INDICE

1. INTRODUZIONE

2. IL RISCHIO IDROLOGICO-IDRAULICO IN AMBITO URBANO
   - 2.1 Stato del rischio ed emergenza in Italia
   - 2.2 Definizioni
     - 2.2.1 Rischio e fenomeni associati
     - 2.2.2 Unità minima d'indagine: il bacino idrografico
     - 2.2.3 Gli effetti dell'urbanizzazione sul rischio
   - 2.3 Quadro nazionale e internazionale di riferimento normativo
   - 2.4 La valutazione
     - 2.4.1 Le grandezze del rischio
     - 2.4.2 Valutare ex-lege
   - 2.5 La mitigazione
     - 2.5.1 Interventi strutturali
     - 2.5.2 Interventi non strutturali

3 LA NUOVA POLITICA: DALLA PROTEZIONE ALLA RESILIENZA
   - 3.1 Comunità e territori resilienti al rischio
   - 3.2 La mitigazione socialmente giusta
     - 3.2.1 L'importanza degli interventi non strutturali
       - 3.2.1.1 Sistemi di previsione e preannuncio
         - 3.2.1.1.1 *SAFER with GMES*
         - 3.2.1.1.2 *OPERA PROJECT* – Protezione civile dalle Alluvioni
       - 3.2.1.2 Tecniche di flood-proofing
       - 3.2.1.3 Norme d'uso del territorio
         - 3.2.1.3.1 *Water-smart cities*
       - 3.2.1.4 Coperture assicurative
         - 3.2.1.4.1 Regime assicurativo italiano
         - 3.2.1.4.2 *Best practices* europee
         - 3.2.1.4.3 SIGRA (Sistema Integrato per la Gestione del Rischio assicurativo da Alluvione)

4 IL TELERILEVAMENTO ATTIVO NEL PROCESSO DI RESILIENZA
   - 4.1 Principi fisici del Telerilevamento
   - 4.2 Sensori attivi: definizioni
   - 4.3 L'apporto dei sistemi di OT a microonde RADAR
     - 4.3.1 *Synthetic Apertur Radar* (SAR) : principi di funzionamento
       - 4.3.1.1 Modalità di acquisizione
       - 4.3.1.2 Distorsioni
     - 4.3.2 SAR e *Flood Mapping*: un rapporto privilegiato
   - 4.4 L'apporto del Laser Scanning Aereo
     - 4.4.1 *Light Detection and Ranging* (LiDAR): principi di funzionamento
     - 4.4.2 Applicazioni
   - 4.5 Disegno strategico

5 CASO DI STUDIO: VICENZA NELL'EMERGENZA VENETO 2010
5.1 Dinamica dell'evento
5.1.1 L'inefficacia del sistema di previsione e preannuncio
5.2 Il danno subito
5.2.1 Condivisione e sensibilizzazione: l'importanza del Web
5.3 Quadro regionale di riferimento normativo e programmatico

6 IL PROTOTIPO
6.1 Estrazione areali di allagamento da immagini SAR
6.1.1 Reperimento delle immagini SAR
6.1.1.1 La missione COSMO-Skymed
6.1.1.2 Caratteristiche del set di immagini a disposizione
6.1.2 Pre-processamento delle immagini
6.1.3 Condizioni di allagamento al 01/11/2010: analisi di Coherence Change Detection
6.1.4 Condizione di allagamento al 03/11/2010: Classificazione supervisionata
6.1.5 Analisi del fenomeno di allagamento su immagini SAR: risultati complessivi
6.2 Calcolo dei volumi di allagamento con tecnologia LiDAR
6.2.1 Il rilievo LiDAR a disposizione
6.2.2 Tiranti idrici e volumi di allagamento

7 VALIDAZIONE DEL PROTOTIPO
7.1 Validazione areali allagamento
7.2 Validazione volumi di allagamento

8 CONSIDERAZIONI FINALI
8.1 Confronto con le previsioni di P.A.I.
8.2 Potenzialità e limiti
8.3 Possibili evoluzioni del sistema di conoscenza integrato SAR-LiDAR
8.4 Conclusioni e sviluppi futuri

1. INTRODUZIONE

L'attività di tesi si pone l'obiettivo di valutare l'apporto di conoscenza che tecnologie e tecniche di Telerilevamento attivo possono attualmente offrire al campo del rischio idrologico-idraulico nel perseguimento del nuovo obiettivo di resilienza .

La materia risulta attualmente interessata, soprattutto a livello internazionale, da una profonda reinterpretazione delle sue linee fondamentali in virtù della dimensione sempre più ordinaria con la quale i fenomeni a pericolosità naturale si manifestano in termini di danno a beni e persone. Essa si fa promotrice di un nuovo approccio al rischio fondato non più sul concetto di passivo di stima delle vulnerabilità, bensì di resilienza, intesa come capacità da sviluppare nei territori e nelle comunità per conoscere, prepararsi e convivere al meglio con il rischio stesso. In questo senso vengono ricosciuti tutti i limiti della politica tradizionale attualmente in vigore, fondata esclusivamente sulla protezione dal rischio mediante opere di difesa strutturali e azioni emergenziali per il recupero di situazioni già compremesse. Oggi invece, coscienti del carattere di ordinarietà che l'emergenza è giunta ad acquisire e consapevoli dei limiti economici e tempistici con i quali tali interventi sono destinati a scontrarsi, sembra più giusto indirizzare le macchina decisionale verso una politica di mitigazione del rischio socialmente giusta, che si avvalga soprattutto di misure non strutturali, la cui importanza è stata forse trascurata e sottovalutata nel passato.

Primo fondamentale obiettivo che la materia si pone è quello di porre in essere una struttura conoscitiva del rischio più effice ed efficiente, condizione sostanziale per intraprendere il percorso di resilienza e possibile esclusivamente sulla base del risconoscimento di una co-responsabilità sociale ed istituzionale tanto nella causa che nel danno.
In risposta a tali esigenze emergenti, vengono valutate le potenzialità teoriche ed applicative dell'utilizzo integrato di sensori SAR e LiDAR in termini di supporto all'analisi dei fenomeni di allagamento ed in generale all'intero sistema di conoscenza del rischio.
Tale obiettivo viene perseguito in due fasi. La prima finalizzata a valutare i fondamenti dell'attuale sistema di conoscenza del rischio in Italia, in termini di strumenti, metodologie e fondamenti teorici; ad analizzare le linee foondamentali della nuova politica emergente orientata alla resilienza , anche verificando lo stato di allineamento dell'Italia rispetto alle necessità e alle misure necessarie per il perseguimento dell'obiettivo di conoscenza,

preparazione e convivenza con il rischio; per ultimo a verificare principi teorici, caratteristiche di funzionamento e attuale stato dell'arte del telerilavamento attivo, nella fattispecie di quello a microonde SAR e quello laser LiDAR.

La prima fase, che si conclude con la realizzazione del disegno strategico, ha lo scopo di fornire il subtrato conoscitivo necessario per identificare forme e modalità idonee a valutare le tecnologie proposte in termini di capacità di risposta alle esigenze specifiche del rischio. In questo senso, ai fini di limitare e circoscrivere il più possibile i termini di incertezza che caratterizzano le dinamiche dei fenomeni naturali e l'attuale complessità del territorio su cui essi agiscono, ai due senosiri viene richiesta la capacità di offrire analisi di allagamento strutturate e sistematiche da utilizzare all'interno della modellazione idraulica. E questo in virtù sia di un rapporto privilegiato tra SAR e allagamento legato ai principi di funzionamnto del sensore stesso, sia dell'elevata accuratezza che il sensore LiiDAR offre nella restituzione della morfologia territoriale.
La verifica di tali potenzialità prende forma all'interno del caso studio relativo fenomeno alluvionale che ha interessato la Regione Veneto, e soprattutto la città di Vicenza, nel Novembre del 2010. Su di esso viene operata innanzitutto una analisi dell'approccio locale, tanto sociale quanto istituzionale, al rischio così da poter avere un riscontro più ravvicinato dei limiti posti in luce dalla nuova politica orientata alla resilienza. Dopodichè si realizza l'attività di prototipizzazione, nella quale le immagini derivanti da sensore SAR sono trattate ai fini dell'estrazione di areali di allagamento superficiale, per poi essere incrociati con il dato LiDAR ai fini della stima di tiranti idrici massimi e relativi volumi d'acqua invasati. L'efficacia di tali risultati viene poi validata sulla base del confronto con i rilievi diretti e l'archivio fotografico dell'evento, in modo da poter avere un riscontro sia quantitativo che qualitativo in termini di accuratezza offerta.

I risultati che ne derivano presentano numerosi vantaggi in termini di supporto alla conoscenza del rischio, ma anche dei limiti, che saranno in parte superabili proprio qualora il processo di resilienza trovi affermazione e legittimazione come nuovo approccio al rischio.

2. IL RISCHIO IDROLOGICO-IDRAULICO IN AMBITO URBANO

La crescente frequenza ed intensità con la quale fenomeni a pericolosità natuale si manifestano sollecitando i luoghi e le forme dell'abitare quotidiano porta a dover valutare in termini specifici le dinamiche di rischio a cui gli ambiti urbani e le relative popolazioni risultano attualmente soggetti.

2.1 Stato del rischio ed emergenza in Italia

Le alluvioni, insieme alle frane, rappresentano i fenomeni di pericolosità naturale più frequenti, comportando ingenti danni sia in termini di perdita di vite umane sia in termini di beni materiali: esclusivamente nel periodo gennaio 2009 - agosto 2010 si registra un numero di perdite umane pari a 47 ed un danno complessivo stimato di 2500 milioni di Euro [2]. I fenomeni naturali potenzialmente pericolosi vengono usualmente distinti in due categorie principali: fenomeni di origine endogena correlati a dinamiche interne alla Terra, quali ad esempio eruzioni vulcaniche e terremoti, e quelli di origine esogena che si manifestano sulla sua superficie, quali alluvioni, frane e valanghe. Sotto questo punto di vista e a livello generale il concetto di rischio naturale è da intendersi come manifestazione dell'interferenza tra i suddetti processi, che "naturalmente" si sviluppano sul territorio rimodellandone le forme e tutto ciò che per l'uomo riveste un valore, sia esso fisico, economico, sociale o ambientale.

In questo contesto il tema globale dei cambiamenti climatici e dei suoi effetti sul pianeta non può esser ovviamente ne ignorato ne negato: esso ha di fatto assunto nei nostri giorni una forte rilevanza locale, manifestandosi prima di tutto in termini di precipitazioni molto intense alternate a periodi di siccità medio-lunghi accompagnati da temperature elevate. Tale cambiamento sta comportando di fatto un aggravamento dei livelli di fragilità del territorio italiano, già di per sé caratterizzato da un elevato ed esteso rischio idro-geologico.

Di fatto però, nel vasto quadro delle emergenze connesse al rischio idrologico-idraulico che hanno interessato in tempi più o meno recenti il nostro paese, il fattore "cambiamento climatico" ed i fenomeni naturali in senso stretto ricoprono un ruolo esclusivamente secondario. Ad avere le maggiori responsabilità nell'evoluzione di tali fenomeni sono invece l'incremento dei livelli di vulnerabilità del nostro territorio legati ad un aumento del valore dei beni su di esso presenti. Il sempre più intenso e generalizzato consumo di suolo a favore

dell'urbanizzazione, l'abusivismo edilizio, l'alterazione delle dinamiche naturali dei fiumi mediante opere di regimazione idraulica prive di razionalità e lungimiranza, l'estrazione illegale di inerti, la cementificazione degli alvei, il disboscamento dei versanti: tutti sintomi della presunzione umana di poter adattare la natura a qualsivoglia esigenza antropica su cui è necessario riflettere criticamente.

In quanto tali, sono proprio questi ultimi aspetti che ci obbligano a dover affinare la nostra sensibilità - intesa come sensibilità generalizzata delle comunità - nei confronti di una emergenza che non può e non deve più essere vissuta come evento "straordinario", limitato ai soli territori remoti ed ad altissimo rischio, bensì come qualcosa di "ordinario" ed estremamente legato ai luoghi della nostra quotidianità.

Nella tabella a seguire si riportano i principali eventi di emergenza connessi al rischio idrologeologico-idraulico che hanno interessato il nostro paese nell'ultimo secolo. Ripercorrendo la storia a ritroso fino ai giorni nostri ciò che emerge è un significativo aumento della frequenza di accadimento ed una sempre maggiore concentrazione degli eventi in centro urbani medio-grandi. Di contro si assiste, come ovvio che sia, ad una progressiva dimunzione delle vittime umane dovuto sostanzialmente al cambiamento degli stili di vita e al modo di vivere il territorio, al miglioramento delle capacità economiche delle comunità, ad una conoscenza più sistematica delle dinamiche territoriali e dei fenomeni che possono agire su di esse.

