

Implicazioni geomorfologiche e vulnerabilità costiera indotte dalla subsidenza multi-decennale nella Piana del Tavoliere di Puglia (Sud Italia)

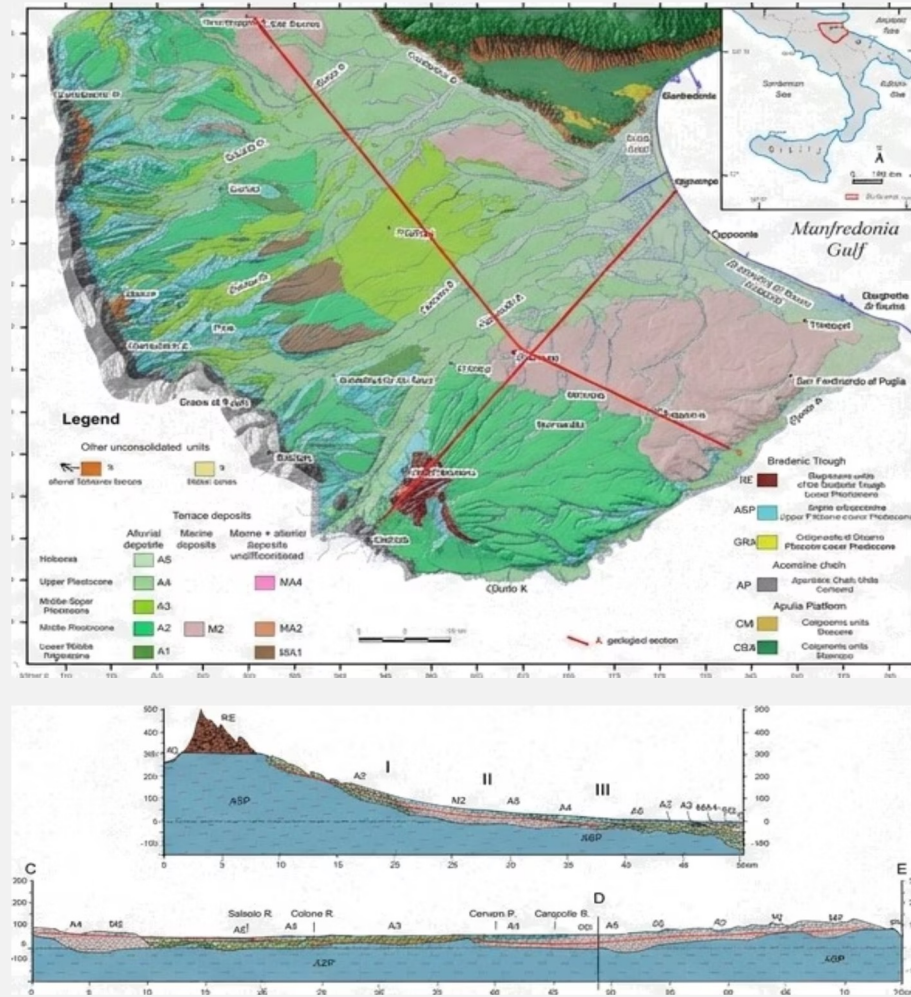
Capolongo D^{1,2}., Belmonte A²., Caldara M¹., De Santis V¹., Giachetta E¹., Liso I.S¹., Parise M¹., Petio P¹., Refice A²., Scardino G¹., Scicchitano G.¹

¹ Dip. Scienze dalla Terra e Geoambientali – Università degli studi di Bari – Aldo Moro

² Istituto per il rilievo elettromagnetico dell'ambiente, Consiglio Nazionale della Ricerche (IREA CNR), Bari, Italy



Inquadramento Geologico



De Santis et al. 2014

Evoluzione Tettonica

• Prima Fase (Pliocene Medio - Pleistocene Inferiore):

Forte subsidenza tettonica dei settori esterni dell'avampaese apulo..
Accumulo di spessi depositi terrigeni entro il bacino dell'avanfossa.

• Seconda Fase (Pleistocene Inferiore - Presente):

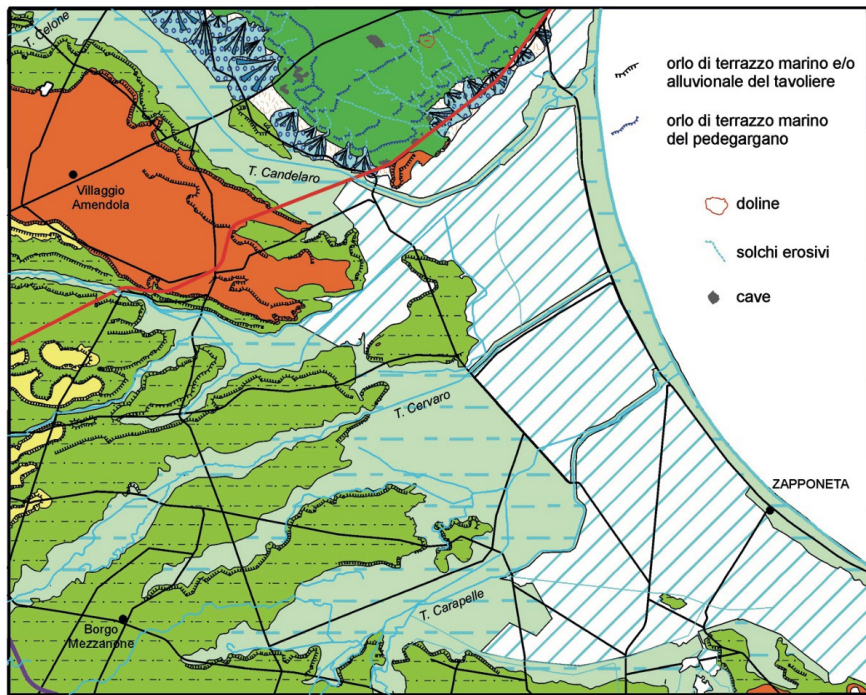
Innesco di un sollevamento regionale generalizzato.

Deposizione di cicli regressivi (Sabbie di Monte Marano, Conglomerati di Irsina) e formazione di terrazzi marini e continentali.

Principali Successioni Sedimentarie

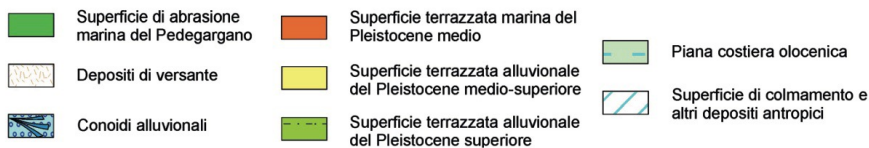
- **Unità Plio-Pleistoceniche Inferiori:** La successione inizia con le emipelagiti argilloso-limose delle **Argille Subappennine** (Pliocene Sup.-Pleistocene Inf.), che evolvono verso l'alto nelle sequenze silicoclastiche della Fossa Bradanica, rappresentate dalle **Sabbie di Monte Marano** e dai **Conglomerati di Irsina**.
- **Depositi Quaternari Recenti (Pleistocene Medio - Olocene):** Il settore è caratterizzato da complesse alternanze di sedimenti misti (silicoclastico-carbonatici) e depositi continentali, inclusi **sistemi alluvionali**, conoidi e brecce di pendio, che culminano nelle attuali **sabbie di spiaggia** lungo la linea di costa.

