

## L'utilizzo di immagini satellitari per la definizione di aree inondabili

G. Fiore<sup>a</sup>, A. Gioia<sup>a</sup>, V. Totaro<sup>a</sup>, G. Caradonna<sup>a</sup>, A. Novelli<sup>a</sup>, E. Tarantino<sup>a</sup>, V. Iacobellis<sup>a</sup>, U. Fratino<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Politecnico di Bari, via Orabona 4, Bari, 70125, Italy, tel: 080 5963299, fax: 080 5963414,  
e-mail: andrea.gioia@poliba.it

### Sommario

Il considerevole numero di inondazioni che ha causato, negli ultimi decenni, ingenti danni materiali e perdite di vite umane, mette in evidenza la crescente vulnerabilità cui risultano sottoposte molte aree urbanizzate, indipendentemente dalla loro ubicazione geografica e dalle loro strutture sociali ed economiche. Ciò ha indotto la comunità scientifica a dedicare un grande sforzo allo sviluppo ed al miglioramento di nuove tecniche finalizzate alla rapida identificazione e mappatura delle aree esposte al rischio di allagamento. In tale contesto allo scopo di soddisfare la crescente richiesta da parte degli utilizzatori finali (istituzioni, professionisti, autorità locali) ed anche per ottemperare alle disposizioni della recente normativa (Flood-directive 2007/60/CE), differenti modelli idrologici-idraulici sono stati sviluppati in grado di identificare rapidamente le aree allagabili; i modelli di ultima generazione fanno spesso ricorso alle moderne tecniche di *remote sensing*, ed assumono un ruolo fondamentale per la disponibilità di informazione distribuita, anche in ambiti territoriali in cui vi è scarsa disponibilità del dato misurato in sito.

Il lavoro svolto riguarda un approccio multidisciplinare per la definizione dell'indice spettrale più appropriato derivato da sensore spettrale remoto, in grado di riprodurre mappe di allagamento ottenute mediante utilizzo della modellazione idraulica. Nello specifico, attraverso l'uso di immagini Landsat-8, si è valutata la capacità di diversi descrittori spettrali di stimare le aree a rischio di inondazione del tratto vallivo del fiume Lato (TA), utilizzando gli effetti al suolo determinati da eventi di piena. La selezione dell'indice satellitare più appropriato è avvenuta mediante utilizzo di un test noto come "test dei classificatori binari".

Come conferma della validità dei risultati così ottenuti, questi ultimi sono stati confrontati con quelli derivanti dalla calibrazione di diversi descrittori geomorfologici, dipendenti da informazioni semplicemente ricavabili mediante elaborazione dei *Digital Elevation Models*, in grado di individuare in maniera rapida e semplice le aree esposte al rischio di inondazione.

### Abstract

The considerable number of floods that caused, in recent decades, substantial material damage and loss of life, highlights the increasing vulnerability to which are subjected many urban areas, regardless of their geographical location and their social and economic structures. This has led the scientific community to devote great efforts to the development and improvement of new techniques in order to provide for the rapid identification and mapping of areas at risk of flooding. Last generation models often make use of modern remote sensing techniques, which play a fundamental role in the availability of distributed information, even in territories where there is limited availability of the data measured *in situ*. In this context the work involves a multidisciplinary approach to define the spectral index more appropriate derived from remote spectral sensor, that can reproduce flood maps obtained through use of hydraulic modeling. Specifically, through the use of Landsat-8, it evaluated the ability of different spectral descriptors to estimate the areas at risk of flooding in the Lato river basin (Southern Italy), using the ground effects caused by flood events. The selection of the more appropriate satellite index was achieved by using a test known as binary classifiers test. The adopted procedure provided the calibration of

different geomorphological descriptors, able to identify quickly and easily areas at risk of flooding, using Digital Elevation Models.

## 1. Introduzione

L'applicazione della direttiva europea 2007/60/CE sulle strategie di valutazione e adattamento al rischio idraulico impone un necessario aggiornamento dei mezzi teorici attualmente in uso per poter procedere ad una mappatura del territorio sulla base del livello di pericolosità idraulica, con lo scopo di mitigare e contenere gli effetti che le alluvioni hanno sul territorio circostante.

