

MONITORAGGIO DI OPERE STRATEGICHE MEDIANTE TECNICHE SATELLITARI: IL CASO STUDIO DELLA DIGA “CASTELLO SUL FIUME MAGAZZOLO”

MONITORING OF STRATEGIC STRUCTURES USING SATELLITE TECHNIQUES: THE CASE STUDY OF “CASTELLO DAM ON MAGAZZOLO RESERVOIR”

Claudia Pipitone

Scuola Politecnica, Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM), viale delle Scienze, edificio 8, 90100 Palermo, claudia.pipitone02@unipa.it

PAROLE CHIAVE: diga di terra, deformazioni, livello di invaso, GNSS, SAR, immagini Landsat, ASTER.

KEY WORDS: embankment dam, deformations, water level, GNSS, SAR, Landsat images, ASTER.

RIASSUNTO

Il Global Navigation Satellite System (GNSS) e il telerilevamento sono stati utilizzati per determinare la relazione tra le deformazioni di una diga di terra e le variazioni di superficie e livello di invaso, durante il periodo di un anno. L'utilizzo di un ricevitore posto sul coronamento della diga e di una stazione permanente attivi durante l'arco della giornata ha permesso la determinazione della serie temporale degli spostamenti dell'opera nel periodo analizzato, riferiti ad un sistema di riferimento locale della diga. La componente ortogonale al coronamento è stata successivamente posta in relazione con le forze di natura idraulica che agiscono sull'opera. Per la determinazione dei livelli di invaso sono state impiegate due differenti metodologie nell'ambito del telerilevamento, sfruttando immagini satellitari (ottiche e radar) con differenti caratteristiche. Le metodologie utilizzate per l'identificazione dei livelli di invaso del bacino si basano: la prima su un processo di classificazione non controllata, al fine di utilizzare un processo quanto più possibile automatizzato, l'altra invece, sfrutta la sovrapposizione del bacino su isoipse esistenti per l'identificazione manuale dei limiti del bacino. I risultati ottenuti dalle due tecniche sono stati messi a confronto con misure *in situ* al fine di valutarne l'attendibilità, valutando inoltre la relazione con gli spostamenti ortogonali al coronamento, ottenuti durante il periodo di monitoraggio del bacino. Dal confronto è emerso che la relazione tra gli spostamenti e il livello di invaso è di tipo non lineare.

ABSTRACT

Global Navigation Satellite System (GNSS) and remote sensing have been used to determine the relation between deformations of an embankment dam and water surface and level, during one year. The use of a reference station positioned on the dam crest and a permanent station recording data continuously (24h), allowed the displacements monitoring during the whole period, referred to the dam local coordinate system. Thus, the dam orthogonal deformation component and hydraulic forces have been compared. Remote sensing allowed monitoring the water level using several images (optical and *Synthetic Aperture Radar*, SAR) characterized by different geometric and spectral resolutions, using two different techniques. The first is based on unsupervised classification to automatize the process, the other one is based on visual interpretation with overlapping contour lines on the water reservoir boundary. Their assessments have been evaluated by comparing remote sensing water level estimations with measurements *in situ*. Displacements orthogonal to the dam, referred to the reservoir monitoring period have been also compared with *in situ* water level measurements and evaluated results from remote sensing methods. The relationship between displacements and water levels has been proved to be non-linear.

1. INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE

Il monitoraggio in tempo reale di strutture strategiche, in particolare delle dighe, rappresenta un potente strumento orientato al controllo e alla salvaguardia di opere che rivestono un'importanza dal punto di vista sociale, economico e ambientale. La possibilità di determinare il comportamento dell'opera nel tempo, infatti, permette di valutare eventuali situazioni di malfunzionamento della struttura che ne possano compromettere la funzionalità nel corso della vita utile della stessa, correggendo possibili anomalie. Diverse sono le tecniche e le strumentazioni che permettono di effettuare le attività di monitoraggio, che coinvolgono diversi aspetti strutturali, geotecnici e idraulici. Le tecniche GNSS, utilizzate nel presente lavoro, permettono, ad esempio, la determinazione delle componenti tridimensionali di spostamento in maniera continua nel tempo, ottenute dall'elaborazione, in post-processamento, dei dati registrati dalle stazioni di controllo in tempo reale. Nonostante in Italia, per il controllo di opere complesse, siano

previste campagne di misure periodiche, utilizzando strumentazione geodetica tradizionale (stazioni totali, livelli), le potenzialità delle tecniche satellitari emergono da differenti studi presenti in letteratura. Ad esempio, l'utilizzo di *Continuously Operating Reference Station* (stazioni CORS), utilizzando una stazione di riferimento su una torre posta nelle vicinanze dell'opera, non affetta dalle deformazioni che influenzano il comportamento della stessa, è stato impiegato per valutare le deformazioni della diga Sermo nelle Isole Java, in Indonesia, a seguito del verificarsi di un terremoto. La strumentazione impiegata prevedeva l'utilizzo di multi-sensori fissi, tra cui una stazione totale automatizzata 3D, prismi e sensori che registrano in maniera automatica il livello idrico (Tarsisius Aris *et al.*, 2012). Recentemente, uno studio condotto presso la Taiho Subdam (Giappone) ha messo in evidenza una forte correlazione tra gli spostamenti ottenuti dalle tecniche GNSS e InSAR, espressa dall'elevato valore del coefficiente di correlazione per entrambe le orbite di ripresa (Shimizu, 2015). Come noto, tuttavia, il comportamento strutturale di una diga, risulta influenzato dai

