISON STOCCAGGIO, sono stati acquisiti ed analizzati anche i dati interferometrici presenti nel Geoportale Nazionale (<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>). Il periodo potenzialmente più interessante è quello coperto dai satelliti ERS-1/2 poiché si riferiscono all'intervallo 1993-2000 durante il quale la pressione di giacimento ha subito un significativo recupero (Figura 3). Sono state analizzate le immagini acquisite in modalità "descending" in quanto più numerose; inoltre, visto il limitato angolo di incidenza dei satelliti ERS, la misura lungo la "line of sight" LoS) può essere considerata rappresentativa dello spostamento verticale. In Figura 10 è riportata la velocità media nel periodo di post-produzione dal 1993 al 2000 fornita da tali misure. Data la grande estensione areale del rilievo ERS SAR, le misure sono state calibrate - fornendo quindi spostamenti assoluti - utilizzando le livellazioni eseguite dal Comune di Ravenna nel periodo temporale 1992-1998 [Teatini et al., 2005]. La Figura 10 evidenzia un trend regionale alquanto complesso, caratterizzato da zone molto subsidenti in corrispondenza alle aree urbanizzate lungo la Via Emilia a seguito principalmente di significativi emungimenti d'acqua di falda. Abbassamenti più contenuti sono rilevati nell'entroterra ravennate e a nord-ovest delle Valli di Comacchio.

Durante la fase di post-produzione, il recupero di pressione in giacimento provoca un'espansione della roccia serbatoio e un conseguente rebound della superficie del terreno al di sopra del campo, o una subsidenza inferiore rispetto alle zone circostanti qualora, come nell'area di interesse, altri processi naturali e antropici contribuiscano all'abbassamento del territorio. Tuttavia, tale comportamento non si riscontra dalle misure a disposizione; un'analisi dettagliata sull'area del giacimento (Figura 11) non evidenzia alcuna riduzione della velocità media di abbassamento nella zona del campo. Al contrario, le velocità medie dei PS all'interno della traccia del campo sono generalmente maggiori rispetto a quelle dei PS esterni alla stessa.

In conclusione, le misure SAR a disposizione non evidenziano alcun effetto delle attività minerarie sul campo di San Potito né durante la fase seguente il termine della produzione primaria e neppure durante i test di erogazione stoccaggio condotte durante gli ultimi due anni. Se da un lato questo può essere considerato un fattore positivo, in quanto le attività condotte non hanno avuto alcun evidente effetto sul territorio in termini di variazione di quota altimetrica, dall'altro l'assenza di spostamenti imputabili alla produzione e/o stoccaggio di gas non permette una calibrazione specifica dei parametri geomeccanici dell'area di San Potito.

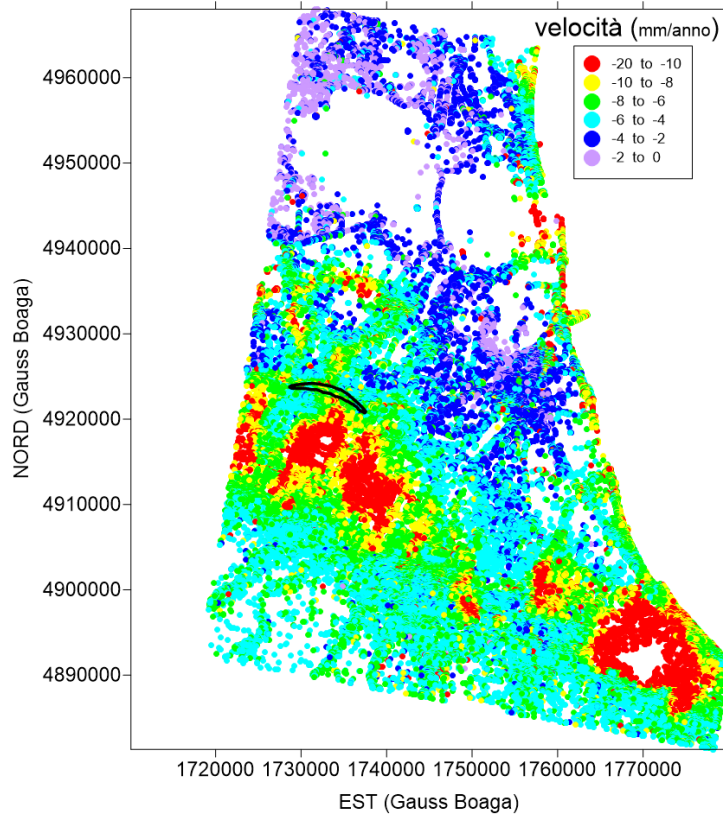


Figura 10: Velocità verticale media (mm/anno) nei punti misura PS nel periodo di post-produzione dal 1992 al 2000.

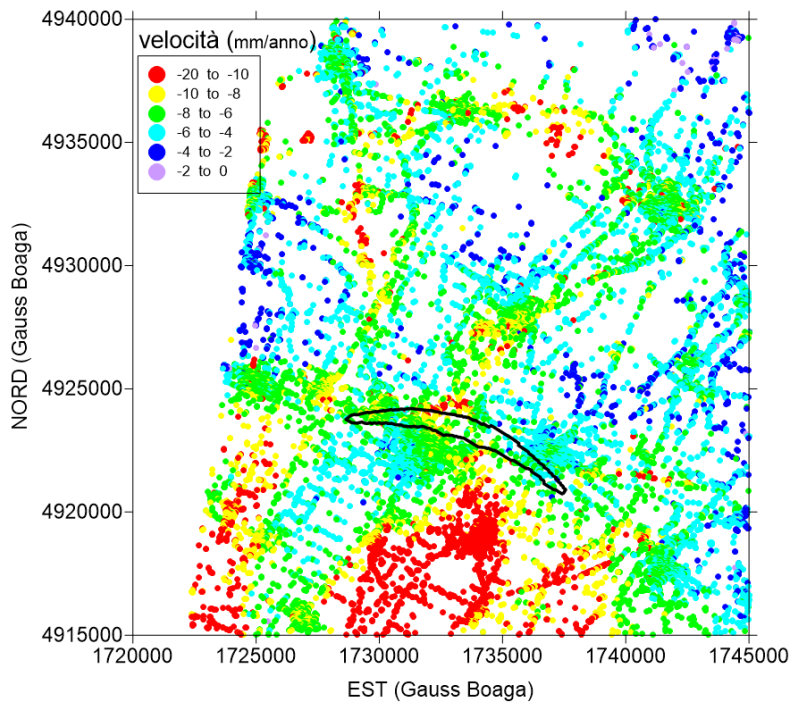


Figura 11: Velocità media (mm/anno) nei punti misura PS in corrispondenza del campo di San Potito nel periodo di post-produzione dal 1992 al 2000.

5 MODELLO STATICO

M³E ha sviluppato e mantiene costantemente aggiornato allo stato dell'arte un modello geomeccanico FEM per la simulazione degli spostamenti superficiali indotti dallo sfruttamento di giacimenti di idrocarburi. Il modello risolve le equazioni dell'equilibrio per mezzi porosi sollecitati da pressioni di strato variabili e caratterizzati da un comportamento elasto-plastico o ipo-plastico anche anisotropo mediante un approccio agli elementi finiti (adottando elementi tetraedrici lineari a 4 nodi) ed elementi d'interfaccia. Tale scelta consente di rappresentare con grande fedeltà le volumetrie e le complesse geometrie che spesso caratterizzano le strutture geologiche di interesse.

Per il modello geomeccanico è necessario generare una griglia di calcolo ad elevata risoluzione nei pressi del giacimento che si estenda sufficientemente lontano da esso in modo da limitare l'influenza delle condizioni al contorno sul risultato delle simulazioni sopra e nelle vicinanze del giacimento stesso. In questo studio si è impiegato un dominio di calcolo avente un'estensione areale di 45x45 km con il campo di San Potito collocato in posizione pressoché baricentrica.

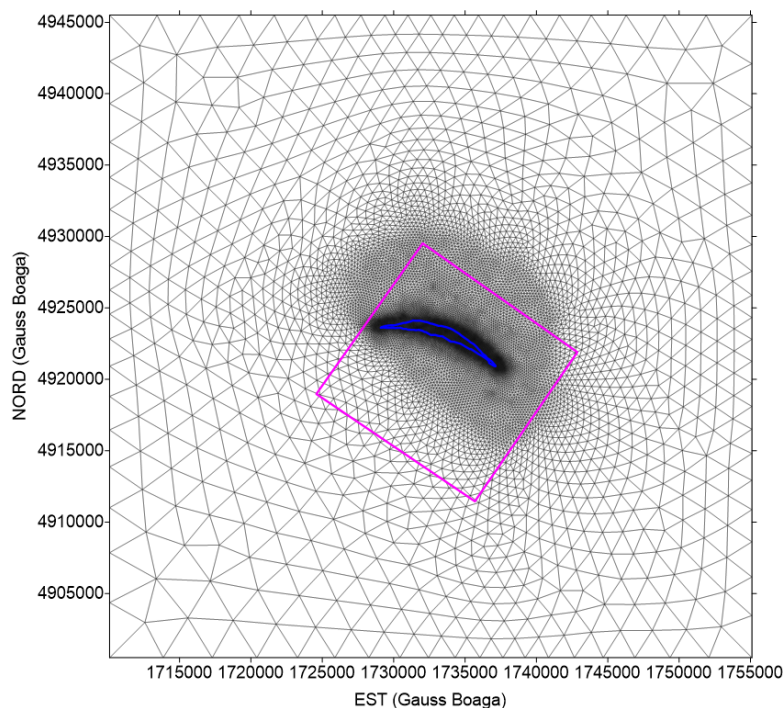


Figura 12: Discretizzazione bidimensionale del dominio di calcolo utilizzata per la generazione del modello tridimensionale FEM. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in viola il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico 3D.

Il dominio 2D è stato discretizzato mediante 13088 nodi e 26096 elementi triangolari con uno spacing medio di circa 50 m nella zona del campo (Figura 12), in coerenza con la discretizzazione utilizzata nel modello Eclipse.

La griglia di calcolo 3D è stata ottenuta utilizzando il generatore automatico di griglia TetGen [Si, 2008], con l'accortezza di vincolare i vari layer di elementi finiti alla geometria degli orizzonti geologici. Viene 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, i volumi dei pool mineralizzati, le quote dei GWC e le geometrie dell'acquifero connesso idraulicamente al giacimento.

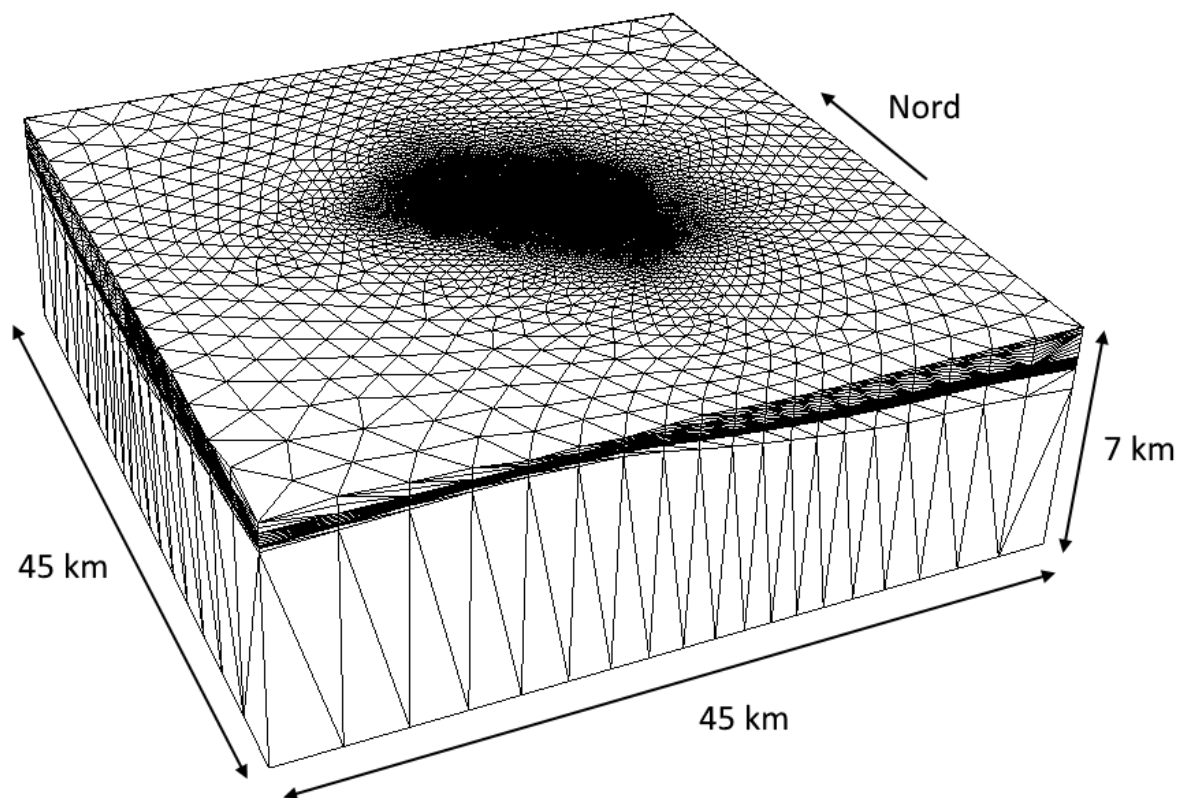


Figura 13: Vista prospettica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale.

La vista prospettica dell'intera griglia del modello geomeccanico è mostrata in Figura 13. In Figura 14 e Figura 15 sono riportate alcune sezioni verticali del modello geomeccanico in corrispondenza dell'ordinata Est 1,734,000 passante per il centro del modello e del campo di San Potito.

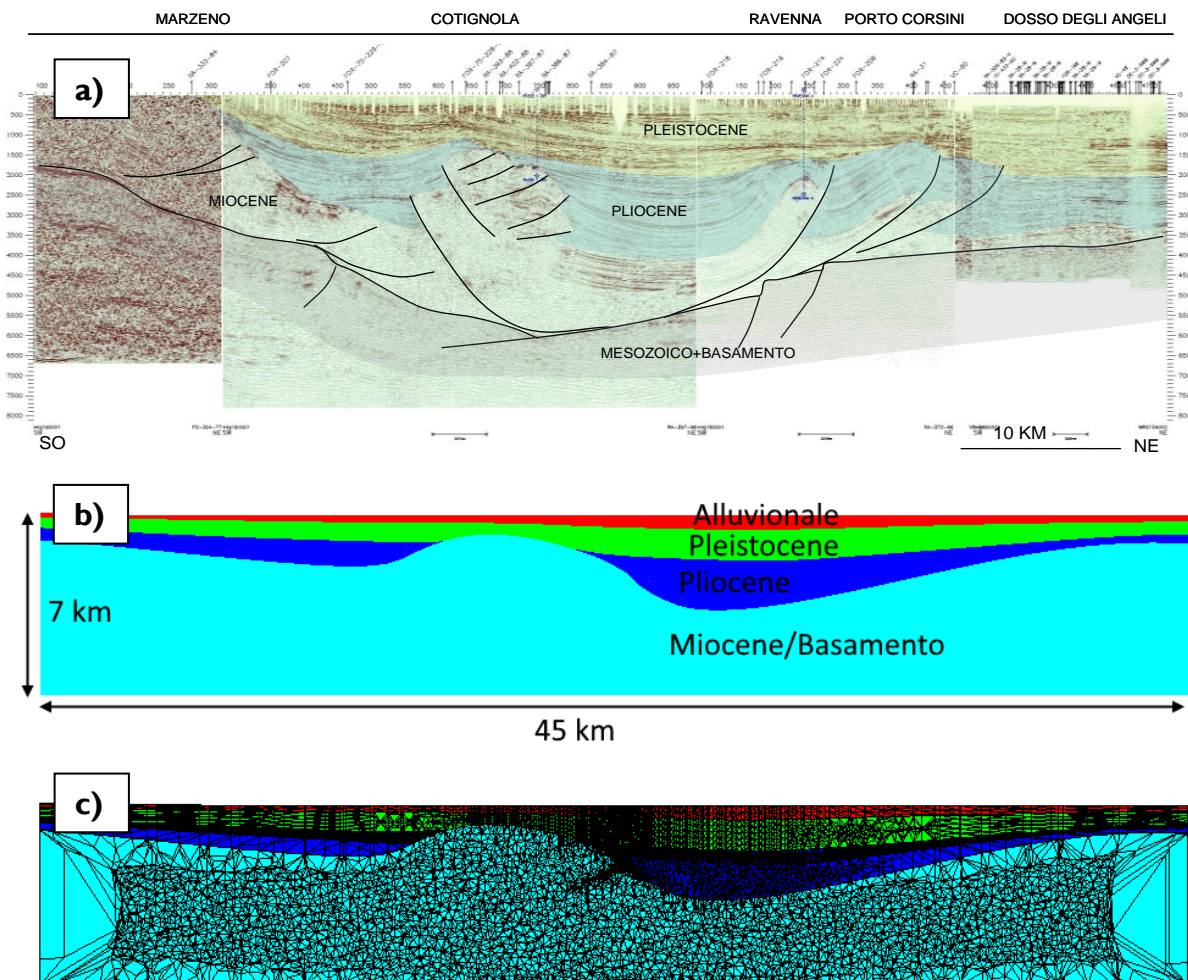


Figura 14: a) Sezione geologica verticale a scala regionale dell'area interessata dal modello geomeccanico; b) sezione verticale del modello geomeccanico lungo l'ordinata Est 1,734,000 con evidenziati gli orizzonti geologici principali; c) sezione verticale lungo la medesima coordinata Est con evidenziata la griglia di calcolo.

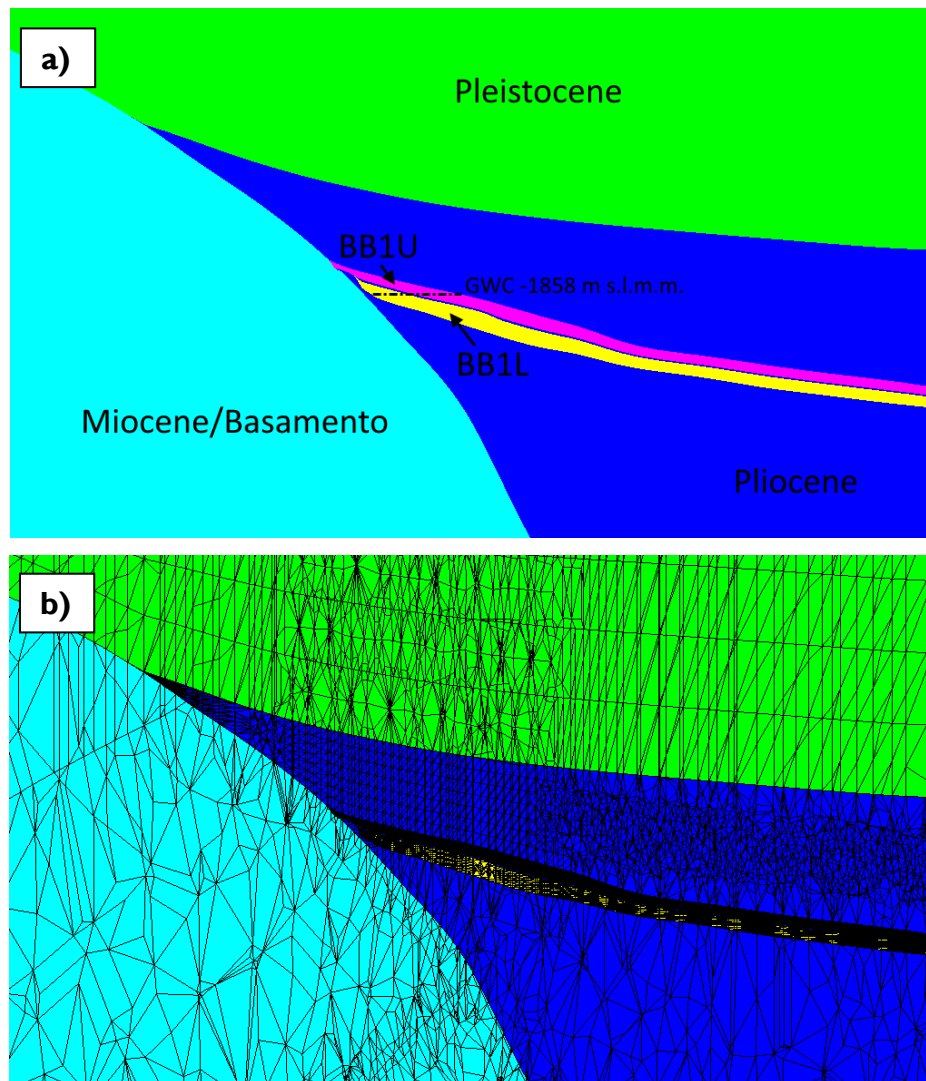


Figura 15: a) Particolare della sezione di Figura 14-b in corrispondenza dei livelli mineralizzati; b) Particolare della sezione di Figura 14-c in corrispondenza dei livelli mineralizzati. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale.

L'analisi del rilievo sismico 3D ha evidenziato la presenza di 7 faglie principali all'interno del dominio di calcolo (Allegato C). Nessuna di queste faglie attraversa il campo o l'acquifero connesso idraulicamente ai livelli produttivi. In via cautelativa sono state inserite nel modello geomeccanico le tre faglie più vicine al giacimento e quindi possibilmente interessate da un maggior disturbo tensionale a seguito delle operazioni di produzione e erogazione/stoccaggio:

- Faglia 2 localizzata 3 km a Nord-Est del giacimento (Figura C 2 e Figura 16). Si estende tra il Miocene e il Pliocene inferiore fino a chiudersi sul bottom dell'acquifero connesso idraulicamente al livello BB1L;

- Faglia 4 localizzata nell'alto strutturale di Cotignola. Si chiude sulla superficie di contatto tra Miocene e Pliocene a 300 m circa di profondità dal giacimento (Figura C 4 e Figura 16);
- Faglia 5 localizzata nell'alto strutturale di Cotignola. Si chiude sulla superficie di contatto tra Miocene e Pliocene 400 m circa sopra il giacimento (Figura C 5 e Figura 16).

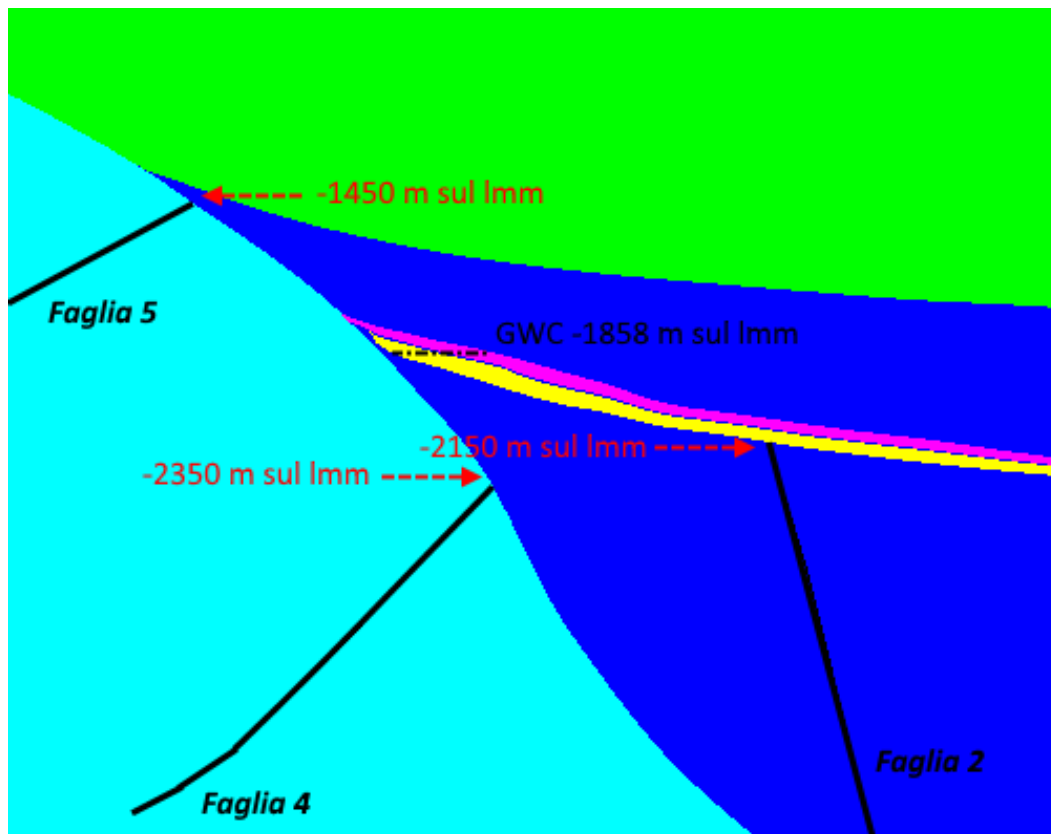


Figura 16: Particolare della sezione di Figura 14-b in corrispondenza dei livelli mineralizzati. In nero sono evidenziati i profili delle faglie inserite nel modello geomeccanico e in rosso sono riportate le quote di chiusura della Faglia 2 sul livello BBIL e delle Faglie 4 e 5 sul Pliocene. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale.