DATA	AREA GEOGRAFICA	VITTIME	CAUSE
22/11/2011 [3]	PROVINCIA DI MESSINA	3 MORTI	Esondazione dei torrenti a causa delle intense precipitazioni. Forti mareggiate lungo le coste.
04/11/2011 [4]	CITTA' E PROVINCIA DI GENOVA	6 MORTI	Esondazione fiumi Bisagno, Fereggiano, Sturla e Scrivia per le intense precipitazioni. Forti mareggiate lungo le coste
25/11/2011 [5]	VAL DI VARA, CINQUE TERRE, LUNIGIANA	12 MORTI	Esondazione/piena dei fiumi Vara, Magra, Taro e altri corsi d'acqua minori, a causa delle intense precipitazioni.
03/03/2011 [6]	MARCHE, TERAMANO E ROMAGNA	5 MORTI	Esondazione/piena dei fiumi Vomano, Tronto, Ete, Chienti, Fiastra, Esino, Misa e altri corsi d'acqua minori, a causa delle intense precipitazioni
31/10-02/11/2010 [7]	VENETO	3 MORTI, 200.000 ANIMALI DECEDUTI	Esondazione del fiume Bacchiglione e altri fiumi minori causata dalle fortissime piogge nell'area prealpina e pedemontana veneta, unite ad una rapida escursione termica con conseguente scioglimento del manto nevoso in area montana
05/10/2010 [8]	COMUNE E PROVINCIA DI PRATO	3 MORTI	Allagamenti dovuti a violento nubifragio
04/10/2010 [9]	PROVINCIA DI GENOVA E SAVONA	1 MORTO	Piogge alluvionali e dissesto idrogeologico
09/09/2010 [10]	COSTIERA AMALFITANA (SALERNO)	1 MORTO	Forti piogge e dissesto idrogeologico
01/10/2009 [11]	PROVINCIA DI MESSINA	36 MORTI	Forti piogge, esondazioni e dissesto idrogeologico
22/10/2008 [12]	CAPOTERRA (CAGLIARI)	4 MORTI	Forti piogge, esondazioni e dissesto idrogeologico
29/05/2008 [13]	VAL PELICE (TORINO)	4 MORTI	Forti piogge, esondazioni e dissesto idrogeologico

23/09/2003 [14]	PROVINCIA DI MASSA CARRARA	1 MORTI	Forti piogge provocano lo straripamento del torrente Carrione
29/08/2003 [15]	PROVINCIA DI UDINE	2 MORTI	Piogge violente concentrate in tempo e spazio dopo estate molto calda
06-23/11/2000	PROVINCIA DI IMPERIA E SAVONA	7 MORTI	Nubifragi
13-16/10/2000 [16]	PIEMONTE, VALLE D'AOSTA, LIGURIA E LOMBARDIA	23 MORTI, 11 DISPERSI, 40.000 SFOLLATI	Intense precipitazioni provocano allagamenti, frane e smottamenti
09/09/2000 [17]	SOVERATO - CALABRIA	13 MORTI, 1 DISPERSO	Straripamento della fiumara Beltrame
05/05/1998 [18]	VALLE DEL SARNO, VALLO DI LAURO - CAMPANIA	159 MORTI	Piogge consistenti e dissesto idrogeologico
14/10/1996 [19]	CROTONE	6 MORTI	Piogge consistenti
19/06/1996 [20]	VERSILIA - TOSCANA	13 MORTI, 1500 SFOLLATI	Forti piogge innescano esondazione del Fiume Versilia e frane di versante con effetti disastrosi nei fondovalle
12/09/1995 [21]	LOMBARDIA NORD-OCCIDENTALE	1 MORTO, 150 SFOLLATI	Violenti piogge causano esondazione di vari corsi d'acqua
12/03/1995 [22]	SICILIA ORIENTALE	11 MORTI, 7 DISPERSI	Torrenti in piena, mareggiate, bufere di vento
05/11/1994 [23]	FIUME TANARO E PO BASSO PIEMONTESE	70 MORTI, 2226 SFOLLATI	Piogge intense provocano esondazione del fiume Tanaro e del Po, dissesto idro-geologico
23/09/1993 [24]	PROVINCIA DI GENOVA	2 MORTI, 3 DISPERSI	Nubifragio provoca esondazione dei torrenti Varenna, Leira ed altri corsi d'acqua del ponente genovese
31/10/1992 [25]	POGGIO A CAIANO - TOSCANA	0	Il torrente Ombrone Pistoiese rompe gli argini la notte del 31 ottobre 1992 inondando l'intero paese
27/09/1992 [26]	GENOVA	2 MORTI	Esondazione dei torrenti Bisagno e Sturla
22/09/1992 [27]	SAVONA, QUILIANO, VADO LIGURE	3 MORTI	Precipitazioni intense provocano lo straripamento dei fiumi Leimbro, il Quiliano, il Segno, il rio Tecci e Sansobbia
15/11/1991 [28]	CAMPI BISENZIO	1 MORTO	Intense precipitazioni provocarono rottura degli argini del fiume Bisenzio con successiva inondazione delle aree circostanti
ESTATE 1987 [29]	VALTELLINA	53 MORTI	Forti e persistenti piogge provocano l'esondazione del Fiume Adda e di alcuni torrenti, nonché l'innesco di alcune frane
19/07/1985 [30]	VAL DI STAVA (TRENTO)	268 MORTI	I bacini di decantazione della miniera di Prestavel ruppero gli argini scaricando 160.000 m cubi di fango sull'abitato di Stava
08-09/11/1982 [31]	PROVINCIA DI PARMA	0 MORTI	Esondazione Fiume Taro a seguito di eccezionali e violente piogge
07-08/10/1977	PIEMONTE E VALLE D'AOSTA	15 MORTI, 2 DISPERSI	Nubifragio
07-08/10/1970 [32]	PROVINCIA DI GENOVA	44 MORTI	A causa di piogge molto intense e localizzate straripano in più punti della città di Genova i torrenti Bisagno, Polcevera, Leira, Chiaravagna e canterana
02-03/11/1968 [33]	BIELLESE, ASTIGNANO	72 MORTI	Intense e prolungate precipitazioni unite alle condizioni di dissesto idro-geologico provocarono la piena del fiume Strona e Quarnasca con conseguente allagamento di tutte le aree circostanti
04/11/1966 [34]	VENETO, TRENTINO E FRIULI	18 MORTI IN TRENTINO	Piogge eccezionali su tutta l'area, unite ad un repentino aumento termico con il rapido disgelo della neve precedentemente caduta in montagna, e ad un fortissimo vento di scirocco che impedì lo sversamento in mare delle acque meteoriche. Esondazione di tutti i fiumi dei bacini dell'Adige, Brenta-Bacchiglione, Piave, Livenza e Tagliamento.
04/11/1966 [35]	FIRENZE - TOSCANA	34 MORTI	Eccezionale ondata di mal tempo
09/10/1963 [36]	VAJONT (LONGARONE, ERTO E CASSO)	1910 MORTI	Una frana di stacca dal Monmte Toc, cade nel bacino della diga e crea un'onda che investe Longarone
23-25/11/1959 [37]	METAPONTO	11 MORTI	Piogge intense provocano esondazione di cinque fiumi contemporaneamente
05/09/1959 [38]	ANCONA	10 MORTI	Violento nubifragio, intense e prolungate precipitazioni con successivo trasporto superciale di detriti
26-26/10/1954 [39]	SALERNO	318 MORTI, 250 FERITI, 5.500 SFOLLATI	Piogge intese provocano la piena dei torrenti e innescano frane
21/10/1953 [40]	REGGIO CALABRIA	51 MORTI, 100 DISPERSI	Evento meteo intenso, predisposizione strati geologici superficiali, orografia, rottura argini.

19/09/1953	GENOVA, VAL DI TREBBIA, PROVINCIA DI PIACENZA	10 MORTI	Nubifragi che provocano l'esondazione del torrente Bisagno e Trebbia
14/11/1951 [41]	POLESINE	84 MORTI	Cause naturali e dissesto del territorio
08/11/1951 [42]	TAVERNERIO	16 MORTI	Intense piogge innescano frana che provocò l'ostruzione e successiva esondazione del fiume Cosia
15/10/1951 [43]	CALABRIA MERIDIONALE ED ORIENTALE	70 MORTI	Evento meteo eccezionale
04/09/1948 [44]	PROVINCIA DI ASTI, ALBA, CHIVASSO E PIEMONTE ORIENTALE	49 MORTI, 400 SFOLLATI	Piogge consistenti provocano l'esondazione dei torrenti Borbore, triversa e fiume Tanaro
13/08/1935 [45]	MOLARE - VALLE DELL'ORBA (PIEMONTE)	111 MORTI	Violenta precipitazione che provocò lo straripamento del lago di Ortiglieto a Molare inondando le campagne in provincia di Alessandria
21/02/1931 [46]	PALERMO	11 MORTI	Precipitazioni di eccezionale intensità e durata insieme a vento di Tramontana provocano lo straripamento dei fiumi Oreto, Kemonia e Papireto che attraversano il centro città con conseguenti allagamenti e crolli trutturali
22/11/1926 [47]	CAMPI BISENZIO	1 MORTO	Precipitazioni intense provocano la rottura degli argini dei fiumi Bisenzio, Ombrone, Pistoiese e del toorente Marinella
01/12/1923 [48]	GLENO - VALLE DI SCALVE (BERGAMO)	356 MORTI	Il pilone centrale della diga di Gleno cedette e le acque del lago artificiale si riversarono nella vallata sottostante.
20/09/1920 [49]	PROVINCIA DI UDINE	0 MORTI	Esondazione dei fiumi Corno, Cormor, Torre, Natisone e altri minori
24/10/1910 [50]	COSTIERA AMALFITANA, SALERNO, ISOLA DI ISCHIA	200 MORTI	Violento nubifragio
17/09/1882 [51]	VERONA, VALLI GRANDI VERONESI, POLESINE	11 MORTI	Intense piogge, modificazioni idrografia montana, venti di scirocco provocarono straripamento del fiume Adige
03/11/1844 [52]	FIRENZE - TOSCANA	/	Esondazione del fiume Arno

Tabella 2.1 - Principali eventi di emergenza idrologico-idraulica in Italia dal 1777 al 2011

Nonostante il numero di vittime umane vada progressivamente diminuendo, il danno prodotto da tali eventi va sostanzialmente aumentando. Questo è dovuto in primis alle cause stesse che stanno determinando l'aumento dei livelli di rischio sul nostro territorio quali ad esempio la presenza generalizzata di edificazione ed attività industriali, commerciali e agricole e zootecniche in aree non idonee. L'elevato valore intrinseco di tali elementi, sia esso economico, sociale o ambientale, porta ad un vertiginoso aumento delle stime di danno e dei relativi fondi pubblici necessari per il funzionamento della macchina dei soccorsi, per l'alloggiamento e l'assistenza agli sfollati, per supportare e risarcire le attività produttive e i cittadini colpiti con l'obiettivo di ripristinare per quanto possibile la realtà pre-evento. L'attuale dimensione del problema viene resa chiaramente se si considera infatti che, solo negli ultimi 50 anni, sono stati spesi più di 16 miliardi di euro[2] per sopperire ai soli danni di origine alluvionale. La tabella a seguire mostra una panoramica recente dell'ammontare di fondi pubblici stanziati in soli 24 mesi per emergenza alluvioni-allagamenti.

N° ORDINANZA PROTEZIONE CIVILE	CONTENUTO	FONDI STANZIATI
3815 del 10/10/2009	Eccezionali avversità atmosferiche ottobre 2009 provincia di Messina (Giampielieri)	60.000.000
3849 del 19/02/2010	Situazione di grave criticità comune di Casamicciola Terme (Napoli) 11/ 2009	38.200.000
3865 del 15/04/2010	Dissesti idrogeologici provincia di Messina febbraio 2010 (San Fratello) e ottobre 2009 (Giampielieri)	70.170.000
3882 del 18/06/2010	Eventi alluvionali regione autonoma Friuli-Venezia Giulia dicembre 2009	1.000.000
3862 del 31/03/2010	Dissesti idrogeologici Regione Calabria febbraio 2010 (Maierato)	15.000.000
3850 del 02/03/2010	Eccezionali eventi meteorologici regioni Emilia-Romagna, Liguria e Toscana dicembre 2009 - gennaio 2010	20.000.000
3848 del 12/02/2010	Interventi urgenti di protezione civile eventi meteorologici Regioni Emilia-Romagna, Liguria e Toscana di dicembre 2009 - gennaio 2010	20.000.000
3847 del 05/02/2010	Eventi meteorologici province Pordenone ed Udine (05/06 2009); province di Treviso e Vicenza (06/2009) e regione autonoma Friuli-Venezia Giulia (12/2009)	10.000.000
3880 del 03/06/2010	Dissesto idrogeologico comune di Belvedere Marittimo (CS) gennaio 2009	700.000
3868 del 21/04/2010	Situazione di emergenza frana di Montaguto (AV)	2.500.000
3899 del 24/09/2010	Eventi atmosferici Veneto	824.400
3903 del 22/10/2010	Contributi per l'alluvione in Liguria	10.000.000
3906 del 13/11/2010	Disposizioni per il maltempo in Veneto	300.000.000
3908 del 24/11/2010	Interventi urgenti per maltempo in Provincia di Salerno dell'8, 9 e 10 novembre 2010	5.000.000
3909 del 4/12/2010	Interventi per il maltempo in Liguria	1.500.000
3911 del 10/12/2010	Interventi per il maltempo in Emilia Romagna e l'alluvione in provincia di Parma	1.500.000
3914 del 22/12/2010	Interventi per il maltempo in Provincia di Salerno (Atrani e Scala)	1.500.000
3912 del 22/12/2010	Interventi per il maltempo in Friuli Venezia Giulia	2.000.000
3915 del 30/12/2010	Interventi per il maltempo in Provincia di Lucca e Massa Carrara	2.500.000
3918 del 18/01/2011	Interventi urgenti di protezione civile per il maltempo in Calabria	7.000.000
3922 del 09/02/2011	Ulteriori disposizioni per maltempo in provincia di Salerno - 8, 9 e 10 novembre 2010	5.000.000
TOTALE		**574.394.400**

Tab. 2.2 - Fondi stanziati (Euro) per le principali emergenze idrogeologiche in Italia da Ottobre 2009 a Febbraio 2011 – [53]

La superficie delle aree ad alta criticità idrogeologica si estende in Italia per 29.517 Kmq, ossia per il 9,8% dell'intero territorio nazionale. Di queste aree, ben 12.263 kmq pari al 4,1% del territorio riguardano esclusivamente il rischio alluvioni. Di seguito si riporta una panoramica di dati utili per la comprensione dello stato di fragilità idrologica del nostro territorio e le relative attività poste in atto dalle amministrazioni locali per la sua prevenzione e mitigazione.