Inquadramento Geomorfologico



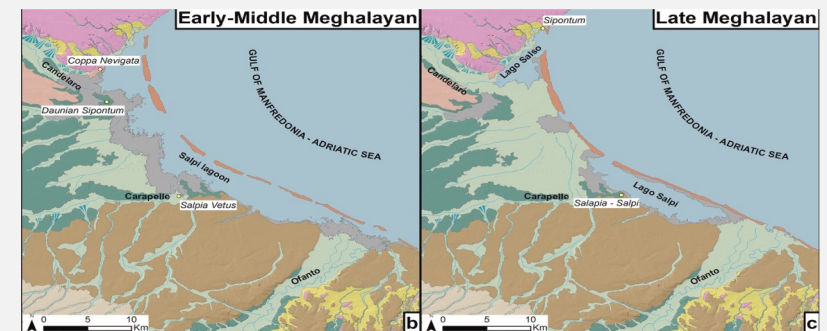
DOMINIO DEL GARGANO

DOMINIO DEL TAVOLIERE DI PUGLIA



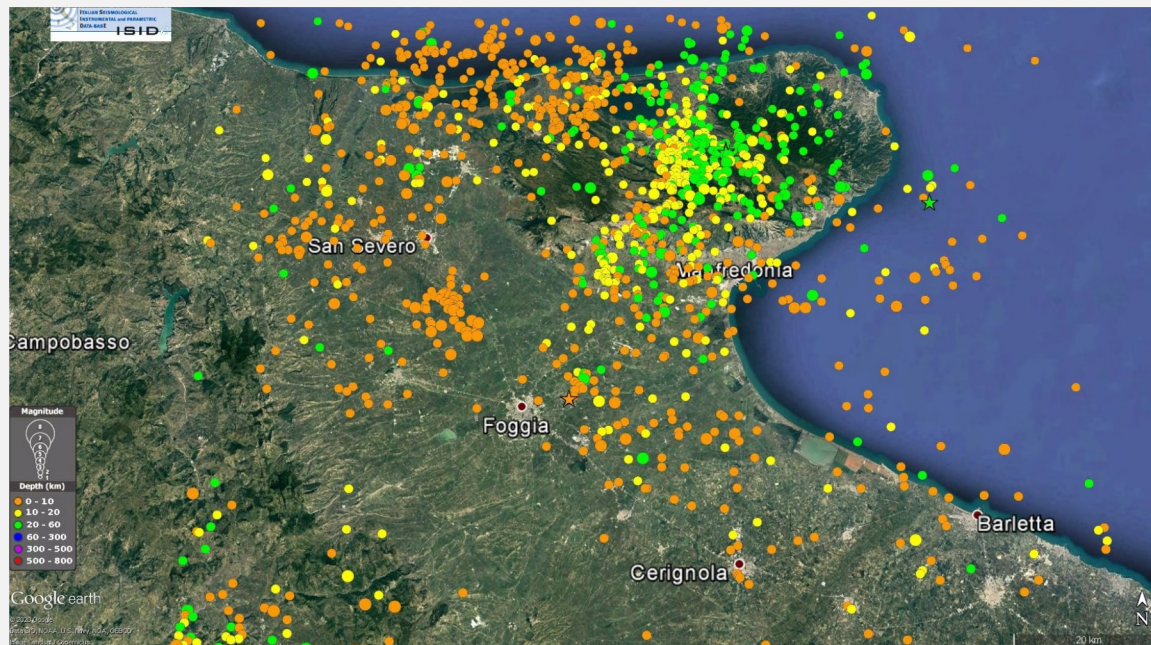
Caldara et al. 2017

- Con una superficie superiore a **4.000 km²**, il Tavoliere di Puglia rappresenta la più vasta pianura alluvionale dell'Italia meridionale. È delimitato a nord dal Promontorio del Gargano, a ovest dal Subappennino Dauno e a sud-est dalle Murge.
- Il paesaggio è caratterizzato da una **topografia a gradonata**, con superfici piane o dolcemente inclinate di origine marina e alluvionale che raggiungono le massime elevazioni nel settore occidentale.
- L'area è drenata da vari corsi d'acqua che sfociano nel Mar Adriatico e nel Golfo di Manfredonia. Il regime pluviometrico medio è di circa 500 mm/anno, con frequenti fenomeni di siccità estiva.
- **Zone Umide:** Le paludi e le zone umide costiere (es. Lago Salso) sono i resti dell'antica **laguna di Salpi**, drasticamente ridotta dalle opere di bonifica degli ultimi due secoli.



Susini et al 2023
(modificato)

Sismicità

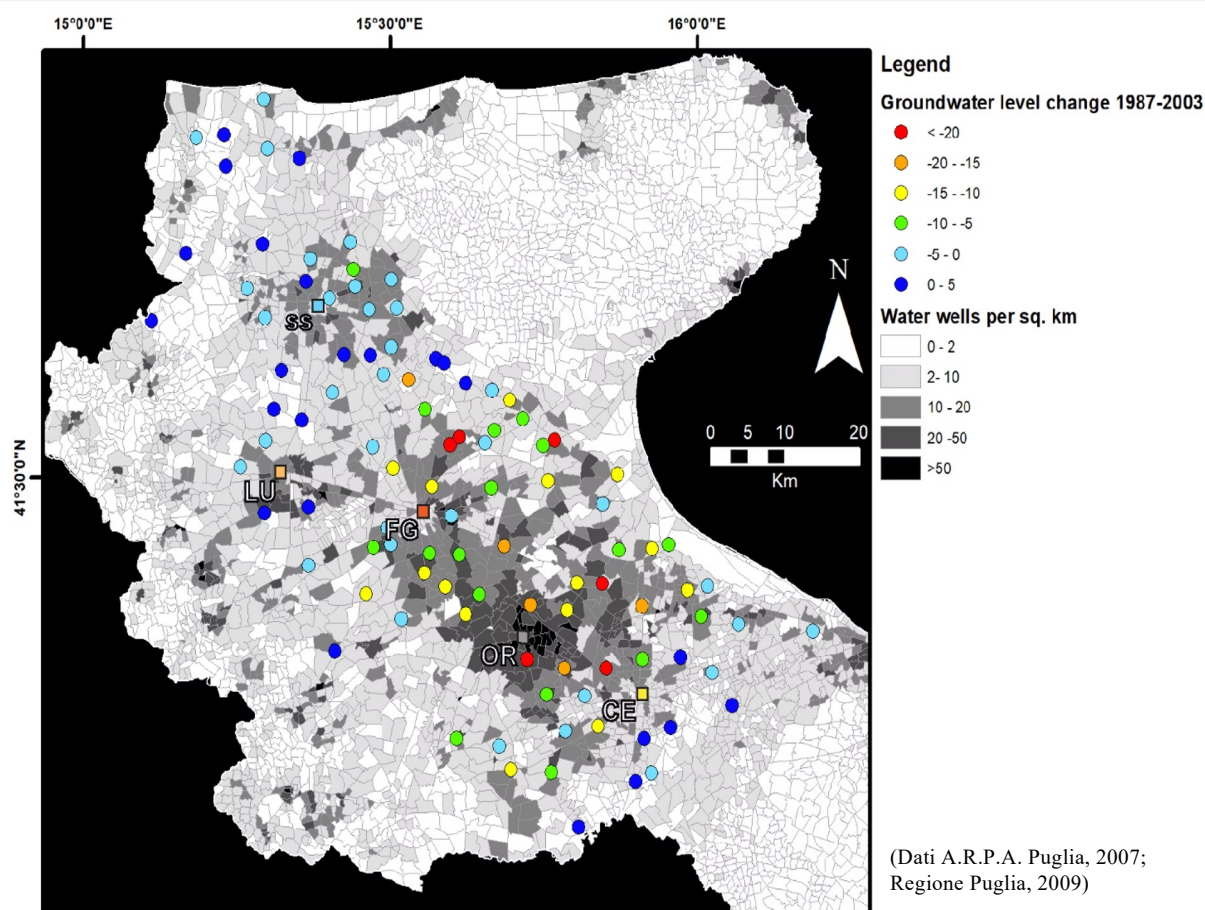


Mapa della sismicità regionale (1990-2018).

La mappa sismica registra 1362 eventi tra il 1990 e il 2018. Un dato fondamentale emerge dall'analisi: la maggior parte dei terremoti ha una magnitudo bassa (1-3) e si origina a profondità (1-30 km), distribuendosi lungo le strutture del Gargano e dell'Appennino. Non sono state riportate rotture superficiali associate a questi eventi.