carichi idrici che agiscono sull'opera. Per questo motivo, dunque, esistono in letteratura numerosi studi sperimentali mirati alla determinazione delle relazioni tra le deformazioni subite dalle strutture e sollecitazioni di natura idraulica. Utilizzando un sistema geodetico convenzionale per il monitoraggio della diga Yamula (Turchia), ad esempio, sono stati indagati gli spostamenti, nelle due componenti, di alcuni punti distribuiti lungo la struttura, durante il primo riempimento del bacino artificiale. A partire dalle misure note di spostamento e dei livelli di invaso, è stato impiegato un modello dinamico che ha rivelato i massimi spostamenti in corrispondenza della parte centrale della diga e un'apparente relazione lineare tra le variazioni del livello di invaso e le deformazioni dell'opera (Bayrak, 2008). Mediante l'ausilio di alcuni punti di controllo *Global Positioning System* (GPS) posti in corrispondenza della diga ad arco Ataturk (Turchia), sono state monitorate le componenti di deformazione della struttura, individuando gli spostamenti maggiori (planimetrici e in direzione radiale) a monte del coronamento della diga. Nonostante l'elevata precisione con cui sono state effettuate le misure, non emerge una perfetta correlazione tra gli spostamenti in direzione radiale e il livello di invaso del bacino (Kalkan, 2014).

Le misure relative ai livelli di invaso vengono in genere ricavate da apposita strumentazione installata in corrispondenza dell'opera. In questo lavoro, verranno, invece, analizzate stime indirette dei livelli di invaso, utilizzando il telerilevamento, il quale risulta particolarmente utile laddove non siano disponibili eventuali misure *in situ*. In genere, per le stime indirette, a partire dalla determinazione delle estensioni dei bacini artificiali, occorre conoscere le relazioni volume-superficie-quota di invaso, specifiche per l'area di studio. Tali informazioni non sempre disponibili, possono essere ricavate mediante l'utilizzo di immagini satellitari (Sima *et al.*, 2013).

In uno studio precedente, sono stati valutati gli spostamenti e i livelli di invaso della diga Castello sul fiume Magazzolo (Agrigento), ottenuti rispettivamente da ricevitori GNSS e dall'utilizzo di sole immagini ricavate da sensori ottici (Landsat, LS) relative ad un periodo di monitoraggio di circa tre mesi (Dardanelli *et al.*, 2014). I risultati ottenuti hanno messo in evidenza una correlazione tra le variabili, espressa tramite il coefficiente di determinazione, che è risultato maggiore del valore 0.5 per le diverse sezioni analizzate. Ulteriori indagini sono successivamente proseguite, analizzando modelli di natura idraulica e geotecnica esistenti, al fine di interpretare l'andamento della serie temporale di spostamenti (Dardanelli e Pipitone, 2017). In questo lavoro, il monitoraggio degli spostamenti è riferito ad un periodo di circa due anni, all'interno del quale è stato individuato un dataset di immagini satellitari consistente, che comprende immagini acquisite con modalità differente e con diverse caratteristiche di risoluzione. Inoltre, è stato preso in considerazione l'utilizzo di nuove immagini che non fossero limitate al solo periodo considerato per gli spostamenti, in modo da incrementare il dataset disponibile, utile per l'interpretazione dei risultati ottenuti dal telerilevamento. Il confronto tra i valori delle superfici e i livelli di invaso, ottenuti grazie all'uso di differenti metodologie, con misure *in situ*, ha permesso di valutare i limiti e le potenzialità che caratterizzano le metodologie adottate. Con riferimento agli spostamenti, invece, l'utilizzo di una stazione permanente, posta a distanza di chilometri dal sito monitorato ha permesso di escludere che la stazione potesse essere affetta dalle deformazioni dell'opera, riducendo inoltre i costi per ulteriori materializzazioni.

2. METODOLOGIA

2.1 Telerilevamento

Per lo studio, sono state utilizzate immagini satellitari provenienti da sensori ottici e radar (Landsat, ASTER e TerraSAR-X, CosmoSkyMed). Le metodologie adottate per la valutazione della superficie del bacino sono due: la prima basata sulla sovrapposizione dei limiti del bacino con le curve di livello esistenti; la seconda, invece, utilizza la tecnica di classificazione per valutare la superficie del bacino, dalla quale viene determinato il livello di invaso, attraverso la relazione sito-specifica (superficie-volume) nota.

