Modellazione locale del geoide in un'area soggetta a subsidenza: un approccio esplorativo nel Delta del Po veneto

Zanusso E.[1][0009-0005-0750-5866]; Amoroso A.[1]; Magnabosco L.[1]; Masetto C.[1][0009-0002-2043-567X]; Savio D.[1][0009-0003-6227-6547]; Trivelloni U.[1]; Fabris M.[2][0000-0002-4901-8522]

[1] Regione del Veneto, Direzione Pianificazione Territoriale
zanussoenrico@gmail.com; alessandra.amoroso@regione.veneto.it; laura.magnabosco@regione.veneto.it; carlo.masetto@regione.veneto.it; daniele.savio@regione.veneto.it; umberto.trivelloni@regione.veneto.it
[2] Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - ICEA
massimo.fabris@unipd.it

Abstract. Il Delta del Po veneto è soggetto a subsidenza attiva, che può avere un effetto non trascurabile nella stima dell'ondulazione locale del geoide. Misure di livellazione geometrica (2023) e GNSS (2024) sono state eseguite su 40 capisaldi, confrontando le differenze con il modello ITALGEO2005. I residui restano entro ±4 cm, con i valori negativi che si concentrano nella Sacca degli Scardovari, indicando un'anomalia spazialmente strutturata, legata a subsidenza differenziale o ai limiti del modello.

Parole chiave: Ondulazione del geoide, ITALGEO2005, GNSS, Livellazione geometrica, Subsidenza, Delta del Po.

1 Introduzione

Il Delta del Po è uno dei territori geodeticamente più complessi dell'Italia settentrionale. La compattazione dei sedimenti alluvionali e l'estrazione di acque sotterranee o di gas naturali hanno determinato nel Novecento tassi di subsidenza tra i più elevati d'Europa, con abbassamenti cumulati che in alcune aree superano i tre metri e con vaste superfici stabilmente sotto il livello medio del mare [1]. A inizio Novecento le quote del territorio deltizio erano comprese tra -1,0 m e +1,6 m s.l.m, mentre nel 2007 risultavano comprese tra -2,8 m e +0,3 m [2]. Le fasi più intense (fino a 250 mm/anno nel periodo 1951–1957 [3]) si sono ridotte dopo la sospensione delle estrazioni di acque sotterranee e di gas naturali negli anni Sessanta, ma il fenomeno è ancora in corso. Misure GNSS e InSAR multi-temporali documentano infatti tassi attuali fino a 16-18 mm/anno nella fascia costiera [4].

Le quote misurate con tecniche GNSS (h) sono riferite all'ellissoide, mentre le applicazioni legate al flusso dell'acqua richiedono quote ortometriche (H), riferite al geoide, superficie equipotenziale che approssima il livello medio del mare con discrepanze a livello globale di 1-2m [5]. La separazione tra le due superfici è

l'ondulazione del geoide N, legata a h e H dall'equazione approssimata della livellazione GNSS [6]:

$$N \approx h - H \tag{1}$$

In Italia il modello di riferimento è ITALGEO2005 (IGMI) che è derivato anche da dati gravimetrici e distribuito come grigliati *.gk2 [5, 7]. ITALGEO2005 dichiara un'accuratezza di ±0,04 m su scala nazionale. La sua rappresentatività in aree costiere soggette a subsidenza attiva (dove la dinamica del suolo può alterare il campo altimetrico locale) non è stata tuttavia ancora valutata sistematicamente con dati locali ad alta precisione.

Questo lavoro, di carattere esplorativo, costruisce un modello locale di N nel Delta del Po veneto (integrando livellazione geometrica e GNSS su capisaldi comuni) e lo confronta con ITALGEO2005 per quantificarne le discrepanze, indicarne la distribuzione spaziale e le possibili cause.

2 Area di studio e dati disponibili

2.1 Area di studio

L'area esaminata ricade nel settore veneto del Delta, in provincia di Rovigo, tra Lorèo, Taglio di Po e Porto Tolle. Il territorio è pianeggiante, con quote prevalentemente negative e una fitta rete di canali, argini e valli da pesca.

La subsidenza cumulata e le opere di difesa a mare hanno prodotto bordi sopraelevati verso il mare e una vasta depressione centrale, esposta al rischio di inondazione [1]. I 40 capisaldi analizzati occupano circa 360 km² (circa 30 km in direzione N–S e 20 km E–O), con coordinate in RDN2008, UTM fuso 12 (EPSG:6876). Sono più fitti lungo gli argini delle Valli del Po (nord) e attorno alla Sacca degli Scardovari (sud), che risulta essere un’area tra le più dinamiche del Delta per evoluzione costiera [1] (Fig. 1). L'involucro convesso dei punti definisce il dominio dell'analisi.

