



eni s.p.a.
Development, Operations &
Technology

OPS

DEPARTMENT

TERA

DOCUMENTO #

02/2015

Campo di Guendalina Studio di Subsidenza Management Summary

LISTA DI DISTRIBUZIONE:

GEOES/CS

GEOD/CS

AUTORI

F. Bottazzi	TENC

Data: 27 febbraio 2015

0	Rapporto Finale	<i>M. C. Dacome</i> M. C. Dacome	D. Casini Ropa
		<i>S. Mantica</i> S. Mantica	<i>M. Rotondi</i> M. Rotondi
AGGIORNAMENTI		CONTROLLATO DA	APPROVATO DA

Indice

1	Introduzione	3
2	Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti	5
2.1	Approccio metodologico.....	5
2.2	Geometria del modello.....	5
2.3	Proprietà dei materiali	6
2.3.1	Densità della roccia	6
2.3.2	Compressibilità uniassiale.....	7
2.4	Inizializzazione e storia di pressione	10
2.4.1	Stato tensionale iniziale	10
2.4.2	Storia di pressione	11
3	Risultati delle analisi eseguite.....	12
4	Confronto con i dati disponibili	17
4.1	Stazione CGPS	17
4.2	Misure di compattazione rilevate da markers radioattivi.....	18
	Bibliografia	21

1 Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo al campo di Guendalina, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento. Il campo di Guendalina è posto nell'offshore Adriatico a circa 45 km dalla costa dell'Emilia-Romagna (Figura 1), è stato scoperto nel 1998 mediante la perforazione del pozzo esplorativo Guendalina 1. Analogamente a diversi altri giacimenti localizzati in Adriatico, si tratta di un campo costituito da una successione di livelli mineralizzati, idraulicamente indipendenti, ciascuno dei quali è collegato a un acquifero laterale. La profondità del fondale marino è di circa 42 m.

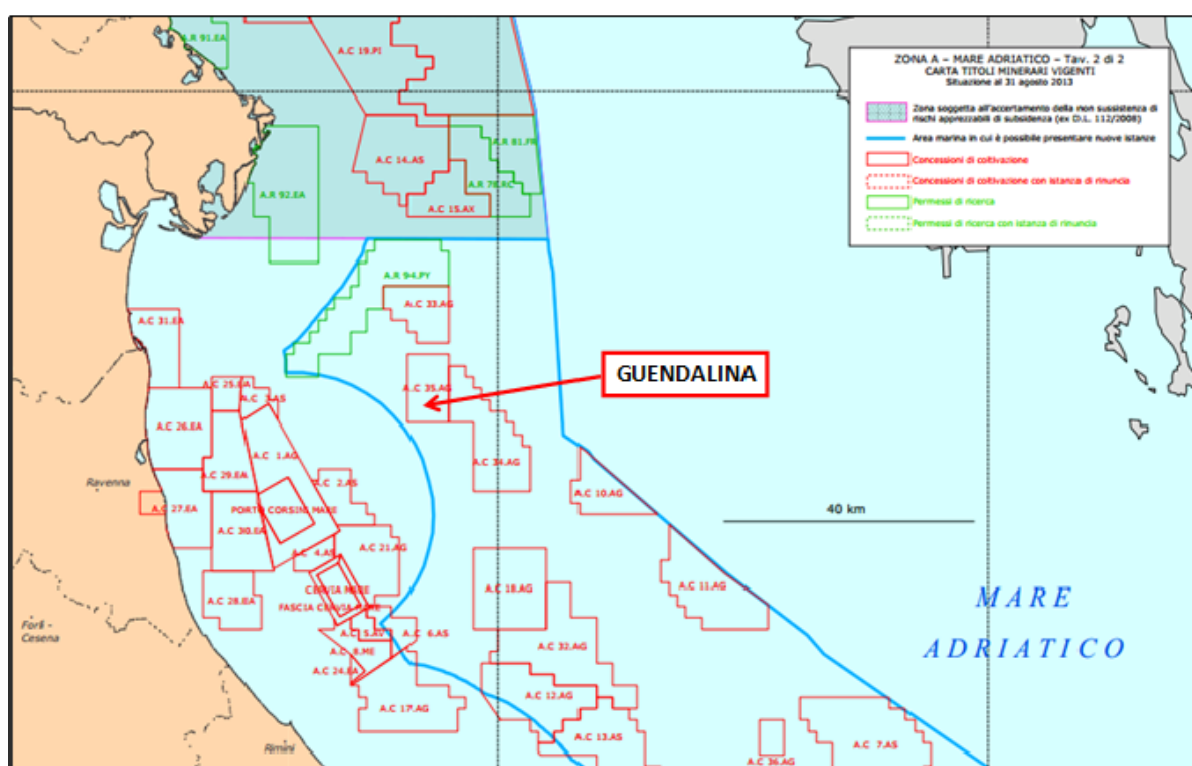



Figura 1 – Ubicazione del campo di Guendalina.

La valutazione della subsidenza per il campo in esame è stata effettuata da MED Ingengneria S.r.l. [1] con un modello geomeccanico 3D ad elementi finiti (FE) costruito utilizzando il codice di calcolo GEPS3D; in tale modello le informazioni relative alla geometria del giacimento, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione della pressione sono state ottenute dallo studio fluido-dinamico di giacimento realizzato con il codice di calcolo alle differenze finite (FD) Eclipse [2].


La produzione del giacimento è iniziata nell'ottobre del 2011 attraverso i pozzi produttori Guendalina 2dir e Guendalina 3. Attualmente il campo produce da 2 string (Guendalina 3 corta e lunga). Il presente studio analizza due differenti scenari di produzione denominati rispettivamente Do Nothing¹ (DN) e Side Track² (ST). La data di fine produzione è stimata dal modello fluido-dinamico e, quindi, dipende anche dalla compressibilità dei pori. Dato che per quest'ultima, come descritto nel §2.3.2 sono stati considerati tre diversi scenari, basati sulla correlazione regionale [5],

¹ Corrispondente al caso Do Nothing in [3].

² Corrispondente al caso Do Nothing + Sidetrack G-2dir in [3].

	eni s.p.a Development, Operations & Technology	Campo di Guendalina Studio di Subsidenza Management Summary	Pagina 4 di 21
---	---	--	----------------

il termine della produzione è previsto tra il 2016 e il 2017 per il caso DN e tra il 2019 e il 2020 nel caso ST. La simulazione è stata protratta per circa 30 anni dopo la chiusura del campo in modo da considerare la propagazione del disturbo di pressione negli acquiferi connessi alla zona mineralizzata.

	eni s.p.a Development, Operations & Technology	Campo di Guendalina Studio di Subsidenza Management Summary	Pagina 5 di 21
---	---	--	----------------

2 Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

2.1 Approccio metodologico

Lo studio geomeccanico di subsidenza [1] è stato condotto utilizzando il codice FE GEPS3D. La costruzione del modello è stata basata sulle seguenti informazioni:

- mappe geologiche dei livelli interessati dal giacimento, estese in misura tale da descrivere interamente non solo le zone mineralizzate ma anche gli acquiferi laterali idraulicamente connessi agli strati produttivi;
- descrizione dettagliata di geometria e geologia dei livelli mineralizzati e degli acquiferi ad essi connessi idraulicamente, riprodotti con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica;
- distribuzione di pressione nei livelli mineralizzati e negli acquiferi connessi, calcolata con un modello di flusso 3D Eclipse [3]. Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato protratto fino alla data 31/12/2052 (a pozzi chiusi), in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione;
- descrizione della risposta meccanica della roccia con una legge costitutiva ipo-plastica, che tiene conto non solo della variazione della compressibilità uniassiale (c_m) con lo stress efficace, ma modella accuratamente anche gli eventuali fenomeni di espansione dei sedimenti soggetti a ripressurizzazione;
- calcolo della compattazione dei livelli mineralizzati e degli acquiferi connessi basato sullo spessore *gross* degli stessi e sulla più aggiornata stima della compressibilità uniassiale, ottenuta da misure in situ effettuate nei pozzi equipaggiati con markers nell'offshore Adriatico, ulteriormente calibrata sui dati di monitoraggio nel pozzo Guendalina 2dir e sulle misure da CGPS disponibili.

2.2 Geometria del modello

Il modello Eclipse di Guendalina [3] è composto da 162x170x25 celle nelle direzioni I, J e K rispettivamente, per un totale di quasi 700,000 di celle, di cui circa 500,000 attive, per un'estensione areale di circa 16x16 km².