2.2 Interpretazione visiva

Utilizzando la prima tecnica è risultato utile identificare la migliore combinazione di bande e le tecniche utili per incrementare la risoluzione spaziale delle immagini, che permettono di distinguere in maniera efficiente i limiti del bacino. Per incrementare la risoluzione spaziale di alcune immagini provenienti da sensori ottici (*Landsat7, LS7 e Landsat8, LS8*), è stata utilizzata la tecnica del *resolution merge*, combinando le bande multi spettrali con risoluzione geometrica (R) di 30 m e la banda pancromatica con R = 15 m. In questo modo utilizzando la tecnica del *principal component* si è preservato il contenuto radiometrico, aumentando i dettagli spaziali di alcune aree caratteristiche (ad esempio i limiti del bacino). Con riferimento alle immagini radar non è stata adottata alcuna procedura preliminare, essendo queste caratterizzate da una elevata risoluzione spaziale e da un'unica banda disponibile. I valori del livello di invaso sono stati determinati per ciascuna delle due sponde della diga, caratterizzate da differente pendenza e composizione. Il valore del livello idrico per la data di acquisizione dell'immagine, è stato quindi calcolato attraverso una media pesata, in cui i pesi sono stati attribuiti proporzionalmente alle pendenze delle due sponde.

2.3 Classificazione

Con riferimento alla tecnica di classificazione non controllata, è stato adottato l'algoritmo k-means, il quale utilizzando un processo iterativo permette di raggruppare i pixels associandoli alla rispettiva classe. Solo per le immagini LS7 ETM+ SLC-Off che presentano il problema delle scansioni mancanti è stata preliminarmente effettuata una procedura di riempimento delle stesse (*filling*), necessaria al fine di classificare correttamente la superficie del bacino. A seguito della classificazione, sono state adottate due ulteriori tecniche: la segmentazione delle classi e il *clumping*. La prima, utilizzata per tutte le tipologie di immagini, identifica le regioni effettivamente connesse tra loro, associandole all'interno della stessa classe. Solo per le immagini radar è, invece, stata adottata la tecnica del *clumping*, che permette di riempire i pixels mancanti all'interno delle aree già classificate utilizzando un *kernel* di dimensione nota.

I risultati ottenuti dalle due metodologie sono stati confrontati con le misure *in situ*, utilizzando degli indicatori statistici per valutare le potenzialità e le criticità di entrambi i metodi.

2.4 GNSS

L'analisi delle componenti di spostamento della diga è stata effettuata analizzando i dati di un ricevitore, posto sul coronamento dell'opera, in corrispondenza della sezione centrale. I dati registrati dal ricevitore durante l'arco della giornata sono stati elaborati utilizzando una singola baseline tra il ricevitore posto sul coronamento e la stazione permanente

considerata come riferimento, che ha permesso di determinare le coordinate variabili nel tempo del ricevitore. Queste ultime sono state calcolate con elevata precisione mediante l'applicazione di modelli per la correzione dell'errore troposferico e ionosferico. Per il primo è stata utilizzata la modellazione di Saastamoinen (1972) e la "mapping function" di Niell (1996), mentre, per la modellazione dell'errore ionosferico, è stato adottato il modello di Klobuchar (1996) con i parametri forniti dal *Centre for Orbit Determination in Europe* (CODE). È stata inoltre considerata l'influenza delle maree oceaniche sulla determinazione delle coordinate utilizzando il modello di Schwiderski (1980), mentre il fissaggio delle ambiguità è avvenuto mediante l'utilizzo del metodo *Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment* (LAMBDA) associato ad un *ratio* test, che rappresenta una delle metodologie maggiormente utilizzate in letteratura.

Le coordinate del ricevitore posto sul coronamento sono state calcolate in un sistema di riferimento globale e, successivamente, convertite in un sistema locale della diga. I risultati ottenuti, sono stati inoltre analizzati dal punto di vista statistico, al fine di eliminare eventuali *outliers*, applicando sulla serie temporale una media mobile, analizzando differenti intervalli temporali, per valutarne la tendenza e il comportamento a lungo termine. Al termine dell'analisi delle due variabili, spostamento e livello di invaso, è stato possibile eseguire il confronto tra le stesse, durante il periodo di un anno, cui corrisponde lo svuotamento e conseguente riempimento dell'invaso.

3. AREA DI STUDIO

L'area di studio è la diga Castello sul fiume Magazzolo, rappresentata mediante un'immagine multi-temporale in Figura 1, situata tra Alessandria della Rocca e Bivona, in provincia di Agrigento. Essa rappresenta una delle principali riserve idriche nella parte occidentale della Sicilia ed è costituita da materiali sciolti a grana grossa (alluvioni di fondo valle e formazioni calcaree) e manto di tenuta in conglomerato bituminoso.

