

	Eni S.p.A. Development, Operations & Technology	RESDEP DEPARTMENT REIT	DOCUMENTO # 05/2017
---	---	------------------------------	------------------------

Campi di Annamaria Complex
Modello Geomeccanico di Subsidenza
Management Summary

LISTA DI DISTRIBUZIONE GEOD/CS GEOES/CS		
AUTORI F. Gemelli (EORG)		
DATA 20 dicembre 2017		
DESCRIZIONE	CONTROLLATO DA	APPROVATO DA
Rapporto Finale	 M. C. Dacome	 M. Antonelli
	 M. De Simoni	 A. Tiani
	 S. Mantica	



Indice

1	Introduzione	3
1.1	Il campo di Annamaria.....	3
1.2	Produzione di Annamaria Complex.....	4
2	Dati delle stazioni CGPS di Annamaria.....	5
3	Modello geomeccanico agli elementi finiti.....	6
3.1	Approccio metodologico.....	6
3.2	Geometria.....	6
3.3	Proprietà dei materiali	7
3.3.1	Densità	7
3.3.2	Peso specifico dei fluidi saturanti	8
3.3.3	Proprietà meccaniche	8
3.4	Inizializzazione e storia di pressione	12
3.4.1	Stato tensionale iniziale	12
3.4.2	Storia di pressione	12
4	Risultati delle simulazioni numeriche.....	13
5	Confronto con i dati CGPS	15
6	Confronto con i dati di compattazione da marker radioattivi	18
7	Confronto con i dati batimetrici	22
8	Bibliografia	24

1 Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio di subsidenza relativo ai campi a gas di Annamaria, Ida e Ika, il cui insieme è denominato “Annamaria Complex” (Figura 1).

L’obiettivo dell’attività è valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione dei giacimenti, durante la loro vita produttiva e nei 30 anni successivi alla chiusura dei pozzi.

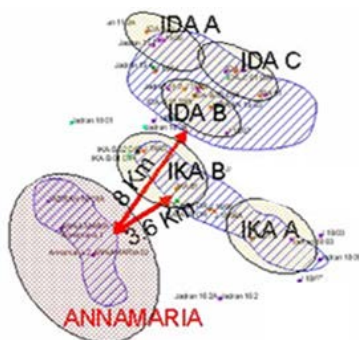


Figura 1 – Campi di Annamaria Complex.

L’evoluzione della subsidenza è stata stimata attraverso un modello geomeccanico costruito con il codice di calcolo agli elementi finiti (FE) AbaqusTM [1]. Le informazioni relative alla geometria del giacimento, le proprietà petrofisiche e l’evoluzione delle pressioni sono state ottenute dal modello fluido-dinamico di giacimento [2] realizzato in ambiente Petrel RETM [3], con l’ausilio del simulatore ai volumi finiti INTERSECTTM (IX) [4].

Alcuni parametri caratteristici della legge costitutiva adottata per descrivere il comportamento del materiale sono stati calibrati in modo da riprodurre le variazioni altimetriche misurate dalle stazioni CGPS installate sulle piattaforme di Annamaria (§2).

L’affidabilità del modello geomeccanico è stata verificata confrontandone i risultati con le seguenti misure a disposizione:

- compattazione in situ registrata a partire dal 2010 lungo il pozzo verticale di monitoraggio Annamaria B11, attraverso l’acquisizione annuale della quota di 100 marker radioattivi sparati nella parete del pozzo (§6);
- dati batimetrici acquisiti nell’area di Annamaria nel 2009 e nel 2016 (§7).

1.1 Il campo di Annamaria

Il campo di Annamaria è operato da Eni ed è ubicato nell’off-shore Adriatico, in corrispondenza della linea mediana tra Italia e Croazia (Figura 2). La piattaforma Annamaria B si trova nell’off-shore italiano (concessione mineraria A.C 11.AG) e dista circa 60 km in direzione Nord-Est dalla costa di Pesaro. Invece, la piattaforma Annamaria A è ubicata nell’off-shore croato a 5.2 km in direzione Nord-Ovest rispetto alla piattaforma italiana.

Il giacimento di Annamaria è formato da 2 culminazioni comunicanti tra loro, una di esse si trova in corrispondenza delle acque croate e l’altra in corrispondenza delle acque italiane. Le formazioni Carola e Porto Garibaldi sono quelle di interesse minerario. Il giacimento si estende da 880 a 1750 mssl di profondità, mentre la profondità del fondale è compresa tra 56 e 60 m.

La scoperta del campo di Annamaria risale al 1979 per il lato italiano, con la perforazione del pozzo Annamaria 1, e al 1982 per il lato croato, con la perforazione del pozzo Jadran 16/1a.

Lo sviluppo del campo è avvenuto tra gennaio 2009 e luglio 2010, con la perforazione di 6 pozzi dalla piattaforma croata ed altri 6 dalla piattaforma italiana, oltre ad un pozzo di monitoraggio della compattazione.

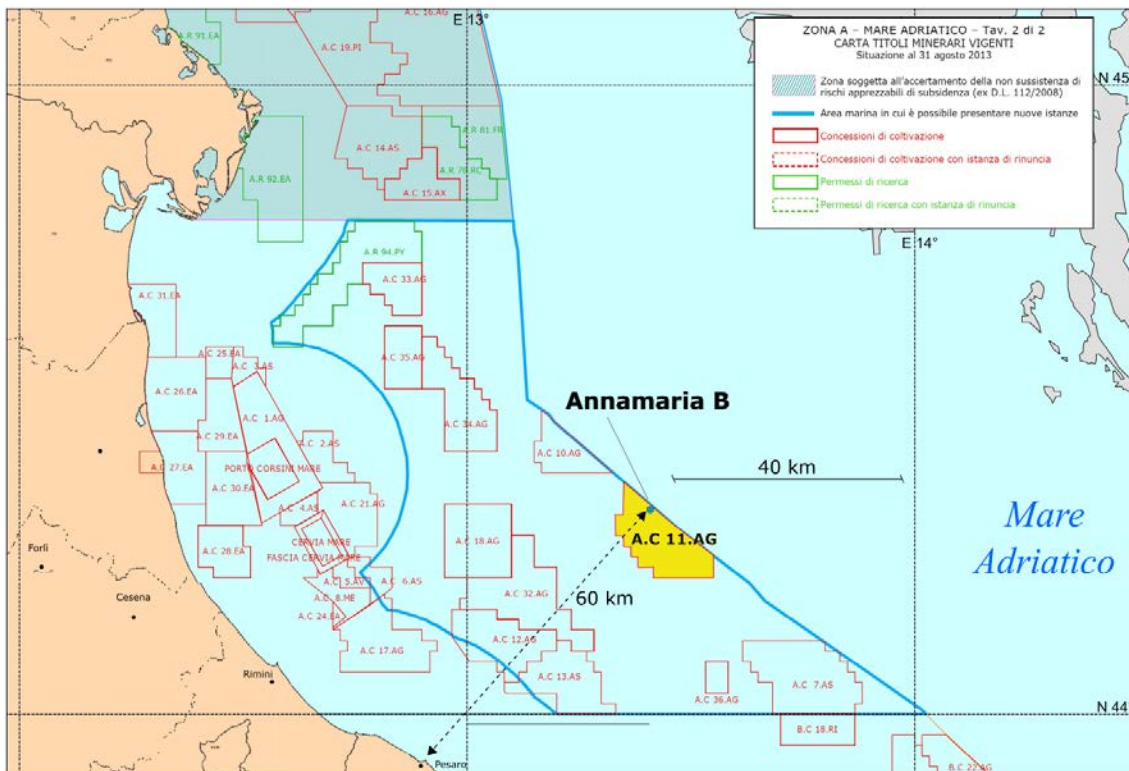


Figura 2 – Ubicazione della concessione di coltivazione A.C 11.AG e della piattaforma Annamaria B. La presente mappa è un’elaborazione dell’originale pubblicata dal Ministero dello Sviluppo Economico [5].

1.2 Produzione di Annamaria Complex

Il dominio del modello fluido-dinamico di Annamaria (denominato modello Intersect nel seguito) [2] include l’intero Annamaria Complex: infatti, si è voluto descrivere sia la possibile comunicazione idraulica tra i livelli produttivi dei 3 campi (inclusi quelli carbonatici di Ika) sia la distribuzione del disturbo di pressione trasmesso attraverso gli acquiferi connessi.

L’avvio della produzione è avvenuto nel 2006 per i pozzi di Ika e Ida; invece, dai pozzi di Annamaria si è iniziato a produrre nel 2009 dalla piattaforma croata e nel 2010 dalla piattaforma italiana.

In seguito all’aggiornamento produttivo e all’analisi dei dati di pressione e di produzione di tutte le stringhe, il volume di gas inizialmente in posto (GOIP) è pari a 29.533 GSm³ (19.849 in Annamaria). Alla fine della fase di *history match* (HM, 30 giugno 2017), quando risultano in produzione 28 pozzi, la produzione cumulativa di gas è pari a 9.528 GSm³ con *recovery factor* (RF) del 32.3% (5.286 GSm³ da Annamaria, con RF di 26.6%).

Con il modello Intersect sono stati simulati 2 scenari di *forecast*. Il primo prevede il mantenimento dei completamenti aperti a fine HM, senza ulteriori interventi di sviluppo, ed è stato denominato “*Do-Nothing*” (abbreviato con DN nel seguito). Il secondo, invece, prevede la perforazione di ulteriori 4 pozzi nel campo di Annamaria – 2 dalla piattaforma italiana e 2 da quella croata – ed è stato denominato “*Do-Nothing + 4 Development Wells*” (4DW).

Per entrambi gli scenari il termine della produzione è previsto a gennaio 2031 ma con differenti RF. Per lo scenario DN, la produzione cumulativa stimata dal modello a fine forecast è pari a 12.953 GSm³ con RF del 43.9% (7.514 GSm³ da Annamaria, con RF di 37.9%). Mentre, per lo scenario 4DW, si stima una produzione cumulativa di 14.287 GSm³ con RF del 48.4% (8.849 GSm³ da Annamaria, con RF di 44.6%).

2 Dati delle stazioni CGPS di Annamaria

Entrambe le piattaforme di Annamaria sono strumentate con una stazione CGPS per il monitoraggio continuo degli spostamenti.

La registrazione delle misure è iniziata ad aprile 2010 sulla piattaforma B (coordinate piane Gauss-Boaga Roma40 2393009 m E 4908951 m N, elevazione tavola rotary di 41 m e altezza d'acqua di 59 m) ed a gennaio 2010 sulla piattaforma A (2390513 m E 4913553 m N) (Figura 3).

