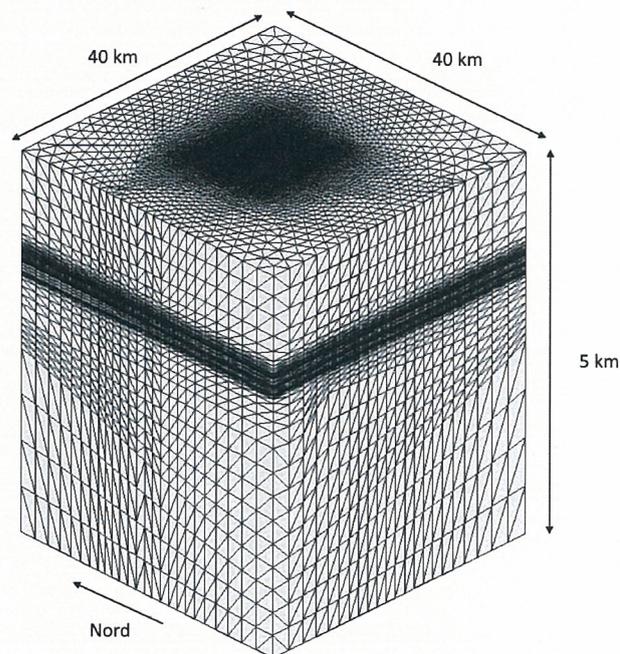


Commessa: M3E 08/16

Modello di previsione della subsidenza antropica del giacimento di Teodorico



Committente: Po Valley Operations

Elaborato: REV_04 Relazione Tecnica

Data: Novembre 2016

Redatto: Ing. Giovanni Isotton

Verificato: Ing. Pietro Teatini

Approvato:

Giovanni Isotton
Pietro Teatini

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
2	GIACIMENTO DI TEODORICO	2
3	MODELLO DI PRODUZIONE	4
4	MODELLO GEOMECCANICO	10
4.1	Griglia di calcolo	10
4.2	Legge costitutiva del mezzo poroso	17
5	CALIBRAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO	18
6	PREVISIONE MODELLISTICA DELLA SUBSIDENZA.....	23
7	CONCLUSIONI.....	26
8	REFERENZE.....	27
	ALLEGATO A: isobate e isopache locali dei livelli mineralizzati.....	28
	ALLEGATO B: isobate regionali degli orizzonti geologici.....	34

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Ubicazione dell'area dell'istanza di concessione del giacimento di Teodorico.....	2
Figura 2: Schema stratigrafico (non in scala) della successione torbidity plio-pleistocenica.....	3
Figura 3: Ubicazione della piattaforma e dei pozzi Irma 001 e Irma 002.....	4
Figura 4: Vista in pianta del modello statico di Eclipse per i livelli produttivi PLQ-C, PLQ-D1, PLQ-D2, PLQ-E2 e PLQ-F. In rosso è evidenziata la zona mineralizzata e in verde la linea delle 12 miglia.	5
Figura 5: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico.....	6
Figura 6: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-C e associato waterdrive al 20° anno previsto dal modello Eclipse. In grassetto sono evidenziate le celle del giacimento e in blu la linea delle 12 miglia.....	7
Figura 7: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-D1 e associato waterdrive al 20° anno previsto dal modello Eclipse. In grassetto sono evidenziate le celle del giacimento e in blu la linea delle 12 miglia.....	8
Figura 8: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-D2 e associato waterdrive al 20° anno previsto dal modello Eclipse. In grassetto sono evidenziate le celle del giacimento e in blu la linea delle 12 miglia.....	8
Figura 9: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-E2 e associato waterdrive al 20° anno previsto dal modello Eclipse. In grassetto sono evidenziate le celle del giacimento e in blu la linea delle 12 miglia.....	9
Figura 10: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-F e associato waterdrive al 20° anno previsto dal modello Eclipse. In grassetto sono evidenziate le celle del giacimento e in blu la linea delle 12 miglia.....	9
Figura 11: Discretizzazione bidimensionale del dominio di calcolo utilizzata per la generazione del modello tridimensionale FEM. In rosso è evidenziata la linea delle 12 miglia, in blu la traccia dell'involuppo dei pool mineralizzati e in viola la sezione A-A.....	10
Figura 12: Vista assonometrica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 10 volte rispetto a quella orizzontale.....	11

Figura 13: Sezione verticale del modello geomeccanico lungo la traccia A-A di Figura 11 con l'ubicazione della trappola mineraria dei livelli del giacimento. La scala verticale è amplificata 5 volte rispetto a quella orizzontale..... 12

Figura 14: Sezione verticale del modello geomeccanico lungo la traccia A-A di Figura 11 in cui è evidenziata la discretizzazione verticale in corrispondenza dei pool mineralizzati. La scala verticale è amplificata 20 volte rispetto a quella orizzontale. 13

Figura 15: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello PLQ-C. In rosso è evidenziato il giacimento, in blu l'acquifero e in giallo la linea delle 12 miglia..... 14

Figura 16: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello PLQ-D1. In rosso è evidenziato il giacimento, in blu l'acquifero e in giallo la linea delle 12 miglia. 14

Figura 17: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello PLQ-D2. In rosso è evidenziato il giacimento, in blu l'acquifero e in giallo la linea delle 12 miglia. 15

Figura 18: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello PLQ-E2. In rosso è evidenziato il giacimento, in blu l'acquifero e in giallo la linea delle 12 miglia. 15

Figura 19: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello PLQ-F. In rosso è evidenziato il giacimento, in blu l'acquifero e in giallo la linea delle 12 miglia..... 16

Figura 20: Grafico doppio logaritmico che riporta l'andamento della c_M in I ciclo di carico in funzione della σ_z efficace secondo la legge dell'Adriatico settentrionale [Baù *et al.*, 2002; Ferronato *et al.*, 2013]..... 16

Figura 21: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-C al 20° anno e quella ottenuta dalla simulazione con modello idrodinamico FEM dell'associato waterdrive (esterno al giacimento). In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.....20

Figura 22: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-D1 al 20° anno e quella ottenuta dalla simulazione con modello idrodinamico FEM dell'associato waterdrive (esterno al giacimento). In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.....20

Figura 23: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-D2 al 20° anno e quella ottenuta dalla simulazione con modello idrodinamico FEM dell'associato waterdrive (esterno al giacimento). In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.....21

Figura 24: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-E2 al 20° anno e quella ottenuta dalla simulazione con modello idrodinamico FEM dell'associato waterdrive (esterno al giacimento). In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.....21

Figura 25: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-F al 20° anno e quella ottenuta dalla simulazione con modello idrodinamico FEM dell'associato waterdrive (esterno al giacimento). In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.....22

Figura 26: Subsidenza (cm) prevista al 20° anno dal first gas. In giallo è evidenziata la linea delle 12 miglia e in verde la traccia del giacimento. Il simbolo arancione indica il punto di massima subsidenza.24

Figura 27: Andamento temporale della subsidenza massima (cm).25

I INTRODUZIONE

Il presente rapporto tecnico ha come oggetto lo sviluppo di un modello geomeccanico FEM per la previsione della subsidenza antropica prodotta dalla coltivazione del giacimento di Teodorico.

Il rapporto è strutturato come segue. Nei capitoli 2 e 3 sono riportati i dati forniti da Po Valley Operations con riferimento alla geologia dell'area e al modello fluidodinamico di giacimento. Il capitolo 4 descrive la metodologia applicata per la generazione del modello geomeccanico 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 spazio-temporale 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 5. Le pressioni in giacimento e in acquifero sono quindi utilizzate come dati di input nel modello geomeccanico. Il capitolo 6 riassume gli spostamenti superficiali previsti (e.g. la subsidenza) dal modello geomeccanico FEM per lo scenario di coltivazione programmato. Le considerazioni conclusive sono presentate nel capitolo 8.

2 GIACIMENTO DI TEODORICO

Il giacimento di Teodorico è ubicato nell'Adriatico centro-settentrionale a circa 50 km a NE di Ravenna, a profondità comprese tra 1300 e 1600 m TVDss (Figura 1). Il giacimento è stato scoperto da ENI nel 1986 e originariamente denominato "Irma-Carola". Esso è situato all'interno della sequenza torbiditica di avanfossa plio-pleistocenica. La trappola che costituisce il giacimento corrisponde a una blanda anticlinale allungata in direzione NE-SO. All'interno della sequenza plio-pleistocenica sono stati identificati diversi livelli porosi, alcuni di interesse minerario, denominati dall'alto verso il basso (Figura 2): PLQU-3, PLQU-4, PLQU-5 (Formazione Ravenna), PLQ-B1, PLQ-C, PLQ-C1, PLQ-C2(C6), PLQ-D1, PLQ-D2, PLQ-E2, PLQ-F, PLQ-H1+H2 (Formazione Carola) e PL3-C (Formazione Porto Garibaldi) [Po Valley, 2015]. I livelli oggetto di interesse minerario sono i livelli PLQ-C, PLQ-D1, PLQ-D2, PLQ-E2 e PLQ-F (Formazione Carola) correlabili ai 2 pozzi ubicati all'interno della concessione (Figura 3). Da un punto di vista litologico i livelli mineralizzati sono costituiti da sabbie e silt intercalati a sottili livelli di argille e argille siltose.

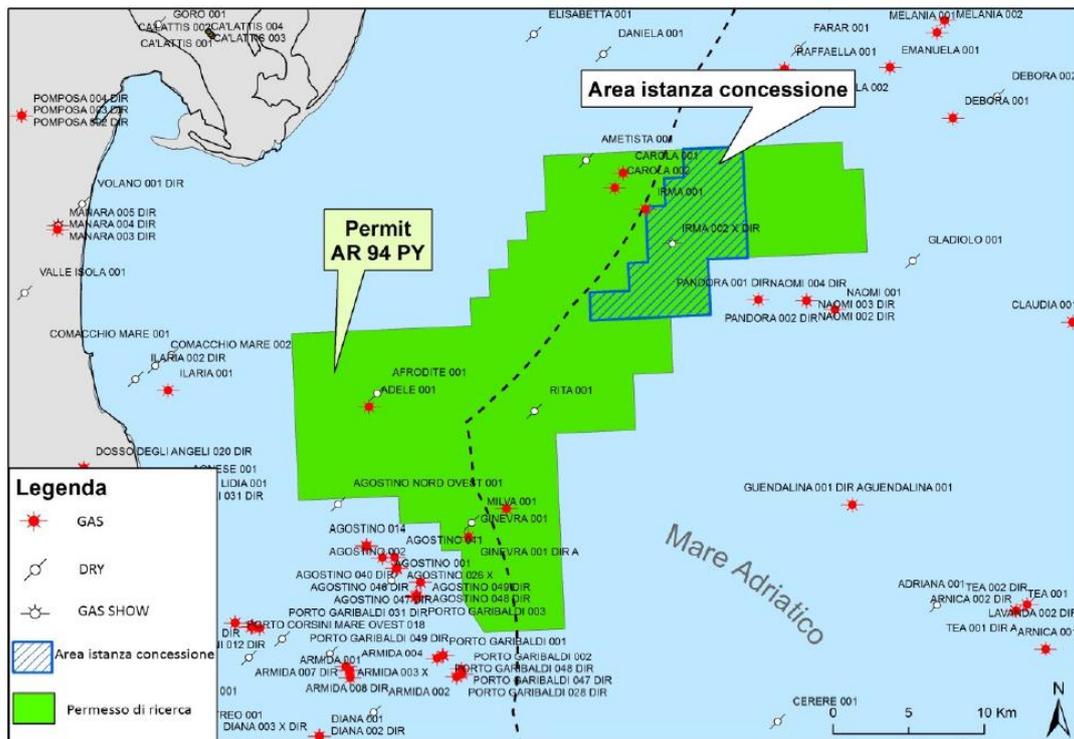


Figura 1: Ubicazione dell'area dell'istanza di concessione del giacimento di Teodorico.

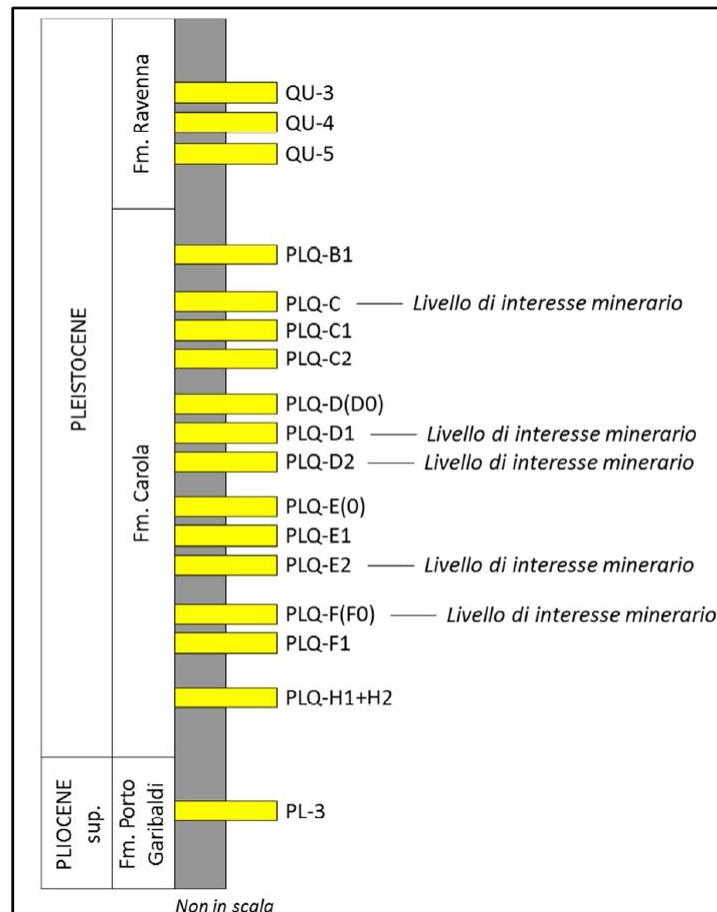


Figura 2: Schema stratigrafico (non in scala) della successione torbiditica plio-pleistocenica.

Po Valley Operations ha fornito le superfici stratigrafiche ottenute con interpretazione sismica relativamente ai top dei pool mineralizzati, mentre su scala regionale si è fatto riferimento all'archivio dei pozzi esplorativi del progetto VIDEPI (<http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/videpi/videpi.asp>). Da queste informazioni è stato possibile estrarre le mappe delle isobate e delle isopache locali dei livelli mineralizzati (ALLEGATO A) e delle isobate dei principali orizzonti geologici a scala regionale (ALLEGATO B).

3 MODELLO DI PRODUZIONE

Il programma di sviluppo del giacimento prevede l'installazione di una piattaforma, posta in prossimità del pozzo Irma 001 (Figura 3), da cui saranno perforati almeno 2 pozzi direzionati, completati in doppio con string da 2"3/8 e ICGP.