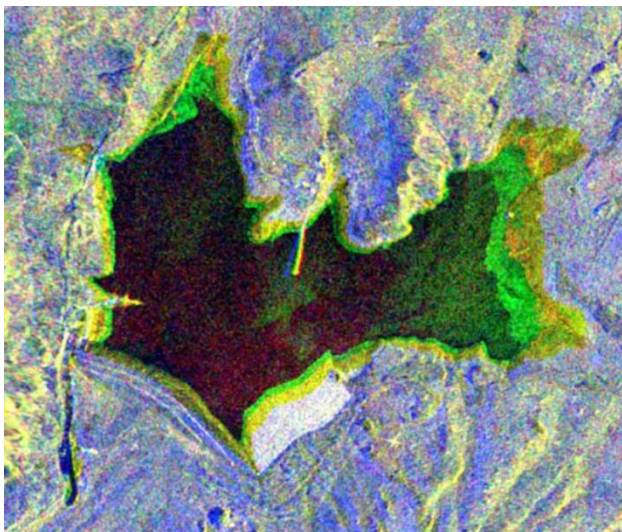


Figura 1 Composizione RGB di immagini Cosmo-SkyMed relative all'area di studio. I colori all'interno dell'area rappresentano le variazioni di superficie del bacino. In verde è rappresentata la superficie relativa alla scena acquisita il 08/09/2011, in giallo il 08/02/2012. La superficie interna è relativa alla data di acquisizione del 10/09/2012.

La diga risulta costituita da due tratti rettilinei laterali, di lunghezza pari a 165.00 m (a destra) e 317.00 m (a sinistra), raccordati da un arco di cerchio dello sviluppo di circa 310 m,

avente concavità rivolta verso valle. Le sponde laterali sono costituite da argille rimaneggiate con frequenti inclusioni di gesso e di calcare, di spessore variabile. Con riferimento alla sponda sinistra, l'instabilità superficiale riscontrata ha reso necessario un intervento di placcaggio, che risulta evidente nella figura 1.

4. ACQUISIZIONE DEI DATI

4.1 Telerilevamento

Il dataset acquisito da sensori ottici durante il periodo Gennaio 2011 – Luglio 2013 risulta costituito complessivamente da 50 immagini (LS5, LS7, LS8, ASTER) caratterizzate da bande con differenti caratteristiche di risoluzione spettrale e spaziale (quest'ultimo variabile da 15 m per le ASTER a 60 m per le LS5). I dati radar a disposizione risultano, invece, costituiti da 6 immagini Cosmo-SkyMed (CSK) con risoluzione geometrica di 2.50 m e 2 TerraSAR-X (TSX) con risoluzione di 1.25 m (Stripmap) e 8.25 (Scansar). Le bande utilizzate nel processo di interpretazione visiva per le immagini LS sono *Short-wave Infrared* (SWIR) e *Near Infrared* (NIR), per le immagini ASTER sono state adottate le bande disponibili (*Visible* e *Near Infrared*, VNIR), mentre per le immagini SAR è stata utilizzata l'unica banda disponibile per l'identificazione dei limiti del bacino. Le stesse bande sono, in genere, state utilizzate durante il processo di classificazione. La scala della carta dalla quale sono state estrapolate le curve di livello è 1:2000, mentre per la determinazione delle quote di invaso a partire dalla conoscenza delle superfici del bacino è stata utilizzata l'equazione sito-specifica nota per la diga Castello.

4.2 GNSS

La serie temporale degli spostamenti è stata determinata utilizzando come stazione di riferimento la stazione permanente di Agrigento (AGRI) distante circa 30 km dal sito, appartenente alla rete UNIPA CORS, i cui dati in formato RINEX sono disponibili al seguente link: <http://www.netgeo.it/>. L'utilizzo di una stazione permanente relativamente lontana permette, infatti, di potere escludere l'influenza di eventuali deformazioni che influiscono sul comportamento della diga. I dati di spostamento elaborati sono relativi ad un ricevitore GNSS posto sul coronamento dell'opera, in corrispondenza della sezione centrale, entrato in funzione per le attività di monitoraggio dal mese di Aprile 2011 al mese di Maggio 2013. Tale ricevitore ha registrato i dati durante l'arco della giornata, con intervallo di campionamento pari a 30 secondi. Per garantire una maggiore precisione delle coordinate stimate, sono stati utilizzati i dati relativi alla correzione della posizione del centro di fase dell'antenna, effemeridi precise dei satelliti GPS e i parametri relativi alle maree oceaniche.

5. RISULTATI

5.1 Telerilevamento

5.1.1 Interpretazione visiva

Utilizzando la tecnica di interpretazione visiva è stata identificata la corrispondente quota di invaso, associata alla data di acquisizione di ciascuna immagine, utilizzando la sovrapposizione con le isoipse esistenti, estratte da una carta in scala 1:2000. Il valore risultante della quota di invaso è stato, successivamente, ottenuto, dalla media pesata dei valori identificati in corrispondenza della sponda sinistra e destra della diga, in cui i rispettivi pesi associati risultano proporzionali alle pendenze delle due sponde. Al termine del processo di

identificazione dei livelli di invaso, i risultati ottenuti sono stati messi a confronto con le misure dei livelli di invaso *in situ* disponibili. Da questa analisi è emerso che l'accuratezza per la determinazione dei livelli di invaso è fortemente condizionata dalla precisione con cui viene realizzato il processo di georeferenziazione delle immagini satellitari e dalla risoluzione geometrica delle stesse. I valori delle variabili ottenute utilizzando le immagini radar con la rispettiva risoluzione originale, mostrano una forte correlazione con i dati ottenuti dalle misure *in situ*. Analoghi risultati sono stati ottenuti utilizzando le immagini acquisite da sensori ottici, soprattutto per quelle aventi risoluzione geometrica pari a 15 m (ASTER e LS8, LS7 a seguito del processo di resolution merge). Per quanto riguarda le immagini LS5, queste risultano caratterizzate da una bassa risoluzione geometrica e alcune di esse presentano scansioni mancanti, in quanto l'area di studio si trova ai bordi della scena; per questo motivo, infatti, i risultati non sono complessivamente positivi.