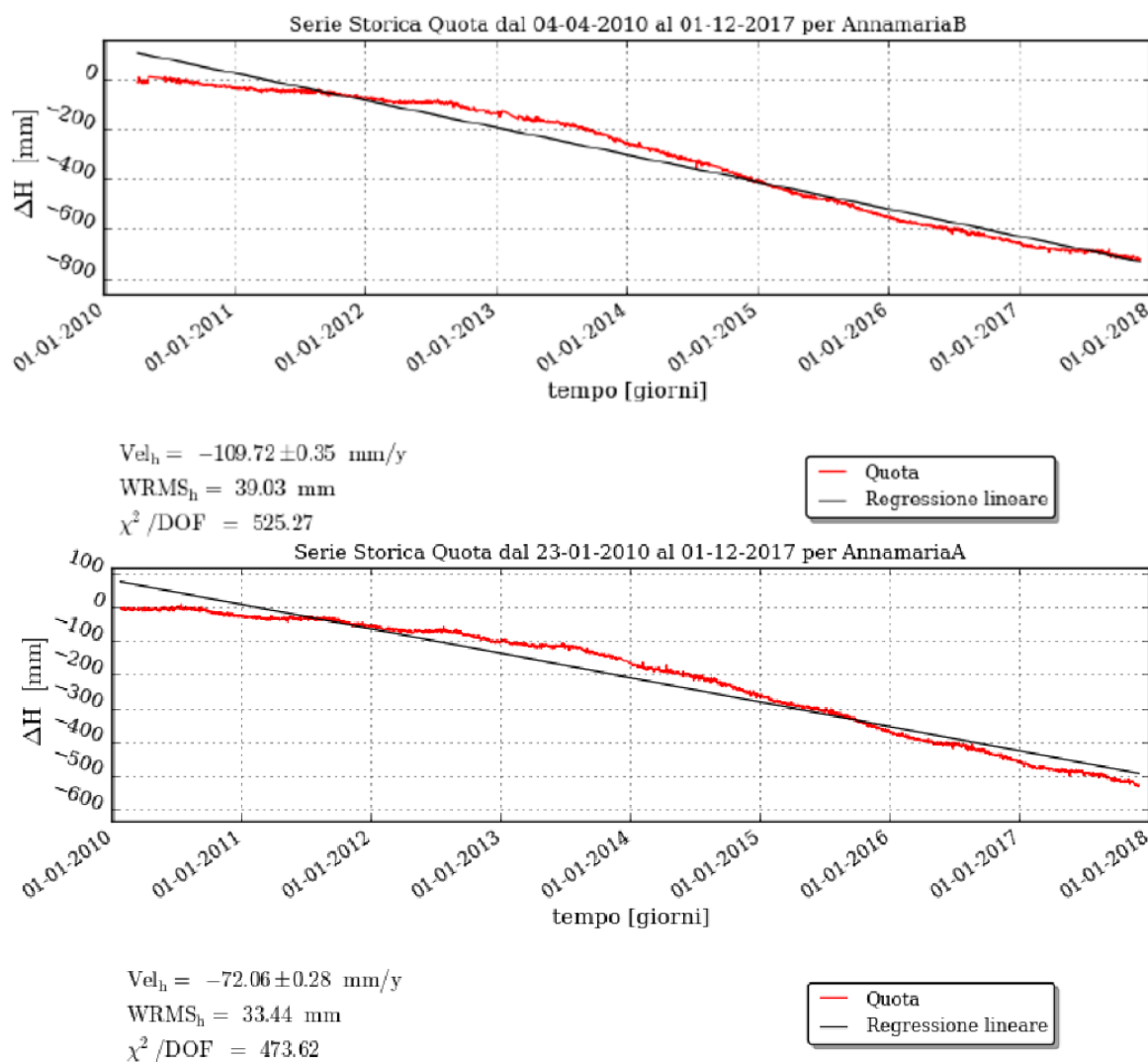


Figura 3 – Serie storiche di spostamenti verticali registrati dalle stazioni CGPS, aggiornate al giorno 01/12/2017, (in alto piattaforma B e in basso piattaforma A).

3 Modello geomeccanico agli elementi finiti

Lo studio geomeccanico è stato svolto con un modello numerico 3D agli elementi finiti (FE), costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [1] (denominato modello Abaqus nel seguito).

3.1 *Approccio metodologico*

La costruzione del modello Abaqus ha necessitato le seguenti informazioni dal modello fluido-dinamico [2]:

- mappe geologiche dei livelli interessati dal campo, estese in misura tale da descrivere interamente, non solo la zona mineralizzata, ma anche gli acquiferi laterali idraulicamente connessi agli strati produttivi;
- dettagliata descrizione di geometria, geologia e petrofisica dei livelli mineralizzati e degli acquiferi ad essi connessi idraulicamente, riprodotte con accuratezza dalla griglia di calcolo numerica;
- distribuzione ed evoluzione temporale della pressione nei livelli mineralizzati e negli acquiferi ad essi connessi idraulicamente.

Invece, per la stima dei parametri caratterizzanti il comportamento meccanico della roccia secondo la legge costitutiva adottata nel modello geomeccanico (§3.3.3), sono stati utilizzate 2 tipi di informazione:

- risultati di prove di compressione eseguite in laboratorio su campioni di formazione geologica prelevati dal pozzo Annamaria B7 (§3.3.3), per una prima stima diretta;
- variazioni altimetriche registrate dalle stazioni CGPS installate sulle piattaforme di Annamaria (§2), per la successiva calibrazione.

È importante precisare che sia le simulazioni fluido-dinamiche sia le simulazioni geomeccaniche sono state prolungate fino al 2061. Infatti, con le prime si è voluto valutare la ripressurizzazione del giacimento dopo la fine della produzione per effetto all'acquifero circostante, mentre con le seconde l'evoluzione della subsidenza nei 30 anni successivi alla chiusura dei pozzi.

3.2 *Geometria*

Il modello Intersect è composto da 267x192 celle nelle direzioni I e J rispettivamente, per 248 livelli. Esso interessa un'area di circa 68x55 km² ed è costituito da 12,713,472 di celle, di cui 6,616,341 attive. Per non risentire dell'influenza delle condizioni al contorno imposte ai bordi, il modello Abaqus è stato esteso lateralmente (*side-burden*) fino a ricoprire un'area di circa 88x73 km². Data l'estensione risultante, è stato necessario effettuare un processo di upscaling per limitare il numero dei gradi di libertà. Nella direzione verticale, il modello Abaqus per la zona del giacimento è stato ottenuto accorpendo tra loro livelli attivi e non attivi del modello IX. Un processo di upscaling è stato attuato anche in direzione orizzontale, unendo tra loro un differente numero di celle a seconda della distanza dal centro del giacimento.

La griglia originale, inoltre, è stata estesa verticalmente in modo da comprendere la regione che va dal fondale marino fino ad una profondità di 5000 m. Il modello Abaqus è stato diviso in 5 livelli

dalla sommità del giacimento fino al fondale marino (*overburden*) e in 5 livelli dal fondo del giacimento fino alla base del modello (*underburden*), come mostrato in Figura 4.

La griglia FE risulta così costituita da 81x50x136 (550,800) elementi e 572,934 nodi per un totale di 2,055,863 gradi di libertà.

Le condizioni al contorno assegnate al modello Abaqus sono di spostamento nullo alla base e spostamento orizzontale impedito ai lati della griglia.

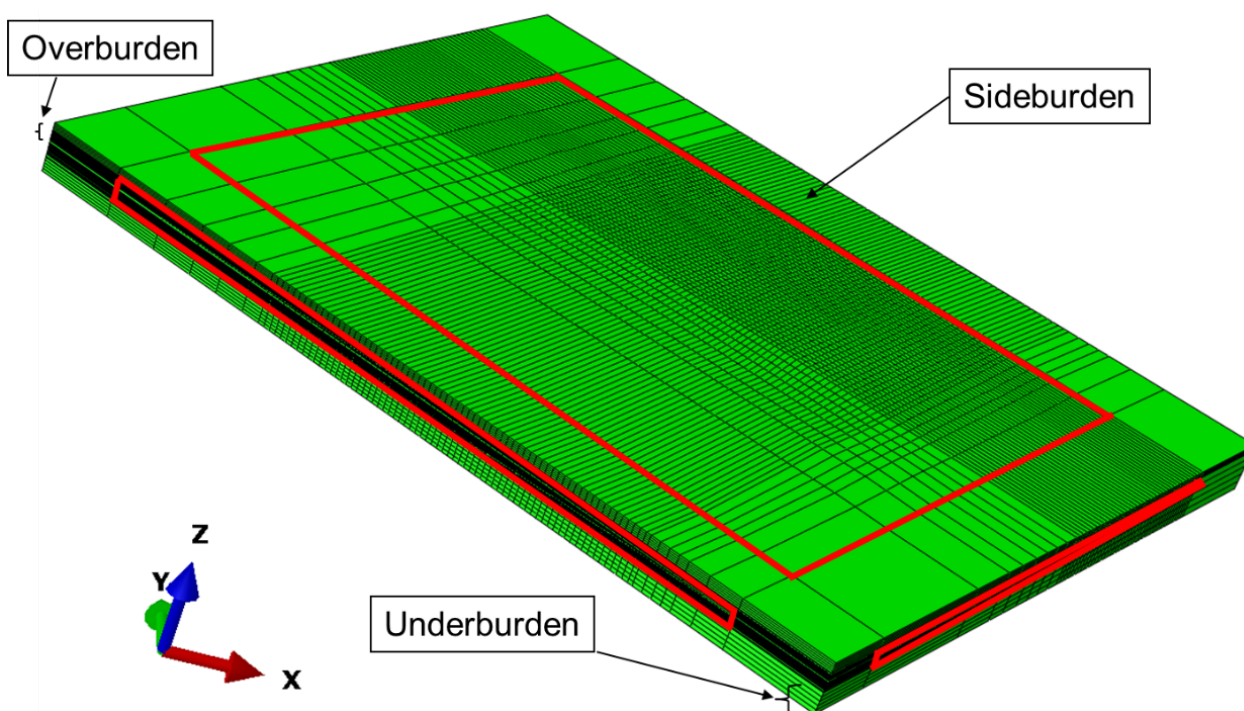


Figura 4 – Confronto tra l'estensione del modello geomeccanico e del modello fluido-dinamico (riquadri rossi).

3.3 Proprietà dei materiali

3.3.1 Densità

A partire dal log sonico e dal log di densità registrati lungo il pozzo Annamaria 1 si è utilizzato l'approccio di Gardner et al. [6] per calcolare un profilo continuo di densità della roccia (Figura 5). Esso è stato interpolato attraverso le seguenti relazioni:

$$\rho(\text{kg/m}^3) = 1291.2 \cdot z^{1.0781} \quad z_{fm} \leq z \leq 1778 \text{ m} \quad [\text{Eq. 3.1}]$$

$$\rho(\text{kg/m}^3) = 2685.9 \quad z \geq 1778 \text{ m} \quad [\text{Eq. 3.2}]$$

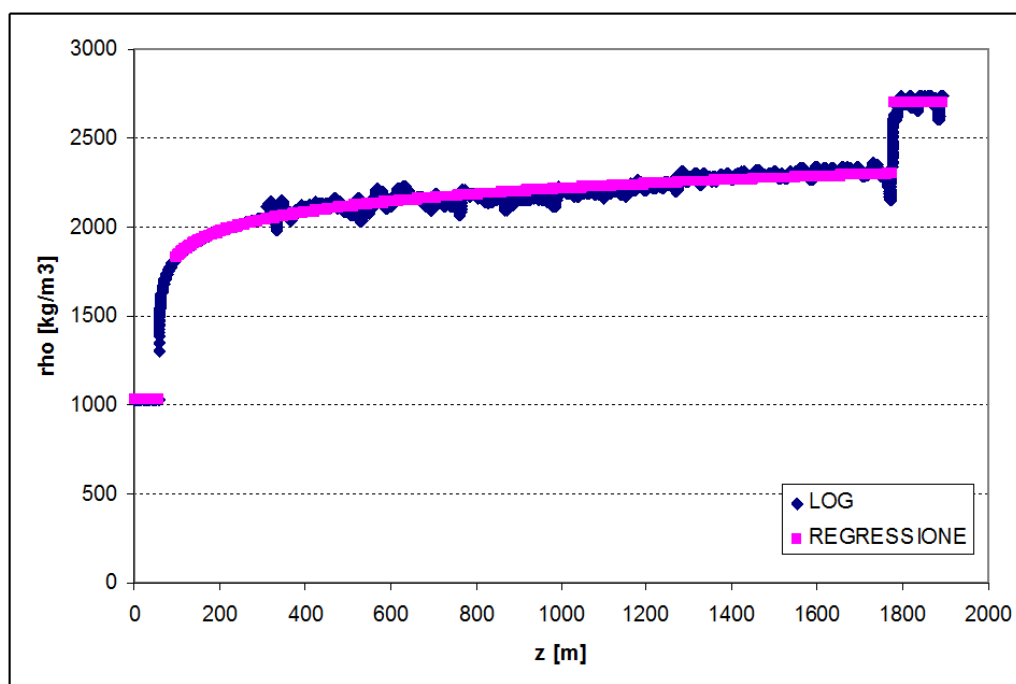


Figura 5 - Profilo del log di densità per il pozzo Annamaria 1.

dove le profondità (z) sono misurate in metri TVDSS (*True Vertical Depth Sub Sea*) ed è stata considerata una profondità del fondale marino z_{fm} pari a 58 metri.

