

HeMOC: un Progetto per il Monitoraggio dei Beni Culturali nella Città di Como

Marco Scaioni¹, Rasoul Eskandari¹, Luigi Barazzetti¹, Manuel Garramone¹,
Mattia Previtali¹, Fabio Roncoroni², Stefano Barindelli³, Andrea Gatti³, Eugenio Realini³,
Fernando Sansò³, Davide Ravasi⁴, Michael Aghemio⁴, Luca Lucidera⁴, Sara Sciannamè⁴

¹ Politecnico di Milano – Dipartimento di Architettura, Ambiente Costruito e Ingegneria delle Costruzioni (DABC), {marco.scaioni, rasoul.eskandari, luigi.barazzetti, manuel.garramone, mattia.previtali}@polimi.it

² Politecnico di Milano – Polo Territoriale di Lecco, fabio.roncoroni@polimi.it

³ Geomatics Research & Development S.r.l. – {stefano.barindelli, eugenio.realini, fernando.sanso}@g-red.eu

⁴ DkR S.r.l. – {d.ravasi, m.agemio, l.lucidera, s.scianname}@dkr.srl

Abstract. Il progetto HeMOC (“HERitage MONitoring in Como”) è stato finanziato nell’ambito del PNRR (2024-2025) per consentire lo sviluppo e l’implementazione di una rete di sette stazioni permanenti GNSS finalizzate al monitoraggio di alcuni edifici storici nella città di Como, interessata dal fenomeno della subsidenza. Queste sono basate sui sensori GNSS GeoGuard[®] per la misura degli spostamenti dei punti monitorati rispetto ad un riferimento locale, sviluppati da GReD S.r.l. assieme al software di elaborazione BREVA[®], basato su cloud. I risultati delle misure saranno visualizzati su una piattaforma online dedicata, in avanzato stato di sviluppo da parte di DkR S.r.l. L’architettura del sistema è scalabile e consentirà in futuro l’estensione della rete con l’inclusione di nuove stazioni permanenti.

Key Words: GNSS, HeMOC, monitoraggio, NODES, rete di stazioni permanenti, patrimonio culturale, PNRR, subsidenza, visualizzazione.

1 Introduzione

La città di Como è stata intensamente interessata nella seconda metà del secolo scorso dal fenomeno della subsidenza imputabile all’azione combinata di una serie di cause. Tra queste si annoverano la complessa stratigrafia e la struttura geologica del territorio, la variazione della falda freatica dovuta all’influenza del lago di Como e al prelievo per usi civili e industriali, le modifiche antropiche [1]. Il fenomeno è andato rallentando negli ultimi decenni, mantenendosi in modo significativo nella zona della Convalle prossima al lago [2], come illustrato in Figura 1. La subsidenza ha effetti anche sulla conservazione e sulla sicurezza degli edifici storici situati nel centro cittadino, richiedendo l’integrazione del monitoraggio delle deformazioni in situ e su scala urbana. In passato sono state eseguite alcune misurazioni di una rete di livellazione che si estendeva sull’intera città e che consentiva di valutare l’entità del fenomeno nel lungo

periodo [2]. Le misurazioni di questa rete erano tuttavia piuttosto onerose in termini di tempo e costi, fatto che ne ha portato alla loro interruzione nel 2012. Alcuni edifici storici (la Cattedrale, il Teatro Sociale e la Basilica di San Giacomo) sono stati e/o sono monitorati mediante reti di livellazione locali, che tuttavia sono scollegate rispetto al contesto urbano.

Supportato dai finanziamenti europei del programma PNRR nell'ambito del Partenariato Esteso NODES ("Nord Ovest Digitale E Sostenibile") – Spoke 3 ("Industria del Turismo e della Cultura") [3], il progetto HEMOC ("HEritage MOonitoring in Como") ha come principale obiettivo quello di progettare sette nuove stazioni permanenti GNSS da implementare a partire dall'estate 2024, una volta completate le procedure autorizzative da parte degli enti coinvolti (Chiesa Cattedrale di Como, Comune di Como, Pontificio Collegio Gallio) e delle autorità competenti (Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio). Queste stazioni si basano su una tecnologia GNSS a basso costo sviluppata dalla società Geomatics Research & Development S.r.l. (GRd), che consente l'osservazione continuativa 3D per il monitoraggio di sette siti del patrimonio culturale comasco, come illustrato nella Sezione 2.

