



Eni S.p.A.

Development, Operations & Technology

RESDEP

DOCUMENTO #

IPET-89477285-0

Campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra

Modello Elasto-Plastico di Subsidenza

Management Summary

Executive Summary

L'obiettivo di questo studio è la previsione della subsidenza associata all'estrazione di gas dall'insieme di giacimenti del Clara Complex (Calpurnia, Clara Nord, Clara Est), Calipso ed Elettra, ubicati nell'offshore adriatico a oltre 30 km al largo di Ancona, mediante una simulazione geomeccanica ad elementi finiti 3D a scala di campo elaborata da ISAMGEO. I risultati delle simulazioni, effettuate utilizzando una legge costitutiva del tipo Rate Dependent Modified Cam-Clay Model (RDMCCM), mostrano come, per i campi del Clara Complex, tale modello sia in grado di riprodurre in modo molto più efficace, rispetto al modello MCCM classico, l'andamento della subsidenza osservata tramite misure GPS sulle piattaforme. Tuttavia è risultato necessario adottare due set di parametri leggermente diversi (per Clara Est e Clara Nord con una compressibilità leggermente superiore agli altri 4 campi), per riprodurre l'andamento della subsidenza osservata con GPS sui campi del complesso.

Data

10/12/2021



Indice

1	Introduzione	3
2	Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS	5
2.1	Stazione CGPS di Clara NW	5
2.2	Stazione CGPS di Clara Est	5
2.3	Stazione CGPS di Clara Nord	6
2.4	Stazione CGPS di Elettra	6
2.5	Stazione CGPS di Calpurnia	7
2.6	Stazione CGPS di Calipso	7
3	Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti	8
3.1	Approccio metodologico	8
3.2	Geometria del modello	8
3.3	Proprietà dei materiali	11
3.3.1	Densità della roccia	11
3.3.2	Comportamento della roccia	12
3.3.1	Pressioni iniziali	14
3.3.2	Storia di pressione	14
4	Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico	15
5	Confronto con i dati delle stazioni CGPS	19
	Bibliografia	23

1 Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo all'insieme dei campi del Clara Complex (Clara Nord, Clara Est e Calpurnia), di Calipso e di Elettra, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione dei giacimenti. Tali campi sono situati nell'offshore adriatico a oltre 30 km al largo di Ancona (Figura 1); si tratta di giacimenti relativamente superficiali compresi nella successione plio-pleistocenica, a profondità che varia tra i 550 m e i 1500 m sotto il livello mare. La profondità del fondale marino in tale area è di circa 70-75 m. La posizione relativa dei cinque campi considerati è illustrata in Figura 2.

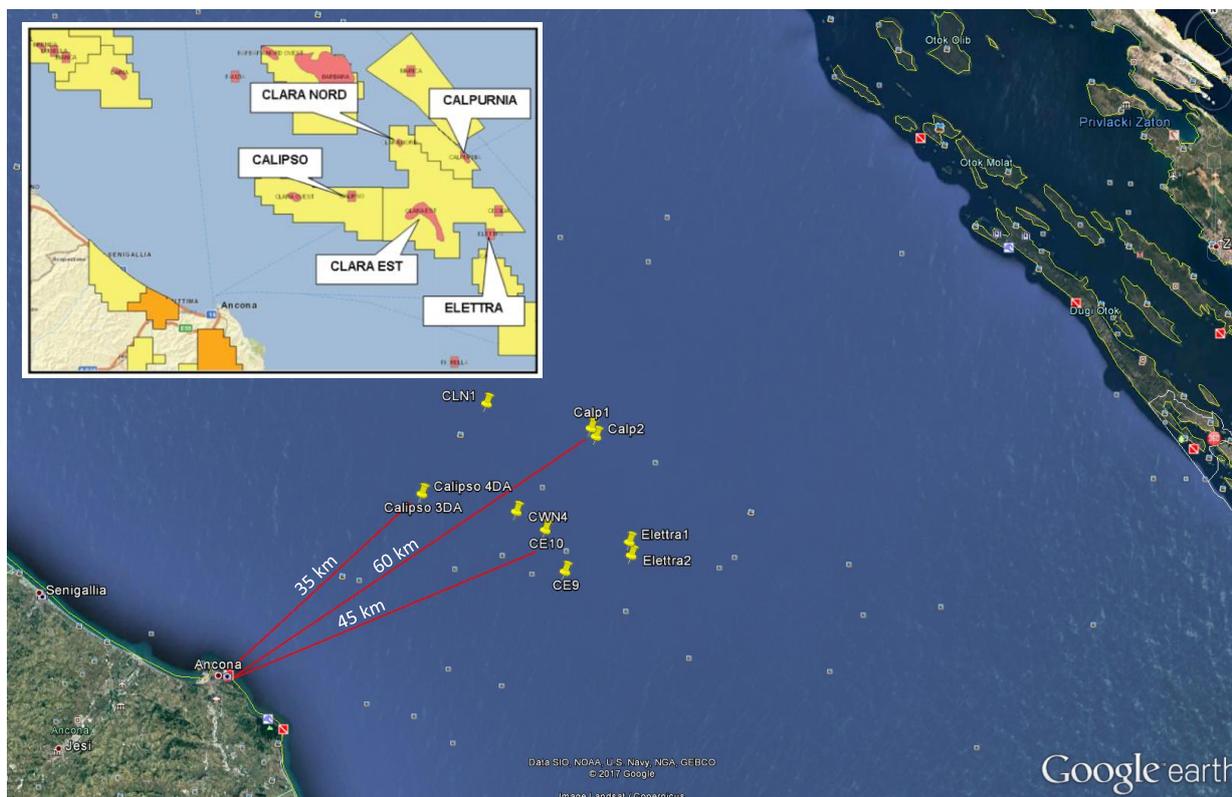


Figura 1 – Posizione dei campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra.

Nello studio fluido-dinamico [1] sono considerati due scenari di forecast:

- Do Nothing (DN): prevede di proseguire lo sviluppo del giacimento mediante i completamenti aperti a fine history match (31/08/2020), senza ulteriori interventi.
- Field Development (FD): considera lo sviluppo del campo di Calipso con un nuovo pozzo (Calipso 3) dal 01/12/2021.

La previsione di subsidenza è stata eseguita da ISAMGEO Engineering GmbH con un modello geomeccanico 3D ad elementi finiti (FE), impiegando il codice di calcolo proprietario. Le informazioni relative alla geometria del giacimento, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dallo studio fluido-dinamico di giacimento realizzato da Eni [1] con il codice di calcolo Intersect [2].

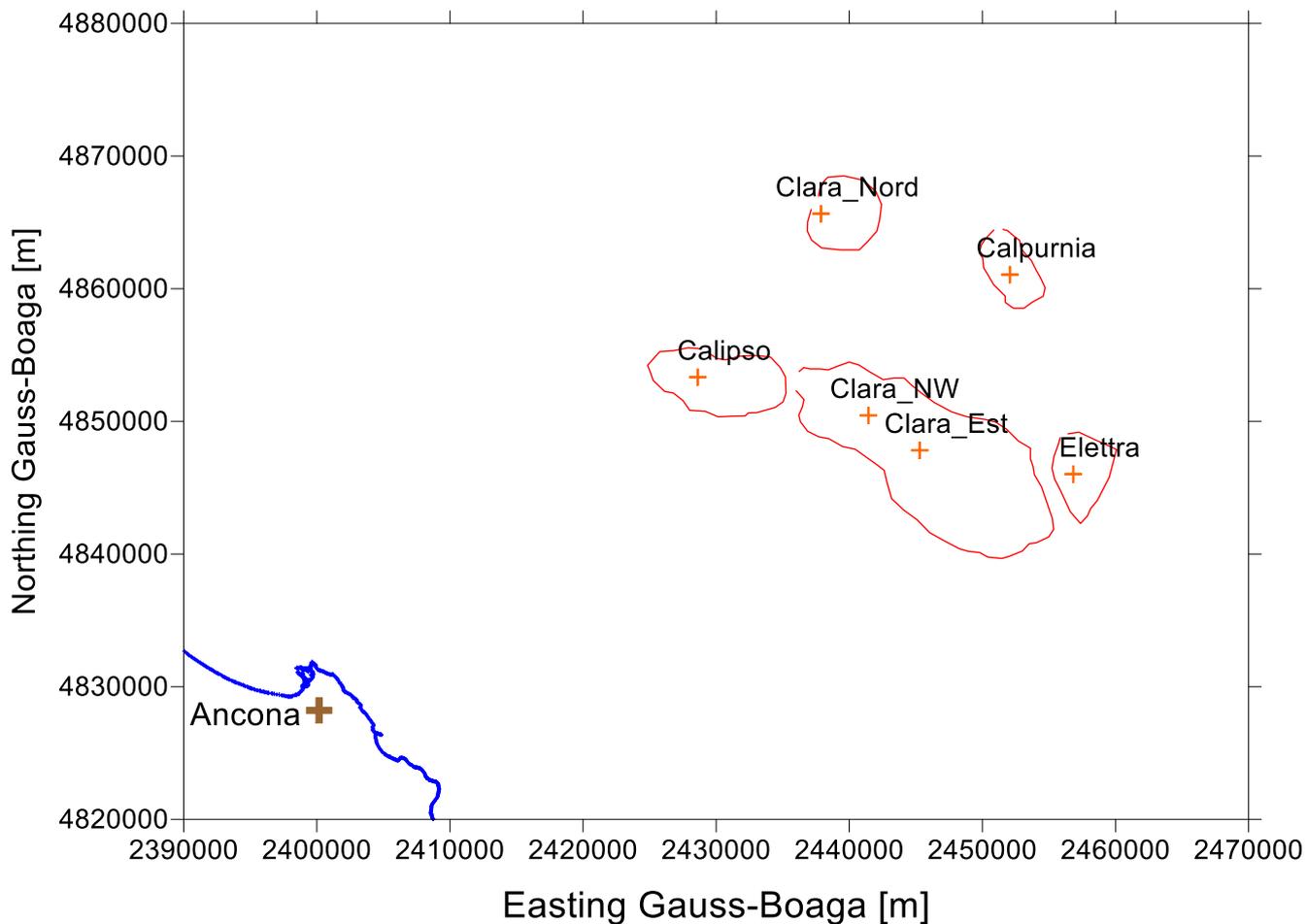


Figura 2 – Posizione relativa dei tre campi che compongono il Clara Complex (Clara Nord, Clara Est e Calpurnia), di Calipso e di Elettra.