La curva analitica così ottenuta fornisce un'ottima approssimazione della densità misurata ed è stata implementata in formato tabulare nel modello Abaqus.

Attraverso un'operazione di integrazione della densità lungo la verticale, si è ottenuto il seguente profilo della tensione totale verticale σ_v :

$$\sigma_v(\text{bar}) = 5.86 + 0.12 \cdot (z - z_{fm})^{1.0781} \quad z_{fm} \leq z \leq 1778 \text{ m} \quad [\text{Eq. 3.3}]$$

$$\sigma_v(\text{bar}) = 365.95 + 0.26 \cdot (z - z_{fm})^{1.0781} \quad z \geq 1778 \text{ m} \quad [\text{Eq. 3.4}]$$

3.3.2 Peso specifico dei fluidi saturanti

Viene fornito al modello Abaqus il valore del peso specifico dei fluidi saturanti. Per ogni regione idromeccanica il valore di γ_f (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 Intersect.

3.3.3 Proprietà meccaniche

Il comportamento meccanico del materiale costituente le formazioni geologiche è stato descritto secondo la legge costitutiva elasto-viscoplastica 'Soft-Soil-Creep' [7] (nel seguito abbreviato con VNM), che è stata formulata arricchendo il classico modello elasto-plastico 'Modified Cam-Clay Model' [8] (MCCM) con la componente viscosa della deformazione. Evidenze sperimentali mostrano che materiali come quelli dei giacimenti dell'area adriatica possono presentare una risposta di tipo elasto-viscoplastico alle variazioni di sforzo efficace [9].

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.

I valori dei parametri λ^* , κ^* e μ^* sono stati ottenuti direttamente dall'interpretazione dei risultati di prove di laboratorio effettuate su 10 campioni prelevati dal pozzo Annamaria B7 [10] e sono pari a: 5.75e-2, 6.19e-3 e 1.02e-3, rispettivamente.

Successivamente, il valore di μ^* è stato calibrato in modo da riprodurre con la maggior accuratezza possibile le misure registrate dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma Annamaria B (§2). In seguito a tale operazione di calibrazione, il valore di μ^* utilizzato nel modello è pari a 1.06e-3.

Poi, a ν è stato assegnato il valore di 0.3, mentre M è stata posta pari a 1.33.

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 pari a 1.339.

Il parametro geomeccanico chiave negli studi di subsidenza è la comprimibilità edometrica c_m del materiale, calcolata come segue:

$$c_m = k^* / \sigma'_v \quad [\text{Eq. 3.5}]$$

dove σ'_v è la tensione efficace verticale, definita come la differenza tra la tensione totale verticale e la pressione dei pori p :

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad [\text{Eq. 3.6}]$$

Si precisa che gli interlayer inattivi nel modello fluido-dinamico e le regioni di over-, under-, side-burden sono descritti come mezzi elastici lineari, approssimazione più che sufficiente dal momento che in tali intervalli non sono presenti variazioni di pressione dovute alla produzione.

Nelle Tabelle 1, 2 e 3 si riportano i valori di c_m per tutti i livelli del modello Abaqus.

Infine, si sottolinea che il campo di pressione del modello IX è stato stimato utilizzando comprimibilità dei pori coerenti con la comprimibilità edometrica c_m del modello geomeccanico.

Tabella 1 – Livelli geologici, IX (0 inattivi, 1 attivi) e Abaqus. ROCKNUM e comprimibilità edometrica.

LIVELLO GEOLOGICO	LIVELLO ECLIPSE			LIVELLO ABAQUS	ROCKNUM	PROF. mssl	PRESS. bar	PORO. -	Cm 1/bar
	0/1 FLAG	INIZIALE	FINALE						
Over-burden				OVB1	\	195.1	\	\	6.01E-04
				OVB2	\	332.1	\	\	2.66E-04
				OVB3	\	469.2	\	\	1.65E-04
				OVB4	\	606.2	\	\	1.18E-04
				OVB5	\	743.3	\	\	9.14E-05
PLQ1-D_top - PLQ1-Da_top	0	1	1	1	1	880.3	90.0	0.36	7.5E-05
PLQ1-Da	1	2	2	2					
PLQ1-Da_bot - PLQ1-D3_top	0	3	3	3					
PLQ1-D3	1	4	6	4					
PLQ1-D3_bot - PLQ1-D3b_top	0	7	7	5					
PLQ1-D3b	1	8	9	6					
PLQ1-D3b_bot - PLQ1-D4_top	0	10	10	7					
PLQ1-D4	1	11	13	8					
PLQ1-D4_bot - PLQ1-D5_top	0	14	14	9					
PLQ1-D5	1	15	16	10					
PLQ1-D5_bot - PLQ1-D6_top	0	17	17	11					
PLQ1-D6	1	18	21	12	2	981.1	100.7	0.34	6.59E-05
PLQ1-D6_bot - PLQ1-D7_top	0	22	22	13					
PLQ1-D7	1	23	26	14					
PLQ1-D7_bot - PLQ-A1_top	0	27	27	15					



Tabella 2 – Livelli geologici, IX (0 inattivi, 1 attivi) e Abaqus. ROCKNUM e comprimibilità edometrica.

LIVELLO GEOLOGICO	LIVELLO ECLIPSE			LIVELLO ABAQUS	ROCKNUM	PROF. mssl	PRESS. bar	PORO. -	Cm 1/bar
	0/1 FLAG	INIZIALE	FINALE						
PLQ-A1	1	28	31	16	3	1059.6	108.4	0.29	5.97E-05
PLQ-A1 bot - PLQ-A2 top & PLQ-A2 & PLQ-A3	0	32	34	17					
PLQ-A3	1	35	35	18					
PLQ-A3 bot - PLQ-A3a top	0	36	36	19					
PLQ-A3a	1	37	38	20					
PLQ-A3a bot - PLQ-A3b top	0	39	39	21					
PLQ-A3b	1	40	40	22					
int-PLQ-A3b-A4	0	41	41	23					
PLQ-A4 & PLQ-A4 bot - PLQ-A4a top	1	42	44	24					
PLQ-A4a	1	45	46	25					
PLQ-A4a bot - PLQ-A5a 1 top	0	47	47	26					
PLQ-A5a 1 & PLQ-A5a 1 bot - PLQ-PLQ-A5a 2	1	48	52	27					
PLQ-A5a 2	1	53	53	28					
PLQ-A5a 2 bot - PLQ A5 B top	0	54	54	29					
PLQ A5 b	1	55	58	30					
PLQ A5 B bot - PLQ-A5c top & PLQ-A5c	0	59	61	31					
PLQ-A5d	1	62	64	32					
PLQ-A5d bot - PLQ-A6 top	0	65	65	33					
PLQ-A6	1	66	68	34	4	1135.8	116.4	0.30	5.5E-05
PLQ-A6 bot - PLQ-A6a top	0	69	69	35					
PLQ-A6a	1	70	70	36					
PLQ-A6a123	1	71	72	37					
PLQ-A6b	1	73	78	38					
PLQ-A6b bot - PLQ-A7 top	0	79	79	39					
PLQ-A7 & PLQ-A7 bot - PLQ-A8a top	1	80	84	40					
PLQ-A8a & PLQ-A8a bot - PLQ-A8b top	1	85	86	41					
PLQ-A8b & PLQ-A8b bot - PLQ-A9 top	1	87	88	42					
PLQ-A9 & PLQ-A9 bot - PLQ-A10 top	1	89	91	43	5	1169.1	119.5	0.29	5.3E-05
PLQ-A10 & PLQ-A10 bot - PLQ A10a_top	1	92	93	44	6	1182.1	120.8	0.31	5.22E-05
PLQ A10a	1	94	95	45					
PLQ-10a bot - PLQ-A11a top	0	96	96	46					
PLQ-A11a	1	97	98	47	7	1202.4	123.3	0.28	5.13E-05
PLQ-A11b	1	99	100	48					
PLQ-A11c	1	101	103	49					
PLQ-A11c bot - PLQ-A12_top	0	104	104	50					
PLQ-A12	1	105	107	51					
PLQ-A12 bot - PLQ-B0 top	0	108	108	52					
PLQ-B0	1	109	110	53					
PLQ-B0 bot - PLQ-B1-B2 top	0	111	111	54					
PLQ-B1-B2 & PLQ-B1-B2 bot - PLQ-PLQ-B3 & PLQ-B3 bot - PLQ-B4 top	1	112	116	55	8	1253.4	129.9	0.25	4.94E-05
PLQ-B4 & PLQ-B4 bot - PLQ-B5a top	1	117	119	56					
PLQ-B5a & PLQ-B5a bot - PLQ-B5b top	1	120	122	57					
PLQ-B5b & PLQ-B5b bot - PLQ-B6ab top	1	123	125	58					
PLQ-B6ab & PLQ-B6ab bot - PLQ-C1 top	1	126	129	59					
PLQ-C1 & PLQ-C1 bot - PLQ-C2 top	1	130	132	60	9	1274.7	130.7	0.25	4.78E-05
PLQ-C2 & PLQ-C2 bot - PLQ-Dab top	1	133	135	61					
PLQ-Dab	1	136	137	62	10	1322.8	139.1	0.21	4.69E-05
PLQ-Dab bot - PLQ-D1ab_top	1	138	143	63					
PLQ-D1ab	0	144	144	64					
PLQ-D1ab bot - PLQ-E top	1	145	150	65					
PLQ-E	0	151	151	66					
PLQ-E bot - PLQ-E1 top	1	152	156	67	11	1375.8	145.5	0.19	4.5E-05
PLQ-E1	0	157	157	68					
PLQ-E1	1	158	158	69					
PLQ-E1	1	159	159	70					
PLQ-E1	1	160	160	71					
PLQ-E1 bot - PLQ-F top	0	161	161	72					
PLQ-F	1	162	165	73	12	1434.6	154.9	0.19	4.37E-05
PLQ-F bot - PLQ-G_top	0	166	166	74					
PLQ-G	1	167	175	75					
PLQ-G bot - PLQ-Int Hbcd top	0	176	176	76					



Tabella 3 – Livelli geologici, IX (0 inattivi, 1 attivi) e Abaqus. ROCKNUM e comprimibilità edometrica.