Tali dati, frutto dell'indagine realizzata con frequenza annuale nell'ambito della campagna nazionale di Legambiente e Dipartimento di Protezione Civile [1], permettono di scattare una fotografia dettagliata e aggiornata al Dicembre 2011 del rischio e delle azioni poste in atto per mitigarlo. Particolare attenzione viene posta sull'operato delle Amministrazioni Comunali e questo essenzialmente per due motivi fondamentali: il primo perché, avendo essi un ruolo determinante nelle scelte di pianificazione urbanistica e territoritoriale, sono promotori di una attività decisionale altamente strategica per la mitigazione del rischio idrologico-idraulico; in

[1] Indagine legata a "Operazione Fiumi 2011", campagna nazionale di monitoraggio, prevenzione e informazione sulla mitigazione del rischio idrogeologico realizzata da Legambiente con la collaborazione del Dipartimento di Protezione Civile

secondo luogo perchè il sindaco di ciascun comune rappresenta, come stabilito dalla legge, la prima autorità di Protezione Civile.

I dati prodotti sono frutto della elaborazione di appositi questionari inviati a ciascuna Amministrazione Comunale italiana dai promotori dell'indagine.

REGIONE	COMUNI A RISCHIO	% COMUNI A RISCHIO
Calabria	409	100%
Prov. Aut. di Trento	222	100%
Molise	136	100%
Basilicata	131	100%
Umbria	92	100%
Valle d'Aosta	74	100%
Marche	239	99%
Liguria	232	99%
Lazio	372	98%
Toscana	280	98%
Piemonte	1.049	87%
Abruzzo	294	96%
Emilia Romagna	313	95%
Campania	504	92%
Friuli Venezia Giulia	201	92%
Sardegna	306	81%
Puglia	200	78%
Sicilia	277	71%
Lombardia	929	60%
Prov. Aut. di Bolzano	46	59%
Veneto	327	56%
TOTALE	**6.633**	**82%**

Tab. 2.3 - Comuni a rischio idrogeologico in Italia [54]

ATTIVITA'	NUMERO COMUNI	PERCENTUALE COMUNI
Abitazioni	1.121	85%
Quartieri	403	31%
Industrie	743	56%
Strutture sensibili	257	20%
Strutture ricettive o commerciali	339	26%

Tab. 2.4 - Urbanizzazione delle aree a rischio di frane e alluvioni nei comuni italiani [54]

POPOLAZIONE A RISCHIO	NUMERO COMUNI	PERCENTUALE COMUNI
Oltre 100.000	2	0,1%
Da 50.000 a 100.000	1	0,08%
Da 10.000 a 50.000	9	0,7%
Da 1.000 a 10.000	121	9%
Da 100 a 1.000	340	26%
Da 1 a 100	655	50%
0	169	13%
Indeterminato	19	1%

Tab. 2.5 - Numero di cittadini presenti in aree a rischio [54]

Come emerge dai dati relativi al numero di cittadini presenti in aree a rischio, il livello di urbanizzazione delle aree più fragili ed esposte a rischio risulta molto pesante. Per contro, come si potrà constatare dalla tabella a seguire, non si nota nei fatti una decisa ed efficace inversione di tendenza nella gestione del territorio. Gli interventi di delocalizzazione di strutture risultano nel complesso davvero molto esigui mentre la quantità di opere per la messa in sicurezza del territorio risulta abbastanza elevato. Va sottolineato però che tali interventi, se non realizzati adeguatamente e sulla base studi capaci di valutarne gli effetti a scala di bacino, rischiano in molti casi di accrescere la fragilità del territorio piuttosto che migliorarne le condizioni, trasformandosi in alibi per continuare ad edificare nelle aree golenali ed in prossimità degli alvei.

ATTIVITA'	NUMERO COMUNI	PERCENTUALE COMUNI
Delocalizzazione di abitazioni	56	4%
Delocalizzazione di fabbricati industriali	29	2%
Manutenzione	912	69%
Opere di messa in sicurezza	926	70%
Recepimento PAI nel piano urbanistico	1035	79%

Tab. 2.6 - Attività realizzate dai comuni italiani per la prevenzione da frane e alluvioni [54]

Di particolare importanza risulta anche l'organizzazione del sistema locale di protezione civile, quale strumento fondamentale per rispondere all'emergenza in maniera efficace e tempestiva. Affatto secondario è inoltre il ruolo dell'informazione alla popolazione sui rischi che riguardano il territorio, sui comportamenti da dottare in caso di pericolo, sui contenuti del piano d'emergenza e la formazione del personale addetto.

ATTIVITA'	NUMERO COMUNI	PERCENTUALE COMUNI
Piano d'emergenza	1.083	82%
Aggiornamento del piano d'emergenza	655	50%
Recepimento sistema allertamento regionale	931	71%
Sistema di monitoraggio e allerta	599	46%
Struttura di protezione civile H24	635	48%
Attività di informazione	429	33%
Esercitazioni di protezione civile	375	29%

Tab. 2.7 - Pianificazione comunale d'emergenza, allertamento, attività d'informazione, esercitazioni [54]

Per ultimo si riporta a titolo semplicemente informativo una tabella che mette a confronto, per i maggiori paesi europei compresa l'Italia, il grado di esposizione alle alluvioni del tipo tsunami, mareggiata e straripamento di fiumi espresso in percentuale della superficie interna nazionale. Come si potrà osservare, la situazione italiana rappresenta forse la più preoccupante.

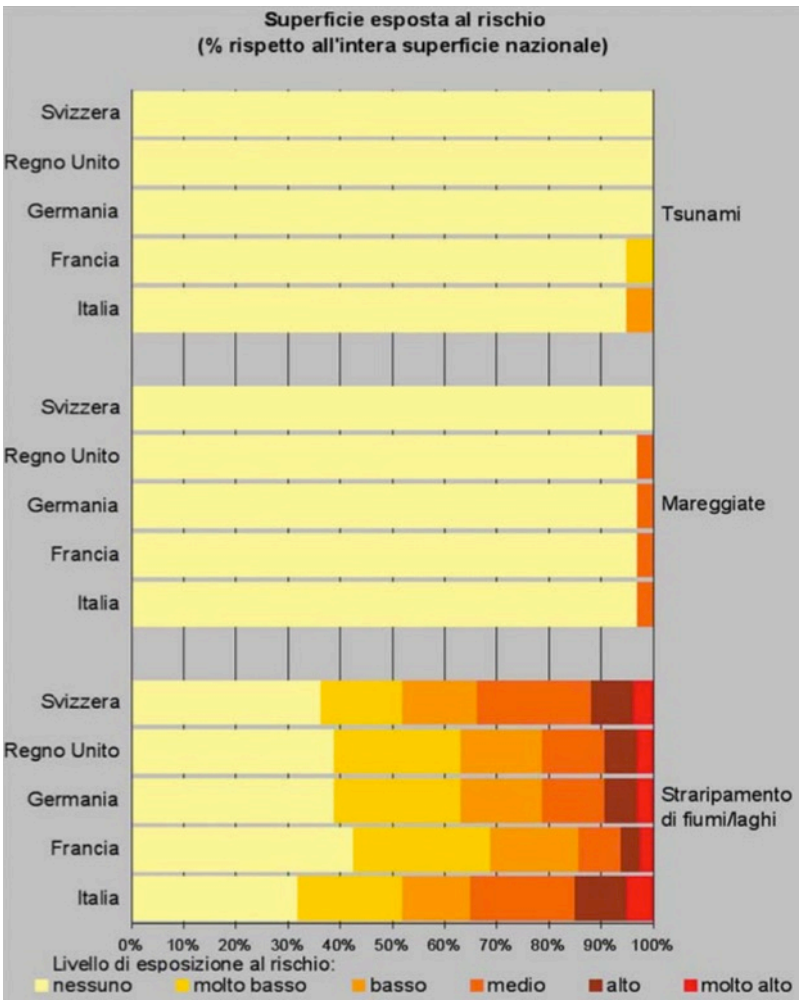


Fig. 2.1 - Percentuale di superficie totale nazionale esposta a rischio [55]

2.1 Definizioni

2.2.1 Rischio e fenomeni associati

Il concetto di "rischio" può essere definito come la minaccia ad un qualsiasi bene conseguente alla possibilità che un evento disastroso si verifichi [56].
Da tale assunto si conclude come il "rischio" sia di fatto un termine di natura complessa in quanto contiene in sè sia la probabilità di accadimento di un certo evento indesiderabile - ossia la pericolosità - sia le conseguenze del manifestarsi di quel particolare evento – ossia il danno. La conseguenza diretta di tale considerazione è che il rischio sarà di fatto nullo se insiste su un'area in cui non esistono beni con un valore comunemente riconosciuto, sui quali un certo evento sfavorevole possa avere conseguenze più o meno gravi. In tal caso, si parlerà esclusivamente di "pericolosità" dell'evento. Tale distinzione deriva dal fatto che il possibile evento sfavorevole può essere vissuto come fatto dannoso piuttosto che come semplice evento naturale esclusivamente se, singoli o comunità, lo "percepiscono" come tale. La percezione e l'accettazione del rischio associato ad una determinata situazione è una componente fondamentale che dipende da molti fattori tra i quali [57]:

- la possibilità di assumere volontariamente il rischio
- la familiarità dei soggetti con la situazione che li minaccia
- il numero di persone coinvolte
- la loro predisposizione psicologica e culturale alla sopportazione del fatto dannoso
- l'episodicità ovvero la persistenza della condizione di pericolo, la vicinanza del pericolo

Nel caso del rischio idrologico-idraulico, l'evento sfavorevole a cui si fa riferimento è nella fattispecie il fenomeno alluvionale, dove per "alluvione" si intende *"…l'allagamento temporaneo, anche con trasporto ovvero mobilitazione di sedimenti anche ad alta densita', di aree che abitualmente non sono coperte d'acqua. Cio' include le inondazioni causate da… ogni altro corpo idrico superficiale anche a regime temporaneo, naturale o artificiale… ed esclude gli allagamenti non direttamente imputabili ad eventi meteorologici.*[2]"

La norma legittimizza altresì la differenza sopra accennata tra pericolosità e rischio di alluvione: la prima viene definita come "*la probabilita' di accadimento di un evento alluvionale*

[2] Art.2, Comma 1, lettera a), Decreto Legislativo 23 Febbraio 2010, n.49 – "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni"

in un intervallo temporale prefissato e in una certa area" [3], mentre la seconda come "*la combinazione della probabilita' di accadimento di un evento alluvionale e delle potenziali conseguenze negative per la salute umana, il territorio, i beni, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attivita' economiche e sociali derivanti da tale evento*" [4].

I fenomeni alluvionali possono essere distinti in vari tipi a seconda delle cause scatenanti:

- **Straripamento di alvei fluviali**

  Fenomeni di pioggia intensa e/o prolungata nel tempo, eventualmente anche in concomitanza di acque di fusione di nevi o ghiacciai, possono nel complesso determinare un aumento considerevole delle portate in transito su un alveo fluviale: i volumi d'acqua che se ne originano possono tracimare o fare collassare gli argini, inondando le zone circostanti [5]. Tale fenomeno, di per sé di origine naturale, ha effetti che possono essere fortemente e negativamente influenzati dagli interventi antropici precedentemente realizzati sul letto del corso d'acqua e sulle aree circostanti.

- **Collasso di sbarramenti**

  Le cause più frequenti del cosiddeto fenomeno di *dam-breaking* ossia della rottura di dighe ed argini sono da ricondursi all'accumulo di elevati volumi d'acqua tali da esercitare notevoli spinte sulle pareti di invasi o sui sistemi di deviazione dei deflussi.

  Nel caso di arginature possono verificarsi diversi tipi di rotture:

  - Per tracimazione: rotture che si verificano quando il livello idrico nell'alveo supera il coronamento dell'argine portando l'opera a rottura. Ciò avviene in caso di superamento dei valori di progetto delle opere di sbarramento in termini di portata e/o livello idrometrico in seguito a piene eccezionali oppure a causa di

[3] Art.2, Comma 1, lettera b), Decreto Legislativo 23 Febbraio 2010, n.49 – "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni"

[4] Art.2, Comma 1, lettera c), Decreto Legislativo 23 Febbraio 2010, n.49 – "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni"

[5] I volumi tracimati possono dare formazione alle c.d."flood plains" o golene che, consentendo il temporaneo accumulo d'acqua in eccesso, riducono il picco dell'onda di piena, effettuando un vero e proprio processo di laminazione. Il processo di laminazione in senso stretto afferisce al campo degli interventi strutturali per la mitigazione del rischio idrologico-idraulcio: esso ha la funzione di provvedere alla detenzione dei volumi di piena nella parte montana del bacino per poi rilasciarli a valle in maniera controllata sia nel tempo che in termini di portate secondo valori compatibili con la sufficienza idraulica del corso d'acqua. [58]

sottodimensionamento ed errori di progettazione, quali anche la mancata costipazione [6] dell'opera.

- Per erosione: rotture che interessano principalmente il piede dell'opera
- Per filtrazione: rotture determinate dalla formazione di percorsi preferenziali di deflusso attraverso l'opera che mettono in luce probabili errori di prettazione, piene persistenti o danni arrecati da animali (topi muschiati che minano le fondazioni, calpestio di bestiame).

Nel caso di dighe, nonostante l'opera di sbarramento riesca a volte reggere l'urto, l'inondazione può essere innescata dall'onda di piena causata dalla caduta nel bacino artificiale di frane, massi o blocchi di ghiaccio [7].

- **Inondazioni da mare e da estuario**

  L'effetto combinato di fenomeni di alta marea, condizione climatiche particolarmente estreme ed eventi rari come il verificarsi di onde di maremoto o tsunami può minare e travolgere le difese naturali o artificiali dei litorali mettendo in serio pericolo la vita di quanti risiedono in prossimità delle aree costiere. Nel caso specifico delle inondazioni da estuario la causa va ricercata nell'effetto dominante delle alte maree che va ad sotacolare il naturale deflusso del corso d'acqua in mare.