La deformazione superficiale osservata nel Tavoliere non è primariamente guidata da attività tettonica attiva in superficie,

Densità dei pozzi e calo della falda (1987-2003)



Si osserva una chiara correlazione spaziale: le aree con la più alta densità di pozzi (colori scuri) si trovano nel sud-est del Tavoliere.

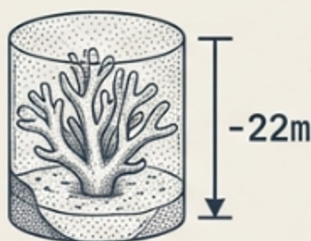
In questa stessa area è stato registrato un drastico calo dei livelli piezometrici, fino a oltre **60 metri** (pallini rossi) rispetto agli anni '50.

Il sovrasfruttamento dell'acquifero superficiale (SP) ha creato un deficit nel bilancio ricarica/estrazione.

Nell'area sono presenti molti pozzi abusivi.

Subsidenza a lungo termine

Analisi della fascia costiera: Golfo di Manfredonia, Ippocampo, Zapponeta



-0.21 mm/anno

Tasso Medio Tettonico (125.000 anni)

Valore calcolato sulla profondità di un bioherma a *Cladocora caespitosa* (corallo fossile) rinvenuto a -22 metri nell'area di Ippocampo.

Il corallo risale allo stadio isotopico marino MIS 5.5 (livello mare +6m). Range naturale: -0.11 / -0.23 mm/anno.

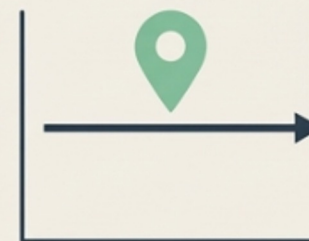


-0.44 mm/anno

Modello GIA & Tettonica

Stima specifica per l'area di Manfredonia che rappresenta il limite massimo del contributo naturale.

Include la somma dei movimenti tettonici e del GIA (Glacial Isostatic Adjustment), basato sui modelli globali di Lambeck et al. (2011).



~-0.007 mm/anno

Stabilità del Margine Nord (Coppa Navigata)

Tasso di subsidenza sostanzialmente nullo rilevato verso il margine meridionale del Gargano.

Dimostra la stabilità tettonica di questa zona specifica negli ultimi 410.000 anni (dal MIS 11), in netto contrasto con la mobilità della piana costiera centrale.

Effetti di subsidenza



**Subsidenza naturale connessa con i fenomeni di
compattazione dei sedimenti di origine recente**



***Carotaggio eseguito il località Sciale delle Rondinelle -
Manfredonia (FG)***



**Subsidenza naturale connessa con i fenomeni di compattazione
dei sedimenti relativi a colmate storiche**



***Voli IGM 1955: F. 164 Foggia str.139 f. 8914;
1972: F. 164 Foggia str.1 f. 10239***

Possibili cause subsidenza

Prelievi in falda in zona di divieto
assoluto di emungimento



Altre possibili cause subsidenza - zona costiera

Negli ultimi anni, in concomitanza di eventi meteomarinari intensi, alcune aree retrodunari vengono allagate e si stanno convertendo in “*salt marsh*”



**Allagamenti
area "Ippocampo"
(Manfredonia)**

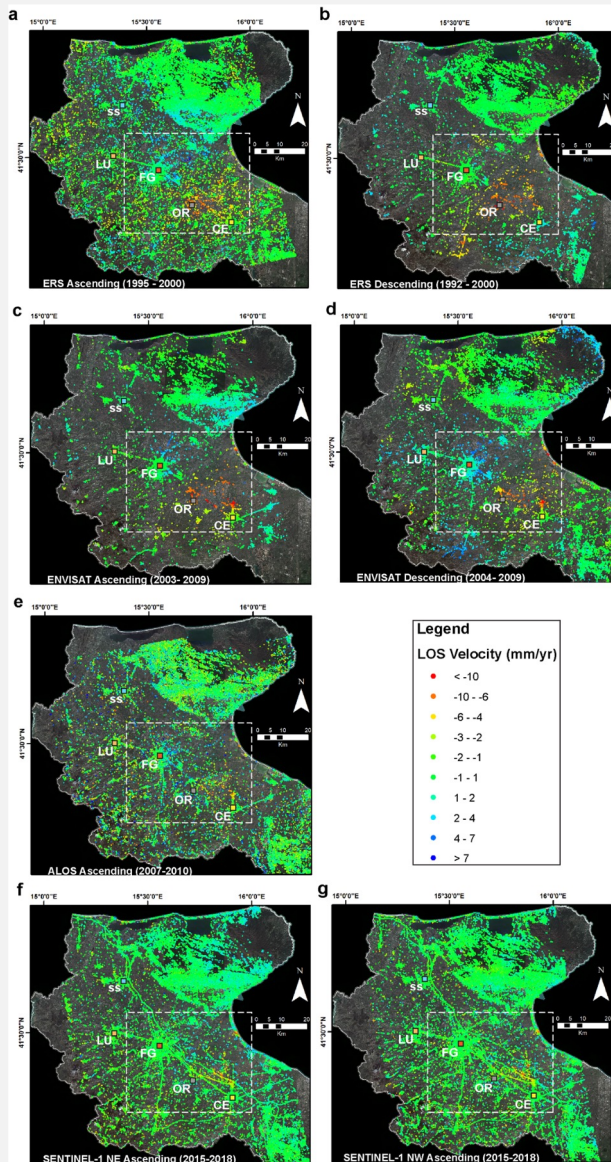
Analisi interferometrica

Dataset SAR

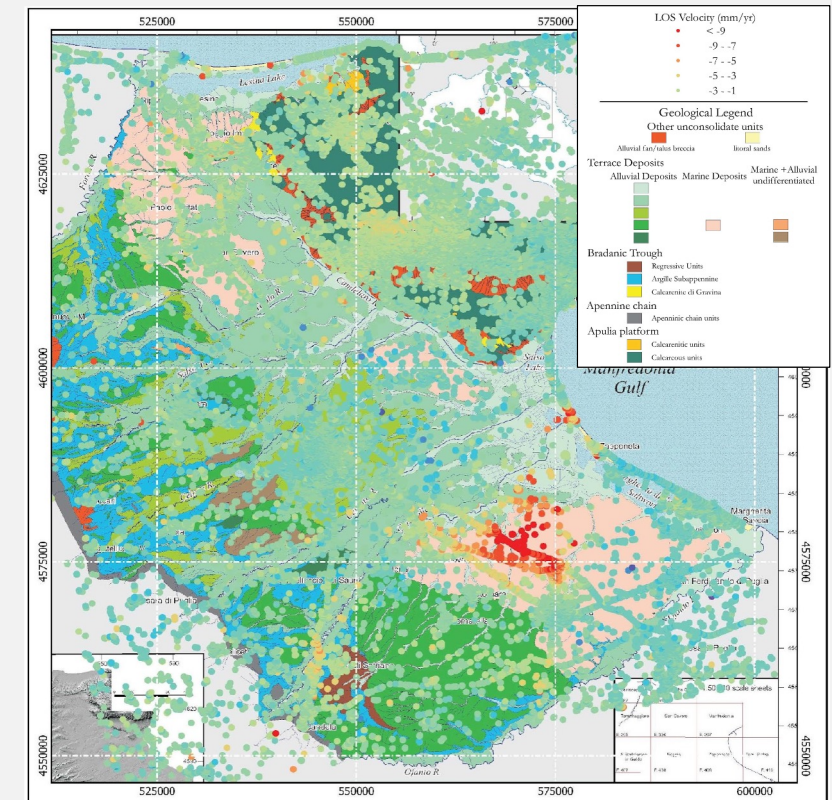
Missione	Ascendente	Discendente	Totale	Periodo
ERS-1/2	24	34	58	1992–2000
ENVISAT	33	28	61	2003–2009
ALOS-PALSAR	62	—	62	2006–2011
Sentinel-1	117 (2015–2018)	94 (2014–2021)	211	2014–2021

