



Campi di Tea Lavanda Arnica

Modello Geomeccanico di Subsidenza

Management Summary

Executive Summary

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico svolto per valutare quantitativamente la subsidenza indotta dall'attività estrattiva dai campi a gas di Tea, Lavanda e Arnica.

A tal fine è stato costruito un modello numerico 3D agli elementi finiti, in cui il comportamento meccanico del materiale poroso è stato descritto con una legge costitutiva elasto-viscoplastica, calibrata con i dati CGPS registrati in corrispondenza della piattaforma Tea.

I risultati delle simulazioni numeriche indicano che la subsidenza indotta raggiunge i massimi valori di abbassamento (5 cm) ed estensione areale (7 km) a fine produzione (2023), mentre la distanza minima dalla costa è sempre maggiore di 53 km.

Data

20/12/2019

Indice

1	Introduzione	3
2	Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS	4
3	Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti	5
3.1	Approccio metodologico	5
3.2	Geometria e griglia.....	5
3.3	Proprietà dei materiali	7
3.3.1	Densità della roccia	7
3.3.2	Peso specifico dei fluidi saturanti	7
3.3.3	Proprietà meccaniche	7
3.4	Inizializzazione e storia di pressione	10
3.4.1	Stato tensionale iniziale	10
3.4.2	Storia di pressione.....	10
4	Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-viscoplastico	11
5	Confronto con i dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS.....	14
	Bibliografia	15

1 Introduzione

L'obiettivo di questo studio geomeccanico è la valutazione quantitativa della subsidenza indotta dalla produzione dei giacimenti a gas di Tea, Lavanda e Arnica, situati nell'offshore adriatico, circa 58 km a Est di Marina di Ravenna (Figura 1), dove la profondità del fondale marino è di circa 41 m.

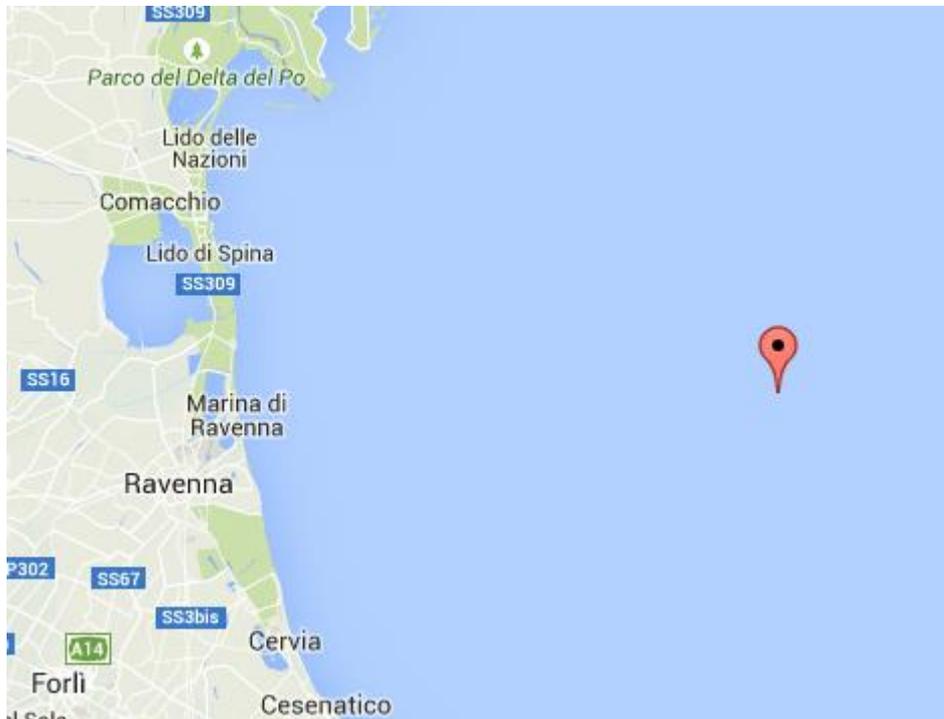


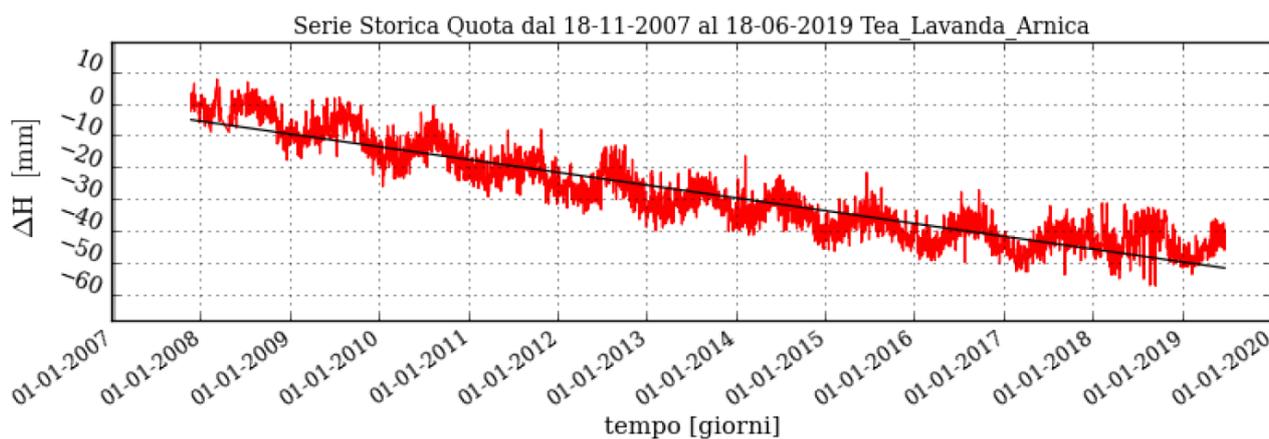
Figura 1 – Posizione della piattaforma di Tea.