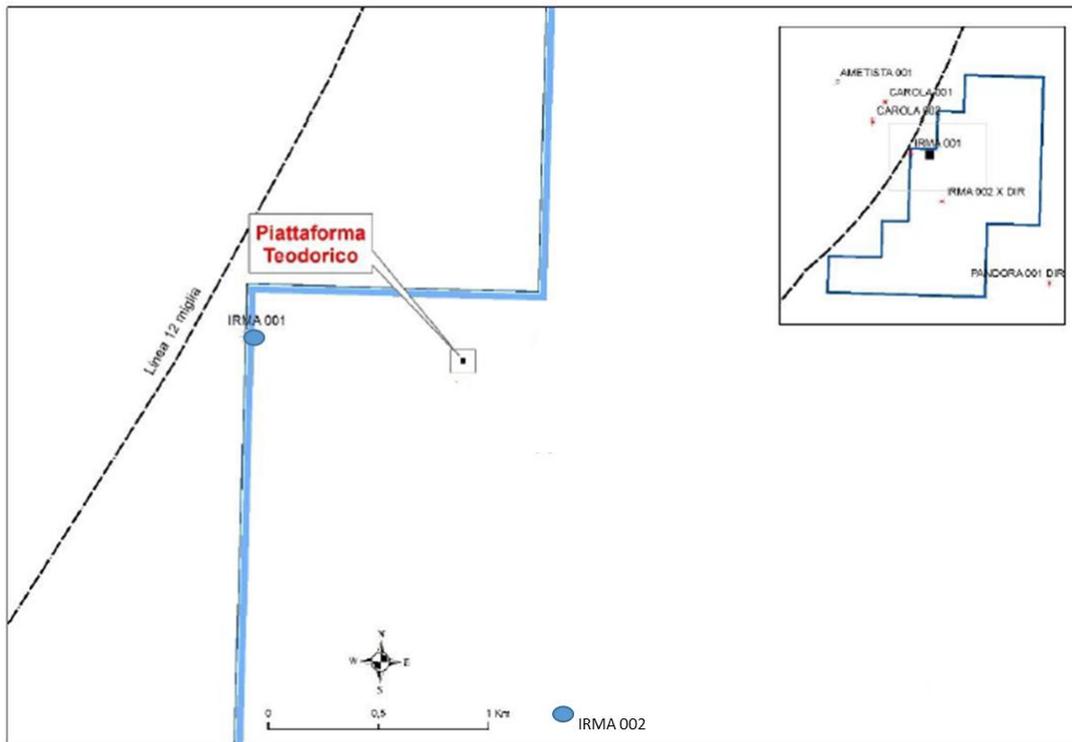


Figura 3: Ubicazione della piattaforma e dei pozzi Irma 001 e Irma 002.

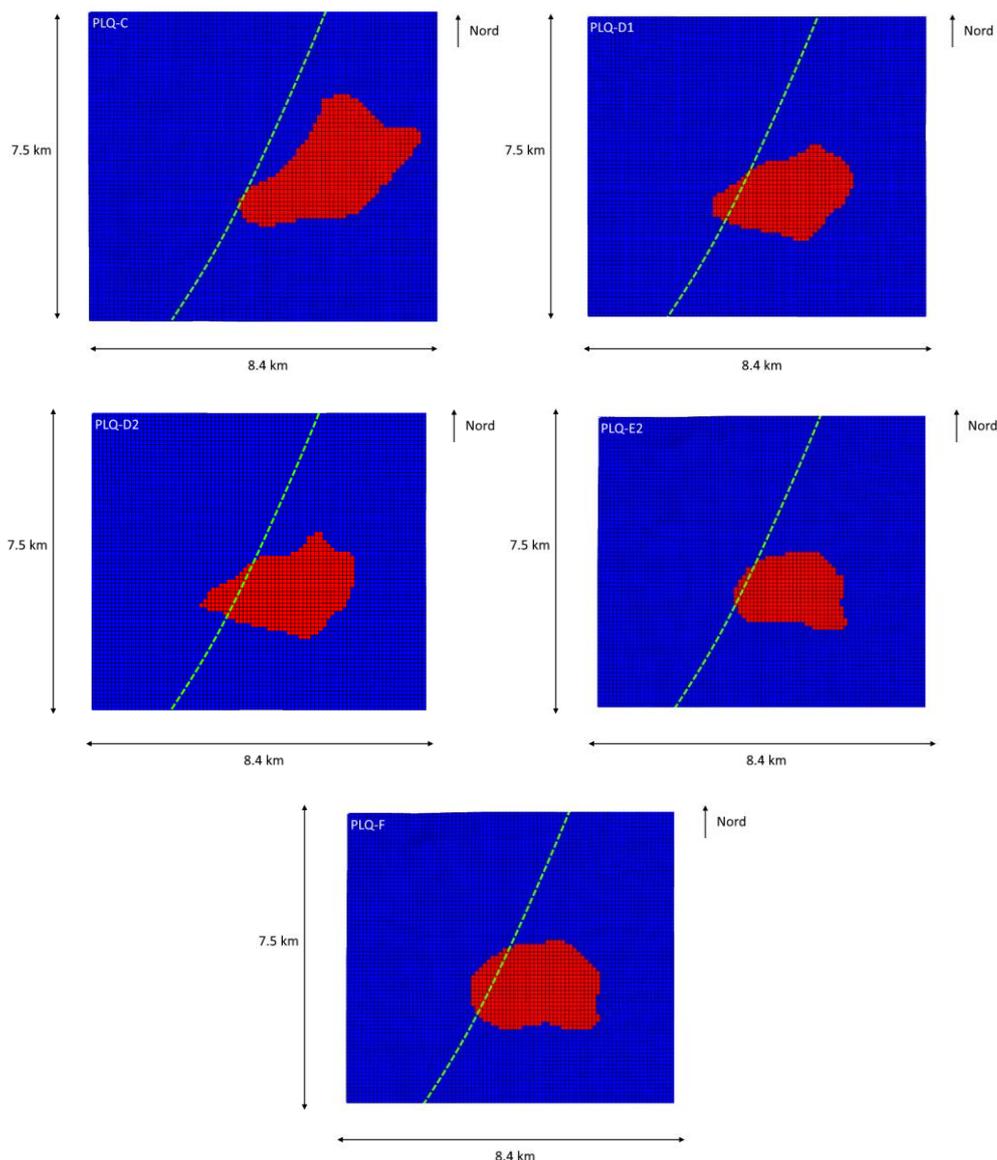


Figura 4: Vista in pianta del modello statico di Eclipse per i livelli produttivi PLQ-C, PLQ-D1, PLQ-D2, PLQ-E2 e PLQ-F. In rosso è evidenziata la zona mineralizzata e in verde la linea delle 12 miglia.

Per il giacimento di Teodorico è stato indagato un unico scenario di coltivazione. Po Valley Operations ha fornito il modello fluidodinamico di giacimento, sviluppato mediante il software Eclipse, utilizzato per la gestione dei livelli produttivi e la simulazione del comportamento futuro del giacimento. La vista in pianta del modello statico con il grid di calcolo adottato per la discretizzare ciascun livello produttivo è riportata in Figura 4. Tale modello ha fornito l'andamento nel tempo della variazione della pressione media nei pool mineralizzati per lo scenario forecast di

coltivazione (Figura 5). I risultati del modello fluidodinamico in termini di produzione di gas cumulativo e corrispondente fattore di recupero sono riportati in Tabella I.

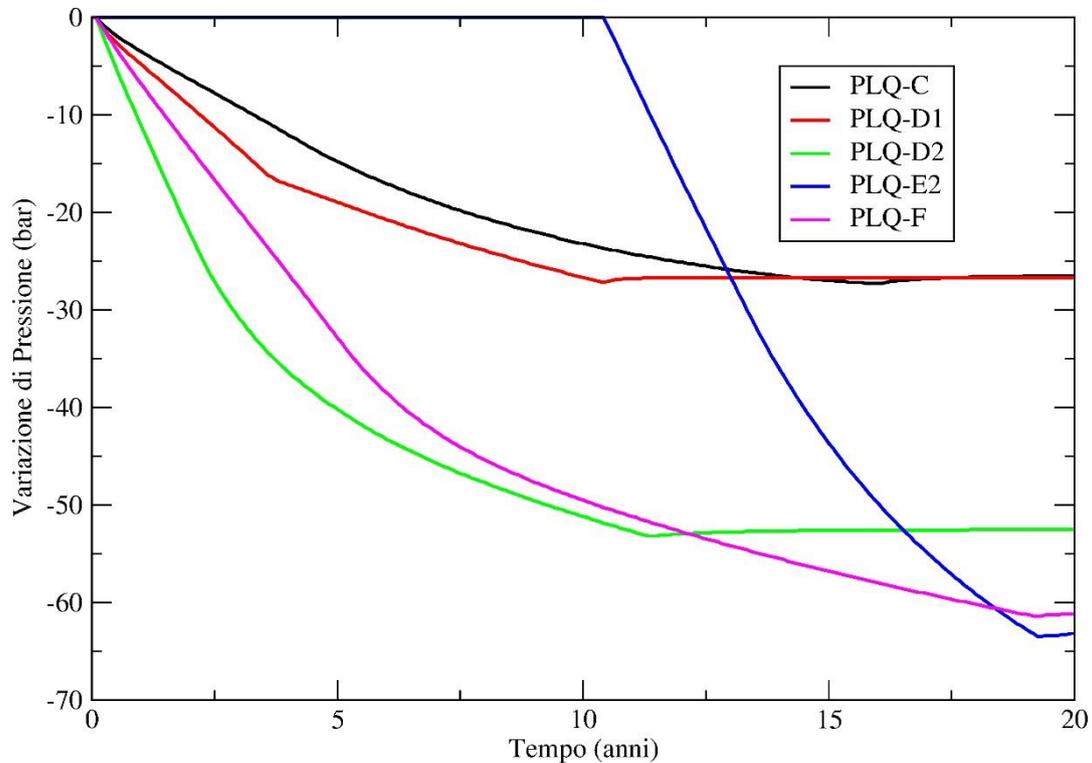


Figura 5: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico.

Livello	PLQ-C	PLQ-D1	PLQ-D2	PLQ-E2	PLQ-F	Totale
GOIP (10^6 m^3_{sc})	467.7	409.6	304.8	172.9	490.5	1845.5
Gp cum (10^6 m^3_{sc})	233.6	196.5	142.7	81.1	254.6	908.4
RF (%)	49.9	48.0	46.8	46.9	51.9	49.2

Tabella I: Volumi di gas cumulativamente prodotti e Recovery Factor (RF) per livello e per tutto il campo.

In Figura 6 - Figura 10 è mostrata la variazione di pressione prevista dopo 20 anni dal first gas per tutti i livelli produttivi e i relativi waterdrive. Oltre al ruolo esercitato dal giacimento, i processi geomeccanici connessi alla coltivazione di gas naturale sono attivati anche dalla variazione di pressione nell'acquifero connesso idraulicamente al campo [Baù *et al.*, 2000; Ferronato *et al.*, 2004]. Poiché l'acquifero è stato incluso solo parzialmente nel modello fluidodinamico di produzione, l'andamento spazio-temporale 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 5.

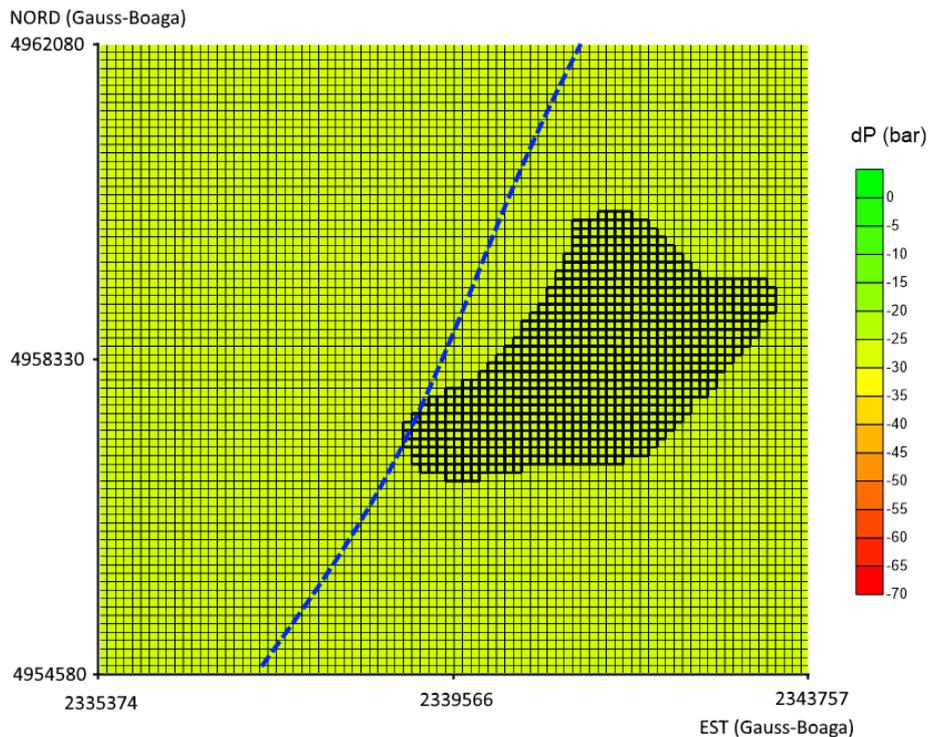


Figura 6: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-C e associato waterdrive al 20° anno previsto dal modello Eclipse. In grassetto sono evidenziate le celle del giacimento e in blu la linea delle 12 miglia.

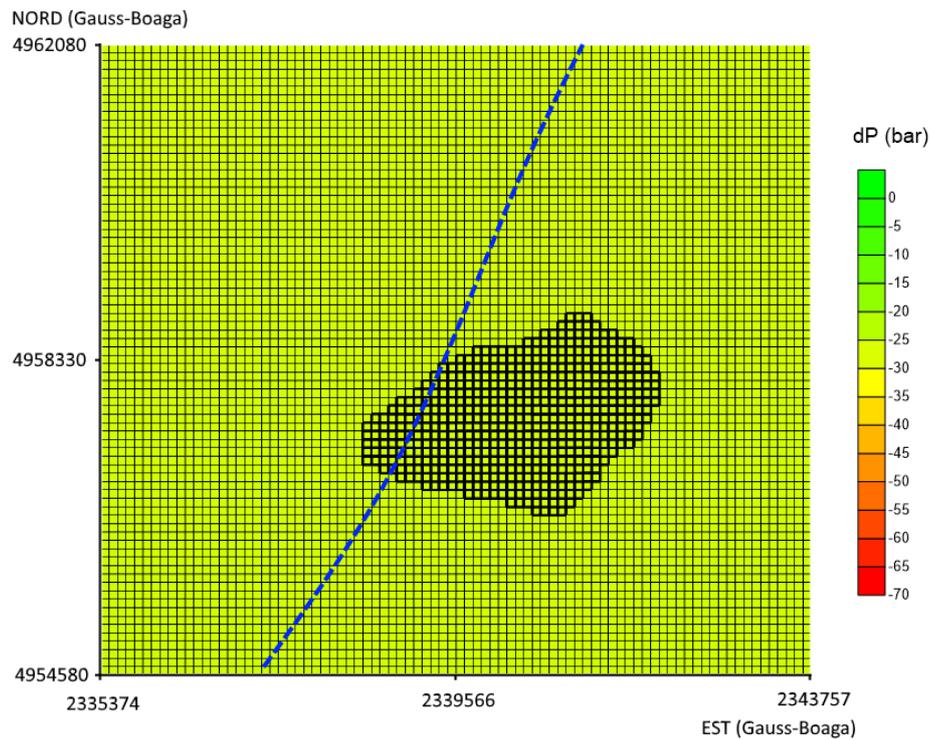


Figura 7: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-D1 e associato waterdrive al 20° anno previsto dal modello Eclipse. In grassetto sono evidenziate le celle del giacimento e in blu la linea delle 12 miglia.