Tale necessità è resa più impellente dall'aumentata frequenza degli eventi estremi sul nostro territorio, l'origine dei quali può essere ricondotta non solo ai fenomeni di urbanizzazione e di cambiamento di uso del suolo, ma anche ai cambiamenti climatici: infatti è noto che una consistente parte del territorio dell'Italia meridionale sia ormai soggetta stabilmente ad un fenomeno di degradazione dei suoli progressivo ed invadente. Tutto questo ha, ovviamente, riflessi inevitabili sulla maggior esposizione di aree civili al rischio idraulico.

Sensibili sono stati, a tal proposito, i recenti miglioramenti nelle tecniche di valutazione del rischio idraulico, specie nell'estensione del campo di applicazione dei modelli *DEM-based*: questa metodologia infatti, pur utilizzando esclusivamente informazioni di carattere geomorfologico, permette di ottenere degli indici in grado di fornire informazioni attendibili sulla tendenza delle aree ad essere allagate.

Nell'ambito della multidisciplinarietà dell'argomento oggetto del presente lavoro, si propone un confronto tra le mappe di allagamento ottenute mediante la definizione dell'indice spettrale più appropriato derivato da sensore spettrale remoto e quelle ottenute mediante applicazione dei modelli *DEM-based*. Nello specifico, attraverso l'uso di immagini Landsat-8, si è valutata la capacità di diversi descrittori spettrali di stimare le aree a rischio di inondazione del tratto vallivo del fiume Lato (TA), utilizzando, come riferimento per calibrazione, gli effetti al suolo determinati da eventi di piena, ricostruiti mediante simulazione numerica. La selezione dell'indice satellitare e del descrittore di bacino più appropriato è avvenuta mediante utilizzo di un test noto come test dei classificatori binari.

## 2. Il caso di studio

In riferimento alla determinazione dell'indice che meglio si adatta alla definizione delle aree allagabili a seguito di un dato evento meteorico, si è scelto di focalizzare la presente analisi sul fiume Lato, il cui bacino idrografico si sviluppa nella provincia di Taranto e ha una estensione di circa 670 km<sup>2</sup>, sfociando nel golfo di Taranto in località Torre del Lato. L'analisi è stata incentrata sui due differenti eventi alluvionali, per i quali si era in possesso di immagini satellitari del tipo Landsat-8 ad esso temporalmente riferibili ed acquisite dal sito dell'USGS. In particolar modo, si sono analizzati gli eventi di piena che hanno interessato la parte valliva del fiume Lato nei giorni 6/7 ottobre e 1/2 dicembre 2013.

## 3. Metodologie

Di seguito si illustrano le metodologie e i concetti utilizzati per la redazione del presente articolo; in particolare si definiscono brevemente i descrittori morfologici di bacino (sintetici e composti) usati per la ricostruzione delle aree allagabili, la modellazione idrologica/idraulica utilizzata per la definizione delle aree inondabili di riferimento, il metodo dei classificatori binari per la selezione dell'indice satellitare e del descrittore di bacino più appropriato e le metodologie di correzione e campionamento dell'immagine satellitare.

### 3.1 Descrittori morfologici di bacino

La morfologia di un bacino idrografico costituisce l'elemento base che permette di individuare gli effetti della distribuzione del deflusso superficiale conseguenti al verificarsi di sollecitazioni meteoriche in ingresso al bacino stesso. I descrittori morfologici sintetici e composti analizzati nel

presente lavoro sono quelli riportati in Manfreda et al., 2014, e sono ricavabili a partire dal modello digitale del terreno (DEM).

### 3.1.1 Descrittori sintetici

- *upslope contributing area*,  $A_s$  [ $m^2$ ];
- *differenza di quota rispetto alla rete di drenaggio (elevation to the nearest stream)*,  $H$  [ $m$ ];
- *distanza dalla rete di drenaggio (distance from the nearest stream)*,  $D$  [ $m$ ];
- *curvatura superficiale (surface curvature)*,  $\nabla^2 H$  [-];
- *pendenza locale (local slope)*,  $S$  [-].