La generazione di una griglia di calcolo geomeccanica in grado di riprodurre accuratamente i volumi depletati costituisce un elemento di fondamentale importanza per garantire l'attendibilità delle previsioni modellistiche. Si è scelto di simulare un dominio di estensione areale 40 x 40 km, limitato superiormente dalla batimetria dell'Adriatico settentrionale e inferiormente da un basamento posto a 5 km di profondità. La scelta dell'estensione areale del dominio è stata effettuata in modo da ubicare il campo in posizione baricentrica, collocando la frontiera del modello sufficientemente lontano dal volume che si depleta, così da poter ragionevolmente assumere spostamenti nulli su di essa. La griglia di calcolo tridimensionale è stata ottenuta utilizzando un generatore automatico di mesh 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. In questo modo è stato generato un dominio di forma pressoché parallelepipedica, discretizzato con elementi tetraedrici i cui vertici giacciono sul top e bottom dei livelli geologici, in modo tale da riprodurre con accuratezza le chiusure a pinch-out, i volumi dei pool mineralizzati e le geometrie dell'acquifero connesso idraulicamente al giacimento, nonché dei livelli argillosi che costituiscono gli interlayer, l'overburden e l'underburden. La proiezione della griglia 2D sulle superfici degli

orizzonti geologici e la successiva eliminazione degli elementi degeneri o eccessivamente distorti ha condotto alla generazione di una discretizzazione FEM con 482,208 nodi e 2,833,297 tetraedri (Figura 2).

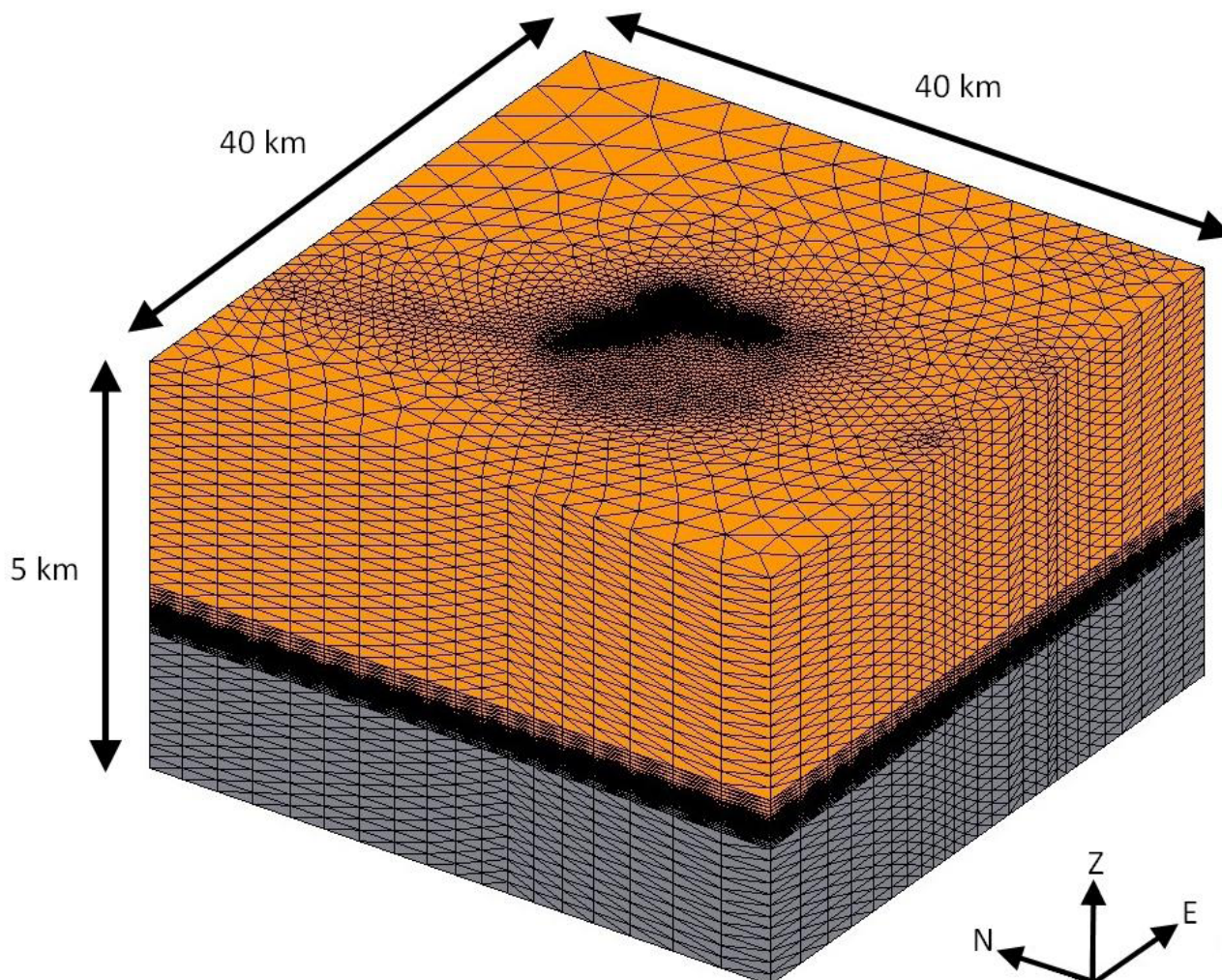


Figura 2 – Vista assonometrica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 10 volte rispetto a quella orizzontale.

2.3 Proprietà dei materiali

2.3.1 Densità della roccia

Per ricostruire il profilo di densità ρ sono stati utilizzati i *density log* e i *sonic log* acquisiti nei pozzi Guendalina 1 (267-3106 m TVDSS), Guendalina 1dir (2783-3113 m TVDSS), Guendalina 2dir (1366-3188 m TVDSS) e Guendalina 3 (1266-3133 m TVDSS). Per praticità, tale profilo può essere rappresentato attraverso la sua regressione effettuata mediante la seguente funzione:

$$\rho(z) = 1.4111 \cdot (z - z_{fm})^{0.0622} \quad (1)$$



con z misurata in metri TVDSS (True Vertical Depth Sub Sea) e ρ in g/cm^3 , mentre la profondità del fondale marino z_{fm} è pari a 42 m. Per la densità dell'acqua marina è stato assunto il valore di 1030.0 kg/m^3 . Il profilo di densità così ottenuto è stato integrato per ottenere un profilo di sforzo totale verticale σ_v :

$$\sigma_v(z) = 0.130323(z - z_{fm})^{1.0622} + 10^{-5} \rho_w g z_{fm} \quad (2)$$

dove σ_v è lo sforzo totale verticale (in bar), z è la profondità (in metri TVDSS), ρ_w è la densità dell'acqua assunta pari a 1030 kg/m^3 e g è l'accelerazione di gravità assunta pari a 9.807 m/sec^2 .

2.3.2 Compressibilità uniassiale

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la compressibilità uniassiale c_m del materiale. E' oggi comunemente accettato [4] che i valori più attendibili di questo parametro, generalmente funzione non lineare dello stress efficace, siano quelli ottenuti dalle misure *in situ* tramite markers.

Si è, quindi, utilizzata per la stima della compressibilità una correlazione regionale ricavata da uno studio statistico basato sui valori di compressibilità calcolati su campi dell'Adriatico dotati di marker radioattivi. Tale correlazione tra c_m e tensione verticale efficace σ'_v è stata proposta da Hueckel *et al.* [5] ed è riportata in Figura 3 ove sono rappresentate la miglior stima

$$c_m = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \quad (3)$$

ed il quantile superiore al 97.5%. Nella relazione (3) σ'_v è la tensione efficace verticale espressa in bar e c_m è espresso in bar^{-1} . Inoltre in Figura 3 la relazione di Hueckel *et al.* [5] è messa a confronto con quella di Baù *et al.* [4]; si può osservare come le due risultino analoghe.

Si segnala che studi successivi [6] hanno evidenziato come, sia la correlazione di Baù *et al.* [4] sia quella di Hueckel *et al.* [5], tendano a sottostimare la compressibilità uniassiale dei sedimenti posti a meno di 1500 m di profondità. Per tener conto di ciò, ovvero per profondità inferiori a 1500 m, Ferronato *et al.* [6] hanno proposto che, in via cautelativa, il valore di c_m ottenuto dalle precedenti correlazioni sia moltiplicato per 2. Si ottiene così la legge impiegata nello "middle scenario":

$$c_m = \begin{cases} 2 \cdot 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z < 1500m \\ 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z \geq 1500m \end{cases} \quad (4)$$