La subsidenza cresce dall'entroterra verso la costa orientale [4]: ciò motiva lo studio, ma introduce anche un elemento temporale nel confronto tra campagne distinte.

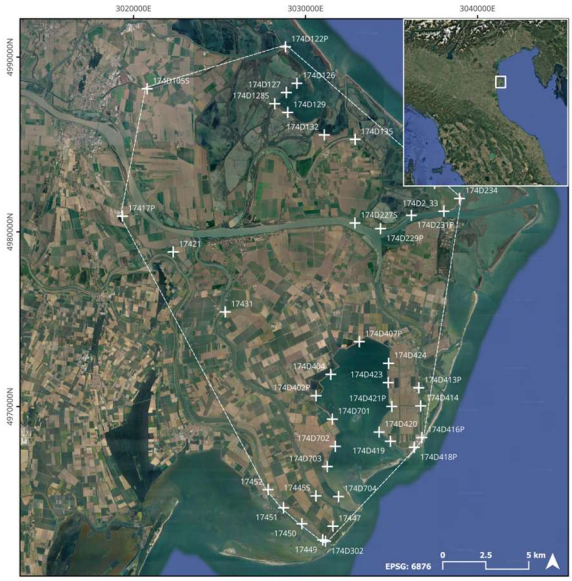

Fig. 1. Area di studio: nome e posizione dei 40 capisaldi comuni e perimetro dell'area di calcolo (EPSG:6876).

2.2 Campagne di livellazione e GNSS

Il primo dataset comprende 201 quote ortometriche da livellazione geometrica di alta precisione lungo la linea IGMI 0174 Lorèo–Porto Tolle (campagna IGMI/Regione del Veneto, 2023). Ogni dislivello è misurato in andata e ritorno; lo scarto tra le due determinazioni deve rientrare in 2,5 mm/km e il dato finale è la media, con accuratezza intrinseca dell'ordine del millimetro per chilometro di percorso. Il secondo dataset comprende 75 misure plano-altimetriche GNSS (Università di Padova, 2024): sessioni di almeno tre ore per baseline, post-processing con utilizzo di effemeridi precise, quote ellissoidiche GRS80 in RDN2008, con protocollo coerente con le campagne sulla rete PODELNET (PO DELta NETwork) (3 stazioni permanenti e 46 siti non permanenti) [4, 8]. L'antenna è stata centrata sul contrassegno a terra del caposaldo; l'errore atteso in quota è dell'ordine di 1 cm.

2.3 Selezione dei capisaldi comuni

L'incrocio dei due dataset ha individuato circa 40 capisaldi con quota ortometrica *H* (2023) ed ellissoidica *h* (2024).
Per ciascuno di essi è stata esaminata la monografia IGMI (aggiornata al 2013) o, per i casi non documentati, i file di campagna delle ditte esecutrici.
Alcuni capisaldi hanno doppio contrassegno (bullone torico per la stadia; centrino universale o chiodo per il treppiede GNSS), fisicamente distinto e a quota diversa. Nella quasi totalità dei casi la livellazione del 2023 ha quotato tutti i contrassegni, e

l'abbinamento è stato fatto sul contrassegno effettivamente occupato dall'antenna GNSS.
Quando erano stati quotati solo i bulloni torici, la quota GNSS era stata corretta con il dislivello tra contrassegni dichiarato nelle monografie. Per il caposaldo 174D233 (Pila, Porto Tolle) - dove il centrino è stato materializzato dopo l'ultimo aggiornamento della monografia - il dato proviene dai rapporti di misura della ditta esecutrice. Due coppie di misure sono state escluse per assenza di elementi che giustificassero valori anomali.

3 Metodologia

3.1 Ondulazione locale e confronto con ITALGEO2005

Per ciascun caposaldo l'ondulazione locale è stata stimata con l'equazione $N \approx h - H$, con h da GNSS (2024) e H da livellazione (2023). Il valore è una stima puntuale che incorpora sia il segnale geoidico reale sia gli eventuali effetti della subsidenza intercorsa tra le due campagne. I valori sono stati confrontati con ITALGEO2005 interrogando i grigliati *.gk2 e calcolando, punto per punto, $\Delta N = N_{\text{locale}} - N_{\text{ITALGEO2005}}$.