LIVELLO GEOLOGICO	LIVELLO ECLIPSE			LIVELLO ABAQUS	ROCKNUM	PROF. mssl	PRESS. bar	PORO. -	Cm 1/bar					
	0/1 FLAG	INIZIALE	FINALE											
PLQ-Int Hbcd	1	177	181	77	13	1512.7	166.5	0.19	4.19E-05					
PLQ-Int Hbcd bot - PLQ-H top	0	182	182	78										
PLQ-H	1	183	193	79										
PLQ-H bot - PLQ-Int L top	0	194	194	80										
PLQ-Int L	1	195	203	81										
PLQ-Int L bot - PLQ-P 1 top	0	204	204	82										
PLQ-P 1	1	205	205	83										
PLQ-P 1 bot - PLQ-Q top	0	206	206	84										
PLQ-Q	1	207	207	85	14	1925.6	220.8	0.18	3.07E-05					
	0	208	208	86										
	1	209	209	87										
	0	210	210	88										
	1	211	211	89										
	0	212	212	90										
	1	213	213	91										
	0	214	214	92										
	1	215	215	93										
	0	216	216	94										
	1	217	217	95										
	0	218	218	96										
	1	219	219	97										
	0	220	220	98										
1	221	221	99											
0	222	222	100											
1	223	223	101											
PLQ-Q bot - PLQ-R top	0	224	224	102	15	2083.9	235.7	0.17	2.43E-05					
PLQ-R	1	225	225	103										
	0	226	226	104										
	1	227	227	105										
	0	228	228	106										
	1	229	229	107										
	0	230	230	108										
	1	231	231	109										
	0	232	232	110										
	1	233	233	111										
	0	234	234	112										
	1	235	235	113										
	0	236	236	114										
	1	237	237	115										
	0	238	238	116										
	1	239	239	117										
	0	240	240	118										
	1	241	241	119										
0	242	242	120											
1	243	243	121											
0	244	244	122											
1	245	245	123											
PLQ-R bot - Santerno_t	0	246	246	124	16	1673.2	169.4	0.19	3.41E-05					
Santerno_t - top carbonate	0	247	247	125										
Top carbonate - bot carbonate	1	248	248	126										
Under-burden				UB1						\	2227.7	\	\	1.88E-05
				UB2						\	2782.1	\	\	1.16E-05
				UB3	\	3336.6	\	\	8.27E-06					
				UB4	\	3891.1	\	\	6.37E-06					
				UB5	\	4445.5	\	\	5.15E-06					

3.4 Inizializzazione e storia di pressione

3.4.1 Stato tensionale iniziale

Per il campo di Annamaria, lo sforzo totale verticale σ_v è stato calcolato dal gradiente di over-burden definito a partire da log sonici e di densità, come descritto in §3.3.1.

Invece, lo sforzo efficace σ'_h è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad [\text{Eq. 3.7}]$$

dove K_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.54 [11]. Inoltre, si è assunto che lo stato tensionale sia isotropo nel piano orizzontale.

3.4.2 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello di flusso IX, è stata importata nel modello agli elementi finiti.

Le pressioni sono state importate con passo temporale annuale fino alla chiusura dei pozzi (gennaio 2031) e poi con passo temporale quinquennale fino alla fine della simulazione (gennaio 2061), per un numero totale di step temporali della simulazione geomeccanica pari a 32.

Poi, al fine di confrontare i risultati forniti dal modello geomeccanico con i dati batimetrici e con i dati di compattazione da markers radioattivi, sono state estratte le pressioni anche in corrispondenza delle 11 date di acquisizione di tali misure, per un totale di 43 step temporali..

4 Risultati delle simulazioni numeriche

In questo paragrafo si presentano i risultati forniti dalle simulazioni geomeccaniche agli elementi finiti. Il fenomeno di subsidenza viene descritto sinteticamente attraverso tre indici:

1. la subsidenza massima;
2. l'estensione massima, definita come la massima distanza del punto di massimo dalla linea di iso-subsidenza dei 2 cm – considerata come limite areale del fenomeno;
3. la distanza minima della linea di iso-subsidenza dei 2 cm dalla costa.

Nella Tabella 4 si riportano i valori di tali indici a 3 date significative: alla fine della fase di *history* del modello fluido-dinamico (1-gen-2017), al termine della produzione (1-gen-2031) e alla fine della simulazione (1-gen-2061). Quest'ultima data è stata fissata a 30 anni dopo la chiusura dei pozzi: infatti, si è voluto valutare l'influenza della ripressurizzazione sull'evoluzione della subsidenza. Inoltre, nella stessa tabella si riportano i risultati ottenuti con entrambi gli scenari di sviluppo previsti dal modello fluido-dinamico: "Do-Nothing" e "4 Development Wells".

Tabella 4 – Indici caratteristici del fenomeno di subsidenza previsto dal modello geomeccanico.

Data	Scenario di Sviluppo	Subsidenza Punto di Max (cm)	Estensione Max (km)	Distanza Min da Costa (km)
01-gen-17	\	59	20	50
01-gen-31	DN	118	25	46
01-gen-46		114	26	45
01-gen-61		112	29	44
01-gen-31	4DW	163	25	46
01-gen-46		159	26	45
01-gen-61		157	29	44

Dall'analisi dei risultati segue che:

- in entrambi gli scenari di sviluppo, il massimo abbassamento è previsto alla data di fine produzione e risulta localizzato nel punto aventi le seguenti coordinate piane Gauss-Boaga Roma40: 2390741.5 m E, 4921721.1 m N. Tale punto, denominato punto di massimo, si trova a 900 m dalla piattaforma Annamaria A, lungo la linea immaginaria che congiunge quest'ultima alla piattaforma Annamaria B.
- nello scenario DN il valore massimo previsto in corrispondenza del punto di massimo è di 118 cm a fine produzione e di 112 cm a fine simulazione; analogamente, nello scenario 4DW si prevedono 163 cm e 157 cm (Figura 6). La riduzione dell'abbassamento massimo nei 30 anni successivi alla chiusura dei pozzi è un'evidente effetto della ripressurizzazione del giacimento dovuta all'acquifero;
- l'influenza degli scenari di sviluppo sull'estensione areale del fenomeno è trascurabile: infatti, in entrambi i casi si ha massima estensione del fenomeno pari a 29 km e minima distanza dalla costa pari a 44 km, a fine simulazione (Figura 7). Come dimostra l'analisi dell'evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm (Figura 8), dopo la fine della produzione l'area interessata dal fenomeno subsidenziale risulta in fase di stabilizzazione.

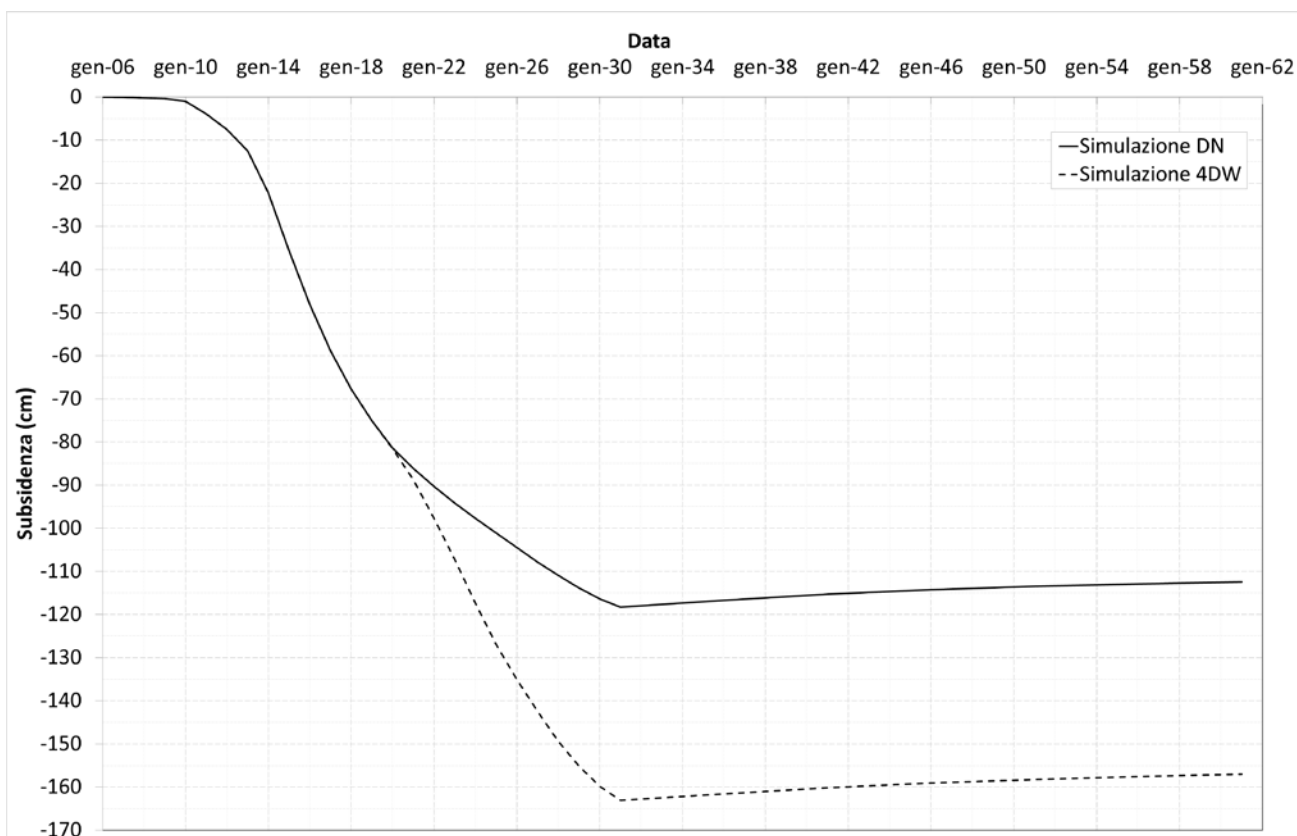


Figura 6 – Evoluzione temporale della subsidenza nel punto di massimo.

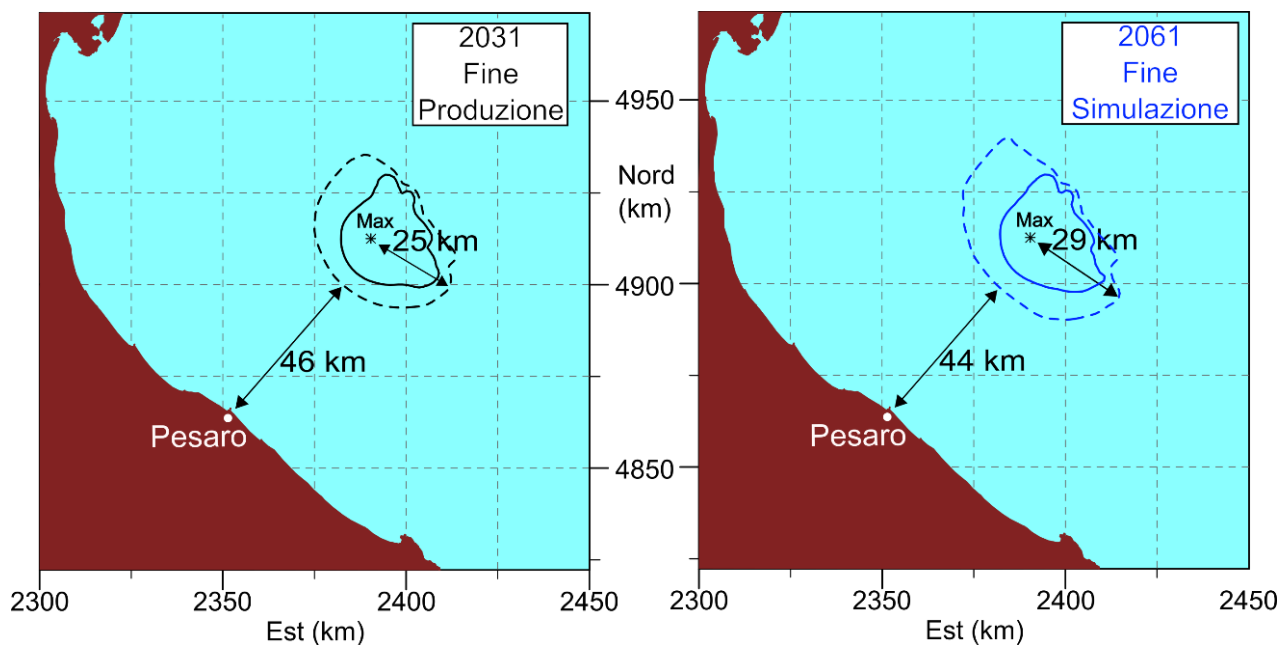
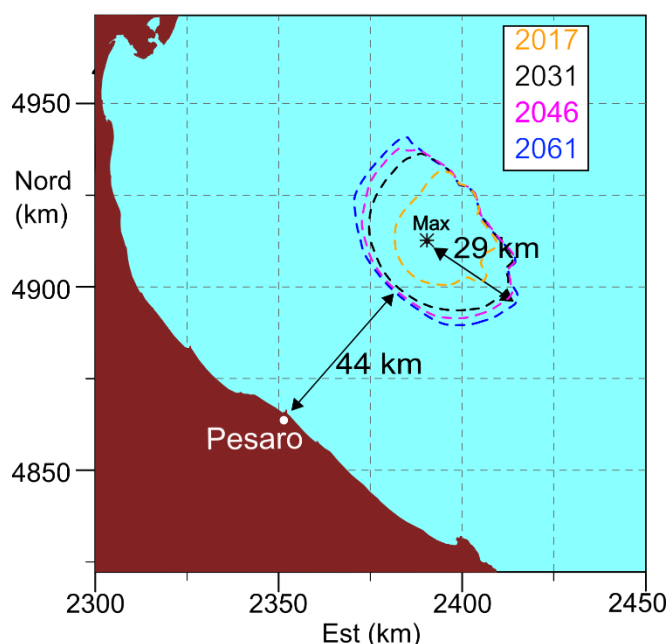


Figura 7 – Linee di iso-subsidenza dei 2 cm (linea tratteggiata) e 5 cm (linea continua) al termine della produzione (sx) e a fine simulazione (dx). L’asterisco indica il punto di massimo.