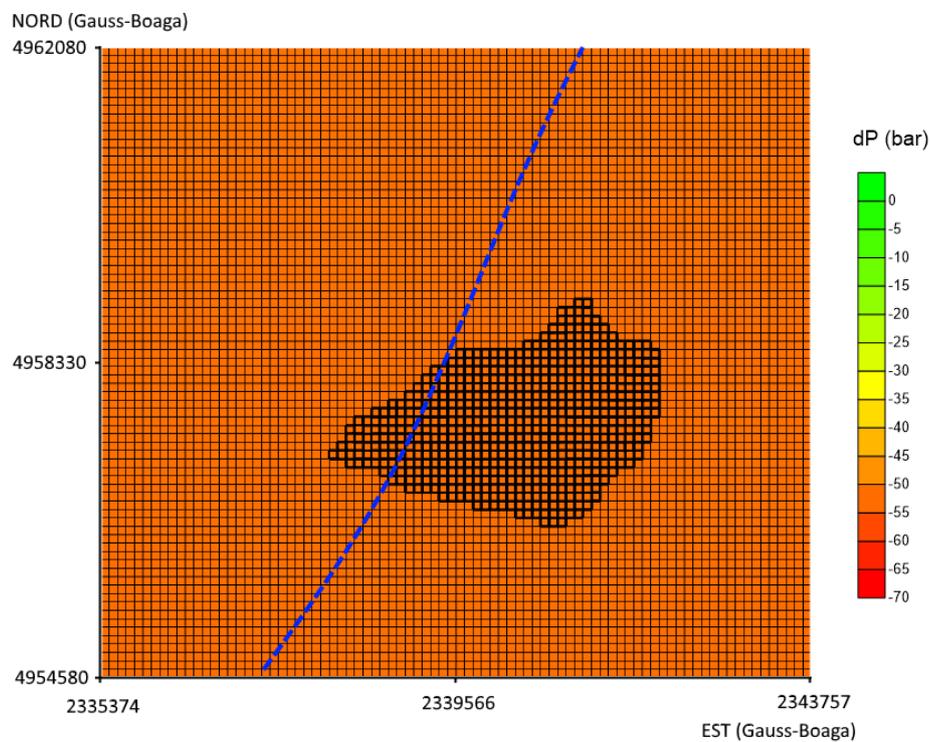


Figura 8: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-D2 e associato waterdrive al 20° anno previsto dal modello Eclipse. In grassetto sono evidenziate le celle del giacimento e in blu la linea delle 12 miglia.

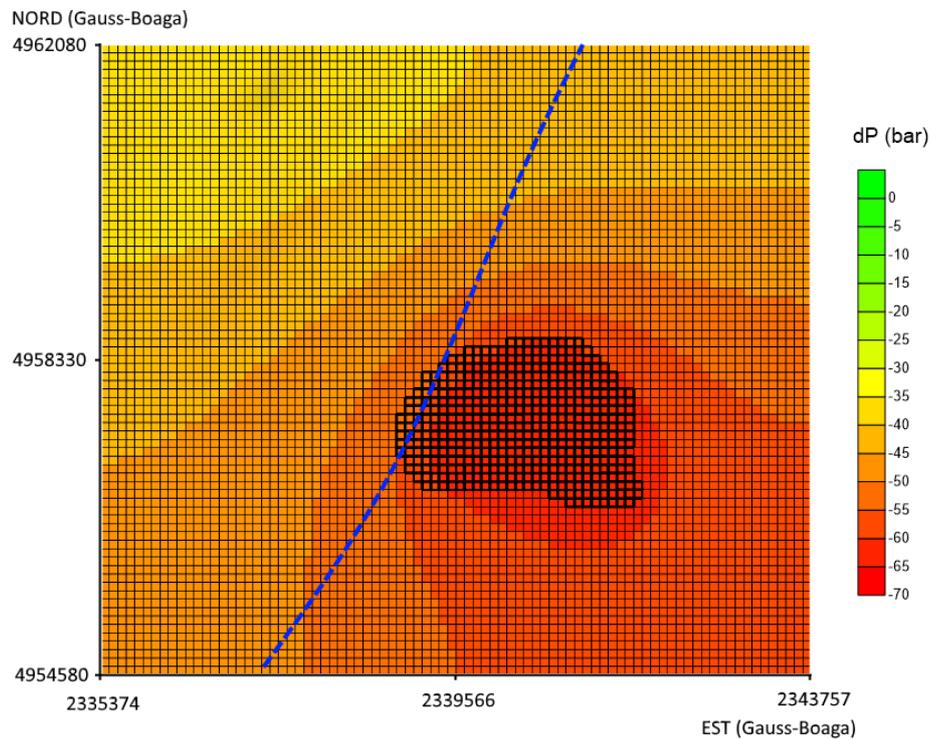


Figura 9: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-E2 e associato waterdrive al 20° anno previsto dal modello Eclipse. In grassetto sono evidenziate le celle del giacimento e in blu la linea delle 12 miglia.

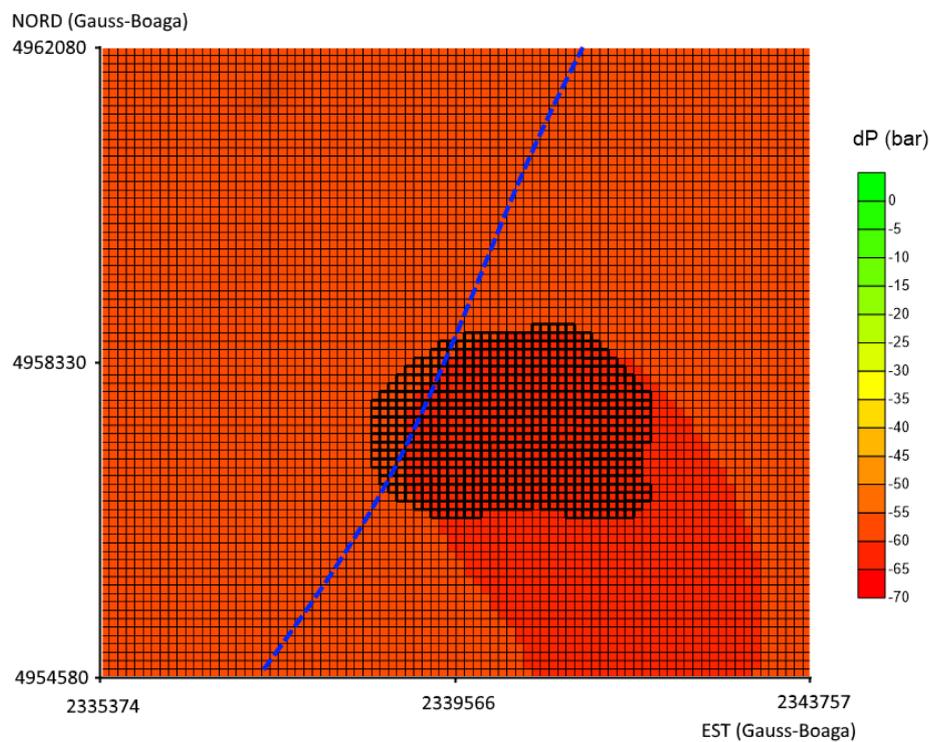


Figura 10: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-F e associato waterdrive al 20° anno previsto dal modello Eclipse. In grassetto sono evidenziate le celle del giacimento e in blu la linea delle 12 miglia.

4 MODELLO GEOMECCANICO

4.1 Griglia di calcolo

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 elastico per mezzi porosi sollecitati da variazioni di pressione di strato variabili nello spazio e nel tempo, e caratterizzati da un comportamento elasto-plastico o ipo-plastico anche anisotropo mediante un approccio FEM che adotta elementi tetraedrici lineari a 4 nodi. Tale scelta consente di rappresentare con grande attendibilità le volumetrie e le complesse geometrie che spesso caratterizzano le strutture geologiche di interesse.

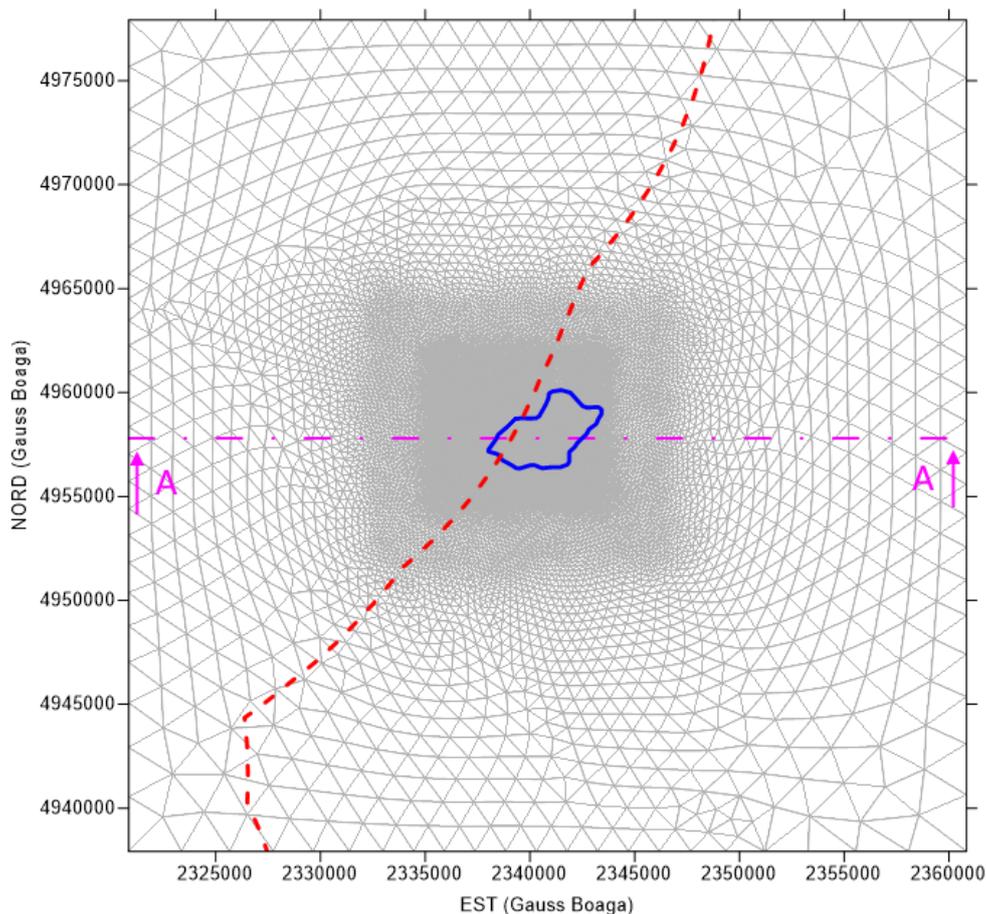


Figura 11: Discretizzazione bidimensionale del dominio di calcolo utilizzata per la generazione del modello tridimensionale FEM. In rosso è evidenziata la linea delle 12 miglia, in blu la traccia dell'involuppo dei pool mineralizzati e in viola la sezione A-A.

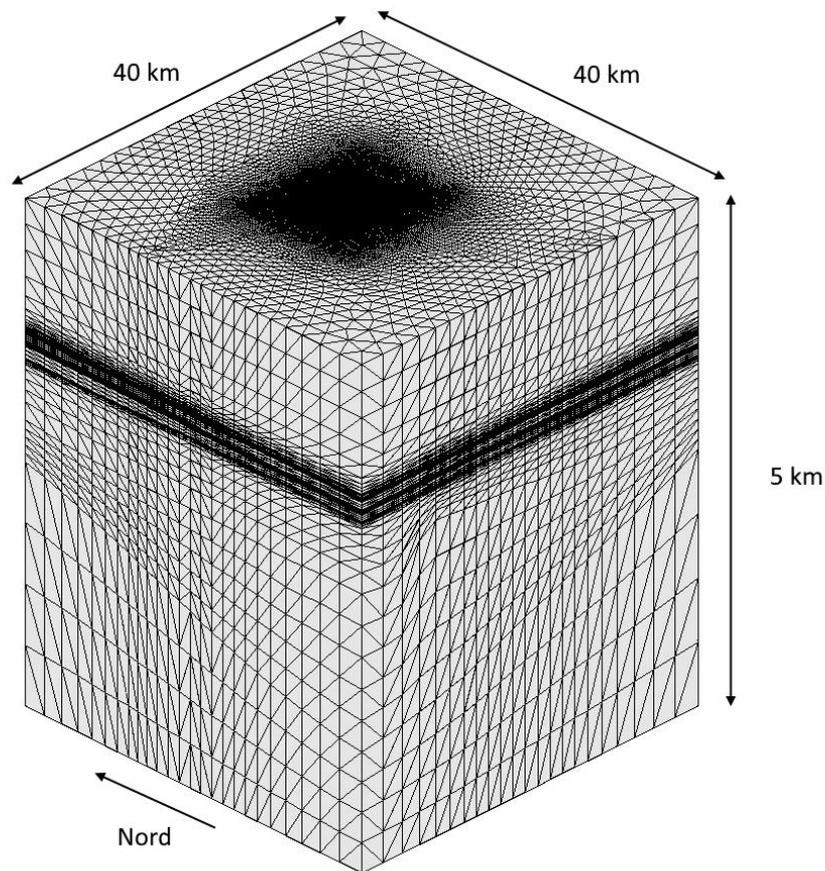


Figura 12: Vista assonometrica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 10 volte rispetto a quella orizzontale.

Per il modello geomeccanico è necessario generare una griglia di calcolo ad elevata risoluzione all'interno e nei pressi del giacimento che si estenda sufficientemente lontano da esso in modo da ridurre al minimo l'influenza delle condizioni al contorno sul risultato delle simulazioni sopra e nelle vicinanze del giacimento stesso. In questo studio è stato impiegato un dominio di calcolo avente un'estensione areale di 40×40 km con il campo di Teodorico collocato in posizione pressoché baricentrica. Il dominio 2D è stato triangolato mediante 13,362 nodi e 26,632 elementi con uno spacing medio di circa 100 m nella zona del campo (Figura 11), in coerenza con la discretizzazione utilizzata nel modello Eclipse. La griglia di calcolo 3D è stata ottenuta utilizzando un generatore automatico di griglia sviluppato da M³E che proietta lungo la direzione verticale i nodi della griglia 2D e adatta la posizione dei vari layer di elementi finiti alla geometria degli

orizzonti geologici. Viene così generato un dominio parallelepipedo che ha il basamento rigido posto a 5 km di profondità, è limitato superiormente dal DEM ed è discretizzato con elementi tetraedrici i cui vertici giacciono sul top e bottom dei livelli geologici in modo tale da riprodurre con accuratezza i volumi dei pool mineralizzati, le quote dei GWC e le geometrie dell'acquifero connesso idraulicamente al giacimento. La griglia così generata consiste complessivamente di 1,186,466 nodi e 7,014,887 tetraedri. La vista assonometrica dell'intera griglia del modello geomeccanico è mostrata in Figura 12. In Figura 13 e Figura 14 sono riportate alcune sezioni verticali del modello geomeccanico in corrispondenza dei livelli mineralizzati.

A partire da questa griglia sono stati "estratti" i modelli di flusso dei singoli waterdrive come sotto-domini del modello geomeccanico. In Figura 15 - Figura 19 sono rappresentati in pianta i modelli di flusso per i cinque livelli del campo (l'estensione areale del waterdrive è circa 30 volte quella del modello Eclipse e sulla frontiera è imposto un abbattimento nullo della pressione). Tali modelli sono stati utilizzati per propagare la variazione di pressione di strato dal giacimento all'acquifero in contatto idraulico, previa calibrazione della conduttività idraulica con l'impiego del bilancio di massa (vedi Capitolo 5).