Timeline complessiva: 1992 → 2021

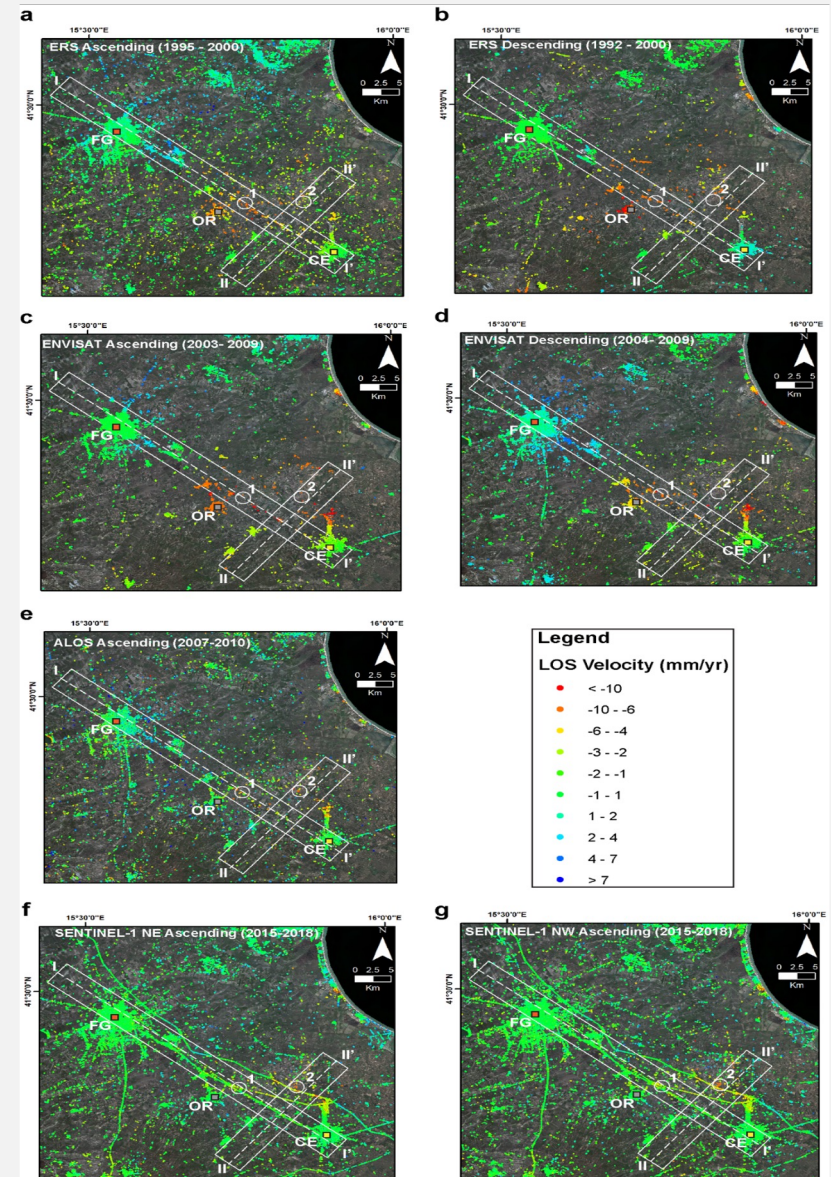
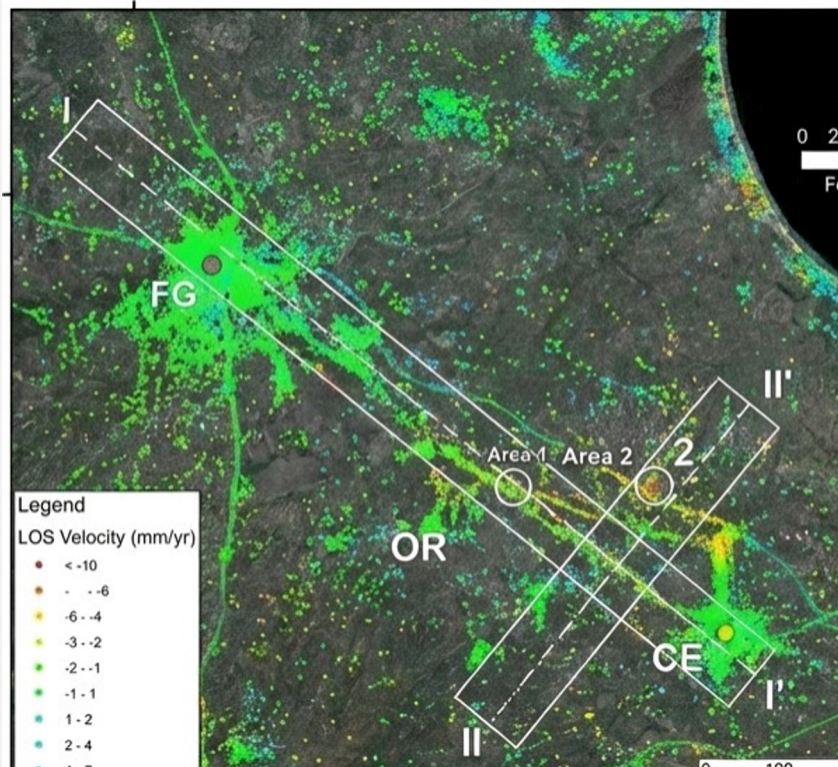
Pattern degli spostamenti