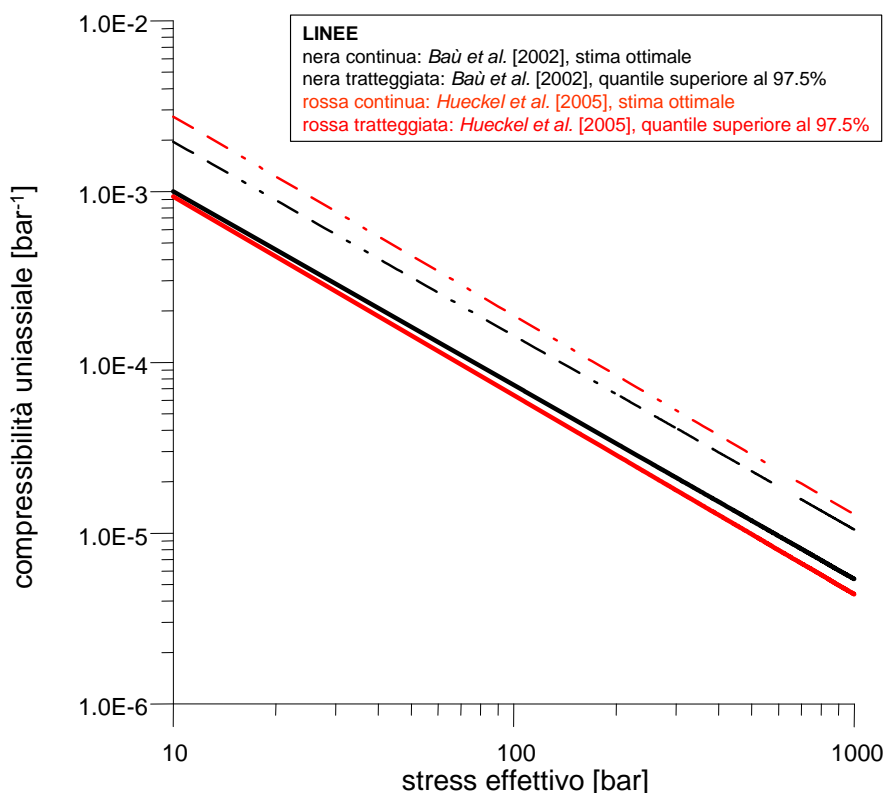


Figura 3 – Correlazione tra la compressibilità uniassiale c_m e lo stress efficace *in situ*, derivata da misure su marker nei campi a gas del bacino nord Adriatico (da [5]).

Al fine di tener conto del grado di incertezza dei dati utilizzati, le simulazioni numeriche sono state effettuate per differenti scenari di compressibilità: il più probabile, chiamato “*middle scenario*” e descritto dalla relazione (4); il quantile superiore o “*upper scenario*” (5); il quantile inferiore o “*lower scenario*” (6).

$$c_m^{upper} = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \cdot 10^{0.467} \quad (5)$$

$$c_m^{lower} = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \cdot 10^{-0.467} \quad (6)$$

I valori di tensione verticale efficace necessari per le stime di c_m nelle equazioni (3), (4), (5) e (6) sono stati calcolati tramite:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (7)$$

dove σ_v è la tensione verticale totale e p la pressione dei pori. Quest’ultima è stata estratta dallo studio fluido-dinamico alla profondità di riferimento, mentre σ_v è stata calcolata a partire dalla densità del materiale come riportato nel paragrafo 2.3.1.

Poiché sul presente campo sono disponibili misurazioni provenienti da una stazione CGPS installata sulla piattaforma di Guendalina e misure di compattazione rilevate dai markers radioattivi lungo il



pozzo Guendalina 2dir, queste sono state utilizzate per calibrare due ulteriori scenari di compressibilità, “GPS scenario” e “markers scenario”, che permettessero di riprodurre in maniera accurata tali dati. Questi presentano un fattore moltiplicativo della curva di compressibilità (4) pari a 3.22 e 1.83 rispettivamente. I dettagli sulla calibrazione di tali modelli sono riportati nei paragrafi 4.1 e 4.2.

In Tabella 1 sono riportati i valori di profondità media, tensione verticale totale σ_v , pressione dei pori iniziale p , tensione verticale efficace σ'_v , coefficiente di Poisson ν , compressibilità uniassiale c_m , adottati livello per livello nei differenti scenari analizzati.

Tabella 1 – Proprietà assegnate, regione per regione, nei diversi scenari analizzati.

Strato	z media [m]	σ_v [bar]	p [bar]	σ'_v [bar]	ν -	c_m “lower” [bar ⁻¹]	c_m “middle” [bar ⁻¹]	c_m “upper” [bar ⁻¹]	c_m “markers” [bar ⁻¹]	c_m “GPS” [bar ⁻¹]
Overburden 1	116.20	20.40	11.60	8.80	0.3	3.72E-04	2.18E-03	3.20E-03	3.99E-03	7.03E-03
Overburden 2	264.70	49.00	26.50	22.50	0.3	1.25E-04	7.31E-04	1.07E-03	1.34E-03	2.35E-03
Overburden 3	413.20	78.60	41.30	37.30	0.3	6.92E-05	4.06E-04	5.94E-04	7.42E-04	1.31E-03
Overburden 4	561.70	109.00	56.20	52.80	0.3	4.62E-05	2.71E-04	3.97E-04	4.95E-04	8.71E-04
Overburden 5	710.20	139.80	71.00	68.80	0.3	3.39E-05	1.99E-04	2.91E-04	3.64E-04	6.40E-04
Overburden 6	858.70	171.10	85.90	85.30	0.3	2.64E-05	1.55E-04	2.27E-04	2.84E-04	4.99E-04
Overburden 7	1007.20	202.70	100.70	102.00	0.3	2.14E-05	1.26E-04	1.84E-04	2.30E-04	4.05E-04
Overburden 8	1155.60	234.70	115.60	119.10	0.3	1.79E-05	1.05E-04	1.54E-04	1.92E-04	3.38E-04
Overburden 9	1304.10	266.80	130.40	136.40	0.3	1.53E-05	8.96E-05	1.31E-04	1.64E-04	2.89E-04
Overburden 10	1452.60	299.30	145.30	154.00	0.3	1.33E-05	7.78E-05	1.14E-04	1.42E-04	2.51E-04
Overburden 11	1601.10	331.90	160.10	171.80	0.3	1.17E-05	3.43E-05	1.00E-04	6.27E-05	1.10E-04
Overburden 12	1749.60	364.70	175.00	189.70	0.3	1.04E-05	3.05E-05	8.95E-05	5.59E-05	9.83E-05
Overburden 13	1898.10	397.70	189.80	207.90	0.3	9.36E-06	2.74E-05	8.04E-05	5.02E-05	8.84E-05
Overburden 14	2046.60	430.80	204.70	226.20	0.3	8.49E-06	2.49E-05	7.29E-05	4.55E-05	8.01E-05
Overburden 15	2195.00	464.10	219.50	244.60	0.3	7.75E-06	2.27E-05	6.66E-05	4.16E-05	7.31E-05
Overburden 16	2343.50	497.60	234.40	263.20	0.3	7.11E-06	2.09E-05	6.11E-05	3.82E-05	6.71E-05
Overburden 17	2492.00	531.20	249.20	282.00	0.3	6.57E-06	1.92E-05	5.64E-05	3.52E-05	6.20E-05
Overburden 18	2640.50	564.90	264.00	300.80	0.3	6.09E-06	1.79E-05	5.23E-05	3.27E-05	5.75E-05
Overburden 19	2737.00	586.80	273.70	313.10	0.3	5.81E-06	1.70E-05	4.99E-05	3.12E-05	5.48E-05
Overburden 20	2781.60	597.00	278.20	318.90	0.3	5.69E-06	1.67E-05	4.89E-05	3.05E-05	5.37E-05
Overburden 21	2826.10	607.20	282.60	324.60	0.3	5.57E-06	1.63E-05	4.79E-05	2.99E-05	5.26E-05
Overburden 22	2870.60	617.40	287.10	330.30	0.3	5.46E-06	1.60E-05	4.69E-05	2.93E-05	5.15E-05
Overburden 23	2908.20	625.90	290.80	335.10	0.3	5.37E-06	1.57E-05	4.61E-05	2.88E-05	5.07E-05
Overburden 24	2933.30	631.70	293.30	338.40	0.3	5.31E-06	1.56E-05	4.56E-05	2.85E-05	5.01E-05
Overburden 25	2952.90	636.20	295.30	340.90	0.3	5.26E-06	1.54E-05	4.52E-05	2.82E-05	4.97E-05
Overburden 26	2972.50	640.70	297.30	343.40	0.3	5.22E-06	1.53E-05	4.48E-05	2.80E-05	4.93E-05
Overburden 27	2987.20	644.00	298.70	345.30	0.3	5.19E-06	1.52E-05	4.46E-05	2.78E-05	4.89E-05
Overburden 28	2997.00	646.30	299.70	346.60	0.3	5.16E-06	1.51E-05	4.44E-05	2.77E-05	4.87E-05
Overburden 29	3006.80	648.50	300.70	347.80	0.3	5.14E-06	1.51E-05	4.42E-05	2.76E-05	4.85E-05
Reservoir 1	3013.10	650.00	301.30	348.70	0.3	5.13E-06	1.50E-05	4.41E-05	2.75E-05	4.84E-05
Reservoir 2	3015.70	650.60	301.60	349.00	0.3	5.12E-06	1.50E-05	4.40E-05	2.75E-05	4.83E-05
Reservoir 3	3018.40	651.20	301.80	349.40	0.3	5.12E-06	1.50E-05	4.40E-05	2.74E-05	4.83E-05
Reservoir 4	3021.10	651.80	302.10	349.70	0.3	5.11E-06	1.50E-05	4.39E-05	2.74E-05	4.82E-05
Reservoir 5	3023.80	652.40	302.40	350.00	0.3	5.10E-06	1.50E-05	4.39E-05	2.74E-05	4.82E-05
Reservoir 6	3026.50	653.00	302.70	350.40	0.3	5.10E-06	1.49E-05	4.38E-05	2.73E-05	4.81E-05