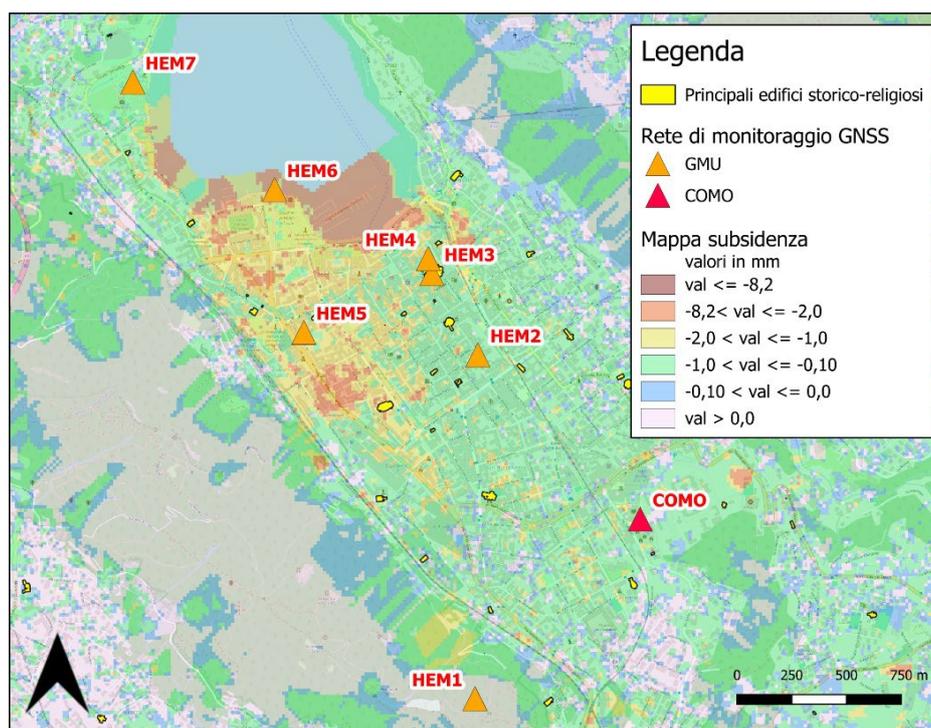


Fig. 1. Planimetria della Città di Como che riporta le posizioni delle stazioni permanenti GNSS della nuova rete HeMOC assieme a una mappatura delle deformazioni verticali (in mm) realizzata mediante l'applicazione di tecniche InSAR basate su dati Sentinel-1 nel periodo 2018-2023. La descrizione dei siti che ospitano le stazioni permanenti fa riferimento al paragrafo 2.3.

Le osservazioni GNSS saranno inoltre integrate con i dati di monitoraggio in situ e utilizzate per calibrare le mappe delle deformazioni del suolo ottenute dall'elaborazione mediante tecniche Advanced DInSAR dei dati COSMO-SkyMed ad alta risoluzione [4].

I risultati dei sensori di monitoraggio saranno implementati in una piattaforma digitale per l'archiviazione e la visualizzazione dei dati (Sezione 3). Questa piattaforma è in fase di sviluppo da parte della società DkR S.r.l. facente parte del partenariato di progetto assieme al Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito del Politecnico di Milano, che fornirà il supporto scientifico al progetto e si occuperà dell'integrazione delle misure di monitoraggio di tipo diverso.

La comunicazione proposta riporterà lo stato di avanzamento delle attività del progetto HeMOC è in corso di svolgimento con la prospettiva di concludersi entro il 2025 e l'auspicio di trovare poi ulteriori sviluppi futuri.

2 La rete HEMOC di stazioni permanenti GNSS

2.1 Studio preliminare del fenomeno della subsidenza a Como

Il monitoraggio del fenomeno della subsidenza nella città di Como ha richiesto un'analisi preliminare del fenomeno, basata sulla letteratura scientifica e su alcune relazioni tecniche. In [5] il lettore potrà trovare una descrizione del fenomeno più completa rispetto a quella qui riportata, il cui scopo è quello di evidenziarne soltanto le caratteristiche principali, con particolare riferimento alla situazione attuale.

La subsidenza nell'area della città di Como, osservata a partire nella seconda metà del Novecento, può essere imputata a diversi fattori combinati sia di natura antropica che naturale. In Figura 2 si riporta la carta geologica dell'area in cui si colloca la città [6]. L'area della "Convalle", nella quale si colloca il centro storico maggiormente urbanizzato, risulta composta da materiale da costruzione rielaborato dall'uomo e da limo altamente comprimibile. Questa stratigrafia risulta essere dal punto di vista litostratigrafico la principale responsabile naturale della subsidenza [7,8] assieme alle oscillazioni della quota piezometrica della falda acquifera e delle acque sotterranee, all'attività tettonica di retrospinta della Gonfolite nell'ambiente sedimentario. Le principali cause antropiche della subsidenza, che hanno modificato la tendenza naturale di abbassamento del suolo nel corso degli ultimi 70 anni, comprendono l'estrazione di acqua tramite pozzi artificiali dagli strati acquiferi profondi, lo stress causato dal sovraccarico dovuto allo sviluppo urbano, le costruzioni atte a prevenire le alluvioni nell'area storica della città (per esempio la diga foranea), l'intenso traffico veicolare, e la deviazione di alcuni torrenti e dei rispettivi delta che sono stati forzati all'interno di canali sotterranei [1,8-10].

Lo studio e il monitoraggio della subsidenza nella città di Como sono stati condotti a partire dal 1870 sino ad oggi. Sino al 2012, le principali tecniche utilizzate erano basate su misure di tipo geotecnico e topografico tradizionali (reti di livellazione geometrica). Per quanto riguarda la livellazione geometrica, sebbene esistessero misure condotte da vari enti per finalità geodetica a partire dagli anni 1877-78, la perdita di molti capisaldi

e il ridotto numero di punti condivisi tra le reti realizzate in tempi diversi ha impedito l'utilizzo dei dati di archivio precedenti al 1955 [2].