Tali discontinuità strutturali sono state rappresentate inserendo all'interno della griglia ad elementi finiti dei 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 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, In Figura 17 e Figura 18 sono riportati

dei particolari della discretizzazione delle faglie. La griglia così generata consiste complessivamente di 1,078,733 nodi e 6,629,877 elementi.

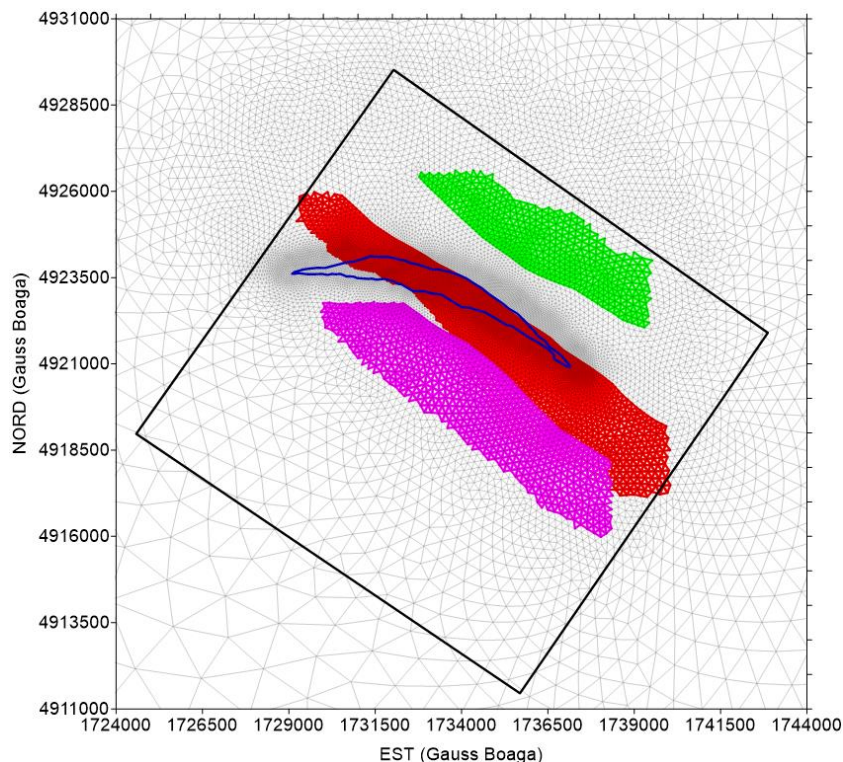


Figura 17: Vista in pianta delle faglie e della loro discretizzazione mediante elementi di interfaccia. Le Faglie 2, 4 e 5 sono evidenziate in verde, rosso e viola, rispettivamente. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico 3D.

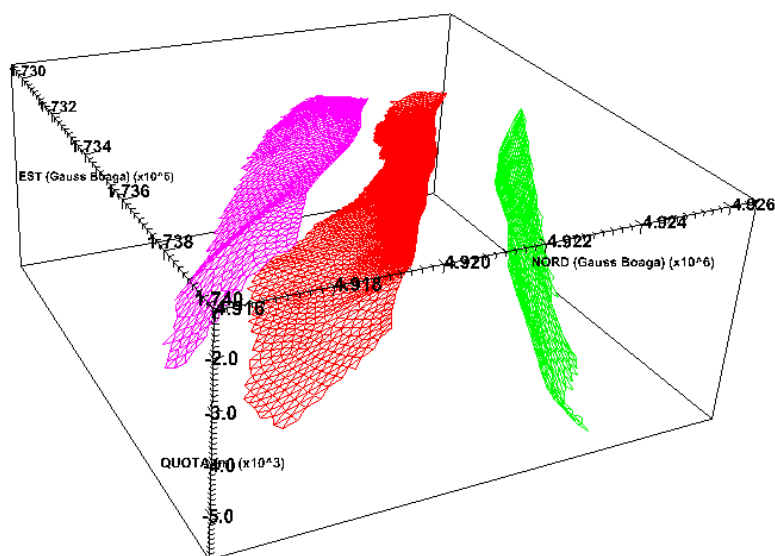


Figura 18: Vista prospettica delle faglie e della loro discretizzazione mediante elementi di interfaccia. Le Faglie 2, 4 e 5 sono evidenziate in verde, rosso e viola, rispettivamente.

A partire dalla griglia 3D complessiva, sono stati estratti i modelli statici utilizzati per le simulazioni idrodinamiche. In Figura 19 sono rappresentati in pianta i modelli di flusso per i due livelli del campo. Tali modelli sono stati utilizzati per propagare la variazione di pressione di strato dal giacimento all'acquifero in contatto idraulico, per la parte non coperta numericamente dai modelli di produzione. L'estensione dell'acquifero in connessione idraulica con i livelli è stata ottenuta a partire dalle condizioni al contorno imposte nei modelli di produzione Eclipse e dalle geometrie degli orizzonti geologici. In particolare, nella zona in corrispondenza all'alto strutturale di Cotignola lo spessore dei livelli BBIU e BBIL si annulla e il flusso è stato considerato nullo.

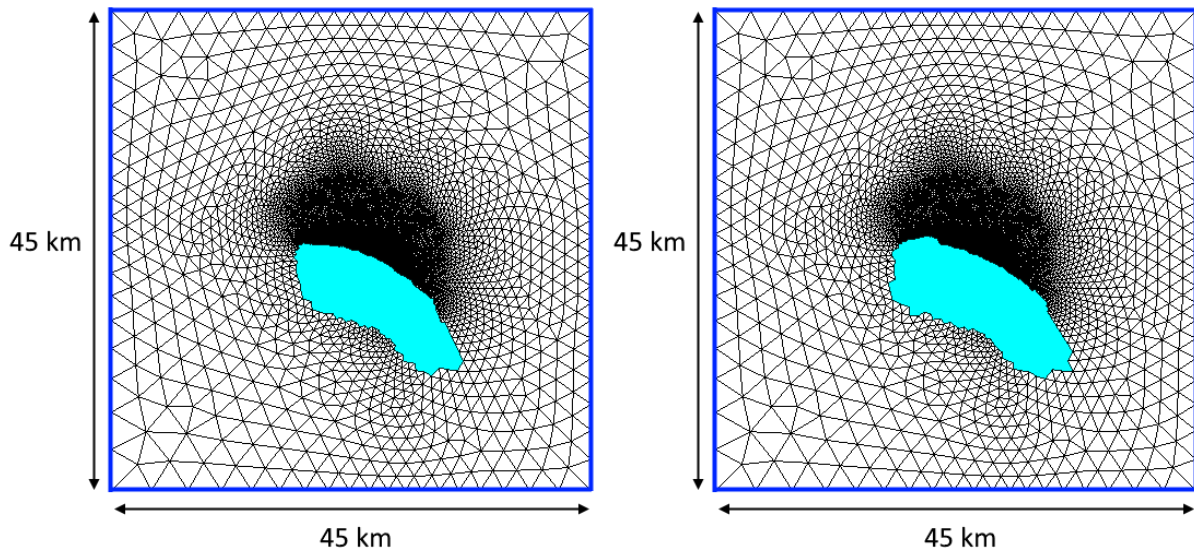


Figura 19: Vista in pianta dei modelli idrodinamici per i livelli BBIU (a sinistra) e BBIL (a destra). In blu è evidenziata la frontiera esterna su cui è imposto flusso nullo. L'area colorata in azzurro identifica la zona a spessore nullo (acquifero non presente) corrispondente all'alto strutturale di Cotignola. Quest'area delimita la frontiera interna dei modelli su cui è stato imposto flusso nullo.

6 MODELLO GEOMECCANICO E MODELLO IDRODINAMICO

6.1 Caratterizzazione geomeccanica

Come evidenziato in precedenza nel Capitolo 4, le misure SAR acquisite sopra il campo di San Potito a partire dal 1992 non hanno messo in luce spostamenti riconducibili alle attività minerarie sul giacimento. Di conseguenza, non è stato possibile calibrare i parametri meccanici del modello. Sulla base dell'esperienza maturata in studi precedenti su altri campi di produzione e stoccaggio del bacino padano (ad es., Settala, Sergnano, Minerbio, Bordolano, Angela Angelina, Dosso degli Angeli), la caratterizzazione geomeccanica sia del modello geomeccanico che del modello di flusso 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 [Baù *et al.*, 2002; Ferronato *et al.*, 2013] in base alla quale il legame tra c_M in I ciclo di carico (espressa in MPa^{-1}) e σ_z (espressa in MPa) risulta essere:

$$c_M = 0.01004 \times \sigma_z^{-1.1347}$$

con andamento lineare in un grafico bi-logaritmico (Figura 20). La legge è stata ottenuta a partire da misure di compattazione in-situ attraverso la tecnica dei marker radioattivi.

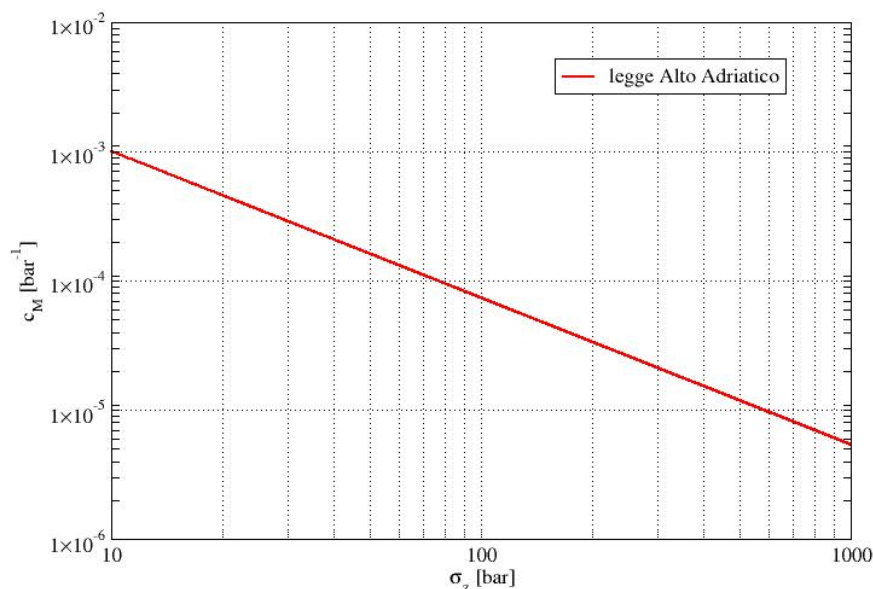


Figura 20: Grafico doppio logaritmico che riporta l'andamento della compressibilità verticale in I ciclo di carico in funzione della tensione verticale efficace secondo la legge dell'Alto Adriatico [Baù *et al.*, 2002; Ferronato *et al.*, 2013].

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 s si è assunto 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 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:

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

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

6.2 Calibrazione dei modelli idrodinamici

Oltre alla variazione di pressione di strato in giacimento, i processi geomeccanici connessi all'erogazione/stoccaggio di gas naturale sono influenzati anche dalla variazione di pressione che si propaga nell'acquifero collegato idraulicamente al campo. Poiché nei modelli di giacimento Eclipse l'acquifero dei livelli BBIU e BBIL è stato rappresentato numericamente solo per una porzione limitata prossima ai pool mineralizzati, sono state eseguite delle simulazioni idrodinamiche ex-novo per ricostruire l'andamento spazio-temporale della pressione in tutto il waterdrive collegato al campo.

La variazione di pressione che si propaga in acquifero è stata calcolata mediante il modello FEM di flusso saturo in mezzi porosi messo a punto da M³E in cui è stata imposta una variazione di pressione nel tempo in giacimento pari a quella prevista con Eclipse [Baù *et al.*, 2000; Ferronato *et al.*, 2004]. L'applicazione del modello di flusso richiede una calibrazione della permeabilità media in acquifero che risulta in generale diversa da quella utilizzata nel modello Eclipse, in seguito al diverso tipo di fluido e alla diversa estensione dell'acquifero stesso. La calibrazione viene effettuata in modo da ottenere col modello FEM l'ingresso in giacimento di un volume d'acqua compatibile con il volume poroso reso disponibile dal gas prodotto durante la fase di produzione primaria, compresa fra il dicembre 1988 e il dicembre 1991 (Figura 3). La permeabilità così ottenuta è rappresentativa della conducibilità media dell'intero acquifero, e tiene in qualche misura anche

conto dei livelli argillosi presenti nella formazione e delle approssimazioni insite nella riproduzione della geometria e degli spessori dell'acquifero.

Il volume d'acqua ingressato in giacimento W_{in} al dicembre 1991 è stato calcolato come differenza fra gli integrali numerici della funzione $S_w \cdot \varphi \cdot ntg$, con S_w il grado di saturazione in acqua, φ la porosità e ntg il rapporto net su gross, nel dicembre 1988 e nel dicembre 1991 estesi al volume geometrico del giacimento. La calibrazione è stata effettuata solo per il livello BBIU con produzione primaria; la permeabilità risultante è stata adottata anche per l'acquifero del livello BBIL interessato dalle sole attività di erogazione/stoccaggio tra il 2013 e il 2017. Si è assunto che i waterdrive non siano tra loro collegati. Come normalmente assunto nei bilanci di massa in giacimenti di idrocarburi, si è ipotizzato che il volume poroso rimanga invariato fra l'inizio e la fine della coltivazione. Il volume d'acqua ingressato nel livello BBIU con i valori di permeabilità utilizzati nel modello Eclipse e quelli risultanti dalla calibrazione del modello FEM dell'acquifero sono riportati in Tabella I.

| Livello | BBIU |
|----------------------------------|------|
| W_{in} [Mm ³] | 2.11 |
| k_h [mD] modello Eclipse | 100 |
| K_v [mD] modello Eclipse | 10 |
| k_h [mD] modello FEM acquiferi | 30 |
| K_v [mD] modello FEM acquiferi | 3 |

Tabella I: Volume d'acqua ingressato, permeabilità orizzontale k_h e verticale k_v impiegata nel modello di Eclipse e calibrata nel modello FEM dell'acquifero collegato al livello BBIU.

Dopo aver calibrato il modello di flusso FEM, l'andamento della pressione in acquifero è stato simulato per entrambi i livelli fino al marzo 2017. Di seguito vengono riportate le mappe di variazione di pressione in giacimento e nel waterdrive:

- nel momento di massima depressurizzazione durante la produzione primaria nel dicembre 1991 (per il solo livello BBIU in Figura 21);
- durante una prova di stoccaggio con $P = 100\% P_i$ per il livello BBIU (aprile 2016 – settembre 2016 in Figura 22);
- durante una prova di erogazione per il livello BBIU (novembre 2016 – marzo 2017 in Figura 23);

- durante una prova di erogazione per il livello BBIL (novembre 2016 - marzo 2017 in Figura 24).

Il livello BBIU ha subito durante la produzione primaria un abbattimento di pressione di circa a 50 bar. Da notare che, in corrispondenza alla porzione più ad Ovest del campo, la variazione di pressione si propaga limitatamente nell'acquifero in connessione idraulica (Figura 21). Ciò è dovuto al fatto che la variazione di pressione in giacimento è minore e non è uniforme su lo spessore del livello, come evidenziato dal modello Eclipse in Figura 25.

Durante le prove di erogazione/stoccaggio si ha un'escursione di pressione tra il massimo (novembre/dicembre) e minimo (marzo/aprile) di circa 30 bar. Tale variazione di pressione rimane localizzata in giacimento e nel mezzo poroso ad esso adiacente. In particolare, nel livello BBIU la zona interessata dalle operazioni di erogazione/stoccaggio ha una forma pseudo quadrata dovuta all'inserimento di barriere idrauliche nel modello Eclipse per mezzo di elementi a ridotta permeabilità (Figura 26).

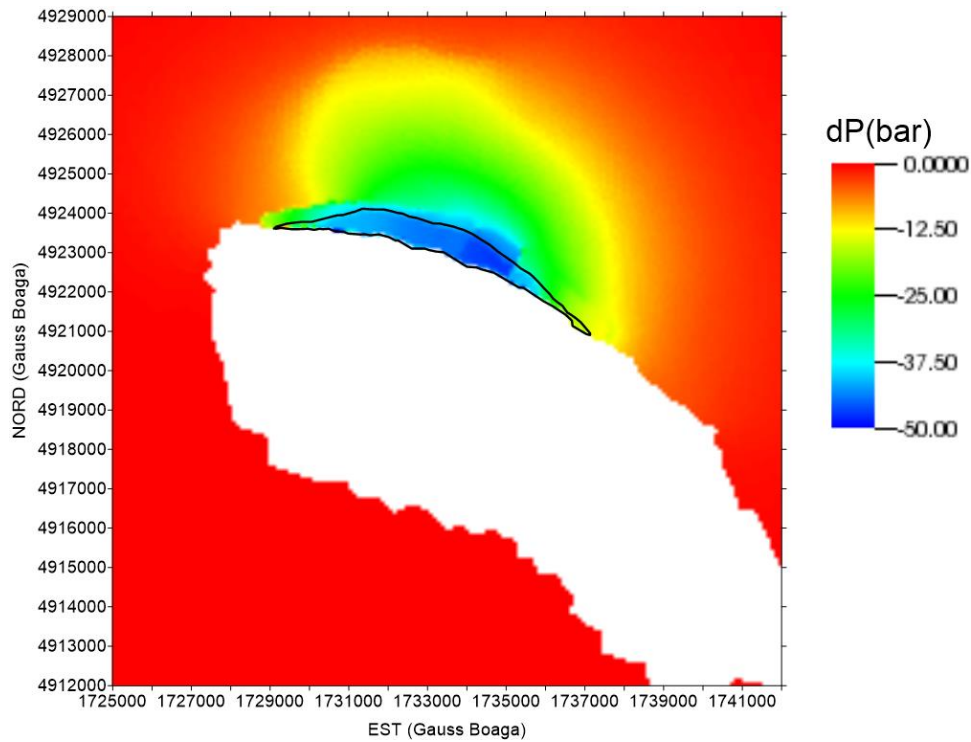


Figura 21: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIU nel momento di massima depressurizzazione nel dicembre 1991. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

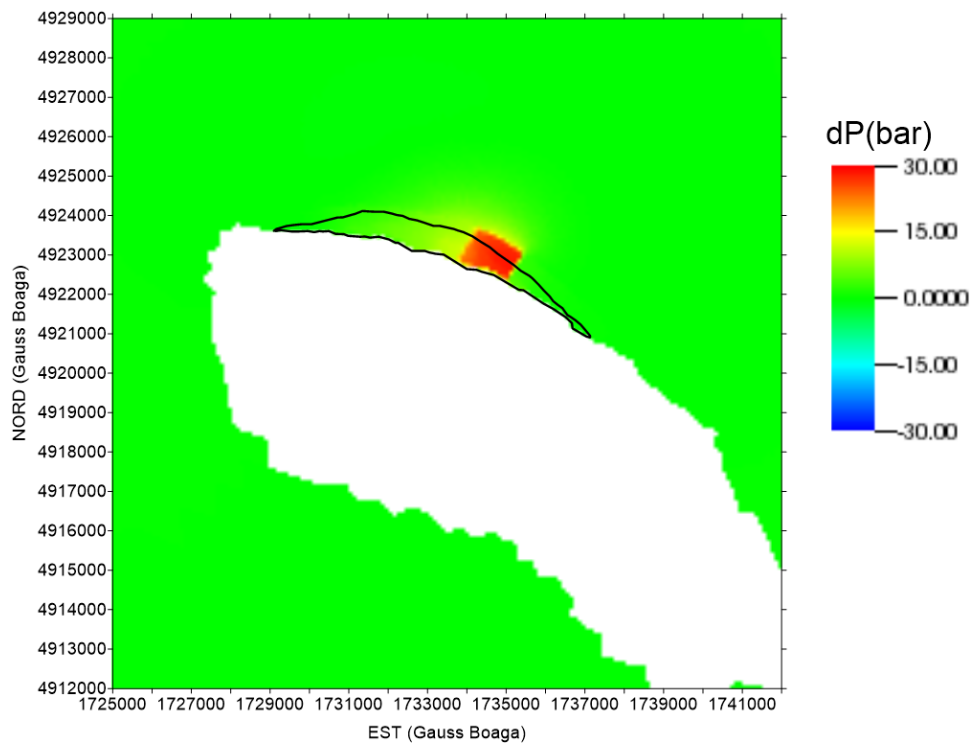


Figura 22: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIU durante una prova di stoccaggio tra aprile 2016 e settembre 2016. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

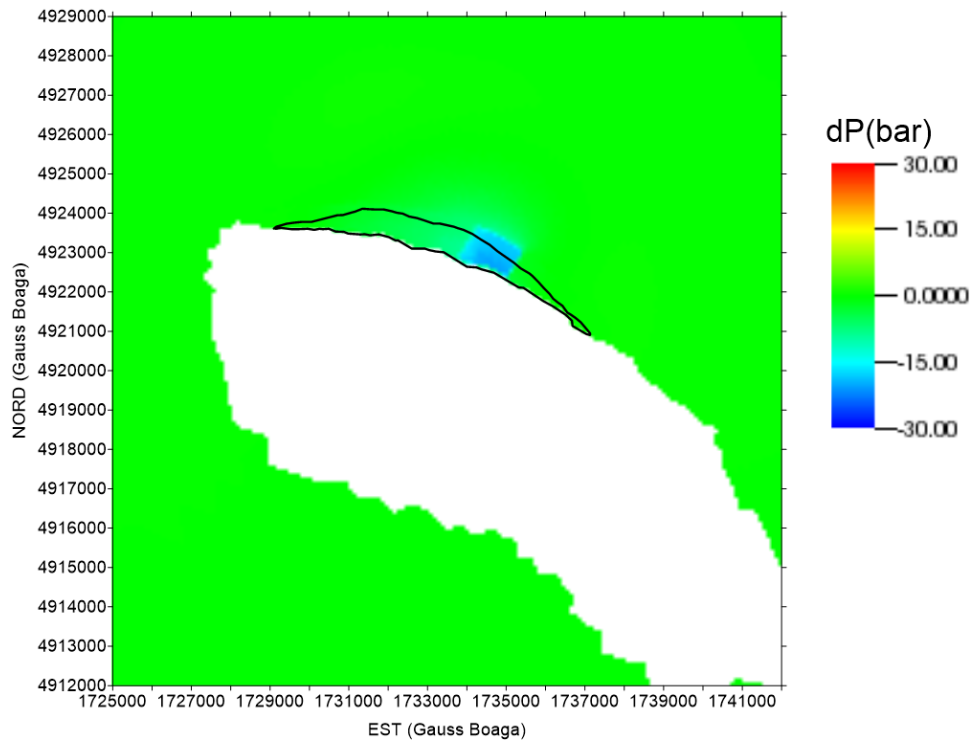


Figura 23: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIU durante una prova di erogazione tra novembre 2016 e marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

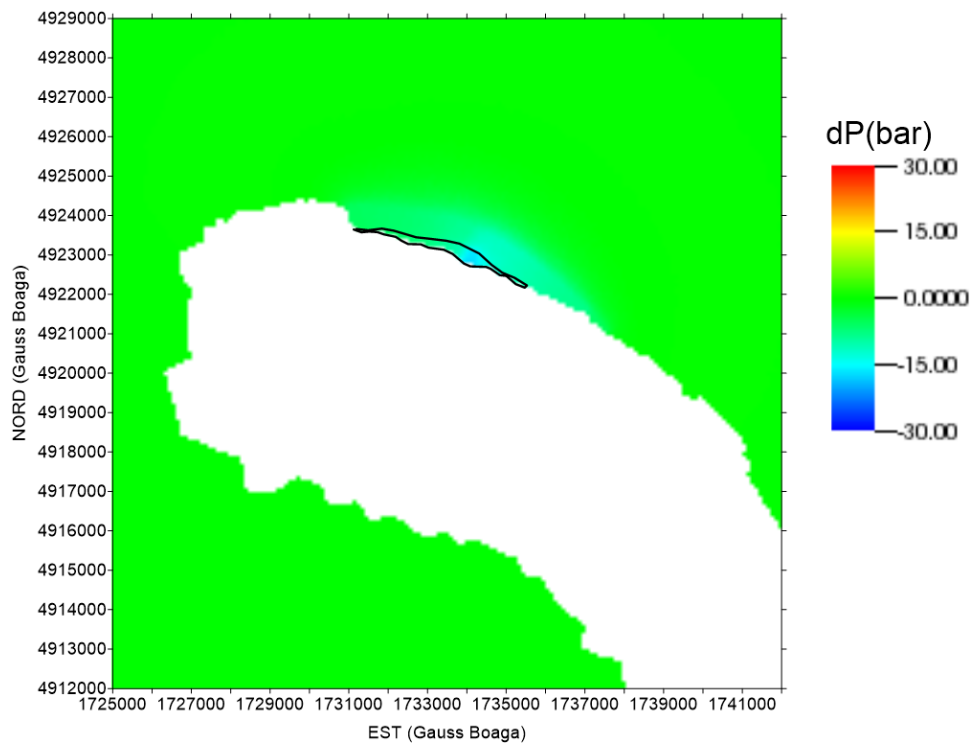


Figura 24: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIL durante una prova di erogazione tra novembre 2016 e marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

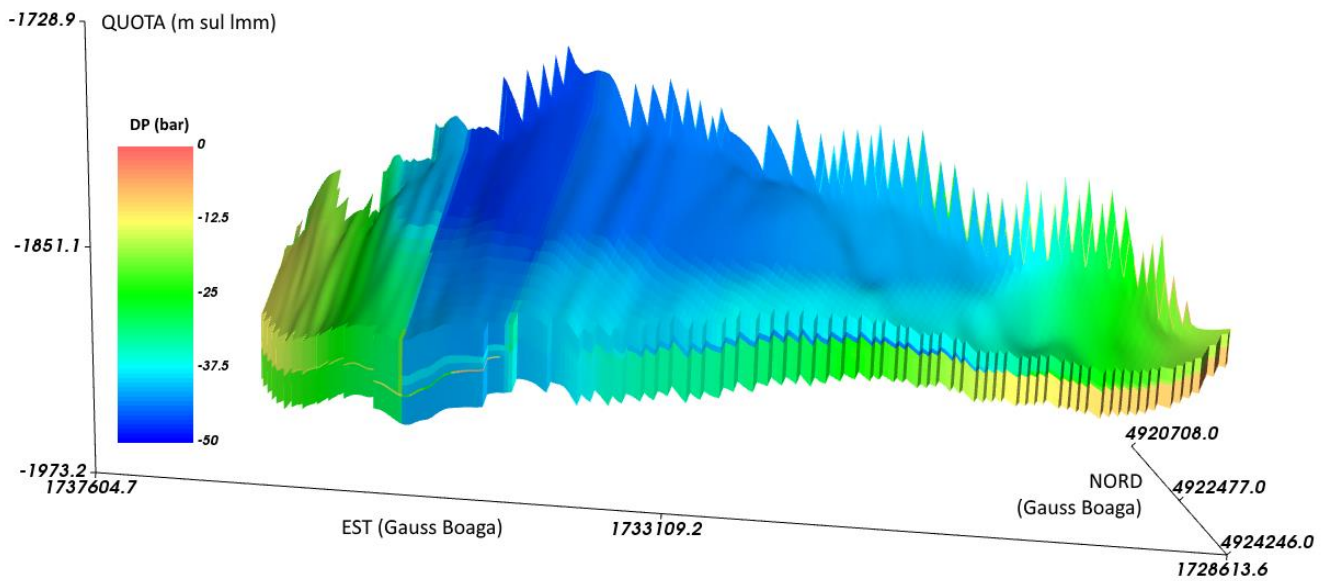


Figura 25: Variazione di pressione (bar) fornita dal modello Eclipse nel livello BBIU nel momento di massima depressurizzazione nel dicembre 1991. Da notare la zona a Nord (a destra nella presente rappresentazione) dove la variazione di pressione è limitata circa 10 bar nella parte più profonda del pool.