Figura 8 – Evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm.

5 Confronto con i dati CGPS

Nelle Figure 9, 10, 11 e 12 si mostra il confronto tra le stime di subsidenza fornite dal modello geomeccanico in corrispondenza delle 2 piattaforme di Annamaria (Tabella 5) e la serie storica di spostamenti verticali registrati dalle stazioni CGPS.

Il modello riproduce con elevata accuratezza le misure corrispondenti alla piattaforma italiana (Figure 9 e 10), in termini sia di spostamenti verticali che di velocità di subsidenza.

Relativamente alla piattaforma Annamaria A (Figure 11 e 12), si osserva la riproduzione accurata della velocità di subsidenza e una sovrastima degli spostamenti verticali, a vantaggio comunque di sicurezza.

Tabella 5 – Risultati del modello geomeccanico in corrispondenza delle piattaforme di Annamaria.

Data	Scenario di Sviluppo	Subsidenza (cm)	
		Annamaria B	Annamaria A
01-gen-17	\	66	56
01-gen-31	DN	114	112
01-gen-46		109	108
01-gen-61		107	107
01-gen-31	4DW	141	159
01-gen-46		137	155
01-gen-61		136	153

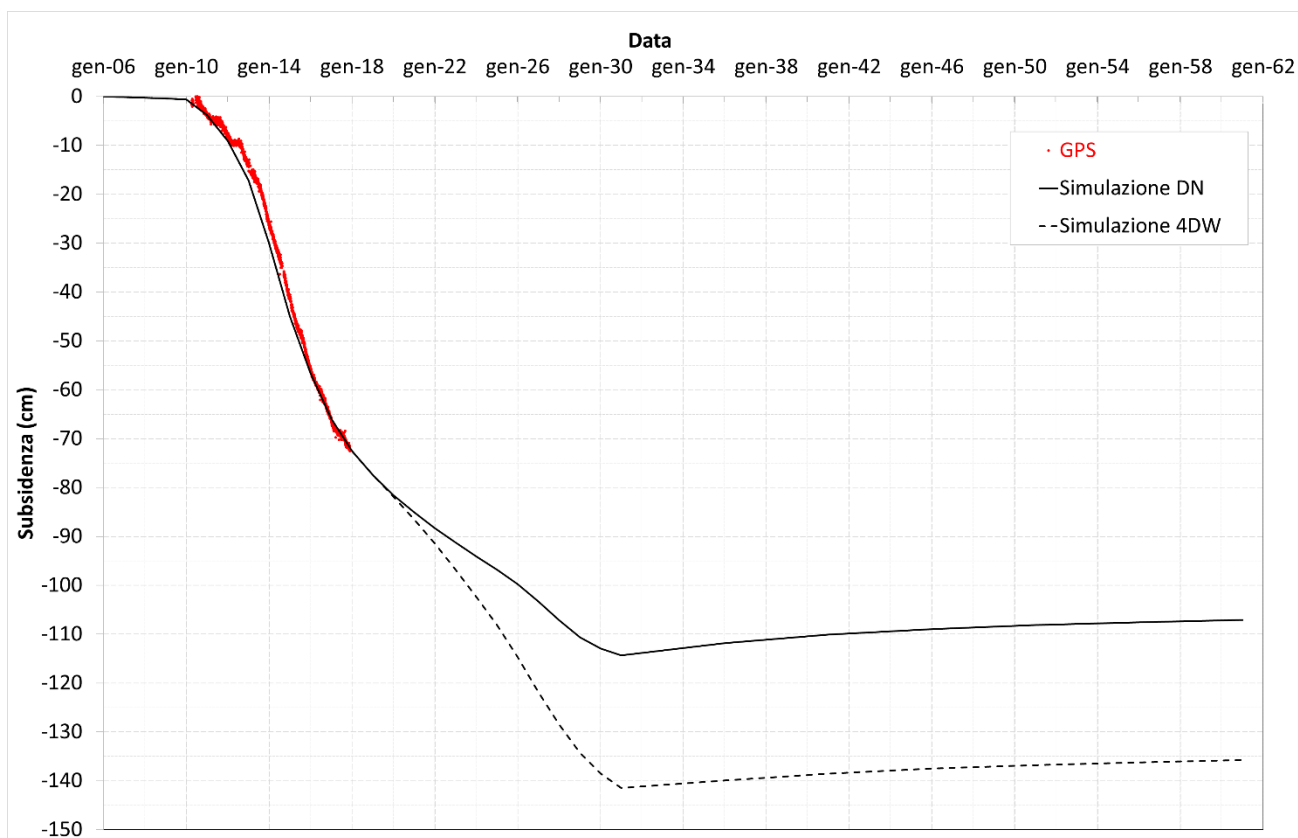


Figura 9 – Confronto tra spostamento verticale misurato e simulato alla piattaforma Annamaria B.

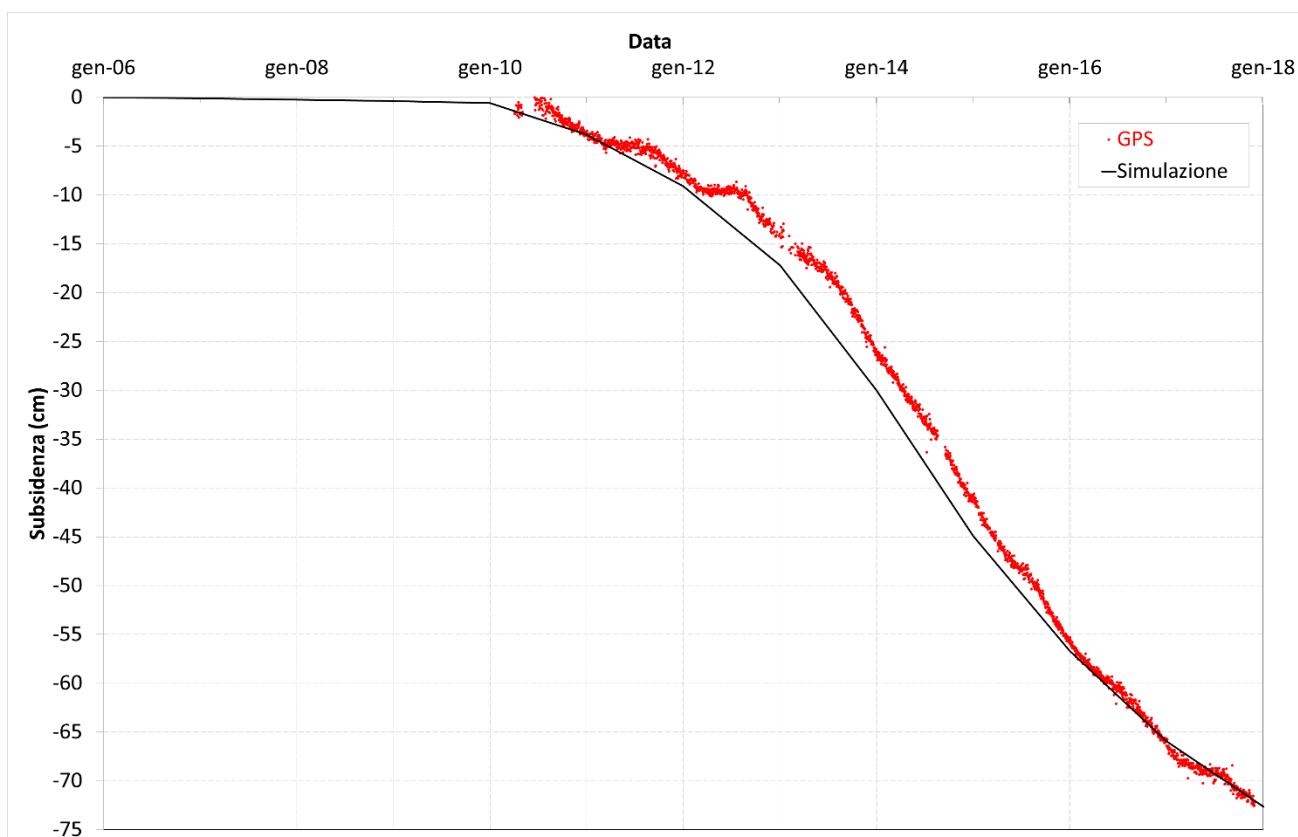


Figura 10 – Ingrandimento della Figura 9.

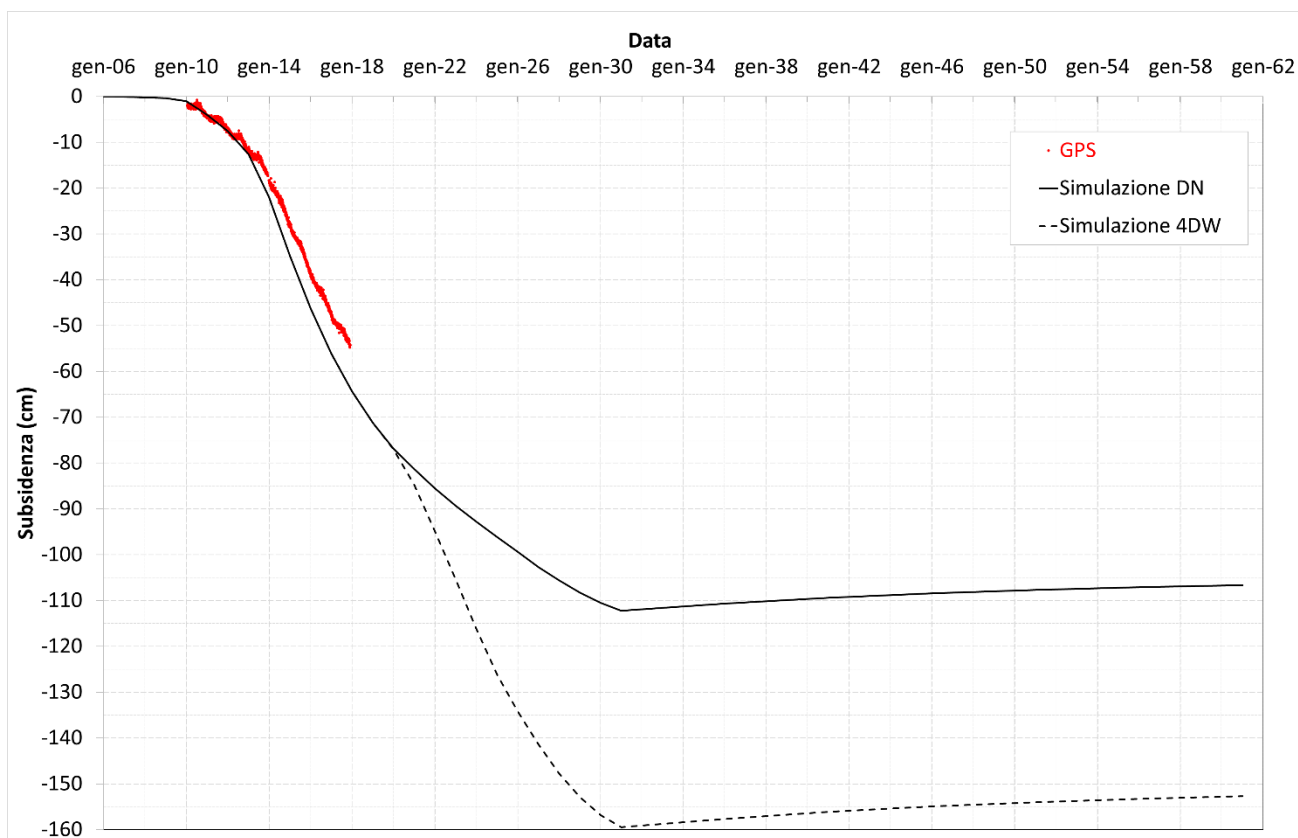


Figura 11 – Confronto tra spostamento verticale misurato e simulato alla piattaforma Annamaria A.