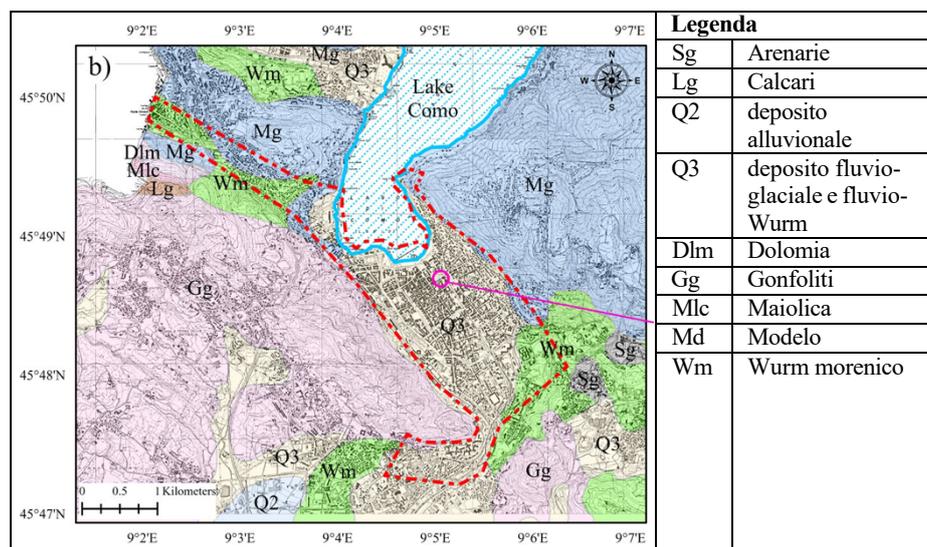


Fig. 2. Mappa geologica semplificata [6] della zona comprendente la città di Como sovrapposta alla Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10.000.

Nel 1975 l'IGMI svolse una nuova campagna di livellazione di alta precisione che comprese anche 19 capisaldi appartenenti alla rete del 1955, per un totale di 51 punti. A partire dal 1975 è stato possibile ripetere periodicamente la sua misurazione mediante livellazione geometrica di alta precisione negli anni: 1979, 1981, 1983, 1985, 1990, 1997 e 2004. La rete del 1997 fu misurata dal Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento (D.I.A.R.) del Politecnico di Milano. La geometria della nuova rete è stata analizzata preventivamente e ottimizzata mediante una simulazione a priori, che ha portato all'introduzione di alcuni capisaldi finalizzati a migliorare l'accuratezza delle misure di livellazione e di estendere la rete attorno alla città storica, con particolare attenzione al lungolago dove il fenomeno della subsidenza si era manifestato in maniera più evidente. La rete disponeva di alcuni collegamenti alle zone periferiche della città di Como, tra le quali la zona a sud-ovest di Camerlata, dove è stato localizzato il caposaldo di riferimento per le misure di livellazione successive, utilizzato poi anche per le analisi InSAR. La Figura 3 mostra la velocità di spostamento in direzione verticale (R_d) tra due coppie di campagne di livellazione consecutive, riportate come esempio (per una consultazione completa dei risultati si rimanda a [11]). Nel confronto tra le epoche 1955-1975 in Figura 3a, nonostante un numero limitato di capisaldi fosse disponibile per l'analisi, si può chiaramente osservare la presenza della subsidenza sino ad una velocità degli spostamenti $R_d = -21,2$ mm/anno. Questo risultato ha portato alla prima identificazione del fenomeno da parte dell'amministrazione comunale, che decise di istituire nel 1980 una apposita "Commissione di studio per i Fenomeni di Subsidenza nell'Area Urbana della Città di Como" con lo scopo di identificarne i fattori di innesco e di intraprendere le opportune misure di mitigazione

e prevenzione. Queste hanno compreso l'estensione della rete di livellazione per monitorare l'intera area urbana. Nelle epoche seguenti si può osservare come la velocità delle deformazioni verticali del suolo si è attestata su valori più contenuti, compresi tra $R_d = [-6,0 \div +13,3]$ mm/anno in prossimità del lungolago. L'abbassamento è stato più intenso sul lato occidentale della città rispetto a quello orientale. Nel periodo 1981-1983 si osserva invece un innalzamento importante nelle zone a sud e a est della città, mentre la subsidenza in prossimità del lago subisce per la prima volta un rallentamento rispetto all'inizio del fenomeno, attestandosi sui valori naturali di circa $R_d = -2$ mm/anno. Questo risultato dimostra l'efficacia delle limitazioni e dei divieti all'estrazione di acqua dal sottosuolo imposti dal Comune di Como. Questo rallentamento del fenomeno, che in alcuni punti ha portata addirittura a un lieve innalzamento del suolo, è stato osservato anche nel confronto tra le campagne di misura successive. In Figura 3b si riportano i risultati relativi all'ultimo periodo analizzato (1997-2004), che evidenziano una subsidenza più marcata ($R_d = -11,3$ mm/anno) vicino al Tempio Voltiano, situato in prossimità del lago. Nel corso dell'ultimo decennio sono state applicate anche metodologie di analisi basate su tecniche di telerilevamento satellitare a microonde [4,5,8,11,12].