### 3.1.2 Descrittori composti

- *indice topografico modificato (modified topographic index)*,  $TI_m$ :

$$TI_m = \ln \left( \frac{A_d^n}{\tan(\beta)} \right) \quad [1]$$

dove  $A_d$  [ $m$ ] è l'area di drenaggio a monte della cella per unità di lunghezza,  $\tan(\beta)$  la pendenza locale e  $n$  un esponente minore dell'unità;

- $\ln(h(A_s)/H)$ : questo indice mette in relazione, in ogni punto, l'altezza d'acqua  $h$  con il descrittore sintetico  $H$ , dove  $h$  si determina per ogni cella del bacino in funzione della relativa area contribuente con la seguente relazione:

$$h(A_s) \cong bA_s^n \quad [2]$$

in cui  $A_s$  [ $m^2$ ] è l'area contribuente a monte nel punto di interesse, ed  $n$  è un esponente assunto pari a 0.3 (Nardi et al., 2006).

- $\ln(h(A_t)/H)$ : questo indice si differenzia dal precedente per il fatto che l'area contribuente  $A_t$  è valutata rispetto alla cella appartenente al reticolo idrografico, idraulicamente più vicina alla cella in esame;
- $h(A_t) - H/D$ ;
- $(h_r - H)/D$ .

## 3.2 La modellazione idrologica/idraulica

Le mappe di allagamento di riferimento determinate mediante propagazione idraulica delle portate idrologiche generate dagli eventi meteorici in esame, sono state ottenute procedendo preliminarmente alla stima degli idrogrammi di piena e successivamente facendo uso di una modellazione idraulica bidimensionale. Il dominio di calcolo è stato quindi descritto sulla base delle informazioni topografiche desumibili da un modello digitale del terreno con risoluzione  $8 \times 8 \text{ m}^2$ . Individuato il dominio e definita la griglia di calcolo, gli eventi di piena sono stati simulati inserendo come condizione al contorno due diversi idrogrammi di piena, mediante l'applicazione del CN SCS Method (USDA-SCS, 1985). La modellazione idraulica è stata calibrata mediante confronto con le aree inondate corrispondenti ai tempi di ritorno di 30 e 200 anni estratte dal piano di assetto idrogeologico dell'autorità di Bacino della Puglia.

## 3.3 Il metodo dei classificatori binari

La selezione dell'indice satellitare e del descrittore geomorfologico più idoneo a rappresentare le aree allagate è stata realizzata facendo ricorso al test del classificatore binario lineare, al fine di minimizzare l'errore di sovrapposizione tra l'area allagabile,  $S_{SIM}$ , ricostruita mediante l'elaborazione delle immagini satellitari o degli indici geomorfologici e l'area allagabile,  $S_M$ , ottenuta mediante simulazione numerica e considerata come mappa di riferimento per la calibrazione degli indici.

Come riportato in letteratura, il test può generare due tipi di errori: quello di Falso Positivo (ER1) e quello di Falso Negativo (ER2). L'errore ER1 determina una falsa attribuzione delle aree allagate,

tendendo a sovrastimarle, laddove l'errore ER2 tende a sottostimarle. Analiticamente, i due indici sono individuati dalle seguenti relazioni:

$$ER1 = \frac{NS_M \cap S_{SIM}}{NS_M} * 100 \qquad ER2 = \frac{S_M \cap NS_{SIM}}{S_M} * 100 \qquad [3]$$

dove  $NS_M$  e  $NS_{SIM}$  rappresentano le aree non interessate dall'allagamento derivanti rispettivamente dall'applicazione del modello idraulico e dell'indice spettrale o geomorfologico. La somma ( $ER1 + ER2$ ) rappresenta la funzione obiettivo che si intende minimizzare per individuare l'indice più adeguato. Ne consegue che l'obiettivo del test sia quello di ricercare il valore minimo della funzione obiettivo.

### 3.4 metodologie di correzione e campionamento dell'immagine satellitare

Per le finalità dell'indagine, si sono acquisite due immagini satellitari Landsat-8 relativamente ai due eventi osservati, con risoluzione spaziale pari a 30 m, congrue al rilevamento delle aree inondate (Ticehurst, 2009). Si riporta a titolo di esempio in fig. 1, l'immagine scattata il 10 ottobre 2013 alle ore 9:37, selezionata tra quelle disponibili nelle ore immediatamente successive all'evento, in ragione della modesta copertura nuvolosa.