La valutazione della subsidenza è stata effettuata con un modello geomeccanico 3D agli elementi finiti, costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [1]; in tale modello le informazioni relative alla geometria dei giacimenti, alle proprietà petrofisiche e all'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dallo studio fluido-dinamico di giacimento, realizzato con il codice di calcolo alle differenze finite Eclipse [2]. La produzione è iniziata nel novembre 2007 ed è previsto che terminerà a maggio 2023. Dal campo sono stati estratti 1812 MSm³ di gas al 31/08/2019 e, a fine produzione (2023), si prevede l'estrazione di 1870 MSm³ di gas.

Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato comunque protratto fino al 2054 in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione al fine di stimare l'evoluzione della subsidenza dopo la chiusura dei pozzi.

2 Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di produzione di Tea in corrispondenza delle coordinate 2362501 m E, 4929500 m N. Il periodo di osservazione in cui sono disponibili i dati va dal 17 novembre 2007 al 18 giugno 2019 (Figura 2).



$$Vel_h = -4.08 \pm 0.03 \text{ mm/y}$$

$$WRMS_h = 5.18 \text{ mm}$$

$$\nu^2 / DOF = 13.79$$

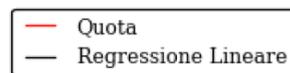


Figura 2 – Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Tea, aggiornate al 18 giugno 2019.

Il periodo di osservazione copre un intervallo temporale di oltre 11 anni e fornisce un valore di velocità di subsidenza medio pari a 4.08 mm/anno.

	Eni S.p.A.	Campi di Tea Lavanda Arnica - Modello Geomeccanico di Subsidenza Management Summary	Pagina 5 di 15
--	-------------------	--	----------------

3 Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

3.1 Approccio metodologico

Lo studio geomeccanico è stato svolto con un modello 3D agli elementi finiti, costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [1] e le seguenti informazioni:

- mappe geologiche dei livelli interessati dai giacimenti, estese in misura tale da descrivere interamente non solo le zone mineralizzate, ma anche gli acquiferi laterali idraulicamente connessi agli strati produttivi;
- dettagliata descrizione della geometria e geologia dei livelli mineralizzati e degli acquiferi ad essi connessi idraulicamente, riprodotte con accuratezza dalla griglia di calcolo numerica;
- distribuzione di pressione nei livelli mineralizzati e negli acquiferi connessi, calcolata con un modello di flusso 3D Eclipse [3];
- proprietà meccaniche della roccia descritte con la legge costitutiva elasto-viscoplastica ‘Soft-Soil-Creep’ [4] (VNM), che considera anche l’effetto della componente viscosa della deformazione;
- calcolo della compattazione dei livelli mineralizzati e degli acquiferi connessi fatto sulla base dello spessore gross degli stessi e della più aggiornata stima della compressibilità uniassiale ottenuta da misure in situ effettuate nei pozzi equipaggiati con markers nell’offshore adriatico calibrata in modo da riprodurre le misure CGPS effettuate sulla piattaforma di Tea.

3.2 Geometria e griglia

Il dominio del modello geomeccanico è stato ottenuto da quello del modello fluido-dinamico. Quest’ultimo interessa un’area di circa 43x43 km² ed è stato discretizzato con una griglia composta da 283x292x32 celle nelle direzioni I, J e K rispettivamente, per un totale di circa 2.7 milioni di celle, di cui oltre un milione attive [3].

Per limitare gli effetti di bordo dovuti alle condizioni meccaniche imposte al contorno del modello geomeccanico (spostamento nullo alla base e spostamento orizzontale impedito ai lati), il suo dominio deve essere sufficientemente esteso. Quindi, nel piano orizzontale sono stati aggiunti 5 elementi di *sideburden*, per ogni lato, fino a ricoprire un’area di circa 66x60 km²; invece, in direzione verticale, il dominio è stato esteso sia verso il basso fino alla profondità di 7000 m, con 5 livelli di *under-burden*, sia verso l’alto fino al fondale marino, con 5 livelli di *over-burden*.

Infine, per limitare il numero dei gradi di libertà, è stato effettuato un processo di *upscaling* orizzontale unendo tra loro un differente numero di celle a seconda della distribuzione del gas e delle dimensioni delle celle stesse.

La griglia del modello geomeccanico risulta, quindi, composta da 120x136x42 elementi, per un totale di circa 700000 elementi e 2.5 milioni di gradi di libertà (Figura 3).