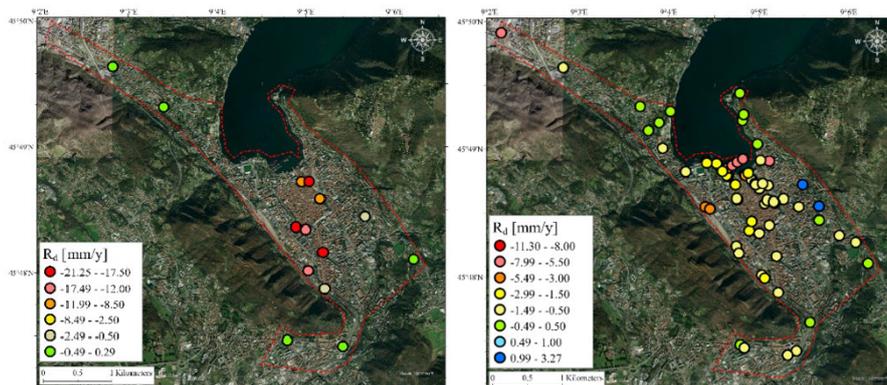


Fig. 3. Velocità di spostamento verticale (R_d) a livello urbano osservate sui capisaldi della rete di livellazione della città di Como nei seguenti periodi: a) 1955-1975 (a sinistra), b) 1997-2004 (a destra).

2.2 Localizzazione delle nuove stazioni permanenti GNSS della rete HeMOC

La scelta dei siti ove installare le nuove stazioni permanenti della rete HeMOC ha seguito i seguenti criteri:

- analisi delle deformazioni verticali storiche del suolo;
- mappa delle deformazioni verticali del suolo derivata dall'analisi di dati Sentinel-1 a media risoluzione nel periodo 2018-2023 (si veda la Fig. 1);
- presenza di edifici che sono stati oppure sono attualmente monitorati mediante altre tecniche di misurazione in situ (Cattedrale di Como e Basilica di San Giacomo);

- distribuzione sul territorio della Convalle;
- scelta di edifici storici con forte valenza culturale;
- disponibilità da parte degli enti gestori dei siti;
- presenza di un punto di riferimento locale esterno alla zona affetta da subsidenza (individuato presso il Castel Baradello).

Seguendo questi criteri si è arrivati all'individuazione dei seguenti sette siti (si riportano alcune immagini degli stessi in Fig. 4, mentre la posizione è indicata nella mappa in Fig. 1 tramite i codici identificativi delle stazioni indicati tra parentesi: (1) il Pontificio Collegio Gallio (HEM5), (2) il Monumento ai Caduti (HEM6), progettato dall'architetto Terragni (3) la Basilica di San Giacomo (HEM4), (4) la Cattedrale (HEM3), (5) il Palazzo degli Olginati (HEM2), che ospita alcuni musei comunali, (6) la Palazzina Nord nel complesso di Villa Olmo (HEM7), (7) il Castel Baradello (HEM1). Inoltre, la rete integrerà anche i dati provenienti dalla stazione permanente di Como della rete SPIN3 (stazione con codice "COMO" in Fig. 1) [13].

2.3 Il sistema di monitoraggio GNSS (GReD S.r.l.)

Il progetto HEMOC si avvale del servizio di monitoraggio GNSS GeoGuard® per il calcolo degli spostamenti dei punti monitorati rispetto ad un riferimento locale, sviluppato dall'azienda GReD S.r.l. [14,15]. Questo servizio comprende tutte le operazioni necessarie per utilizzare la tecnologia GNSS per scopi di monitoraggio strutturale e di fenomeni naturali. Tra queste si evidenziano la progettazione della rete e l'installazione dei sensori GNSS, la raccolta e il processamento dei dati, l'analisi di dettaglio dei risultati e la loro condivisione con l'utente finale. L'architettura della soluzione implementata nel progetto HEMOC è indicata in Figura 5 e si compone di due elementi principali:

- le unità di acquisizione GeoGuard® Monitoring Unit (GMU), dotate di uno/due ricevitori e antenne GNSS a singola o doppia frequenza di tipo consumer e un sistema di comunicazione bidirezionale;
- un sistema cloud-based che raccoglie e organizza i dati acquisiti, ne verifica l'integrità del flusso, esegue le elaborazioni in modo automatico, analizza i risultati e li mette a disposizione dell'utente finale.

Le GMU sono dei sensori innovativi GNSS IoT che, a differenza delle stazioni GNSS geodetiche tradizionali, sono basati su ricevitori ed antenne GNSS mass-market. In Figura 6 è riportata una descrizione schematica del *datalogger* della GMU.

Il progetto HEMOC prevede la materializzazione di una rete di monitoraggio GNSS composta da 6 GMU singola antenna, singola frequenza ed una 1 GMU singola antenna a doppia frequenza.