- **Sesse**

  Quando il vento soffia costantemente e con forte intensità da una stessa direzione sposta gandi masse d'acqua innalzandole verso una sponda e deprimendole verso l'altra: se il vento cessa improvvisamente, l'equilibrio si spezza causando l'oscillazione dell'acqua e la sua fuoriuscita.

[6] Il procedimento di costipazione o costipamento del calcestruzzo ha la funzione di garantire al conglomerato fresco la maggior compattezza, omogeneità e densità possibile sulla base di un idoneo progetto di miscela che abbia la classe di consistenza richiesta dal progettista.. Il grado di costipazione raggiunto durante la messa in opera influenza notevolmente la resistenza finale del calcestruzzo.

[7] Un esempio di questo genere è stata la catastrofe del Vajont, avvenuta nel 1963.

- **Fuoriuscita di acque di fusione di ghiacciai**

  In periodi di disgelo, alimentati da attività vulcaniche o dal progressivo riscaldamento dell'atmosfera, i laghi subglaciali si svuotano e le masse d'acqua accumulatesi precipitano a valle.

- **Sovraccarico idraulico e allagamenti localizzati della rete di drenaggio urbano minore**

  Quando la rete fognaria, normalmente concepita per far defluire acque di precipitazione con tempi di ritorno relativamente esigui, è sottoposta a nubifragi, rovesci di pioggia più intensi e ravvicinati, o viene investita del compito di smaltire acqua derivante da corpi idrici collassati o tracimati, viene sottoposta ad una pressione tale da non riuscire più ad ottemperare ad i suoi compiti, causando così allagamenti anche in ambito urbano.

  Va sottolineato però che la capacità di smaltimento propria del sistema di drenaggio va progressivamente peggiorando nel tempo: nelle città Europee sono sempre più frequenti i casi in cui, a causa della impermeabilizzazione del suolo urbano, dell'inadeguatezza delle attività di manutenzione, dell'insufficienza idraulica, del deterioramento strutturale dei collettori e di difetti costruttivi, si assiste ad allagamenti urbani localizzati dovuti all'incapacità della rete di smaltire deflussi generati da acque zenitali anche di scarsa entità.

- **Innalzamento del livello freatico e sprofondamenti del terreno**

  L'innalzamento del livello freatico fino in superficie, particolarmente accentuato nel caso di suoli molto permeabili, è causato in genere da piogge intense e molto prolungate nel tempo. Nella maggior parte dei casi, i volumi d'acqua in eccesso derivanti dall'affioramento della sorgente vengono assorbiti dal terreno stesso, senza turbare il normale svolgimento delle attività sociali ed economiche nelle zone limitrofe.

  Lo sprofondamento del terreno è, invece, la conseguenza di un'eccessiva captazione di acque sotterranee, gas, petrolio o qualsiasi altra forma di sostanza dotata di volume, da parte del suolo.

2.2.2 Unita' minima d'indagine: il bacino idrografico

Nei problemi di rischio idrologico-idraulico l'unità fisiografica fondamentale a cui far riferimento è il bacino o una parte ben definita di esso detta sotto-bacino. Il bacino idrografico, mediante il complesso di collettori che formano il reticolo idrografico, è definito come il luogo dei punti che raccoglie l'intero apporto di precipitazioni che verranno convogliate sotto forma

di deflusso verso il punto estremo di valle del reticolo detto sezione di chiusura del bacino. Come stabilito infatti nel primo articolo delle "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo" (Legge 18 maggio 1989, n. 183) si definisce bacino idrografico: *"il territorio dal quale le acque pluviali o di fusione delle nevi e dei ghiacciai, defluendo in superficie, si raccolgono in un determinato corso d'acqua direttamente o a mezzo di affluenti, nonché il territorio che può essere allagato dalle acque del medesimo corso d'acqua, ivi compresi i suoi rami terminali con le foci in mare ed il litorale marittimo prospiciente; qualora un territorio possa essere allagato dalle acque di più corsi d'acqua, esso si intende ricadente nel bacino idrografico il cui bacino imbrifero montano ha la superficie maggiore"*.

Ciò è possibile in quanto il bacino stesso è separato dalle aree adiacenti tramite versanti o pendici, ossia displuvi naturali o artificiali che impediscono o regolano il flusso d'acqua da un'area all'altra. Tali displuvi prendono il nome di spartiacque topografico o freatico a seconda se si faccia riferimento rispettivamente al bacino idrografico superficiale-imbrifero ovvero sotterraneo-idrogeologico. Il bacino idrografico superficiale e quello sotterraneo non necessariamente coincidono. Nel primo caso la linea di spartiacque può essere definita come la linea più elevata separante il bacino imbrifero dai bacini contermini, unendo le massime quote relative secondo la minore pendenza. Mentre la delimitazione del bacino è di carattere relativamente semplice quando ci si riferisce al solo scorrimento superficiale, risulta invece notevolmente più difficoltoso delimitare lo spartiacque freatico o sotterraneo: l'individuazione della linea che delimita il sistema idrico sotterraneo scolante verso la sezione di chiusura del bacino può essere determinata esclusivamente mediante approfondite indagini idro-geologiche.

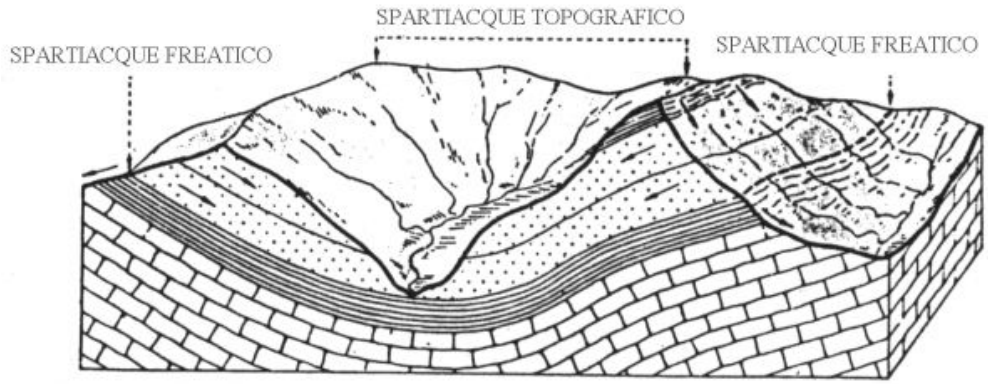


Fig. 2.2 - Differenze fra spartiacque topografico (o superficiale) e freatico (o sotterraneo) [60]

Il bacino idrografico può essere definito in base alle seguenti caratteristiche [59]:

- Caratteristiche morfometriche o topografiche
- Caratteristiche geologiche e litologiche
- Caratteristiche di copertura vegetale del suolo
- Caratteristiche dovute alle modificazioni antropiche

Tra le varie caratteristiche morfometriche di un bacino idrografico si annoverano innanzitutto le sue possibili ***dimensioni planimetriche*** quali:

- *Area o Superficie del bacino* A_b : la superficie della proiezione orizzontale del bacino idrografico chiuso alla sezione di chiusura del corso d'acqua
- *Perimetro P* : lunghezza della proiezione orizzontale di tutto il contorno dello spartiacque del bacino idrografico
- *Lunghezza dell'asta fluviale principale* L_a : l'asta fluviale principale [8], identifica il percorso dei deflussi più importante nel bacino, lungo il quale dovrebbero anche defluire le portate maggiori. Nella fattispecie quindi la lunghezza L_a è misurata considerando il "percorso idraulicamente più lungo" partendo dallo spartiacque sino alla sezione di chiusura.

Per quanto riguarda le caratteristiche morfometriche relative alla ***forma*** del bacino è possibile individuare i seguenti coefficienti:

- *Rapporto di circolarità*: rapporto tra l'area del bacino e l'area del cerchio di uguale perimetro P

$$R_c = \frac{4\pi A_b}{P^2} = 12.6\frac{A_b}{P^2}$$

- *Rapporto di uniformità*: rapporto tra il perimetro P e la circonferenza del cerchio di uguale area

$$R_u = \frac{P}{2\sqrt{\pi A_b}} = 0.28\frac{P}{\sqrt{A_b}}$$

[8] Per asta fluviale principale della rete si intende la successione più lunga di segmenti che uniscono una sorgente – ossia un punto della rete posto alla estremità di monte - alla sezione di chiusura del bacino [60]

- *Fattore di forma*: rapporto tra l'area del bacino ed il quadrato della lunghezza dell'asta fluviale

$$R_f = \frac{A_b}{L_a^2}$$

- *Rapporto di allungamento*: rapporto tra il diametro del cerchio di uguale area del bacino e la lunghezza dell'asta fluviale

$$R_a = \frac{2\sqrt{A_b}}{L_a\sqrt{\pi}} = 1.13\frac{A_b}{L_a}$$

Un'ulteriore caratteristica morfometriche del bacino è quella relativa alla sua ***altimetria***, rispetto alla quale è possibile definire i seguenti aspetti:

- Altezza Media:

$$\overline{z} = \frac{1}{A_b}\int_0^{A_b} z dA$$

- *Altezza Mediana*: è l'altezza z_{50} tale che il 50% della superficie del bacino ha una quota $z > z_{50}$ e il restante 50% della superficie del bacino ha una quota $z < z_{50}$

- *Curva Ipsometrica o Ipsografica*: ogni punto della curva rappresenta in ordinata una quota z del bacino ed in ascissa la superficie totale delle parti di esso aventi quota maggiore di z

- *Rilievo*: differenza di quota fra il punto più elevato dello spartiacque e la sezione di chiusura del bacino, ossia la quota valliva più bassa. Definibile come $(\Delta z)_{\max}$

Altra caratteristica morfometrica importante del bacino è la ***pendenza media***, sia relativa al bacino che all'asta fluviale principale. Per quanto riguarda la prima questa è definibile sulla base di due metodi esposti a seguire:

- *Metodo di Alvard-Horton*: secondo tale metodo la pendenza media del bacino può essere difinita secondo la formula che segue

$$i_m = \frac{\Delta z L}{A_b}$$

dove

Δz è la differenza di quota tra le curve di livello

L è la lunghezza dello sviluppo totale delle curve di livello all'interno del bacino

- *Metodo del reticolo*: tale procedura consiste nel sovrapporre al bacino individuato sulla carta topografica un reticolo a maglie quadrate. Per ogni nodo del reticolo si individuano le due curve di livello più vicine, si misura la minima distanza tra queste due curve e si calcola la pendenza associata a ciascun nodo in modo da poter stimare la pendenza media complessiva.

$$i_j = \frac{\Delta z}{d_j} \Rightarrow i_m = \frac{1}{N}\sum_j^N i_j$$

- La ***pendenza media dell'asta principale*** è invece stimabile sulla base della seguente espressione:

$$\sqrt{i_m} = \frac{L_a}{\sum_k \frac{l_k}{\sqrt{i_k}}}$$

dove l_k e i_k sono rispettivamente la lunghezza e la pendenza del k-esimo tratto elementare dell'asta principale.

Per finire, tra le caratteristiche morfometriche del bacino idrografico particolarmente rilevanti, troviamo l'*organizzazione del reticolo fluviale*. Va ricordato che la classificazione di ciascun reticolo si basa innanzitutto sulla definizione di due entità geometriche fondamentali: le aste ed i nodi. Si indica come nodo o la sorgente del corso d'acqua (nodo di sorgente) o una confluenza (nodo di biforcazione) e come asta il tratto di corso d'acqua compreso tra due nodi. Una volta stabiliti i suoi componenti fondamentali, i vari rami fluviali che da essi si originano possono essere suddivisi secondo un ordine gerarchico convenzionale.

I metodi di gerarchizzazione e conseguente classificazione geomorfologica di un reticolo fluviale possono essere di due tipi: "da monte" e "da valle". I metodi più utilizzati sono quelli

da monte e fra essi quelli di Horton e di Strahler. Secondo tale metodo un'asta che non nasce dalla confluenza di altre due è di primo ordine e quindi le aste di primo ordine saranno di conseguenza quelle più lontane dalla sezione di chiusura; un'asta di ordine n e un'asta di ordine $(n-1)$ congiungendosi danno origine a un'asta di ordine n; due aste di ordine n congiungendosi danno origine a un'asta di ordine $(n+1)$. Per ogni bacino idrografico esiste inoltre una relazione fra il numero dei rami fluviali (Nu) aventi un certo ordine e l'ordine (u) stesso: in genere il valore del primo diminuisce all'aumentare del secondo.
La gerarchizzazione del reticolo idrografico è importante principalmente per ottenere la caratterizzazione del grado di sviluppo della rete idrografica nonchè la localizzazione e distinzione dei singoli rami.

Come anticipato, il bacino idrografico è definibile anche sulla base di ulteriori caratteristiche oltre a quelle di tipo morfometrico. Queste ultime, non essendo di fatto sufficienti ad esaminare il vasto quadro di dinamiche che hanno luogo sulla nostra unità fisiografica fondamentale, devono essere necessariamente affiancate da ulteriori strumenti di indagine. Caratteristiche geologiche e litologiche, nonché di copertura vegetale e di antropizzazione del bacino risultano di fondamentale importanza nel momento in cui si tenti di analizzare le possibili dinamiche di trasformazione degli afflussi meteorici in deflusso superficiale nella sezione di un corso d'acqua. La loro importanza è ben spiegata già dal concetto di ***ciclo globale idrologico***, ossia quel vasto quadro di processi di trasporto e trasformazione che interessano l'acqua alla scala di bacino idrografico. In generale nel ciclo idrologico la risorsa "acqua" subisce una serie di trasferimenti e di trasformazioni che interessano l'atmosfera, la superficie del suolo e il sottosuolo.