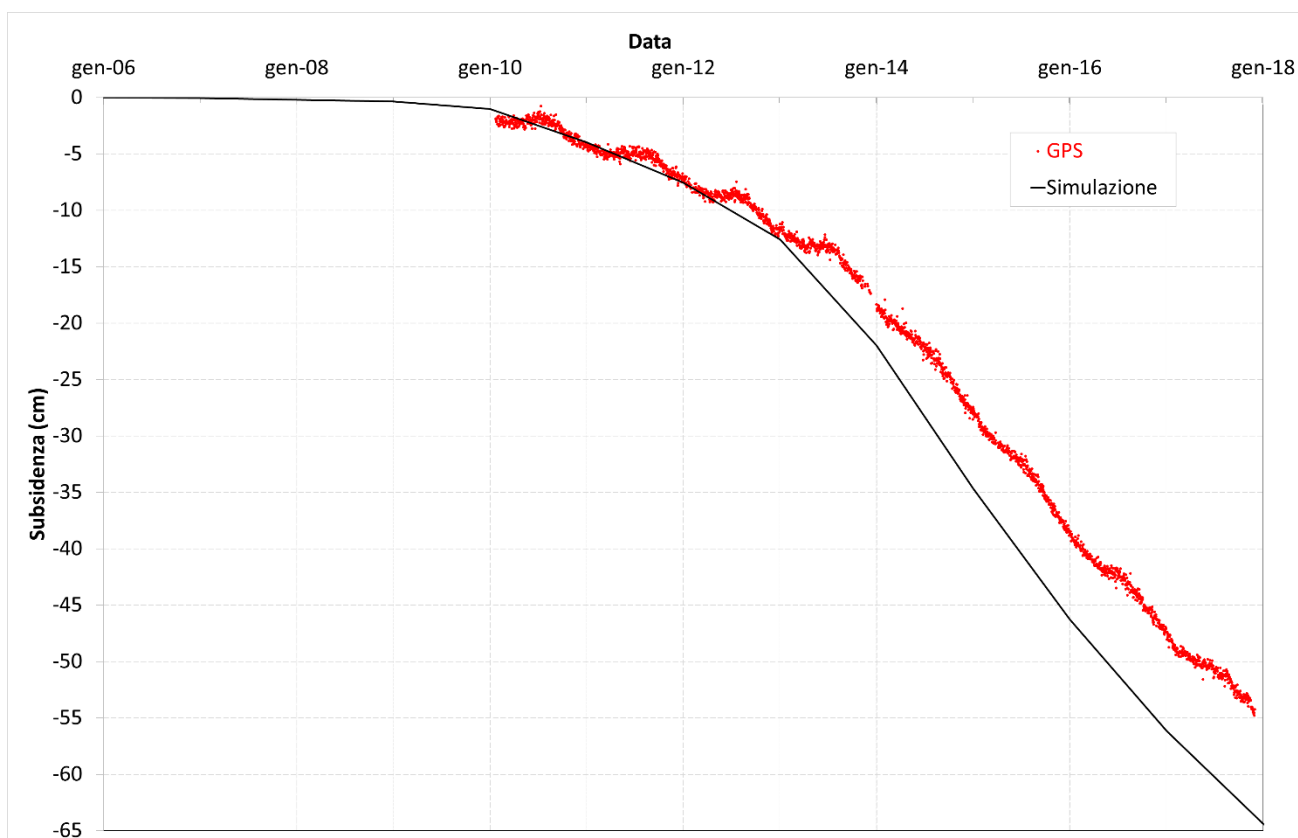


Figura 12 – Ingrandimento della Figura 11.



6 Confronto con i dati di compattazione da marker radioattivi

Nella regione del giacimento è disponibile una serie di rilevazioni *in situ* della compattazione tramite marker radioattivi installati lungo il pozzo Annamaria B 11.

Dai risultati delle simulazioni numeriche sono stati estratti gli spostamenti in corrispondenza dei marker ed è stata calcolata la variazione della loro distanza (compattazione se negativa, espansione se positiva) negli intervalli temporali considerati.

Dal confronto di queste ultime con le misure *in situ* si può notare come le compattazioni misurate siano in buon accordo con quanto previsto dal modello.

Il pozzo Annamaria B 11 è stato perforato dalla piattaforma Annamaria B, è quasi verticale (deviazione massima pari a 1.09°) ed è dedicato al monitoraggio della compattazione.

A tal scopo sono stati sparati in formazione 100 marker radioattivi, suddivisi in 3 intervalli di profondità e posizionati a 5.25 m l'uno dall'altro; essi definiscono 94 marker spacing di ampiezza pari a 10.50 m (Tabella 6). Sono stati eseguiti 9 sondaggi e le misure acquisite sono riportate nelle Tabelle 7, 8, 9 e 10. Da quest'ultima si nota che le misure per il marker spacing più profondo (numero 2) sono disponibili solamente fino al 2012.

Dall'analisi delle quote dei top dei livelli del giacimento in corrispondenza del pozzo di monitoraggio, si osserva che i 4 marker spacing più superficiali (dal numero 99 al numero 96) non ricadono all'interno del giacimento e vengono esclusi dal presente confronto: infatti, le deformazioni in essi misurate sono attribuibili ad effetti poroelastici [12] e non alla variazione di pressione associata alla produzione.

Tabella 6 – Descrizione dei 3 intervalli di profondità in cui si trovano i marker.

Profondità Nominale		Spessore monitorato	Quantità	
Top Marker	Bottom Marker		Marker	Marker Spacing
(m MD)		(m)	-	
970.00	1001.50	31.50	7	5
1057.55	1498.55	441.00	85	83
1738.00	1774.75	36.75	8	6
		509.25	100	94

Tabella 7 – Misure dell'ampiezza dei marker spacing a profondità nominale da 970.00 a 1001.50 m MD.

Marker Spacing	Profondità Nominale		Ampiezza Nominale	Sondaggio								
	Top Marker	Bottom Marker		2010a	2010b	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
#	(m MD)		(m)									
99	970.000	980.500	10.500	10.620	10.621	10.623	10.625	10.626	10.628	10.625	10.599	10.583
98	975.250	985.750	10.500	10.562	10.561	10.561	10.561	10.561	10.562	10.559	10.562	10.559
97	980.500	991.000	10.500	10.507	10.502	10.505	10.502	10.500	10.504	10.499	10.527	10.537
96	985.750	996.250	10.500	10.505	10.505	10.504	10.504	10.504	10.504	10.504	10.482	10.480
95	991.000	1001.500	10.500	10.497	10.499	10.501	10.497	10.497	10.498	10.497	10.495	10.494



Tabella 8 - Misure dell'ampiezza dei marker spacing a profondità nominale da 1057.55 a 1362.05 m MD.

Marker Spacing	Profondità Nominale		Ampiezza Nominale	Sondaggio								
	Top Marker	Bottom Marker		2010a	2010b	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
#	(m MD)		(m)									
92	1057.550	1068.050	10.500	10.463	10.464	10.467	10.464	10.465	10.467	10.461	10.477	10.497
91	1062.800	1073.300	10.500	10.561	10.564	10.560	10.562	10.561	10.560	10.560	10.545	10.566
90	1068.050	1078.050	10.000	10.542	10.542	10.542	10.542	10.539	10.543	10.541	10.539	10.530
89	1073.300	1083.800	10.500	10.314	10.311	10.315	10.319	10.309	10.314	10.314	10.334	10.327
88	1078.050	1089.050	11.000	10.326	10.328	10.332	10.326	10.326	10.327	10.324	10.292	10.271
87	1083.800	1094.300	10.500	10.581	10.582	10.581	10.576	10.583	10.583	10.579	10.582	10.564
86	1089.050	1099.550	10.500	10.470	10.472	10.471	10.472	10.480	10.466	10.466	10.490	10.515
85	1094.300	1104.800	10.500	10.470	10.472	10.473	10.475	10.470	10.473	10.470	10.438	10.444
84	1099.550	1110.050	10.500	10.482	10.484	10.485	10.485	10.485	10.486	10.481	10.495	10.462
83	1104.800	1115.300	10.500	10.452	10.449	10.448	10.450	10.449	10.451	10.452	10.449	10.442
82	1110.050	1120.550	10.500	10.494	10.493	10.494	10.498	10.497	10.495	10.495	10.499	10.496
81	1115.300	1125.800	10.500	10.608	10.612	10.608	10.611	10.608	10.609	10.606	10.609	10.601
80	1120.550	1131.050	10.500	10.516	10.515	10.509	10.515	10.513	10.518	10.517	10.513	10.506
79	1125.800	1136.300	10.500	10.437	10.434	10.433	10.435	10.432	10.428	10.429	10.436	10.428
78	1131.050	1141.550	10.500	10.497	10.499	10.500	10.501	10.496	10.494	10.494	10.492	10.490
77	1136.300	1146.800	10.500	10.534	10.538	10.539	10.536	10.534	10.546	10.546	10.522	10.512
76	1141.550	1152.050	10.500	10.575	10.571	10.572	10.571	10.572	10.573	10.572	10.569	10.567
75	1146.800	1157.300	10.500	10.536	10.535	10.532	10.535	10.532	10.528	10.530	10.539	10.541
74	1152.050	1162.550	10.500	10.533	10.534	10.535	10.533	10.530	10.536	10.531	10.523	10.519
73	1157.300	1167.800	10.500	10.497	10.498	10.497	10.498	10.496	10.493	10.487	10.459	10.455
72	1162.550	1173.050	10.500	10.501	10.503	10.498	10.503	10.498	10.495	10.492	10.490	10.486
71	1167.800	1178.300	10.500	10.481	10.482	10.484	10.481	10.475	10.472	10.463	10.481	10.474
70	1173.050	1183.550	10.500	10.537	10.531	10.534	10.533	10.520	10.505	10.486	10.468	10.458
69	1178.300	1188.800	10.500	10.539	10.537	10.537	10.537	10.528	10.482	10.456	10.428	10.417
68	1183.550	1194.050	10.500	10.475	10.477	10.475	10.474	10.461	10.414	10.396	10.371	10.358
67	1188.800	1199.300	10.500	10.559	10.555	10.556	10.555	10.540	10.522	10.509	10.485	10.466
66	1194.050	1204.550	10.500	10.462	10.464	10.463	10.461	10.455	10.444	10.431	10.412	10.389
65	1199.300	1209.800	10.500	10.501	10.500	10.500	10.497	10.496	10.491	10.487	10.487	10.469
64	1204.550	1215.050	10.500	10.587	10.589	10.589	10.588	10.584	10.589	10.587	10.582	10.581
63	1209.800	1220.300	10.500	10.545	10.542	10.544	10.545	10.545	10.540	10.537	10.525	10.529
62	1215.050	1225.550	10.500	10.439	10.439	10.436	10.437	10.437	10.440	10.436	10.433	10.430
61	1220.300	1230.800	10.500	10.461	10.461	10.459	10.461	10.460	10.461	10.462	10.457	10.451
60	1225.550	1236.050	10.500	10.627	10.626	10.626	10.624	10.627	10.622	10.621	10.619	10.622
59	1230.800	1241.300	10.500	10.567	10.568	10.566	10.568	10.567	10.567	10.563	10.557	10.554
58	1236.050	1246.550	10.500	10.535	10.536	10.536	10.535	10.530	10.525	10.528	10.519	10.512
57	1241.300	1251.800	10.500	10.454	10.450	10.452	10.451	10.452	10.449	10.446	10.439	10.431
56	1246.550	1257.050	10.500	10.515	10.516	10.520	10.520	10.506	10.505	10.502	10.508	10.491
55	1251.800	1262.300	10.500	10.580	10.578	10.579	10.583	10.574	10.562	10.560	10.552	10.544
54	1257.050	1267.550	10.500	10.474	10.469	10.473	10.473	10.467	10.453	10.440	10.426	10.435
53	1262.300	1272.800	10.500	10.524	10.522	10.521	10.516	10.512	10.500	10.492	10.482	10.467
52	1267.550	1278.050	10.500	10.506	10.507	10.506	10.502	10.492	10.477	10.465	10.451	10.439
51	1272.800	1283.300	10.500	10.490	10.486	10.484	10.486	10.474	10.452	10.437	10.423	10.407
50	1278.050	1288.550	10.500	10.497	10.493	10.492	10.487	10.481	10.463	10.454	10.431	10.417
49	1283.300	1293.800	10.500	10.484	10.483	10.481	10.478	10.474	10.465	10.455	10.456	10.447
48	1288.550	1299.050	10.500	10.518	10.520	10.519	10.519	10.518	10.518	10.514	10.513	10.509
47	1293.800	1304.300	10.500	10.519	10.521	10.521	10.522	10.518	10.518	10.519	10.518	10.510
46	1299.050	1309.550	10.500	10.543	10.543	10.542	10.542	10.539	10.543	10.542	10.535	10.529
45	1304.300	1314.800	10.500	10.474	10.475	10.475	10.476	10.476	10.472	10.471	10.466	10.462
44	1309.550	1320.050	10.500	10.498	10.497	10.495	10.497	10.488	10.483	10.477	10.483	10.478
43	1314.800	1325.300	10.500	10.548	10.545	10.543	10.537	10.531	10.528	10.524	10.518	10.513
42	1320.050	1330.550	10.500	10.481	10.481	10.480	10.475	10.470	10.468	10.467	10.455	10.448
41	1325.300	1335.800	10.500	10.473	10.472	10.470	10.466	10.459	10.454	10.450	10.449	10.442
40	1330.550	1341.050	10.500	10.571	10.570	10.567	10.564	10.556	10.551	10.544	10.547	10.539
39	1335.800	1346.300	10.500	10.575	10.577	10.576	10.573	10.572	10.574	10.570	10.558	10.554
38	1341.050	1351.550	10.500	10.463	10.462	10.462	10.463	10.463	10.457	10.456	10.453	10.450
37	1346.300	1356.800	10.500	10.478	10.478	10.476	10.474	10.472	10.467	10.466	10.463	10.457
36	1351.550	1362.050	10.500	10.532	10.531	10.530	10.529	10.522	10.517	10.515	10.511	10.505