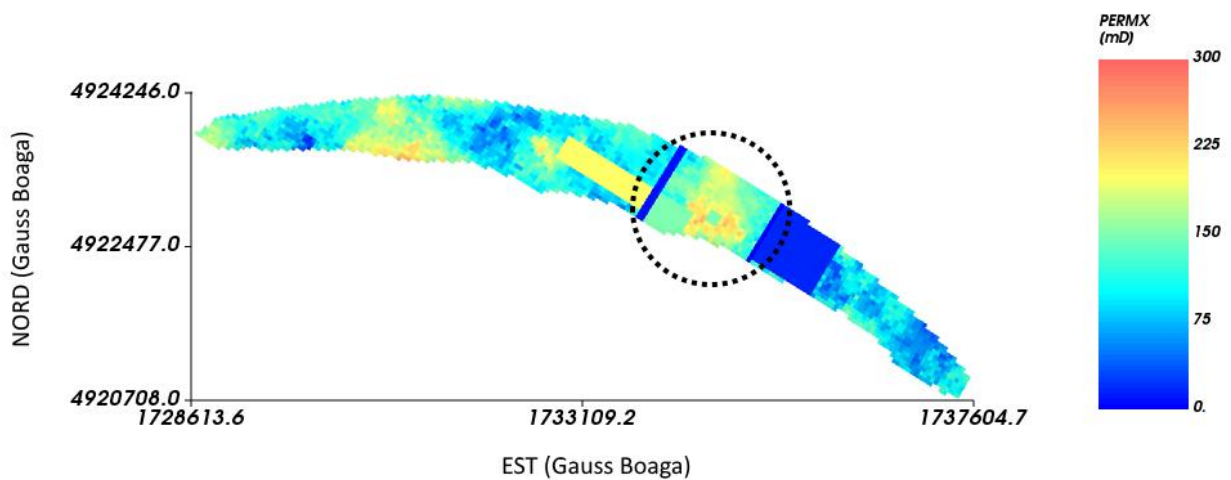


Figura 26: Permeabilità orizzontale (mD) fornita dal modello Eclipse nel livello BBIU. Nel cerchio nero è evidenziata la zona interessata dalle prove di erogazione/stoccaggio.

7 PREVISIONI MODELLISTICHE

7.1 Spostamenti della superficie del terreno

Il modello FEM geomeccanico è stato utilizzato per simulare gli spostamenti del suolo causati dalle attività minerarie sviluppate sul giacimento di San Potito. La storia di deformazione e lo stato tensionale nel campo sono state simulate dall'inizio della coltivazione primaria (1988) al fine di riprodurre correttamente, data la non linearità della legge costitutiva adottata, le condizioni iniziali necessarie per la simulazione degli scenari di sviluppo previsti in futuro. In Figura 27 è mostrata la mappa di subsidenza prevista dal modello nel dicembre 1991 (fine della produzione): il massimo abbassamento, quantificato in 2.6 cm, è posizionato poco a Nord della traccia del giacimento, in posizione baricentrica (Figura 27). Si può notare come le isocinetiche di subsidenza si sviluppino in modo asimmetrico attorno al campo, con un prevalente abbassamento a verso Nord-Est. Ciò è dovuto alla presenza dell'alto strutturale di Cotignola che chiude verso Sud l'acquifero collegato ai livelli mineralizzati favorendo la propagazione dell'abbattimento di pressione in direzione Nord. In Figura 28 è mostrato l'andamento temporale dello spostamento verticale nel punto di massima subsidenza.

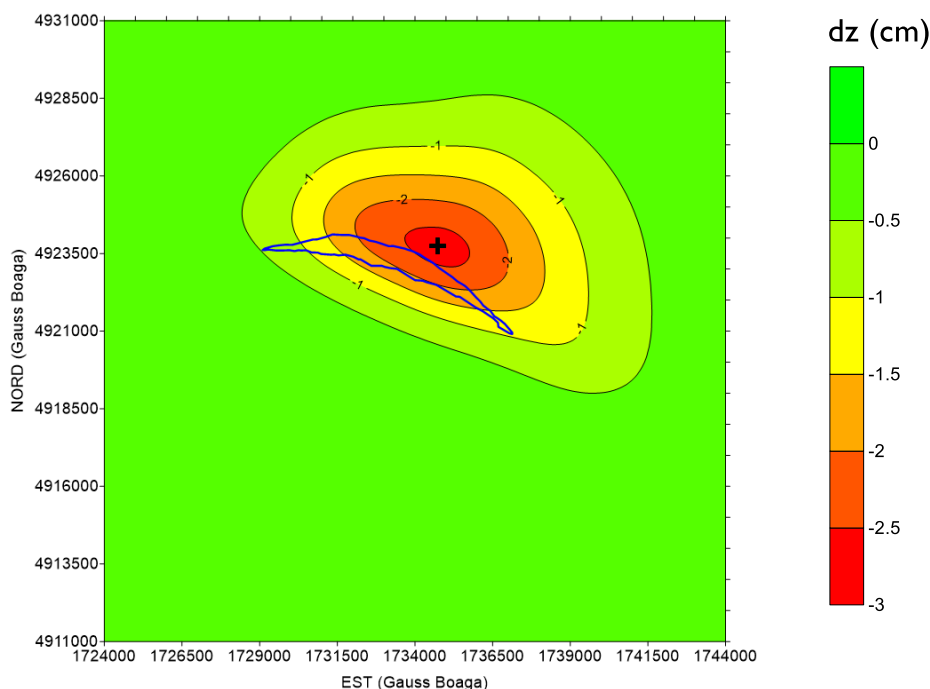


Figura 27: Subsidenza (cm) simulata al dicembre 1991, fine coltivazione del campo. In blu è evidenziata la traccia del giacimento. Il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.

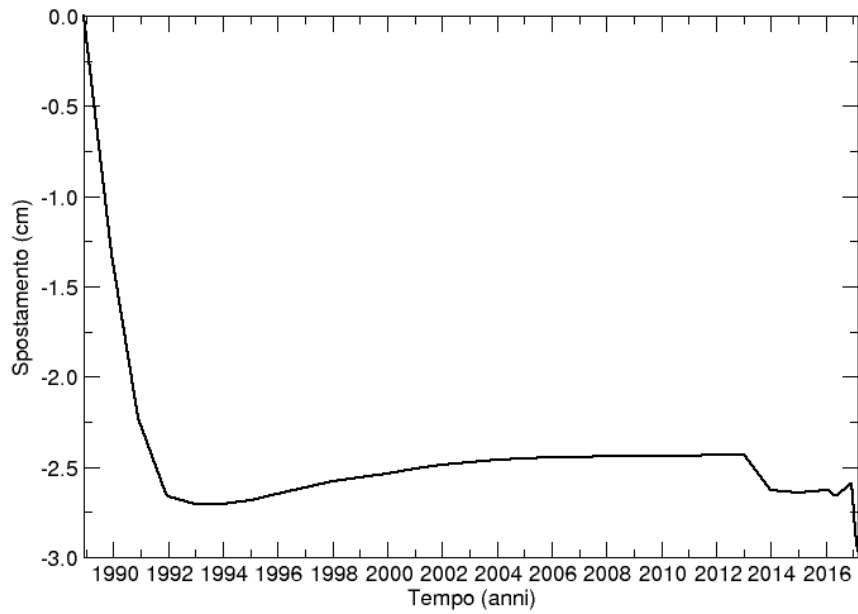


Figura 28: Spostamento verticale (cm) in corrispondenza del punto di massima subsidenza.

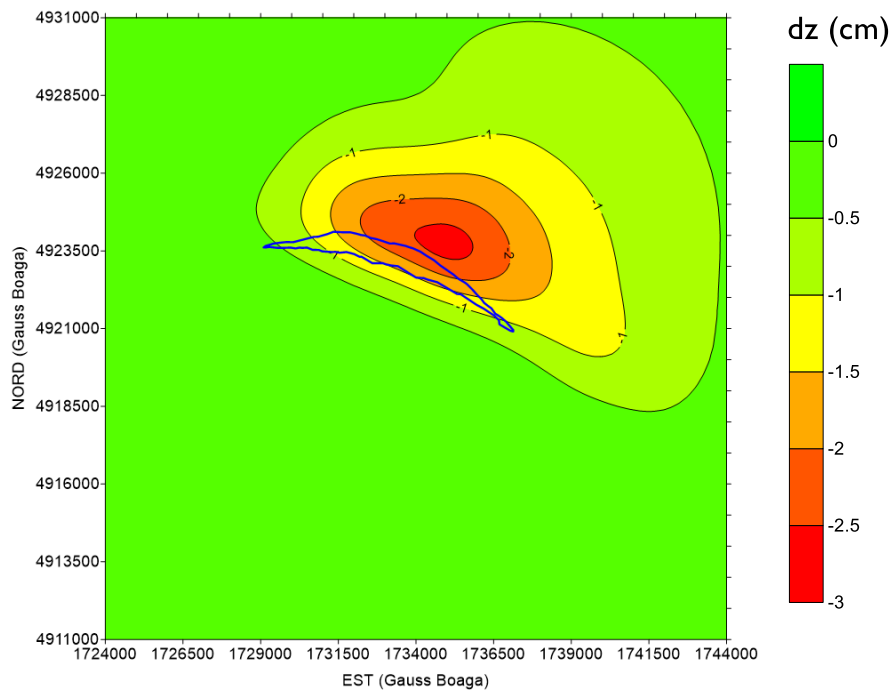


Figura 29: Subsidenza (cm) simulata al 2016. In blu è evidenziata la traccia del giacimento.

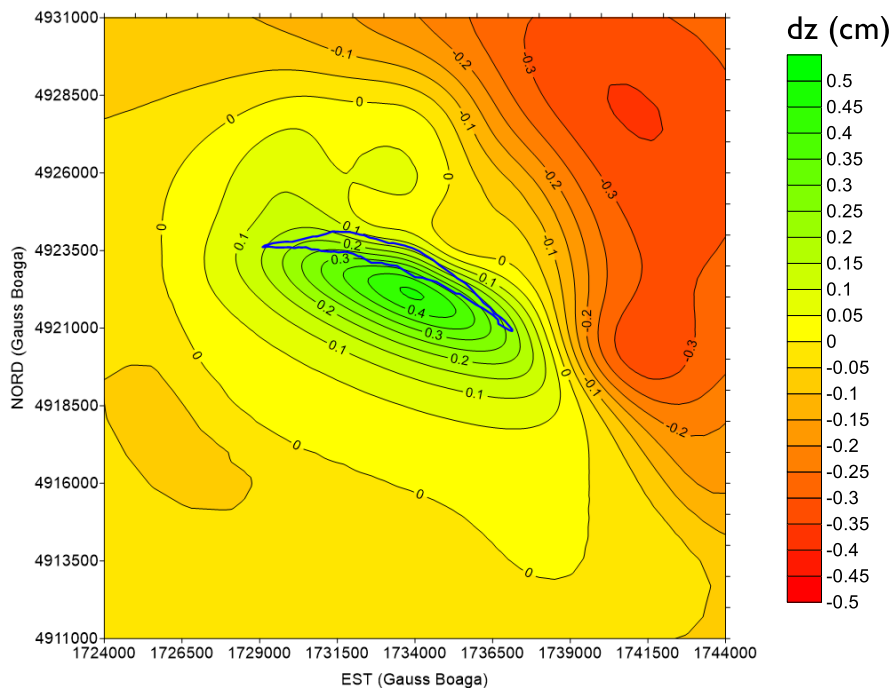


Figura 30: Spostamento verticale (cm) simulato durante il periodo 1991 - 2016. In blu è segnata la traccia del giacimento.

La mappa di subsidenza prevista dal modello all'inizio delle prove di stoccaggio/erogazione (2016) è riportata in Figura 29; l'asimmetria del cono di subsidenza rispetto alla traccia del giacimento si accentua ulteriormente. In Figura 30 è riportata la mappa degli spostamenti verticali calcolati a partire dal 1991: al di sopra del campo lo spostamento è positivo (rebound) in seguito al recupero di pressione in giacimento, mentre la porzione esterna dell'acquifero continua a depletarsi e, di conseguenza, si ottiene un'ulteriore abbassamento. È comunque da notare che gli spostamenti cumulati nel periodo 1991-2016 sono caratterizzati da valori limitati, inferiori a 1 cm.

Sono stati quindi calcolati gli spostamenti che si sono prodotti nel corso delle due prove di stoccaggio ed erogazione con $P=100\%P_i$, ovvero la differenza tra gli spostamenti che si manifestano tra un minimo di pressione ed il successivo massimo e viceversa. La Figura 31 e la Figura 32 mostrano rispettivamente le mappe dello spostamento verticale previsto dal modello nei periodi aprile 2016 – settembre 2016 e novembre 2016 – marzo 2017. Gli spostamenti verticali risultano minori durante la prova di stoccaggio: la prova di stoccaggio è effettuata nel solo livello BBIU, mentre la prova di erogazione interessa entrambi, con il mezzo poroso del livello BBIL meno rigido perché, non essendo stato interessato da una produzione primaria, lavora in 1 ciclo di carico.

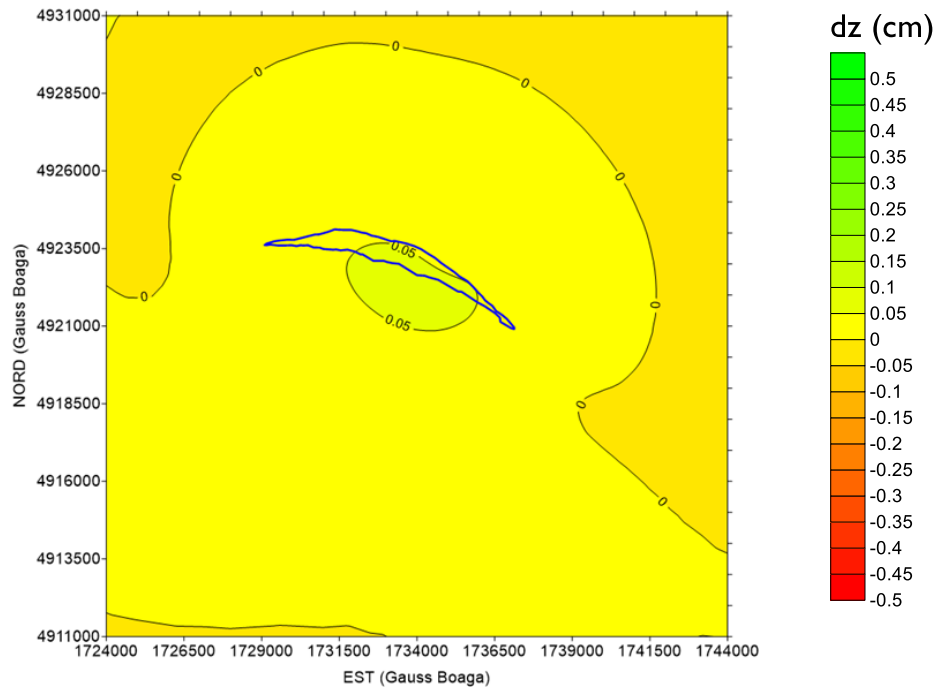


Figura 31: Spostamento verticale (cm) simulato durante la prova stoccaggio aprile 2016 – settembre 2017. In blu è segnata la traccia del giacimento.

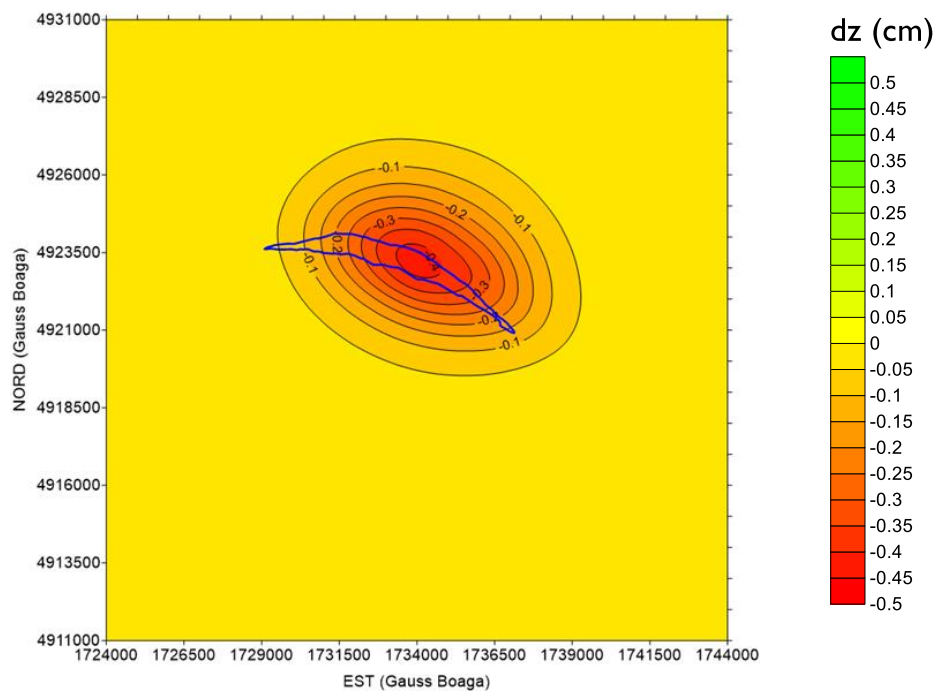


Figura 32: Spostamento verticale (cm) simulato durante la prova erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In blu è segnata la traccia del giacimento.

7.2 Confronto tra spostamenti misurati e spostamenti calcolati

In Figura 33, Figura 34 e Figura 35 si confrontano le misure SAR fornite da EDISON STOCCAGGIO e i risultati del modello geomeccanico. Per facilitare il confronto sono stati utilizzati due accorgimenti:

1. i risultati del modello sono stati rappresentati in corrispondenza ai PS rilevati dal SAR;
2. gli spostamenti sono stati valutati in termini di “double-difference” [Fokker and Visser, 2015], ovvero calcolando lo spostamento verticale relativo sia nello spazio (rispetto ad alcuni PS vicini al campo) che nel tempo nell’intervallo temporale relativo alla prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. Ciò permette di confrontare direttamente modello e misure, eliminando la problematica dello spostamento del punto di riferimento utilizzato per l’analisi SAR.

Per quanto riguarda le misure ottenute dal Geoportale Nazionale, in Figura 36 è riportato il confronto tra la velocità media rispetto DD a un punto esterno alla traccia del giacimento ottenuta dalle misure con dati ERS e calcolata dal modello sugli stessi punti PS nella fase di post-produzione dal 1993 al 2000.

Le figure evidenziano come nelle misure non sia riscontrabile alcun pattern associabile alle attività su San Potito. I risultati modellistici danno ragione di questo fatto: gli spostamenti indotti dal recupero di pressione nella fase post-produttiva e nei test di stoccaggio/erogazione sono assai limitati, dell’ordine di pochi mm o inferiori a 1 mm/anno, ovvero comparabili o inferiori all’accuratezza della metodologia di misurazione, e vengono completamente mascherati dagli spostamenti causati da altri processi naturali e antropici.

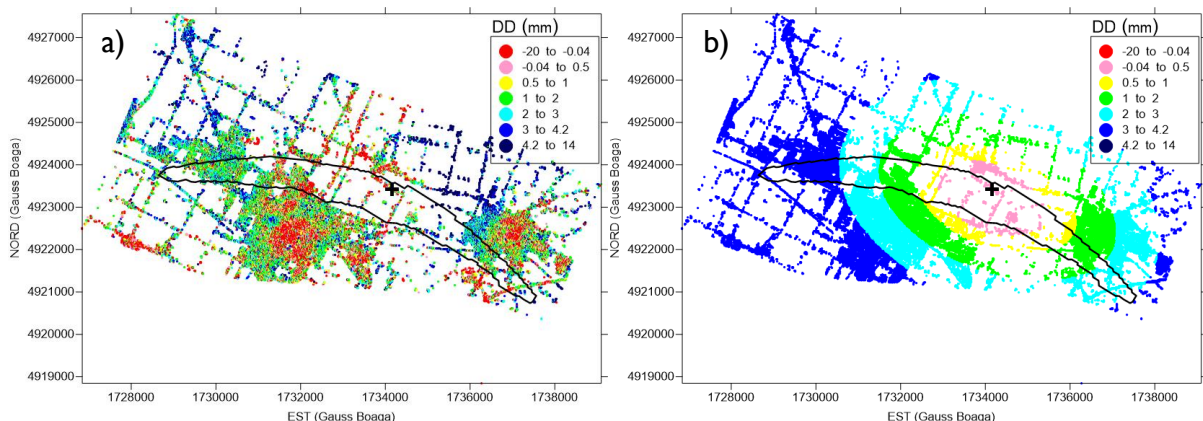


Figura 33: Spostamenti verticali (mm) in termini di *double difference* rispetto al PS AGF7G8X di Figura 7, evidenziato con il simbolo +. L’intervallo temporale corrisponde a quello della prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017: a) misure SAR; b) risultanti dal modello geomeccanico.