Reservoir 7	3029.20	653.7	302.90	350.70	0.3	5.09E-06	1.49E-05	4.37E-05	2.73E-05	4.81E-05
Reservoir 8	3031.30	654.10	303.10	351.00	0.3	5.09E-06	1.49E-05	4.37E-05	2.73E-05	4.80E-05
Reservoir 9	3033.70	654.70	303.40	351.30	0.3	5.08E-06	1.49E-05	4.37E-05	2.73E-05	4.80E-05
Reservoir 10	3037.10	655.50	303.70	351.80	0.3	5.08E-06	1.49E-05	4.36E-05	2.72E-05	4.79E-05
Reservoir 11	3040.50	656.20	304.00	352.20	0.3	5.07E-06	1.49E-05	4.35E-05	2.72E-05	4.78E-05
Reservoir 12	3042.40	656.70	304.20	352.50	0.3	5.06E-06	1.48E-05	4.35E-05	2.72E-05	4.78E-05
Reservoir 13	3045.50	657.40	304.60	352.90	0.3	5.06E-06	1.48E-05	4.34E-05	2.71E-05	4.77E-05
Reservoir 14	3053.00	659.10	305.30	353.80	0.3	5.04E-06	1.48E-05	4.33E-05	2.70E-05	4.76E-05
Reservoir 15	3059.80	660.70	306.00	354.70	0.3	5.03E-06	1.47E-05	4.32E-05	2.70E-05	4.74E-05
Reservoir 16	3064.30	661.70	306.40	355.30	0.3	5.02E-06	1.47E-05	4.31E-05	2.69E-05	4.73E-05
Reservoir 17	3068.80	662.80	306.90	355.90	0.3	5.01E-06	1.47E-05	4.30E-05	2.69E-05	4.73E-05
Reservoir 18	3073.30	663.80	307.30	356.50	0.3	5.00E-06	1.47E-05	4.29E-05	2.68E-05	4.72E-05
Reservoir 19	3077.80	664.80	307.80	357.00	0.3	4.99E-06	1.46E-05	4.29E-05	2.68E-05	4.71E-05
Reservoir 20	3082.30	665.80	308.20	357.60	0.3	4.98E-06	1.46E-05	4.28E-05	2.67E-05	4.70E-05
Reservoir 21	3086.70	666.90	308.70	358.20	0.3	4.97E-06	1.46E-05	4.27E-05	2.67E-05	4.69E-05
Reservoir 22	3089.60	667.50	309.00	358.60	0.3	4.96E-06	1.46E-05	4.26E-05	2.66E-05	4.68E-05
Reservoir 23	3092.50	668.20	309.30	359.00	0.3	4.96E-06	1.45E-05	4.26E-05	2.66E-05	4.68E-05
Reservoir 24	3097.00	669.20	309.70	359.50	0.3	4.95E-06	1.45E-05	4.25E-05	2.65E-05	4.67E-05
Reservoir 25	3104.00	670.80	310.40	360.40	0.3	4.93E-06	1.45E-05	4.24E-05	2.65E-05	4.66E-05
Underburden 1	3113.50	673.00	311.40	361.70	0.3	4.91E-06	1.44E-05	4.22E-05	2.64E-05	4.64E-05
Underburden 2	3123.00	675.20	312.30	362.90	0.3	4.89E-06	1.43E-05	4.20E-05	2.63E-05	4.62E-05
Underburden 3	3137.30	678.50	313.70	364.80	0.3	4.87E-06	1.43E-05	4.18E-05	2.61E-05	4.59E-05
Underburden 4	3156.30	682.90	315.60	367.20	0.3	4.83E-06	1.42E-05	4.15E-05	2.59E-05	4.56E-05
Underburden 5	3175.30	687.20	317.50	369.70	0.3	4.79E-06	1.40E-05	4.11E-05	2.57E-05	4.52E-05
Underburden 6	3194.30	691.60	319.40	372.20	0.3	4.75E-06	1.39E-05	4.08E-05	2.55E-05	4.49E-05
Underburden 7	3218.10	697.10	321.80	375.30	0.3	4.71E-06	1.38E-05	4.04E-05	2.53E-05	4.44E-05
Underburden 8	3246.60	703.60	324.70	379.00	0.3	4.65E-06	1.36E-05	4.00E-05	2.50E-05	4.39E-05
Underburden 9	3275.10	710.20	327.50	382.70	0.3	4.60E-06	1.35E-05	3.95E-05	2.47E-05	4.34E-05
Underburden 10	3360.60	729.90	336.10	393.90	0.3	4.45E-06	1.30E-05	3.82E-05	2.39E-05	4.20E-05
Underburden 11	3503.20	762.90	350.30	412.60	0.3	4.22E-06	1.24E-05	3.62E-05	2.26E-05	3.98E-05
Underburden 12	3645.70	795.90	364.60	431.40	0.3	4.00E-06	1.17E-05	3.44E-05	2.15E-05	3.78E-05
Underburden 13	3788.30	829.10	378.80	450.20	0.3	3.81E-06	1.12E-05	3.27E-05	2.04E-05	3.59E-05
Underburden 14	3930.80	862.30	393.10	469.20	0.3	3.63E-06	1.06E-05	3.12E-05	1.95E-05	3.43E-05
Underburden 15	4073.40	895.60	407.30	488.20	0.3	3.47E-06	1.02E-05	2.98E-05	1.86E-05	3.27E-05
Underburden 16	4215.90	928.90	421.60	507.30	0.3	3.31E-06	9.71E-06	2.85E-05	1.78E-05	3.13E-05
Underburden 17	4358.50	962.30	435.90	526.50	0.3	3.17E-06	9.30E-06	2.73E-05	1.70E-05	3.00E-05
Underburden 18	4501.10	995.80	450.10	545.70	0.3	3.04E-06	8.92E-06	2.62E-05	1.63E-05	2.87E-05
Underburden 19	4643.60	1029.40	464.40	565.00	0.3	2.92E-06	8.57E-06	2.51E-05	1.57E-05	2.76E-05
Underburden 20	4786.20	1063.00	478.60	584.40	0.3	2.81E-06	8.24E-06	2.41E-05	1.51E-05	2.65E-05
Underburden 21	4928.70	1096.70	492.90	603.80	0.3	2.71E-06	7.93E-06	2.32E-05	1.45E-05	2.55E-05

2.4 Inizializzazione e storia di pressione

2.4.1 Stato tensionale iniziale

Per il campo di Guendalina lo sforzo totale verticale è stato calcolato dal gradiente di overburden definito a partire dai density log come descritto nel paragrafo 2.3.1. Lo sforzo orizzontale σ'_h è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico definite come:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (8)$$

	eni s.p.a Development, Operations & Technology	Campo di Guendalina Studio di Subsidenza Management Summary	Pagina 11 di 21
---	---	--	-----------------

dove K_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.429 coerentemente con il coefficiente di Poisson adottato.

2.4.2 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale del campo di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dai modelli fluido-dinamici Eclipse, è stata imposta come condizione forzante nei nodi del modello FE corrispondenti ai livelli dei giacimenti e degli acquiferi connessi.

3 Risultati delle analisi eseguite

Il presente paragrafo riporta i risultati delle previsioni di subsidenza per i dieci scenari considerati. In Tabella 2 sono riportate le date più significative relative al verificarsi della massima subsidenza per le quali si forniscono i risultati modellistici (sintetizzati in Tabella 3). Sempre in Tabella 2, nella prima colonna, si riporta la corrispondenza tra la nomenclatura degli scenari adottata nel presente rapporto e quella utilizzata in [1]. Si rammenta che le simulazioni sono state protratte fino al 31/12/2052 (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione. In Tabella 3, sono riportati i valori di massima subsidenza e l'estensione del fenomeno, calcolata come massima distanza del punto di massima subsidenza dalla linea di iso-subsidenza dei 2 cm.

Tabella 2 – Date significative relative alla subsidenza nel punto di massimo.