L'immagine è stata oggetto di calibrazione radiometrica e correzione atmosferica e successivamente ricampionata. La correzione atmosferica è stata applicata, mediante l'algoritmo del tipo *image-based*, noto come *dark-subtraction*. Per il ricampionamento invece è stato utilizzando l'algoritmo di Gram-Schmidt (Maurer, 2013) che ha consentito di ottenere un'immagine con risoluzione geometrica di 15 m.

## 4. Risultati e discussione

Si riportano nel seguito i risultati relativi all'applicazione dei descrittori geomorfologici e degli indici spettrali per la stima delle aree inondabili relativamente ai due eventi considerati sul bacino del fiume Lato. In particolare il confronto tra i risultati ottenuti in merito alla capacità di riprodurre le aree inondabili da parte delle due metodologie, conferma la elevata affidabilità nell'utilizzo di tali approcci per una stima a priori dell'effetto al suolo di un evento meteorico, specialmente quando risulta molto oneroso da parte degli utilizzatori finali estendere le analisi numeriche dalla piccola scala alla grande scala.



Figura 1 - Immagine LANDSAT-8 utilizzata (10/10/2013 ore 09:37:07)

### 4.1 Valutazione degli indici spettrali: la procedura utilizzata per la definizione delle aree allagate

Nel seguito è illustrata la procedura adottata nella individuazione di aree allagate a seguito dell'occorrenza di un evento di piena, attraverso l'utilizzo di indici spettrali estratti da immagini satellitari. Si tiene a precisare che, non essendo disponibile la ricostruzione a terra degli effetti dell'evento analizzato, la mappa usata come riferimento è quella ottenuta dall'applicazione di un modello idraulico bidimensionale, sulla scorta delle valutazioni idrologiche e idrauliche di supporto alla ricostruzione dell'evento alluvionale.

Al fine di estrapolare le aree inondate dall'immagine satellitare si è ricorso ad indici che utilizzano la firma spettrale di riflettanza e, quindi, fra i più noti il Simple ratio (SR), il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), il Land Surface Water Index (LSWI), l'Optical Water Index (OWI) e l'Automated Water Extraction Index (AWEI), riportati in Lillesand et al., 2014

L'indice SR è il rapporto tra valori di riflettività nel vicino infrarosso o NIR (0,75 -1,1 μm) e nel rosso (0,58 – 0,75 μm). Esso ha espressione:

$$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} \quad [4]$$

e assume valori compresi tra 0 e 1 in presenza di suolo e acqua.

L'indice NDVI, dato dalla differenza normalizzata dei valori di riflettanza nel NIR e nel rosso, è definito dalla relazione:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad [5]$$

ove  $\rho_{NIR}$  è la riflettività nella banda del NIR e  $\rho_{RED}$  quella nella banda del rosso. Varia tra -1 e 1 e i valori negativi sono indice della presenza di acqua.

L'indice LSWI utilizza l'infrarosso a onde corte (SWIR):

$$LSWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad [6]$$

ove NIR e SWIR sono i valori di riflettanza calcolati nel NIR e nello SWIR, mentre i pedici individuano le lunghezze d'onda alle quali sono calcolati.

L'indice OWI, che appare particolarmente sensibile alla presenza di acqua nel suolo (Guerschman et al., 2008), è strettamente legato ad altri due indici: l'Enhanced Vegetation Index (EVI) e il Global Vegetation Moisture Index (GVMI) attraverso la relazione:

$$\begin{aligned} OWI &= 0 & se\ EVI &\geq 0 \\ OWI &= GVMI - EVI & se\ EVI &< 0 \end{aligned} \quad [7]$$

L'indice AWEI tende a esaltare il contrasto tra l'acqua e altre superfici oscure attraverso sottrazioni e addizioni di valori di riflettanza di bande note, per cui è in grado di aumentare la capacità di definizione delle superfici liquide (Feyisa et al., 2013). Per tale indice, nell'indagine condotta, si è fatto riferimento alla formulazione sotto definita:

$$AWEI_{nsh} = 4 * (\rho_{banda2} - \rho_{banda5}) - (0.25 * \rho_{banda4} + 2.75\rho_{banda7}) \quad [8]$$

ove  $\rho$  è il valore di riflettanza delle bande spettrali del Landsat.