5.1.2 Classificazione

Con riferimento alla seconda tecnica adottata per la valutazione dei livelli di invaso del bacino, su tutte le immagini è stata applicata una preliminare procedura di calibrazione radiometrica, ed è stata, quindi, individuata la superficie del bacino in esame utilizzando il processo di classificazione non controllata. Tale metodologia, a differenza di quella descritta al paragrafo precedente, non è soggettiva e, dunque, risulta facilmente automatizzabile. L'algoritmo utilizzato per la classificazione prevede di individuare un numero di classi e una soglia di convergenza. Nel caso in esame, i valori corrispondenti scelti sono rispettivamente 3 classi e una soglia del 99%. Per le immagini LS7 e LS8 è stata adottata la risoluzione originale delle bande multispettrali ($R = 30$ m) e non quella derivante dal resolution merge a causa della non corretta identificazione della superficie del bacino. Con riferimento alle immagini LS7 ETM+ SLC-Off, è stato scelto di escludere dall'analisi tutte le scene in cui la dimensione delle strisce mancanti risultasse elevata rispetto alla dimensione prevalente del bacino. La procedura di filling e conseguente processo di classificazione, infatti, in questo caso, non hanno permesso la corretta identificazione dell'estensione del bacino. Sono state, inoltre, escluse le immagini nelle quali la copertura nuvolosa risultava elevata o le scansioni mancanti erano posizionate in corrispondenza della struttura e, quindi, tali da non potere essere utilizzate per ottenere una corretta immagine classificata rappresentativa del bacino. Per quanto riguarda le immagini radar, essendo queste caratterizzate da risoluzioni differenti, preliminarmente, è stata effettuata un'analisi al fine di valutare la migliore risoluzione ottimale da utilizzare nel processo di classificazione. Dal confronto con le misure *in situ*, è stato scelto di utilizzare una risoluzione pari a 5.00 m, sia per le immagini CSK che TSX Stripmap, per la classificazione delle immagini. Per quanto riguarda l'immagine TSX Scansar, è stata adottata la risoluzione originale, pari a 8.25 m, in modo da potere mettere in relazione i risultati derivanti dall'elaborazione di questa immagine con quelli derivanti dalle altre immagini radar. Le immagini derivanti dal processo di classificazione sono state successivamente rielaborate, utilizzando due tecniche di post-classificazione, che prevedono la segmentazione delle immagini, effettuata sull'intero dataset (immagini ottiche e radar) e il clumping relativo alle sole immagini radar. La prima tecnica permette di potere escludere dall'immagine classificata tutti i pixels che seppure identificati con la stessa classe del bacino, non appartengono ad esso. Per potere fare ciò sono stati utilizzati 4 pixels adiacenti per la ricostruzione del "segmento" corrispondente alla classe associata al bacino, ottenendo una riduzione del numero di pixels che, erroneamente, dal processo di classificazione venivano identificati appartenenti alla classe

rappresentativa del bacino. La seconda tecnica, applicata alle sole immagini radar, utilizzando un *kernel* di dimensione 3x3, ha permesso di riempire i pixels mancanti all'interno dell'area classificata, che sono stati generati dal processo di classificazione delle immagini con elevata risoluzione geometrica.