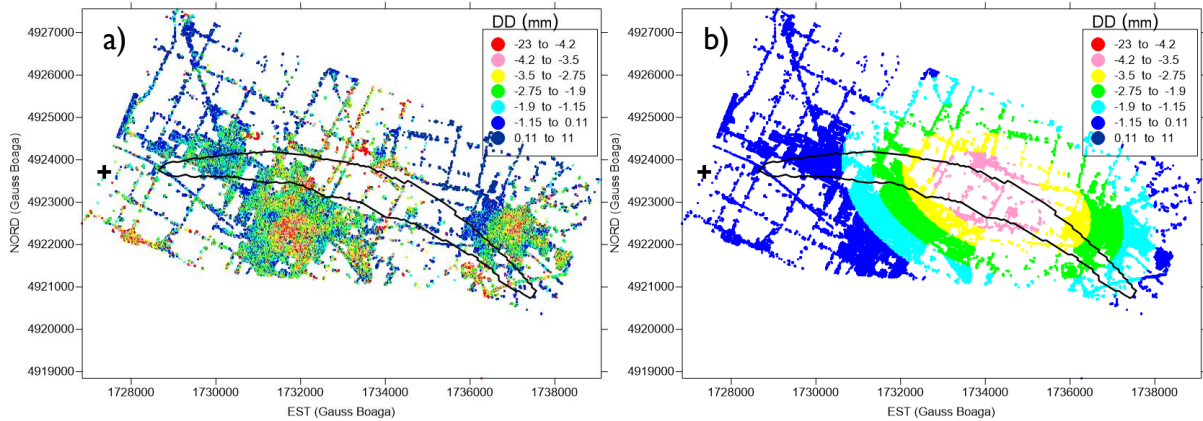


Figura 34: Spostamenti verticali (mm) in termini di *double difference* rispetto al PS AGUOPLZ di Figura 7, evidenziato con il simbolo +. L'intervallo temporale corrisponde a quello della prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017: a) misure SAR; b) risultanti dal modello geomeccanico.

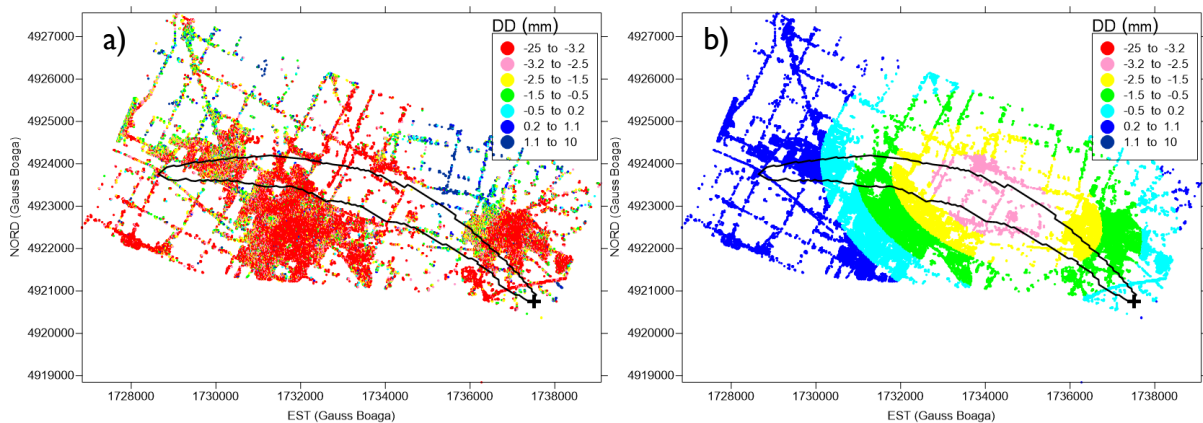


Figura 35: Spostamenti verticali (mm) in termini di *double difference* rispetto al PS AE3URQC di Figura 7, evidenziato con il simbolo +. L'intervallo temporale corrisponde a quello della prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017: a) misure SAR; b) risultanti dal modello geomeccanico.

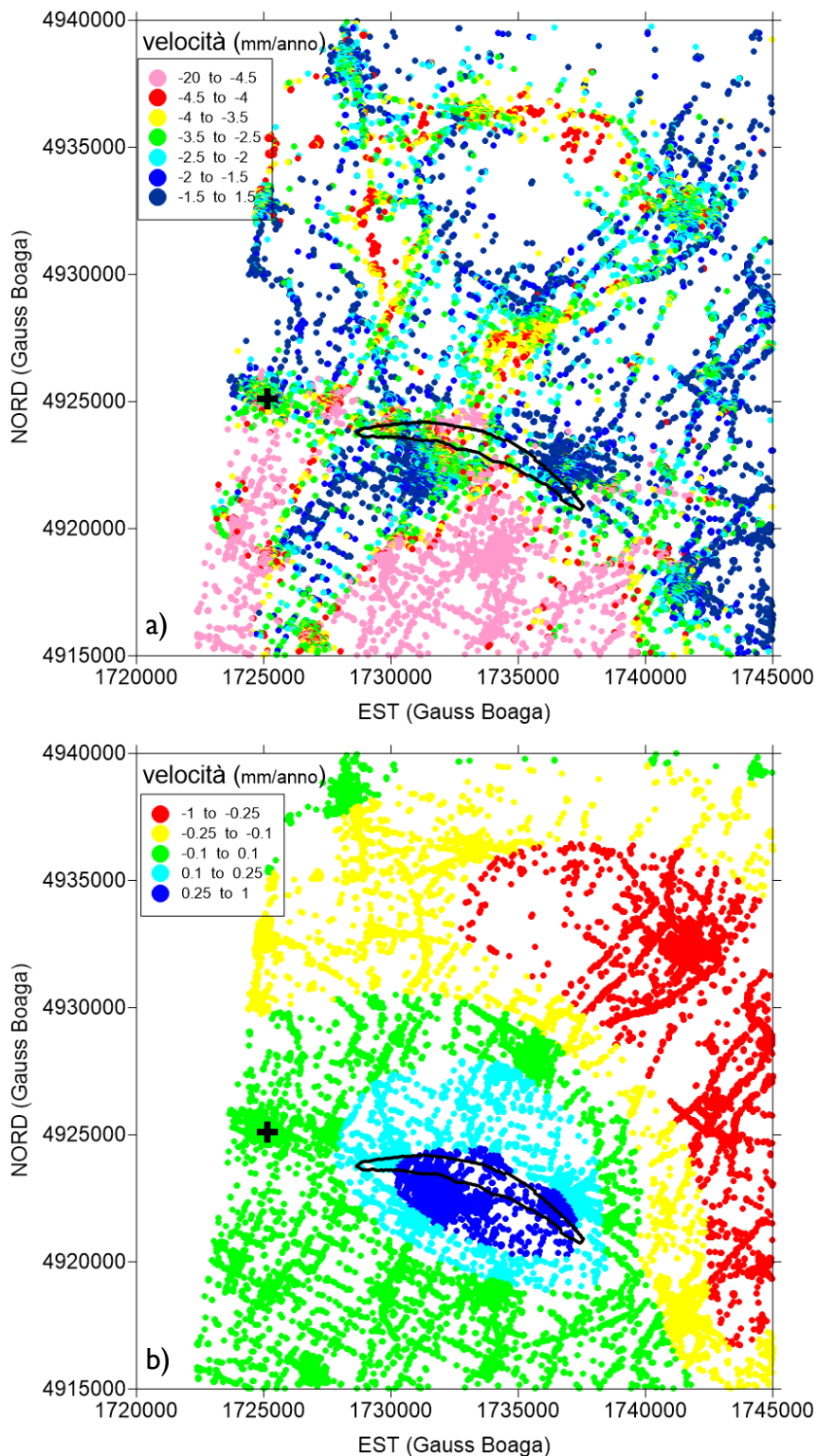


Figura 36: Velocità media (mm/anno) nella fase di post produzione dal 1993 al 2000 rispetto al punto evidenziato dal simbolo +: a) misure SAR; b) risultante dal modello geomeccanico.

7.3 Gradiente dello spostamento

In relazione agli spostamenti differenziali (Figura 37 e Figura 38), il massimo gradiente di spostamento verticale si registra al bordo Sud della traccia del giacimento durante la prova di erogazione ed è pari a 0.002 mm/m , cioè 0.20×10^{-5} . Tale gradiente è stato confrontato con le distorsioni massime ammissibili per strutture di superficie. A tal proposito, esistono diversi coefficienti cautelativi che dipendono dal tipo di struttura, dalla sua importanza e dal materiale con cui viene realizzata. Le strutture multipiano in muratura sono le più sensibili agli spostamenti differenziali, con il limite più cautelativo per i gradienti di deformazione verticale fissato in 50×10^{-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. I risultati delle simulazioni indicano quindi che le prove di stoccaggio ed erogazione hanno causato spostamenti verticali differenziali ampiamente al di sotto del limite di sicurezza predetto.

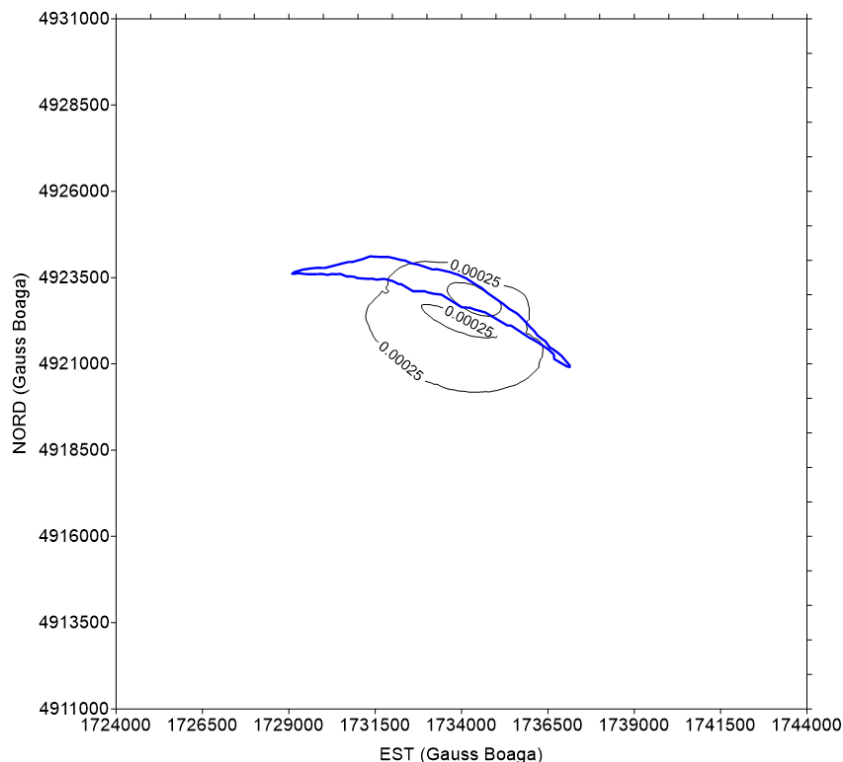


Figura 37: Mappa del gradiente dello spostamento verticale (mm/m) durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2016. In blu è segnata la traccia del giacimento.

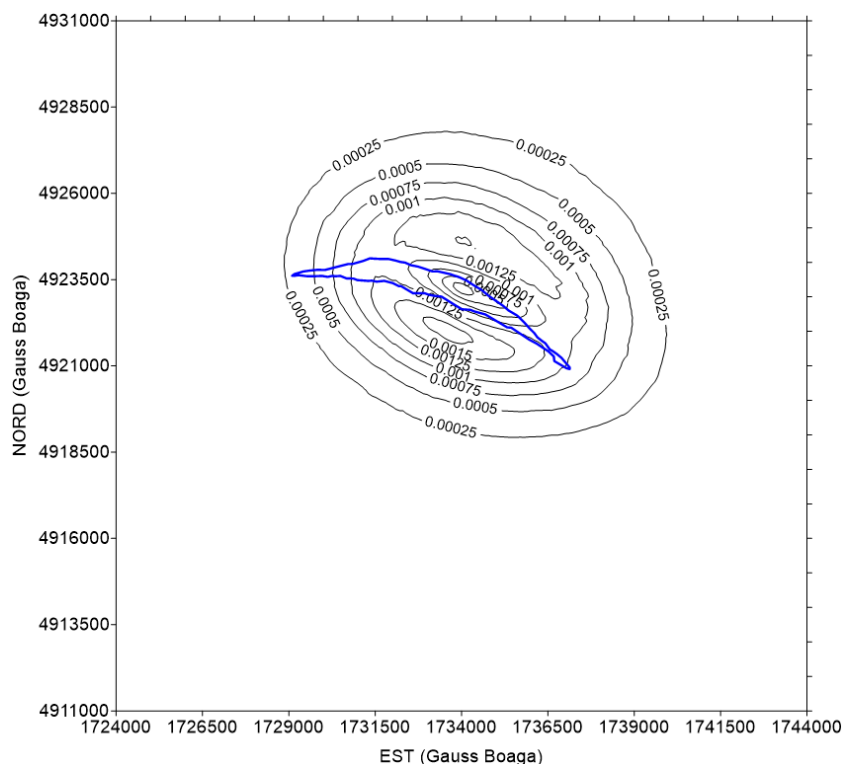


Figura 38: Mappa del gradiente dello spostamento verticale (mm/m) durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In blu è segnata la traccia del giacimento.

7.4 Analisi tensionale

Nell'Allegato D si riporta la variazione di tensione registrata lungo x , y e z a fine produzione e durante le prove di stoccaggio ed erogazione. La variazione di tensione verticale in giacimento è coerente con la variazione della pressione di strato (Figura 21 - Figura 24). In particolare, durante le prove di stoccaggio ed erogazione la perturbazione rimane sostanzialmente confinata all'interno del serbatoio di stoccaggio.

La perturbazione dello stato tensionale rimane circoscritta negli strati del giacimento e non si trasferisce, se non con valori assai modesti, nel caprock e negli strati sottostanti. Ciò è ben evidenziato in Figura 42, Figura 41 e Figura 42 nelle quali la variazione della tensione verticale a fine produzione e durante le prove di stoccaggio ed erogazione è rappresentata lungo la sezione verticale passante (evidenziata in Figura 39) per il campo. La variazione di tensione lungo x e y ha lo stesso pattern di quella lungo z , ma con valori circa dimezzati, come visibile dalle mappe di tensione riportate in Allegato D.

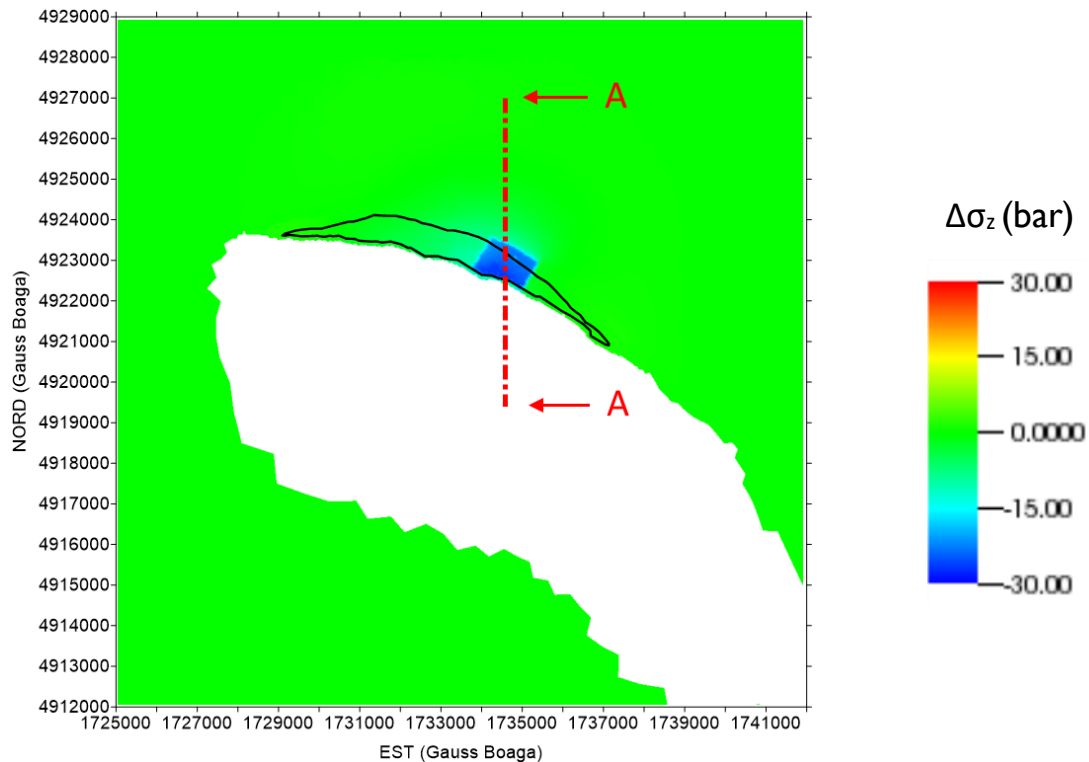


Figura 39: Variazione di tensione σ_z (bar) nel livello BBIU durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento. In rosso si riporta la traccia delle sezioni verticali riportate nelle figure che seguono.

Va posto l'accento, infine, sul fatto che le faglie in prossimità del campo non sono state interessate da un significativo disturbo tensionale né durante la produzione primaria né durante le prove di stoccaggio ed erogazione. Lo stato tensionale iniziale sulle faglie è riportato in Figura 43 e Figura 44 in termini di tensione normale (negativa se di compressione) e tangenziale (in valore assoluto) al piano di faglia, rispettivamente. In Figura 45 - Figura 50 è mostrata la variazione di tensione normale e tangenziale al piano di faglia a fine produzione e durante le prove di stoccaggio ed erogazione. Nel caso più gravoso, il disturbo tensionale è pari allo 0.09% e 0.25% delle tensioni iniziali, per le tensioni normali e tangenziali alla faglia, rispettivamente.

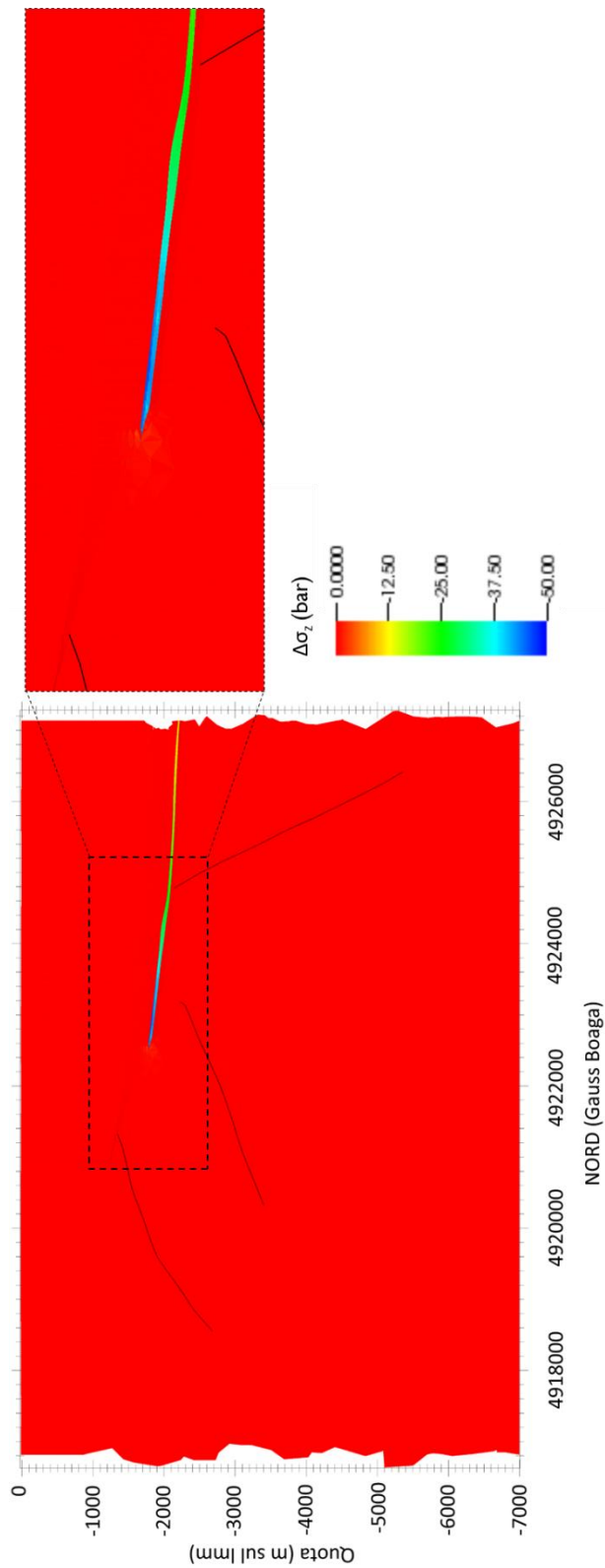


Figura 40: Variazione di tensione σ_z (bar) nella sezione A-A di Figura 39 a fine produzione nel 1992. In nero sono evidenziate le tracce delle faglie.

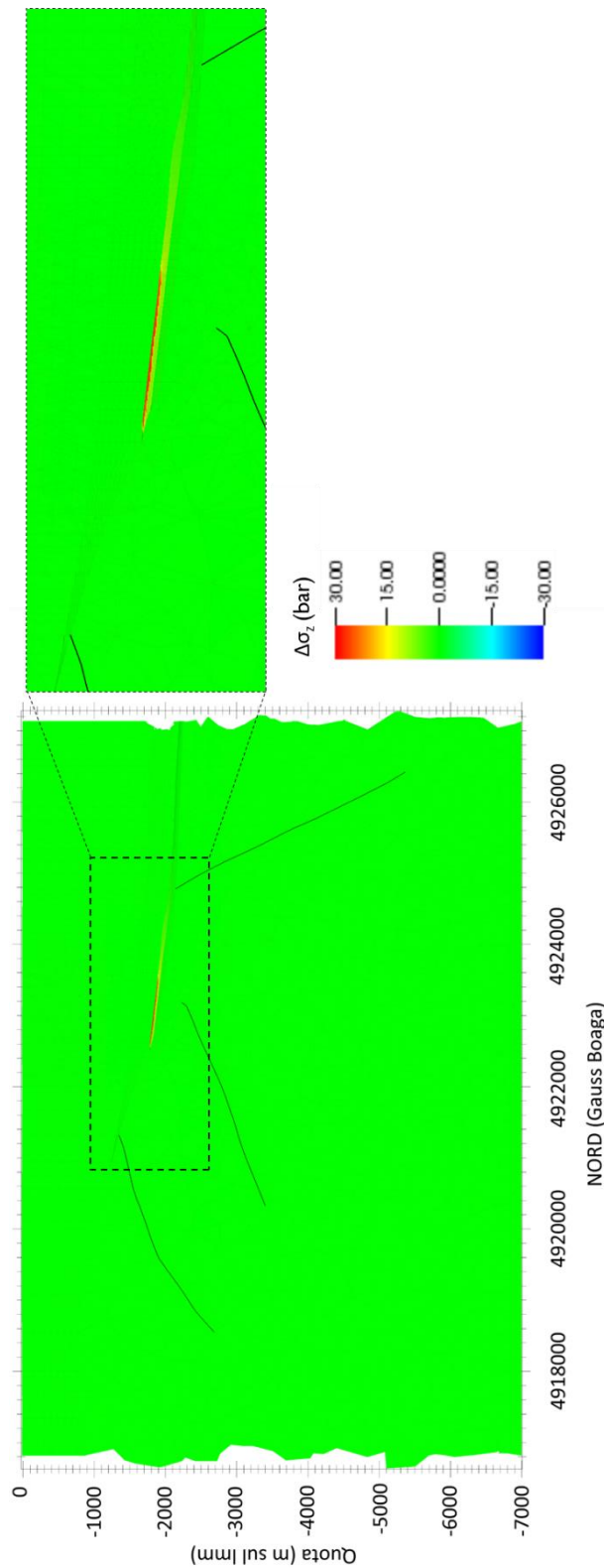


Figura 41: Variazione di tensione σ_z (bar) nella sezione A-A di Figura 39 durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2017. In nero sono evidenziate le tracce delle faglie.