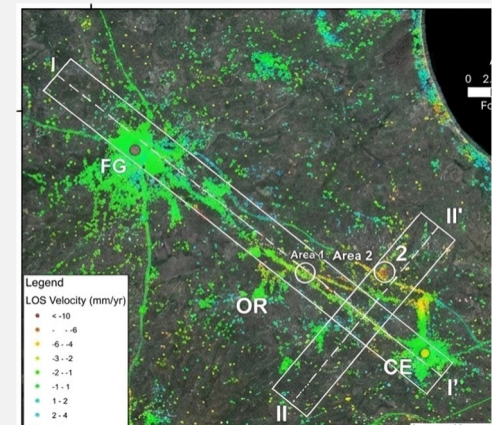
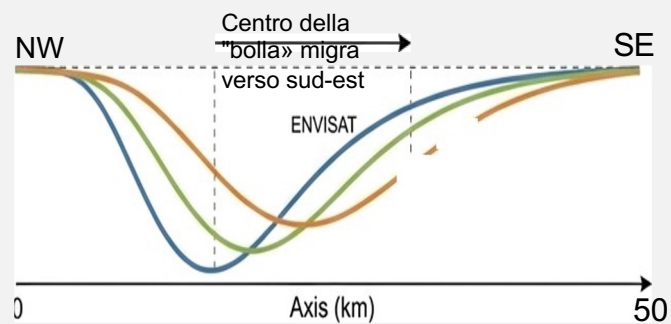
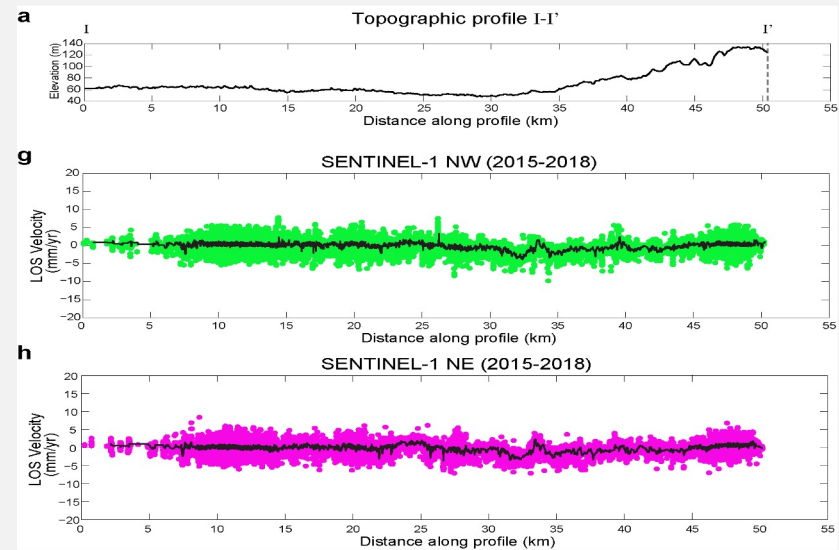
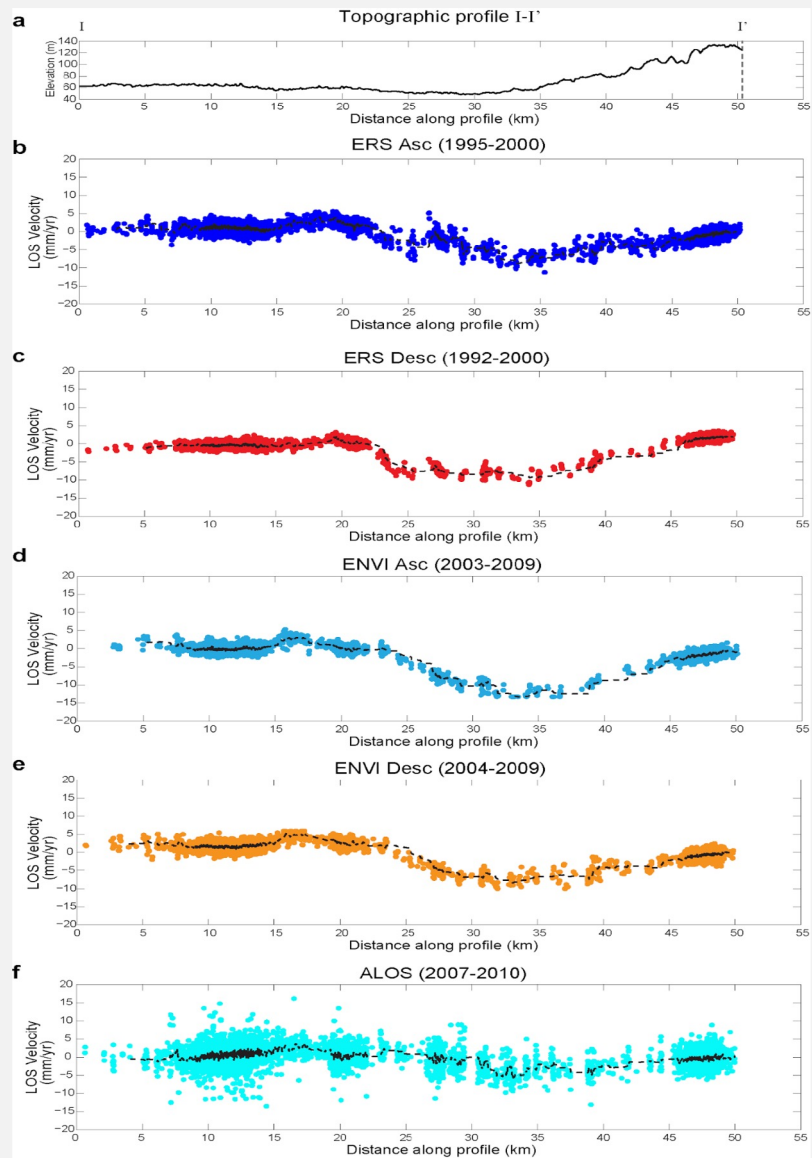


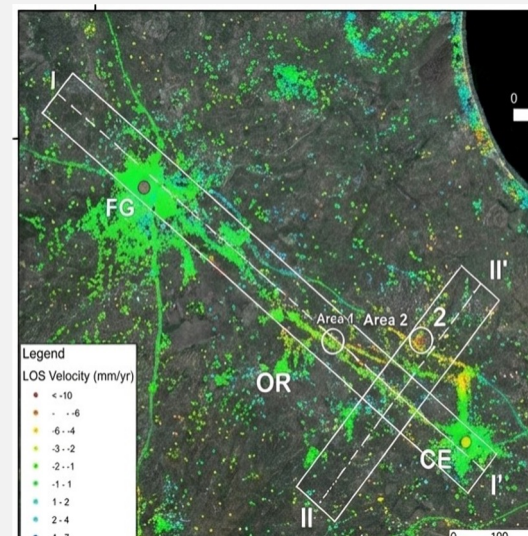
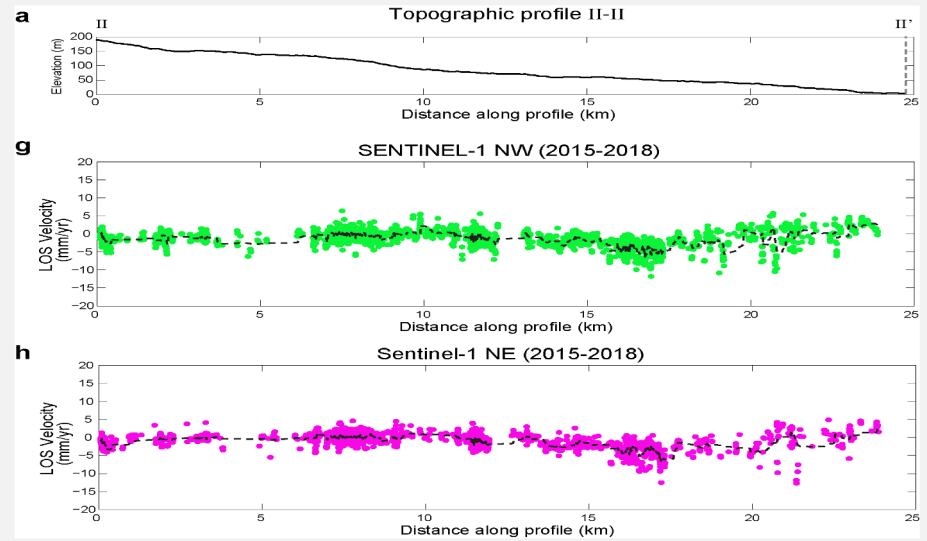
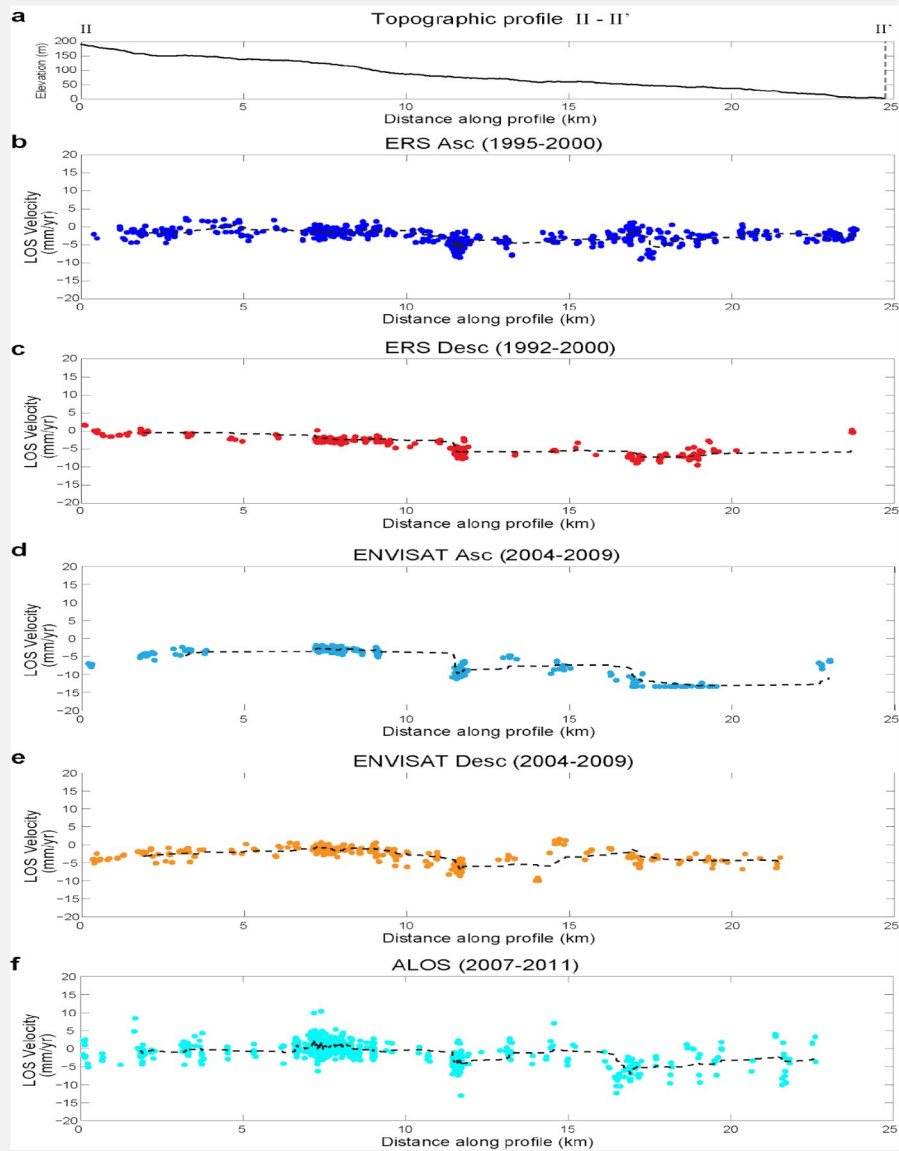
- Le mappe di velocità LOS rivelano aree in **deformazione attiva nel Tavoliere centrale e meridionale**.
- È stata identificata una "**subsidence bowl**" di circa 10 km nel sud-est, vicino a Orta Nova. Qui, i tassi di velocità negativa hanno raggiunto picchi tra **-10 e -15 mm/anno** (aree in rosso).
- Al contrario, le mappe mostrano stabilità o leggero sollevamento (uplift, colori blu) nelle aree centrali e settentrionali di Foggia.
- Il fenomeno è persistente ma dinamico: I dati recenti **Sentinel-1** (2015-2018) suggeriscono un **restringimento dell'area di subsidenza** e uno **spostamento del picco di deformazione verso est di circa 8 km**.