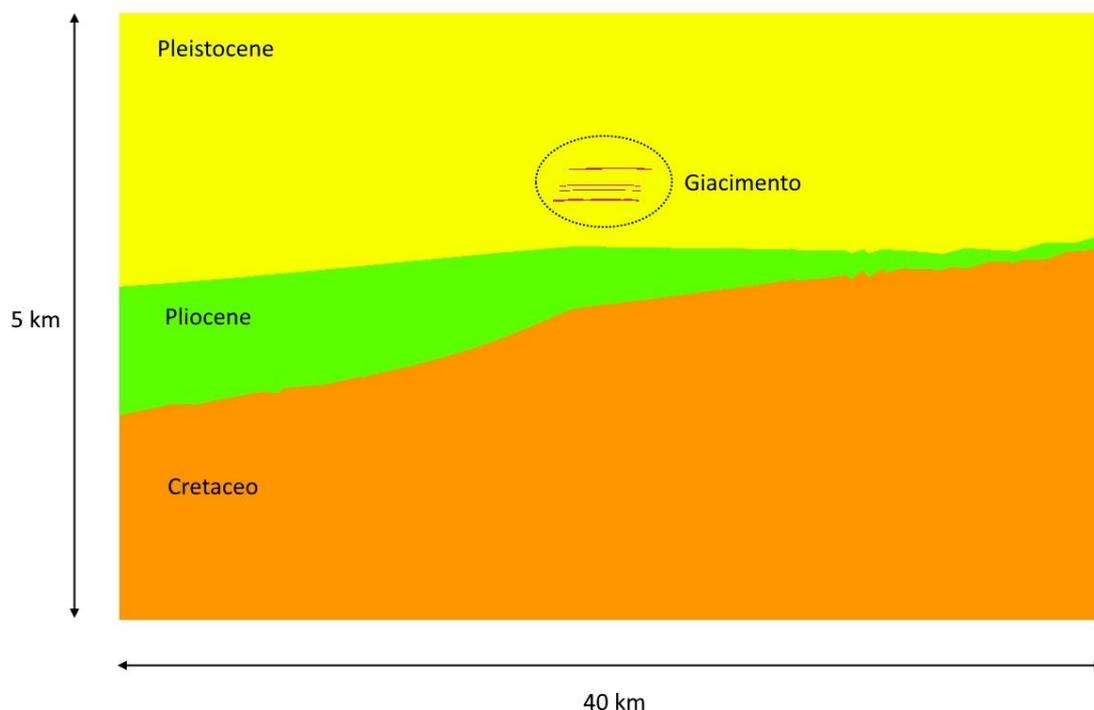


Figura 13: Sezione verticale del modello geomeccanico lungo la traccia A-A di Figura 11 con l'ubicazione della trappola mineraria dei livelli del giacimento. La scala verticale è amplificata 5 volte rispetto a quella orizzontale.

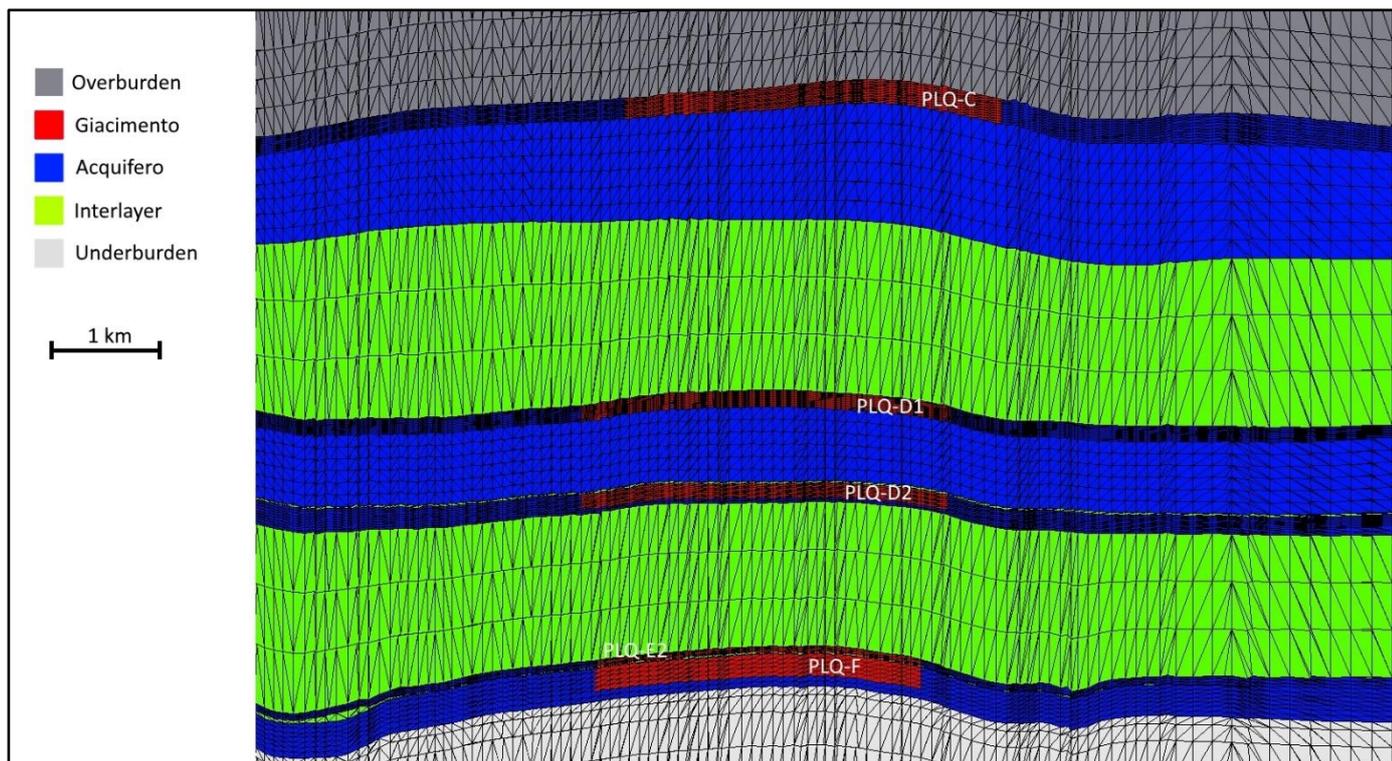


Figura 14: Sezione verticale del modello geomeccanico lungo la traccia A-A di Figura 11 in cui è evidenziata la discretizzazione verticale in corrispondenza dei pool mineralizzati. La scala verticale è amplificata 20 volte rispetto a quella orizzontale.

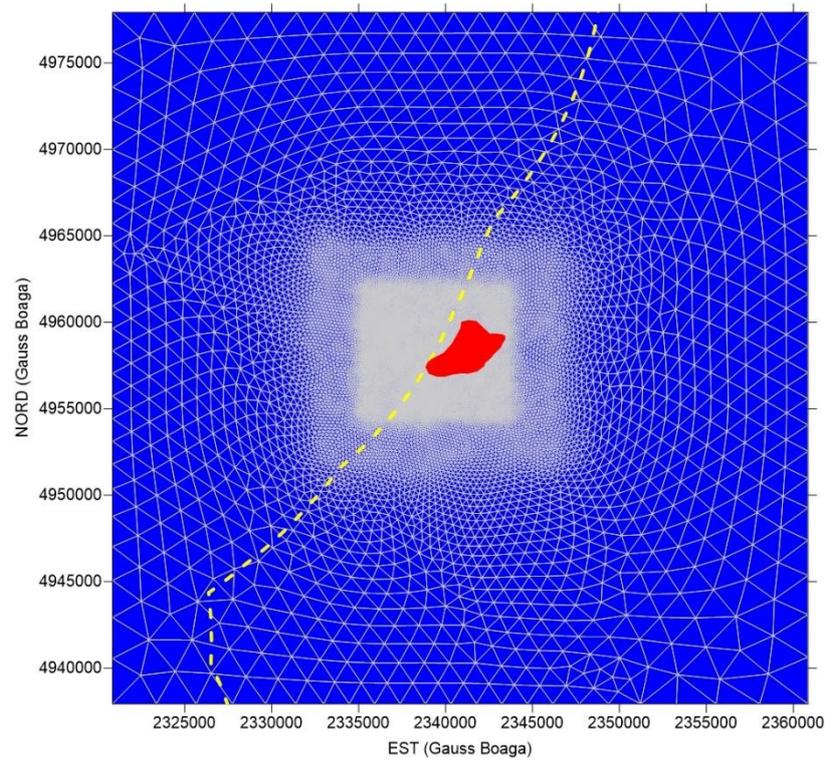


Figura 15: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello PLQ-C. In rosso è evidenziato il giacimento, in blu l'acquifero e in giallo la linea delle 12 miglia.

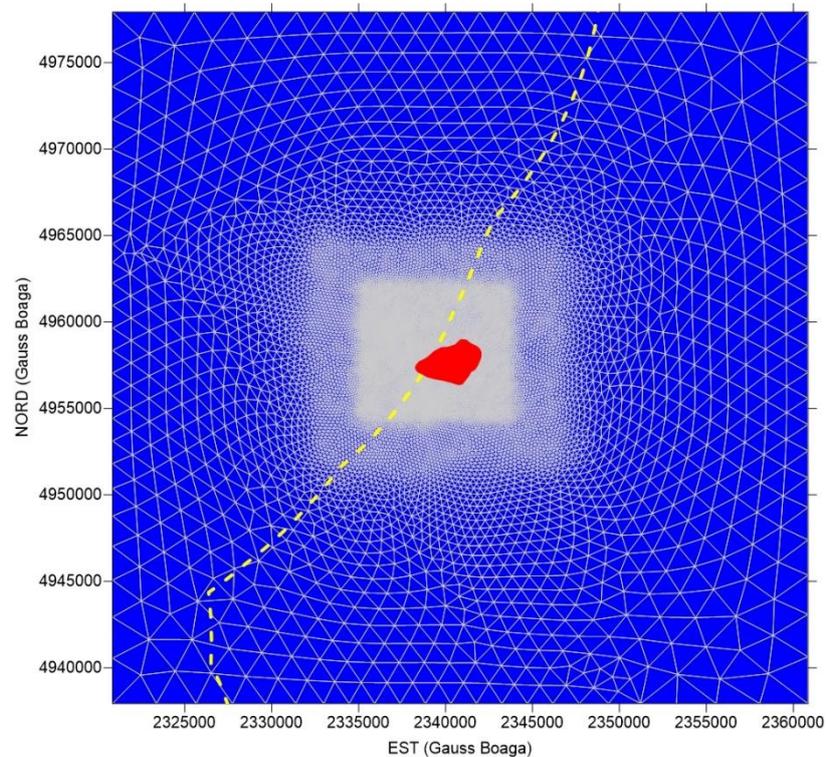


Figura 16: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello PLQ-DI. In rosso è evidenziato il giacimento, in blu l'acquifero e in giallo la linea delle 12 miglia.

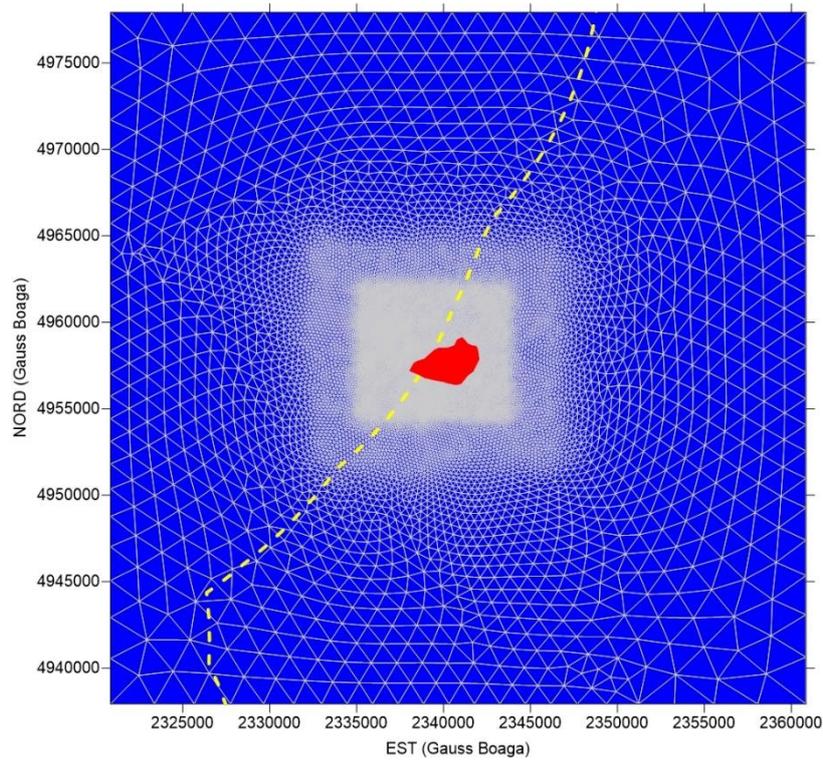


Figura 17: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello PLQ-D2. In rosso è evidenziato il giacimento, in blu l'acquifero e in giallo la linea delle 12 miglia.

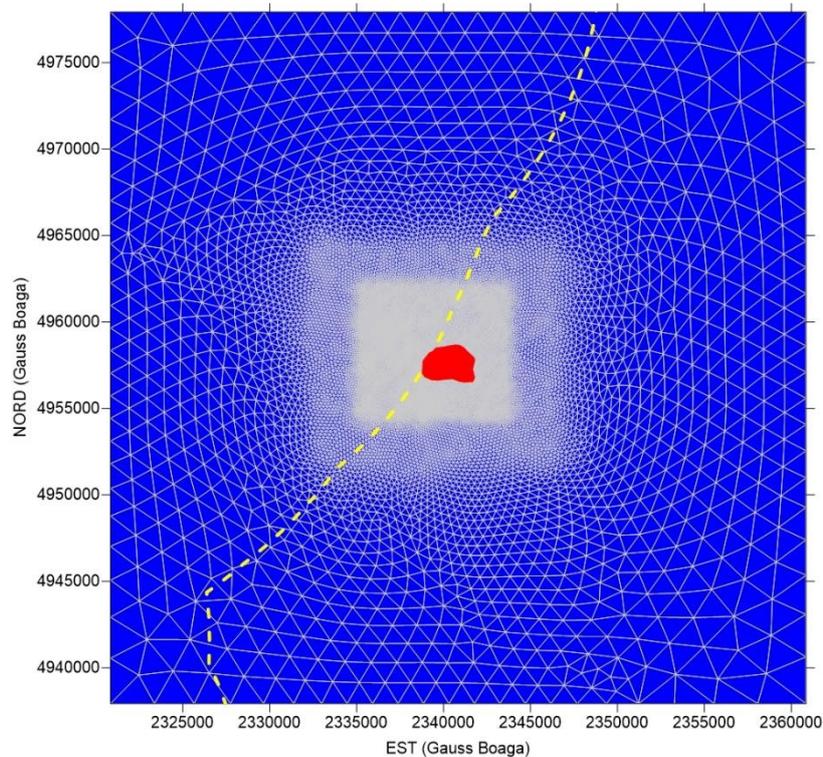


Figura 18: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello PLQ-E2. In rosso è evidenziato il giacimento, in blu l'acquifero e in giallo la linea delle 12 miglia.

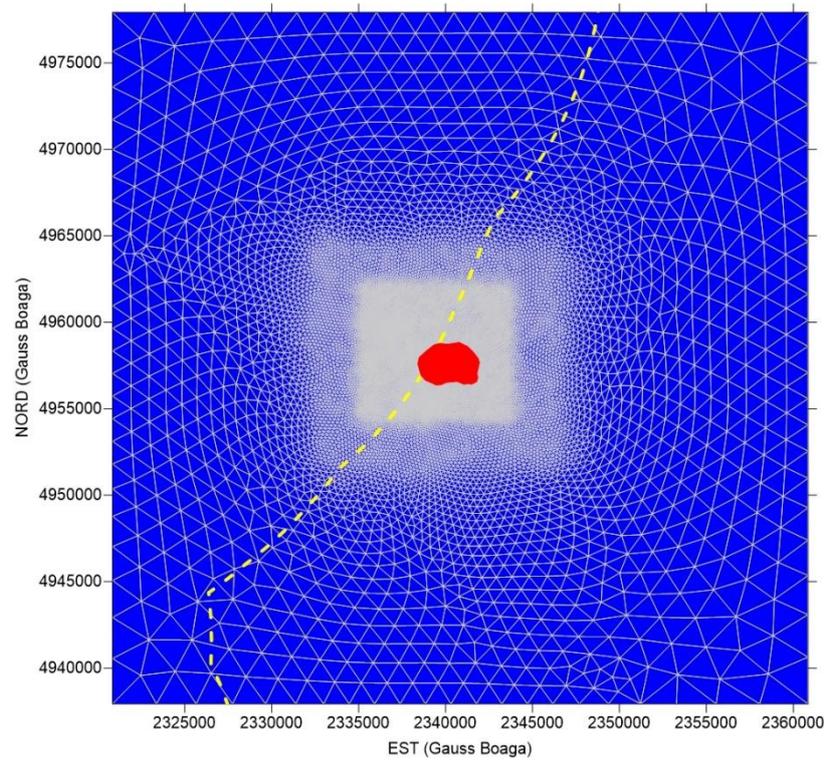


Figura 19: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello PLQ-F. In rosso è evidenziato il giacimento, in blu l'acquifero e in giallo la linea delle 12 miglia.