Oltre alle GMU, nella rete di monitoraggio GNSS sono integrati anche ricevitori di classe geodetica delle reti di stazioni permanenti presenti sul territorio nazionale. In particolare, è inclusa la stazione geodetica GNSS di COMO, appartenente alla rete SPIN3 [13], nonché alla rete europea EPN [16].



Pontificio Collegio Gallo



Monumento ai Caduti



Basilica di San Giacomo



Cattedrale



Palazzo degli Olginati (musei comunali)



Villa Olmo



Castel Baradello

Fig. 4. Immagini dei siti selezionati per ospitare le stazioni permanenti GNSS della rete HeMOC.

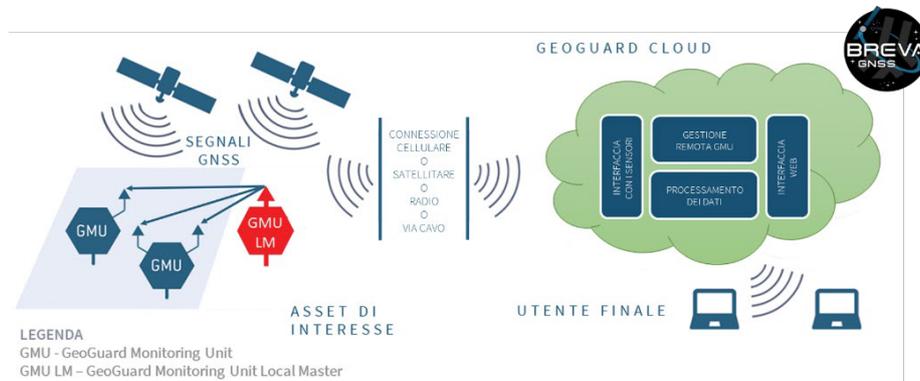


Fig. 5. Architettura standard della soluzione GeoGuard®. I dati grezzi GNSS raccolti dalla rete di GeoGuard® Monitoring Unit (GMU) vengono inviati al cloud dove Breva, il software proprietario di GReD, li raccoglie e li elabora fornendo gli spostamenti dei punti monitorati all'utente finale.

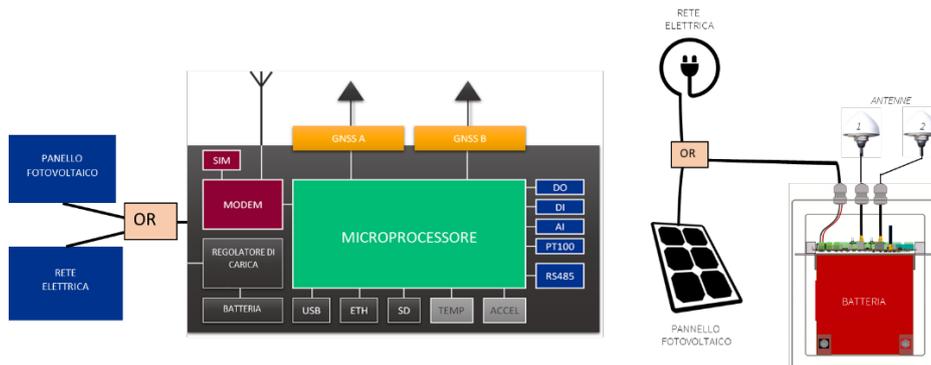


Fig. 6. Rappresentazione schematica del *datalogger* GNSS (a sinistra) della GMU (a destra).

Il sistema cloud ospita BREVA®, il software che si occupa della raccolta ed elaborazione dei dati GNSS raccolti dalla rete di monitoraggio. BREVA® è un software sviluppato da GReD S.r.l. specializzato nell'elaborazione di dati GNSS per il monitoraggio geodetico ed ambientale. E' basato sul codice open-source goGPS [17-19]. BREVA® utilizza un approccio di processamento a baseline, basato sul metodo batch ai minimi quadrati non differenziati e non combinati.

Il software processa i codici e le fasi L1 trasmessi dalle costellazioni GPS e Galileo, utilizzando orbite predette dal Center for Orbit Determination in Europe (CODE) [20]. BREVA® non prevede la stima diretta degli effetti ionosferici e troposferici, ma si avvale di modelli a priori, combinando i dati CODE e Vienna Mapping Function (VMF). Infine, BREVA® effettua la calibrazione delle variazioni del centro di fase L1, compensando interferenze e anisotropie legate all'antenna, ed offre la possibilità di ottenere soluzioni a batch orari e giornalieri, rendendo possibile una gestione flessibile dei risultati del monitoraggio.

Delle sette GMU che verranno installate durante il progetto HEMOC, quella presso il Pontificio Collegio Gallio (HEM5, a singola frequenza) è già operativa dal 22 maggio 2024. In Figura 7 si riportano, a titolo di esempio, gli spostamenti giornalieri del punto HEM5 calcolati rispetto alla stazione permanente di COMO, posta a circa 1.7 km di distanza.