Scenario in [1]	Scenario di produzione	Scenario di compressibilità	Fine produzione	Subsidenza massima	Fine simulazione
DN_L	DN	Lower	2016	2021	2052
DN_M	DN	Middle	2016	2022	2052
DN_U	DN	Upper	2017	2028	2052
DN_M_S	DN	Markers	2016	2022	2052
DN_M_GPS	DN	GPS	2016	2022	2052
ST_L	ST	Lower	2019	2024	2052
ST_M	ST	Middle	2019	2023	2052
ST_U	ST	Upper	2020	2028	2052
ST_M_S	ST	Markers	2019	2023	2052
ST_M_GPS	ST	GPS	2019	2023	2052

Tabella 3 – Risultati finali: massima subsidenza ed estensione del fenomeno per i tre scenari considerati.

Scenario di produzione	Scenario di compressibilità	Fine produzione		Massima subsidenza		Fine simulazione	
		Max sub (cm)	Max estensione (km)	Max sub (cm)	Max estensione (km)	Max sub (cm)	Max estensione (km)
DN	Lower	-	-	-	-	-	-
DN	Middle	1	-	1	-	1	-
DN	Upper	2	-	2	1	2	1
DN	Markers	2	-	2	-	2	-
DN	GPS	3	3	3	4	3	4
ST	Lower	-	-	-	-	1	-
ST	Middle	1	-	1	-	1	-
ST	Upper	2	2	2	2	2	2
ST	Markers	2	-	2	-	2	-
ST	GPS	3	5	3	5	3	5

Le coordinate in cui si prevede di registrare la massima subsidenza sono riportate in Tabella 4 per tutti gli scenari analizzati.

Tabella 4 – Coordinate dei punti in cui si prevede la massima subsidenza.

Scenario di produzione	Scenario di compressibilità	EST (Gauss-Boaga)	NORD (Gauss-Boaga)
DN	Lower	2348890	4935333
DN	Middle	2349432	4935366
DN	Upper	2349432	4935366
DN	Markers	2350088	4935837
DN	GPS	2349432	4935366
ST	Lower	2349239	4935237
ST	Middle	2349239	4935237
ST	Upper	2350015	4935730
ST	Markers	2348890	4935333
ST	GPS	2349432	4935366

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza previsto è pari a circa 3 cm per il “*GPS scenario*”, che risulta il più conservativo tra quelli analizzati. Tale valore viene raggiunto nel 2022 per lo scenario di produzione DN e nel 2023 per lo scenario ST. L'evoluzione nel tempo della subsidenza valutata in tale punto per tutti gli scenari è riportata in Figura 4;
- al termine della produzione per il “*GPS scenario*”, che risulta il più conservativo tra quelli analizzati, la massima estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm risulta pari a 3 km nel caso DN e a 5 km nel caso ST. Tale distanza arriva a 4 km nel caso DN e a 5 km nel caso ST a fine simulazione (31/12/2052); le curve di iso-subsidenza per il “*GPS scenario*” sono rappresentate da Figura 5 a Figura 9;
- il fenomeno si esaurisce a oltre 40 km dalla linea di costa per tutti gli scenari considerati.

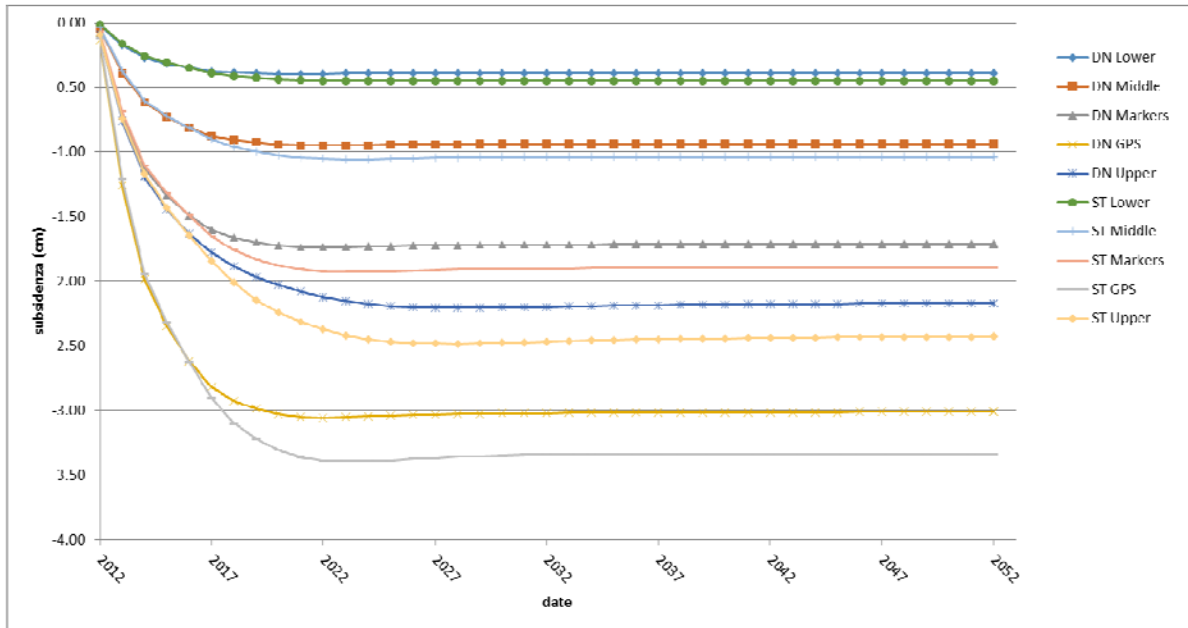


Figura 4 – Evoluzione della subsidenza nel punto di massimo.

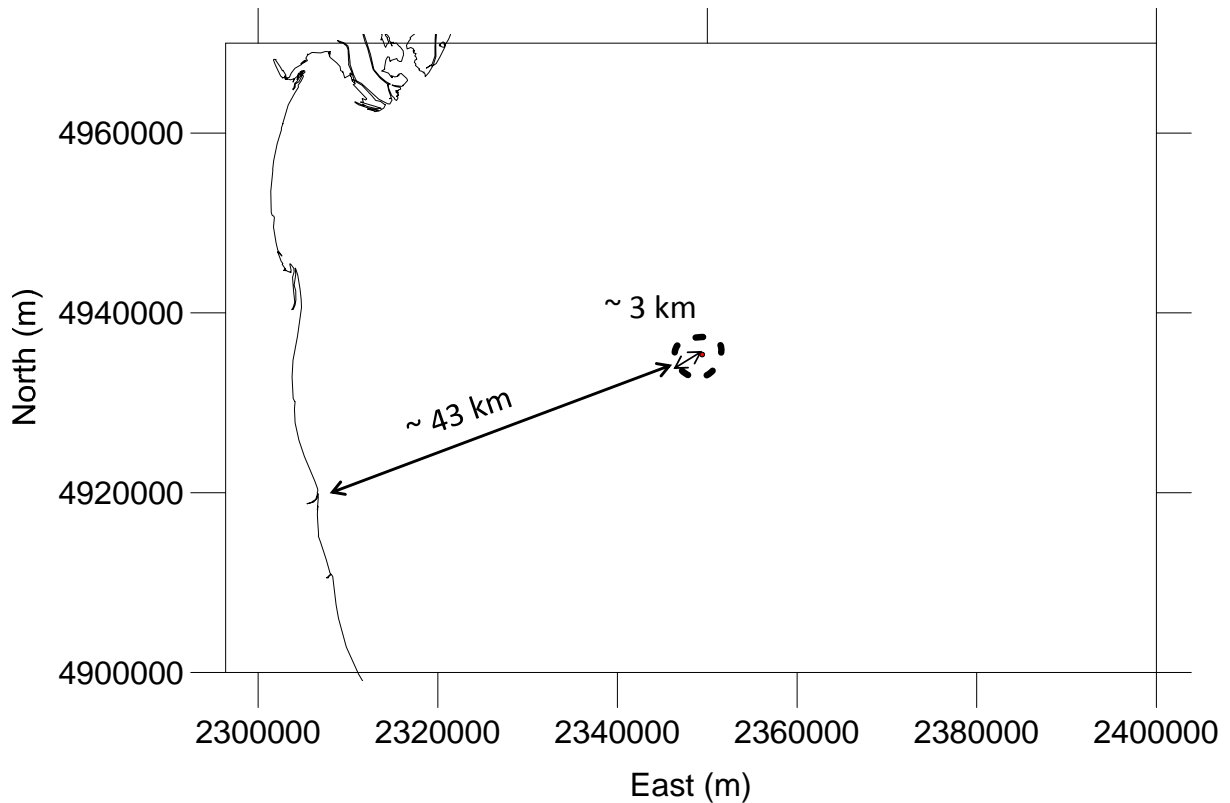


Figura 5 – Curve di iso-subsidenza per il “GPS scenario”, caso DN, a fine produzione (2017).