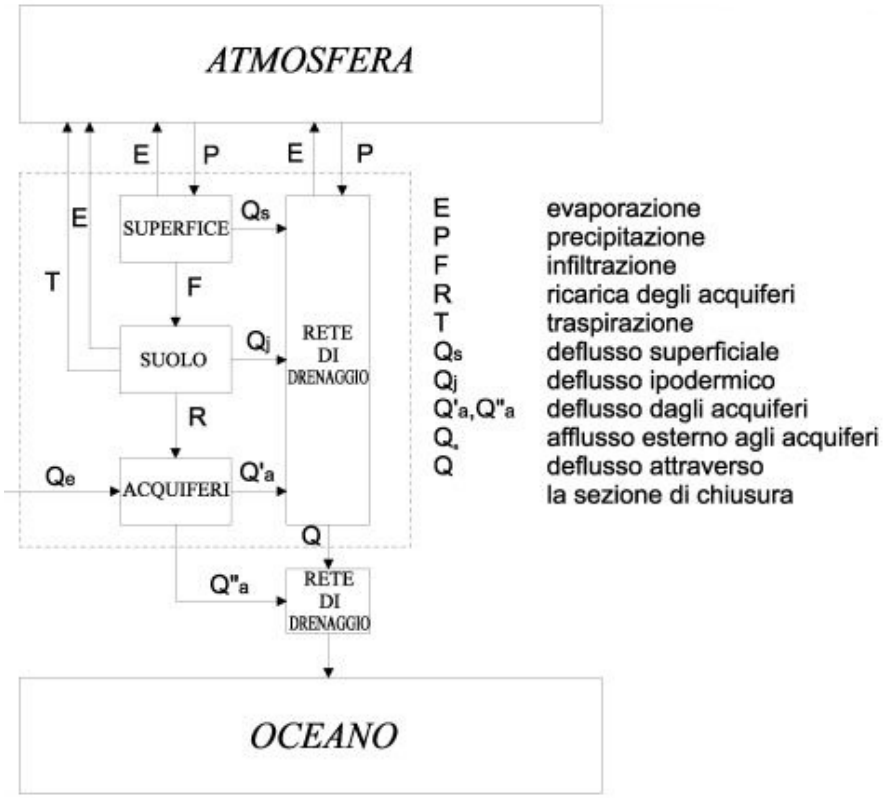


Fig. 2.3 - Schema a blocchi del ciclo idrologico [60]

Il lavoro necessario per la messa in movimento delle particelle d'acqua nel ciclo idrologico è fornito sostanzialmente da due sorgenti di energia: la radiazione solare e la forza di gravità. Queste due forze, mediante la loro conservazione, sono in grado di assicurare la regolarità e l'equilibrio del ciclo globale.

Ogni singola goccia d'acqua, mediante un percorso ciclico che attraversa oceani, atmosfera e terra, viene infatti immagazzinata in un sistema chiuso all'interno del quale subisce cambiamenti di stato da liquido a gassoso o solido e viceversa. I principali processi fisici in gioco sono l'evaporazione, la condensazione, le precipitazioni, l'infiltrazione ed i deflussi. All'inizio di un evento meteorico la precipitazione - sotto forma di pioggia, neve o grandine - è, prima di tutto, in parte trattenuta dalla vegetazione per intercettazione vegetale ed in parte dalle depressioni o piccoli invasi superficiali. Con il proseguire dell'evento la superficie del suolo viene ricoperta da un sottile strato d'acqua, secondo un fenomeno di tipo transitorio detto di detenzione superficiale, dopodichè l'acqua scorre fino a raggiungere il reticolo idrografico mediante il cosiddetto scorrimento superficiale che determina così la formazione del deflusso superficiale.

In ognuna di queste fasi, soprattutto in quella di invaso superficiale, l'acqua può infiltrare nel suolo, facendone variare il contenuto idrico ossia l'umidità. Una parte dell'acqua di

infiltrazione torna poi in atmosfera per effetto dell'evapotraspirazione, un'altra parte torna in superficie per effetto dell'assorbimento capillare ed il resto raggiunge le acque sotterranee. Tutto ciò premesso per sottolineare che, il volume d'acqua che raggiunge il suolo è funzione di una serie di componenti legate proprio alle caratteristiche del bacino sopra accennate: intensità di precipitazione, copertura vegetale, pendenza, capacità di infiltrazione, permeabilità e contenuto iniziale di umidità. Intensità di pioggia moderate possono essere più efficaci nella penetrazione nel suolo, soprattutto quando esso è molto poroso. Piogge leggere vengono rapidamente perse per evaporazione, mentre elevate intensità, più alte della capacità di assorbimento del suolo, si accumulano sulla superficie e scorrono su di essa portando a condizioni pericolose di erosione, di dissesto idrogeologico e di sovraccarico del sistema di drenaggio urbano.

Nelle aree fortemente urbanizzati si assiste infatti ad un peggioramente esponenziale dei danni causati dal rischio e questo prima di tutto per la sempre più progressiva ed accentuata incompatibilità delle caratteristiche del territorio con le dinamiche naturali.

2.2.3 Gli effetti dell'urbanizzazione sul rischio

Come accennato, l'urbanizzazione ed il vasto quadro di dinamiche ad essa associate, rappresentano uno degli elementi di maggior impatto nel rischio idrologico-idraulico, sia in termini di frequenza di accadimento che di danno prodotto. A livello generale l'*urbanizzazione* può essere definita come il processo di modificazione artificiale dell'uso del suolo nel tempo [62]. La dimensione temporale dell'urbanizzazione viene usualmente quantificata mediante un periodo di progettazione, definito come il periodo di tempo – di solito compreso tra i 15 ed i 25 anni – nel quale i cambiamenti urbani possono essere suscettibili di affidabile previsione.

In particolare la conoscenza delle caratteristiche di impermeabilizzazione e artificializzazione del territorio di riferimento risulta fondamentale proprio in virtù degli effetti altamente negativi che la loro presenza provoca sul *bilancio idrologico* [9] *e ambientale* del bacino idrografico di riferimento, tanto a medio quanto a lungo termine.

Tali effetti si sostanziano essenzialmente in:

- impatto sui fenomeni di piena
- impatto sulla qualità delle acque
- impatto sulla capacità delle risorse idriche superficiali e sotterranee

[9] Il bilancio idrologico lega tra loro, mediante apposita equazione, i volumi d'acqua entranti, uscenti ed accumulati in un volume di controllo ed un intervallo di tempo prestabiliti.

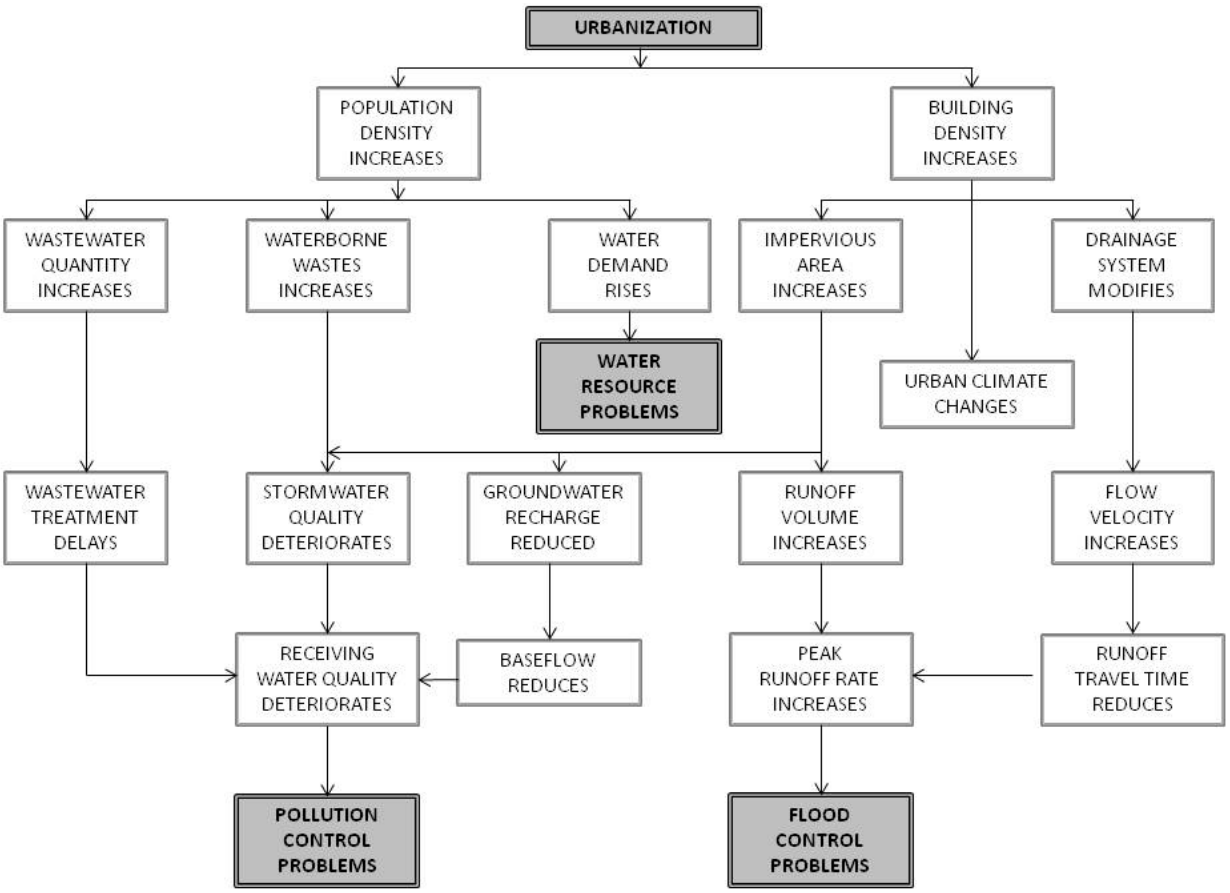


Fig. 2.4 - Impatto idrologico dell'urbanizzazione [62]

Per quanto riguarda l'aggravamento dei fenomeni di piena, la modificazione antropica delle superifici naturali permeabili verso quelle più o meno impermeabili è responsabile degli incrementi sia della quantità che dei volumi di acqua piovana soggetta a deflusso e questo a causa della diminuzione della capacità naturale di accumulo da parte del terreno. Come già detto tale capacità in condizioni "normali" viene assicurata per effetto dei fenomeni di infiltrazione, intercettazione vegetale e accumulo in despressioni superificiali. Dallo schema a seguire è possibile avere una idea immediata degli effetti indotti a lungo termine sul bilancio idrologico a causa dell'urbanizzazione

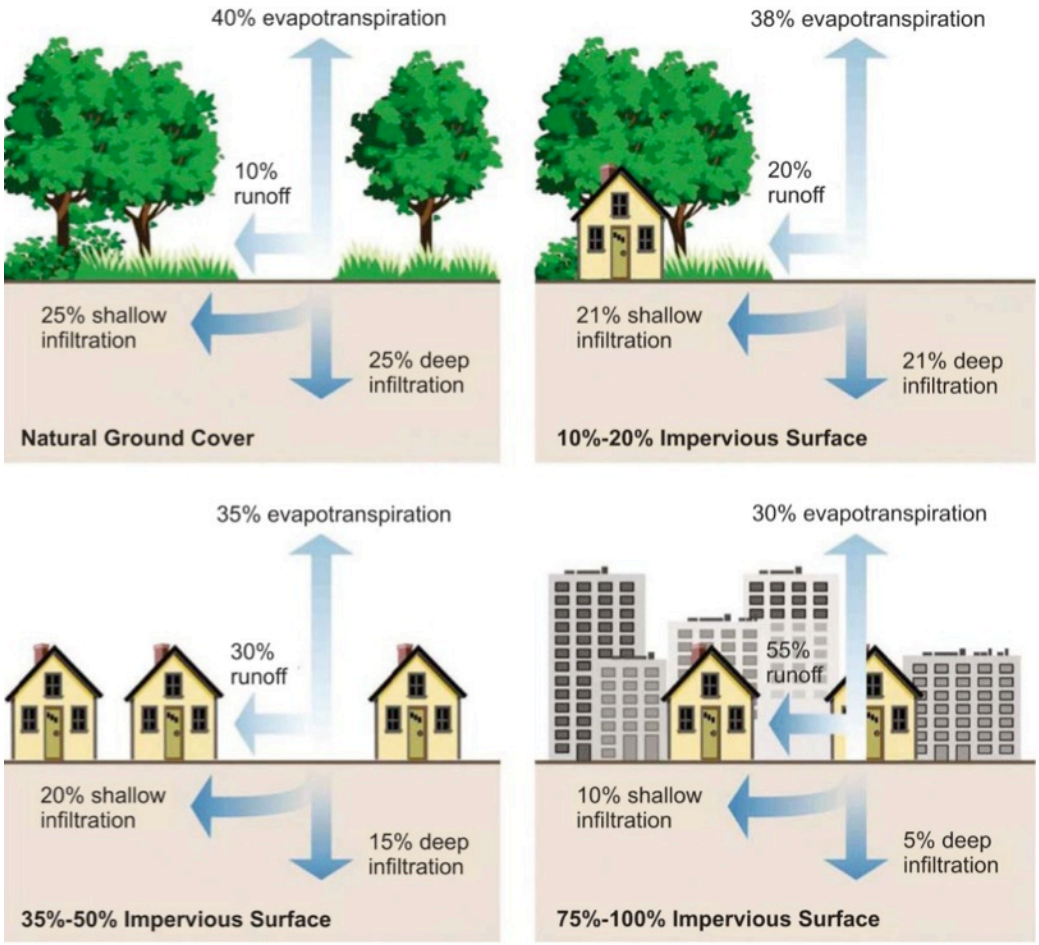


Fig.2.5 - Influenza dell'urbanizzazione sulle diverse componenti del ciclo idrologico [63]

La progressiva artificializzazione della copertura dei suoli nel tempo, partendo ipoteticamente da una situazione di totale copertura naturale fino a giungere, per la stessa area, a livelli di impermeabilizzazione pari al 75%-100%, comporterebbe quindi:

- Incremento dei deflussi dal 10% al 55%
- Decremento della capacità di infiltrazione del terreno dal 50% al 15%
- Decremento della capacità di evapotraspirazione dal 40% al 30%

Tali effetti conducono ad un aggravamento generale del bilancio idrologico del bacino che si manifesta con:

- aumento delle portate al colmo e dei volumi di deflusso
- dimuzione del tempo di corrivazione
- riduzione della ricarica della falda
- aumento della frequenza e dell'intensità delle piene fluviali
- diminuzione delle portate di magra nei corpi idrici ricettori

- regime idrometrico più intermittente nei corpi idrici ricettori

A medio termine inoltre, sempre per quanto riguarda i fenomeni di piena, l'urbanizzazione di un territorio risulta responsabile di:

- rendere più gravosi gli idrogrammi di piena in termini di volumi totali, portate al colmo e rapidità di formazione dei colmi di piena
- aumentare il tempo di ritorno della piena sia in termini di volumi complessivi che portate al colmo, a parità di tempo di ritorno della precipitazione
- aumentare l'erosione dei suoli e dei fenomeni franosi

Le due figure a seguire risultano particolarmente utili per esemplificare quanto affermato relativamente agli effetti a breve termine indotte dall'urbanizzazione sui fenomeni di piena. Esse rappresentano l'evoluzione dei possibili idrogrammi di piena di un corso d'acqua associati ad un progressivo sviluppo urbanistico: notare come i valori di tempo e di portata, all'aumentare dei nuclei urbanizzati, subiscano rispettivamente un forta diminuzione ed un forte aumento.