5.1.3 Confronto tra le due metodologie

L'attendibilità dei metodi utilizzati è stata valutata attraverso alcuni indicatori statistici tra cui il *Root Mean Square Error* (RMSE), che fornisce indicazioni circa gli errori ottenuti rispetto al modello di regressione calcolato per le variabili in esame. Per il processo di interpretazione visiva (I.V.) sono state escluse dall'analisi solo sei immagini rispetto al dataset comprensivo di 58 immagini. Tale metodologia dunque, seppure risulti soggettiva, permette di utilizzare diverse tipologie di immagini, comprese quelle caratterizzate da copertura nuvolosa, ombre o scansioni mancanti (come nel caso delle immagini LS7 ETM+ SLC-Off) che risultano particolarmente utili per la costruzione delle serie storiche degli eventi. Con riferimento alle immagini radar, grazie alla elevata risoluzione geometrica, i limiti del bacino risultano facilmente individuabili. I risultati mettono, infatti, in evidenza errori piuttosto bassi, che denotano una forte corrispondenza tra le variabili ($RMSE = 0.33$ m). Il valore del RMSE è stato calcolato per le immagini aventi caratteristiche simili ($R = 15$ m, ASTER e LS, LS8 a seguito del resolution merge). I risultati mostrano un valore più elevato rispetto a quello calcolato in precedenza ($RMSE = 0.74$ m), ma comunque inferiore rispetto a quello calcolato per le LS5, che sono caratterizzate da una risoluzione più bassa, per le quali il valore del RMSE risulta circa pari a 1.5 m. Per il processo di classificazione (C.), è stato utilizzato un numero di immagini inferiore rispetto all'altra tecnica, poiché è risultato necessario ai fini dell'analisi, escludere tutte le immagini per le quali l'identificazione del bacino non risultasse corretta o, comunque, non coerente con la forma presumibilmente assunta dallo stesso. I risultati, anche in questo caso, mostrano coerenza con i dati misurati *in situ* (Fig. 2) nonostante l'analisi di immagini aventi caratteristiche differenti, ha messo in evidenza alcuni limiti di applicabilità del metodo. Considerando solamente le immagini radar, anche, in questo caso, il valore del RMSE risulta basso ($RMSE = 0.50$ m), denotando una forte corrispondenza tra i valori ottenuti dal processo e quelli misurati *in situ*. Al fine di ottenere un indicatore valido per le immagini che presentano caratteristiche simili, esso è stato calcolato per le immagini LS ($R = 30$ m) e, separatamente per le immagini ASTER ($R = 15$ m). Nel primo caso il valore determinato è di circa 0.5 m, mentre per le immagini ASTER vale 0.65 m.

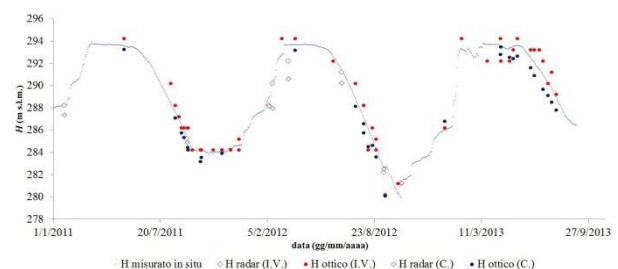


Figura 2 Confronto tra le misure dei livelli di invaso (H) misurati *in situ* e i valori ottenuti utilizzando le differenti metodologie

Complessivamente, dunque, utilizzando le diverse tipologie di immagini, sebbene alcuni parametri risultino comparabili tra le due metodologie o in alcuni casi risultano migliori i valori ottenuti dal processo di classificazione ($RMSE \sim 0.70$ m rispetto al valore di $RMSE = 0.90$ m per il processo I.V., utilizzando tutte

le immagini utili), occorre considerare che il dataset utilizzato per entrambe risulta differente. In particolare, risulta più consistente il dataset utile per il processo di interpretazione visiva, che ha permesso, inoltre di potere adottare le massime risoluzioni possibili per ciascuna tipologia di dato.

5.2 GNSS

Le coordinate, espresse nel sistema di riferimento geocentrico, del ricevitore posto in corrispondenza della sezione centrale della diga, sono state calcolate utilizzando una singola baseline che collega lo strumento alla stazione permanente. Successivamente le coordinate sono state convertite in un sistema di riferimento locale, avente gli assi principali in direzione parallela e ortogonale allo sviluppo del coronamento. Complessivamente, è stato analizzato un arco temporale di dati pari a un anno (Aprile 2011 – Marzo 2012), rappresentativo del periodo di svuotamento e conseguente riempimento dell'invaso artificiale. La serie è stata successivamente analizzata anche dal punto di vista statistico, individuando il comportamento a lungo periodo attraverso l'applicazione di una media mobile con intervallo temporale di due mesi. Dall'analisi è emerso, per la componente di spostamento ortogonale al corpo diga, che l'intervallo di variabilità dei dati ottenuti è sub-centimetrico e che la deviazione standard calcolata per la stessa componente è anch'essa compresa nello stesso intervallo di variabilità. Gli spostamenti individuati

sono stati successivamente messi a confronto con i valori dei livelli di invaso misurati *in situ* per verificare l'esistenza di una relazione tra le due variabili, durante i differenti periodi analizzati. Ciò che emerge (Fig. 3) è un comportamento non lineare, probabilmente dovuto ai differenti carichi agenti sulla struttura e alla composizione della stessa. Infatti, come si osserva dalla figura, ad una riduzione dei valori del livello di invaso, non corrisponde una diminuzione degli spostamenti. Ciò che emerge dall'analisi è, inoltre, la corrispondenza dei valori più bassi del livello di invaso con i valori massimi degli spostamenti GNSS e una relazione tra le variabili non univocamente definita. L'analisi del processo deformativo, complesso nella sua interpretazione, dunque, richiede sicuramente ulteriori indagini ed approfondimenti dal punto di vista geotecnico e idraulico, al fine di riuscire a fornire delle risposte sull'effettiva influenza delle sollecitazioni di natura idraulica sugli spostamenti dell'opera. Sullo stesso grafico, sono stati successivamente riportati i valori dei livelli di invaso ottenuti dal processo di interpretazione visiva e dalla classificazione durante il periodo analizzato (Aprile 2011 – Marzo 2012), dai quali si evince una coerenza con i dati misurati. Nella stessa figura, è possibile, inoltre, notare che, nel periodo analizzato, a ciascun valore delle misure *in situ* dei livelli di invaso, corrisponde, in generale, un valore stimato con la tecnica I.V.. Al contrario, il processo di classificazione non sempre permette di ottenere un valore corrispondente del livello di invaso per le problematiche analizzate in precedenza.