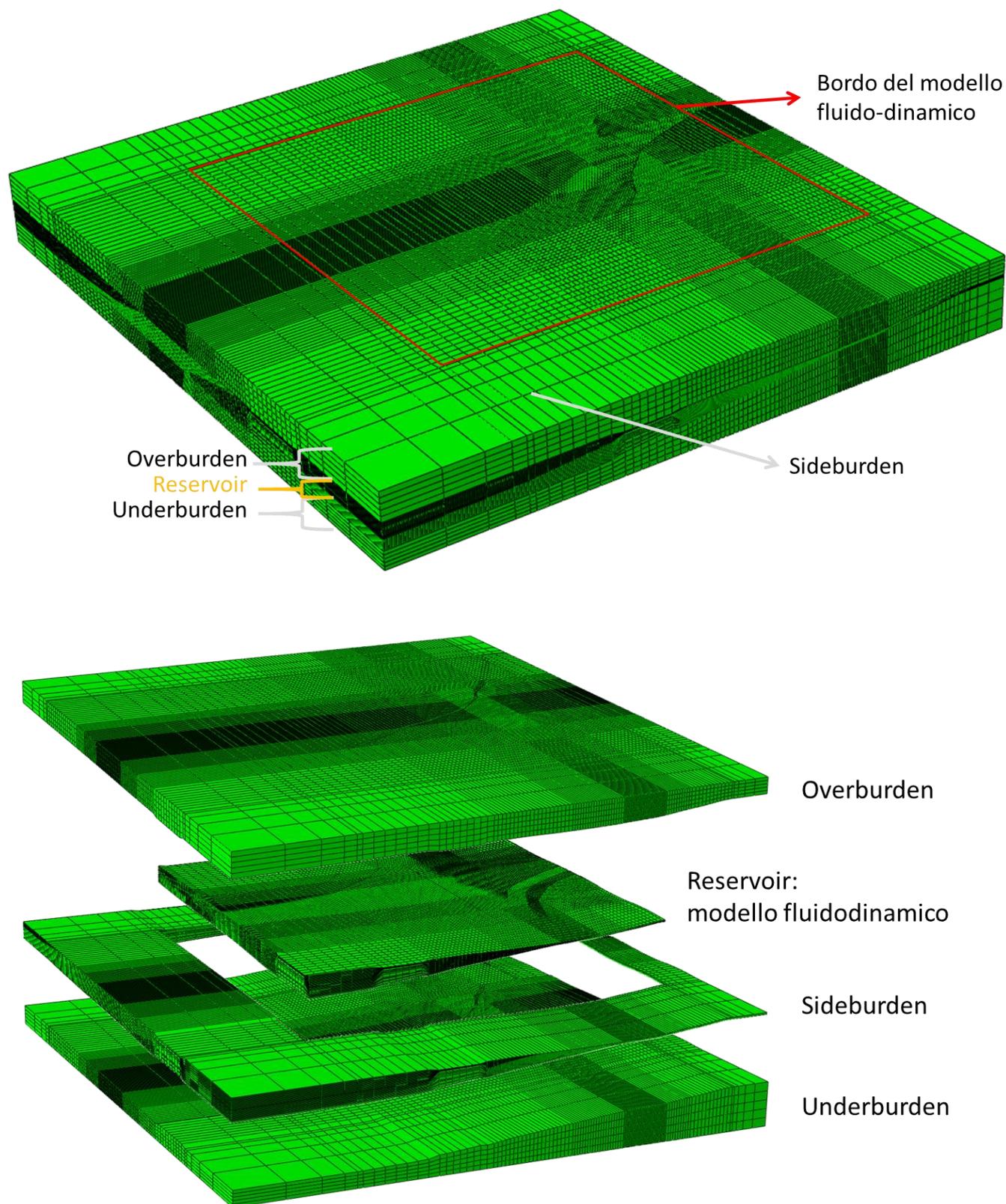


Figura 3 –Estensione del modello geomeccanico (il riquadro rosso indica l’estensione del modello Eclipse).

3.3 Proprietà dei materiali

3.3.1 Densità della roccia

Partendo dai density log e dai sonic log acquisiti lungo i pozzi Arnica-1V, Lavanda-1Dir e Tea-1V, è stato possibile definire il seguente profilo di densità:

$$\rho(z_{tvdss}) = 1.197 \cdot (z_{tvdss} - z_{fm})^{0.0845} \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (1)$$

ove le profondità (z_{tvdss}) sono misurate in metri TVDSS (*True Vertical Depth Sub Sea*) e z_{fm} la profondità del fondale marino, al di sopra del quale la densità è quella dell'acqua (1030.0 kg/m^3). La densità della roccia è stata fornita al modello FE in forma tabulare, come funzione della profondità.

3.3.2 Peso specifico dei fluidi saturanti

Viene fornito al modello geomeccanico il valore del peso specifico dei fluidi saturanti. Per ogni regione porosa tale valore (relativo al gas o all'acqua) è stato considerato costante. Esso è stato determinato partendo dalla profondità del contatto gas-acqua e dalla distribuzione iniziale delle pressioni calcolata dal modello fluido-dinamico [3].