2 Dati di subsidenza misurati dalle stazioni CGPS

2.1 Stazione CGPS di Clara NW

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di Clara NW in corrispondenza delle coordinate 2437874.64 m E, 4865654.87 m N. Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dall'8 aprile 2016 al 30 agosto 2021 (Figura 3).

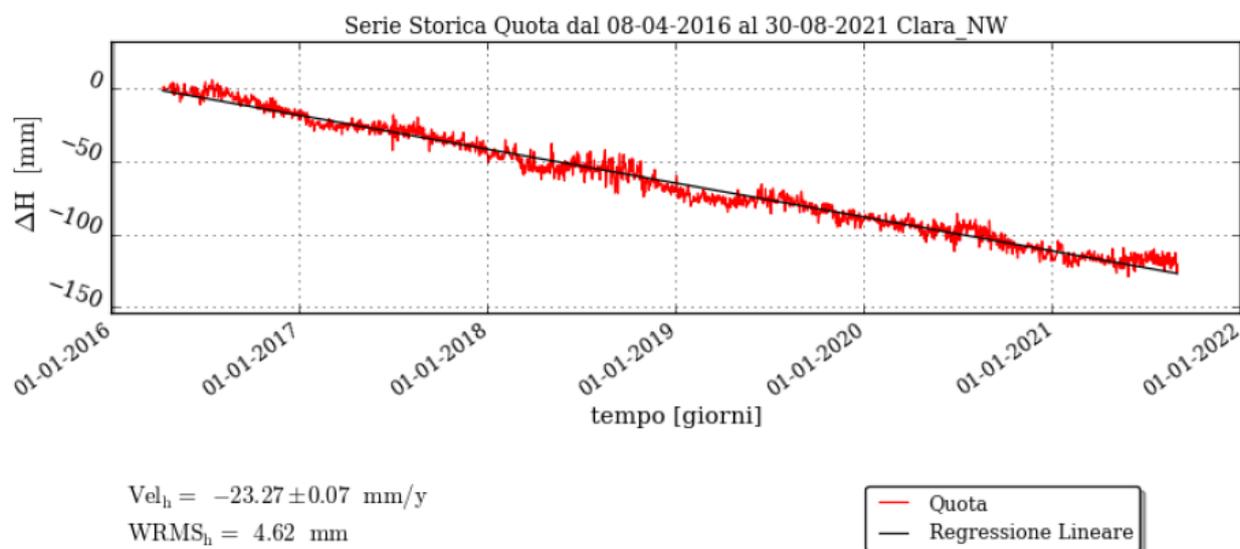


Figura 3 - Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Clara NW, aggiornate al 30 agosto 2021.

2.2 Stazione CGPS di Clara Est

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di Clara Est in corrispondenza delle coordinate 2445292.66 m E, 4847821.65 m N. Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dal 7 novembre 2007 al 31 dicembre 2021 (Figura 4).

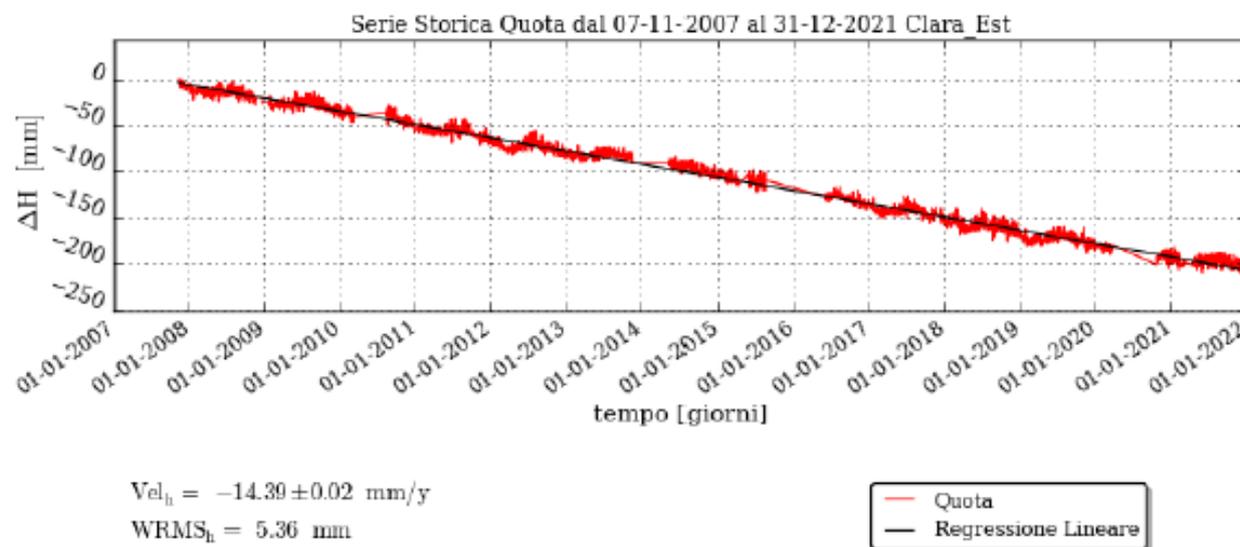


Figura 4 - Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Clara Est, aggiornate al 31 dicembre 2021.

2.3 Stazione CGPS di Clara Nord

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di Clara Nord in corrispondenza delle coordinate 2437874.64 m E, 4865654.87 m N. Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dall'8 novembre 2007 al 6 giugno 2021 (Figura 5).

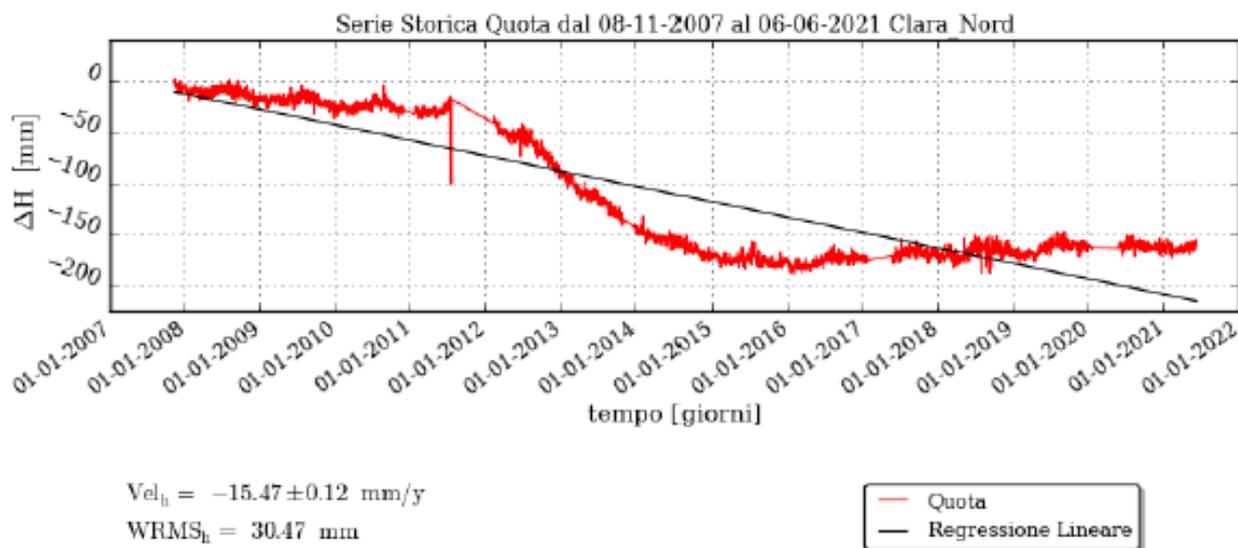


Figura 5 - Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Clara Nord, aggiornate al 6 giugno 2021.

2.4 Stazione CGPS di Elettra

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di Elettra in corrispondenza delle coordinate 2456828.99 m E, 4846025.11 m N. Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dal 27 luglio 2014 al 31 dicembre 2021 (Figura 6).

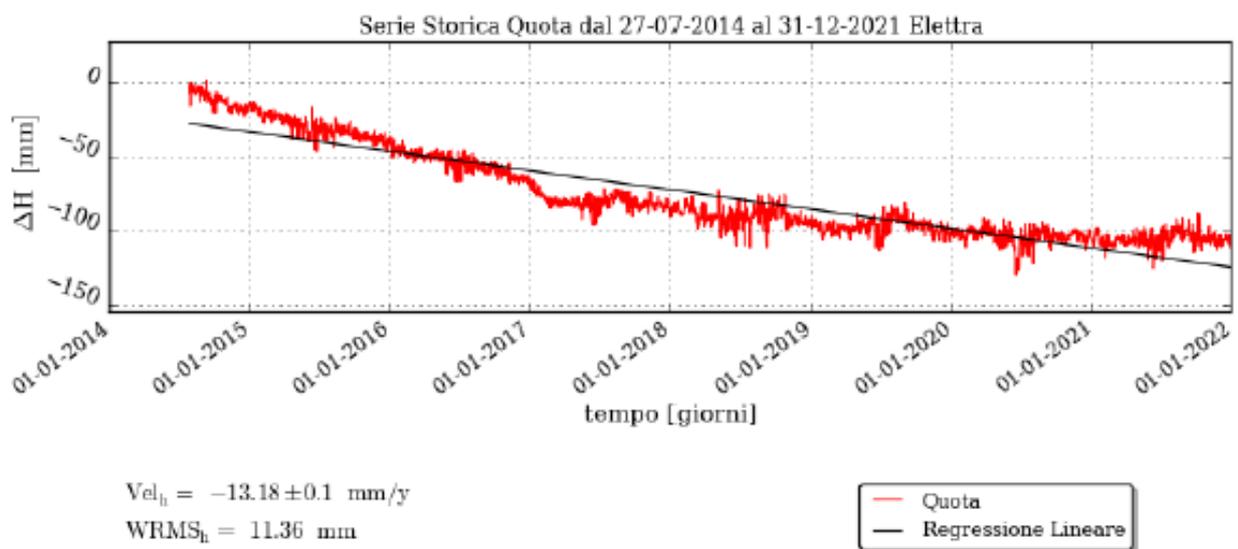


Figura 6 - Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Elettra, aggiornate al 31 dicembre 2021.

2.5 Stazione CGPS di Calpurnia

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di Calpurnia in corrispondenza delle coordinate 2452070.72 m E, 4861063.98 m N. Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dal 5 febbraio 2008 al 14 novembre 2019 (Figura 7).