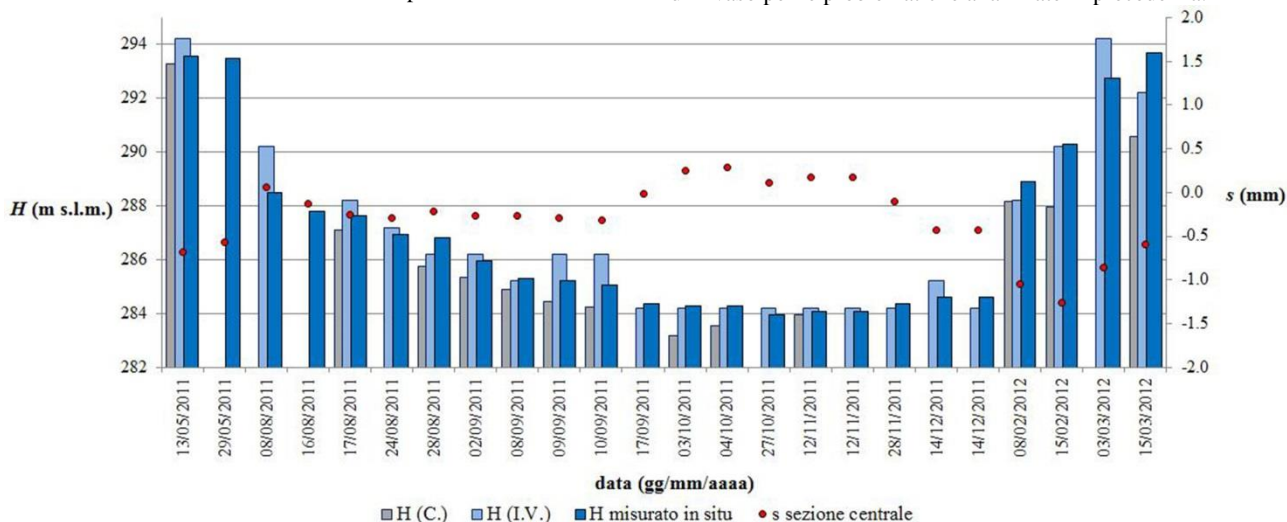


Figura 3 Istogramma rappresentativo dell'andamento dei livelli di invaso (H), durante i differenti periodi di acquisizione, ottenuti da misure *in situ* e applicando le due metodologie. Sull'asse secondario è riportato l'andamento degli spostamenti (s).

6. CONCLUSIONI

Lo studio mira a mettere in evidenza le potenzialità della tecnologia satellitare impiegata per la determinazione degli spostamenti e dei livelli di invaso della diga. Con riferimento alla determinazione degli spostamenti tramite tecniche GNSS, l'utilizzo di una stazione permanente a circa 30 km dal sito di monitoraggio permette di ridurre i costi legati alla materializzazione di nuovi ricevitori, evitando, soprattutto, che le possibili deformazioni della diga possano influenzare il comportamento anche della stazione di riferimento. Gli spostamenti calcolati con la stessa precisione di tecniche geodetiche tradizionali, sono relativi alla sezione centrale del corpo diga, ottenuti nell'arco temporale di un anno, rispetto ai quali è stata calcolata una media mobile con arco temporale di due mesi, per valutare l'andamento a lungo termine.

Per la determinazione dei livelli di invaso, utilizzando il telerilevamento, sono state utilizzate differenti metodologie, evidenziandone i limiti e le potenzialità, impiegando un dataset comprensivo di immagini rilevate da sensori ottici e radar. Utilizzando l'interpretazione visiva dei limiti del bacino, la scelta di risoluzioni geometriche elevate ha permesso di ottenere un miglioramento delle prestazioni, includendo nell'analisi anche immagini con elevata copertura nuvolosa, ombre e scansioni mancanti (come nel caso delle LS7 ETM+ SLC-Off). Con riferimento alla tecnica di classificazione non controllata, sebbene questa presenti notevoli vantaggi, tra cui la possibilità di essere un processo automatizzabile, utilizzando le immagini del dataset disponibile, sono state riscontrate diverse problematiche, che non hanno permesso di utilizzarle tutte, poiché il processo di classificazione non risultava efficiente. Anche la tecnica del resolution merge che migliora il contenuto geometrico, si è rivelata una soluzione ottimale nel caso del processo di

interpretazione visiva per le immagini LS7 e LS8 dotate di una banda pancromatica, ma nel caso della classificazione ciò non ha permesso la corretta identificazione della superficie del bacino. Per questo motivo, per queste immagini è stata utilizzata una differente risoluzione durante l'applicazione delle due metodologie.