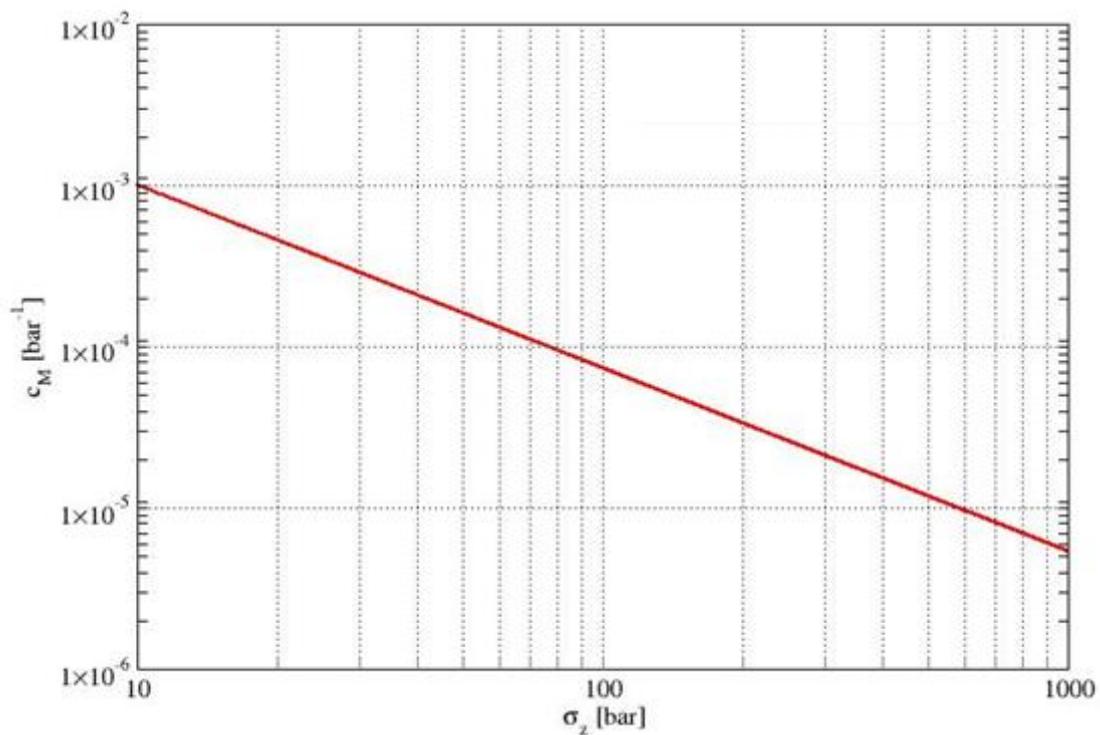


Figura 20: Grafico doppio logaritmico che riporta l'andamento della c_M in I ciclo di carico in funzione della σ_z efficace secondo la legge dell'Adriatico settentrionale [Baù et al., 2002; Ferronato et al., 2013].

4.2 Legge costitutiva del mezzo poroso

Il modello geomeccanico utilizza una legge costitutiva della compressibilità verticale edometrica c_M del mezzo poroso in funzione della tensione verticale efficace σ_z . Nel caso in esame, in analogia a quanto già fatto per altri campi appartenenti al bacino sedimentario padano, ci si è riferiti alla legge costitutiva ricavata per l'Adriatico settentrionale [Baù *et al.*, 2002; Ferronato *et al.*, 2013] in base alla quale la relazione 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). Per il calcolo dello stato tensionale iniziale è stato usato il gradiente di overburden ottenuto dal density log del pozzo Amelia-21:

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

con obg espresso in $[\text{MPa/m}]$ e la profondità z in $[\text{m}]$.

Il modello numerico implementato è di tipo ipo-plastico isotropo. Scrivendo i tensori di stress e di deformazione con la consueta notazione vettoriale, il collegamento tensioni-deformazioni $\sigma = C\varepsilon$ per un modello isotropo è dato dalla matrice:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}$$

Escluso il modulo di taglio G , pari a $E/[2(1+\nu)]$, la matrice C dipende da 2 parametri indipendenti, ovvero E e ν , rispettivamente modulo di elasticità normale o di Young e modulo di contrazione laterale o di Poisson. La compressibilità verticale è legata ai parametri E e ν dalla relazione:

$$c_M = \frac{1}{E} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) = \frac{1}{E} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}$$

Per il modulo di Poisson è stato utilizzato il valore $\nu=0.3$ sulla base dei dati di bibliografia per il bacino padano.

5 CALIBRAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO

Come precisato al Capitolo 2, per una corretta modellazione dei processi geomeccanici è necessario implementare una rappresentazione realistica del waterdrive nella sua estensione. Di conseguenza, sono state eseguite delle simulazioni idrodinamiche intese a predire l'andamento spazio-temporale della pressione nel waterdrive collegato al campo.

La variazione di pressione che si propaga in acquifero è stata calcolata mediante il modello idrodinamico FEM di flusso saturo in mezzi porosi messo a punto da M³E sulla cui frontiera interna, coincidente con la frontiera dei 5 livelli, è stata imposta una variazione di pressione nel tempo pari a quella simulata in giacimento 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 implementata nel modello Eclipse, a causa della diversa estensione dell'acquifero stesso. La calibrazione viene effettuata in modo da simulare col modello idrodinamico 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. Il valore così ottenuto è rappresentativo della permeabilità media di ciascun acquifero, e tiene anche conto dei livelli argillosi eventualmente presenti nella formazione e delle approssimazioni insite nella riproduzione della geometria e degli spessori della stessa.

Il volume d'acqua ingressato nel livello W_{in} tra due istanti temporali t_1 e t_2 è stato calcolato con la formula del bilancio di massa comunemente utilizzata nell'ingegneria del petrolio [Chierici, 1985 e 1994; Ferronato *et al.*, 2004]:

$$W_{in} = G_1 (B_{g,1} - B_{g,2}) + G_p B_{g,2}$$

dove G_1 , G_p e $B_{g,1}$ e $B_{g,2}$ sono rispettivamente il volume del gas *in place* all'istante t_1 , il volume del gas prodotto tra t_1 e t_2 e i fattori volumetrici del gas negli istanti t_1 e t_2 ($B_g = 0.350958 zT/p$ [Rm^3/Sm^3] dove z , T e p sono rispettivamente il fattore di supercomprimibilità del gas, la temperatura in Kelvin e la pressione in kPa in giacimento). Si assume per t_1 l'anno prima dell'inizio della coltivazione e per t_2 l'anno dopo 5 anni di produzione, intervallo di tempo ritenuto rappresentativo del comportamento idraulico dell'acquifero. È stata effettuata una calibrazione separata per ciascuno dei livelli interessati dalla produzione data la ridotta comunicazione idraulica fra loro risultante dal modello di giacimento. Per ciascun livello si è assunto che anche i relativi waterdrive siano tra loro indipendenti e che il rapporto tra la permeabilità orizzontale K_h e quella

verticale K_v sia pari a 50 [Ferronato *et al.*, 2004]. Come normalmente ammesso nei bilanci di massa in giacimenti di idrocarburi, per questo calcolo la roccia è stata supposta infinitamente rigida, cioè con volume poroso invariato fra l'inizio e la fine della coltivazione. I volumi d'acqua ingressati nei cinque livelli PLQ-C, PLQ-D1, PLQ-D2, PLQ-E2 e PLQ-F sono riportati in Tabella 2. Dopo aver calibrato la permeabilità dei modelli di flusso FEM, l'andamento della pressione negli acquiferi è stato simulato per 20 anni dopo il first gas. In Figura 21 - Figura 25 sono riportate le mappe di variazione di pressione al 20° anno dal first gas in giacimento e nel waterdrive per i 5 livelli mineralizzati. L'abbattimento di pressione in giacimento si attenua man mano ci si allontana dal campo, in particolare, l'isobara -5 bar si trova a una distanza massima di 2 km dalla frontiera del campo nei livelli PLQ-D1 e PLQ-F.

Livello	t_1	t_2	W_{in} (10^6 m^3)
PLQ-C	first gas	5° anno dal first gas	0.32
PLQ-D1	first gas	5° anno dal first gas	0.40
PLQ-D2	first gas	5° anno dal first gas	0.14
PLQ-E2	first gas	5° anno dal first gas	0.04
PLQ-F	first gas	5° anno dal first gas	0.17
Totale	-	-	1.08

Tabella 2: Volumi d'acqua ingressati W_{in} calcolati tra gli istanti t_1 e t_2 e utilizzati per la calibrazione dei modelli idrodinamici FEM degli acquiferi collegati idraulicamente ai livelli mineralizzati.

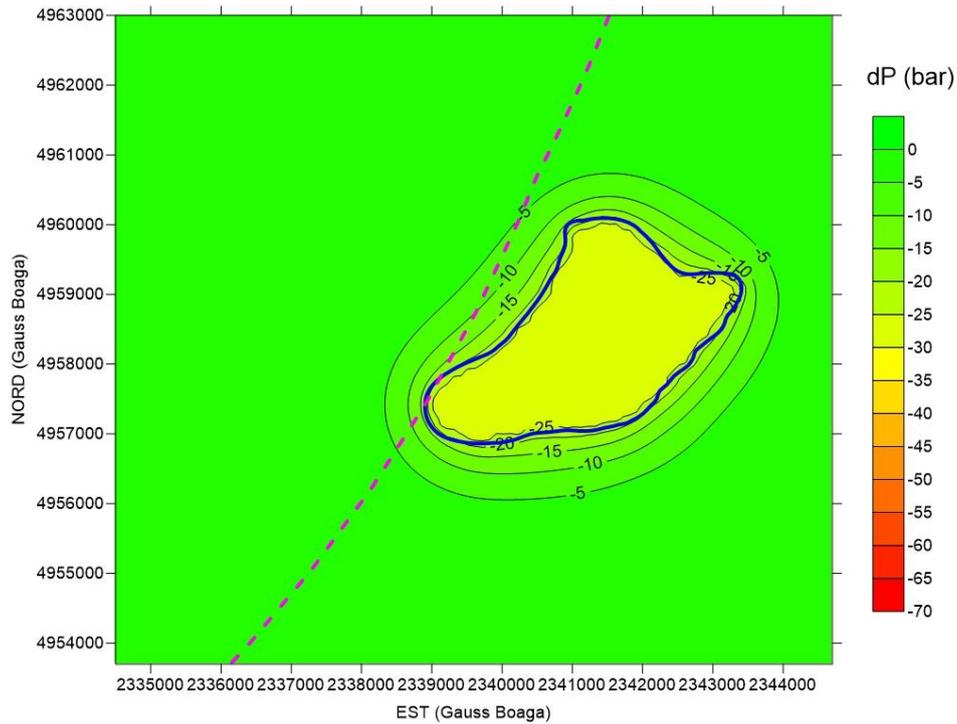


Figura 21: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-C al 20° anno e quella ottenuta dalla simulazione con modello idrodinamico FEM dell'associato waterdrive (esterno al giacimento). In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

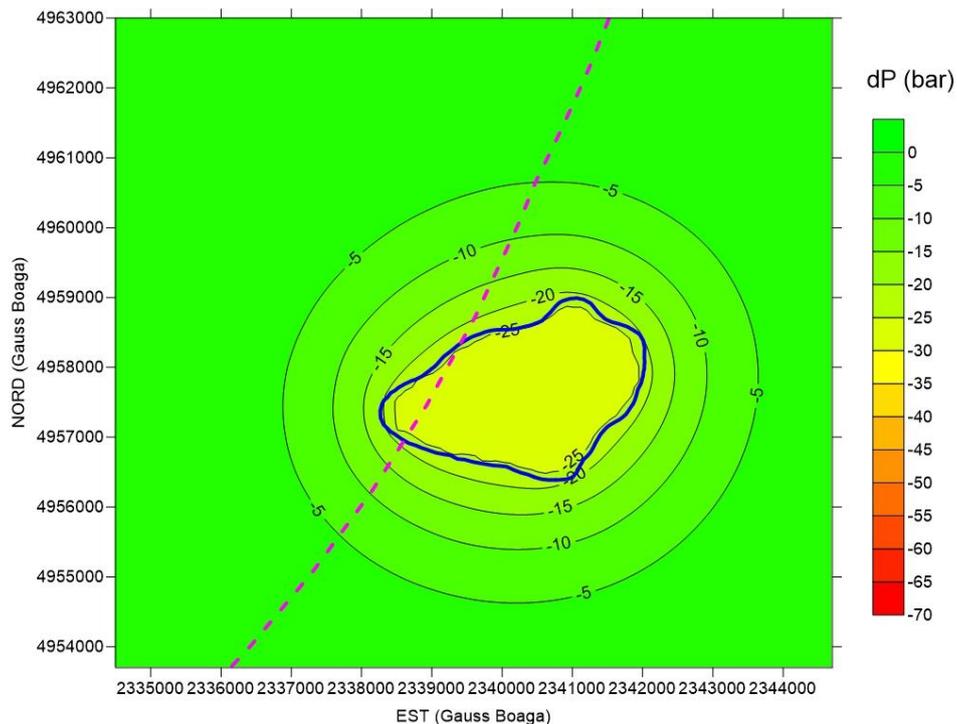


Figura 22: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-D1 al 20° anno e quella ottenuta dalla simulazione con modello idrodinamico FEM dell'associato waterdrive (esterno al giacimento). In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

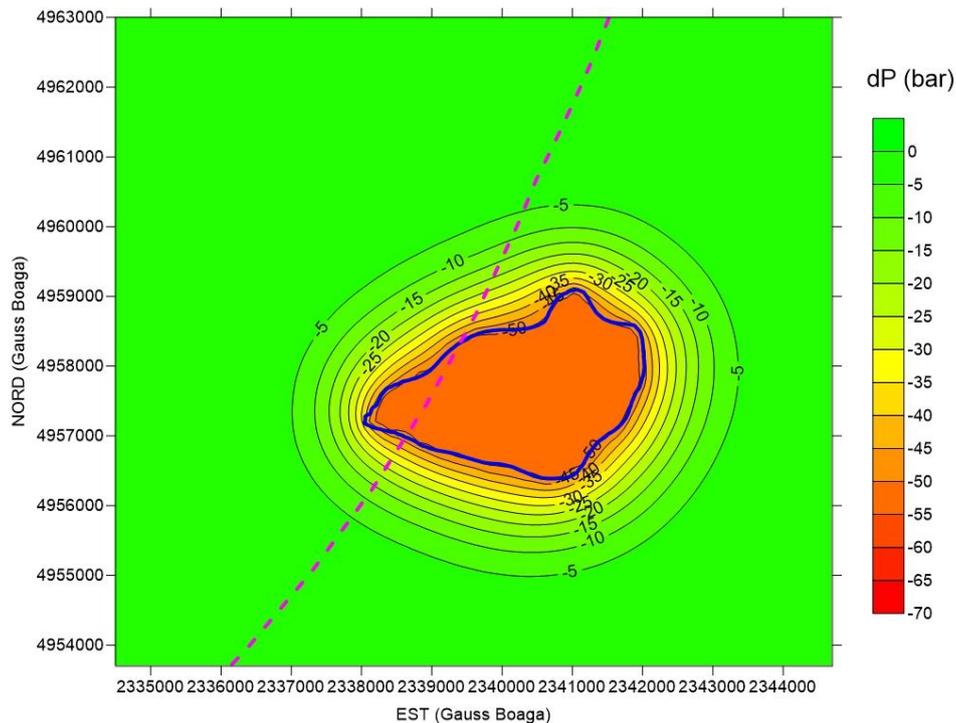


Figura 23: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-D2 al 20° anno e quella ottenuta dalla simulazione con modello idrodinamico FEM dell'associato waterdrive (esterno al giacimento). In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