3.3.3 Proprietà meccaniche

Il comportamento meccanico del materiale poroso è stato descritto secondo la legge costitutiva elasto-viscoplastica 'Soft-Soil-Creep' [4] (VNM), che è stata formulata arricchendo il modello elasto-plastico 'Modified Cam-Clay Model' [6] (MCCM) con la componente viscosa della deformazione. Evidenze sperimentali mostrano, infatti, che materiali come quelli dei giacimenti dell'area adriatica possono presentare una risposta di tipo elasto-viscoplastico alle variazioni di sforzo efficace [7].

I seguenti parametri del VNM hanno un chiaro significato fisico e, fatta eccezione per l'indice di creep, sono analoghi a quelli del MCCM:

- λ^* indice di compressione modificato;
- κ^* indice di ricompressione modificato;
- μ^* indice di creep modificato;
- ν rapporto di Poisson;
- M pendenza della retta di stato critico;
- $pseudo-OCR_{ini-rif}$ grado di sovraconsolidazione iniziale.

Al parametro ν è stato assegnato il valore di 0.3, mentre M è stata posta pari a 1.33 [5].

I valori dei parametri λ^* , κ^* e μ^* sono stati ottenuti direttamente dall'interpretazione dei risultati di prove di laboratorio effettuate su 8 campioni di roccia, estratti da una carota prelevata dal pozzo Tea 1 [8]. In particolare, sono stati assegnati i valori medi: $7.47e-2$, $5.67e-3$ e $1.17e-3$, rispettivamente.

Invece, data l'impossibilità di stimare $pseudo-OCR_{ini-rif}$ da prove di laboratorio, si è assunto che la velocità di deformazione sia stata costante durante tutto il periodo di sedimentazione e si è ottenuta una stima analitica, funzione di λ^* , κ^* e μ^* , pari a 1.3073.

Successivamente, al fine di riprodurre con la maggior accuratezza possibile le misure registrate dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma Tea (§2), è stato necessario modificare il valore assegnato a 2 parametri:

- per μ^* , dal valore medio da laboratorio di $1.17e-3$ a $0.83e-3$;
- per *pseudo-OCR_{ini-rif}*, dalla stima analitica di 1.3073 a 1.4437 .

È importante evidenziare che tali valori ricadono nel corrispondente intervallo di variazione determinato dalle 8 prove di laboratorio, direttamente per μ^* e indirettamente per *pseudo-OCR_{ini-rif}* [8].

Inoltre, si sottolinea che, per mezzo di tabelle di moltiplicatori di volume poroso costruite ad-hoc, anche nel modello fluido-dinamico si è tenuto conto della legge costitutiva elasto-viscoplastica adottata nel modello geomeccanico; ciò garantisce la necessaria coerenza all'approccio di accoppiamento idro-meccanico monodirezionale applicato nel presente studio.

Infine, si precisa che gli elementi corrispondenti a celle inattive nel modello fluido-dinamico e alle regioni di over-, under- e side-burden sono descritti come mezzi elastici lineari non porosi, approssimazione ragionevole data l'assunzione che in tali intervalli non vi siano variazioni di pressione dovute alla produzione. In particolare, per gli elementi corrispondenti ai livelli inattivi (*interlayer*) del modello fluido-dinamico è stata utilizzata, a vantaggio di sicurezza, la stessa comprimibilità degli elementi non porosi corrispondenti a celle inattive del livello attivo immediatamente superiore. La comprimibilità edometrica c_m per tali elementi è così definita:

$$c_m = \kappa^* / \sigma'_v \quad (2)$$

dove σ'_v è la tensione efficace verticale, definita come la differenza tra la tensione totale verticale e la pressione dei pori p derivata dal modello fluido-dinamico:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (3)$$

La Tabella 1 riporta i valori di comprimibilità edometrica assegnata agli elementi non porosi, raggruppati per livello, sia geologico sia dei modelli.

Tabella 1 – Livelli geologici, Eclipse e Abaqus. e comprimibilità edometrica per materiali non porosi.