#### 4.1.1 Selezione dell'indice spettrale

La selezione dell'indice più idoneo a rappresentare le aree allagate è stata realizzata facendo ricorso al test del classificatore binario lineare al fine di minimizzare l'errore di sovrapposizione tra l'impronta allagabile ricostruita mediante elaborazione di immagini satellitari e l'impronta, considerata come mappa di riferimento, ottenuta dal modello idraulico. Prima di effettuare il test, le diverse mappe sono state convertite in mappe binarie.

I test effettuati hanno consentito di calibrare, per ogni indice spettrale utilizzato, una soglia numerica utile all'individuazione delle aree allagate. A seguire, sono riportate le mappe delle aree

allagate (con il valore di soglia individuato) individuate dagli indici spettrali che hanno fornito i migliori risultati nella procedura di calibrazione (cfr. figura 2).

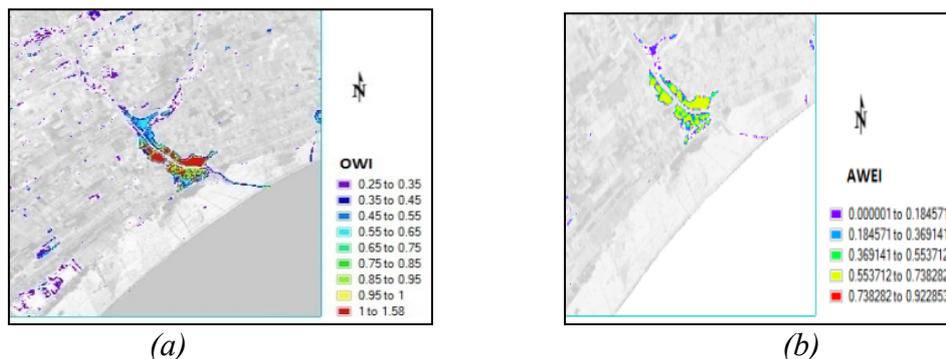


Figura 2 - Mappa di allagamento ottenuta da OWI ( $OWI > 0.25$ ) (a) e da AWEI ( $AWEI > 0$ ) (b)

L'identificazione dell'indice spettrale che meglio si presta all'identificazione delle aree allagate è stata effettuata attraverso l'individuazione del minimo della funzione obiettivo, ricavata dai test del classificatore binario. I risultati ottenuti sono sintetizzati in tabella 1 dalla quale si evince come l'indice spettrale che ha fornito il valore più basso della funzione obiettivo sia l'Optical Water Index con soglia pari a 0.25.

In particolare, il test ha restituito un valore di minimo della funzione obiettivo pari al 44,40%, di cui il 15,62% derivante da errori di falso positivo e il 28,78% da errori di falso negativo; ne deriva quindi che la valutazione effettuata facendo ricorso all' $OWI > 0.25$  conduca a una sovrastima del 15,62% e una sottostima del 28,78% dell'area allagata posta quale riferimento. Il risultato appare soddisfacente come desumibile qualitativamente dalla figura 2a.

Indice	Falsi negativi <i>FN</i>	Falsi positivi <i>FP</i>	Area allagata <i>S</i>	Area non allagata <i>NS</i>	Errore falso negativo <i>ER2 [%]</i>	Errore falso positivo <i>ER1 [%]</i>	Funzione obiettivo <i>OB [%]</i>
$0 < SR < 1$	9664	174	18328	13674	52.73	1.27	54.00
$NDVI < 0$	9664	174	18328	13674	52.73	1.27	54.00
$LSWI > 0.4$	9400	1014	18328	13674	51.29	7.42	58.70
$LSWI > 0.45$	10113	387	18328	13674	55.18	2.83	58.01
$LSWI > 0.5$	10774	144	18328	13674	58.78	1.05	59.84
$LSWI > 0.55$	11332	96	18328	13674	61.83	0.70	62.53
$LSWI > 0.6$	11811	62	18328	13674	64.44	0.45	64.90
$OWI > 0.2$	13674	18328	3103	4153	22.69	22.66	45.35
$OWI > 0.25$	13674	18328	3935	2863	28.78	15.62	44.40
$OWI > 0.3$	13674	18328	4671	2161	34.16	11.79	45.95
$OWI > 0.35$	13674	18328	5425	1692	39.67	9.23	48.91
$OWI > 0.4$	13674	18328	6212	1343	45.43	7.33	52.76
$AWEI > 0$	8540	348	18328	13674	46.59	2.54	49.14
$AWEI > 0.1$	9466	167	18328	13674	51.64	1.22	52.86
$AWEI > 0.2$	10352	93	18328	13674	56.48	0.68	57.16