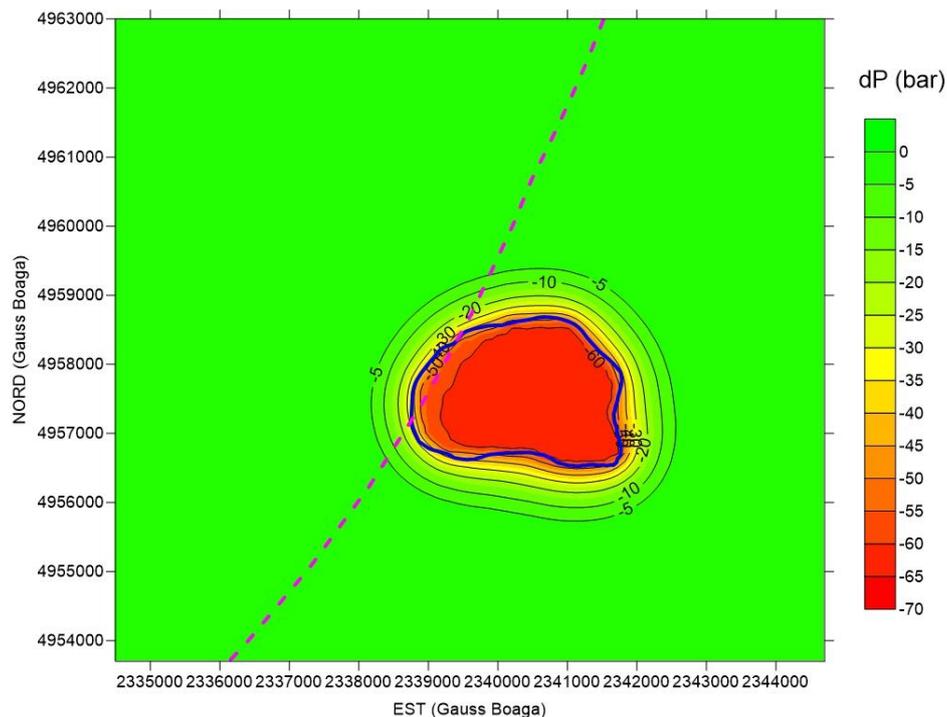


Figura 24: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-E2 al 20° anno e quella ottenuta dalla simulazione con modello idrodinamico FEM dell'associato waterdrive (esterno al giacimento). In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

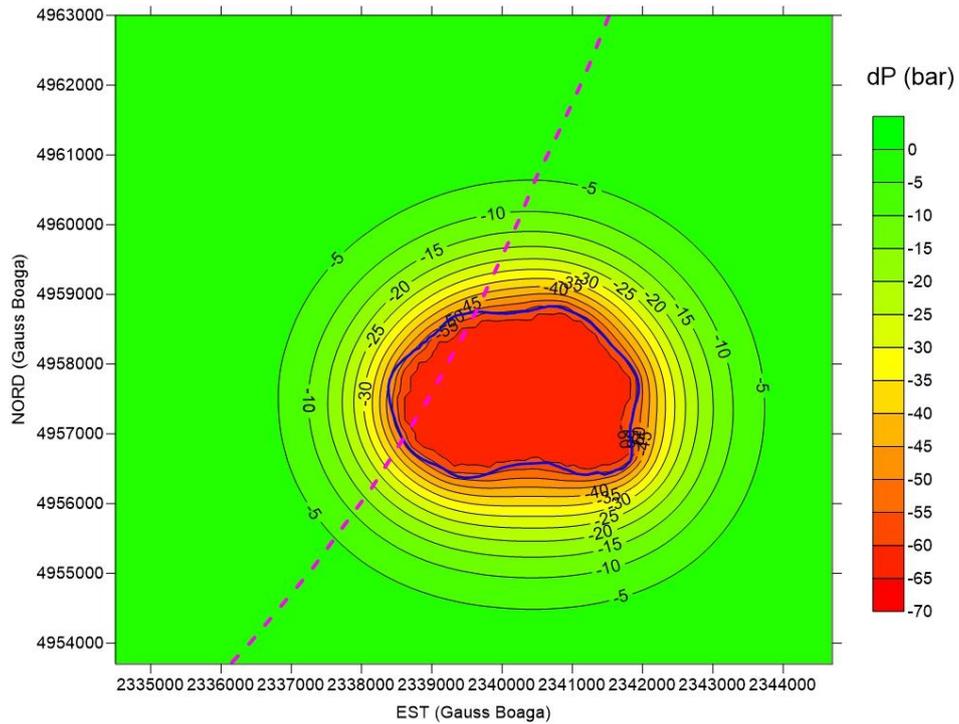


Figura 25: Variazione di pressione (bar) nel livello PLQ-F al 20° anno e quella ottenuta dalla simulazione con modello idrodinamico FEM dell'associato waterdrive (esterno al giacimento). In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

6 PREVISIONE MODELLISTICA DELLA SUBSIDENZA

Il modello geomeccanico FEM è stato utilizzato per la previsione della subsidenza antropica dovuta alla coltivazione del giacimento di Teodorico. In Figura 26 sono riportati i risultati numerici in termini di subsidenza (cioè abbassamento del fondo marino) al termine della produzione (20° anno dal first gas). Il cono di subsidenza è leggermente allungato in direzione SO-NE secondo l'asse principale del giacimento. L'area coinvolta da una subsidenza maggiore o uguale ai 2 cm è pari a 35.7 km² e l'isodinamica 2 cm si trova ad una distanza massima di 1.5 km dalla traccia del campo. Il disturbo all'interno delle 12 miglia è limitato: l'isodinamica 2 cm ricade a una distanza massima di 2 km all'interno delle 12 miglia. In Figura 27 è mostrato l'andamento nel tempo della massima subsidenza. In particolare, la subsidenza massima prevista dopo 20 anni dal first gas è 10.5 cm.

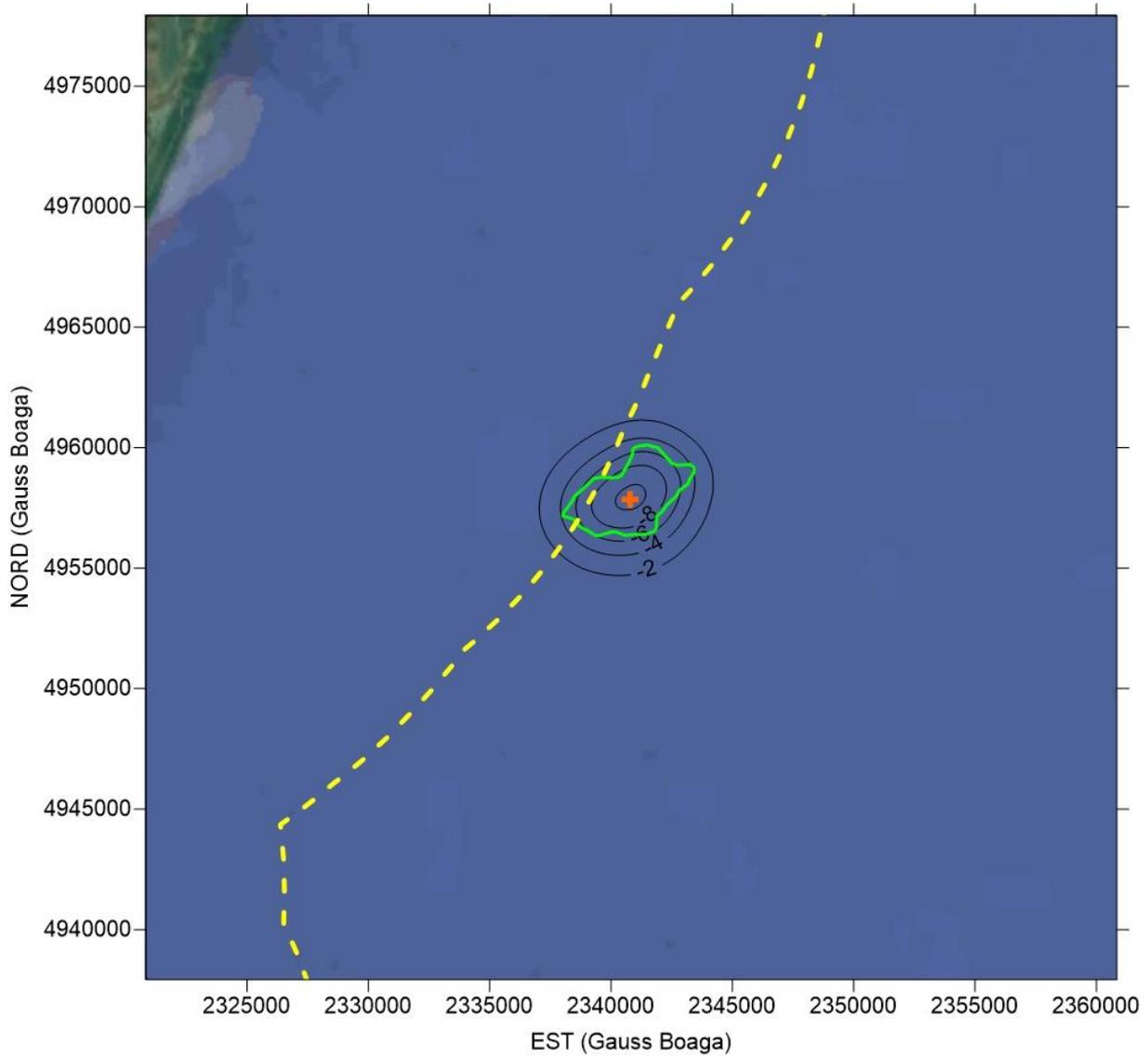


Figura 26: Subsidenza (cm) prevista al 20° anno dal first gas. In giallo è evidenziata la linea delle 12 miglia e in verde la traccia del giacimento. Il simbolo arancione indica il punto di massima subsidenza.

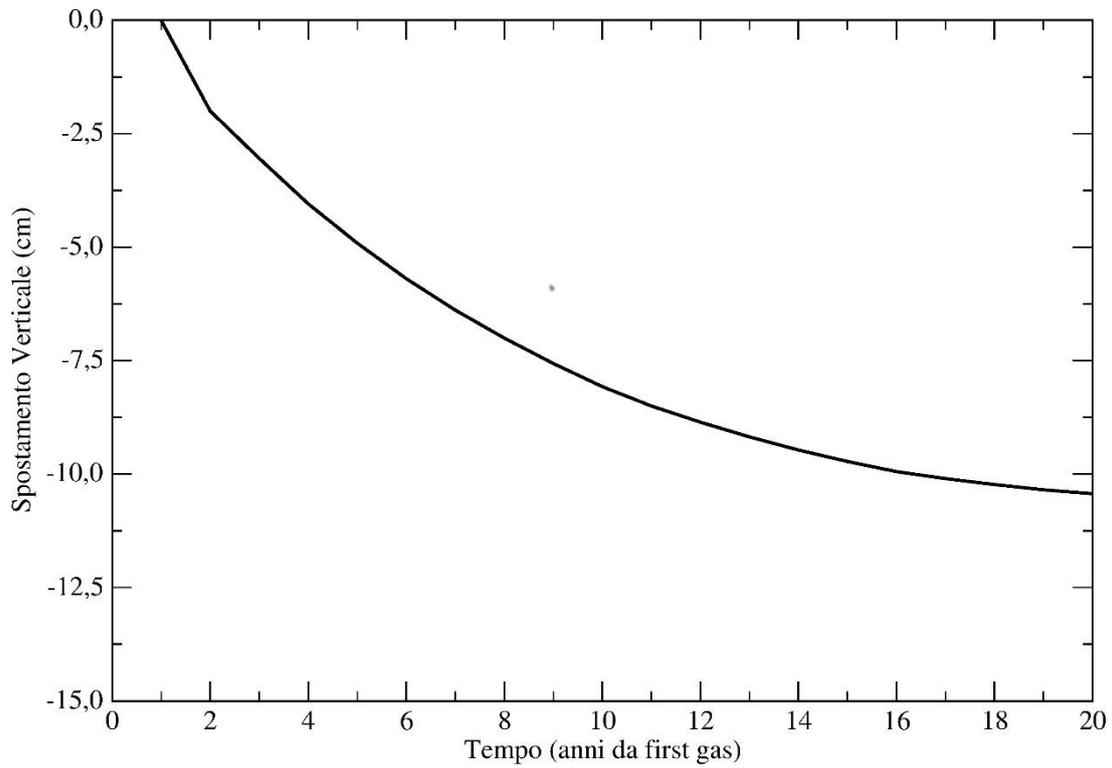


Figura 27: Andamento temporale della subsidenza massima (cm).

7 CONCLUSIONI

Sono stati analizzati, elaborati e utilizzati i dati forniti da Po Valley Operations per la simulazione previsionale della subsidenza antropica causata dalla coltivazione del giacimento di Teodorico.

Le informazioni utili per le simulazioni riguardano la geometria del giacimento e dell'acquifero ad esso idraulicamente connesso (waterdrive), le proprietà petrofisiche del giacimento e quelle geomeccaniche del giacimento, dell'overburden, dell'underburden e del sideburden e l'andamento spazio-temporale delle pressioni di strato. Poiché l'acquifero è stato incluso solo parzialmente nel modello fluidodinamico di produzione, l'andamento spazio-temporale della pressione di strato in acquifero è simulato con un modello FEM idrodinamico calibrato in modo da soddisfare il bilancio di massa in giacimento.

È stato quindi implementato un modello FEM geomeccanico, con legge costitutiva ipo-plastica isotropa, per la previsione della subsidenza a partire dagli abbattimenti di pressione di strato previsti in giacimento e nel waterdrive.

Le simulazioni sono state condotte impiegando le conoscenze allo stato dell'arte.

I risultati ottenuti in fase previsionale (dopo 20 anni dal first gas) possono essere così sintetizzati:

- La previsione della subsidenza fornisce un valore atteso massimo di subsidenza di 10.5 cm.
- L'isodinamica di 2 cm racchiude un'area di 35.7 km².
- Il disturbo all'interno delle 12 miglia in termini di subsidenza del fondo marino è limitato: l'isodinamica 2 cm ricade a una distanza massima di 2 km all'interno delle 12 miglia.

8 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.
- Chierici, G.L. (1985). Petroleum reservoir engineering in the year 2000. *Energy Explor. Exploit.* 3 (3), 173– 193.
- Chierici, G.L. (1994). *Principles of Petroleum Reservoir Engineering*. Springer-Verlag, Berlin.
- Dream (2016). Campo di Teodorico: studio statico e dinamico di giacimento.
- 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.
- Po Valley Operation Pty Ltd. (2015). Concessione di coltivazione di idrocarburi “D 40 A.C.-PY” (derivante dal Permesso di ricerca “A.R94.PY”) – Giacimento di Teodorico (ex giacimento ENI “Carola-Irma”). Relazione tecnica revisione 2.