	LIVELLO GEOLOGICO	LIVELLO ECLIPSE	LIVELLO ABAQUS	Profondità mssl	Tensione vert. bar	Pressione dei pori bar	Tensione vert. eff. bar	Porosità -	c _m 1/bar
OVERBURDEN	\	\	1	304.8	49.9	30.8	19.1	\	2.973E-04
			2	832.4	154.7	84.1	70.6		8.036E-05
			3	1360.0	266.1	137.4	128.7		4.407E-05
			4	1887.5	381.5	190.7	190.7		2.973E-05
			5	2415.1	499.7	244.0	255.7		2.218E-05
LAVANDA	PL3-F1	PL3-F1 Sup	1	2891.1	608.3	318.3	290.0	0.24	1.956E-05
			2	2894.3	609.0	318.7	290.4	0.24	1.953E-05
			3	2896.6	609.6	318.9	290.6	0.24	1.951E-05
		PL3-F1 Inf.	4	2901.1	610.6	319.2	291.4	0.24	1.946E-05
			5	2906.9	611.9	319.9	292.1	0.24	1.942E-05
			6	2911.6	613.0	320.3	292.7	0.24	1.937E-05
	Interlayer		7						1.924E-05
TEA (+Lav2dir)	PL3-H		8	2942.2	620.0	323.1	297.0	0.26	1.910E-05
			9	2945.0	620.7	323.4	297.3	0.26	1.908E-05
	Interlayer		10						1.924E-05
	PL3-H1		11	2907.9	612.2	319.9	292.3	0.26	1.940E-05
			12	2915.0	613.8	320.6	293.2	0.26	1.934E-05
			13	2952.7	622.5	324.2	298.2	0.26	1.902E-05
			14	2958.3	623.8	324.7	299.0	0.26	1.897E-05
	Interlayer		15						1.892E-05
	PL3-H2		16	2968.3	626.1	325.6	300.5	0.27	1.887E-05
			17	2977.0	628.1	326.6	301.5	0.27	1.881E-05
		18	2988.3	630.7	327.4	303.3	0.27	1.870E-05	
		19	3005.1	634.5	329.0	305.5	0.27	1.856E-05	
Interlayer		20						1.821E-05	
ARNICA	PL3-H3	PL3-H3 Sup	21	3078.4	651.5	334.1	317.4	0.26	1.787E-05
			Interlayer		22				
	PL3-H3	PL3-H3 Sup	23	3195.7	678.6	347.2	331.5	0.26	1.711E-05
			Interlayer		24				
	PL3-H3	PL3-H3 Sup	25	3298.2	702.4	357.0	345.4	0.26	1.642E-05
			Interlayer		26				
	PL3-H3	PL3-H3 Inf	27	3558.7	763.2	385.1	378.1	0.26	1.500E-05
			Interlayer		28				
	PL3-H3	PL3-H3 Inf	29	3685.3	792.9	393.2	399.7	0.26	1.419E-05
			Interlayer		30				
	PL3-H3	PL3-H3 Inf	31	3862.0	834.4	409.9	424.5	0.26	1.336E-05
			Interlayer		32				
UNDERBURDEN	\	\	1	5141.3	1139.8	519.5	620.3	\	9.143E-06
			2	5554.4	1239.8	561.2	678.6		8.357E-06
			3	5967.4	1340.6	603.0	737.6		7.689E-06
			4	6380.4	1441.9	644.7	797.2		7.114E-06
			5	6793.5	1543.7	686.4	857.3		6.615E-06

	Eni S.p.A.	Campi di Tea Lavanda Arnica - Modello Geomeccanico di Subsidenza Management Summary	Pagina 10 di 15
---	-------------------	--	-----------------

3.4 Inizializzazione e storia di pressione

3.4.1 Stato tensionale iniziale

Lo sforzo totale verticale è stato calcolato dal gradiente di overburden definito a partire dai density log come descritto nel paragrafo 3.3.1. Lo sforzo orizzontale efficace σ'_h è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico definite come:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (4)$$

dove K_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.54 [5].

3.4.2 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale del campo di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello fluido-dinamico, è stata imposta come condizione forzante nei nodi del modello geomeccanico corrispondenti ai livelli dei giacimenti e degli acquiferi connessi. Le pressioni sono state importate in 26 step temporali, selezionati in modo che non si verificassero eccessive variazioni di pressione tra due intervalli successivi.

4 Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-viscoplastico

Le stime di subsidenza fornite dal modello geomeccanico sono riportate in Tabella 2 per gli step di fine produzione del campo (2023) e di fine simulazione (2054). In particolare, si riporta il valore di massima subsidenza e l'estensione del fenomeno, calcolata come distanza del punto di massima subsidenza dalla linea di iso-subsidenza dei 2 cm.

Tabella 2 – Risultati finali: massima subsidenza ed estensione del fenomeno.

Data	Subsidenza massima [cm]	Estensione massima [km]	Distanza minima dalla costa [km]
2023 (fine produzione)	5	7	53
2054 (fine simulazione)	4	6	54

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza attesa è pari a 5 cm ed è previsto che venga raggiunto alla fine della produzione (2023) (Figura 4); tale valore risulta localizzato in corrispondenza del punto di coordinate 2361432 m Est e 4929969 m Nord che dista 1200 metri dalla piattaforma di Tea;
- nel 2023 (fine della produzione del campo) la massima estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm, calcolata come la massima distanza del punto di massima subsidenza dalla linea dei 2 cm, è pari a 7 km (Figura 5). Tale estensione si riduce a 6 km alla fine della simulazione (Figura 6) per effetto della rapida ripressurizzazione del giacimento;
- il fenomeno si esaurisce a circa 53 km dalla linea di costa.