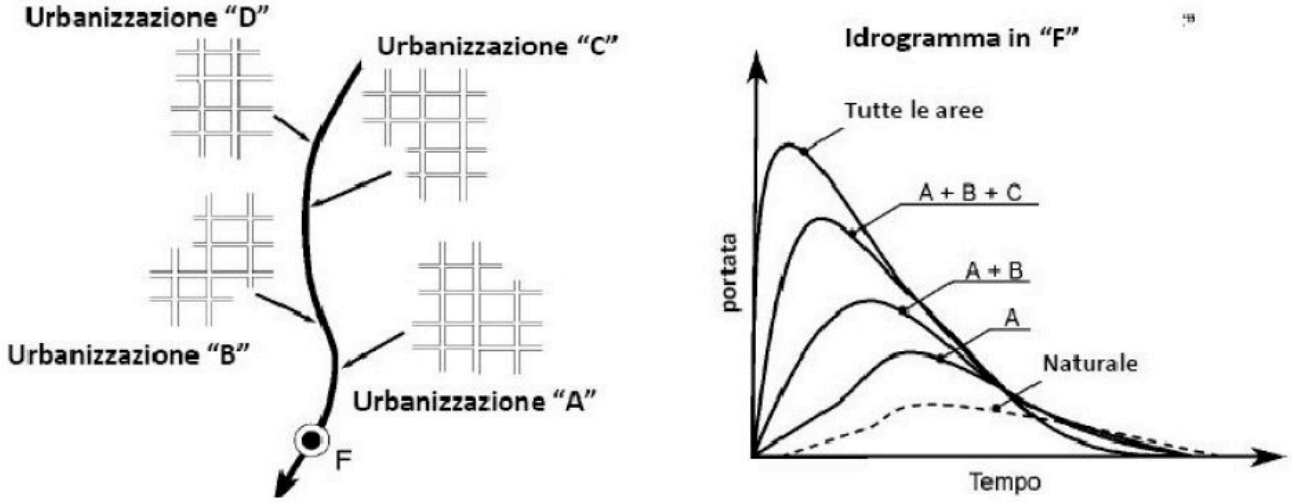


Fig.2.6 - Effetto dell'urbanizzazione sui fenomeni di piena a scala temporale breve [56]

Il secondo tipo di impatto da parte dell'urbanizzazione è quello sulla qualità delle acque, il quale si concretizza prevalentemente attraverso:

- antropizzazione delle aree golenali;
- inquinamento legato al dilavamento delle superfici urbane;

- scarico di rifiuti solidi urbani;
- deperimento della falda acquifera;
- rischio di erosione a causa dell'aumento della portata in tempo di pioggia.

2.3 Quadro nazionale e internazionale di riferimento normativo

Il tema della rischio idrologico-idraulico risulta, proprio in virtù della sua rilevanza in termini di sicurezza per i territori e l'incolumità delle persone, essere affrontata da un vasto e corposo sistema di norme tanto a livello internazionale europeo che nazionale.

L'evoluzione temporale della materia può essere riassunta a seguire:

- Legge 18 maggio 1989, n. 183, "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo"[10] , la quale provvede ad istituire le Autorità di Bacino quali organi competenti in tema di rischio idrogeologico, ad adottare la suddivisione dell'intero territorio nazionale in Bacini idrografici di interesse Nazionale, Interregionale e Regionale, nonché ad inviatare gli organi competenti in materia alla redazione dei "Piani di bacino", adottati dalle Autorità di bacino per i bacini di interesse nazionale ovvero dalle Regioni per tutti gli altri bacini. Il Piano di Bacino in questo modo arriva a configurarsi come il Piano Territoriale di Settore designato a pianificare e programmare norme e azioni finalizzate alla conservazione, difesa e valorizzazione del suolo e della corretta utilizzazione delle acque.

- Decreto Legge 11 giugno 1998, n. 180 convertito in legge, con modificazioni, dalla Legge 3 agosto 1998, n. 267 "Misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania.", meglio conosciuto come Decreto Sarno. Tale provvedimento è stato emanato con l'obiettivo fondamentale di accelerare le procedure previste dalla Legge 183/89 ponendo in essere un intervento straordinario in grado di individuare e risolvere in tempi brevi i problemi relativi a situazioni di rischio idrogeologico già note o facilmente individuabili. Nonostante sia stato emanato per rispondere ad un preciso

[10] successivamente integrata con la Legge 253/90, con il Decreto Legge 398/93 convertito con la Legge 493/93 ed infine abrogata dall'articolo 175 del Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n. 152 – "Norme in materia Ambientale"

evento calamitoso, il succitato Decreto finisce di fatto nel tempo per regolare la problematica della prevenzione dal rischio idrogeologico sull'intero territorio nazionale. Uno delle maggiori novità introdotte dal Decreto Sarno è stata l'istituzione del Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I) e dei relativi Piani Stralcio, con l'obiettivo di ricercare soluzioni quanto più immediate possibile per problemi locali ben individuati e circoscritti, relativi a singoli punti del bacino in cui sono state riscontrate condizioni di pericolo per l'incolumità delle persone e dei beni.

- Decreto del Presidente Consiglio dei Ministri 29.09.98 "Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e 2, del decreto legge 11 giugno 1998, n.180". L'obiettivo fondamentale di tale provvedimento è quello di definire sostanzialmente i criteri generali per la realizzazione del P.A.I in modo da *"…consentire alle Autorita' di bacino e alle Regioni, in primo luogo a quelle ove l'attivita' di pianificazione si trovi all'inizio dell'attivita' conoscitiva, di realizzare prodotti il piu' possibile omogenei e confrontabili a scala nazionale…"*.

- Decreto Legge 12 ottobre 2000, n. 279 convertito in legge, con modificazioni, dalla Legge 11 dicembre 2000, n. 365 "Interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato e in materia di protezione civile, nonché a favore delle zone della regione Calabria danneggiate dalle calamità idrogeologiche di settembre ed ottobre 2000 ".

- Direttiva 2000/60/CE - Direttiva Quadro Europea sulle Acque, finalizzata ad organizzare la gestione delle acque interne superficiali, sotterranee, di transizione e costiere in modo tale da prevenirne e ridurne l'inquinamento, promuovere l'utilizzo sostenibile della risorse, proteggere l'ambiente, migliorare le condizioni degli ecosistemi acquatici e mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità.

- Decreto Legislativo n. 152 del 2006 "Norme in materia ambientale", mediante il quale l'Italia recepisce la Direttiva 2000/60/CE. Particolarmente importante risulta il fatto che, nell'osservanza di quanto stabilito a livello europeo, il il Decreto provvede ad

istituire i Distretti idrografici[11] quale unità territoriale di riferimento per la gestione integrata del sistema delle acque superficiali e sotterranee, nonché individua nel Piano di bacino distrettuale *"lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo ed alla corretta utilizzazione delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche ed ambientali del territorio interessato"*[12].

- Direttiva 2007/60/CE, anche conosciuta come "Direttiva Alluvioni", avente lo scopo di istituire un quadro comune a livello europeo per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni volto a ridurre le conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche connesse con le alluvioni. A tal fine, identifica i Piani di gestione del rischio di alluvioni quale strumento necessario di settore a livello nazionale per ciascun Stato Membro, i quali *"dovrebbero essere incentrati sulla prevenzione, sulla protezione e sulla preparazione...essere riesaminati periodicamente e, se necessario, aggiornati, tenendo conto delle probabili ripercussioni dei cambiamenti climatici sul verificarsi delle alluvioni"*[13]. Inoltre, all'art.18, la stessa Direttiva afferma che *"Gli Stati membri dovrebbero basare le loro valutazioni, le loro mappe e i loro piani sulle <<migliori pratiche>> e sulle <<migliori tecnologie disponibili>> appropriate, che non comportino costi eccessivi, nel campo della gestione dei rischi."*.

- Decreto Legislativo n. 49 del 2010 in recepimento della direttiva 2007/60/CE. Il Decreto disciplina le attività di valutazione e di gestione dei rischi di alluvioni in linea con quanto stabilito a livello europeo. A tal fine esso prevede prevede che siano predisposti appositi piani di gestione del rischio di alluvioni, con obbligo di pubblicazione per le Autorità competenti, entro il 22 giugno 2015.

[11] art.64, Decreto Legislativo n. 152 del 2006

[12] art.65, comma 1, , Decreto Legislativo n. 152 del 2006

[13] art.14 Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio

2.4 La valutazione

2.4.1 Le grandezze del rischio

Come già anticipato il concetto di rischio sussiste esclusivamente laddove si assiste alla concomitante presenza di altri due elementi fondamentali: la "pericolosità" e il "danno". Il primo aspetto è legato alla probabilità di accadimento di un dato evento sfavorevole, mentre il secondo è legato all'eventuale danno che l'evento stesso potrebbe arrecare a beni - in termini di vite umane, beni immobili e mobili, infrastrutture, attività economiche, coltivazioni, beni ambientali e culturali - ai quali singoli e comunità riconoscono un valore, sia esso economico, sociale, ambientale o culturale.
Affinchè il rischio possa essere però di fatto analizzato, stimato, valutato e mitigato, si pone la necessità di individuare una procedura valida, oggettiva e confrontabile per la sua misurazione. A tal fine, è possibile definire il rischio totale in base alla seguente formula:

$$R = E \cdot H(T) \cdot V(h,U)$$

dove

E rappresenta il ***valore esposto*** associato agli elementi a rischio ovvero il ***danno potenziale*** che si subirebbe nell'evenienza di una perdita completa del bene. La sua valutazione varia in base alla natura degli elementi considerati e quindi può essere espresso, a seconda dei casi, come numero, quantità o termine monetario. In generale il valore E può essere definito come:

$E = E(B)$ ossia come la somma del valore dei beni nell'area esaminata che potrebbero essere danneggiati dall'evento.

H rappresenta la ***severità geometrica e meccanica o magnitudo*** dell'evento calamitoso funzione del tempo di ritorno (T) dell'evento stesso ed espressa in funzione di una grandezza caratteristica, quale volume, massa, velocità, energia, oppure secondo una scala relativa. Di fatto la severità di una inondazione dipende da:

- massimo tirante idrico che si realizza durante l'evento, ossia la massima quota raggiunta dall'acqua rispetto al piano campagna

- velocità della corrente idrica che interessa il territorio inondato
- volumi idrici che si invasano nelle aree depresse del bacino
- caratteristiche del territorio inondato quali pendenza, tipologia di suoli e tipi edilizi
- trasporto di materiale solido - al fondo, in sospensione o come materiale flottante - da parte dei deflussi superficiali.

V rappresenta la ***vulnerabilità*** degli elementi a rischio, ossia la capacità di elementi a rischio quali popolazione, edifici, infrastrutture e risorse naturali, di sopportare le sollecitazioni esercitate da un dato evento ed eventualmente di subirne dei danni.

Tale capacità è funzione diretta di:

- tirante idrico h
- velocità media della corrente U
- tipologia e caratteristiche costruttive dei beni

Valutata sotto questo punto di vista la vulnerabilità può quindi essere definita come:

$$V = V(H, B), V \in [0,1]$$

Sulla base di tale formula si otterrà il grado di perdita prodotto su un certo elemento B derivante da un potenziale fenomeno distruttivo di data severità H. Tanto più il valore di V si avvicina ad 1, tanto più si è vicini al massimo pericolo e alla massima perdita; per contro, valori di V vicini allo zero indicano assenza di pericolo e di danno .

Dalla valutazione della vulnerabilità emerge lo stretto legame che intercorre tra rischio e territorio: di fronte ad uno stesso evento di pari intensità, comunità e territori possono rispondere diversamente proprio sulla base della loro forza intrinseca individuale.

Da questa prima formula è possibile derivare altre due grandezze fondamentali per la valutazione del rischio idraulico: la ***pericolosità*** e l'***esposizione***.

La ***pericolosità*** P **di un fenomeno alluvionale**, che è data dal rapporto tra la severità dell'evento e la vulnerabilità degli elementi, viene definita secondo la seguente formula:

$$P = H(T) \cdot V(h, U)$$

come si evince dalla formula, essa è funzione diretta sia del tempo di ritorno (T) dell'evento, ossia l'intervallo di tempo nel quale l'evento calamitoso si verifica in media una sola volta, sia della vulnerabilità $V(h,U)$ degli elementi.