ALLEGATO A: isobate e isopache locali dei livelli mineralizzati

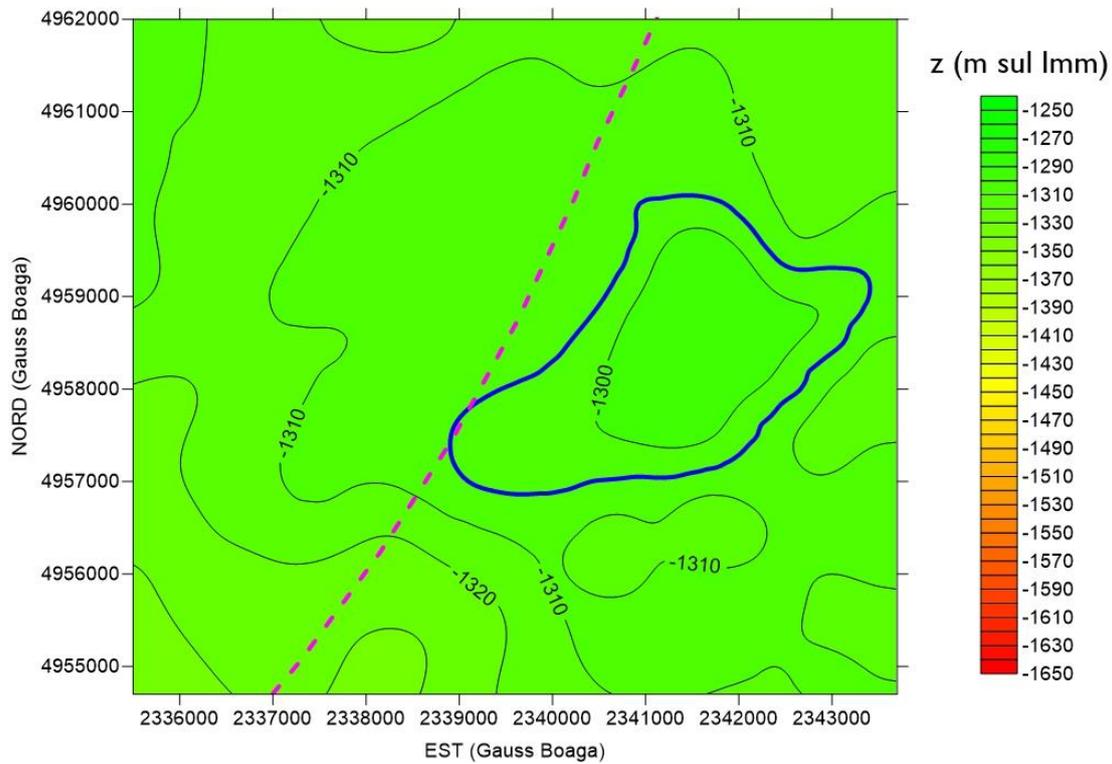


Figura A 1: Isobate (m sul lmm) del top del livello PLQ-C. In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

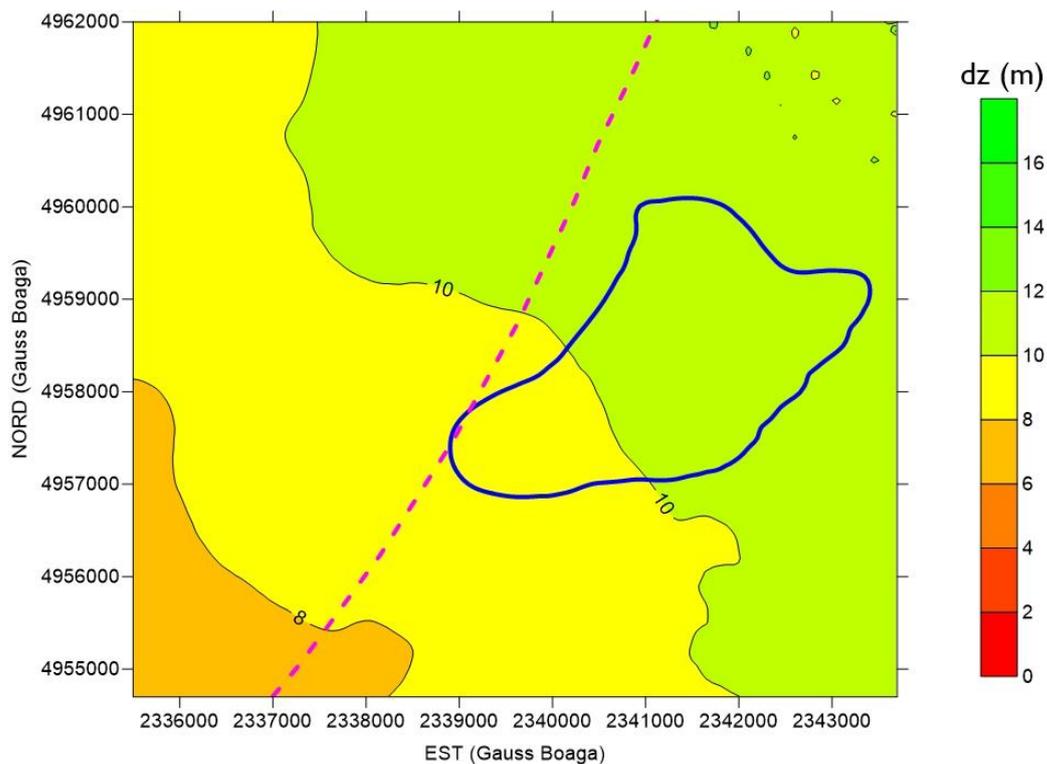


Figura A 2: Isopache (m) del livello PLQ-C. In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

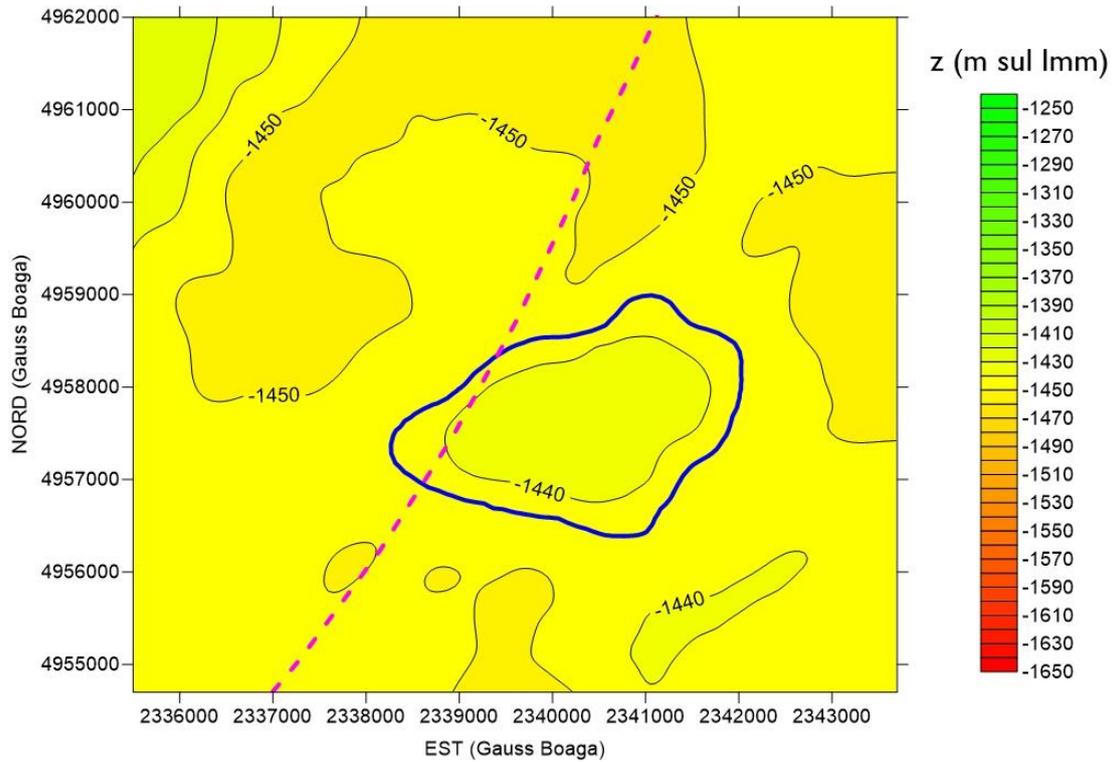


Figura A 3: Isobate (m sul lmm) del top del livello PLQ-DI. In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

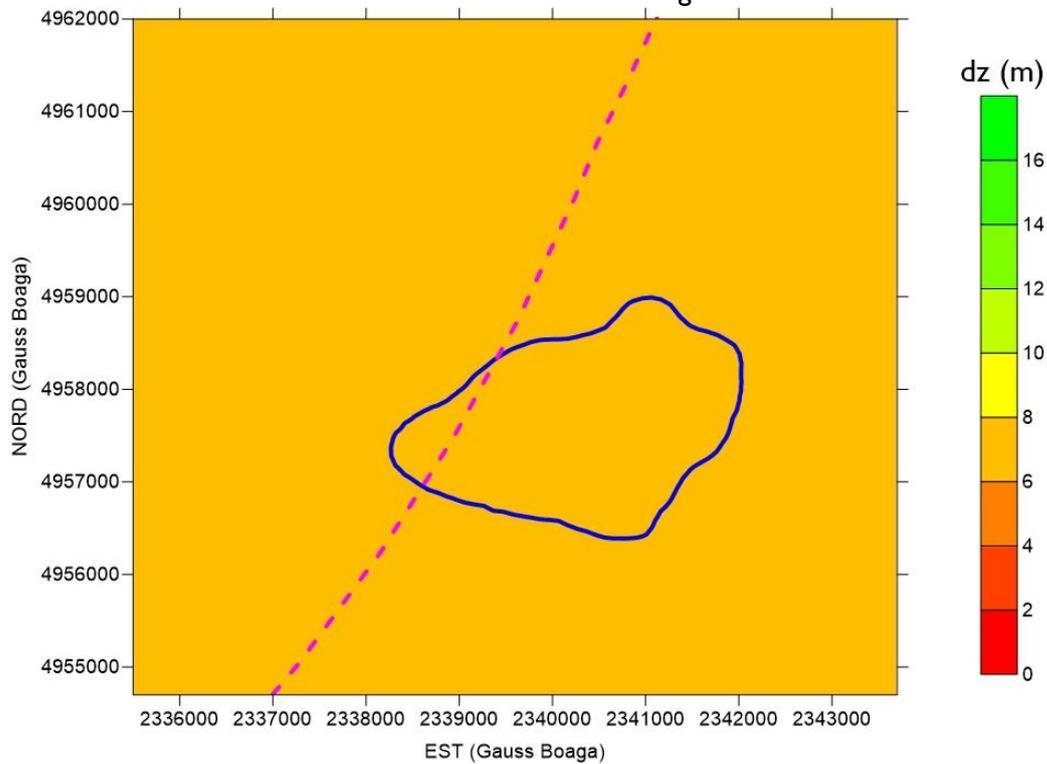


Figura A 4: Isopache (m) del livello PLQ-DI. In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

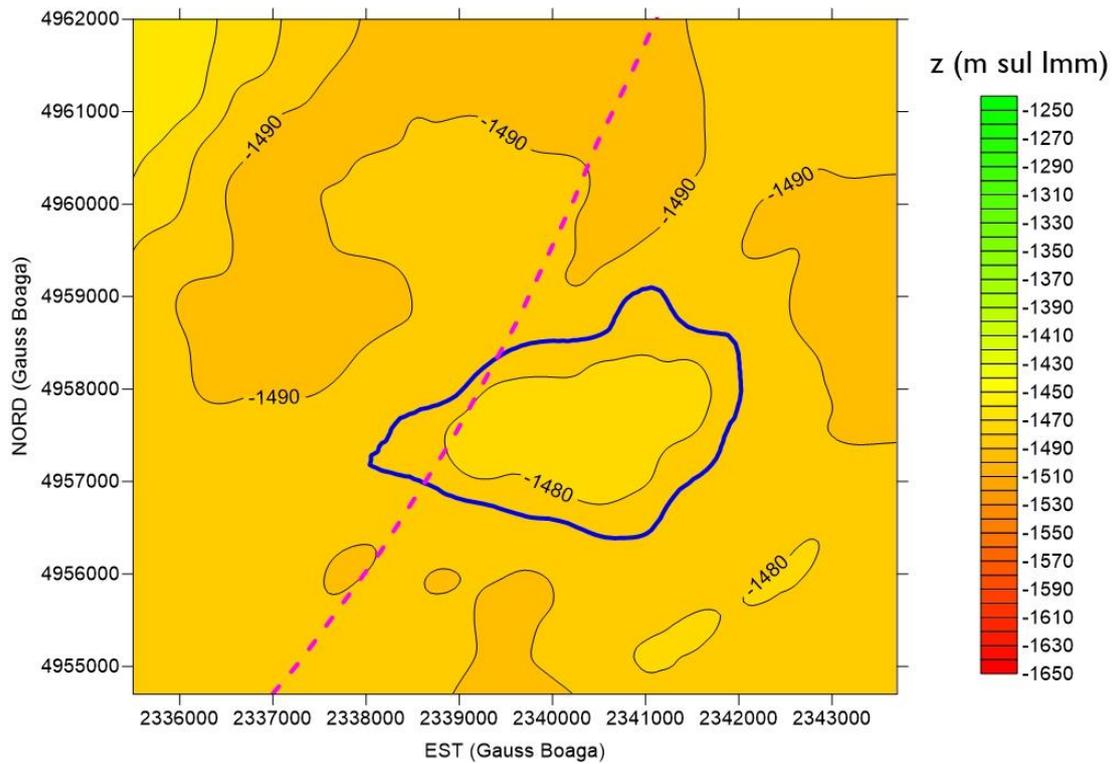


Figura A 5: Isobate (m sul lmm) del top del livello PLQ-D2. In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

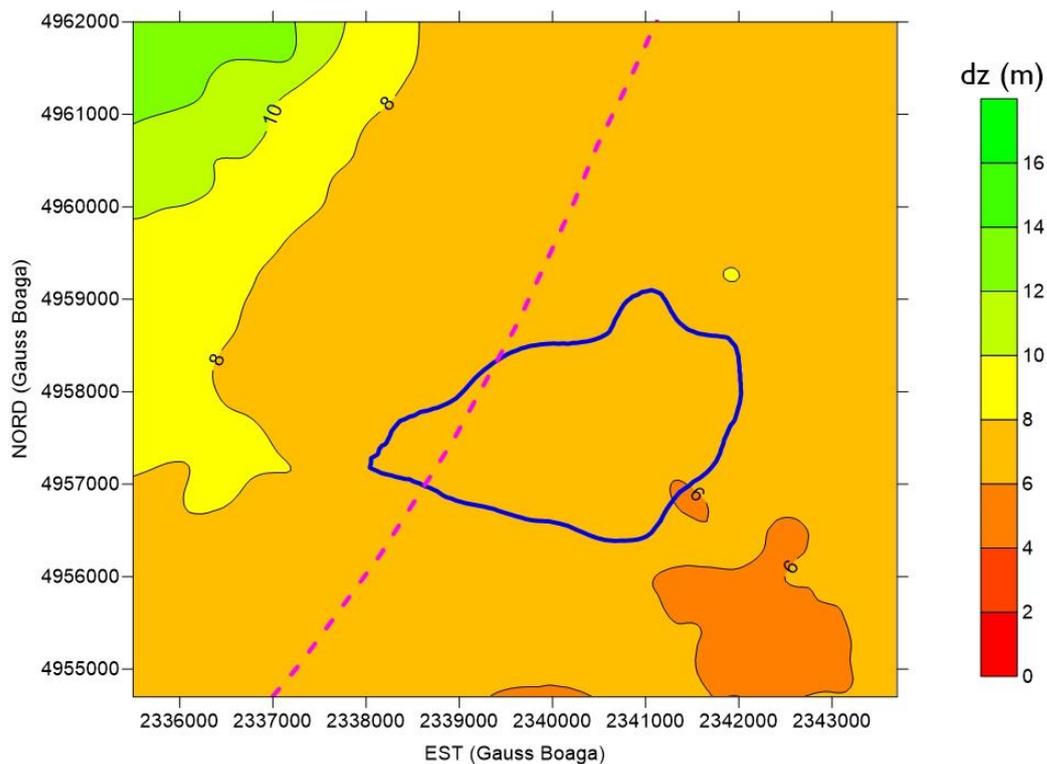


Figura A 6: Isopache (m) del livello PLQ-D2. In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