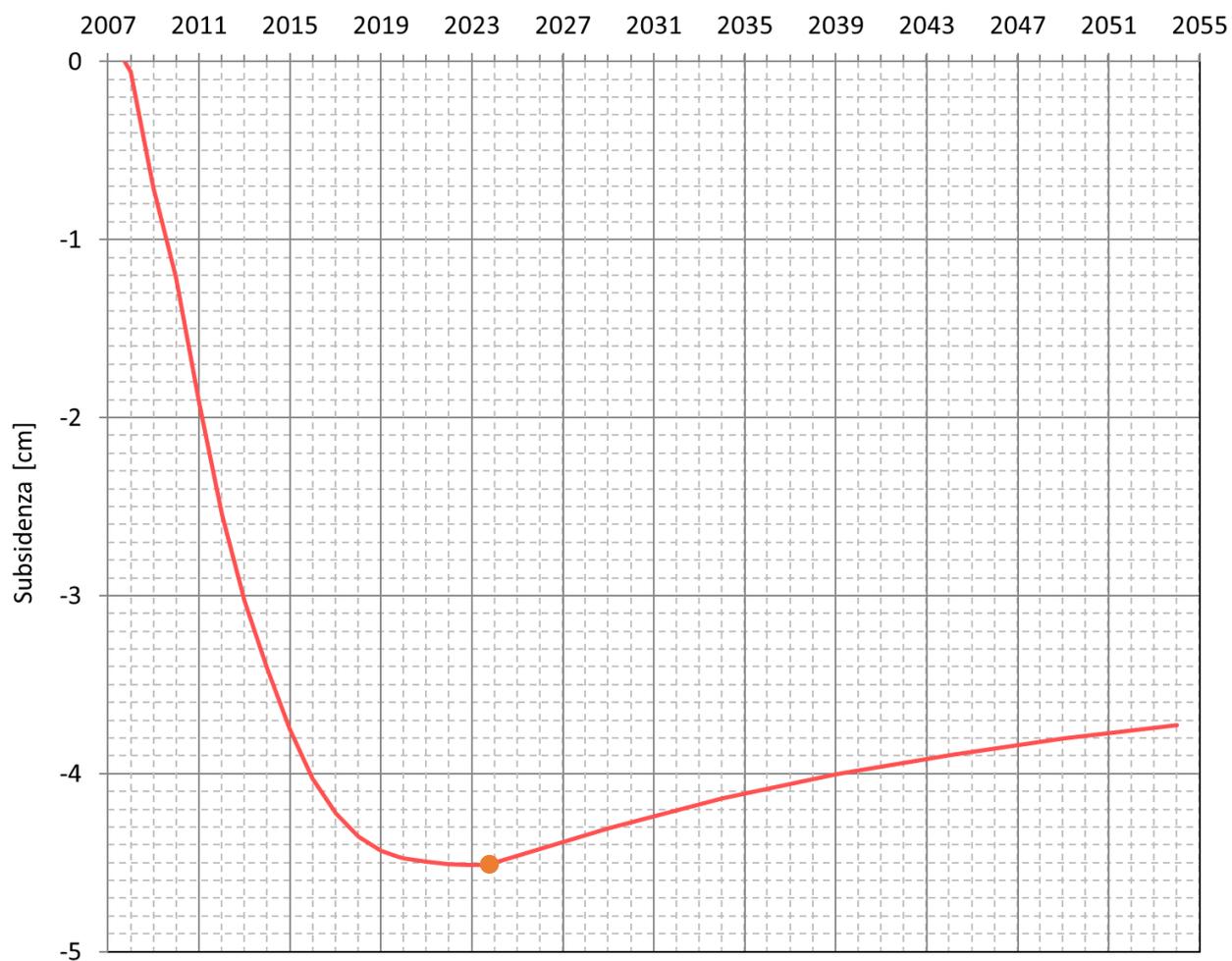
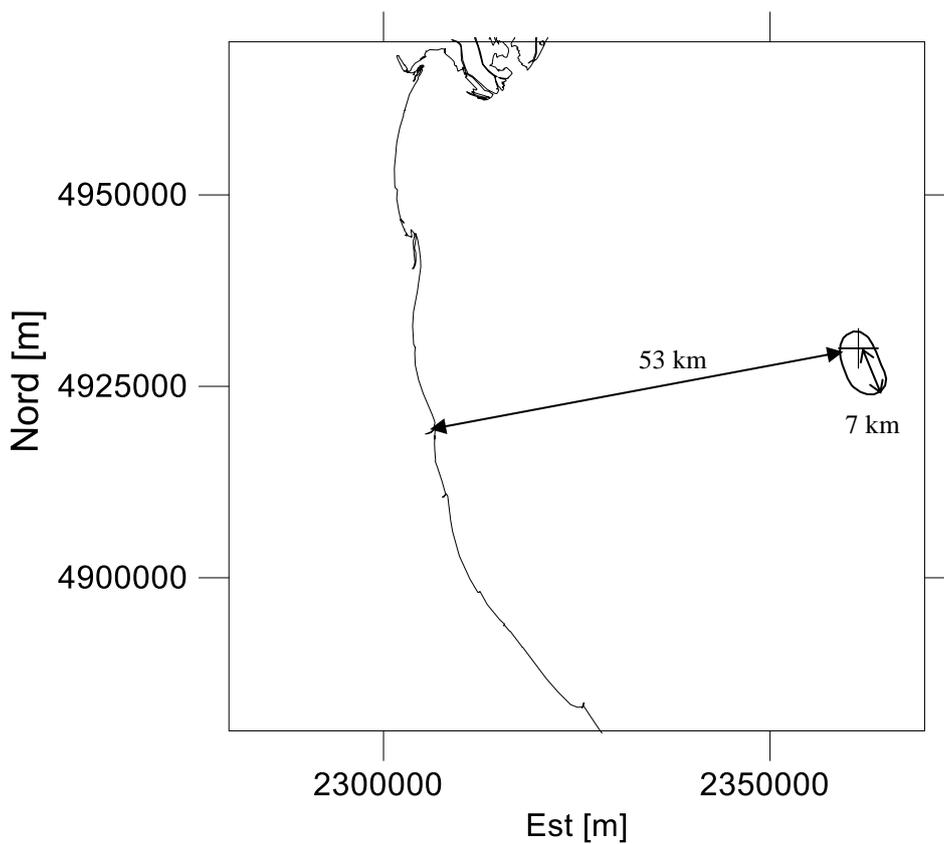
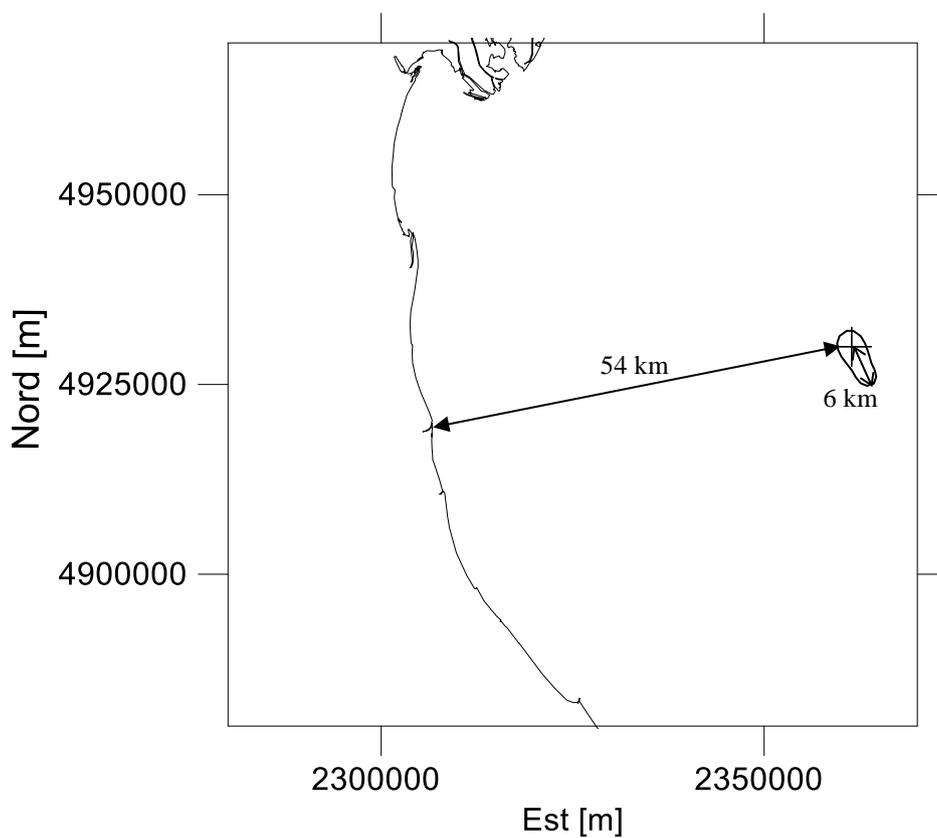