Tabella 1 - Risultati del test del classificatore binario

#### 4.2 Valutazione degli indici geomorfologici sui due eventi di piena

Si è quindi proceduto alla calibrazione del modello basato sui descrittori geomorfologici, al fine di renderlo più aderente alla realtà e migliorarne le prestazioni; di conseguenza, per ognuno dei descrittori elencati al paragrafo precedente è stato calibrato il valore  $\tau$  della soglia che minimizza la funzione obiettivo (v. tabella 2), usando come immagine di riferimento quella ottenuta dalla

modellazione idraulica (v. figura 3). Il valore così ottenuto è stato poi successivamente applicato in fase di validazione per stimare l'errore associato tra simulato e osservato relativamente. La calibrazione dei descrittori morfologici sul bacino del fiume Lato è stata effettuata in prossimità della foce: tale scelta è giustificata dalle criticità quivi riscontratesi a seguito di eventi pluviometrici particolarmente intensi.

Indici	Evento Ottobre		Evento Dicembre		Indici	Evento Ottobre		Evento Dicembre	
	$\tau$	OB	$\tau$	OB		$\tau$	OB	$\tau$	OB
A	1000	0,71	1000	0,71	$Ti_m$	8,9	0,62	8,9	0,62
$\nabla^2 H$	1	0,98	1	0,98	H/D	0	0,57	0	0,57
S	1	0,80	1	0,79	$\ln(h_s/H)$	-2,9	0,27	-2,9	0,27
H	1	0,19	1	0,19	$\ln(h_r/H)$	-0,8	0,28	-0,81	0,28
D	465	0,60	465	0,60	$(h_r-H)/D$	0	0,26	0	0,26

Tabella 2 - Risultati della classificazione binaria lineare per gli indici geomorfologici

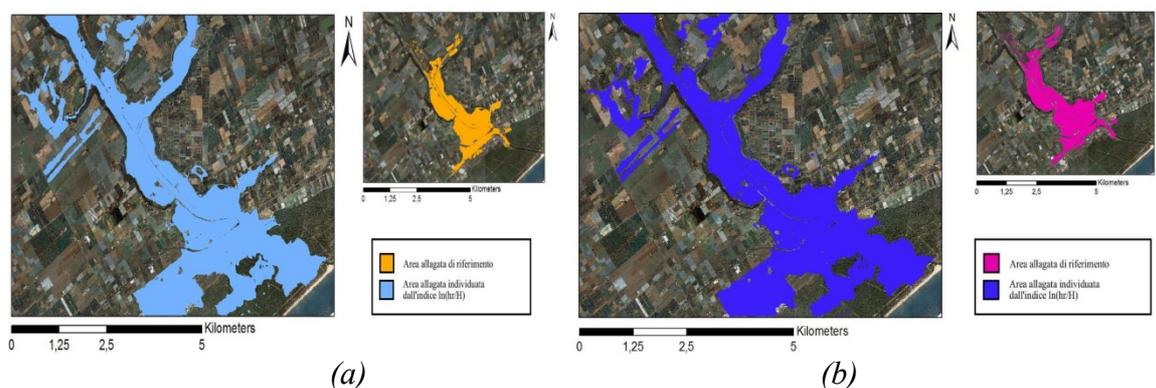


Figura 3 - Calibrazione: confronto fra l'area allagata di riferimento e l'area allagata individuata dall'indice  $\ln(h_r/H)$  per l'evento di Dicembre 2013 (a) e di Ottobre 2013 (b)

La validazione dei descrittori calibrati con la procedura sopra descritta, è stata effettuata mediante confronto con le immagini di allagamento ottenute mediante elaborazione dell'indice spettrale OWI che, come sopra riportato, meglio si presta all'identificazione delle aree allagate attraverso l'individuazione del minimo della funzione obiettivo, ricavata dai test del classificatore binario. La validazione è stata effettuata su una zona più a monte rispetto alla zona di calibrazione ed in particolare, in figura 4 si riporta il confronto tra l'area allagata individuata dal descrittore  $\ln(h_r/H)$  e l'area allagata definita dall'indice spettrale per l'evento di dicembre 2013. Ciò rafforza la capacità del descrittore satellitare di rappresentare l'effetto al suolo di un evento meteorico.