Il confronto tra i livelli di invaso ottenuti da entrambe le tecniche e le misure *in situ* ha messo in evidenza prestazioni migliori nel caso in cui si utilizzino le diverse tipologie di immagini nel processo di classificazione (RMSE ~ 0.70 m) rispetto alla tecnica di interpretazione visiva (RMSE = 0.90 m). Tuttavia, l'utilizzo di quest'ultima ha permesso di potere utilizzare un numero più consistente di immagini nonostante queste presentassero i limiti che non hanno permesso il loro impiego durante il processo di classificazione. Con riferimento agli spostamenti GNSS, è stato riscontrato che la variabilità degli stessi, calcolati per la componente ortogonale al coronamento, su cui è stata preliminarmente eseguita una media mobile per evidenziarne il comportamento a lungo termine, risulta essere sub-centimetrica. Anche la deviazione standard, calcolata nello stesso intervallo temporale, presenta la stessa variabilità degli spostamenti calcolati.

Il confronto tra gli spostamenti ottenuti mediante tecniche GNSS durante il periodo di un anno e le misure dei livelli di invaso ottenute con modalità differenti, ha messo in evidenza un differente comportamento non lineare durante i periodi di svuotamento e riempimento dell'invaso artificiale. La complessa interpretazione del processo deformativo dell'opera mette in evidenza la necessità di effettuare ulteriori indagini di natura differente al fine di ottenere una migliore comprensione del comportamento della struttura.

RINGRAZIAMENTI

Lo studio descritto costituisce un lavoro preliminare inserito nell'ambito della Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile, Ambientale, dei Materiali (XXXI ciclo) presso la Scuola Politecnica dell'Università degli Studi di Palermo, di cui è Tutor il Prof. Ing. Goffredo La Loggia e Co-Tutor gli Ingg. Gino Dardanelli e Antonino Maltese, che ringrazio per i loro preziosi consigli e suggerimenti durante la stesura del lavoro. Le immagini Cosmo-SkyMed utilizzate in questo lavoro sono state acquisite all'interno del progetto "Integrating radar images and hydrological modelling to quantify urban floods" finanziato da European Spatial Agency (ESA) (proposal Id: 31609 - G. Ciraolo principal investigator). Le immagini TSX utilizzate sono state acquisite all'interno del progetto "Integrating RADAR images

and flooding hydrological modeling" (proposal code: HYD3110 - A. Maltese principal investigator) finanziato da DLR. Le immagini Landsat e ASTER sono state acquisite dal sito web EarthExplorer (USGS).

BIBLIOGRAFIA

- Bayrak, T., 2014. Verifying Pressure of Water on Dams, a Case Study. In: *Sensors*, Vol.8, pp. 5376-5385.
- Dardanelli, G., La Loggia, G., Perfetti, N., Capodici, F., Puccio, L., Maltese, A. 2014. Monitoring displacements of an earthen dam using GNSS and remote sensing. *Proc. SPIE*, Bellingham, Washington, 9239, 92392801-92392816.
- Dardanelli, G., Pipitone C., 2017. Hydraulic models and finite elements for monitoring of an earth dam, by using GNSS techniques. In: *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol.61, n.3, pp. 421-433, DOI: 10.3311/PPci.8217.
- Kalkan, Y., 2014. Geodetic deformation monitoring of Ataturk Dam in Turkey. In: *Arabian Journal of GeoSciences*, Vol. 7, pp. 397-405.
- Klobuchar, J.A., 1996. Global Positioning System: Theory and Applications. Vol. I, Cap. XII: Ionospheric effects on GPS, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 485-515.
- Niell, A.E., 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. In: *Journal of Geophysical Research* 101, B2, pp. 3227-3246.
- Saastamoinen, J., 1972. Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In: *The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser.*, Vol. 15, edited by S. W. Henriksen, A. Mancini, and B.H. Chovitz, AGU, Washington, D.C., pp. 247-252.
- Schwiderski, E.W., 1980. On charting global ocean tides. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 18, pp. 243-268.
- Shimizu, N., 2015. Rock Displacement Monitoring using Satellite Technologies-GPS and InSAR. *Vietrock 2015 an ISRM specialized conference*, Vietrock 2015, Hanoi, Vietnam, 1-18.
- Sima, S., Tajrishy, M., 2013. Using satellite data to extract volume-area-elevation relationships for Urmia Lake, Iran. In: *Journal of Great Lake Research*, Vol. 39, pp. 90-99.
- Tarsisius Aris, S., Kabul Basah, S., Fakrurazzi, D., Adin, S., Adhi, D., Susilo A., 2012. Design and installation for Dam Monitoring Using Multi sensors: A Case Study at Sermo Dam, Yogyakarta Province, Indonesia. *TS01F - Dam and Reservoir Engineering Surveying, 5572, FIG Working Week 2012, Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage, Rome, Italy, 6-10 May 2012*