Tabella 9 - Misure dell'ampiezza dei marker spacing a profondità nominale da 1356.80 a 1498.55 m MD.

Marker Spacing	Profondità Nominale		Ampiezza Nominale	Sondaggio								
	Top Marker	Bottom Marker		2010a	2010b	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
#	(m MD)			(m)								
35	1356.800	1367.300	10.500	10.591	10.588	10.589	10.589	10.579	10.576	10.572	10.570	10.569
34	1362.050	1372.550	10.500	10.480	10.480	10.478	10.479	10.475	10.471	10.466	10.463	10.458
33	1367.300	1377.800	10.500	10.464	10.463	10.462	10.463	10.460	10.457	10.452	10.452	10.443
32	1372.550	1383.050	10.500	10.568	10.564	10.565	10.564	10.562	10.554	10.552	10.547	10.542
31	1377.800	1388.300	10.500	10.469	10.465	10.463	10.465	10.456	10.451	10.445	10.442	10.440
30	1383.050	1393.550	10.500	10.443	10.440	10.437	10.434	10.432	10.426	10.421	10.417	10.413
29	1388.300	1398.800	10.500	10.586	10.586	10.584	10.582	10.577	10.572	10.567	10.569	10.561
28	1393.550	1404.050	10.500	10.556	10.557	10.554	10.556	10.550	10.543	10.539	10.538	10.536
27	1398.800	1409.300	10.500	10.558	10.558	10.559	10.559	10.554	10.551	10.547	10.544	10.540
26	1404.050	1414.550	10.500	10.545	10.547	10.547	10.547	10.546	10.544	10.541	10.541	10.536
25	1409.300	1419.800	10.500	10.458	10.460	10.460	10.461	10.455	10.451	10.449	10.446	10.442
24	1414.550	1425.050	10.500	10.533	10.532	10.532	10.532	10.519	10.515	10.512	10.511	10.507
23	1419.800	1430.300	10.500	10.567	10.568	10.566	10.565	10.554	10.554	10.554	10.554	10.550
22	1425.050	1435.550	10.500	10.471	10.471	10.470	10.472	10.465	10.463	10.462	10.460	10.454
21	1430.300	1440.800	10.500	10.452	10.452	10.450	10.454	10.449	10.446	10.442	10.440	10.435
20	1435.550	1446.050	10.500	10.508	10.510	10.508	10.509	10.505	10.506	10.504	10.501	10.498
19	1440.800	1451.300	10.500	10.590	10.591	10.589	10.592	10.590	10.589	10.586	10.584	10.583
18	1446.050	1456.550	10.500	10.546	10.547	10.548	10.546	10.547	10.550	10.547	10.544	10.544
17	1451.300	1461.800	10.500	10.247	10.248	10.249	10.252	10.248	10.250	10.249	10.247	10.243
16	1456.550	1467.050	10.500	10.392	10.392	10.393	10.391	10.391	10.390	10.388	10.387	10.384
15	1461.800	1472.300	10.500	10.510	10.509	10.509	10.512	10.509	10.509	10.508	10.509	10.506
14	1467.050	1477.550	10.500	10.386	10.386	10.387	10.388	10.385	10.388	10.382	10.382	10.379
13	1472.300	1482.800	10.500	10.613	10.612	10.612	10.613	10.614	10.613	10.611	10.610	10.604
12	1477.550	1488.050	10.500	10.572	10.572	10.573	10.574	10.573	10.577	10.577	10.574	10.573
11	1482.800	1493.300	10.500	10.402	10.403	10.399	10.401	10.402	10.402	10.401	10.400	10.399
10	1488.050	1498.550	10.500	10.496	10.498	10.496	10.499	10.497	10.495	10.495	10.493	10.488

Tabella 10 - Misure dell'ampiezza dei marker spacing a profondità nominale da 1738.00 a 1774.75 m MD.

Marker Spacing	Profondità Nominale		Ampiezza Nominale	Sondaggio								
	Top Marker	Bottom Marker		2010a	2010b	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
#	(m MD)			(m)								
7	1738.000	1748.500	10.500	10.538	10.536	10.534	10.536	10.533	10.531	10.525	10.526	10.522
6	1743.250	1753.750	10.500	10.511	10.507	10.506	10.500	10.489	10.495	10.493	10.481	10.482
5	1748.500	1759.000	10.500	10.555	10.553	10.551	10.547	10.542	10.536	10.534	10.529	10.528
4	1753.750	1764.250	10.500	10.451	10.449	10.447	10.440	10.433	10.428	10.424	10.425	10.418
3	1759.000	1769.500	10.500	10.493	10.498	10.498	10.495	10.486	10.479	10.476	10.476	10.467
2	1764.250	1774.750	10.500	10.504	10.508	10.504	10.504	\	\	\	\	\

In Figura 13 si riporta il confronto tra i risultati della simulazione e le misure, in termini di variazione di ampiezza dei marker spacing rispetto al primo sondaggio del 2010. Per le misure viene mostrata anche la barra di confidenza o errore, la cui ampiezza è tale da includere il 99.7% delle misure disponibili.

Si nota che fino al 2016 il modello geomeccanico è capace di fornire previsioni che ricadono all'interno della banda di confidenza associata alle misure, oppure che sovrastimano queste ultime. Invece, per il 2017, si osserva una sottostima della compattazione misurata, comunque con un errore inferiore al 10%.

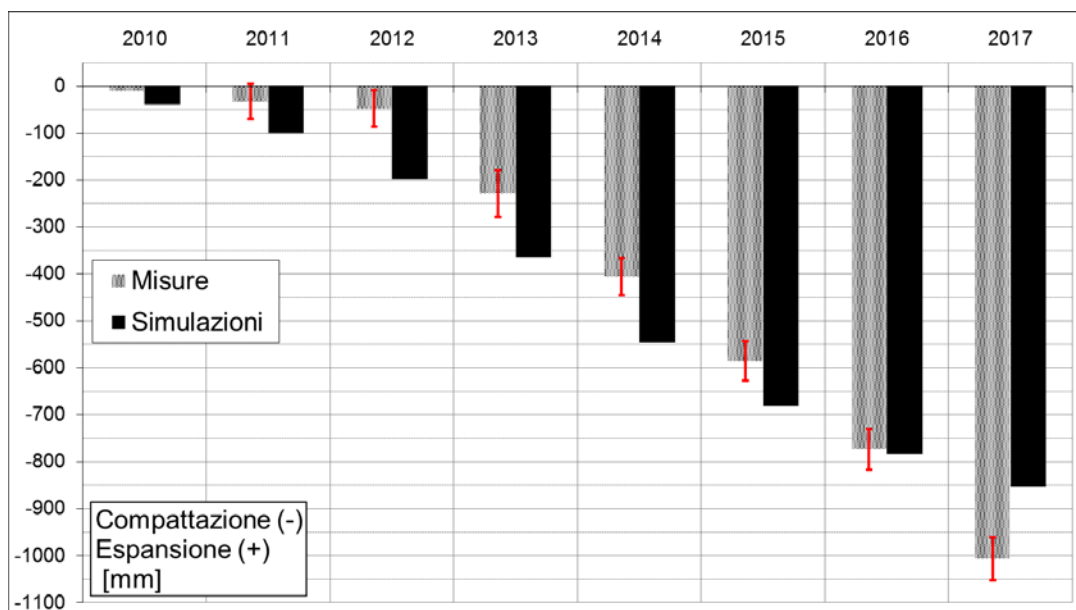


Figura 13 – Confronto tra le deformazioni verticali misurate e le corrispondenti stime del modello geomeccanico, rispetto al primo sondaggio del 2010, con riferimento all'insieme di tutti gli spacing monitorati, fatta eccezione per gli spacing numero 2, 96, 97, 98 e 99.

7 Confronto con i dati batimetrici

Al fine di monitorare le variazioni di quota del fondale marino, l'area del giacimento di Annamaria è stata oggetto di 2 rilievi batimetrici per i quali è stata utilizzata la tecnologia *multibeam*, che garantisce un'accuratezza delle misure di circa 5 centimetri [13].

La prima misurazione è stata effettuata tra aprile e giugno del 2009, mentre la seconda a giugno 2016. È bene precisare che quest'ultima è stata limitata all'area italiana (Figura 14) e, quindi, le differenze di quota tra le 2 acquisizioni non sono disponibili per l'area croata.