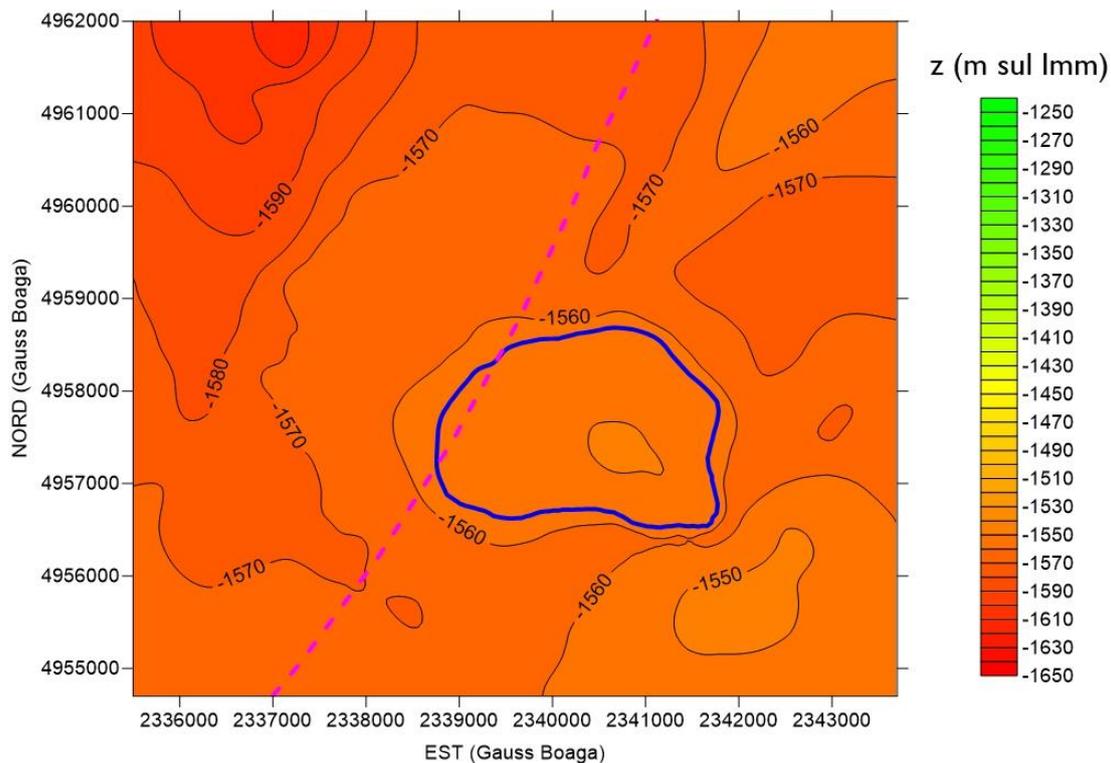


Figura A 7: Isobate (m sul lmm) del top del livello PLQ-E2. In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

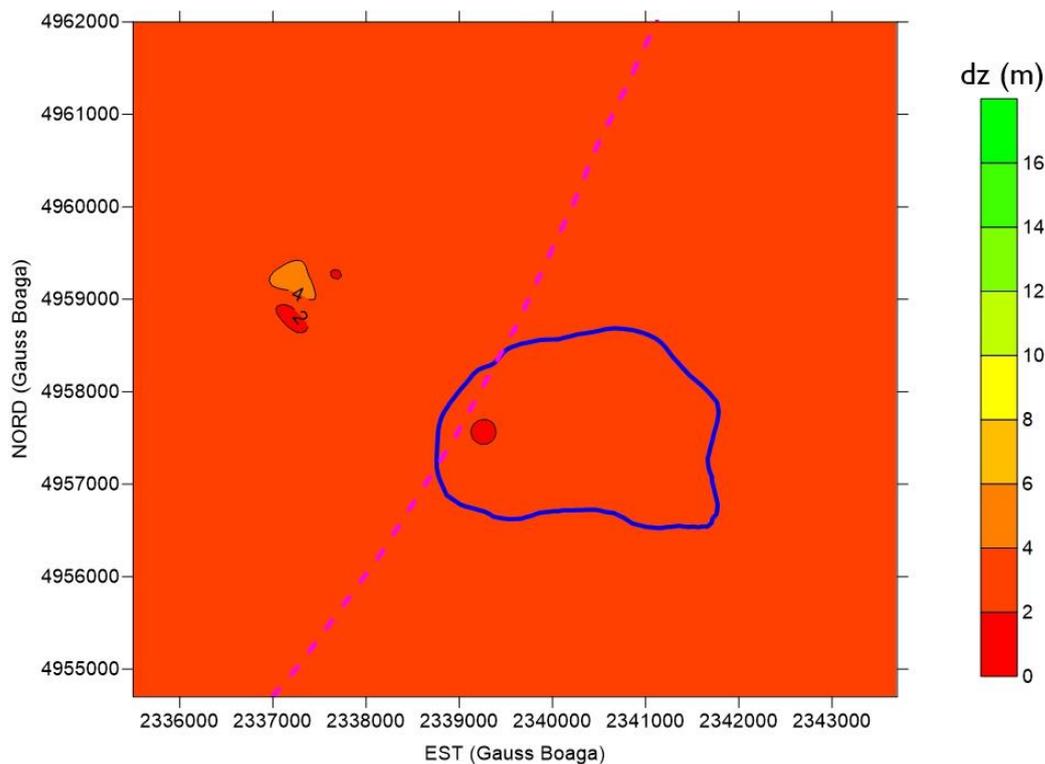


Figura A 8: Isopache (m) del livello PLQ-E2. In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

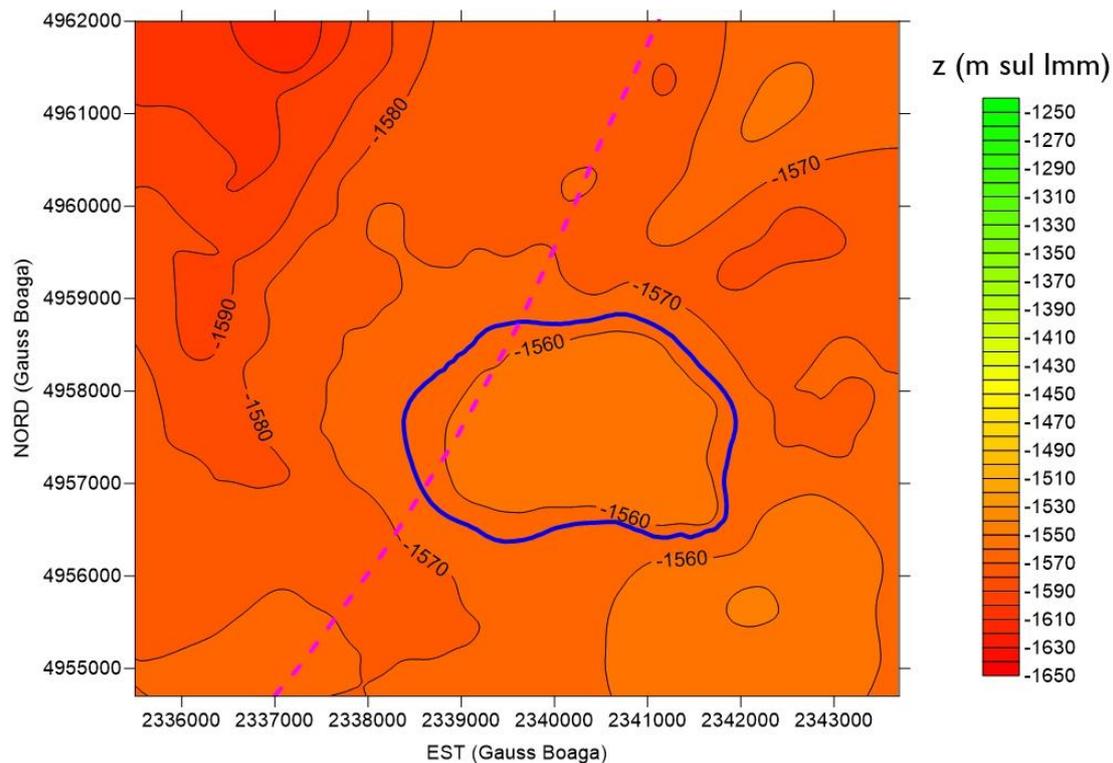


Figura A 9: Isobate (m sul Imm) del top del livello PLQ-F. In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

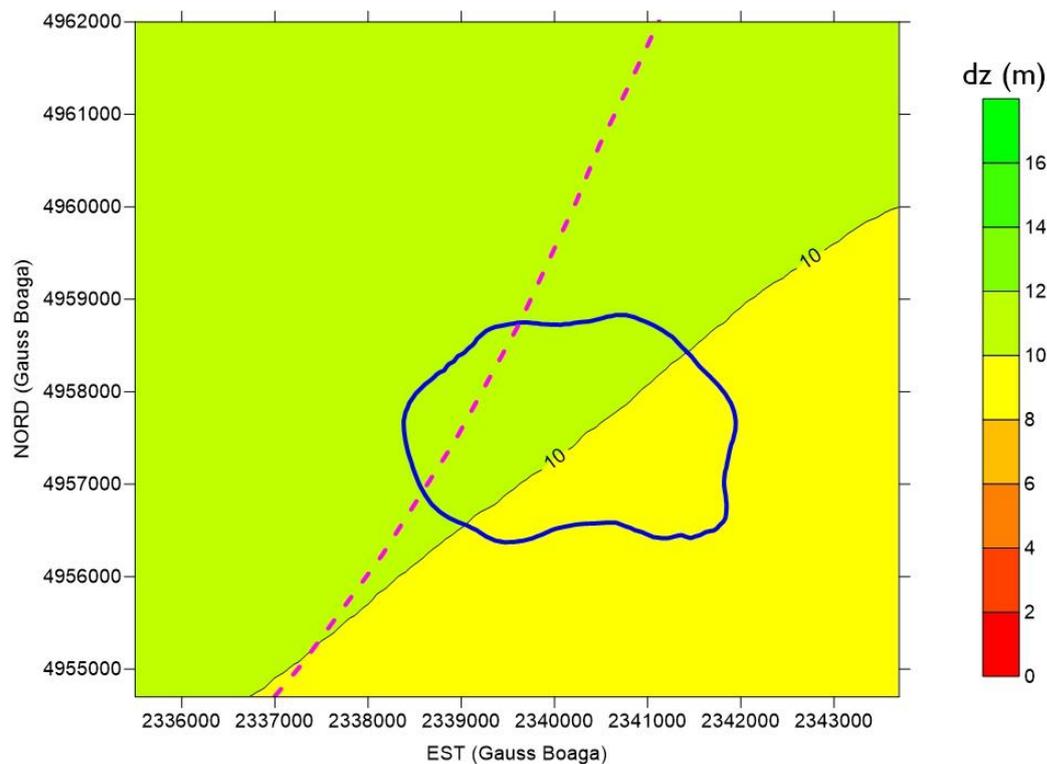


Figura A 10: Isopache (m) del livello PLQ-F. In blu è evidenziata la traccia del GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

ALLEGATO B: isobate regionali degli orizzonti geologici

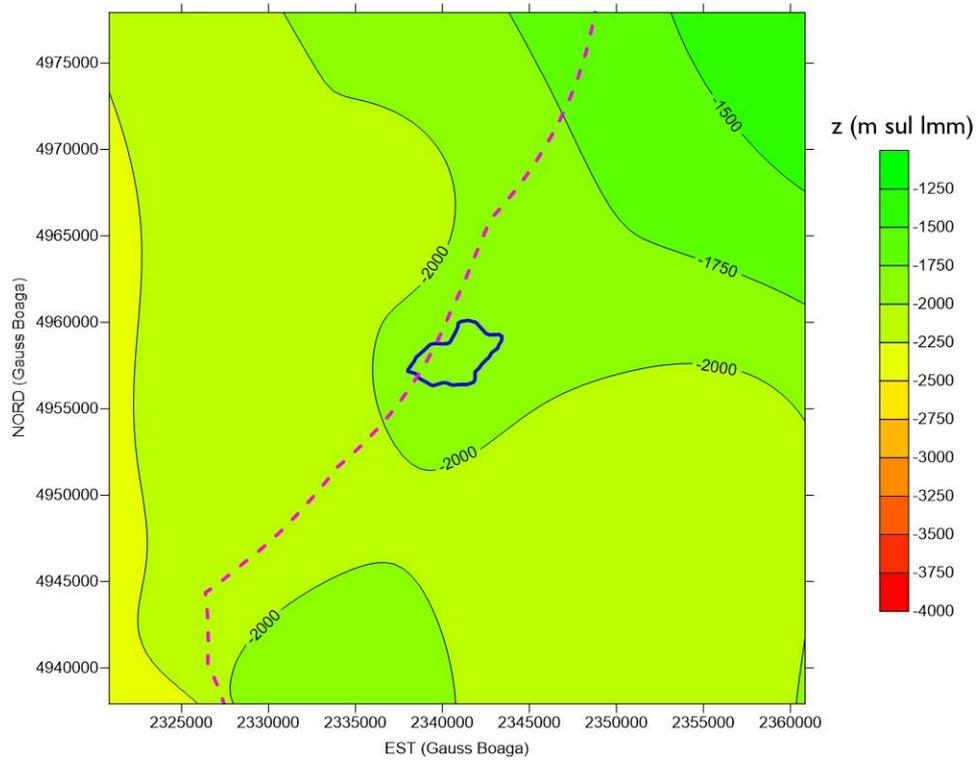


Figura B 1: Isobate (m sul lmm) del top del Pliocene. In blu è evidenziata la traccia dell'involuppo dei GWC e in viola la linea delle 12 miglia.

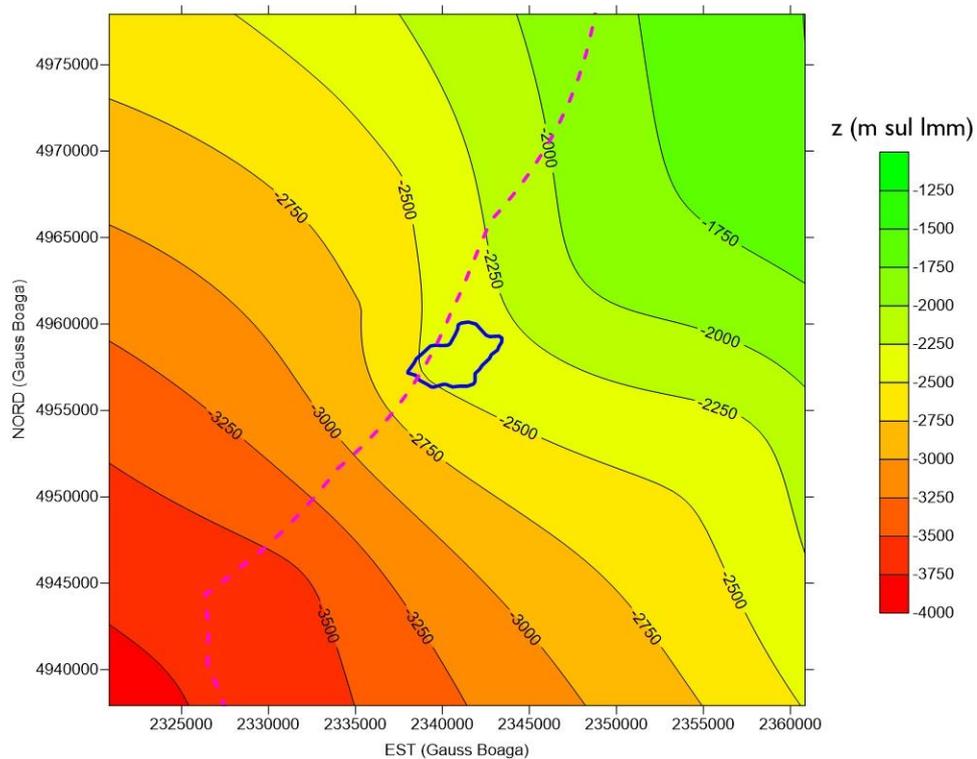


Figura B 2: Isobate (m sul lmm) del top del cretaceo. In blu è evidenziata la traccia dell'involuppo dei GWC e in viola la linea delle 12 miglia.