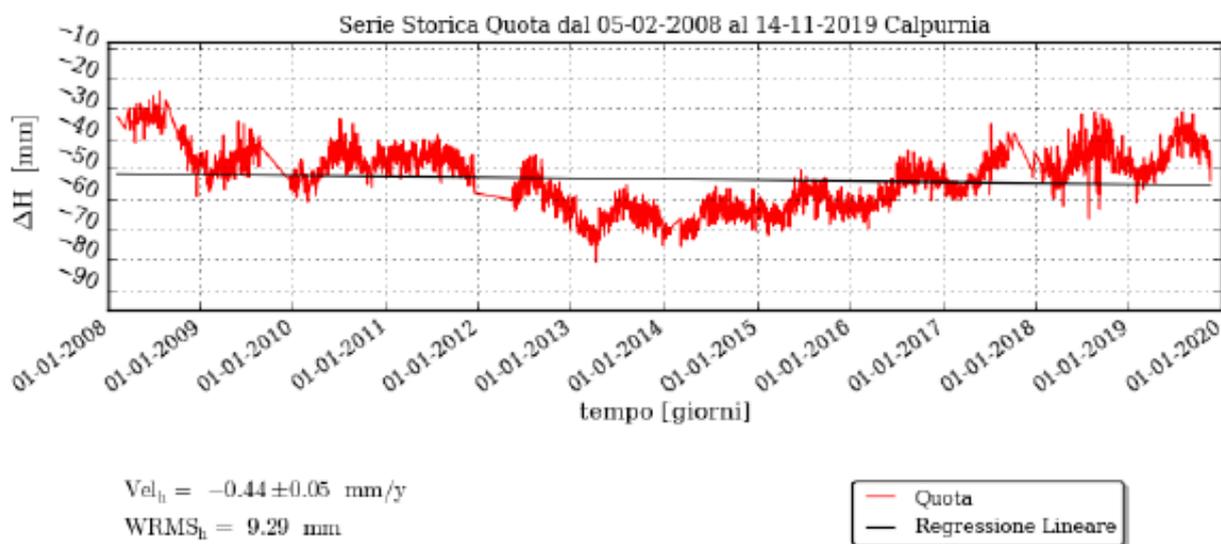


Figura 7 - Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Calpurnia, aggiornate al 14 novembre 2019.

2.6 Stazione CGPS di Calipso

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di Calipso in corrispondenza delle coordinate 2428619.95 m E, 4853331.75 m N. Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dal 29 novembre 2007 al 13 marzo 2021 (Figura 8).

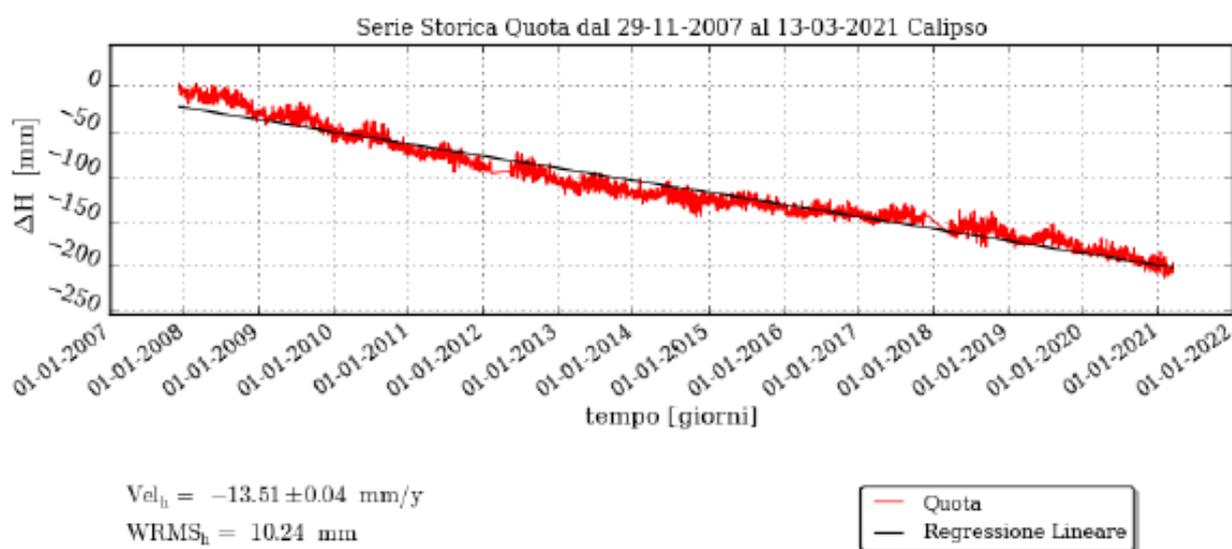


Figura 8 - Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Calipso, aggiornate al 13 marzo 2021.

3 Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

3.1 Approccio metodologico

Lo studio geomeccanico di subsidenza è stato realizzato da ISAMGEO Engineering GmbH utilizzando il codice proprietario ad Elementi Finiti (FE). La costruzione del modello è stata basata sulle seguenti informazioni:

- Mappe geologiche dei livelli interessati dai campi, estese in misura tale da descrivere interamente non solo le zone mineralizzate ma anche gli acquiferi laterali;
- Dettagliata descrizione della geometria e geologia dei “livelli mineralizzati + acquiferi connessi”, riprodotta con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica;
- Distribuzione di pressione nei “livelli mineralizzati + acquiferi connessi”, calcolata con il modello di flusso 3D Intersect;
- Proprietà meccaniche della roccia descritte con una legge costitutiva del tipo Rate Dependent Cam-Clay Modificato, 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 e il comportamento viscoso del materiale per carichi costanti;

3.2 Geometria del modello

Il modello di giacimento, realizzato tramite il software Intersect, interessa una superficie di 89 km × 75 km, scelta per poter simulare tutta l’area interessata dalla depressurizzazione prodotta dalla coltivazione dei giacimenti e per poter riprodurre in maniera accurata l’influenza dell’acquifero (Figura 9). Il modello rappresenta in modo accurato e completo l’intera sequenza degli orizzonti permeabili ed impermeabili dei campi.

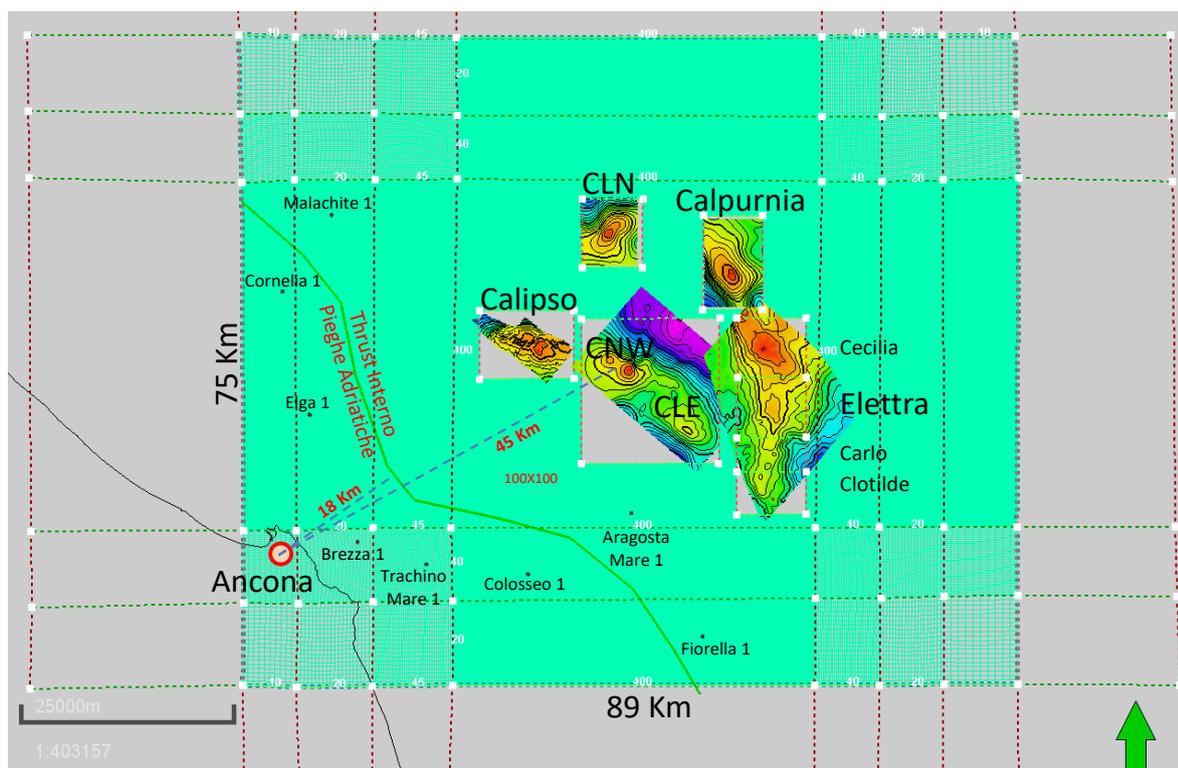


Figura 9 - Estensione areale del modello fluido dinamico Intersect.

Al fine di evitare un'eventuale influenza delle condizioni al contorno sui risultati, è stato necessario estendere la zona modellata dal punto di vista geomeccanico al di là del perimetro della zona modellata dal punto di vista fluido-dinamico. È stata quindi generata una mesh 3D a partire da una mesh 2D con estensione areale maggiore dell'estensione del modello Intersect. Essa è stata inoltre proiettata verticalmente a generare i livelli del giacimento, overburden ed underburden. Il modello geomeccanico così costruito (Figura 10 e Figura 11) risulta suddiviso in 160 livelli e si estende fino a oltre 5100 m di profondità per un totale di 1966159 nodi, 630720 elementi a 16 o 20 nodi (3942 elementi per ciascun livello) e 5832828 gradi di libertà.

Le condizioni al contorno meccaniche del modello sono state così scelte:

- (a) sono impediti i tre gradi di libertà dei nodi della base del modello, simulando così la presenza di un bedrock rigido;
- (b) i nodi sui quattro lati del modello hanno impediti anch'essi i tre gradi di libertà dei nodi; un'analisi di sensitività è stata condotta usando una condizione al contorno in cui i nodi sui quattro lati del modello hanno impediti i movimenti orizzontali in direzione ortogonale ai lati, ma non quello verticale: questa condizione al contorno è potenzialmente quella più conservativa (pessimistica) dal punto di vista della subsidenza prevista. Le due condizioni al contorno laterali conducono a risultati indistinguibili.