Per completezza va sottolineato che la *pericolosità* può essere valutata secondo due diversi punti di vista:

- *PERICOLOSITA' DIRETTA*: ossia la probabilità che un evento calamitoso di una data severità si verifichi entro un certo intervallo di tempo ed in una zona tale da influenzare l'elemento a rischio.

- *PERICOLOSITA' INVERSA*: data una probabilità di accadimento ossia un dato tempo di ritorno, la pericolosità è data dalla severità dell'evento corrispondente a quel dato tempo di ritorno.

Tutte le definizioni riportate incorporano tre concetti, fondamentali per la comprensione e per la valutazione della pericolosità: il concetto di localizzazione spaziale, cioè il "dove", il concetto di intensità o magnitudo, cioè il "quanto grande" ed infine il concetto di frequenza o ricorrenza, cioè "quando" ovvero "quanto spesso".

L'***esposizione*** D **dei beni a rischio**, che è invece data dal prodotto tra vulnerabilità degli elementi e il loro valore, può essere quindi stimata mediante la seguente formula:

$$D = E \cdot V(h,U)$$

Come già detto il valore E degli elementi può essere calcolato sia in termini monetari sia attraverso altri indicatori di tipo socio-economico e/o ambientale; nel caso venga espresso in termini monetari, la stima dell'esposizione restituisce direttamente il ***danno atteso*** nel caso in cui l'evento sfavorevole considerato si verificasse. Tale aspetto fa di questa una misura prettamente economica piuttosto che di tipo idrologico-idraulico.

2.4.2. Valutare ex lege

Una volta definite le grandezze che intevengono nella stima del rischio e definito il vasto quadro di norme di riferimento in tema di rischio idrologico e più in generale di difesa del suolo, è possibile entrare nel dettaglio delle diverse fasi e tecniche per la valutazione del rischio idrologico-idraulico così come definite dalla normativa. A livello internazionale una precisa definizione della materia già sulla base del "Rapporto UNESCO di Vernes & IAEG" del 1984 in cui viene la pericolosità di un evento naturale viene definita come *"la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo si verifichi in un dato periodo di tempo, in una data area, e con una certa intensità"*.

Il Decreto Sarno prima introdotto, recepisce quanto definito dal Rapporto UNESCO e stabilisce all'art. 1, comma 1, che entro il 30 giugno 1999, le Autorita' di Bacino di rilievo nazionale e interregionale e le Regioni per i restanti bacini adottino, ove non fosse gia' stato provveduto, adottino piani stralcio per l'assetto idrogeologico che contengano in particolare l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico e che in quelle aree, entro la stessa data, vengano comunque adottate misure di salvaguardia.

Proprio a fronte di tale necessità, il D.P.C.M 29/09/1998 provvede quindi come anticipato a definire i criteri generali [14] e le diverse fasi [15] per l'analisi, valutazione e perimetrazione delle aree a rischio.

All'interno delle indicazioni generali la Norma prevede che "*L'individuazione esaustiva delle possibili situazioni di pericolosita' dipendenti dalle condizioni idrogeologiche del territorio puo' essere realizzata..*" :

- mediante *"metodologie complesse, capaci di calcolare la probabilita' di accadimento in aree mai interessate in epoca storica da tali fenomeni"*
- mediante *"la localizzazione e la caratterizzazione di eventi avvenuti nel passato riconoscibili o dei quali si ha al momento presente cognizione."*

[14] art. 1, comma 2.1, D.P.C.M. 29/09/1998

[15] art. 1, comma 2.2, D.P.C.M. 29/09/1998

Per quanto riguarda invece la valutazione del rischio totale essa fa riferimento al prodotto di tre fattori:

- ***pericolosita' P*** o probabilita' di accadimento dell'evento calamitoso
- ***valore E*** degli elementi a rischio, intesi come persone, beni localizzati e patrimonio ambientale
- ***vulnerabilita' V*** degli elementi a rischio che dipende sia dalla loro capacita' di sopportare le sollecitazioni esercitate dall'evento, sia dall'intensita' dell'evento stesso

da cui ne consegue che

$$R = V \cdot P \cdot E$$

Il legislatore sottolinea come si dovrà far riferimento a tale formula solo per la individuazione dei fattori che determinano il rischio totale, *"senza tuttavia porsi come obiettivo quello di giungere ad una valutazione di tipo strettamente quantitativo".*
Inoltre specifica un ordine gerarchico di priorità nella scelta degli elementi a rischio:

1) incolumità delle persone
2) agglomerati urbani comprese le zone di espansione urbanistica
3) aree su cui insistono insediamenti produttivi, impianti tecnologici di rilievo, in particolare quelli definiti a rischio ai sensi di legge
4) infrastrutture a rete e le vie di comunicazione di rilevanza strategica, anche a livello locale
5) patrimonio ambientale e i beni culturali di interesse rilevante
6) aree sede di servizi pubblici e privati, di impianti sportivi e ricreativi, strutture ricettive ed infrastrutture primarie

L'attività di valutazione viene articolata in tre fasi corrispondenti a diversi livelli di approfondimento:

- **fase uno**: *"individuazione delle aree soggette a rischio idrogeologico, attraverso l'acquisizione delle informazioni disponibili sullo stato del dissesto."* Lo scopo di tale fase viene perseguito invitando i valutatori a identificare i tronchi della rete idrografica per i

quali dovrà essere eseguita la perimetrazione delle aree a rischio. Per i tronchi individuati o insieme omogenei di essi dovranno essere presi in considerazione:

- tipologia dei punti di possibile crisi e le caratteristiche idrauliche degli eventi temuti quali *"colate detritiche, piene repentine, alluvioni di conoide, ecc. nei bacini montani; piene dei corsi d'acqua maggiori, piene con pericolo di dissalveamento, piene con deposito di materiale alluvionale, sostanze inquinanti o altro, ecc. nei corsi d'acqua di fondo valle o di pianura"*
- analisi delle caratteristiche del bacino e la tipologia dei beni a rischio
- valutazione dei fenomeni accaduti e del relativo danno atteso
- informazioni disponibili circa gli eventi calamitosi pregressi
- dati idrologici e topografici nonchè gli studi gia' eseguiti

❖ **fase due**: "*perimetrazione e valutazione dei livelli di rischio*". Il primo passo è quello di procedere alla individuazione delle aree potenzialmente inondabili. Tale obiettivo viene perseguito invitando a far ricorso sia alle analisi derivanti dalla fase precedente ma soprattutto al prezioso ausilio di studi idrologici ed idraulici. Le aree così ottenute vengono distinte sulla base di tre possibili livelli di *Pericolosità*, ossia diverse probabilita' di evento caratterizzate da differenti entità del fenomeno piena:

- ALTA → Tempo di ritorno "Tr" di 20-50 anni
- MODERATA → Tempo di ritorno "Tr" di 100-200 anni
- BASSA → Tempo di ritorno "Tr" di 300-500 anni

Come accenato gli strumenti e le tecniche fondamentali a cui far ricorso in questa fase sono prima di tutto gli idrometri[16] ed i pluviometri (o pluviografi)[17], fondamentali per la determinazionae del livelli idrometrici[18], pluviometrici e di portata[19]; tali dati vengono

[16] è lo strumento necessario per poter rilevare le quote idrometriche, cioè l'innalzamento o l'abbassamento del livello dell'acqua di fiumi o laghi. Il più semplice degli idrometri è quello ad asta che è costituito da una barra in lega metallica contrassegnata da tacche numerate che riportano i progressivi riferimenti all'unità di misura in vigore e posta verticalmente a diretto contatto con l'acqua del fiume. Tali strumenti hanno subito una evoluzione verso forme più complesse ed efficienti, quali idrometrografi e teleidrometri che, mediante l'uso di tecnologie laser o ultrasuoni, consentono di letture idrometriche e raccogliere e trasmettere i relativi dati a distanza ed in tempo reale.

[17] Strumento di misura della quantità di pioggia precipitata durante un certo periodo in una determinata località, espressa in altezza di acqua per unità di superficie. La capacità di capacità di registrazione delle precipitazioni varia in base allo strumento utilizzato, arrivando a frequenze anche inferiori alle 24 ore.

[18] si intende la misura del dislivello tra la superficie dell'acqua di un fiume ed un punto di riferimento altimetrico che può essere il livello medio del mare (l.m.m) oppure il riferimento "zero" dell'idrometro stesso (detto zero idrometrico).

[19] La portata di un corso d'acqua il volume d'acqua, espresso in metri cubi, che attraversa, in un minuto secondo, una data sezione del suo alveo.

analizzati ed elaborati dai modelli idrologici ed idraulici per poter prevedere rispettivamente l'evento critico di piena e la simulazione della propagazione dell'onda di piena nelle aree considerate.

Entrando più nel dettaglio risulta utile sottolineare che i modelli idraulici provvedono prima di tutto valutare il fenomeno di *trasformazione afflussi-deflussi*, con il quale si fa riferimento all'insieme di quei diversi processi idrologici che concorrono alla formazione del deflusso superficiale a partire dalla precipitazione meteorica, prima ancora che il deflusso stesso si incanali nella rete idrografica, la quale sarà interessata esclusivamente dalla cosiddetta "precipitazione efficace".

La quantità di precipitazione che arriva al suolo, come già anticipato, viene infatti in parte intercettata dalla vegetazione, in parte infiltra nel suolo, in parte va ad accumularsi in piccoli invasi naturali e/o artificiali (pozzanghere, avvallamenti del terreno, impluvi artificiali); solo la frazione rimanente, infine, va a costituire il deflusso superficiale che scorrerà verso la rete idrografica secondo le linee di massima pendenza del terreno.

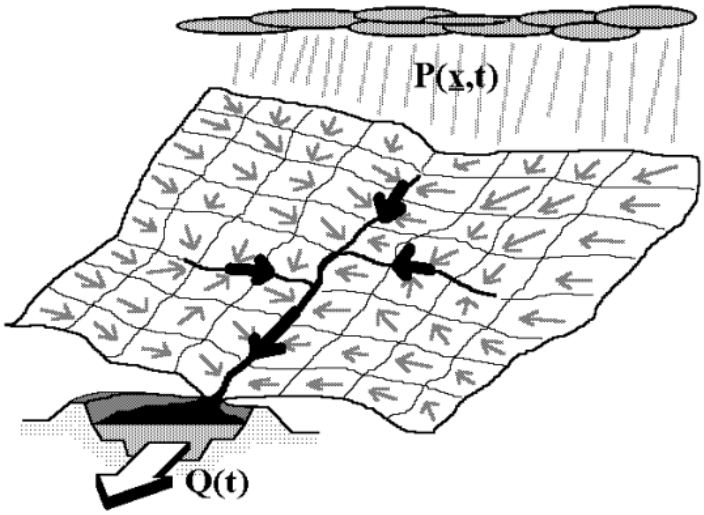


Fig.2.7 - Schema concettuale di trasferimento da precipitazioni distribuite nello spazio e nel tempo ad idrogramma di piena nella sezione di chiusura di un bacino [64]

Avendo quindi come obiettivo principale la stima dei deflussi superficiali, la modellazione della trasformazione afflussi - deflussi si basa fondamentalmente sul calcolo, a partire dalla distribuzione spazio - temporale delle piogge, delle perdite che queste subiscono per intercettazione ed infiltrazione. La valutazione di tali perdite permette di generare, secondo una serie di processi a cascata, il cosiddetto *idrogramma di piena*, che descrive l'evoluzione temporale della portata (m^3/s) dell'asta idrica nella sezione di chiusura. Nel dettaglio l'ingresso principale al modello sarà costituito da una serie di misurazioni di pioggia, di tipo puntuale

(registrazioni pluviometriche) e/o distribuito (radar meteorologico), che dovranno essere interpolate per ottenere l'andamento delle precipitazioni lorde al suolo nello spazio e nel tempo in termini di afflussi per unità di area. La quota parte di tali precipitazioni che andrà in scorrimento superficiale, detta anche *precipitazione efficace* o *deflusso efficace*, verrà poi stimata mediante il modello di trasformazione afflussi - deflussi, che valuterà la quantità di deflusso in ciascun punto del bacino, avente questa ancora le dimensioni di una portata per unità di area. Infine, viene realizzato il processo di concentrazione dei deflussi superficiali nel reticolo idrografico e di trasferimento lungo di esso fino alla sezione di chiusura, stimato tramite un *modello di formazione dell'onda di piena* e generante il già citato *idrogramma di piena*.

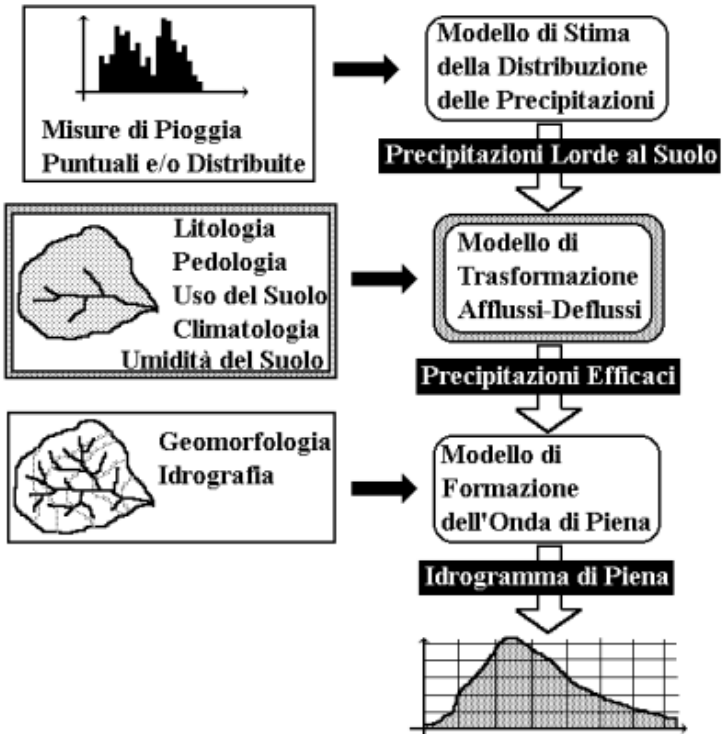


Fig. 2.8 - Schema di flusso della modellazione degli idrogrammi di piena [64]

Il passo successivo è quello poi di ricorrere a modelli idraulici per la simulazione della propagazione dell'onda di piena all'interno del bacino idrografico di riferimento. L'output del modello in questo caso sarà sostanzialmente costituito dalla distribuzione spazio-temporale dei tiranti idrici e delle portate nella rete idrografica e nelle canalizzazioni del sistema di drenaggio (fognature, canalizzazioni, ecc…). Ciò può avvenire ricorrendo a modelli idrodinamici di tipo monodimensionale, bidimensionale o tridimensionale.