3.2 Interpolazione spaziale

I 40 valori sono stati interpolati su griglia 100×100 m entro l'involucro convesso dei punti (software QGIS). Sono stati testati gli algoritmi Nearest Neighbour, IDW, Thin Plate Spline (TPS) e le regressioni polinomiali (semplice, bilineare, quadratica).
Il Nearest Neighbour produce poligoni di Voronoi con transizioni brusche, incompatibili con un campo continuo e graduale. L'IDW genera artefatti “bull's-eye” in corrispondenza dei punti. Le regressioni bilineare e quadratica risultano numericamente instabili. Sono stati quindi selezionati la regressione polinomiale semplice (piano $z = A + Bx + Cy$) e il TPS, cioè la superficie elastica che minimizza la curvatura globale e passa in prossimità dei punti noti. A scala locale, dove geoide ed ellissoide sono assimilabili a piani, il TPS è un'approssimazione fisicamente coerente.

3.3 Punti di controllo

Per interrogare e verificarne la coerenza delle interpolazioni dove non esiste una misura diretta, sono stati scelti 6 punti di controllo esterni al dataset, distribuiti sull'intera area, in zone a minore densità di osservazioni e centrati sui pixel 100×100 m. Poiché in questi punti non esiste un valore misurato di N, come riferimento è stata assunta l'ondulazione ITALGEO2005 ricavata dai grigliati, confrontata con i valori dei modelli interpolati.

4 Risultati

Ondulazione locale. I 40 valori di N mostrano un chiaro gradiente latitudinale, crescente da sud a nord, coerente con l'allontanamento del geoide dall'ellissoide verso settentrione. Il minimo è 40,857 m, il massimo 42,232 m.

Confronto con ITALGEO2005. Le differenze ΔN sono comprese tra −0,034 m (174D418P) e +0,014 m (17431), interamente entro la tolleranza dichiarata (±0,04 m). La loro distribuzione non è casuale: i residui più negativi si concentrano nella Sacca degli Scardovari, nel settore meridionale (Fig. 2), suggerendo un'anomalia localizzata non catturata dal modello nazionale. La superficie TPS di ΔN (Fig. 3) varia tra −0,037 e +0,017 m; l'esagerazione verticale ha solo lo scopo di chiarezza visiva.

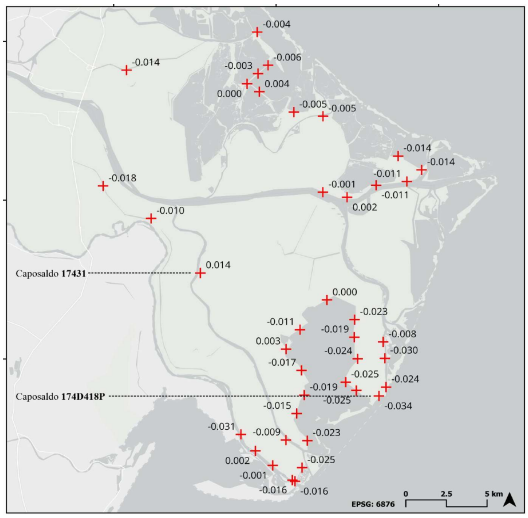

Fig. 2. Differenze di ondulazione ΔN (m) tra il modello locale (dati 2023 e 2024) e ITALGEO2005 nei 40 capisaldi.

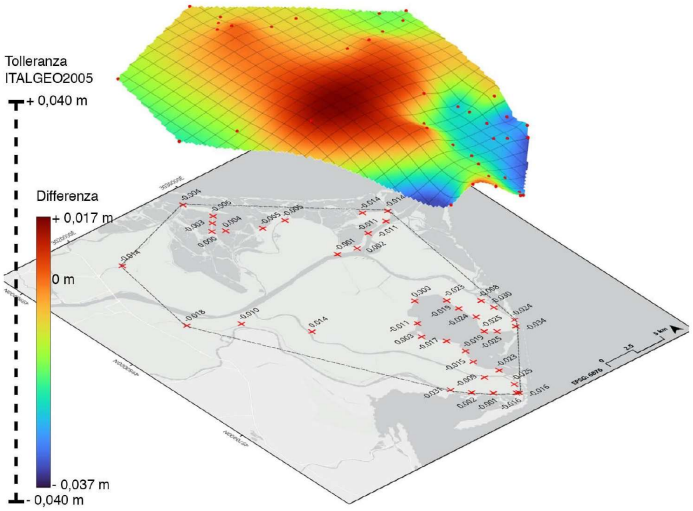

Fig. 3. Rappresentazione 3D della superficie TPS di ΔN rispetto a ITALGEO2005; asse z esagerato 50000 volte; griglia visuale 1×1 km; la tolleranza di ITALGEO2005 è ±0,040 m.