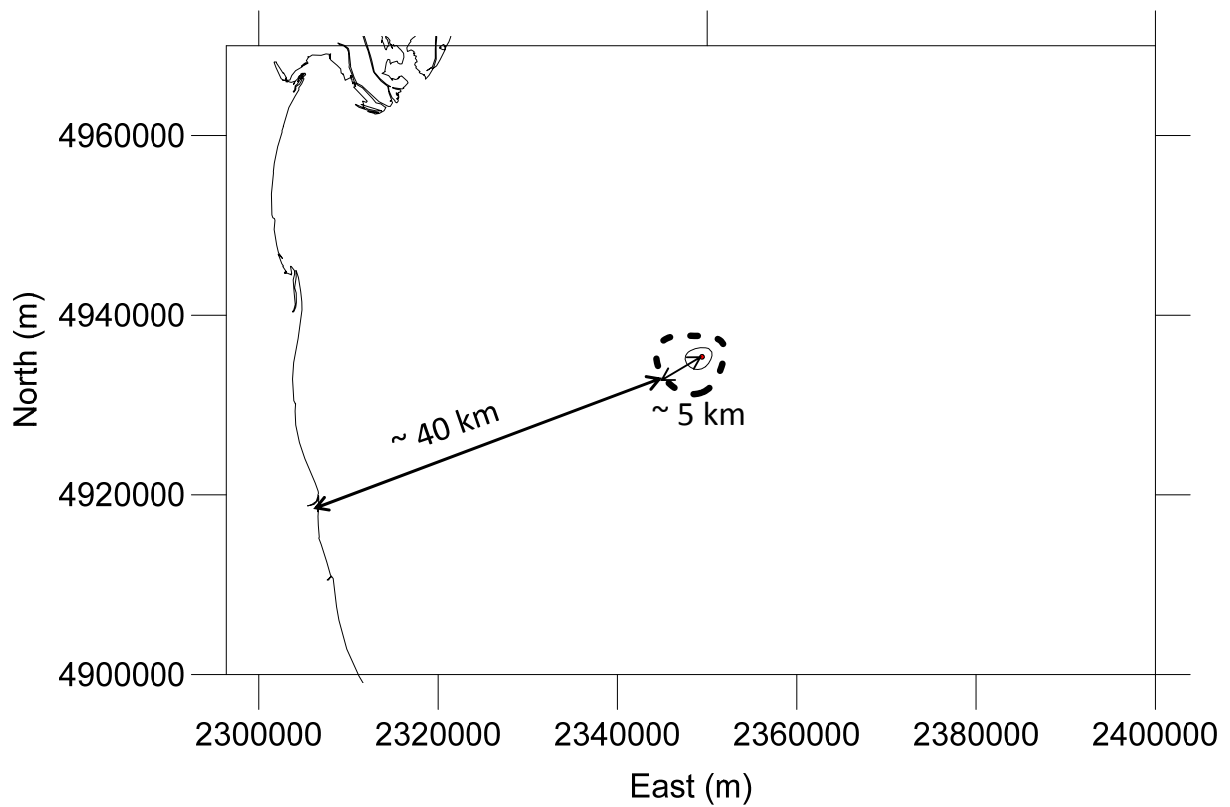


Figura 6 – Curve di iso-subsidenza per il “GPS scenario”, caso ST, a fine produzione (2020).

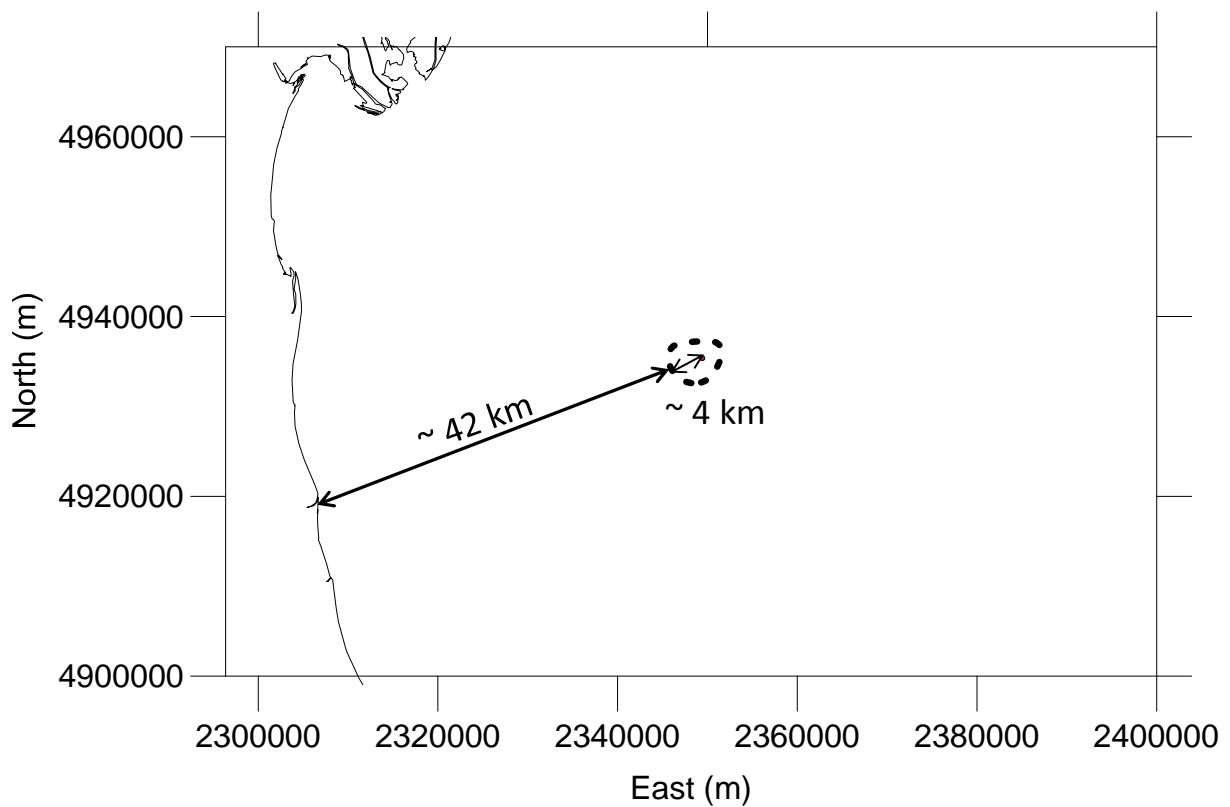


Figura 7 – Curve di iso-subsidenza per il “GPS scenario”, caso DN, a fine simulazione (2052).

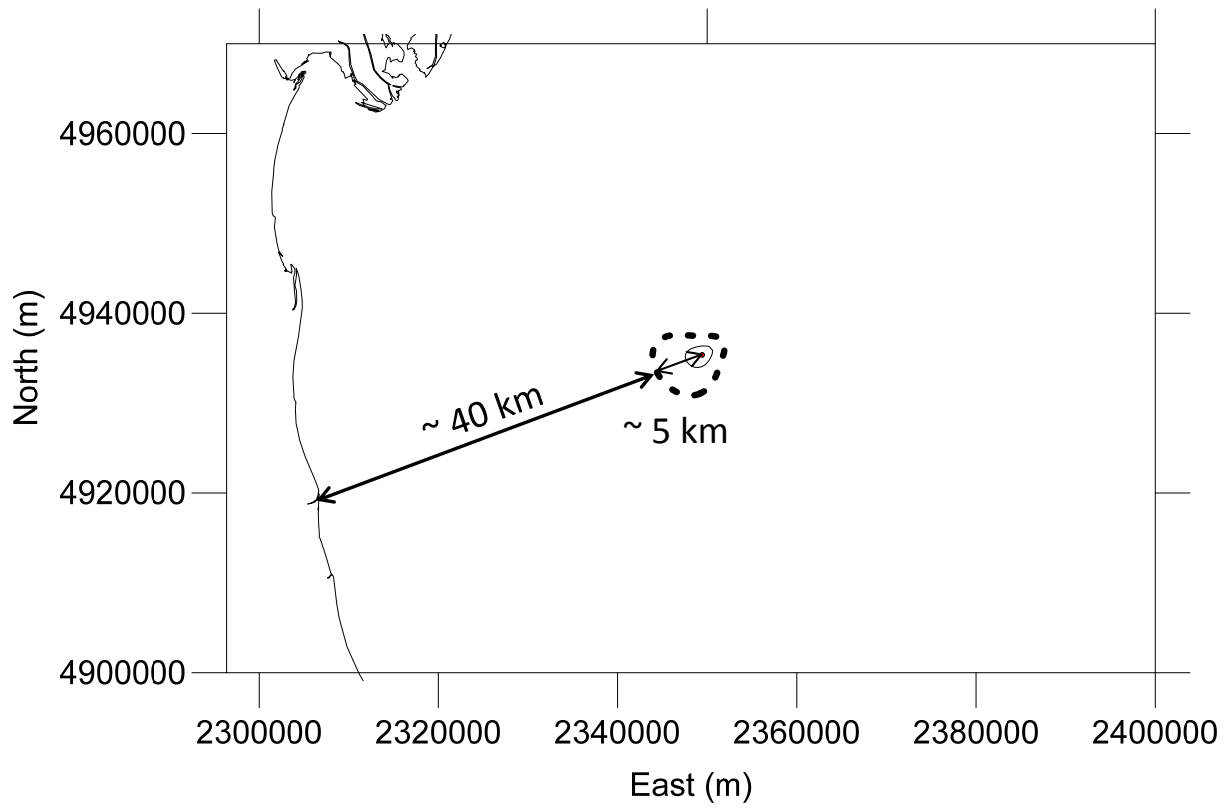


Figura 8 – Curve di iso-subsidenza per il “GPS scenario”, caso ST, a fine simulazione (2052).