Trend Osservati

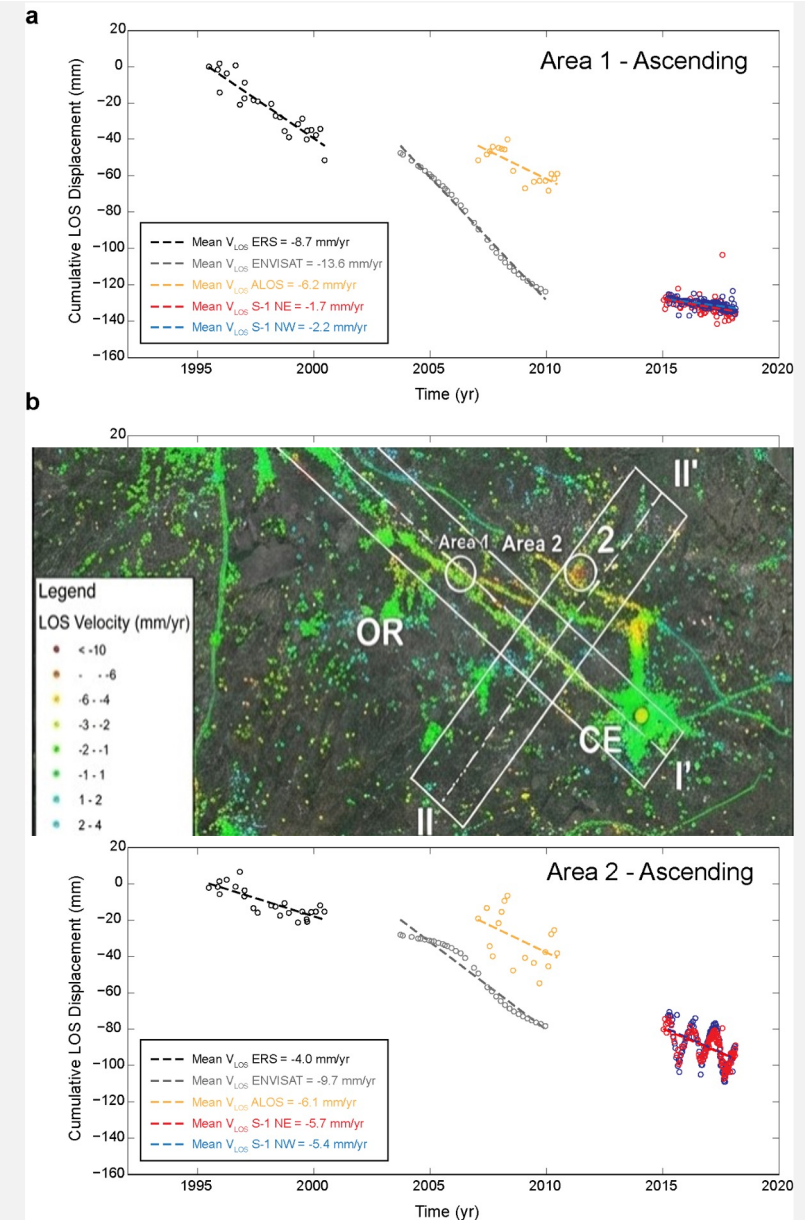




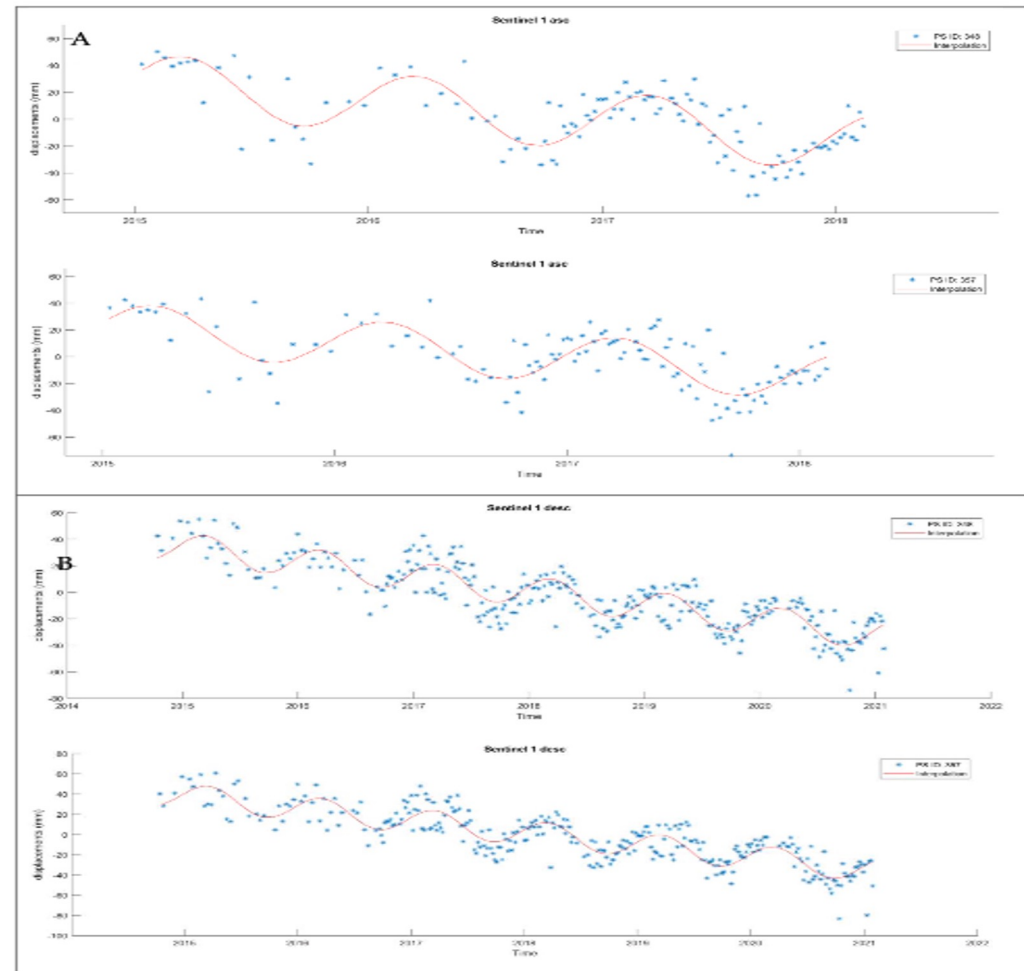
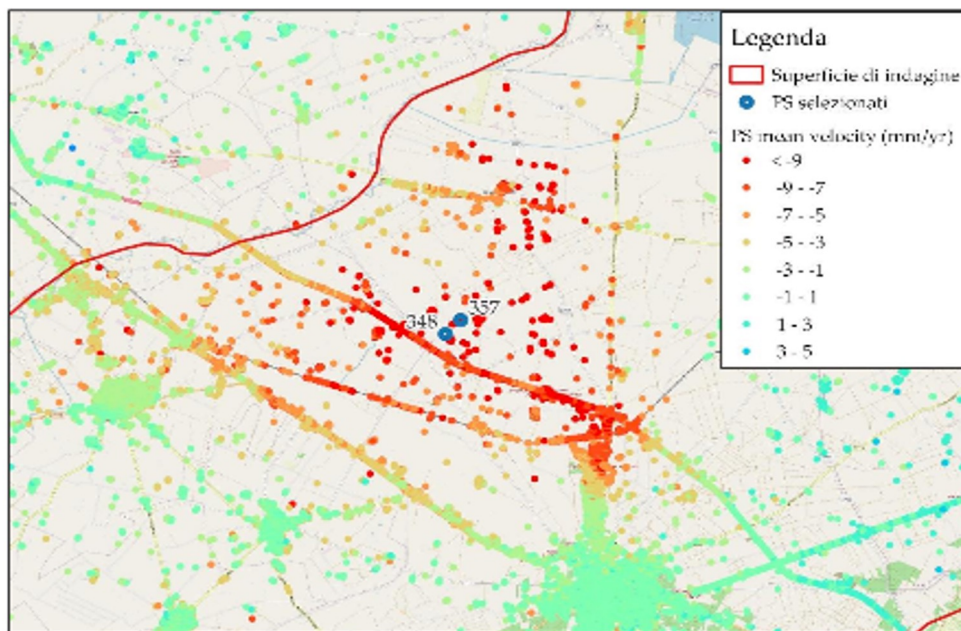


Serie temporali di spostamento (AOI 1 e AOI 2)

- I grafici confrontano l'evoluzione temporale in due aree di osservazione (AOI 1 a ovest, AOI 2 a est).
- Si osserva che i tassi di subsidenza sono generalmente aumentati tra il periodo 1992-2000 e il 2004-2010.
- L'AOI 2 (grafico c) mostra tassi più elevati negli anni recenti, confermando la migrazione verso est del fenomeno.
- Nel periodo 2015-2018, i dati Sentinel-1 rivelano fluttuazioni stagionali della velocità LOS, probabilmente correlate alle variazioni stagionali dei livelli della falda aquifera (ricarica invernale vs estrazione estiva).



Esempi di trend stagionali

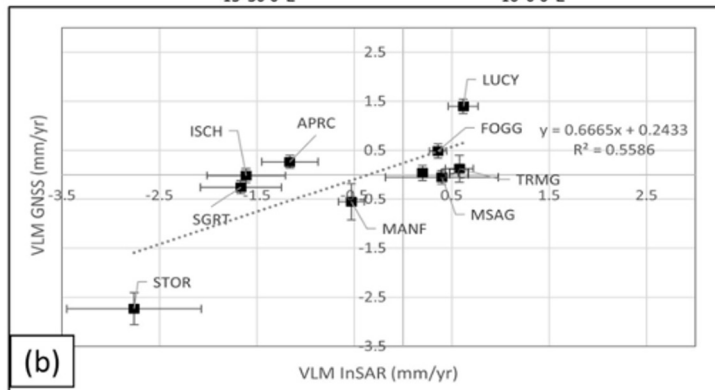
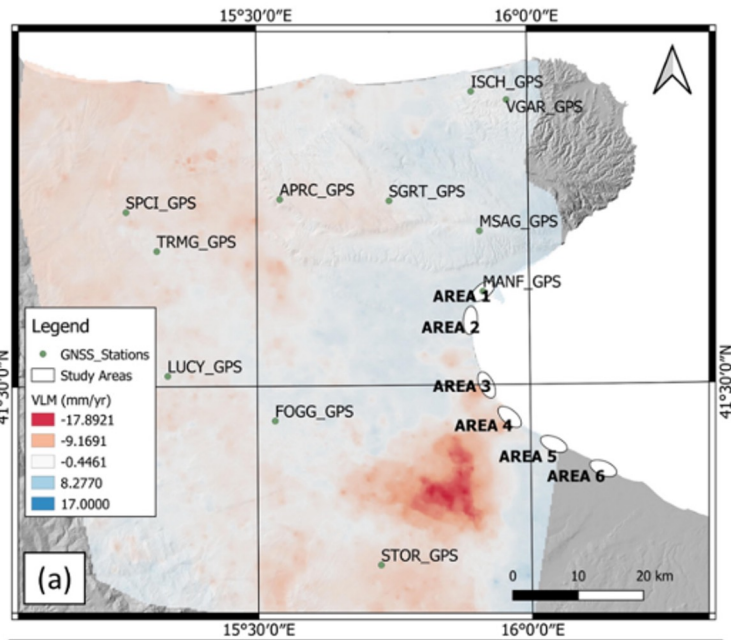




Article

The Impact of Future Sea-Level Rise on Low-Lying Subsiding Coasts: A Case Study of Tavoliere Delle Puglie (Southern Italy)

Giovanni Scardino ^{1,2}, Marco Anzidei ³, Paolo Petio ^{1,*}, Enrico Serpelloni ³, Vincenzo De Santis ^{1,2}, Angela Rizzo ^{1,2}, Serena Isabella Liso ¹, Marina Zingaro ¹, Domenico Capolongo ^{1,2,4}, Antonio Vecchio ^{5,6}, Alberto Refice ⁴ and Giovanni Scicchitano ^{1,2}



Topografia (LiDAR)

Scansione laser aviotrasportata (ALS) e terrestre (TLS) per un DSM ad alta risoluzione.



Dinamica del Suolo (VLM)

Analisi interferometrica (InSAR) calibrata con GNSS per misurare la velocità verticale.



Proiezioni Climatiche

Scenari IPCC AR6 (SSP1-2.6 "Sostenibile" vs SSP5-8.5 "Business-as-usual").