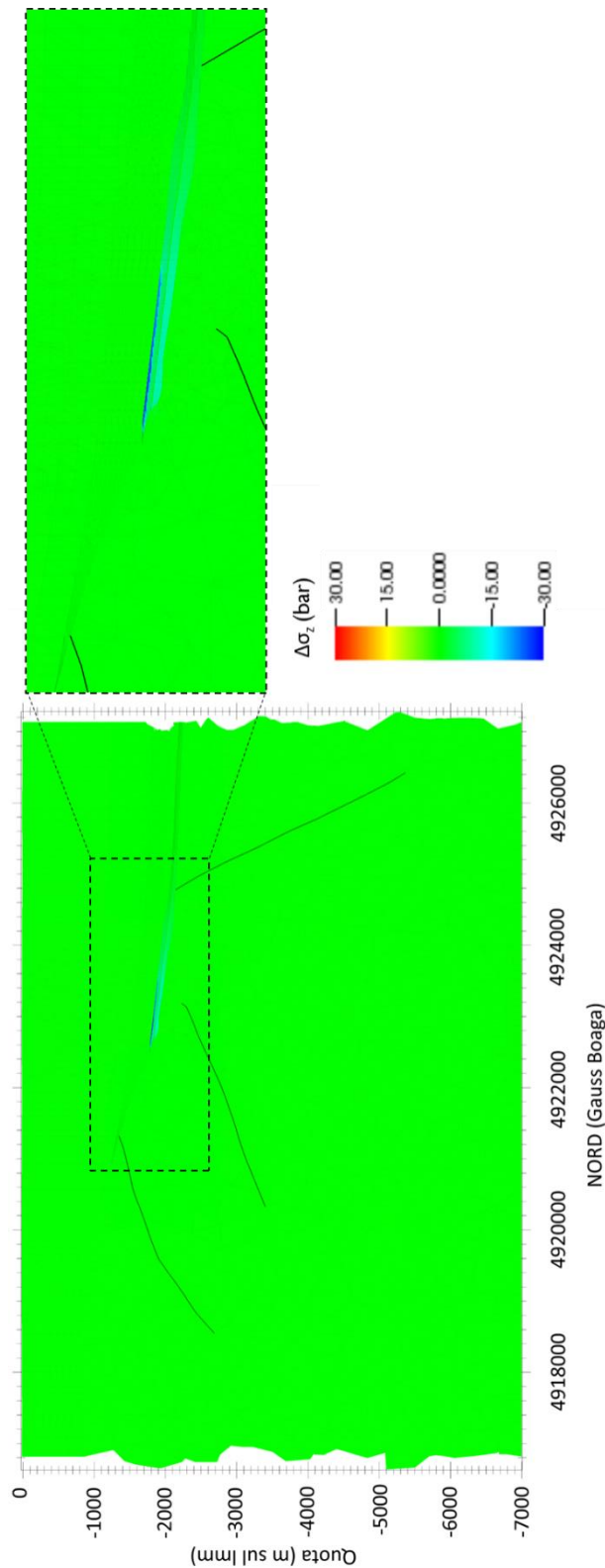


Figura 42: Variazione di tensione σ_z (bar) nella sezione A-A di Figura 39 durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In nero sono evidenziate le tracce delle faglie.

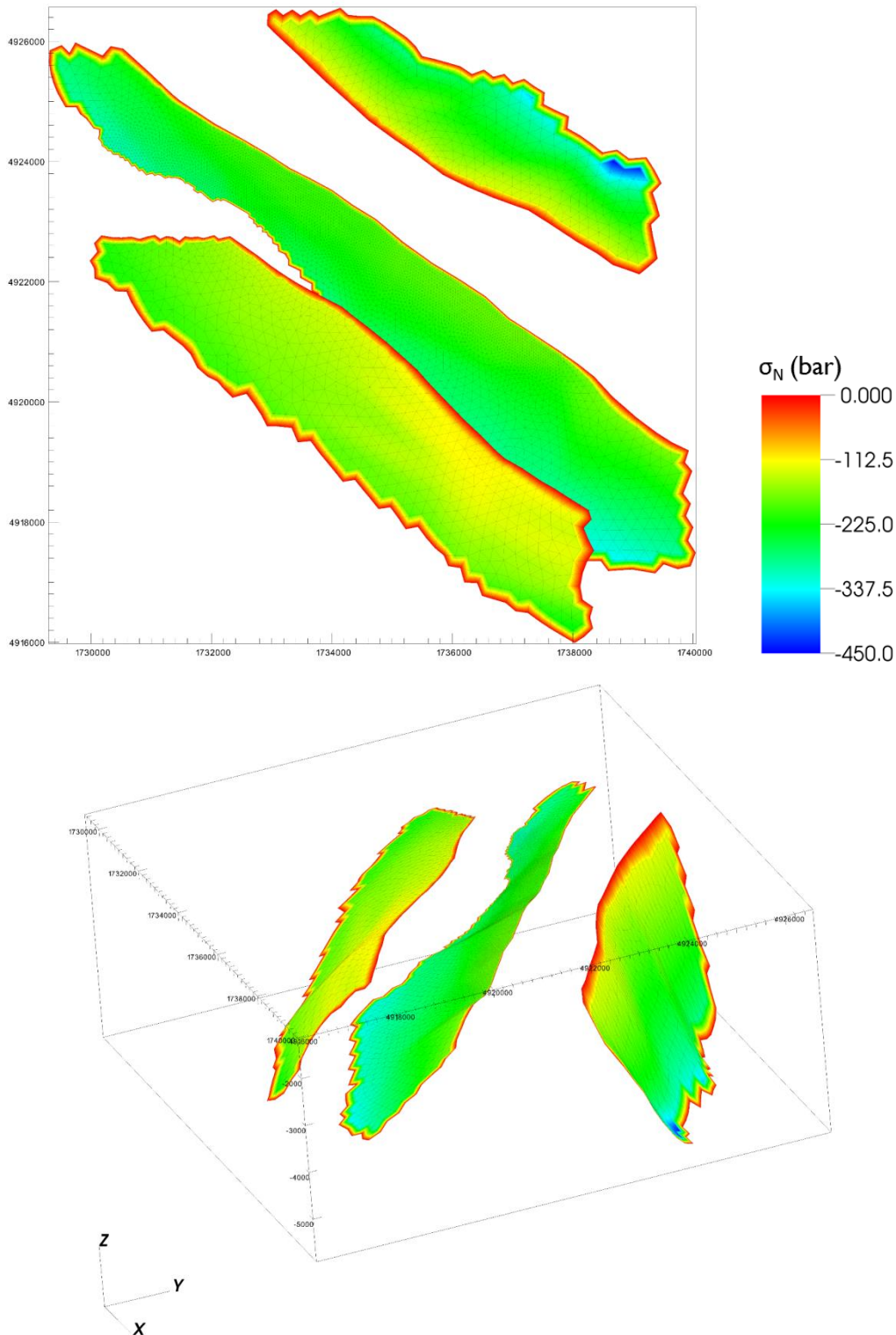


Figura 43: Tensione iniziale normale al piano di faglia σ_N (bar): a) vista in pianta; b) vista assometrica. NB: il modello non fornisce in output la soluzione in termini di tensione sui nodi perimetrali della faglia e il visualizzatore attribuisce a tali nodi un valore nullo.

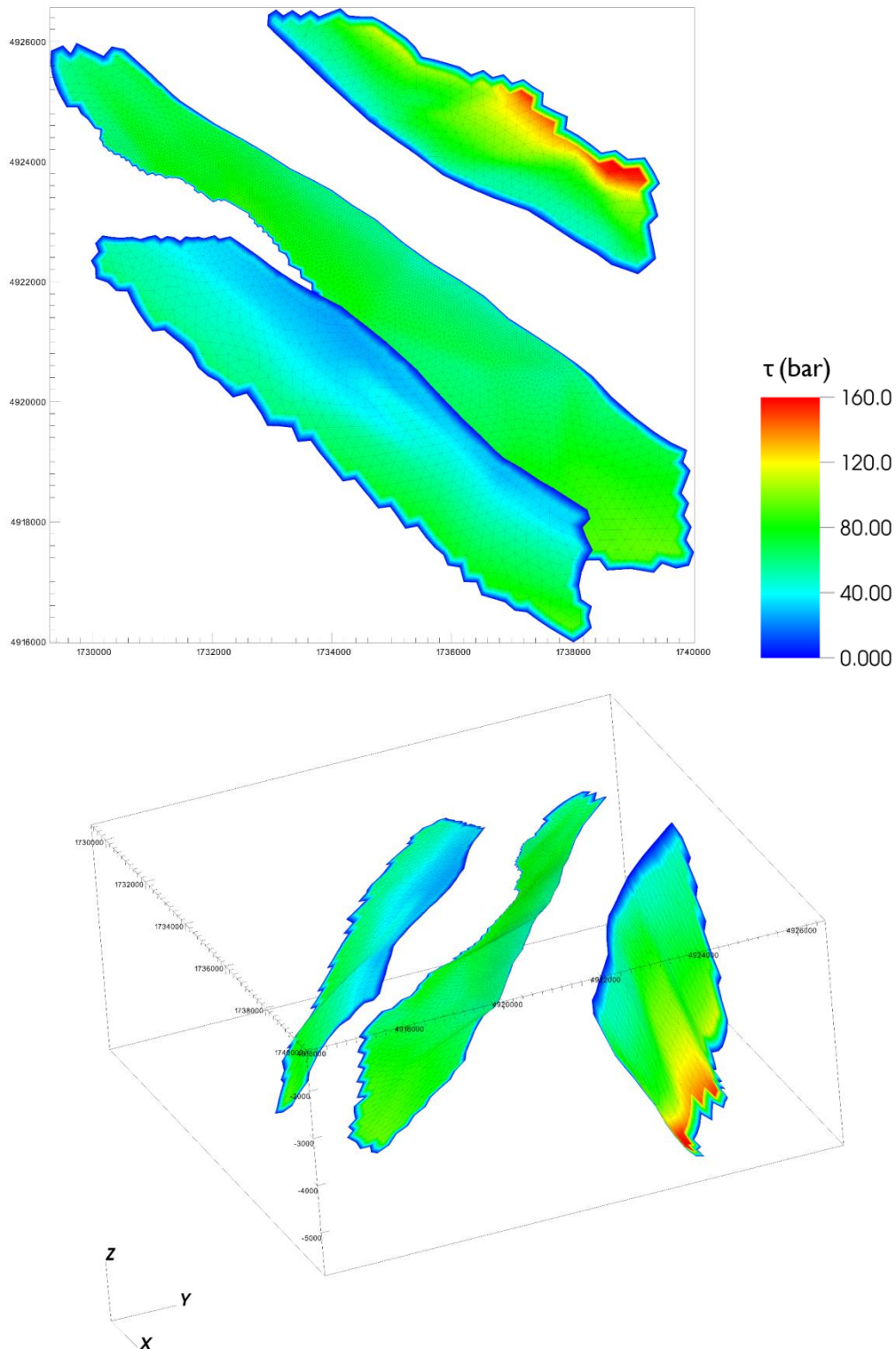


Figura 44: Tensione iniziale tangenziale al piano di foglia τ (bar): a) vista in pianta; b) vista assonometrica. NB: il modello non fornisce in output la soluzione in termini di tensione sui nodi perimetrali della foglia e il visualizzatore attribuisce a tali nodi un valore nullo.

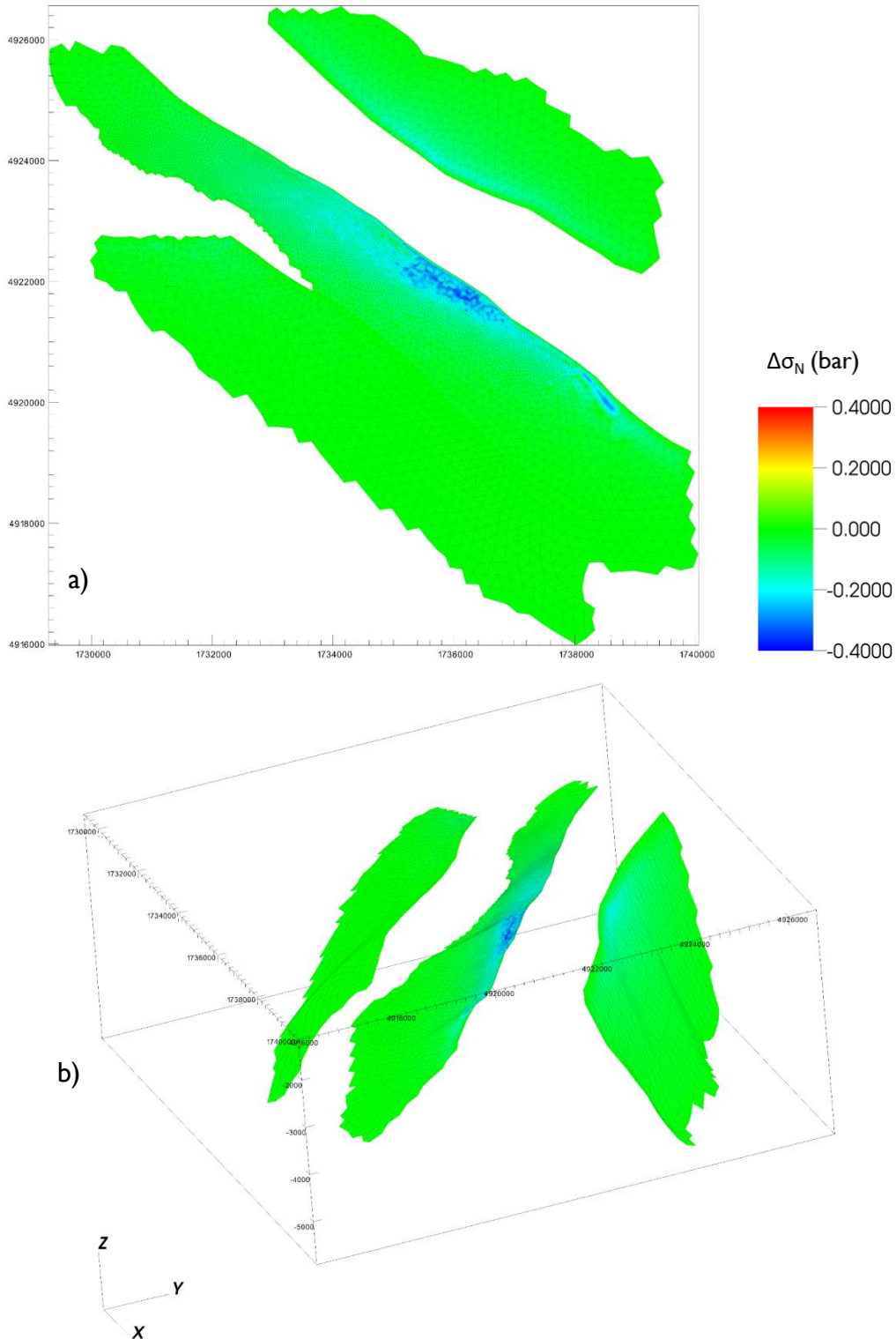


Figura 45: Variazione di tensione normale al piano di foglia σ_N (bar) a fine produzione nel 1992: a) vista in pianta; b) vista assometrica.

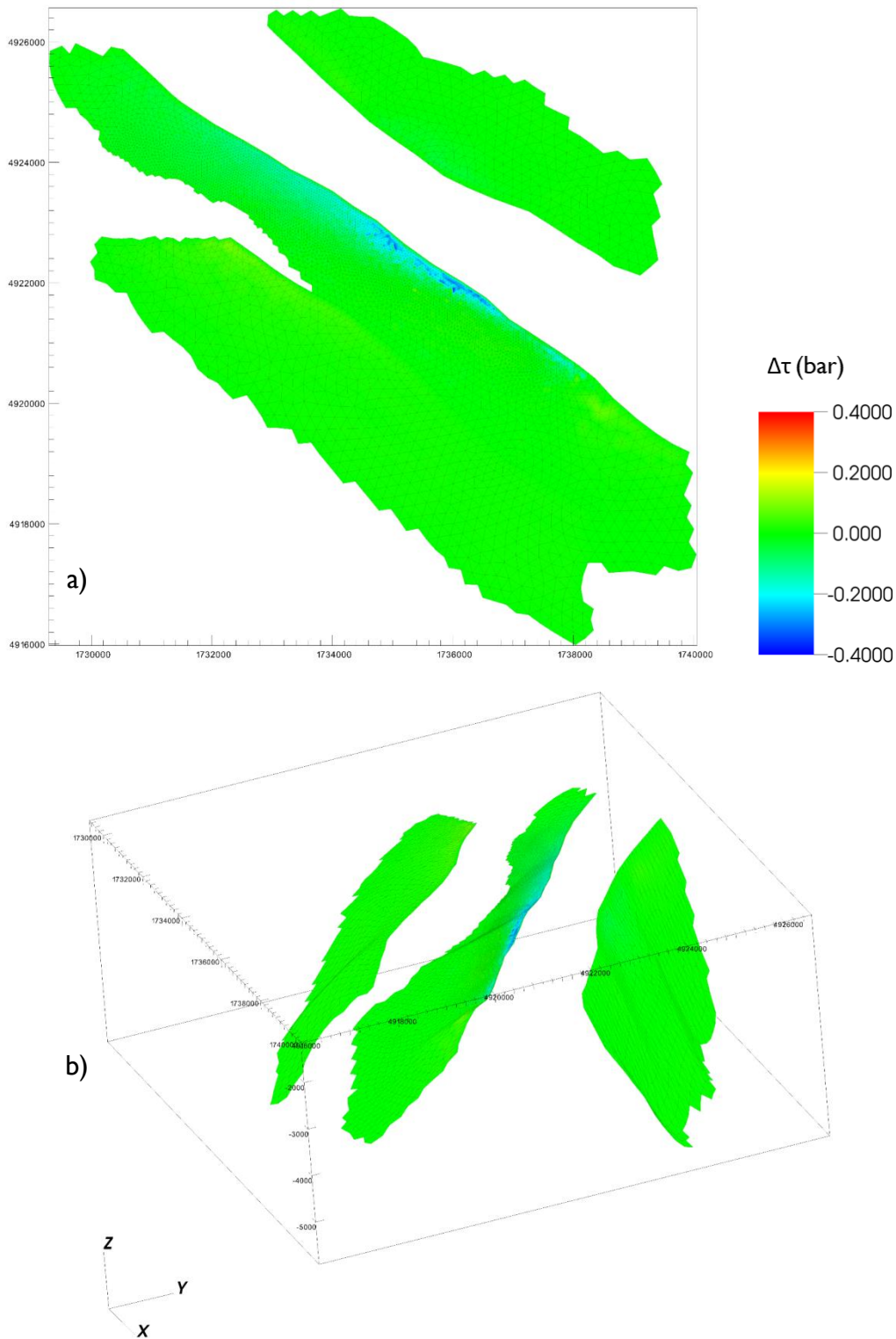


Figura 46: Variazione di tensione tangenziale al piano di foglia τ (bar) a fine produzione nel 1992: a) vista in pianta; b) vista assometrica.

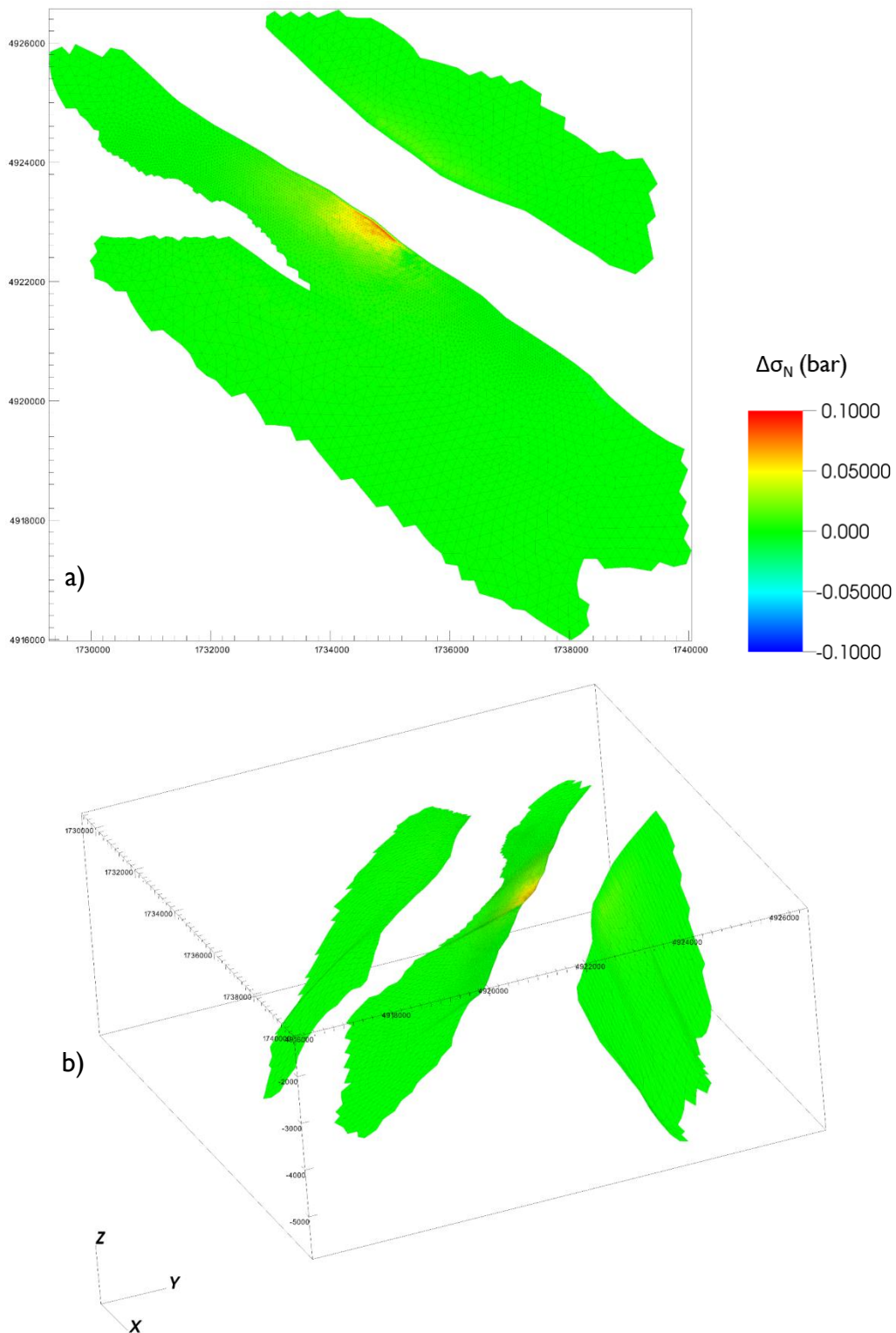


Figura 47: Variazione di tensione normale al piano di faglia σ_N (bar) durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2016: a) vista in pianta; b) vista assometrica.

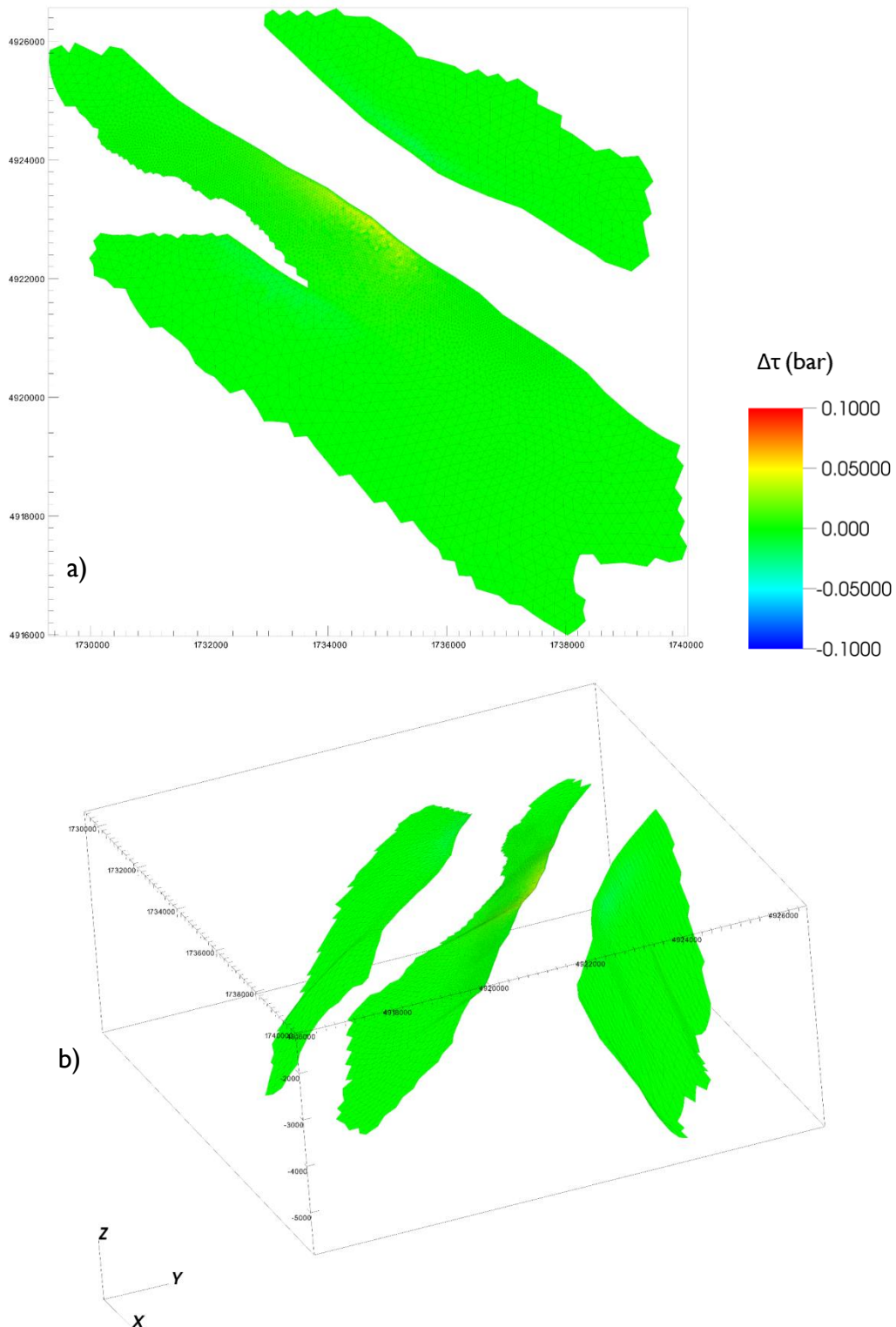


Figura 48: Variazione di tensione tangenziale al piano di faglia τ (bar) durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2016: a) vista in pianta; b) vista assometrica.