4 Confronto con i dati disponibili

I valori risultati del modello numerico sono stati confrontati con i dati di spostamento misurati dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di produzione di Guendalina e con le misure di compattazione rilevate dai markers radioattivi lungo il pozzo Guendalina 2dir.

4.1 Stazione CGPS

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di produzione di Guendalina in corrispondenza delle coordinate LAT=44°33'58.8922", LON=12°52'53.0490". Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dal 21 agosto 2011 al 01 novembre 2014 (Figura 9).

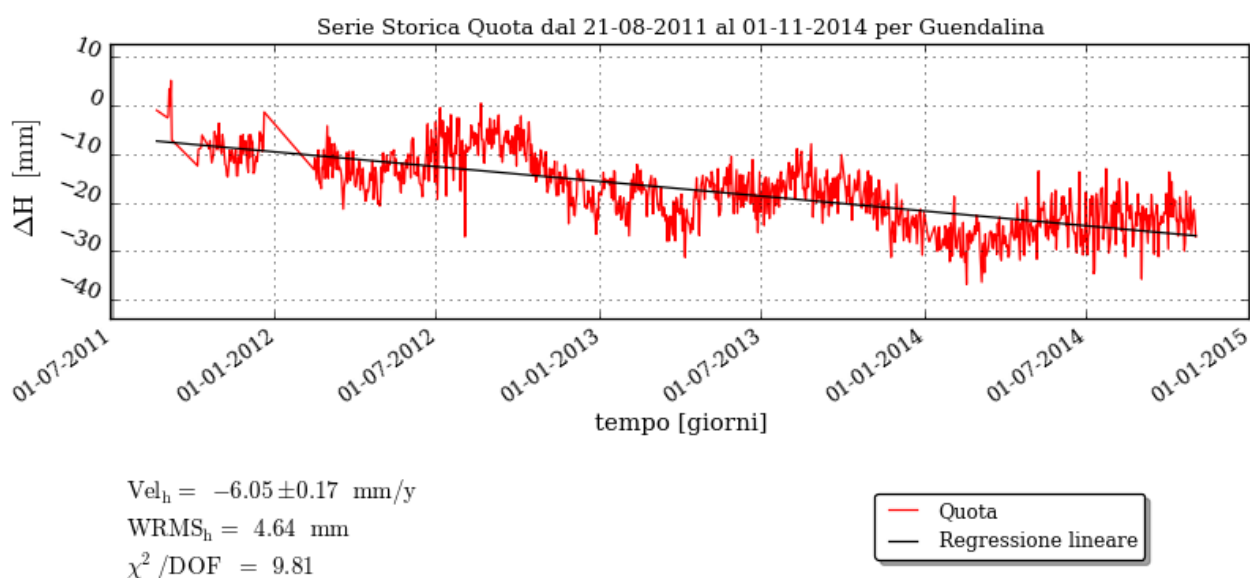
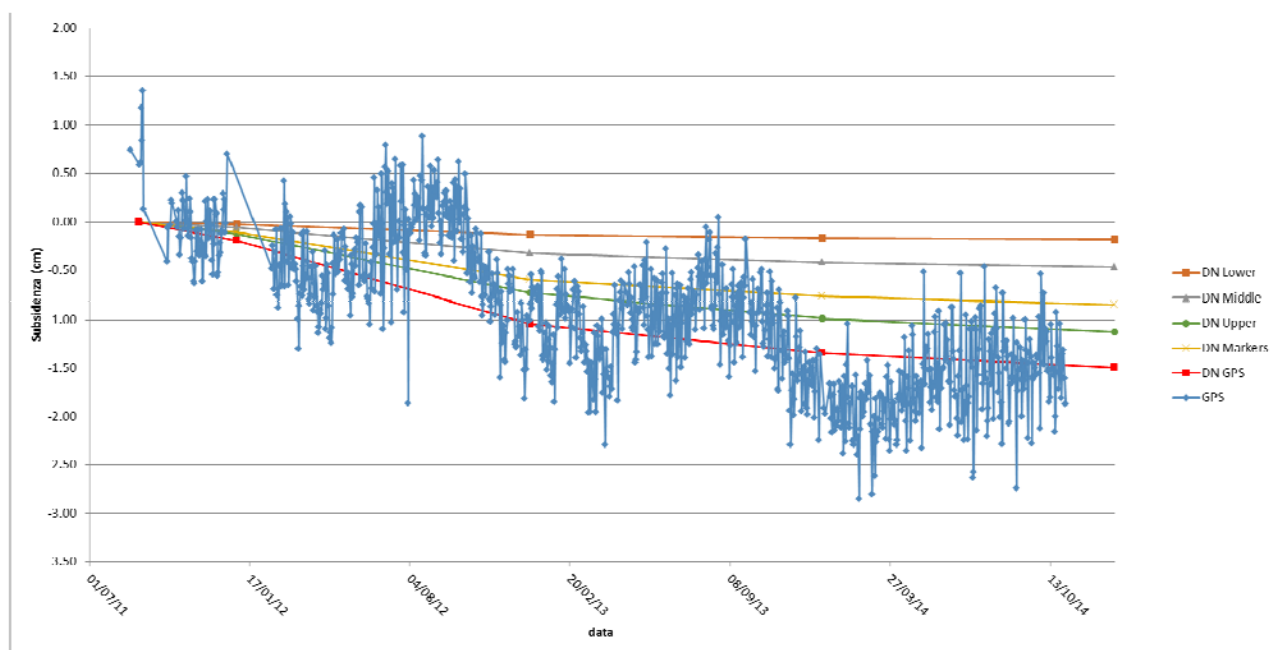


Figura 9 – Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Guendalina, aggiornate al 01/11/2014.

Il periodo di osservazione copre un intervallo temporale di circa 3 anni e fornisce un valore di velocità di subsidenza medio pari a circa 6 mm/anno. Il confronto tra i risultati ottenuti con i cinque scenari di compressibilità (gli scenari DN e ST sono equivalenti nel periodo di registrazione del CGPS) e la serie storica misurata dal CGPS è mostrato in Figura 10. Si può osservare come il “GPS scenario”, calibrato su tale dato, riproduca con accuratezza la subsidenza rilevata dalla stazione CGPS.


Figura 10 – Spostamento misurato e calcolato in corrispondenza della stazione CGPS di Guendalina.

4.2 Misure di compattazione rilevate da markers radioattivi

In corrispondenza del pozzo Guendalina 2dir sono disponibili delle misure di compattazione rilevate dai markers radioattivi installati lungo il profilo del pozzo stesso. In particolare, lungo il tratto compreso tra le profondità 3008 e 3084 m TVDSS, sono stati sparati 15 marker con distanza nominale pari a 5 m circa (eccetto uno la cui distanza è di 10 m). In Tabella 5 sono riassunte le misure di compattazione rilevate tra i mesi di giugno 2011 e luglio 2012 insieme alla corrispondenza tra indice dei markers e indice degli spacing. Poiché la sonda di logging ha i rilevatori a distanza di 10 m, le misurazioni di deformazione (compattazione se negativa ed espansione se positiva) si sono potute rilevare per intervalli di tre markers consecutivi (eccetto per lo spacing #6 che ha dimensione pari a 10 m).

Tabella 5 – Misure di deformazione registrate nel pozzo Guendalina 2dir tra luglio 2012 e giugno 2011. Valori negativi indicano compattazione e positivi espansione.