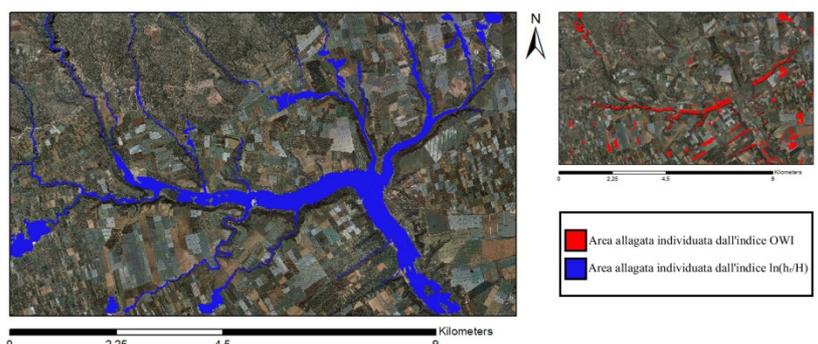


Figura 4 - Validazione: confronto fra l'area allagata individuata dal descrittore  $\ln(h_r/H)$  e l'area allagata definita dall'indice spettrale per l'evento di dicembre 2013

## 5. Conclusioni

Il lavoro proposto ha consentito di confrontare due metodologie in grado di individuare in prima approssimazione le aree allagate conseguenti al verificarsi di un determinato evento alluvionale. Dall'osservazione delle figure sopra riportate si evince che le due metodologie (la prima basata sui descrittori geomorfologici e la seconda sugli indici spettrali derivati da sensore remoto), seppur concettualmente diverse, forniscano risultati tra di loro comparabili, tranne in prossimità della foce, laddove gli indici geomorfologici non riescono a tener conto di una serie di interventi antropici che vanno a limitare il campo di applicabilità di queste procedure, come già osservato da Manfreda et al. (2011). Il lavoro proposto va quindi ad arricchire la letteratura sull'applicabilità delle procedure nella valutazione del rischio alluvionale, mostrando come l'estensione delle procedure *DEM-based* a bacini con caratteristiche diverse, coadiuvata da immagini satellitari, possa costituire un eccellente supporto ad una metodologia oggettiva su larga scala per una nuova mappatura qualitativa del rischio idraulico.

## Riferimenti bibliografici

- Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R. (2014), "Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery", *Remote Sensing of Environment* 140, 23-35
- Guerschman J.P., Van Dijk A.I.J.M., McVicar T.R., Van Niel T.G., Lingtao L., Lui Y., Peña-Arancibia J. (2008) "Actual evapotranspiration and water balance estimates from satellite observations over the Murray-Darling Basin", *Canberra, CSIRO Science Report*
- Lillesand T., Kiefer R. W., & Chipman, J. (2014). Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons.
- Manfreda S., Di Leo M., Sole A. (2011), "Detention of flood prone areas using digital elevation models", *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE) HE.1943-5584.0000367, 781-790
- Manfreda S., Samela C., Sole A., Fiorentino M. (2014), "Flood prone areas assesment using linear binary classifiers based on morphological indices", *Vulnerability, Uncertainty, and Risk: pp. 2002-2011. doi:10.1061/9780784413609.201*
- Maurer T. (2013), "How to pan-sharpen images using the Gram-Schmidt pan-sharpen method – a recipe", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W1, ISPRS Hannover Workshop*
- Nardi F., Vivoni E. R., Grimaldi S. (2006), "Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method", *Water Resour. Res.*, 42(9), W09409
- Ticehurst C.J., Dyce P. and Guerschman J.P. (2009), "Using passive microwave and optical remote sensing to monitor flood inundation in support of hydrologic modelling", *18<sup>th</sup> World IMACS/MODSIM Cong., Cairns (Australia) July, 13-17*
- USDA-SCS (1985), "National Engineering Handbook, Sec, 4 - Hydrology", *Washington, D.C.*