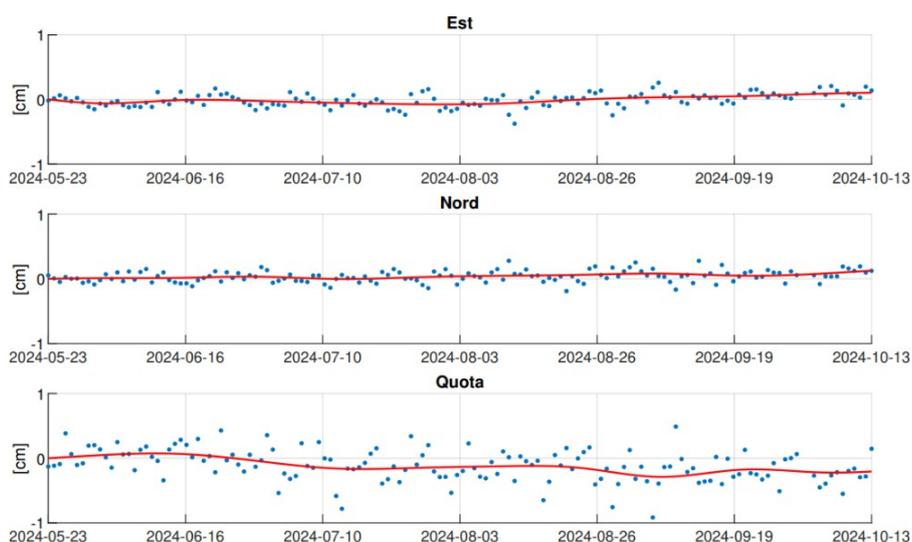


Fig. 7. Spostamenti giornalieri (punti blu) nelle 3 componenti Est, Nord e Quota del punto HEM5 rispetto a COMO. La linea rossa è un modello a spline di interpolazione dei risultati. La distanza tra i due punti è di circa 1,7 km.

3 La piattaforma di visualizzazione dati (DkR S.r.l.)

La piattaforma sviluppata da DkR S.r.l. per la visualizzazione dei dati misurati per il progetto HeMOC si basa su principi di design mirati a garantire un'interfaccia intuitiva ed efficiente. I principi adottati includono la semplicità dell'interfaccia, la visibilità degli elementi chiave, il feedback immediato, l'accessibilità delle informazioni e il rispetto dei modelli mentali degli utenti. L'obiettivo è offrire un'esperienza efficace per una vasta gamma di utenti, dagli esperti del settore ai non specialisti, creando un'interazione fluida e accessibile con modelli complessi.

3.1 Principi di design per la progettazione

La progettazione dell'interfaccia si basa sui principi di chiarezza, coerenza e usabilità, integrando un'approfondita progettazione UX volta a migliorare l'accessibilità e la soddisfazione dell'utente. È stato sviluppato un design-system unico e dedicato al progetto, che garantisce coerenza visiva e funzionale tra le diverse componenti dell'interfaccia, facilitando la manutenzione e l'implementazione di nuove funzionalità.

Particolare attenzione è stata data alla riduzione della complessità visiva, mantenendo tutte le informazioni chiave facilmente accessibili. Ogni elemento è progettato per guidare l'utente nel processo di esplorazione e analisi, privilegiando l'interazione diretta con i modelli 3D e la navigazione intuitiva della mappa della città di Como.

La progettazione dell'interfaccia per il controllo di scene 3D e la navigazione in realtà virtuale rappresenta una sfida significativa, data la necessità di garantire un'interazione fluida e intuitiva con contenuti complessi. Le principali difficoltà riguardano la gestione della visualizzazione spaziale e la necessità di fornire un feedback immediato per azioni complesse come la manipolazione di oggetti 3D e la navigazione in ambienti virtuali. L'interfaccia è stata progettata per semplificare queste operazioni, utilizzando controlli naturali e un design che minimizza la curva di apprendimento per l'utente. È stato inoltre fondamentale assicurare la compatibilità dell'interfaccia con diverse modalità di input, dalle tradizionali interazioni con mouse e tastiera fino a quelle basate su controller di realtà virtuale, garantendo una fruizione coerente su diverse piattaforme.

3.2 Scelta del framework

Per lo sviluppo delle interfacce 3D è stato scelto Babylon.js, un framework avanzato per la gestione dei contenuti tridimensionali. Babylon.js offre un controllo ottimale su materiali, texture e illuminazione, consentendo una resa visiva di alta qualità e fluidità. Inoltre, supporta esperienze immersive di realtà virtuale, che rappresentano uno dei punti chiave del progetto e consentono una fruizione interattiva e coinvolgente dei beni culturali in oggetto.

Per l'interfaccia web è stato adottato React, un framework che garantisce una gestione dinamica e reattiva dei dati, facilitando lo sviluppo di un'interfaccia user-friendly e altamente interattiva. React permette di creare componenti modulari e riutilizzabili, migliorando la manutenzione e la scalabilità dell'applicazione. L'integrazione con Babylon.js consente un'esperienza utente fluida tra i modelli 3D e l'interfaccia generale, assicurando una navigazione coerente e intuitiva.