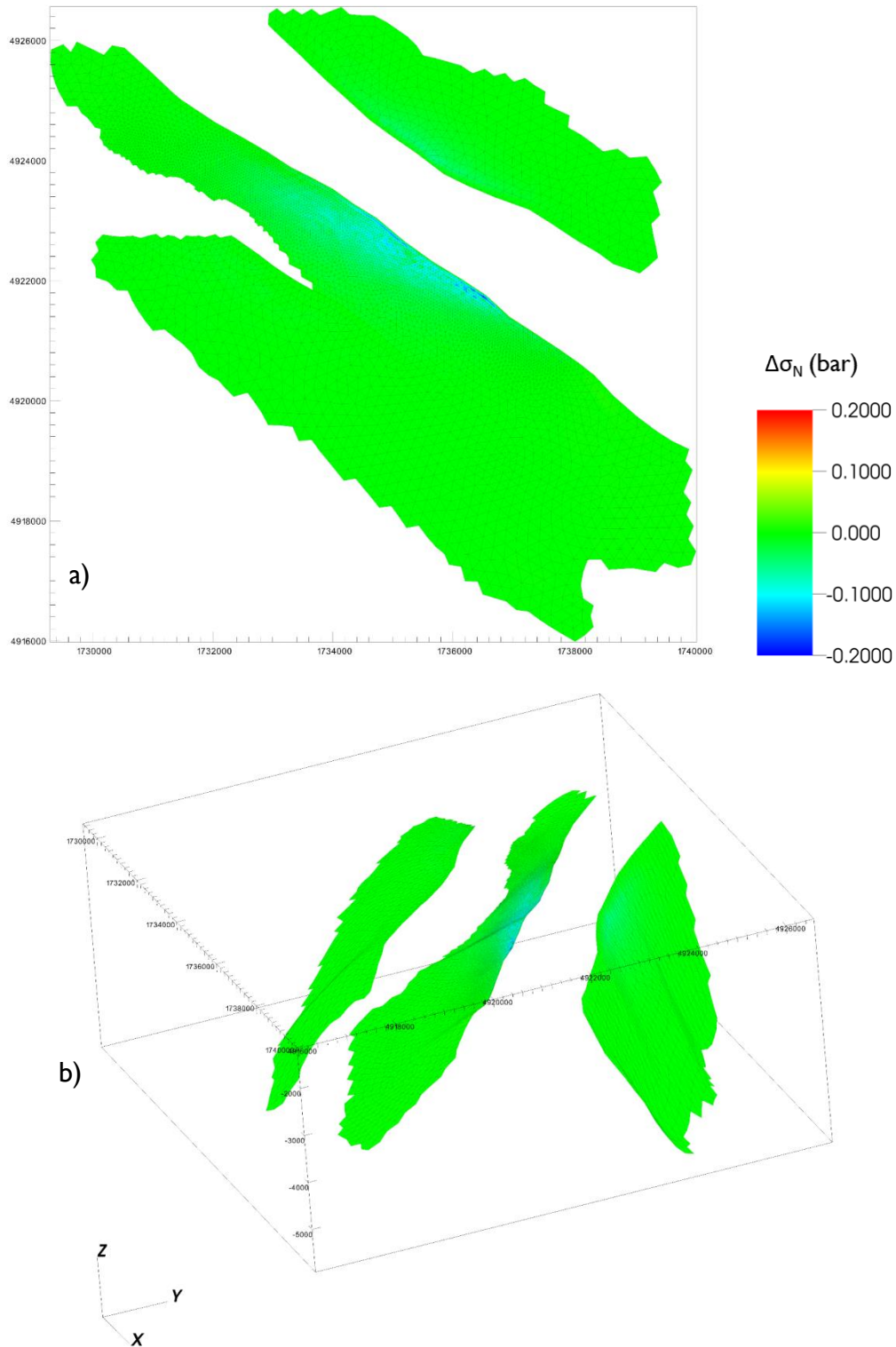


Figura 49: Variazione di tensione normale al piano di foglia σ_N (bar) durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017: a) vista in pianta; b) vista assometrica.

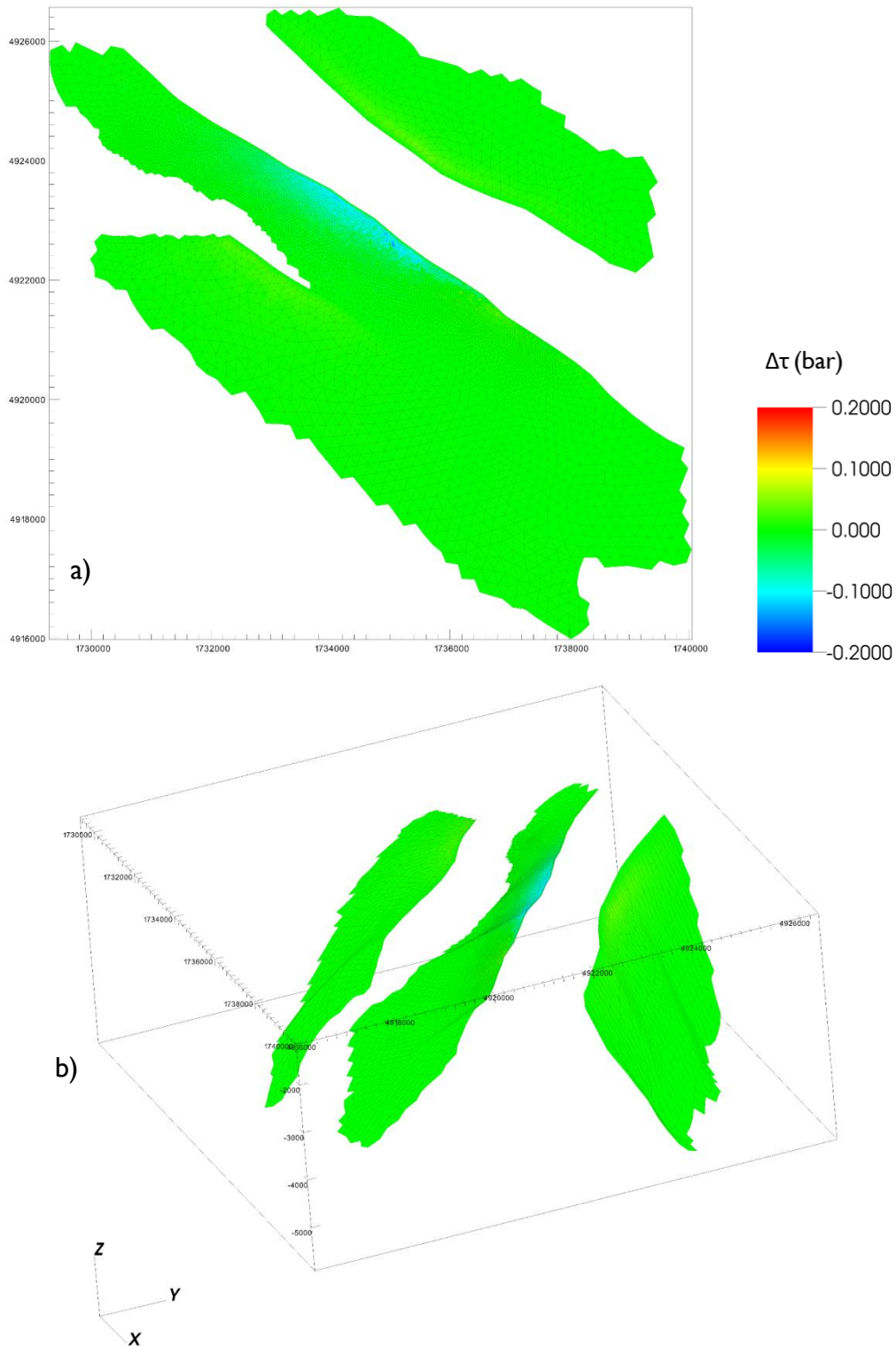


Figura 50: Variazione di tensione normale al piano di faglia τ (bar) durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017: a) vista in pianta; b) vista assometrica.

8 CONCLUSIONI

Sono stati analizzati e utilizzati i dati forniti da EDISON STOCCAGGIO per la simulazione dei principali processi geomeccanici a seguito della produzione primaria e delle prove di stoccaggio ed erogazione nel campo di San Potito a $P=100\% P_i$.

Le informazioni utili per le simulazioni riguardano la geometria del giacimento e dell'acquifero ad esso idraulicamente connesso (waterdrive), le proprietà petrofisiche e geomeccaniche del sottosuolo alla profondità del campo e l'andamento spazio-temporale delle pressioni di strato. Le misurazioni di spostamento verticale al di sopra del giacimento e nelle vicinanze, che si riferiscono agli intervalli temporali 1992 - 2000 e 2013 - 2017, non hanno messo in luce alcuno spostamento correlabile con le attività su giacimento. Di conseguenza, non è stato possibile utilizzare il dataset di misure interferometriche SAR per calibrare il modello geomeccanico.

Le simulazioni sono state condotte impiegando tutte le conoscenze allo stato dell'arte. In particolare, è stato implementato un modello costitutivo isotropo con compressibilità verticale pari a quella ricavata dall'analisi delle misurazioni con marker radioattivi condotte nel bacino dell'Alto Adriatico [Baù *et al.*, 2002; Ferronato *et al.*, 2013].

Nel complesso, il database analizzato appare adeguato per l'esecuzione delle simulazioni geomeccaniche previste dallo studio, in particolare per la previsione degli spostamenti verticali sia assoluti che differenziali. I risultati ottenuti possono essere così sintetizzati:

1. la massima subsidenza causata dalla produzione primaria del giacimento è calcolata nell'ordine di 3 cm; l'escursione massima verticale ottenuta durante la prova di erogazione con $P=100\% P_i$ tra novembre 2016 e marzo 2017 risulta pari a 0.5 cm;
2. il massimo gradiente dello spostamento verticale, previsto nella prova di erogazione con $P=100\% P_i$ tra novembre 2016 e marzo 2017, risulta 0.2×10^{-5} , vale a dire 0.2 mm su 100 m, 200 volte inferiore al limite più restrittivo raccomandato nella letteratura di settore con riferimento alla stabilità strutturale delle opere murarie in superficie;
3. le variazioni dello stato tensionale indotta dalle operazioni di produzione e stoccaggio/erogazione rimane sostanzialmente confinata alla profondità del giacimento. Le variazioni di tensione indotte da tale attività non sono state tali da indurre stati critici (rottura) nelle formazioni in cui è collocato il giacimento. La propagazione della tensione

- nel caprock e nell'underburden è stata assai limitata, con valori inferiori a pochi punti percentuali dei valori massimi previsti nel campo;
4. le faglie ubicate in prossimità del campo non vengono interessate da variazioni tensionali apprezzabili.

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.
- Dream (2017). Campo di San Potito: modello dinamico. Presentazione.
- Ferronato, M., Gambolati, G., Teatini, P. (2004). On the role of reservoir geometry in waterdrive hydrodynamics. *J. Pet. Sci. Eng.*, 44(3-4), 205-221.
- 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.
- Fokker, P.A., Van Thienen-Visser, K. (2015). Inversion of double-difference measurements from optical levelling for the Groningen gas field. *Proc. IAHS*, 372, 375-378.
- 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.
- Giannico, C. (2017). Monitoraggio SqueeSAR™ su San Potito, Aggiornamento Aprile 2017. Relazione Tecnica, TRE ALTAMIRA.
- 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.
- 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.

Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., Bertoni W., Gonella, M. (2005). A century of land subsidence in Ravenna, Italy, *Environ. Geology*, 47(6), 831-846.

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.

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

ALLEGATO A: isobate locali dei livelli mineralizzati

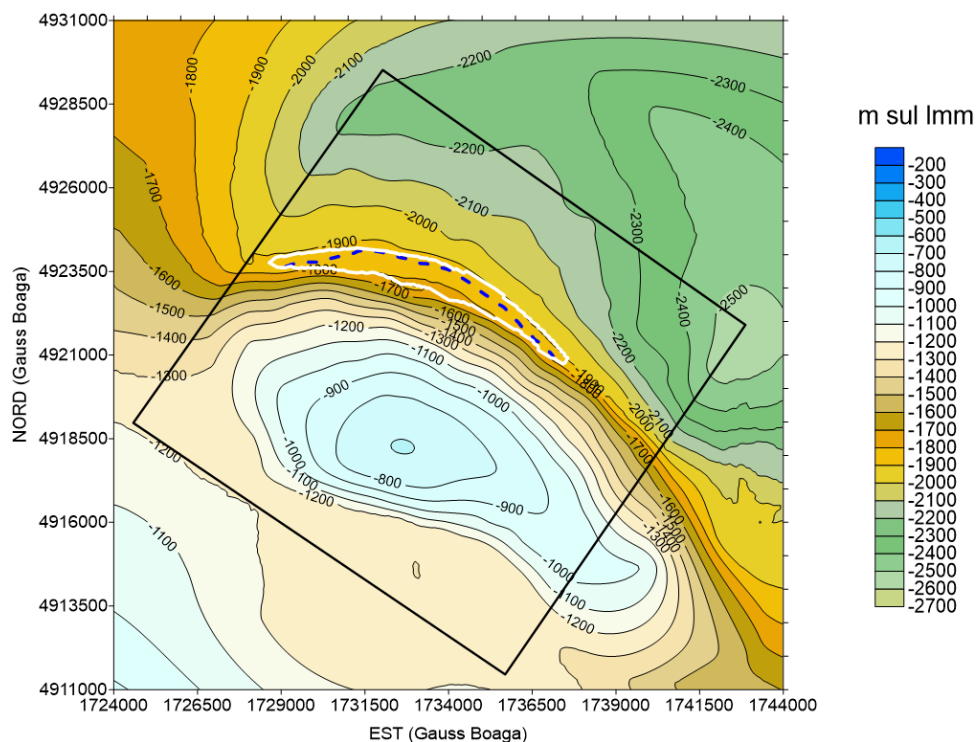


Figura A 1: Isobate (m sul lmm) del top del livello BBIU. In bianco è evidenziata la traccia del modello Eclipse, in blu tratteggiato la traccia del GWC e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

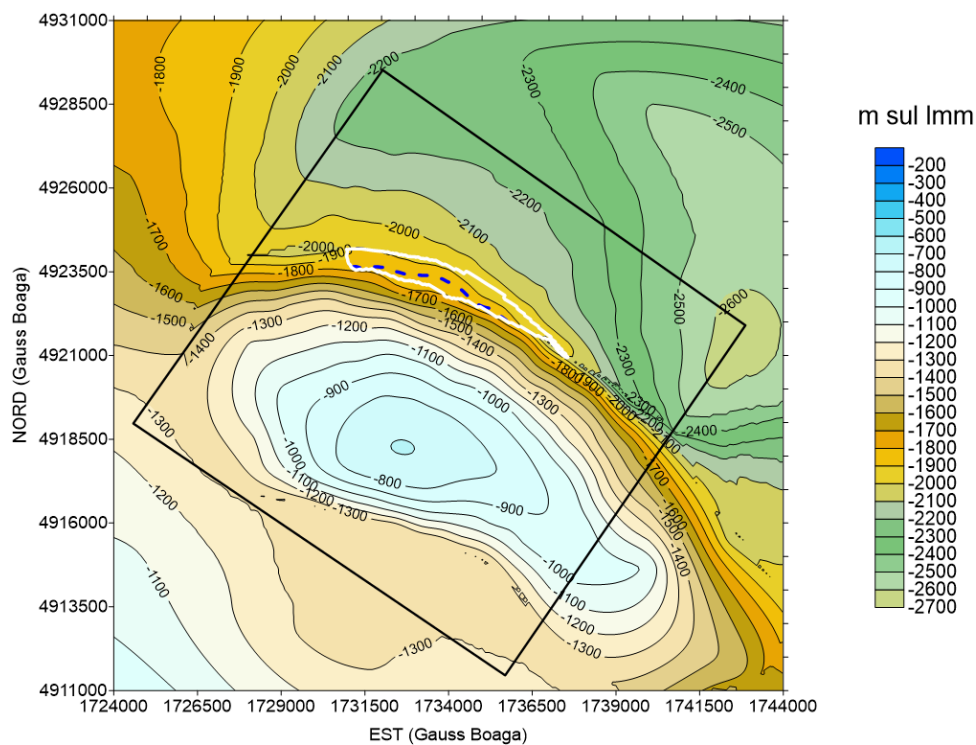


Figura A 2: Isobate (m sul lmm) del top del livello BBIL. In bianco è evidenziata la traccia del modello Eclipse, in blu tratteggiato la traccia del GWC e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

ALLEGATO B: isobate regionali degli orizzonti geologici

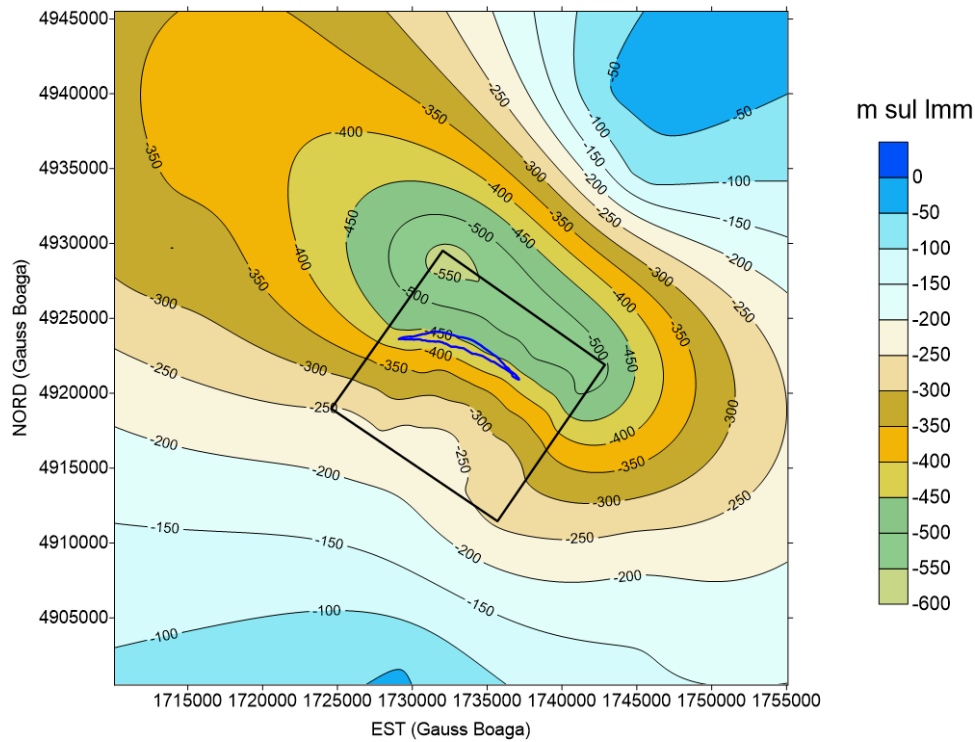


Figura B 1: Isobate (m sul Imm) del Delta-Pleistocene. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

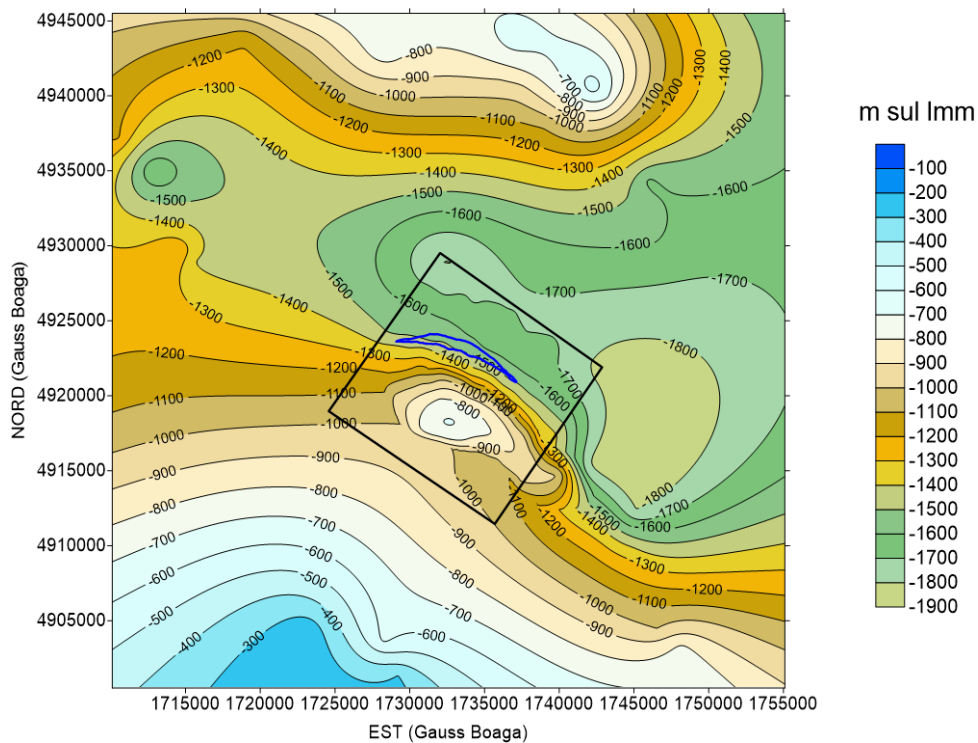


Figura B 2: Isobate (m sul Imm) del Near-Top-Pliocene. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

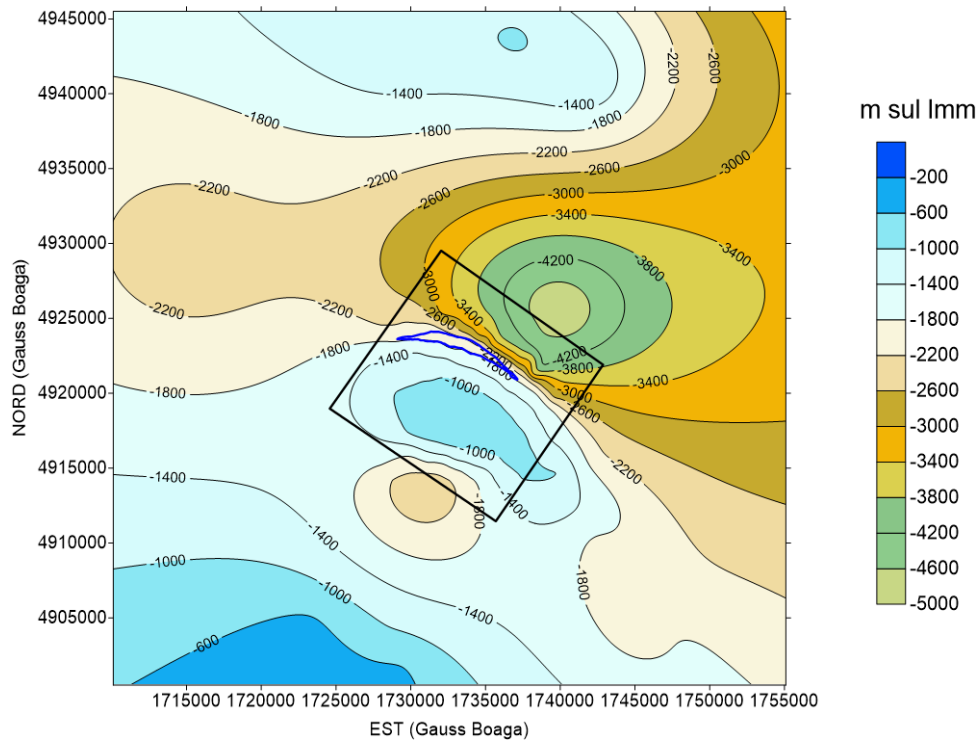


Figura B 3: Isobate (m sul lmm) del Top-Miocene. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