Modelli interpolati. Sui 40 punti noti lo scarto medio tra superficie interpolata e valori calcolati è di 2 mm per il TPS e di 9 mm per il piano: il TPS risulta più aderente ai dati disponibili.

Punti di controllo. Rispetto ai valori ITALGEO2005 nei 6 punti di controllo (Tab. 1) lo scarto medio è 1,2 cm per il TPS e 1,3 cm per il piano, ed è paragonabile all'errore strumentale atteso per il GNSS. Nei punti costieri prossimi alla Sacca degli Scardovari (punti 4 e 5) le differenze salgono fino a 2,5 cm (TPS) e 2,0 cm (piano), restando sotto la soglia di ±0,04 m.

Tab. 1. Punti di controllo: ondulazione ITALGEO2005 e differenza (valore assoluto, m) con i modelli interpolati.

Punto	N ITALGEO2005 [m]	|ΔN| TPS [m]	|ΔN| piano [m]
1	42,119	0,009	0,011
2	41,898	0,006	0,013
3	41,613	0,003	0,015
4	41,256	0,025	0,020
5	41,101	0,020	0,005
6	41,724	0,009	0,015
Media	–	0,012	0,013

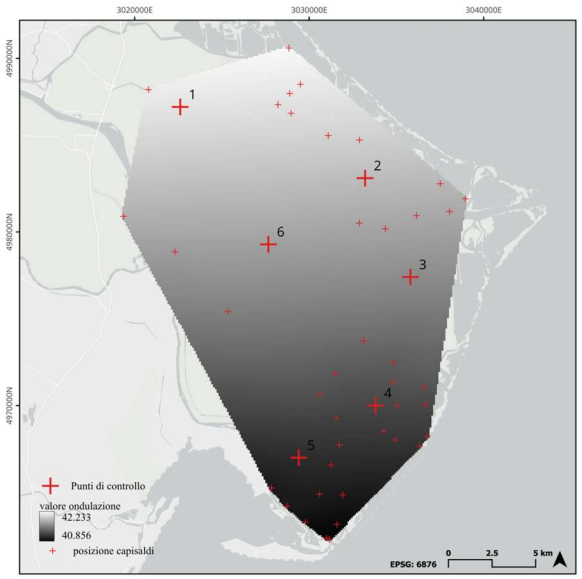

Fig. 4. Posizione dei 6 punti di controllo nell'area del modello di ondulazione locale del geoide calcolato con algoritmo TPS.

5 Discussione

I risultati confermano, in prima approssimazione, la coerenza di ITALGEO2005 con le osservazioni locali: le differenze punto per punto ricadono nella tolleranza dichiarata. La struttura spaziale dei residui, in particolare la concentrazione di anomalie negative nella Sacca degli Scardovari, suggerisce un andamento sistematico. Sono state avanzate due ipotesi, non mutuamente esclusive.

Subsidenza differenziale. I capisaldi della fascia costiera meridionale mostrano tassi di abbassamento superiori a quelli dell'entroterra [3, 4]; l'intervallo di un anno tra la livellazione (2023) e il rilievo GNSS (2024) può aver introdotto un bias sistematico in N, con quote ellissoidiche 2024 già inferiori a quelle che si sarebbero potute misurare nel 2023.

Limiti di ITALGEO2005. La griglia di dati gravimetrici e GNSS/livellazione alla base del modello potrebbe non coprire adeguatamente le zone costiere, con estrapolazione in aree prive di osservazioni dirette e incertezza crescente con la distanza dai punti di misura.

Qualità del dato GNSS. La ricognizione di campo (10–11 giugno 2026) ha evidenziato che edifici, strutture o vegetazione fitta presso l'antenna riducono i satelliti agganciati e degradano la precisione. Il caposaldo IGM 77710 (17431), adiacente a un fabbricato abbandonato con vegetazione densa, ne è un esempio: pur con qualità di misura potenzialmente inferiore, il suo errore resta entro la tolleranza di ITALGEO2005, e il monitoraggio biennale PODELNET mostra una progressiva diminuzione delle quote ellissoidiche, coerente con la subsidenza in atto [4, 8].