3.3 Creazione dei modelli 3D

I modelli 3D degli edifici sono stati realizzati manualmente a partire da rilievi fotogrammetrici e fotografie ad alta risoluzione, con l'obiettivo di raggiungere il massimo livello di dettaglio possibile, tenendo conto dei limiti imposti dalla tecnologia di rendering web tramite browser e dai visori di realtà virtuale attualmente sul mercato. Questa tecnica ha permesso di ottenere rappresentazioni accurate e dettagliate degli edifici storici, utili per l'analisi del degrado e delle deformazioni. È stato inoltre sviluppato uno shader personalizzato, ispirato al design-system del progetto, che rappresenta gli edifici e i dintorni in uno stile retro-futuristico, conferendo un aspetto visivamente distintivo e facilmente riconoscibile. Gli edifici sono stati dotati di volumi semi-trasparenti (Fig. 8) che aiutano a visualizzare l'andamento storico delle rilevazioni all'interno dei volumi stessi, offrendo agli utenti una comprensione più immediata delle variazioni strutturali nel tempo.

3.4 Descrizione dell'interfaccia

L'interfaccia principale presenta una mappa interattiva della città di Como, che funge da hub centrale per l'accesso ai siti di monitoraggio. La mappa (Fig. 9) può essere ruotata e scalata liberamente, permettendo agli utenti di visualizzare la città da diverse prospettive e di ottenere una comprensione più approfondita della sua geografia e delle dinamiche strutturali. Gli edifici monitorati nel progetto sono evidenziati con una colorazione specifica, diversa dagli altri edifici della città, rappresentati in forma stilizzata per ridurre la complessità visiva e facilitare l'orientamento.

Attraverso la mappa della città di Como, gli utenti possono selezionare singoli edifici di interesse e visualizzare i dati di monitoraggio associati, inclusi i modelli 3D, le deformazioni storiche e i risultati delle rilevazioni satellitari. Questo approccio centralizzato garantisce un accesso rapido, intuitivo e visivamente coerente alle informazioni, migliorando l'efficacia della piattaforma nel supportare decisioni sulla base dei dati. Inoltre, la visualizzazione 3D dei singoli edifici integra un sistema di navigazione fluida e controlli interattivi che facilitano l'esplorazione dei vari siti, consentendo agli utenti di analizzare i dati con maggiore facilità e comprensione.

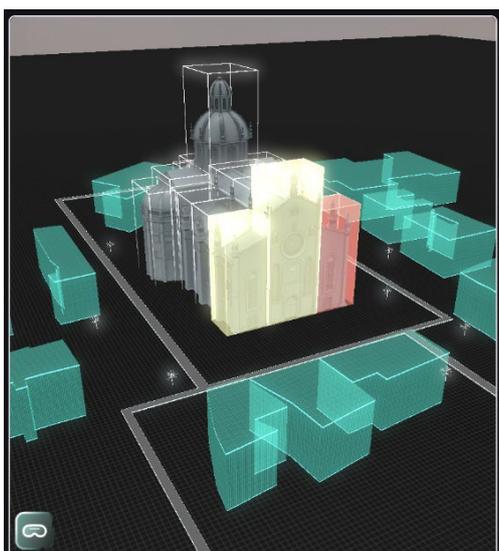


Fig. 8. Schermata di visualizzazione in 3D del Duomo di Como, con i volumi che evidenziano gli spostamenti verticali nel tempo.



Fig. 9. Mappa della Città di Como che funge da menu principale dell'applicazione.

4 Conclusioni e sviluppi del progetto HeMOC

Il progetto HEMOC (“HERitage MONitoring in Como”), supportato dai finanziamenti europei del programma PNRR nell’ambito del Partenariato Esteso NODES (“Nord Ovest Digitale E Sostenibile”), ha come principale obiettivo quello di progettare sette nuove stazioni permanenti GNSS da implementare presso alcuni edifici storici nella città di Como. Queste stazioni si basano su una tecnologia GNSS a basso costo sviluppata da GReD S.r.l., che consente l’osservazione continuativa 3D. Al momento attuale (ottobre 2024), una stazione installata presso il Pontificio Collegio Gallio (denominata HEM5) è già funzionante, mentre le altre sono in fase di installazione e dovrebbero essere operative nei prossimi mesi. Nel contempo, la piattaforma dedicata per la visualizzazione dei dati è in fase avanzata di sviluppo da parte di DkR S.r.l.. Tale piattaforma consentirà a diverse tipologie di utenti di accedere ai dati con profilazioni diverse, favorendone una consultazione intuitiva e tridimensionale.

Una volta completata, la rete di stazioni permanenti HeMOC consentirà di disporre di dati utili per la calibrazione e l’integrazione di osservazioni satellitari provenienti dall’elaborazione di immagini SAR ad alta risoluzione COSMO-SkyMed.

Oltre all’importanza del progetto HeMOC per la città di Como, la soluzione proposta rappresenterebbe un prototipo potenzialmente estendibile ad altri centri storici.