Spacing	Marker top	Marker bottom	TOP REF QUOTA				BOTTOM REF QUOTA				Deformazione luglio 2012 - giugno 2011
			MD	TVDSS	X	Y	MD	TVDSS	X	Y	
#	#	#	m	m	m	m	m	m	m	m	mm
16	1	3	3096.75	3007.89	2351317.63	4936753.94	3107.25	3018.08	2351315.39	4936752.79	6.38
15	2	4	3102.00	3012.98	2351316.51	4936753.37	3112.50	3023.18	2351314.27	4936752.21	0.51
14	3	5	3107.25	3018.08	2351315.39	4936752.79	3117.75	3028.27	2351313.15	4936751.64	-4.60
13	4	6	3112.50	3023.18	2351314.27	4936752.21	3123.00	3033.37	2351312.04	4936751.06	-1.89
12	5	7	3117.75	3028.27	2351313.15	4936751.64	3128.25	3038.47	2351310.92	4936750.48	1.98
11	6	8	3123.00	3033.37	2351312.04	4936751.06	3133.50	3043.57	2351309.80	4936749.91	3.01
10	7	9	3128.25	3038.47	2351310.92	4936750.48	3138.75	3048.66	2351308.68	4936749.33	0.45
9	8	10	3133.50	3043.57	2351309.80	4936749.91	3144.00	3053.76	2351307.56	4936748.75	-1.79
8	9	11	3138.75	3048.66	2351308.68	4936749.33	3149.25	3058.86	2351306.44	4936748.18	6.93
6	11	12	3149.25	3058.86	2351306.44	4936748.18	3159.75	3069.05	2351304.20	4936747.02	-16.67
4	12	14	3159.75	3069.05	2351304.20	4936747.02	3170.25	3079.24	2351301.97	4936745.87	-3.36
3	13	15	3165.00	3074.15	2351303.09	4936746.45	3175.50	3084.34	2351300.85	4936745.29	-3.30

L'analisi dei dati di compattazione e la conseguente procedura di calibrazione del modello viene descritta nel seguito.

Prima di iniziare l'analisi si è proceduto con il corretto posizionamento dei marker rispetto al layering del campo: come evidenziato in Figura 11 il marker #1 è posto nell'overburden, i marker #2 – #5 nell'acquifero del livello PL3-I1, i marker #6 e #7 e il marker #8 negli acquiferi rispettivamente del PL3-J e PL3-J1, i marker #9 e #10 in un interlayer, i marker #11 – #15 nel pool PL3-J3 e nel suo acquifero di fondo.

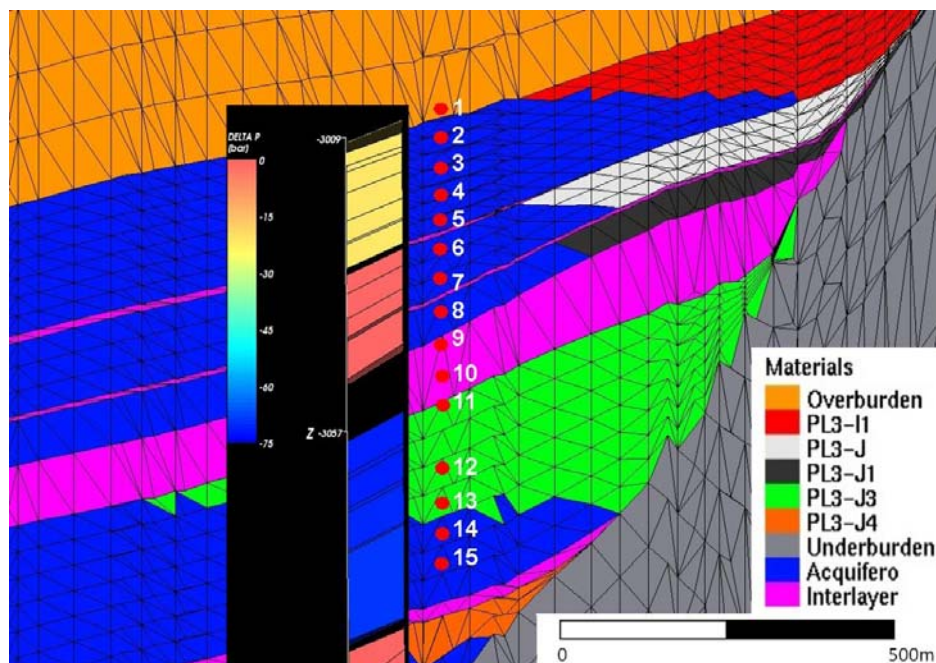


Figura 11 – Posizione dei markers rispetto al layering del campo. Nell'inset con sfondo nero è riportata la variazione di pressione (bar) da modello di produzione nell'intervallo luglio 2012 – giugno 2011 corrispondente alle misurazioni dei marker.

E' stata perciò condotta un'analisi incrociata della deformazione e della variazione di pressione per ciascun spacing al fine di valutare quali delle misure a disposizione potessero essere utilizzate per la calibrazione del modello. Le misure registrate, infatti, evidenziano come gli spacing #8 – #16 siano caratterizzati da alternate compattazioni/espansioni, dell'ordine di pochi millimetri, che non sono consistenti con l'avvenuta depressurizzazione o l'assenza di variazione di pressione. E' per altro già stato osservato in studi precedenti [5], come le misurazioni fornite dai marker siano poco affidabili qualora si riferiscono a spacing con variazioni di pressione limitate. La calibrazione è stata pertanto condotta sulla base dei soli spacing #3, #4 e #6 (marker #11 – #15) posti nel livello PL3-J3.

Il confronto tra la compattazione calcolata e misurata negli spacing posti nel livello PL3-J3 è stato condotto interpolando linearmente i valori dello spostamento dei nodi della griglia più vicini ai marker per ottenere lo spostamento/deformazione in corrispondenza alla posizione dei marker stessi. Si è innanzitutto osservato come, a parità di variazione di pressione (Figura 11), la compattazione dello spacing #6 (16.67 mm) sia significativamente superiore a quella degli spacing #3 e #4, pari a circa 3.3 mm. Pertanto, sono stati selezionati due metodi di analisi:

- 1) confronto della compattazione media per i tre marker spacing #3, #4 e #6 (ovvero sulla compattazione cumulata tra il marker #11 e #15). Si rammenta che, essendo i marker spacing #3 e #4 parzialmente sovrapposti, la compattazione media viene calcolata come somma tra la compattazione degli spacing #6 e #4 e metà di quella dello spacing #3. In questo caso la




compattazione misurata è pari a 21.68 mm in accordo con quella calcolata dal “*middle scenario*” pari a 22.5 mm. Data la modesta differenza, si ritiene che il modello fornisca un risultato già calibrato;

- 2) confronto sulla compattazione del solo marker spacing #6, che avendo registrato una compattazione più elevata, può ritenersi più affidabile degli altri due (e quindi anche più a favore di sicurezza). In questo caso nessun modello fornisce una compattazione equivalente ai 16.67 mm misurati. La calibrazione richiede quindi una aumento della compressibilità rispetto al “*middle scenario*” di un fattore pari a 1.83.

Il confronto tra la deformazione simulata dai vari scenari e quella misurata nel periodo giugno 2011 e luglio 2012 è riportata in Tabella 6.

Tabella 6 – Confronto tra la deformazione simulata dai vari scenari e quella misurata nel periodo giugno 2011 e luglio 2012. Valori positivi indicano espansione, negativi compattazione.

spacing #	Deformazione (mm)					Misurata
	Lower scenario	Middle scenario	Markers scenario	GPS scenario	Upper scenario	
16	-0.56	-1.54	-2.82	-4.96	-3.91	6.38
15	-0.97	-2.69	-4.93	-8.67	-6.91	0.51
14	-0.97	-2.68	-4.91	-8.64	-6.87	-4.60
13	-0.66	-1.81	-3.31	-5.83	-4.59	-1.89
12	-0.10	-0.25	-0.46	-0.82	-0.52	1.98
11	0.15	0.44	0.80	1.41	1.29	3.01
10	0.15	0.44	0.80	1.41	1.30	0.45
9	0.15	0.44	0.80	1.41	1.31	-1.79
8	-0.26	-0.75	-1.38	-2.43	-2.10	6.93
6	-3.18	-9.12	-16.69	-29.37	-25.95	-16.67
4	-3.14	-8.97	-16.42	-28.90	-25.19	-3.36
3	-3.11	-8.88	-16.24	-28.58	-24.72	-3.30

	eni s.p.a Development, Operations & Technology	Campo di Guendalina Studio di Subsidenza Management Summary	Pagina 21 di 21
---	---	--	-----------------

Bibliografia

1. Modello di previsione della subsidenza antropica del campo di Guendalina per due scenari di coltivazione – MED Ingegneria S.r.l. – novembre 2014.
2. Eclipse™, Schlumberger, versione 2012.2.
3. Campo di Guendalina – Revisione studio di giacimento – GISE 03/14. Marzo 2014.
4. D. Baù, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini: *Basin-scale compressibility of the northern Adriatic by the radioactive marker technique*. Géotechnique 52, No. 8, 605–616, 2002.
5. T. Hueckel, G. Cassiani, J.H. Prévost and D.A. Walters: *Field Derived Compressibility of Deep Sediments of the Northern Adriatic*. *Land Subsidence*, Special Volume, Proc. 7th Int. Symp. on Land Subsidence, Shanghai, 2005.
6. M. Ferronato, G. Gambolati, P. Teatini and D. Baù: *Interpretation of Radioactive Marker Measurements To Evaluate Compaction in the Northern Adriatic Gas Field*, SPE Evaluation & Engineering, December 2003.