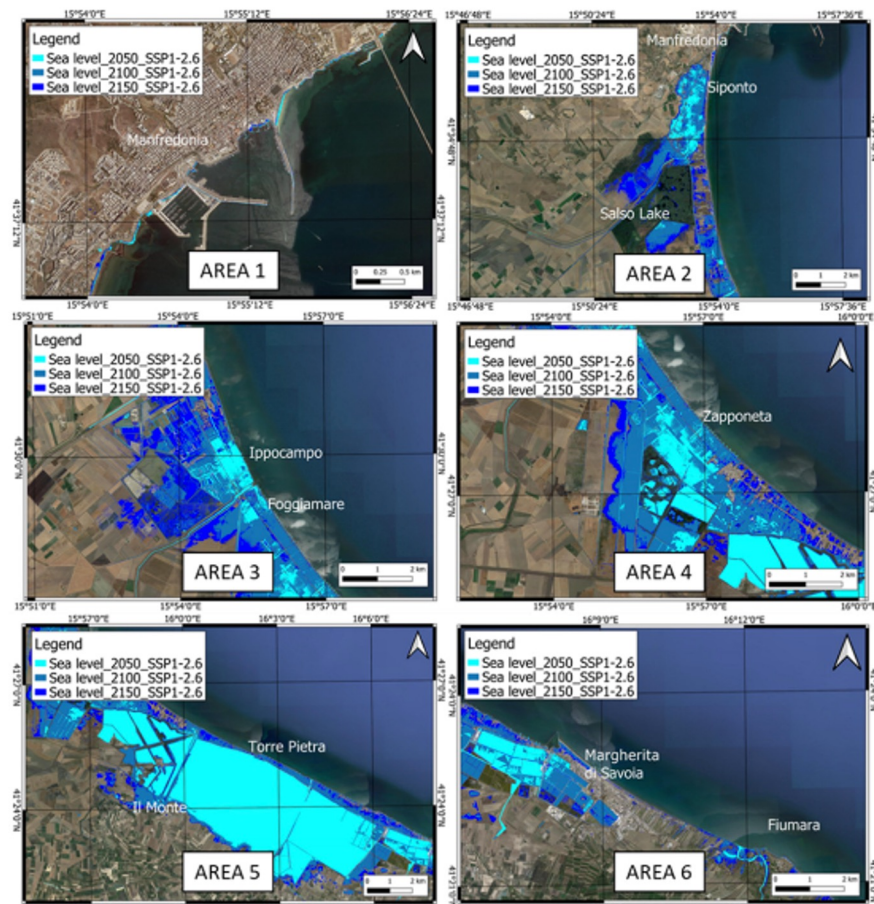


Evoluzione Storica

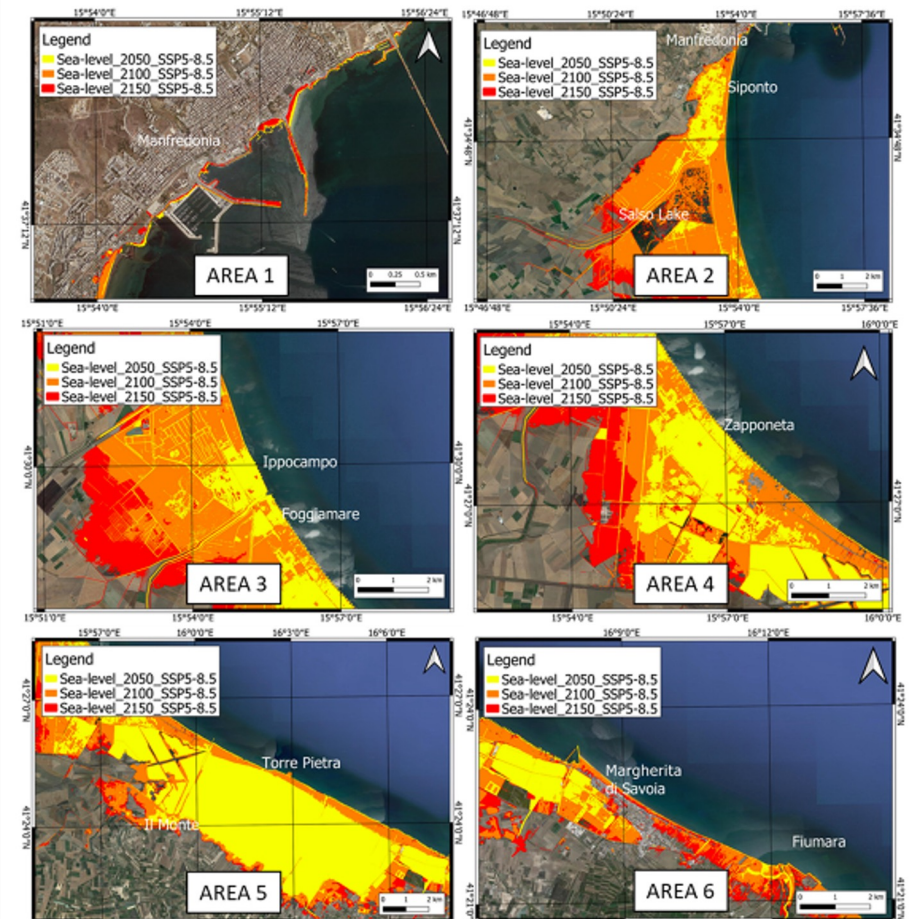
Analisi di ortofoto (1954-2019) per i tassi di erosione.

Modello di Inondazione Integrato

Il modello finale corregge la topografia futura sommando la perdita di quota dovuta alla subsidenza.



Low-emission scenario (SSP1-2.6—IPCC 2021) at 2050, 2100, and 2150.



High-emission scenario (SSP5-8.5—IPCC 2021) at 2050, 2100, and 2150.

Risultati della Perdita di Superficie Totale e Impatti Critici

Estensione Area Inondata (Previsioni)

Anno	Scenario SSP1-2.6 (Basse Emissioni)	Scenario SSP5-8.5 (Alte Emissioni)
2050	44.53 km ²	50.50 km ²
2100	76.54 km ²	118.70 km ²
2150	92.15 km ²	147.74 km ²

Tipologia di Territorio Perduto



Zone Umide e Saline: Entro il 2050 (SSP5-8.5), il **72.5%** dell'area inondata sarà costituita da saline e aree depresse.



Terreni Agricoli: Nel 2150 (SSP5-8.5), il **44.5%** dei terreni agricoli nell'area di studio sarà sommerso.



Aree Protette (Natura 2000): Perdita progressiva: **~50 km²** (2050) → **105 km²** (2100) → **147 km²** (2150).

Dettaglio per Aree Critiche (Macro-Aree)



1. Area 5 (Torre Pietra): È l'area più critica in assoluto. Già nel 2050 si prevede la perdita di circa **35.7 km²**. Nel 2150 (scenario peggiore), la perdita sale a **55 km²**.



2. Area 4 (Zapponeta): Impatto massiccio nel lungo termine. Passa da **~9 km²** persi nel 2050 a **35.4 km²** persi nel 2150.



3. Area 2 (Siponto/Lago Salso): Differenza estrema tra scenari. Nel 2100 (SSP5-8.5) balza a **23.7 km²**, indicando l'inondazione del Lago Salso.



4. Area 3 (Ippocampo): Accelerazione drammatica. Da **<1 km²** nel 2050 a oltre **22 km²** nel 2150.

Conclusioni

1. La subsidenza nel Tavoliere è guidata principalmente dal **sovrasfruttamento dell'acquifero superficiale** per scopi agricoli. Esiste una forte correlazione spaziale tra le aree soggette a maggior abbassamento, la densità dei pozzi e il drastico calo della falda (fino a 60 m dagli anni '50).
1. L'analisi InSAR ha identificato una **depressione larga circa 10 km** nel settore sud-orientale (tra Orta Nova e Cerignola), caratterizzata da velocità di deformazione persistenti con picchi compresi tra **-10 e -15 mm/anno** nel periodo 1992-2018.
1. Il sistema è dinamico: mentre nelle aree interne centrali si osserva una stabilità o un lieve sollevamento (dovuto al recupero elastico della falda), il **picco di subsidenza massima** sta **migrando verso Est** (verso la costa) come evidenziato dai dati Sentinel-1 più recenti.
1. I tassi di subsidenza antropica attuali (> 10 mm/anno) superano di gran lunga la componente naturale (-0.20--0.40 mm/anno) e l'innalzamento eustatico del mare. Questo accelera l'erosione costiera, l'intrusione salina e il rischio di inondazione delle zone umide del Golfo di Manfredonia