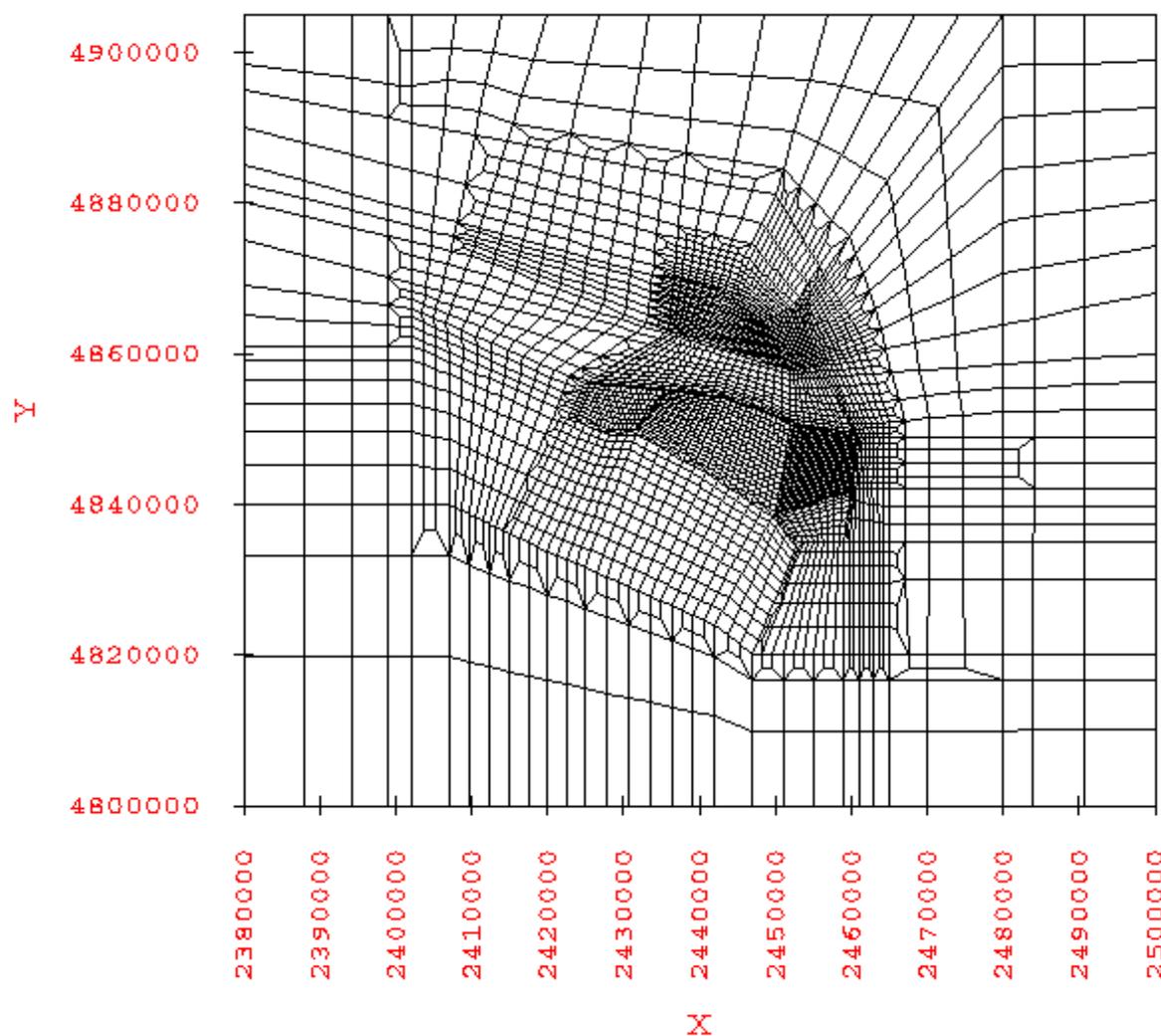


Figura 10 – Visione in pianta della mesh di calcolo utilizzata nel modello ISAMGEO per i campi del Clara Complex, di Calipso ed Elettra.

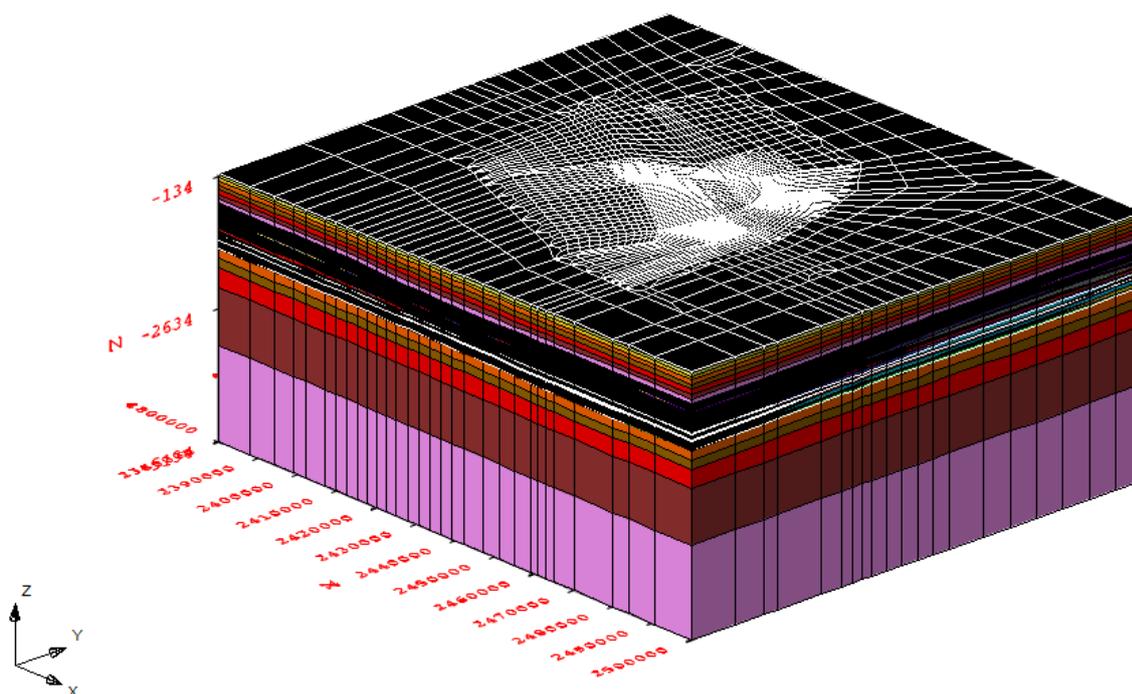


Figura 11 – Mesh di calcolo ad elementi finiti utilizzata nel modello Isamgeo per i campi del Clara Complex, di Calipso e di Elettra. La scala verticale della rappresentazione è pari a 10 volte quella orizzontale.

3.3 Proprietà dei materiali

3.3.1 Densità della roccia

Il profilo di densità media ρ (Figura 12) è stato ottenuto considerando i valori di densità misurati negli intervalli coperti da density log di 16 pozzi perforati nei campi inclusi nel modello. L'insieme dei density log acquisiti in questi pozzi copre l'intervallo tra 283 e 1592 m (TVDSS). Calcolando la media aritmetica dei valori a pari profondità dei density log considerati si è ottenuta un'unica curva di densità media per tutto l'intervallo.

Nell'intervallo tra 77 m (TVDSS) (fondo mare) e 283 m (TVDSS), privo di acquisizioni log, è stata utilizzata la seguente relazione ricavata dal best fit della curva di densità media precedentemente descritta:

$$\rho(z) = 1.6889 \cdot z^{0.0384}$$

dove ρ è la densità bulk in g/cc, z_{ssl} è la profondità, espressa in metri, riferita al fondo mare. Il best fit è stato cercato nell'intervallo superiore della curva di densità media, da 283 a 450 m (TVDSS), poiché, al di sotto di tale profondità, questa curva non segue lo stesso trend delle densità superficiali.

Alla colonna d'acqua, tra 0 e 77 m (TVDSS), è stata assegnata una densità di 1.03 g/cc.

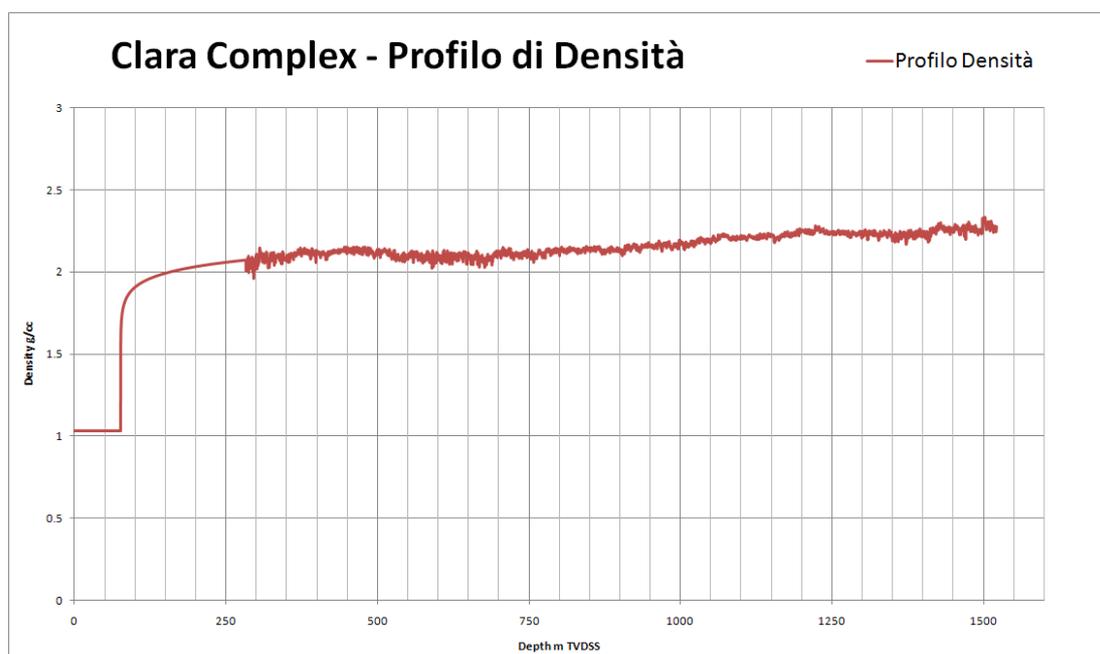


Figura 12 - Profilo di densità medio del Clara Complex.