Figura 4 – Evoluzione temporale della subsidenza nel punto di massimo. Il cerchio arancione indica l’abbassamento atteso al termine della produzione (settembre 2023).

**Figura 5 – Linea di iso-subsidenza dei 2 cm a fine produzione (2023).****Figura 6 – Curve di iso-subsidenza di 2 cm a fine simulazione (2054).**

5 Confronto con i dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS

I valori di subsidenza calcolati dal modello numerico sono stati confrontati con quelli misurati dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di produzione di Tea.

Allo spostamento misurato dalla stazione CGPS, è stata sottratta la componente tettonica della subsidenza, stimata in circa 1 mm/y, sulla base della misura CGPS effettuata sulla piattaforma di Naomi-Pandora durante il periodo di chiusura della produzione e compatibile con le stime disponibili in letteratura, come mostrato in [9].

Il confronto tra i risultati ottenuti dal modello geomeccanico e la serie storica misurata con il CGPS, a cui è stata sottratta la componente sopra indicata, è mostrato in Figura 7.

Si ricorda che nel presente studio è stata calibrata una legge di variazione della compressibilità edometrica con lo stress efficace di tipo elasto-viscoplastico, che ha permesso di riprodurre con accuratezza gli spostamenti registrati sulla piattaforma di Tea, come è possibile osservare in Figura 7.