Sviluppi. La campagna GNSS 2026 sugli stessi siti non permanenti (rete PODELNET, avviata a giugno 2026 [9]) permetterà di discriminare tra le ipotesi: il confronto tra le quote ellissoidiche 2026 e 2024 darà la subsidenza biennale. Se questa fosse dell'ordine del doppio dell'anomalia osservata, che incorpora un solo anno di subsidenza (2023–2024), le discrepanze saranno imputabili soprattutto al bias temporale. Se la subsidenza fosse significativamente inferiore, andranno cercate altre cause, quali i limiti di copertura di ITALGEO2005 nelle zone costiere oppure delle anomalie geofisiche locali.

6 Conclusioni

È stato prodotto un modello locale dell'ondulazione del geoide nel Delta del Po veneto da 40 capisaldi comuni (livellazione 2023, GNSS 2024) su circa 360 km². L'analisi delle monografie IGMI e la correzione per i doppi contrassegni hanno eliminato una fonte di errore sistematico che avrebbe compromesso l'affidabilità dei valori di N.

Le differenze rispetto a ITALGEO2005 (da −0,034 a +0,014 m) sono contenute entro ±0,04 m e lo scarto medio sui punti di controllo (scelti in zone a minor densità di misurazioni) è di circa 1 cm: ITALGEO2005 mantiene quindi la propria accuratezza dichiarata anche in questo contesto geodinamicamente attivo. Se il bias temporale fosse confermato, le differenze effettive risulterebbero ancora minori.

La distribuzione dei residui non è però uniforme e ne deriva un'indicazione operativa: chi utilizza i grigliati *.gk2 nell'area può attendersi accuratezza centimetrica nella maggior parte del territorio, con della cautela aggiuntiva nella fascia costiera meridionale attorno alla Sacca degli Scardovari, dove ΔN raggiunge −0,034 m.

Il TPS aderisce ai dati meglio del piano (scarto medio 2 mm contro 9 mm). Poiché N non può essere considerata costante nemmeno in aree piatte [5], il piano risulta eccessivamente semplificato. Il TPS prodotto può servire da riferimento locale per rilievi futuri e, integrato con i dati 2026, potrà condurre a un modello geoidico locale aggiornato per il Delta del Po veneto.

Riferimenti bibliografici

1. Fabris, M.: Coastline evolution of the Po River Delta (Italy) by archival multi-temporal digital photogrammetry. Geomatics, Natural Hazards and Risk 10(1), 1007–1027 (2019). https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1561528
2. Corbau, C., Simeoni, U., Zoccarato, C., Mantovani, G., Teatini, P.: Coupling land use evolution and subsidence in the Po Delta, Italy: revising the past occurrence and prospecting the future management challenges. Sci. Total Environ. 654, 1196–1208 (2019)
3. Fiaschi, S., Fabris, M., Floris, M., Achilli, V.: Estimation of land subsidence in deltaic areas through differential SAR interferometry: the Po River Delta case study (Northeast Italy). Int. J. Remote Sens. 39(23), 8724–8745 (2018). https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1490977
4. Fabris, M., Battaglia, M., Chen, X., Menin, A., Monego, M., Floris, M.: An integrated InSAR and GNSS approach to monitor land subsidence in the Po River Delta (Italy). Remote Sens. 14(21), 5578 (2022). https://doi.org/10.3390/rs14215578
5. Barzaghi, R., Baiocchi, V.: Italian geodetic reference systems: definition and cartographic use. Appl. Geomat. 18, 87 (2026). https://doi.org/10.1007/s12518-026-00739-6
6. Albertella, A., Barzaghi, R., Carrion, D., Maggi, A.: The joint use of gravity data and GPS/levelling undulations in geoid estimation procedures. Boll. Geod. Sci. Aff. 67(1), 49–59 (2008)
7. Barzaghi, R., Borghi, A., Carrion, D., Sona, G.: Refining the estimate of the Italian quasi-geoid. Boll. Geod. Sci. Aff. 66(3), 145–159 (2007)
8. Cenni, N., Fiaschi, S., Fabris, M.: Monitoring of land subsidence in the Po River Delta (Northern Italy) using geodetic networks. Remote Sens. 13(8), 1488 (2021). https://doi.org/10.3390/rs13081488
9. Fabris, M., Nazari, S.: Analysis of InSAR datasets from the EGMS and Veneto region using ground-based GNSS velocities for the monitoring of land subsidence in the Po river delta (Italy). Front. Earth Sci. 14, 1781404 (2026). https://doi.org/10.3389/feart.2026.1781404