3.3.2 Comportamento della roccia

I risultati dello studio ISAMGEO 2018 [3] mostrano come, adottando un modello classico MCCM, sia necessario utilizzare parametri diversi per zone diverse del modello, ovvero per campi a gas diversi, senza peraltro riuscire a rappresentare in modo del tutto convincente i comportamenti osservati dalle misure GPS. In alternativa, l'uso di un singolo scenario di compressibilità, corrispondente a quello del C_m medio definito in Hueckel et al. (2005) mostra ovvie limitazioni nella capacità di riprodurre i dati GPS osservati.

Alla luce delle evidenze di cui sopra, è apparso quindi utile analizzare la possibilità che un modello più complesso, che tenga conto in modo coerente di fenomeni dipendenti dal tempo e dalla velocità di deformazione, sia in grado di riprodurre i dati di subsidenza osservati in modo coerente, utilizzando un singolo set di parametri fisici, o un set limitato degli stessi parametri.

È stato perciò adottato un modello RDMCCM, tra i cui parametri fondamentali della legge costitutiva è inclusa anche la velocità iniziale di deformazione (strain/anno). Una stima attendibile di tale velocità è stata fornita da Eni, ed è riassunta in Figura 13.

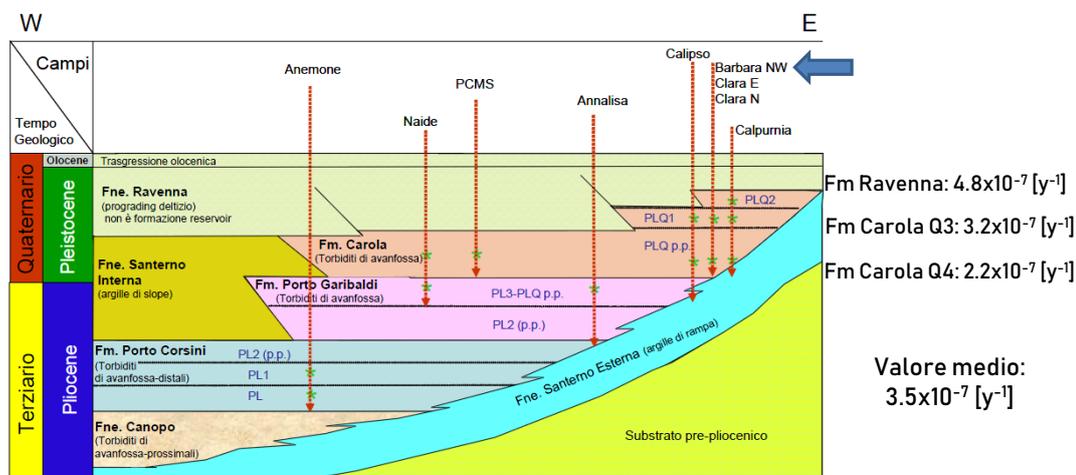


Figura 13 – Velocità di compattazione stimate per i sedimenti che formano il Clara Complex. Si osservi come queste siano velocità di deformazione totali, mentre, a rigore, nel modello RDMCCM andrebbe utilizzata solo la componente plastica.

Nel 2019 [4] è stato effettuato uno studio di fattibilità relativo all’applicazione del modello RDMCCM ai campi del Clara Complex, realizzato tramite un approccio semplificato, basato su simulazioni a elemento singolo con legame costitutivo RDMCCM, e sulla sovrapposizione degli effetti dei singoli elementi, ciascuno rappresentante uno strato produttivo. Le simulazioni con modello RDMCCM condotte con l’approccio semplificato si sono dimostrate in grado di riprodurre con un set quasi unico di parametri l’intero comportamento dei campi del Clara Complex. Infatti i risultati del miglior match presentati nel §4 sono stati ottenuti con due set di parametri leggermente diversi applicati a due gruppi di campi: per Clara Est e Clara Nord sono stati utilizzati valori di λ e κ (quindi di compressibilità) 1.6 volte superiori rispetto ai corrispondenti parametri utilizzati nelle aree di Calipso, Calpurnia, Elettra e Clara NW (Figura 14).

Param	Valore	Param	Valore
λ	0,065	λ	0,04
κ	0,00812	κ	0,005
λ/κ	8	λ/κ	8
ν	0,28	ν	0,28
M	1,6	M	1,6
b	0,025	b	0,025
$R_1 (y^{-1})$	3.5×10^{-8}	$R_1 (y^{-1})$	3.5×10^{-8}
ϕ	0,28	ϕ	0,28

Figura 14 - Set di parametri utilizzati per i due sottogruppi di campi del Clara Complex (Clara Est e Clara Nord sulla sinistra).

3.3.1 Pressioni iniziali

Per quanto riguarda la parte del modello geomeccanico che rappresenta il reservoir e gli acquiferi circostanti, la pressione iniziale nel modello geomeccanico è stata introdotta importando punto per punto la pressione simulata nel modello fluidodinamico Intersect.

La parte restante del modello geomeccanico (interlayers, sideburden, overburden e underburden) richiede comunque valori di pressione per definire gli stress efficaci sulla base di quelli totali. Questa stima dei valori di pressione è stata introdotta nel modello geomeccanico attraverso le seguenti relazioni ricavate in base ad un fit dei dati a disposizione nelle regioni di interesse:

Acquifero e sideburden:

$$p(z) = -1.38656E-08z^3 + 1.08148E-04z^2 - 5.41374E-02z + 6.20852E+01 \quad (1)$$

Clara Est e Clara NW:

$$p(z) = -2.0221E-09z^4 + 8.26E-06z^3 - 1.2475E-02z^2 + 8.3762E+00z - 2.037E+03 \quad (2)$$

Clara Nord

$$p(z) = 1.96918E-07z^3 - 5.99658E-04z^2 + 7.15740E-01z - 2.12059E+02 \quad (3)$$

Calipso:

$$p(z) = 0.158z - 51.591 \quad (4)$$

Calpurnia:

$$p(z) = 5.83187E-08z^3 - 9.14589E-05z^2 + 1.40498E-01z - 3.61793E+00 \quad (5)$$

Elettra:

$$p(z) = 1.05023E-07z^3 - 1.94778E-04z^2 + 2.13751E-01z - 2.02466E+01 \quad (6)$$

ove z è la profondità verticale sotto il livello del mare in metri e p è la pressione dei pori in bar. Per l'overburden è stato utilizzato un gradiente di pressione idrostatico con densità dell'acqua pari a 1030 kg/m^3 . L'insieme di questo gradiente idrostatico e delle relazioni (1)-(6) è stato adottato per l'inizializzazione del modello geomeccanico ad elementi finiti nelle zone di overburden, underburden e side-burden, ovvero ove non è possibile importare le pressioni dai risultati delle simulazioni Intersect. Le stesse relazioni sono state anche utilizzate per il calcolo dei parametri geomeccanici dei materiali §3.3.

3.3.2 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello fluido-dinamico Intersect, è stata importata nel modello ad elementi finiti. In particolare, le pressioni sono state importate ad intervalli annuali dall'inizio della produzione (ottobre 2000) fino a gennaio 2050.

4 Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati delle simulazioni eseguite al fine di stimare l'entità della subsidenza attesa dalla coltivazione dei campi del Clara Complex.

La Tabella 1 e Tabella 2 riportano per i sei campi i valori di subsidenza massima in corrispondenza delle culminazioni principali per i due scenari. Si osservi che la posizione del punto di massima subsidenza varia nel tempo.

Tabella 1 – Valori di massima subsidenza (in metri) in corrispondenza delle diverse culminazioni, scenario DN.

	Clara Est	Clara Nord	Calipso	Calpurnia	Elettra
2021	0.31	0.48	0.28	0.17	0.12
2026	0.52	0.44	0.57	0.16	0.21
2031	0.69	0.43	0.71	0.15	0.24
2041	0.93	0.41	0.74	0.14	0.27
2050	1.04	0.39	0.75	0.14	0.27

Tabella 2 – Valori di massima subsidenza (in metri) in corrispondenza delle diverse culminazioni, scenario FD.

	Clara Est	Clara Nord	Calipso	Calpurnia	Elettra
2021	0.31	0.48	0.28	0.17	0.12
2026	0.52	0.44	0.79	0.16	0.21
2031	0.73	0.43	1.09	0.15	0.24
2041	0.99	0.41	1.13	0.14	0.27
2050	1.12	0.39	1.13	0.14	0.27

La Figura 15 mostra l'andamento nel tempo dell'abbassamento verticale simulato alle 6 piattaforme a partire dal 2000 e per i due scenari considerati.

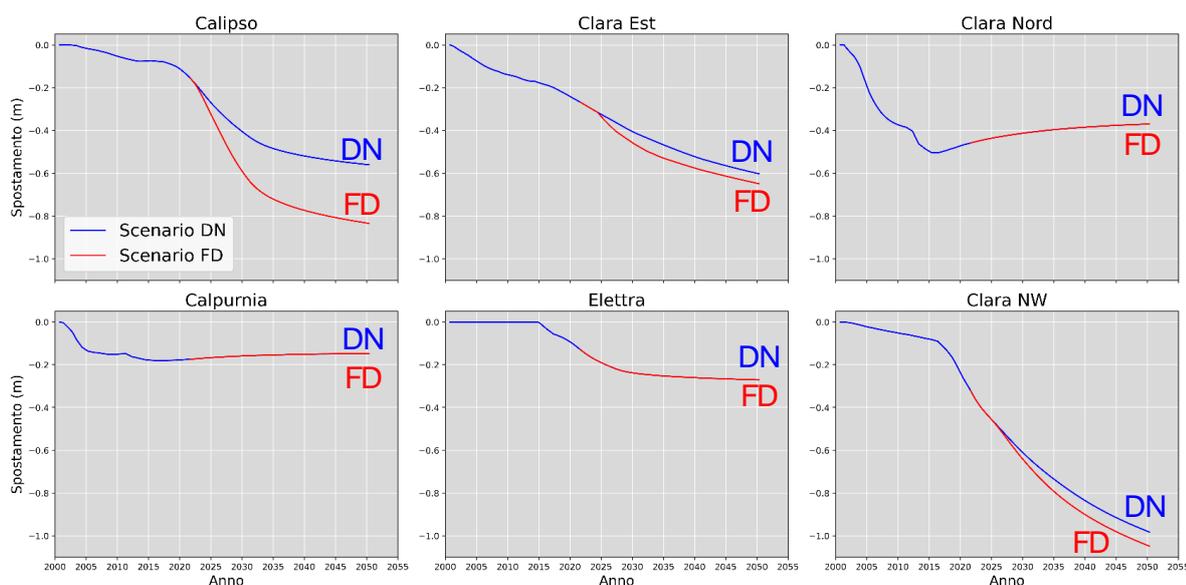


Figura 15 - Spostamento verticale simulato sulle piattaforme dei campi per i due scenari analizzati.