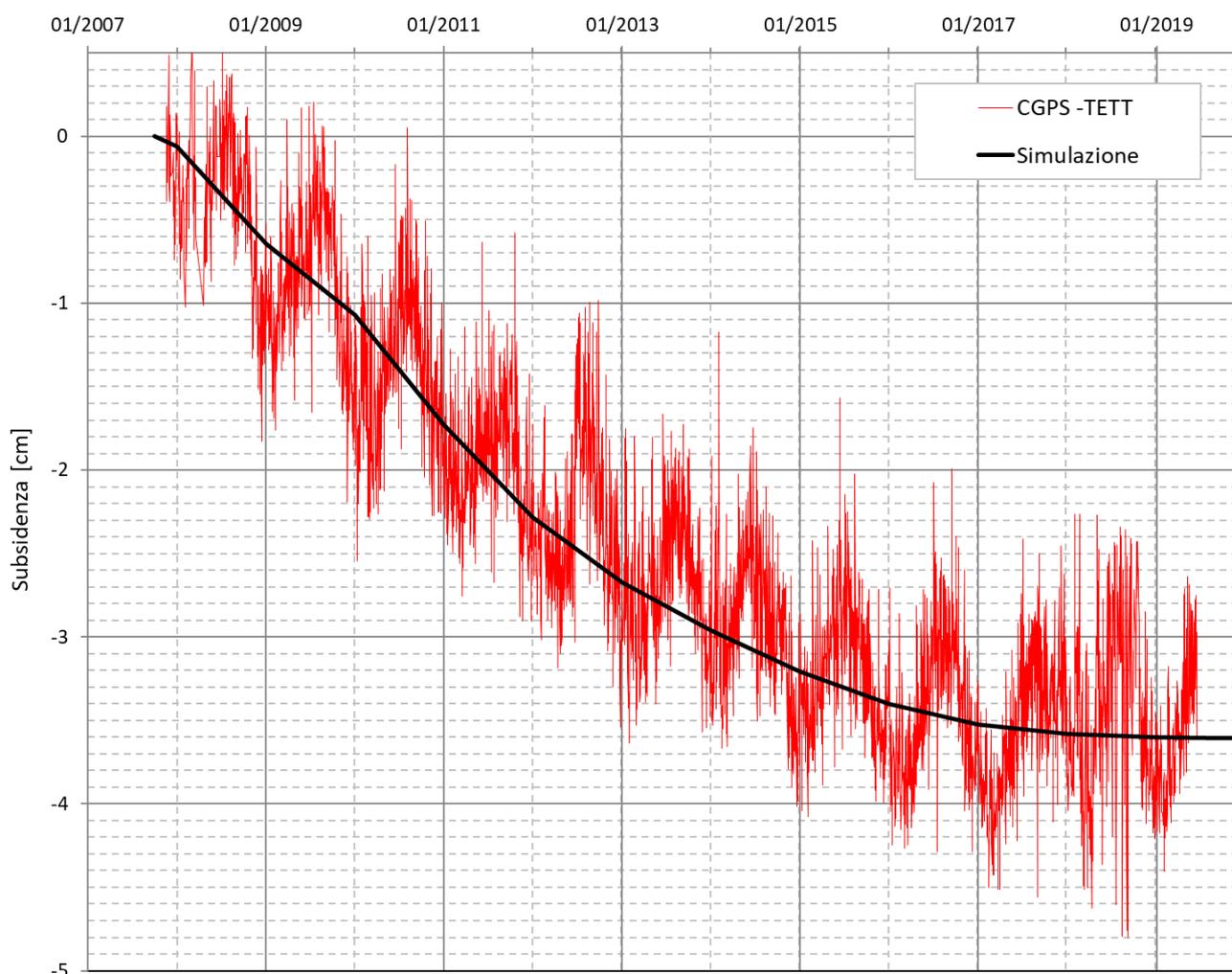


Figura 7 – Confronto tra spostamento verticale misurato e simulato, depurato dalla componente naturale della subsidenza, in corrispondenza della stazione CGPS di Tea.

	Eni S.p.A.	Campi di Tea Lavanda Arnica - Modello Geomeccanico di Subsidenza Management Summary	Pagina 15 di 15
--	-------------------	--	-----------------

Bibliografia

1. Abaqus™, Dassault, versione 6.13.
2. Eclipse™, Schlumberger, versione 2013.2.
3. Campi di Tea Lavanda e Arnica – Studio di giacimento – Scheda riassuntiva. Relazione REIT/EORG IPET E9DFED83-0. Dicembre 2019.
4. P.A. Vermeer and H.P. Neher: A soft soil model that accounts for creep. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam, 1999.
5. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino: *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala* - 04/1996.
6. Roscoe, K. and J. B. Burland, 1968. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, 535-609.
7. G. Volonté, F. Gemelli, S.K. Nguyen, G. Musso, R. Lancellotta, M. Brignoli and S. Mantica: Advances in geomechanical subsidence modeling: effects of elasto-visco-plastic constitutive behavior. ARMA 17-1043. 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, June 2017.
8. Italy – Tea 1 Well – Geomechanical Analyses. Relazione LAIP 21/2019/GM. Ottobre 2019.
9. Campo di Naomi-Pandora - Modello Elasto-Plastico di Subsidenza Management Summary – TERA 13/2013. Dicembre 2013.