ALLEGATO C: isobate delle faglie in prossimità del campo

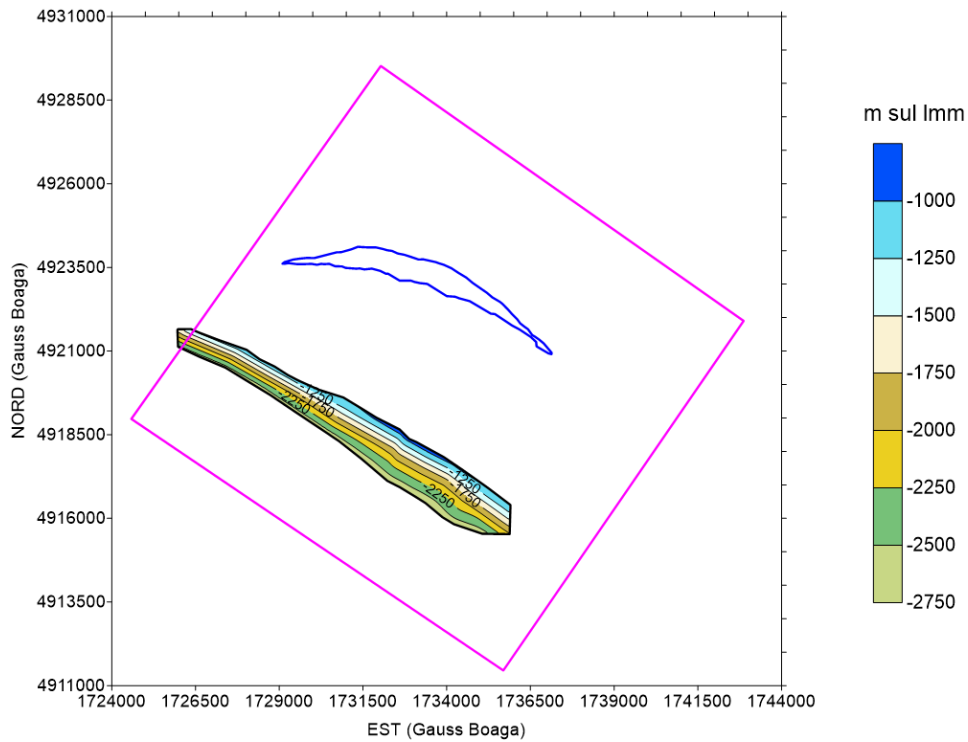


Figura C 1: Isobate (m sul Imm) della Faglia 1. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in viola il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

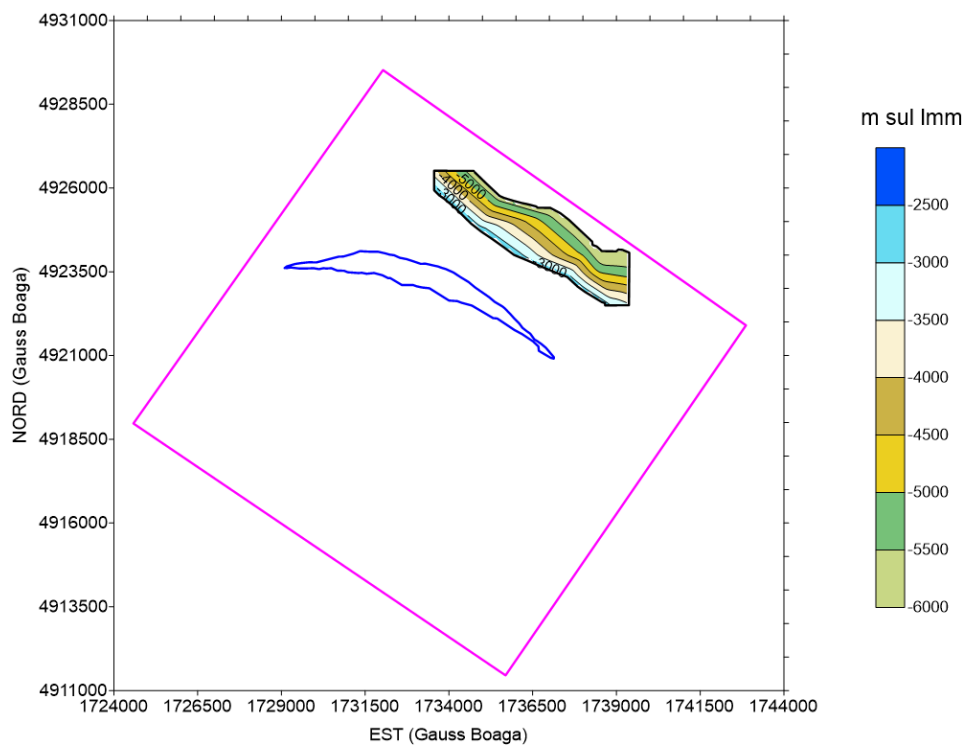


Figura C 2: Isobate (m sul Imm) della Faglia 2. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in viola il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

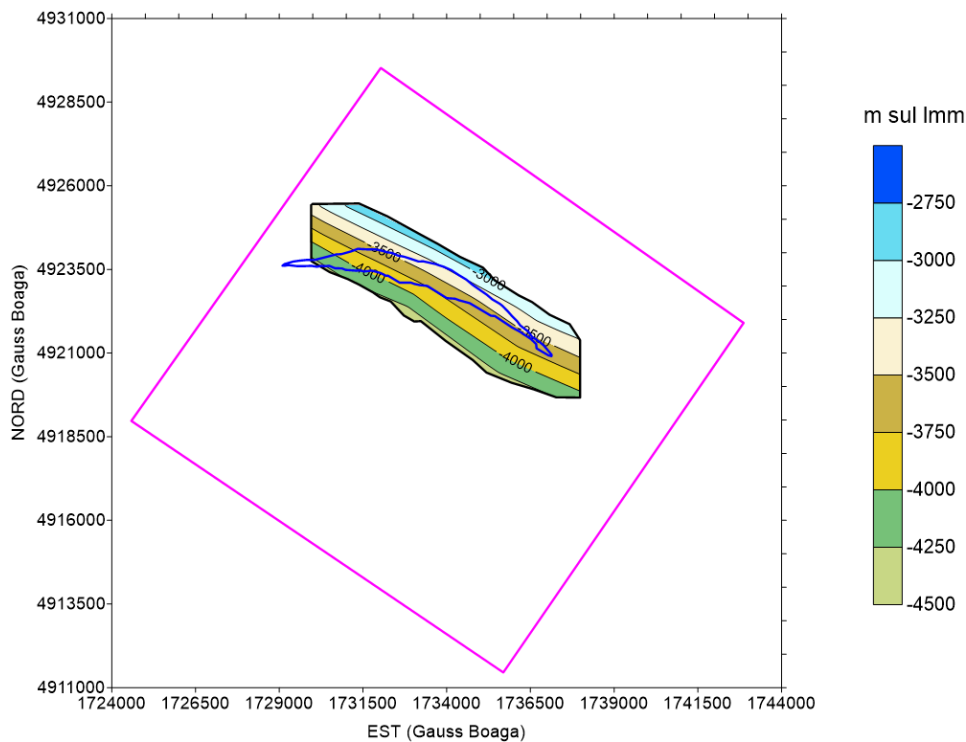


Figura C 3: Isobate (m sul Imm) della Faglia 3. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in viola il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

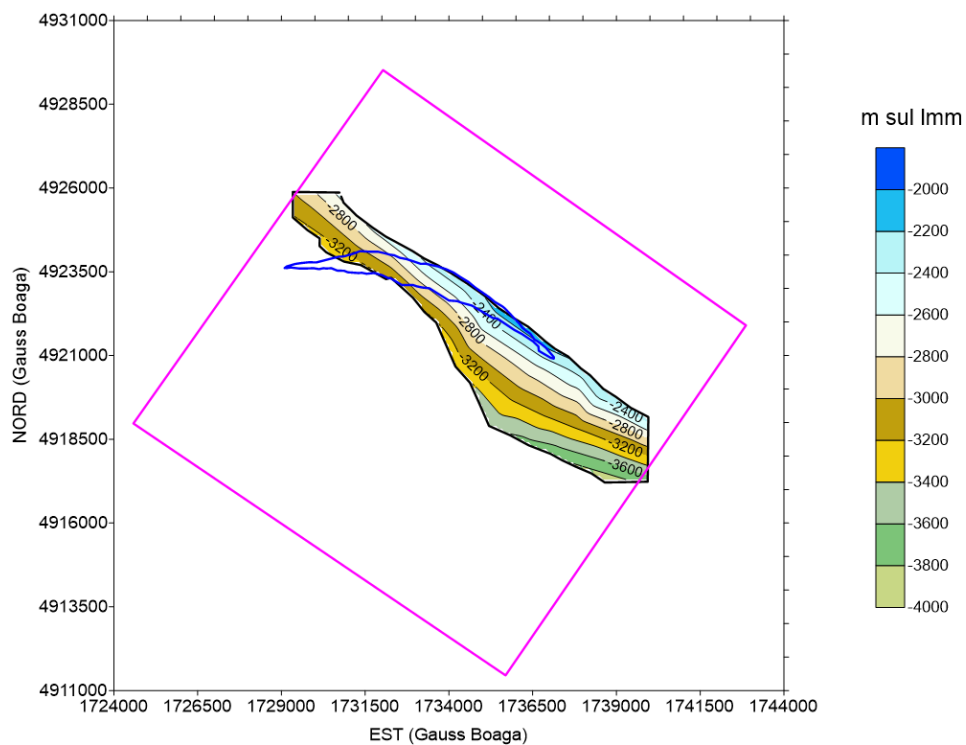


Figura C 4: Isobate (m sul Imm) della Faglia 4. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in viola il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

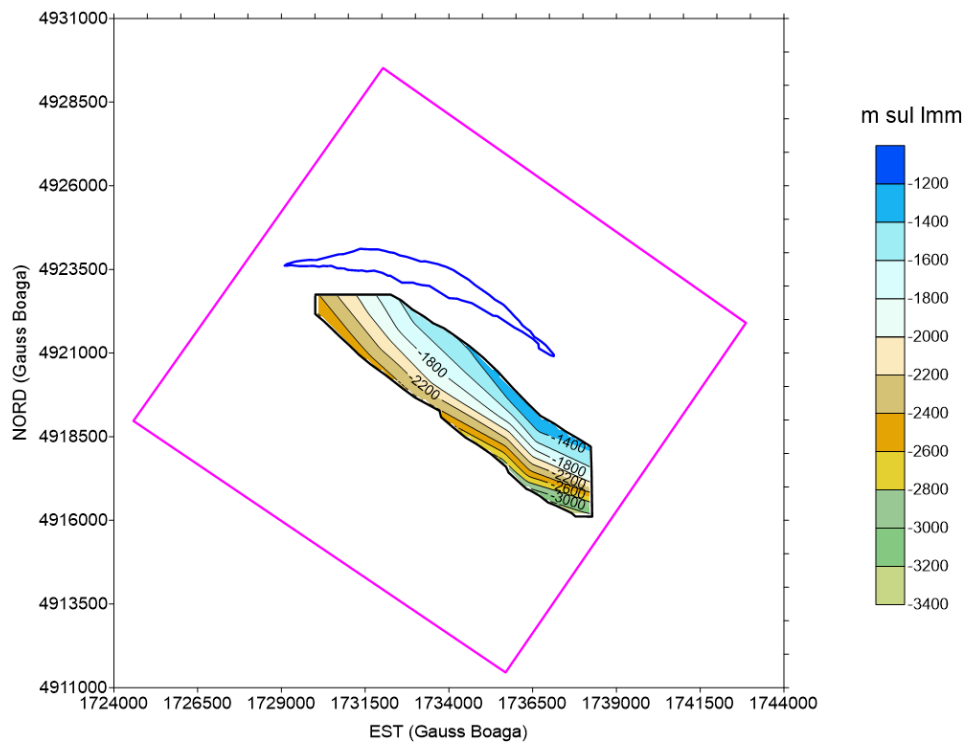


Figura C 5: Isobate (m sul lmm) della Faglia 5. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in viola il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

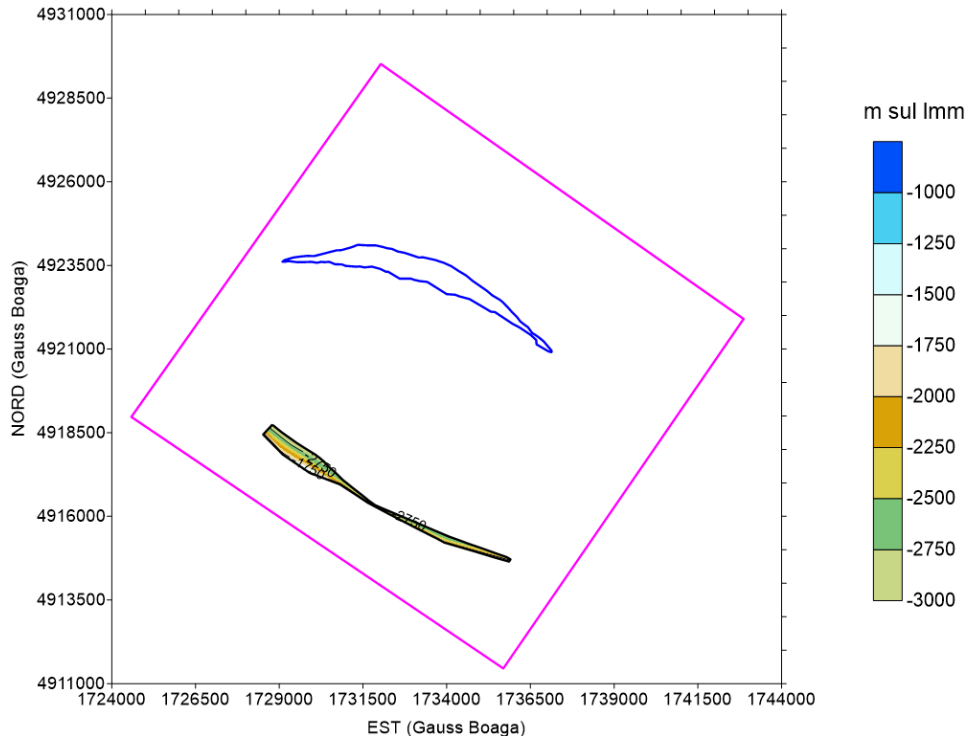


Figura C 6: Isobate (m sul lmm) della Faglia 6. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in viola il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

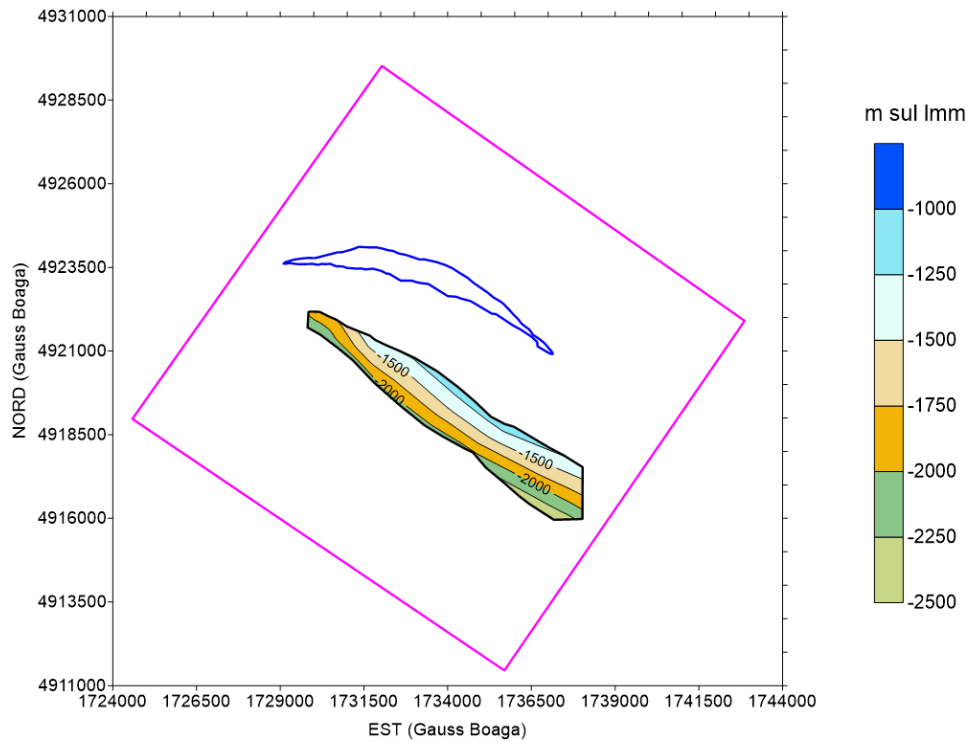


Figura C 7: Isobate (m sul Imm) della Faglia 7. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in viola il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico.

ALLEGATO D: mappe di variazione di tensione

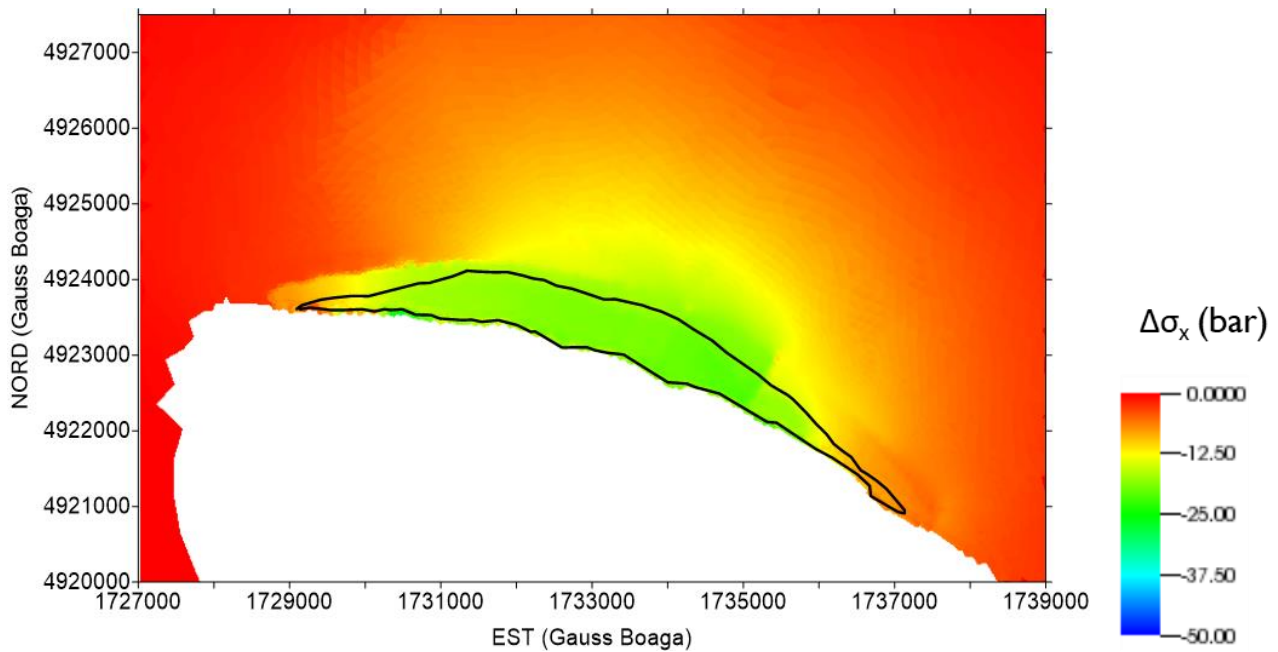


Figura D 1: Variazione di tensione σ_x (bar) nel livello BBIU a fine produzione nel 1992. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

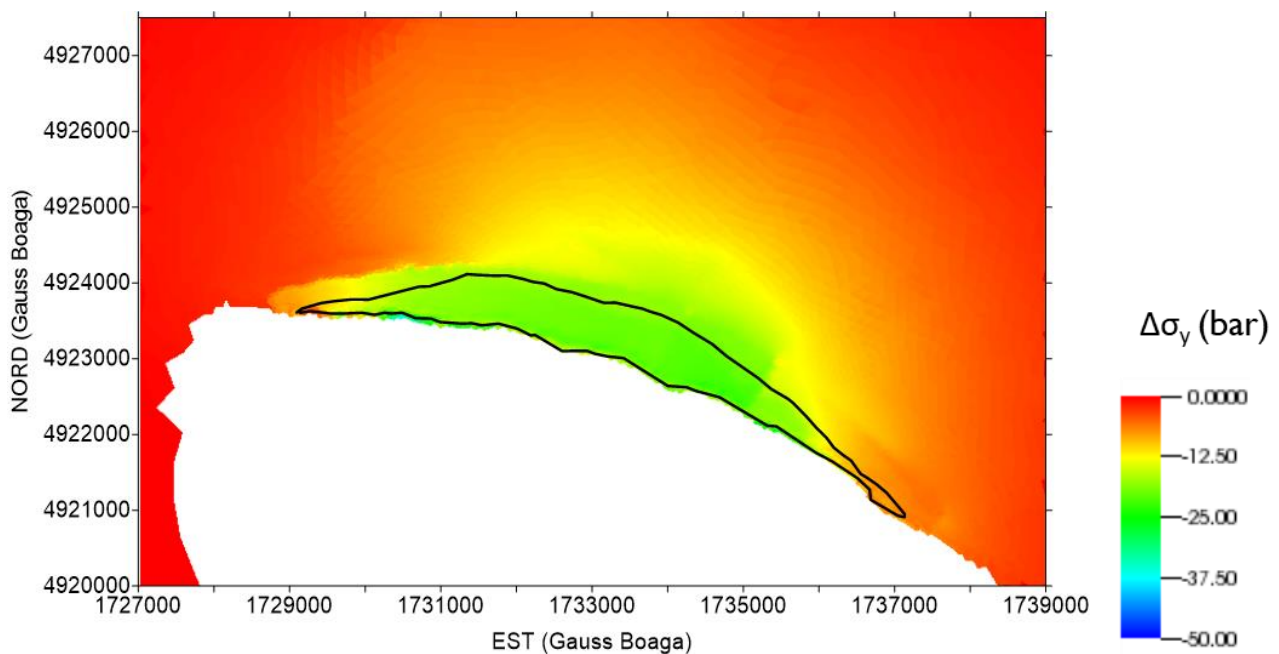


Figura D 2: Variazione di tensione σ_y (bar) nel livello BBIU a fine produzione nel 1992. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

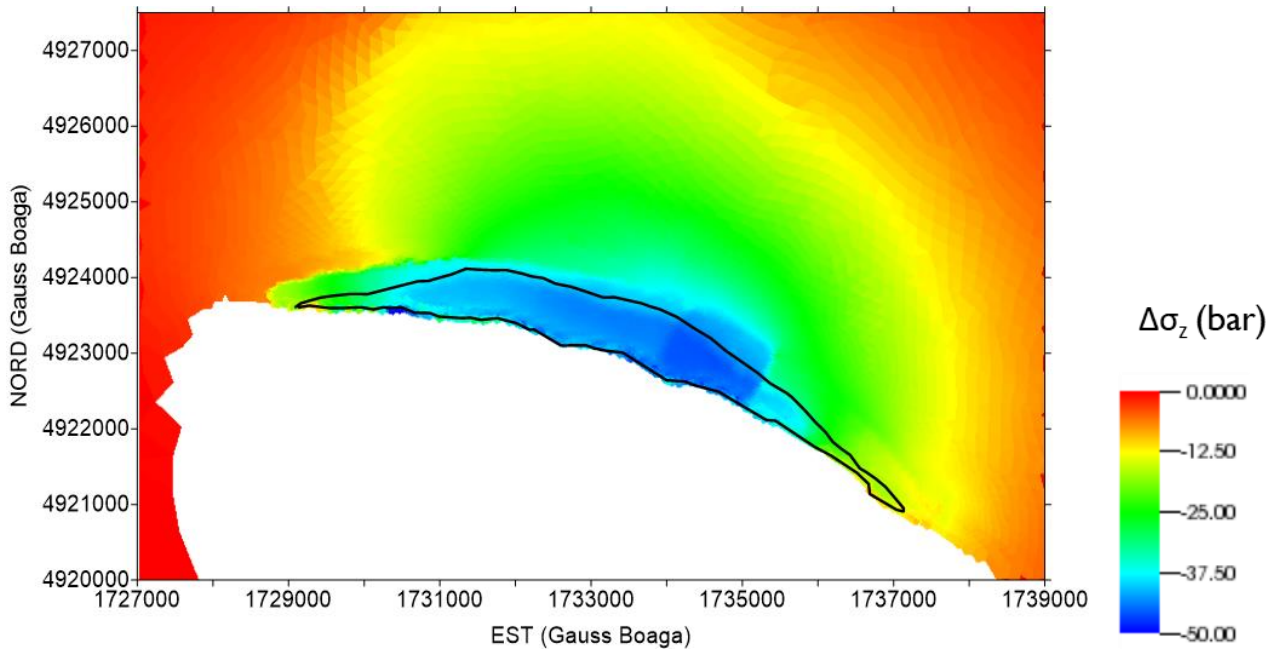


Figura D 3: Variazione di tensione σ_z (bar) nel livello BBIU a fine produzione nel 1992. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