In Figura 16 è riportata la mappa di subsidenza al 2021: la isolinea dei 2 cm è tratteggiata.

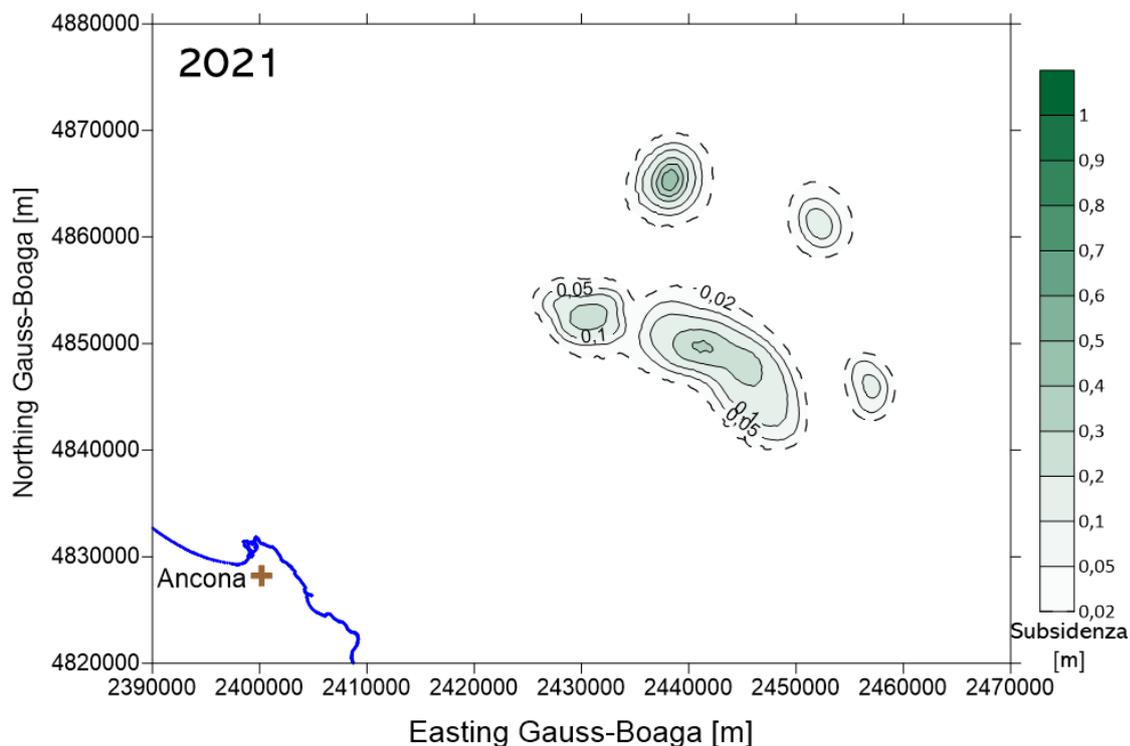


Figura 16 - Mappa di subsidenza (in m) al 1 gennaio 2021 prevista dal modello.

La Figura 17 e Figura 18 mostrano le mappe di subsidenza di forecast a fine simulazione (2050) rispettivamente per lo scenario DN e per lo scenario FD.

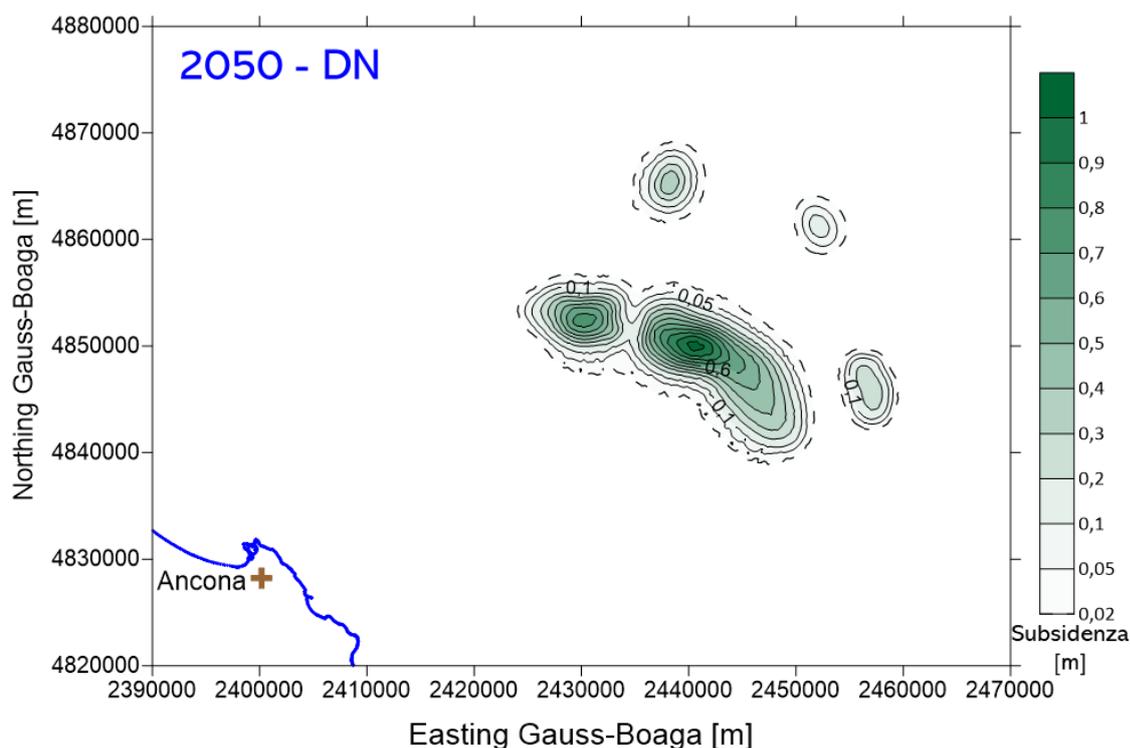


Figura 17 - Mappa di subsidenza (in m) al 1 gennaio 2050 prevista dal modello per lo scenario DN.