Ringraziamenti

Il progetto HeMOC (“HERitage MOnitoring in Como”) è finanziato dal PNRR nell’ambito del Partenariato Esteso NODES (“Nord Ovest Digitale E Sostenibile”) – Spoke 3 (“Industria del Turismo e della Cultura”) con contratto ECS00000036. Si ringraziano gli enti gestori degli edifici storici interessati dal progetto (Chiesa Cattedrale di Como, Comune di Como, Pontificio Collegio Gallio) e la Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio di Como per la collaborazione e l’interesse nel progetto. Un particolare ringraziamento è indirizzato all’Arch. Elisabetta Gandola (Chiesa Cattedrale di Como) e al Prof. Sefano della Torre (Politecnico di Milano – DABC) e a tutti coloro che direttamente o indirettamente sono stati coinvolti nel progetto.

Riferimenti bibliografici

1. Bajni, G.; Apuani, T.; Beretta, G.P. Hydro-geotechnical modelling of subsidence in the Como urban area. *Eng. Geol.* 2019, 257, articolo N. 105144.
2. Colombo, A.; Giussani, A.; Scaioni, M.; Vassena, G. High Precision Levelling Network of Como Area for Subsidence Analysis. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* 1998, 32–6W4, 105–110.
3. NODES – Spoke 3. Disponibile online: <https://www.ecs-nodes.eu/3-industria-del-turismo-e-cultura> (ultimo accesso 18/10/2024).
4. Crosetto, M.; Monserrat, O.; Cuevas-González, M.; Devanthery, N.; Crippa, B. Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2015, 115, 78–89.
5. Eskandari, R.; Scaioni, M. Retrospective Study of Vertical Ground Deformation in Como, Northern Italy: Integration of Levelling and PSI Measurements. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2023, 48–4/W2, 31–38.
6. Regione Lombardia (2018). Carta Geologica 250.000. Disponibile online: <https://www.geoportale.regione.lombardia.it> (ultimo accesso 18/10/2024).
7. Ferrario, M.F.; Bonadeo, L.; Brunamonte, F.; Livio, F.; Martinelli, E.; Michetti, A.M.; Censi Neri, P.; Chiessi, V.; Comerci, V.; Höbig, N. Late Quaternary environmental evolution of the Como urban area (Northern Italy): A multidisciplinary tool for risk management and urban planning. *Eng. Geol.* 2015, 193, 384–401.
8. Nappo, N.; Ferrario, M.F.; Livio, F.; Michetti, A.M. Regression Analysis of Subsidence in the Como Basin (Northern Italy): New Insights on Natural and Anthropogenic Drivers from InSAR Data. *Remote Sensing* 2020, 12(18), articolo N. 2931, <https://doi.org/10.3390/rs12182931>.
9. Comerci, V.; Capelletti, S.; Michetti, A.M.; Rossi, S.; Serva, L.; Vittori, E. Land subsidence and Late Glacial environmental evolution of the Como urban area (Northern Italy). *Quaternary Int.* 2007, 173–174, 67–86.
10. Comune di Como. Relazione di sintesi della Commissione per lo Studio dei fenomeni di Subsidenza. Documenti e Ricerche 1980, 34.
11. Eskandari, R. Retrospective Study of Subsidence in Como town: Integration of Levelling Measurements, DInSAR, and Geospatial Techniques. Tesi di laurea magistrale in Civil Engineering for Risk Mitigation presso il Politecnico di Milano, Campus di Lecco, 2022.

12. Nodes - D1.1 – Requisiti utente, concettualizzazione e progettazione del sistema. Relazione tecnica nell'ambito del progetto HeMOC, 2024.
13. Regione Lombardia, Regione Piemonte, Région Autonome Vallée d'Aoste/Regione Autonoma Valle d'Aosta. SPIN3 GNSS – Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Lombardia – Piemonte – Valle d'Aosta: stazione permanente di Como. Disponibile online: <https://www.spingnss.it/stazione/?id=COMO> (ultimo accesso 18/10/2024).
14. Tagliaferro, G.; Caldera, S.; Realini, E.; Molinari, D.; Pasqui, L. GeoGuard: Low-cost GNSS technologies for the continuous monitoring of structures and land movements. In: Proc. EGU General Assembly Conference, 14-19 aprile 2024, Vienna (Austria), abstract N. 13898.
15. Caldera, S.; Barindelli, S.; Sansò, F.; Pardi, L. Monitoring of structures and infrastructures by low-cost GNSS receivers. *App. Sci.* 2022, 12(23), articolo N. 12468.
16. Rete di stazioni permanenti EPN. Disponibile online: https://www.epncb.oma.be/_networkdata/siteinfo4onestation.php?station=COMO00ITA, (ultimo accesso 14/10/2024).
17. Realini, E.; Reguzzoni, M. goGPS: open source software for enhancing the accuracy of low-cost receivers by single-frequency relative kinematic positioning. *Measurement. Sci. Tech.* 2013, 24(11), articolo N. 115010.
18. Herrera, A.M.; Suhandri, H.F.; Realini, E.; Reguzzoni, M.; de Lacy, M.C. goGPS: open-source MATLAB software. *GPS solutions* 2016, 20, 595–603.
19. Wiki del software. goGPS. Disponibile online: <https://gogps-project.github.io/> (ultimo accesso 14/10/2024).
20. Center for Orbit Determination in Europe. Disponibile online: https://www.aiub.unibe.ch/research/code__analysis_center/index_eng.html (ultimo accesso 14/10/2024).