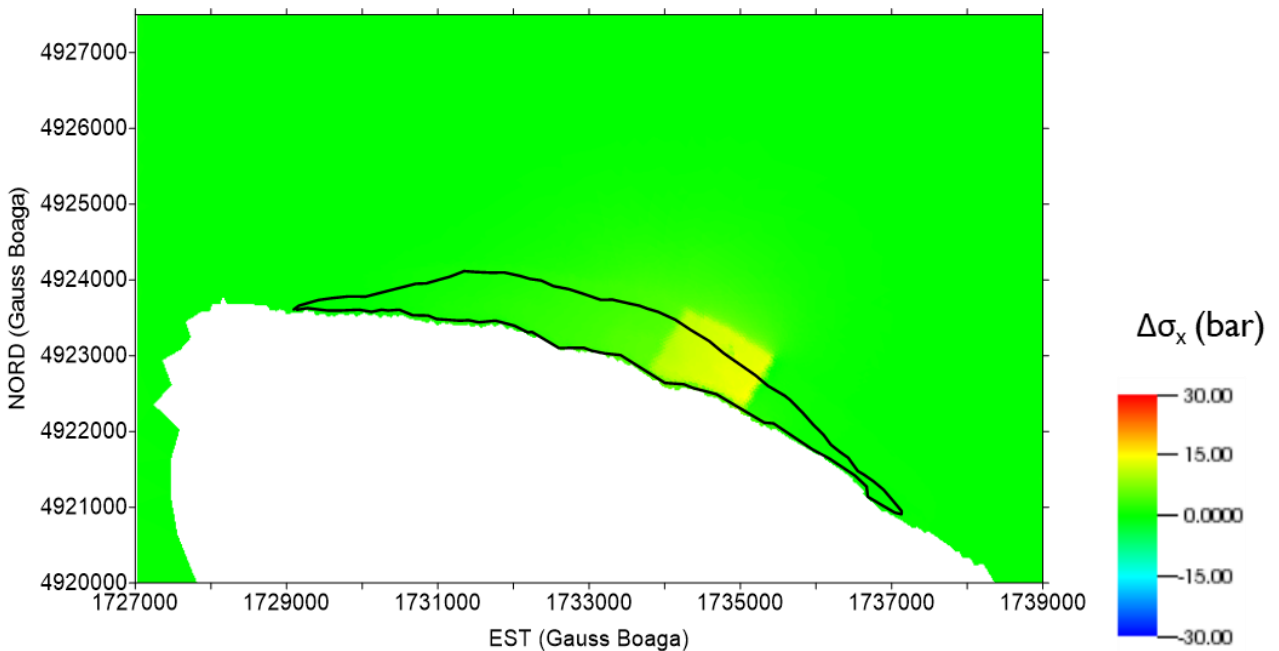


Figura D 4: Variazione di tensione σ_x (bar) nel livello BBIU durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2016. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

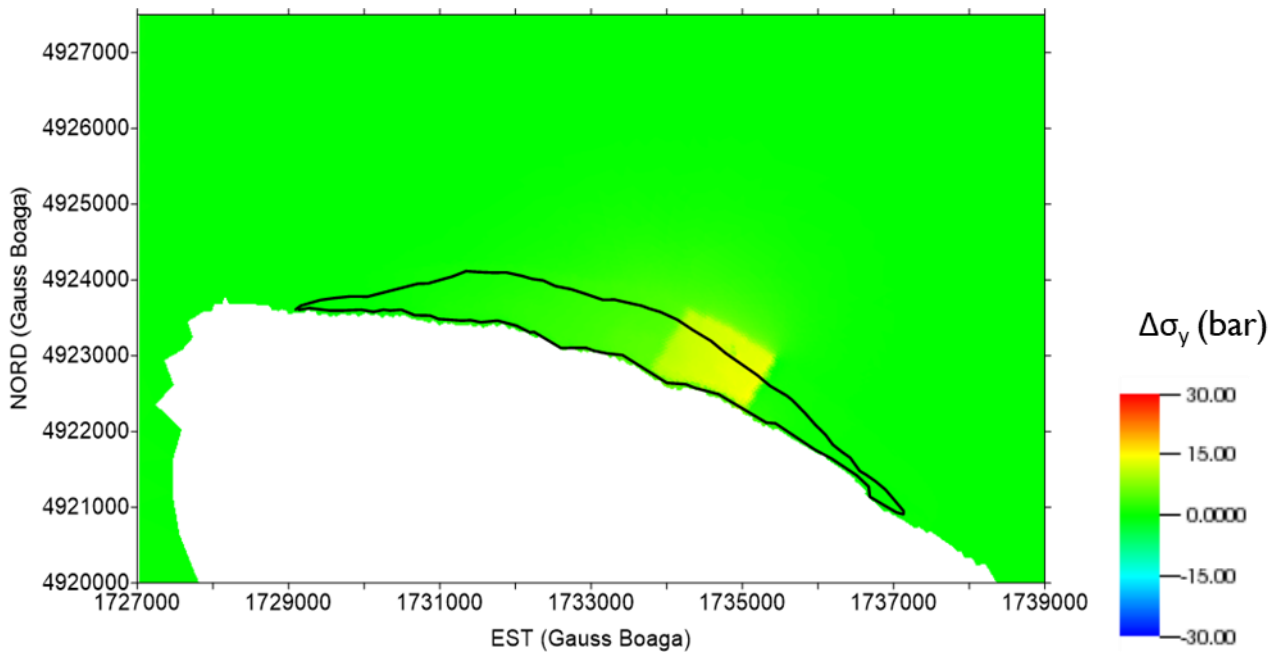


Figura D 5: Variazione di tensione σ_y (bar) nel livello BBIU durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2016. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

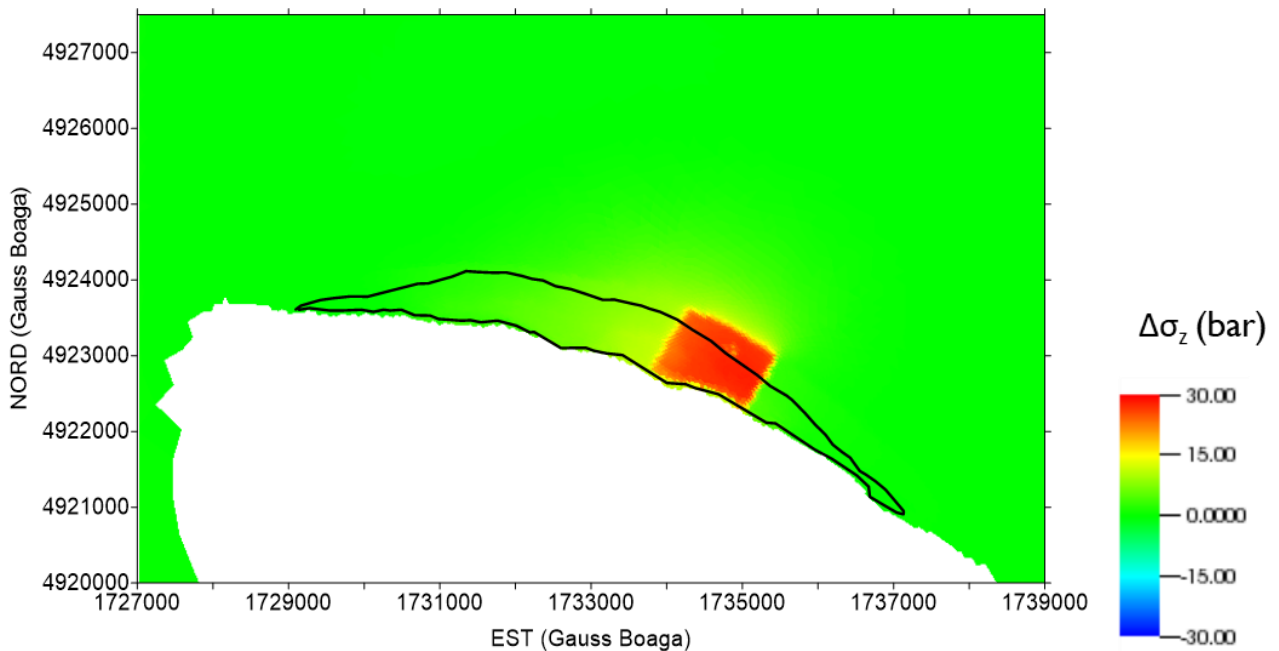


Figura D 6: Variazione di tensione σ_z (bar) nel livello BBIU durante la prova di stoccaggio aprile 2016 – settembre 2016. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

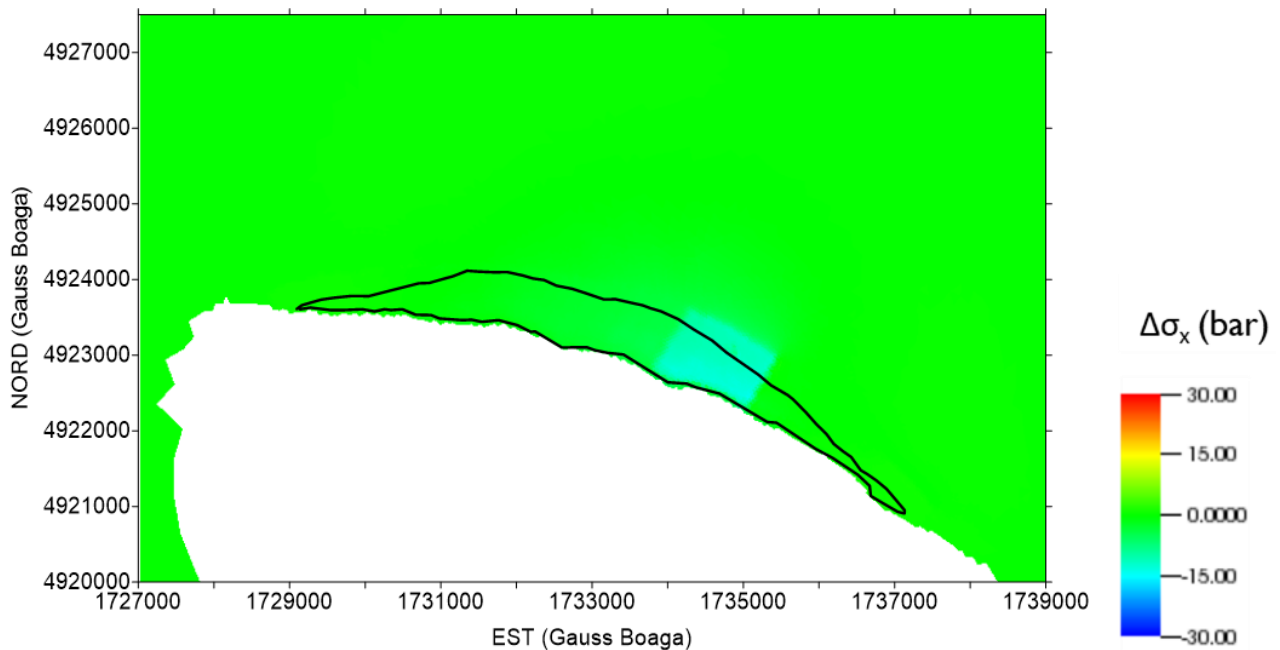


Figura D 7: Variazione di tensione σ_x (bar) nel livello BBIU durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

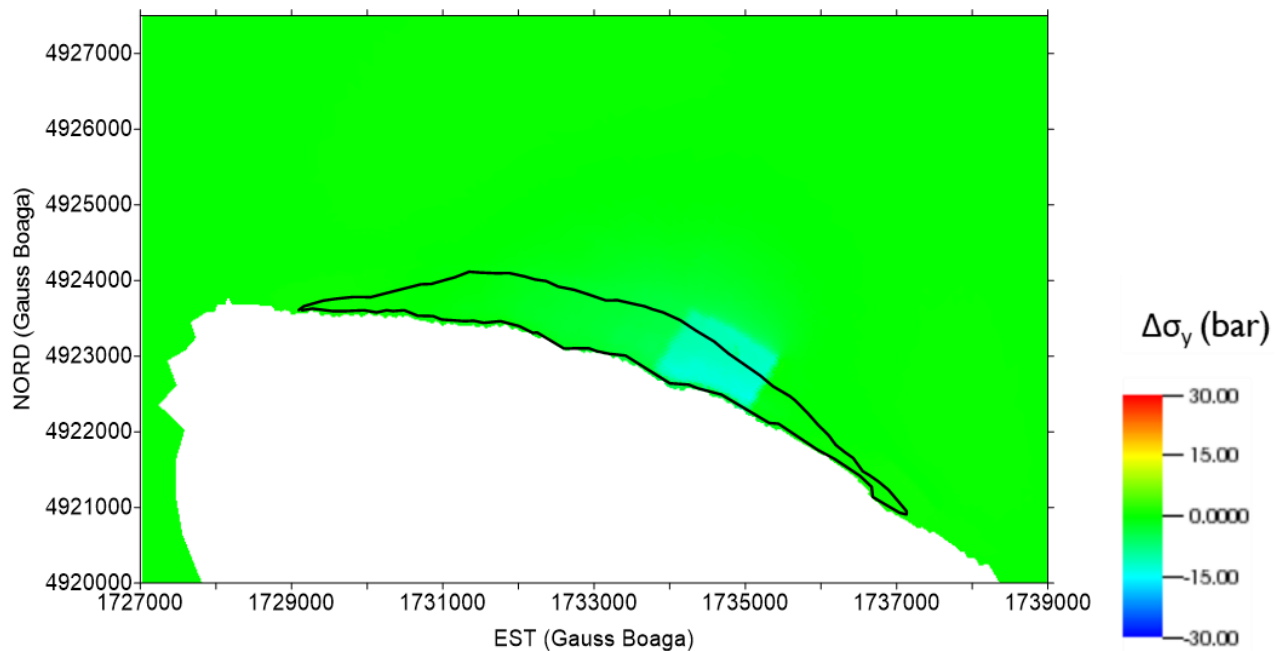


Figura D 8: Variazione di tensione σ_y (bar) nel livello BBIU durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

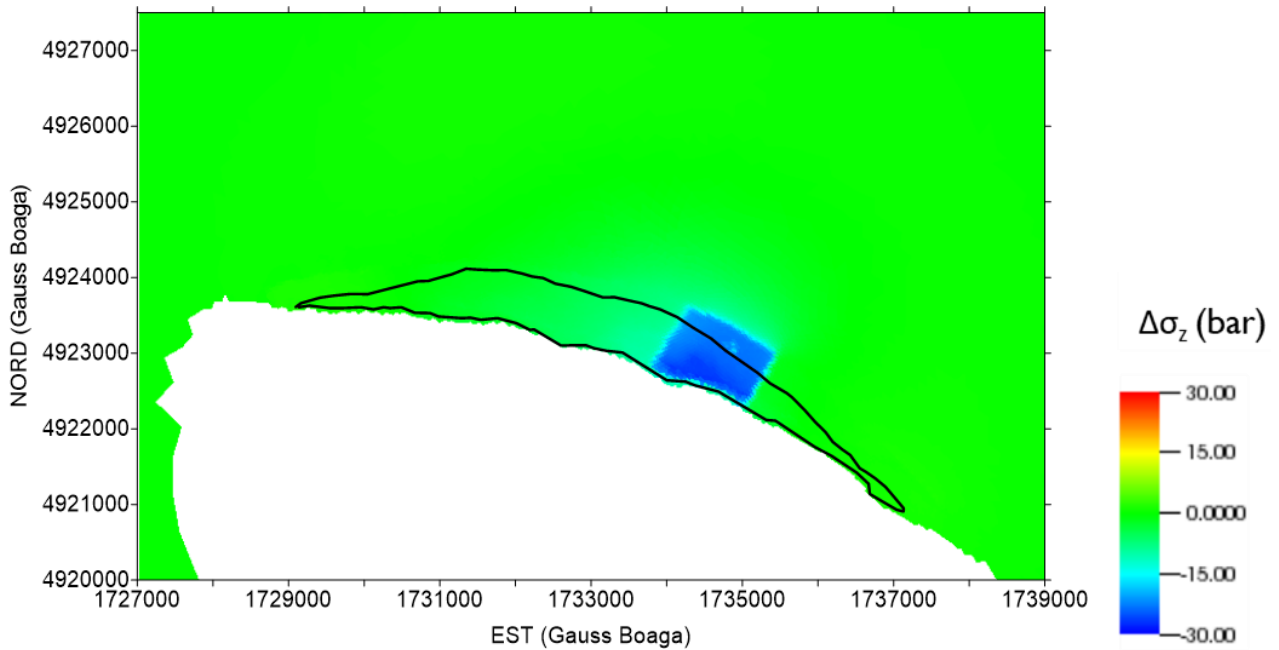


Figura D 9: Variazione di tensione σ_z (bar) nel livello BBIU durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

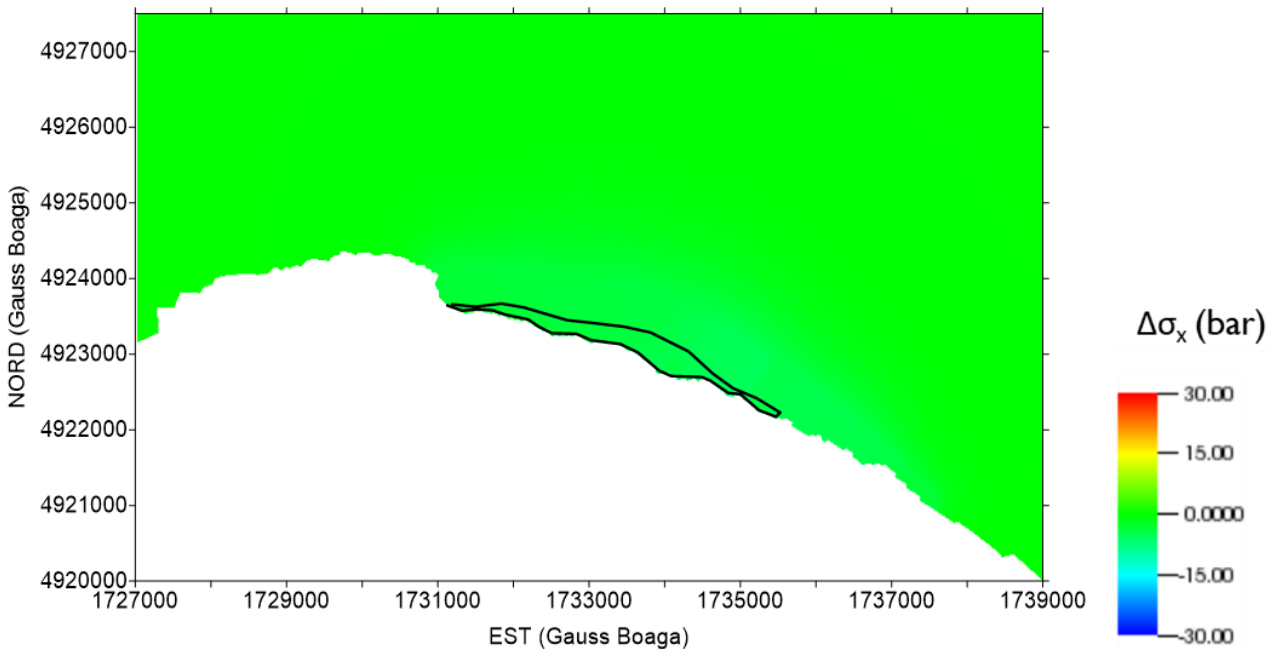


Figura D 10: Variazione di tensione σ_x (bar) nel livello BBIL durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

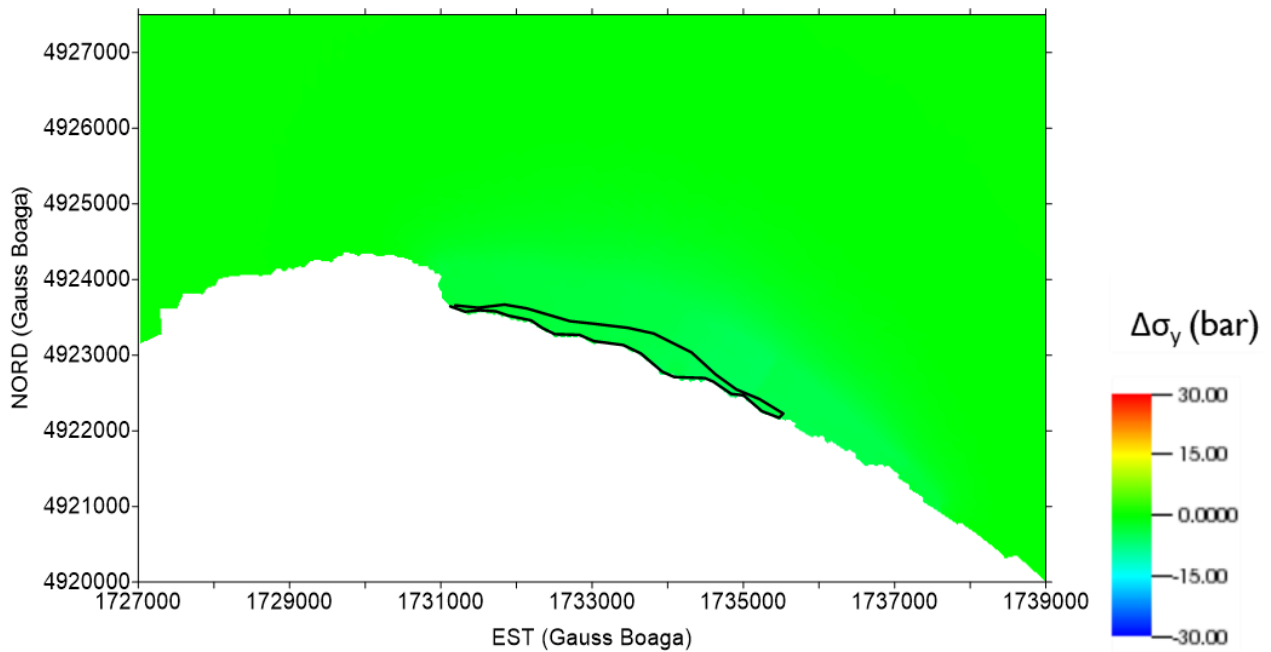


Figura D 11: Variazione di tensione σ_y (bar) nel livello BBIL durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

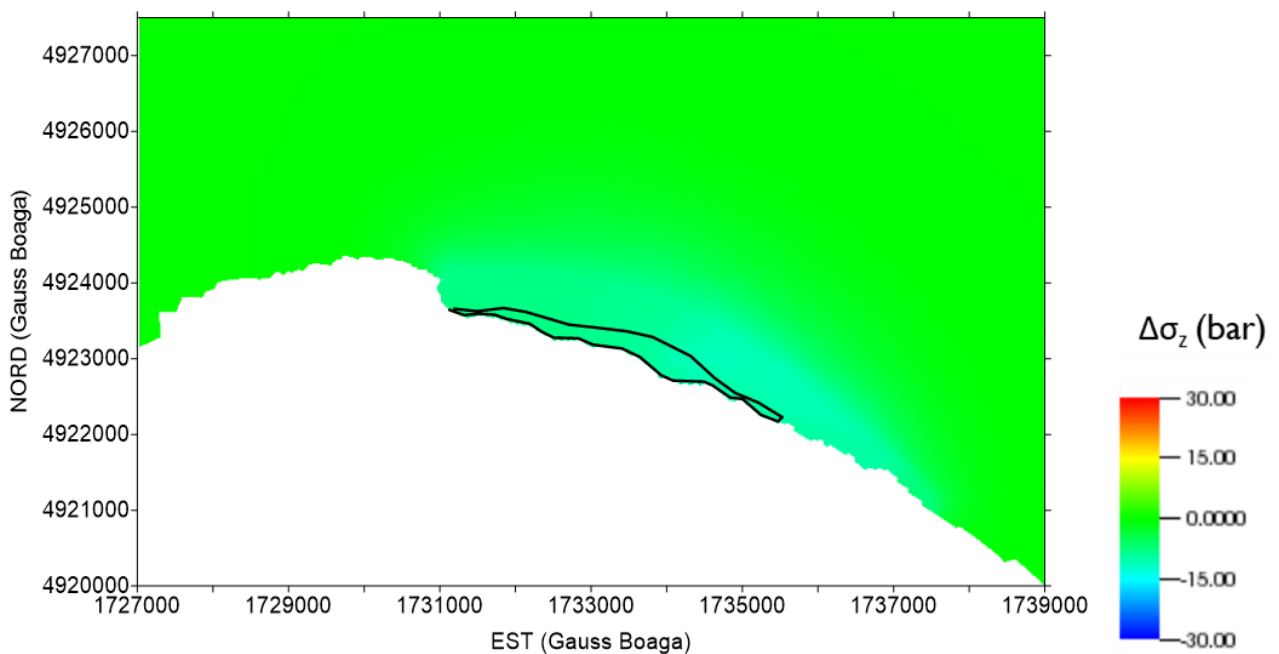


Figura D 12: Variazione di tensione σ_z (bar) nel livello BBIL durante la prova di erogazione novembre 2016 – marzo 2017. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.