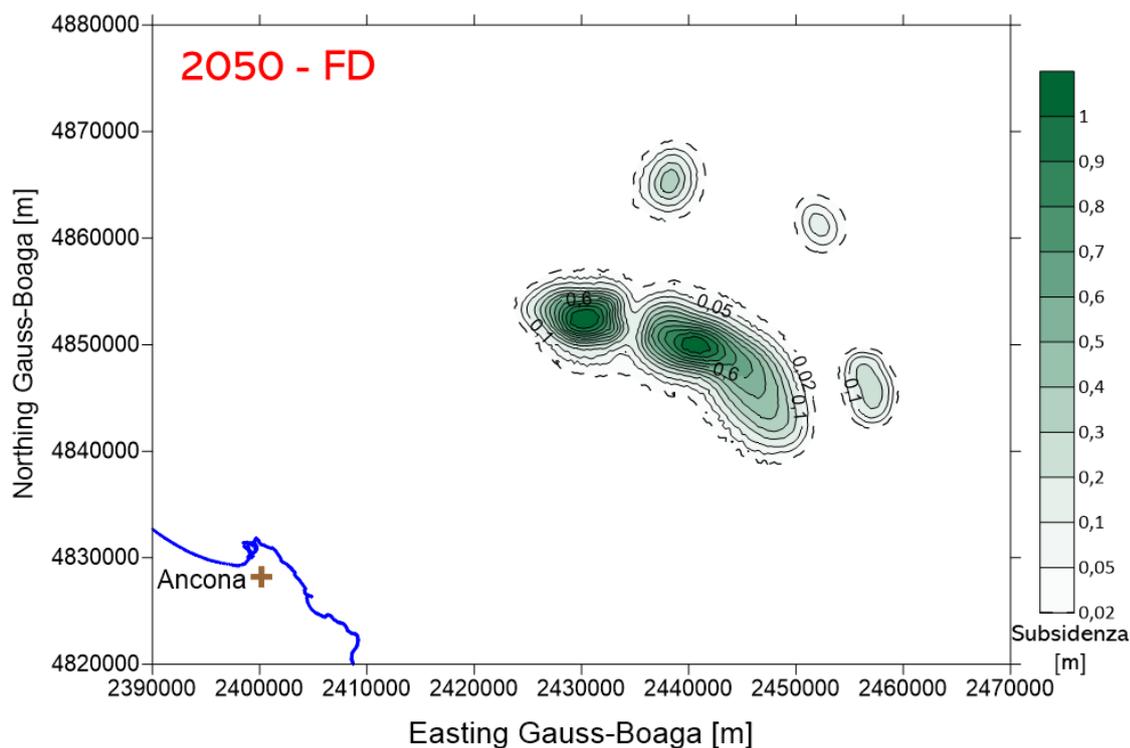
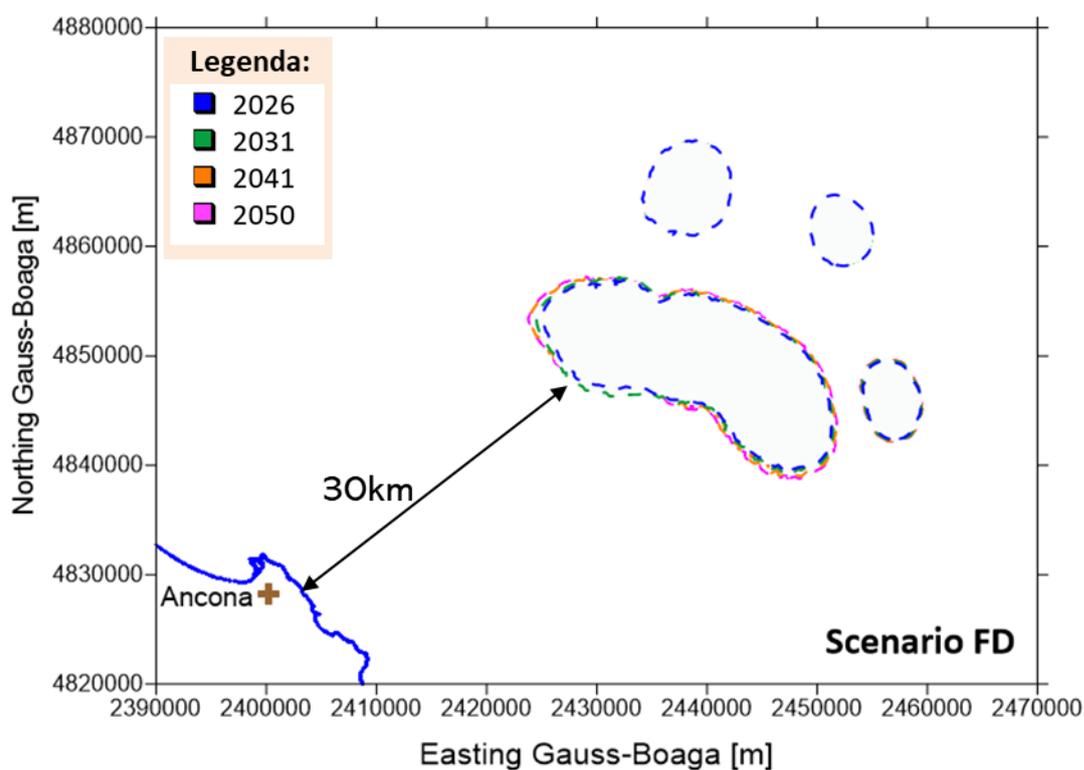
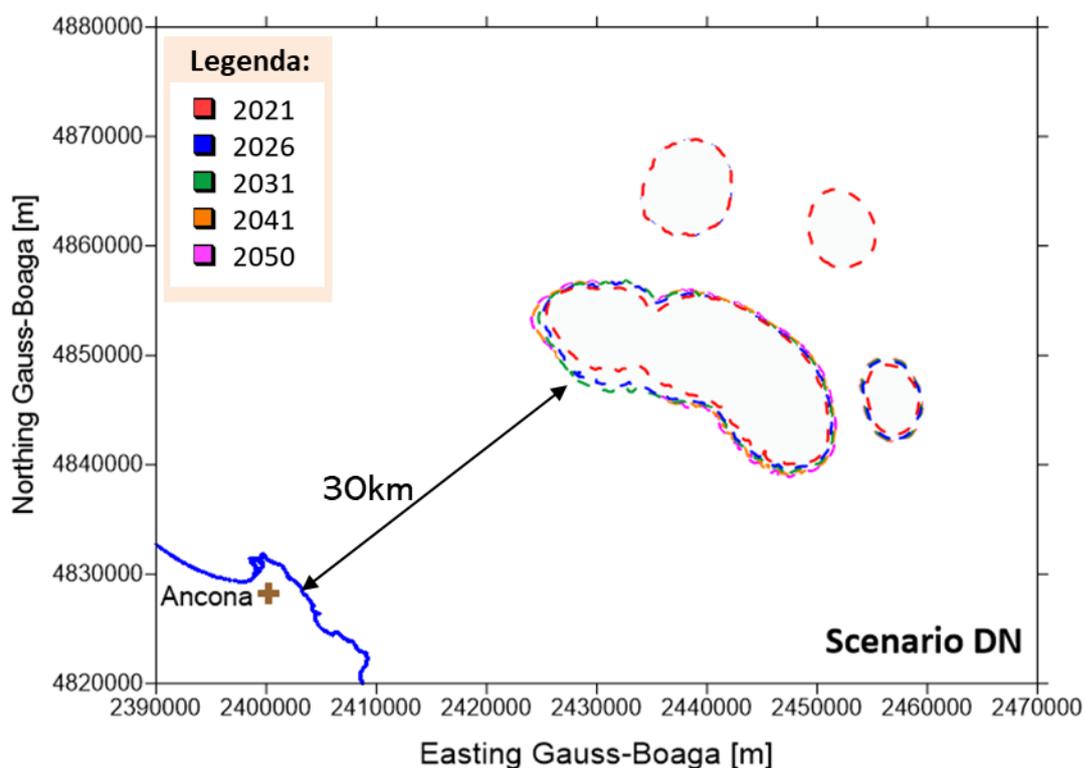


Figura 18 - Mappa di subsidenza (in m) al 1 gennaio 2050 prevista dal modello per lo scenario FD.

La Tabella 3 infine riporta la distanza dell'isolinesa dei 2cm dalla linea di costa in funzione del tempo. Si osserva che la distanza minima varia di poco nel periodo 2021-2050 (Figura 19 e Figura 20, scenario DN ed FD rispettivamente) e non è mai inferiore ai 30 km.

Tabella 3 – Estensione del cono di subsidenza e distanza dalla costa (rispetto alla linea dei 2 cm).

	Scenario DN	Scenario FD
2021	33	-
2026	31	31
2031	30	30
2041	31	31
2050	31	31



5 Confronto con i dati delle stazioni CGPS

L'aggiornamento del modello ad elementi finiti del complesso dei campi di Clara Complex conferma che l'utilizzo del modello MCC «rate dependent» consente di ottenere un discreto match delle serie temporali misurate tramite GPS. Tale match non è ottenibile con un unico set di parametri: è risultato necessario definire due distinte regioni con compressibilità diversa. In particolare, per i campi di Clara Est e Clara Nord la compressibilità calibrata è circa 1.6 volte maggiore che negli altri giacimenti. Tuttavia, il risultato ottenuto è decisamente migliore di quello del precedente studio, svolto utilizzando il modello MCCM classico, dove era stato necessario calibrare una compressibilità diversa su ciascun campo, con significative discrepanze tra i giacimenti.

Il confronto tra i valori di subsidenza estratti dal modello numerico e i dati misurati dalle stazioni CGPS è riportato in Figura 21 per il campo di Clara NW, in Figura 22 per il campo di Calpurnia, in Figura 23 per il campo di Elettra, in Figura 24 per il campo di Clara Est, in Figura 25 per il campo di Clara Nord e in Figura 26 per il campo di Calipso.

Il GPS che mostra il peggior match (con sovrastima della subsidenza) è quello posizionato su Clara NW. In ogni caso, il modello in termini previsionali è conservativo, cioè la subsidenza effettivamente attesa è inferiore a quella simulata.



Figura 21 – Andamento della subsidenza misurata (GPS sulla piattaforma) comparata con la simulazione per il campo di Clara NW.

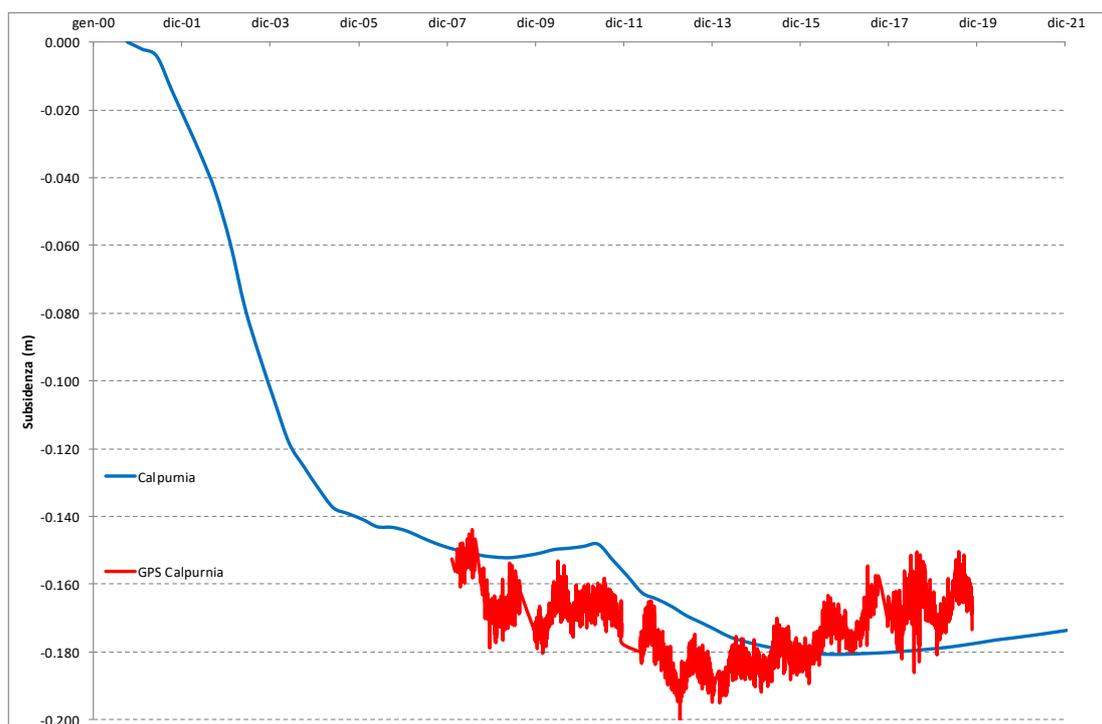


Figura 22 – Andamento della subsidenza misurata (GPS sulla piattaforma) comparata con la simulazione per il campo di Calpurnia.