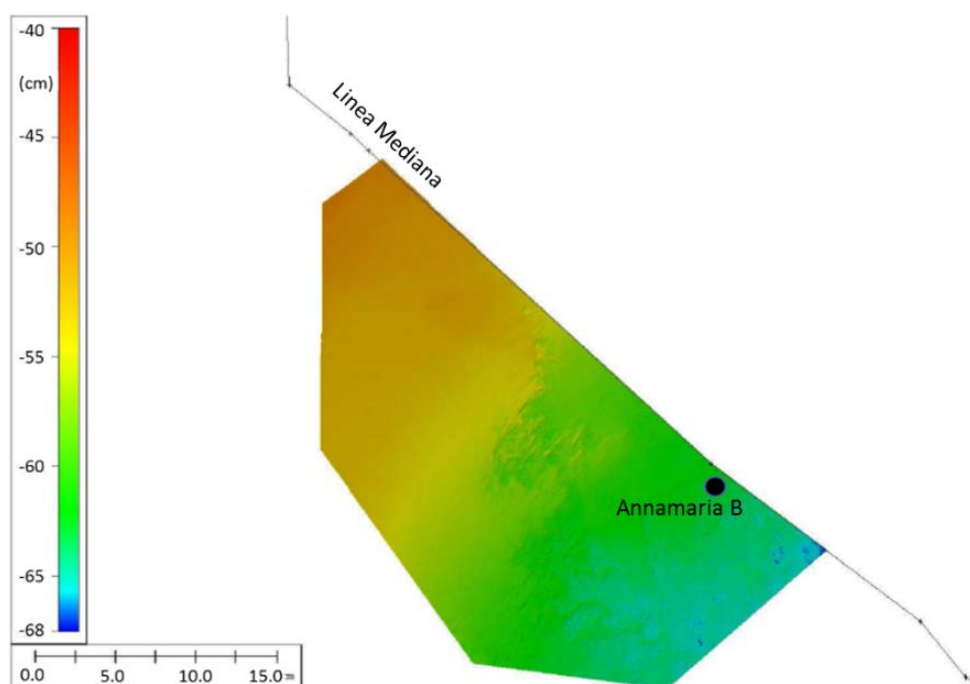


Figura 14 – Estensione del rilievo batimetrico del 2016.

Si è quindi proceduto al calcolo della subsidenza sviluppata tra il 2009 ed il 2016 secondo il modello Abaqus e la si è messa a confronto con la differenza tra le misure batimetriche acquisite, così come calcolata in [13].

In Figura 15 si mostra il confronto in termini di linee di iso-subsidenza (5, 15, 30 e 50 cm) e si osserva un'accurata riproduzione delle misure da parte del modello, seppur limitatamente all'intorno della piattaforma Annamaria B.

Nelle Figure 16 e 17 si riporta il confronto lungo 2 sezioni trasversali: una parallela alla linea mediana (NW-SE) con azimut di 315°, l'altra perpendicolare (NE-SW) con azimut di 225°. Dato che entrambe queste sezioni passano per la piattaforma Annamaria B, si riporta nel confronto anche il valore di subsidenza registrato dalla stazione GPS che, relativamente al periodo 2009-2016, corrisponde a 65 cm.

Dalla Figura 16 si nota che il modello riproduce in modo eccellente le misure batimetriche lungo sezione NE-SW con un'accuratezza compatibile con l'incertezza di 5 cm associata alle misure. Nella Figura 17, per la direzione SE si ha perfetta analogia con quanto osservato in Figura 16; mentre, si osserva una sovrastima, a vantaggio di sicurezza, della misure batimetriche lungo direzione NW.

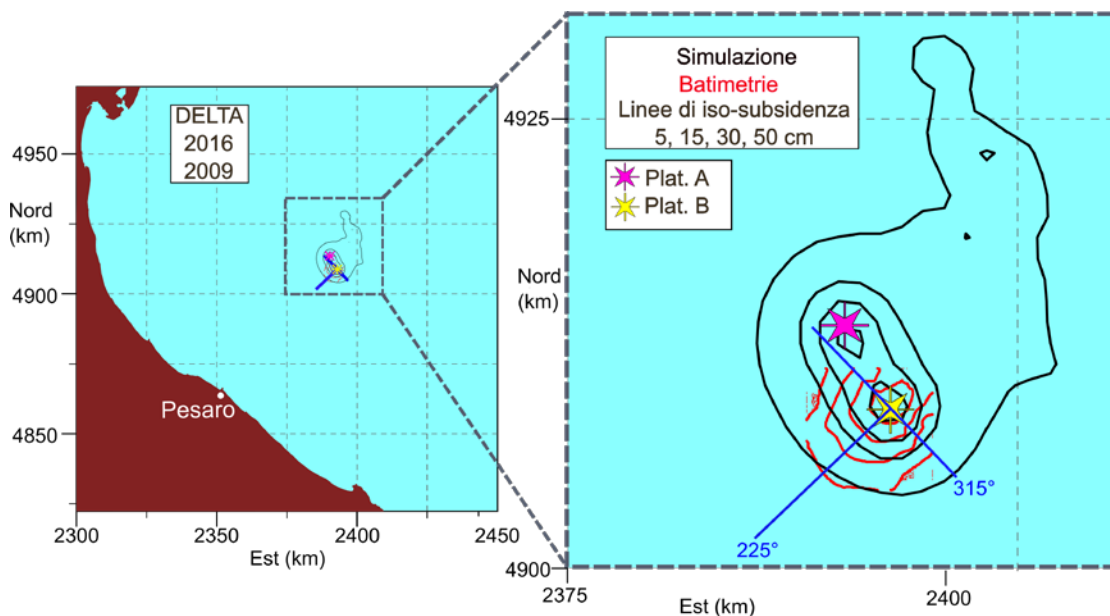


Figura 15 – Subsidenza sviluppata dal 2009 al 2016. Confronto tra misure batimetriche e stime del modello Abaqus. Sono riportate anche le tracce delle sezioni utilizzate per i confronti della Figura 16 e della Figura 17.

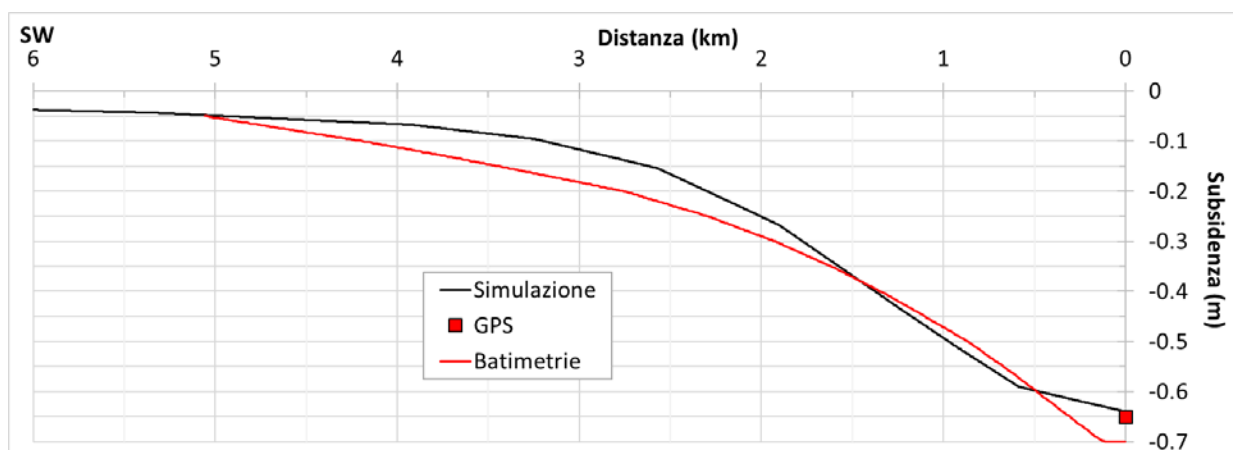


Figura 16 – Subsidenza sviluppata dal 2009 al 2016 lungo la sezione perpendicolare alla linea mediana e avente azimut 225°. Confronto tra valori stimati dal modello Abaqus, misure batimetriche e GPS.

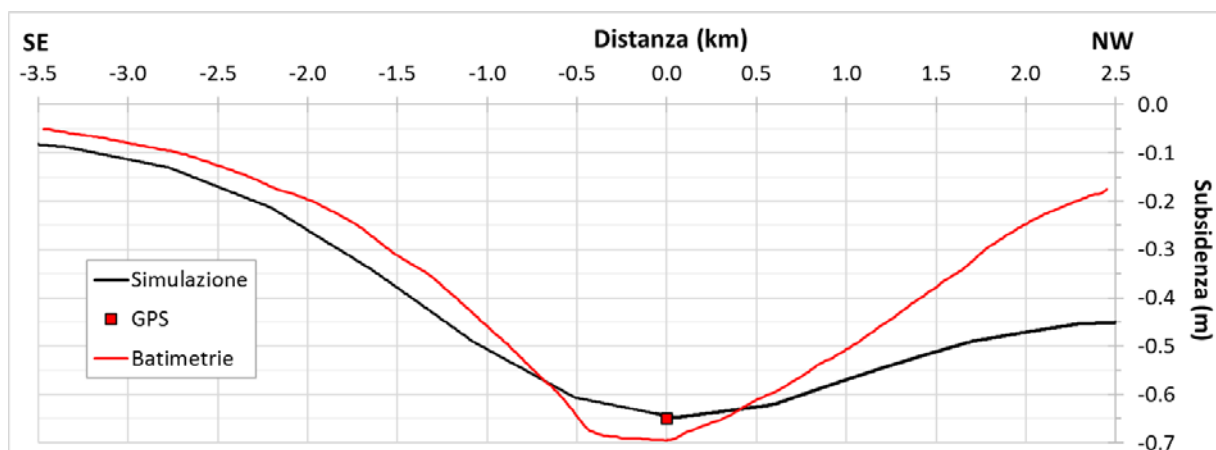


Figura 17 - Subsidenza sviluppata dal 2009 al 2016 lungo la sezione parallela alla linea mediana e avente azimut 315°. Confronto tra misure batimetriche, valori stimati dal modello Abaqus e GPS.

8 Bibliografia

1. AbaqusTM, Simulia, versione 2016hf4.
2. *Annamaria Complex – Studio di giacimento per studio geomeccanico*. Relazione Eni/GISE-EORG-MOGI, n° IPET-7F624362-0, dicembre 2017.
3. PetrelTM, Schlumberger, versione 2016.
4. IntersectTM, Schlumberger, versione 2016.2.
5. Ministero dello Sviluppo Economico, Direzione Generale per le Risorse Minerarie ed Energetiche (DGRME): *Elenco delle piattaforme marine e strutture assimilabili* (Dati al 31/12/2012, aggiornamento del 31/08/ 2013).
6. G.H.F. Gardner, L.W. Gardner, A.R. Gregory. *Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps*, Geophysics, 39, 770-780, 1974.
7. P.A. Vermeer and H.P. Neher: *A soft soil model that accounts for creep*. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam, 1999.
8. Roscoe, K. and J. B. Burland, 1968. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. *Engineering Plasticity*, Cambridge Univ. Press, 535-609.
9. 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.
10. G. Musso e R. Lancellotta. *Analisi teorica del comportamento tensio-deformativo dei materiali appartenenti alle sequenze sedimentarie del bacino adriatico con identificazione di appropriate leggi costitutive*. Relazione 3, Progetto di ricerca “Modeling of Subsidence” Eni e Politecnico di Torino, giugno 2016.
11. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino. *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala*. Relazione Agip S.p.A, LAPO-12/96, aprile 1996.
12. J. Geertsma. *A basic theory of subsidence due to reservoir compaction: the homogeneous case*. Verhandelingen Kon. Ned. Geol. Mijnbouw. Gen. Volume 28, 43-62, 1973.
13. *Giacimento di Annamaria. Valutazione delle variazioni batimetriche (intervallo 2009 – 2016)*. Relazione Eni S.p.A., GEOM, marzo 2017.