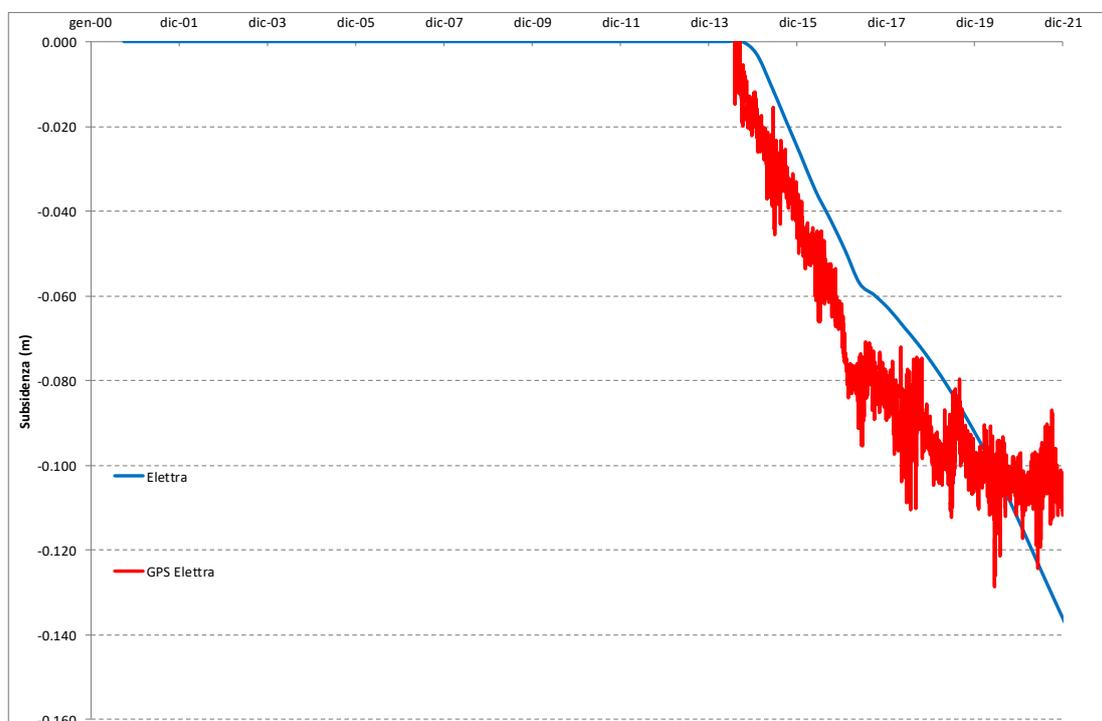


Figura 23 – Andamento della subsidenza misurata (GPS sulla piattaforma) comparata con la simulazione per il campo di Elettra.

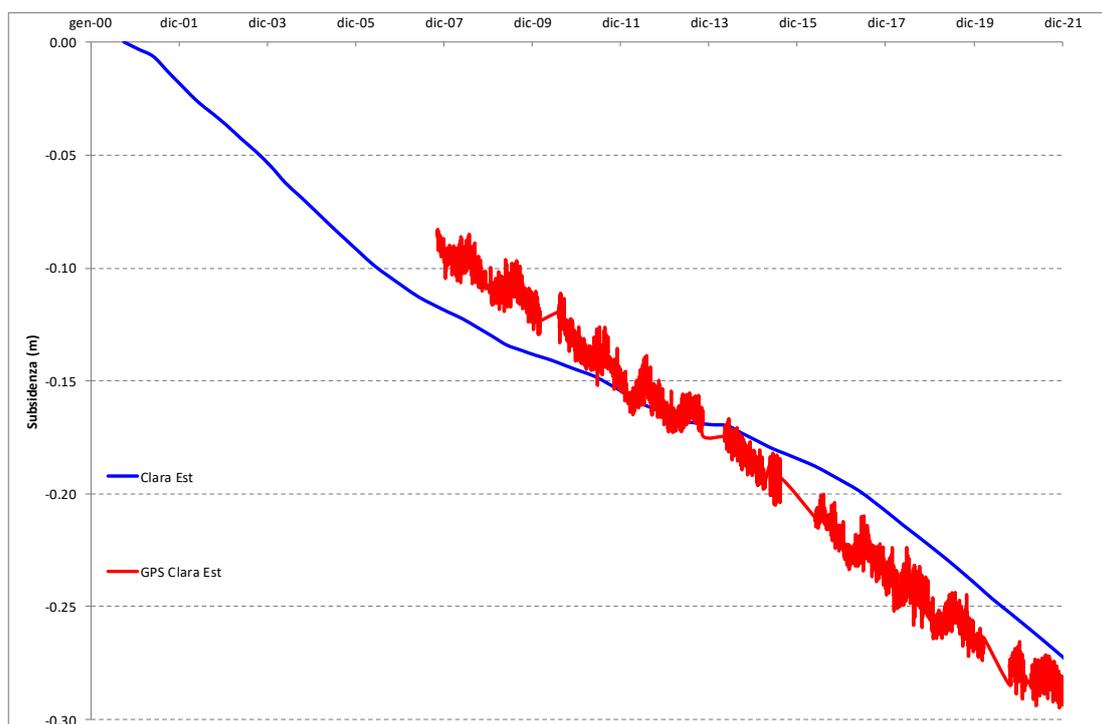


Figura 24 – Andamento della subsidenza misurata (GPS sulla piattaforma) comparata con la simulazione per i campi di Clara Est.

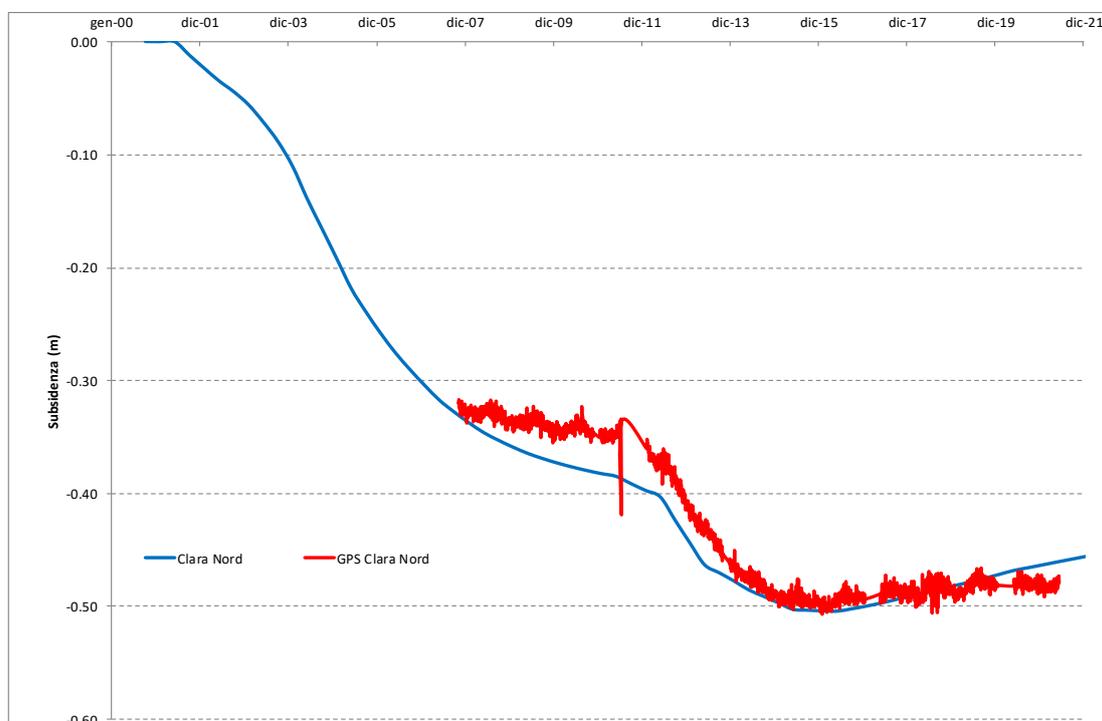


Figura 25 – Andamento della subsidenza misurata (GPS sulla piattaforma) comparata con la simulazione per i campi di Clara Nord.

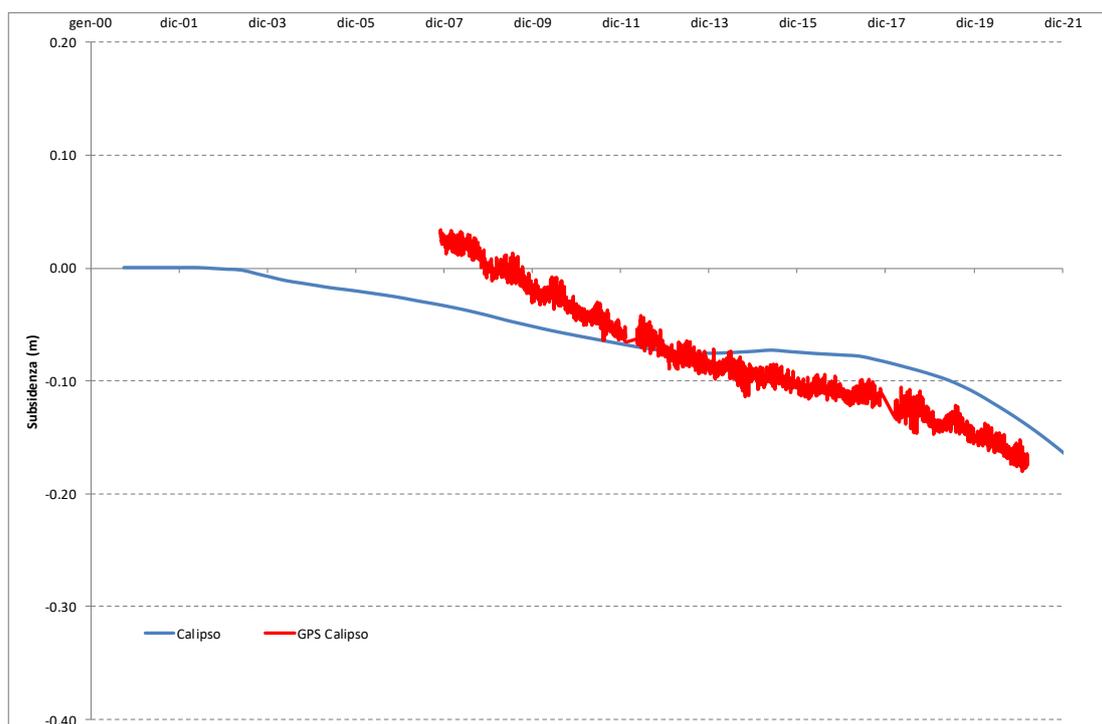


Figura 26 – Andamento della subsidenza misurata (GPS sulla piattaforma) comparata con la simulazione per i campi di Calipso.

Bibliografia

1. Campi di Clara Complex - Aggiornamento dello studio di giacimento per studio geomeccanico – IPET - 2F0DE718-0.
2. Intersect, Schlumberger, versione 2016.2.
3. Campi a gas del Clara Complex, Calipso ed Elettra - Modello predittivo di subsidenza – ISAMGEO 16/04/2018.
4. Campi a gas del Clara Complex, Calipso ed Elettra - Studio di pre-fattibilità finalizzato a valutare l'uso di un approccio con modello tenso-deformativo rate-dependent per i campi del Clara Complex – ISAMGEO 21/11/2018.
5. 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.
6. 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*.
7. 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.
8. Eni-EORG, *Clara Complex – Definizione delle compressibilità*. Rapporto EORG n.8/2017, 2017.
9. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino: *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala - 04/1996*.