I modelli idraulici monodimensionali sono largamente diffusi a livello internazionale nella propagazione dell'onda di piena relativa ad alvei di semplice conformazione. In questo caso la simulazione del moto idraulico viene effettuata assumendo una velocità costante all'interno della singola sezione idraulica ma variabile lungo il corso d'acqua da sezione a sezione. Diversamente, i modelli bidimensionali sono più adatti per tutte le esigenze di simulazione in caso di bacini morfologicamente e strutturalmente complessi, nonchè altamente auspicabili in tutti quei casi in cui l'obiettivo della simulazione sia l'individuazione di aree soggette a pericolosità e rischio di esondazione così come indivuate dai Piani di Assetto Idrogeologici. Tali modelli risultano infatti in grado di restituire un modello più efficace ed attinente alla realtà, reso possibile dall'elevata quantità e qualità di informazioni utilizzate per la costruzione del modello stesso: informazioni di natura topografica, idraulica e geomorfologica del territorio. Proprio grazie ad esse è possibile stabilire, all'interno del modello, una velocità propria di ciascuna sezione che sia caratterizzata non da una bensì da due componenti planimetriche. Per ultimo, i modelli tridimensionali considerano, a differenza dei precedenti, anche la terza componente della velocità in direzione verticale. In questo modo è quindi possibile tener conto di tutte le componenti della velocità nelle tre dimensioni spaziali. Tipici campi di applicazione dei modelli tridimensionali sono rappresentati dalla propagazione delle masse liquide caratterizzate da diversi valori di densità, quale l'intrusione dell'acqua marina in un corso d'acqua dolce, o da diverse condizioni di temperatura, quali lo scarico termico in acque più fredde [65].

Un avolta stabilite individuate le aree potenzialmente interessate dalla propagazione dell'onda di piena, il passo successivo è quello di effettuare su di esse uno studio dei livelli di *Vulnerabilità*. L'individuazione degli elementi esposti a rischio si concretizza con la realizzazione di apposite carte degli insediamenti, delle attività antropiche e del patrimonio ambientale, tenedo fermo l'ordine gerarchico esplicitato dalla Norma in termini di priorità di rischio prima discusso.

L'ultimo passo è quello di procedere infine alla perimetrazione vera e propria delle aree a rischio, resa possibile mediante la sovrapposizione della mappa della pericolosità, ossia delle aree inondabili, con quella della vulnerabilità, ossia la carta degli insediamenti, attività antropiche e patrimonio ambientale. Ai diversi areali di intersezione che ne conseguono è possibile attribuire il livello di rischio più idoneo, stabiliti dalla Norma secondo una scala a gravosità crescente:

- MODERATO R1: danni sociali, economici e al patrimonio ambientale di entità marginale
- MEDIO R2: danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumita' del personale, l'agibilita' degli edifici e la funzionalita' delle attivita' economiche
- ELEVATO R3: problemi per l'incolumita' delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilita' degli stessi, interruzione di funzionalita' delle attivita' socio-economiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale
- MOLTO ELEVATO R4: perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale nochè distruzione di attivita' socio-economiche

❖ **fase tre**: "*programmazione della mitigazione del rischio"*.

Tale fase ha come scopo quello di produrre, per ciascuna classe di area a rischio, analisi ed elaborazioni grafico-documentali mirate a*:*

- individuare tipologie di interventi da realizzare per la mitigazione o rimozione dello stato di rischio
- consentire l'individuazione, programmazione e progettazione preliminare per eventuali finanziamenti di interventi strutturali e non strutturali di mitigazione
- consentire l'apposizione di vincoli definitivi all'utilizzazione del territorio
- definire eventuali misure necessarie di delocalizzazione di insediamenti

"Se opportunamente definite e applicate" le misure di salvaguardia *"consentono un'efficace e positiva azione di governo del territorio e di difesa del suolo, impedendo l'aumento dell'esposizione al rischio in termini quantitativi e qualitativi."*[20]

Risulta importante sottolineare come la valutazione del rischio in ambito urbano risulti estremamente più articolata rispetto all'ambito extra-urbano. Nel primo caso infatti le grandezze da stimare sottendono ragionamenti, analisi e conoscenze di difficile realizzazione e di notevole complessità. Una delle maggiori difficoltà risulta ad esempio la stima della vulnerabilità degli elementi urbani a rischio: in questo caso, diversamente dall'ambito urbano,

[20] art. 1, Premesse, D.P.C.M. 29/09/1998

è fondamentale prevedere non solo il tempo di ritorno e le caratteristiche idrodinamiche dell'evento, ma soprattutto conoscere le diverse tipologie e caratteristiche costruttive dei beni stessi.

Inoltre, data la complessità stessa dei territori urbani, risulta estremamente difficile ma estremamente importante, avere una conoscenza approfondita delle caratteristiche plano-altimetriche della rete di drenaggio urbano maggiore, ossia tutte le vie d'acqua quali strade, piazza, parcheggi, ecc.. e della sua interazione con l'insieme di beni presenti sul territorio.

2.5. La mitigazione

Nella gestione del rischio idrologico-idraulico lo scopo di fatto perseguito è la mitigazione del rischio stesso, dove il verbo "mitigare" viene utilizzato proprio per far riferimento al suo obiettivo di programmare e pianificare sistemi di azioni, interventi e misure volti a ridurre, moderare, attenuare il rischio stesso per la vita umana e per i beni materiali.

Nel perseguimento di tale scopo, la gestione del rischio opera essenzialmente mediante tre attività:

1) **Prevenzione**, finalizzata ad intervenire direttamente sull'allagamento, riducendo la probabilità di accadimento dell'evento
2) **Protezione**, finalizzata ad intervenire sulla vulnerabilità degli elementi esposti, riducendo la probabilità di impatto
3) **Pianificazione di emergenza**, finalizzata ad intervenire sulla gestione del rischio residuo

Nel primo caso si fa riferimento ad ***interventi strutturali***, mentre nel secondo e terzo caso ad ***interventi non strutturali***.

Il successo o il fallimento di un programma di mitigazione del rischio alluvionale dipendono in larga misura dall'integrazione dei due tipi di misure, strutturali e non [58].

2.5.1 Gli interventi strutturali

Per interventi strutturali si intendono quelle misure di competenza ingegneristica che basano la loro azione sulla realizzazione di infrastrutture artificiali appositamente allo scopo di ridurre la probabilità di inondazione di particolari aree all'interno del bacino, aumentando il valore del tempo di ritorno della portata di esondazione. Essi sono quindi finalizzati a

modificare le caratteristiche stesse delle piene responsabili delle alluvioni, tramite il controllo diretto dei corsi d'acqua [58].

Tali interventi lasciano però scoperta una quota di rischio, c.d. richio residuale, dovuta alla loro incapacità di provvedere ad una protezione completa dalla piena: come già accennato ciò dipende non dalla bontà della loro realizzazione, ma dal fatto che nel tempo potrà sempre verificarsi un evento di intensità superiore a quella prevista in fase di pregettazione. Inoltre il loro effetto è la riduzione della frequenza d'accadimento e della gravità delle piene disastrose trascurando però spesso la protezione da eventi minori più frequenti e talvolta anche più dannosi. Per finire gli interventi strutturali creano spesso nelle popolazioni residenti un falso senso di sicurezza: sapere infatti che la probabilità di un evento disastroso è stata ridotta potrebbe portare ad un intensivo sfruttamento delle zone inondabili e conseguentemente, il valore atteso delle perdite potrebbe notevolmente incrementarsi, come nel caso per esempio delle aree urbane [57].

Tra i possili interventi strutturali è possibile citare

- opere di *ingegneria idraulico-strutturale*, fra cui:

  - Rettifiche fluviali: modifica dell'assetto planimetrico di un corso d'acqua, realizzato mediante il taglio di uno o più meandri[21] esistenti, che permette di ottenere maggiori velocità della corrente in prossimità del tratto rettificato con modifica del regime di trasporto solido.
  - Incremento della capacità di convogliamento del corso d'acqua: aumento della sezione trasversale di un corso d'acqua, mediante scavo o arginatura, per contenere in alveo una determinata portata di piena.
  - Serbatoi di laminazione: hanno la funzione di provvedere alla detenzione temporanea dei volumi di piena nella parte montana del bacino e di rilasciarli in maniera controllata a valle con portate ridotte a valori compatibili con la sufficienza idraulica del corso d'acqua.
  - Casse d'espansione: finalizzate alla realizzazione di allagamenti preordinati e razionali degli spazi golenali o delle zone limitrofe al corso d'acqua, rappresentano zone delimitate da un'arginatura, collegate al corso d'acqua da due canalizzazioni che funzionano solo in periodo di piena: un canale immissario che immette l'acqua dal

[21] il meandro è l'ansa formata dal corso del fiume

fiume alla cassa d'espansione ed un canale emissario che restituisce l'acqua dalla cassa d'espansione al fiume stesso.

- Deviazione dei volumi di piena: l'allontanamento di una parte dei volumi di piena avviene mediante un sistema di canalizzazione che convoglia l'acqua in depressioni topografiche limitrofe al fiume dove l'acqua abbia la possibilità di infiltrarsi nel terreno o di evaporare, oppure di essere reinmessa in un lago, in mare o in altro fiume non appartenente al sistema idrico di input.

❖ opere di *ingegneria naturalistica*, che si concretizzano essenzialmente nella sistemazione idraulica del bacino in termini di incremento della stabilità dei pendii, riduzione del trasporto solido e riduzione dell'erosione superficiale attraverso l'impiego di materiali naturali e piantumazione di essenze arboree.

❖ opere di *manutenzione straordinaria*, essenzialmente riguardanti interventi volti alla riparazione, recupero e ripristino di opere di difesa idraulica e versanti di corsi d'acqua regimati e non.

2.5.2 Gli interventi non strutturali

Gli interventi di tipo non strutturale sono definibili come quell'insieme di misure volte a prevenire quelle condizione di uso del territorio che esaltano i fenomeni alluvionali amplificandone gli effetti, ad alleviare i danni alluvionali minimizzando l'impatto delle piene superiori al dato di progetto [57] e a pianificare la gestione del rischio residuale comunque persistente. La competenza in questo caso non è di natura esclusivamente ingegneristica, bensì richiama la partecipazione di un vasto quadro di attori tale è la complessità degli aspetti sui cui agisce. La sua finalità principale è rivolta alla riduzione dell'entità del danno, senza però intervenire sulla regolazione dei regimi di piena. In virtù delle loro finalità, tali tipi di intervento richiedono sempre una preliminare e dettagliata mappatura del rischio.

Le possibili misure non strutturali possono essere distinte in attive o passive a secondo del loro diverso approccio alla mitigazione del rischio:

- *ATTIVO*:
  - Sistemi di previsione e preannuncio: al fine di prevedere in anticipo eventi meteorici particolarmente gravosi in modo da permettere la diramazione di eventuali avvisi di emergenza ed evacuazione alla popolazione.
  - Manutenzione ordinaria: attività periodiche volte ad assicurare l'efficienza dei manufatti, la stabilità delle sponde e l'officiosità dei corsi d'acqua senza ricorrere a interventi strutturali di rilievo.

- *PASSIVO:*
  - Norme d'uso del territorio: ossia la pianificazione del territorio e degli insediamenti nelle aree alluvionabili.
  - Coperture assicurative: volte a ridistribuire i costi della ricostruzione piuttosto che a ridurre direttamente i danni.

3. NUOVA POLITICA: DALLA PROTEZIONE ALLA RESILIENZA

La crescente frequenza con la quale eventi di emergenza alluvioni-allagamenti interessano non solo il nostro paese ma l'intero pianeta ed i sempre più cospiqui danni prodotti a seguito di tali eventi, stanno spingendo la comunità scientifica a ragionare e ad approcciarsi in modo nuovo rispetto al passato al fenomeno del rischio idrologico-idraulico in ambito urbano. In questo senso si sta affermando una nuova politica, che pone le sue basi sull'affermazione del concetto di resilienza al rischio, ossia la capacità di territori e comunità di rispondere attivamente alle crisi ed ai disastri naturali, e allo stesso tempo, di saper anticipare ed adattarsi ai cambiamenti che necessariamente dovranno avvenire.

Ad oggi risulta infatti innegabile che l'utilizzo del territorio avvenga secondo modalità sempre meno compatibili con l'azione delle dinamiche naturali e che tale tendenza costuituisca il primo tra i fattori responsabili dell'aumento dei fenomeni di emergenza legati al rischio, sia in termini di *pericolosità* che di *danno* prodotto.

Potendo ora ricorrere alla terminologia propria della valutazione del rischio, è possibile affermare come l'aumento della *pericolosità* degli eventi alluvionali sia infatti essenzialmente riconducibile a:

- variazioni climatiche, responsabili di eventi meteorici più frequentemente intensi e concentrati
- trasformazioni di tipo estensivo, responsabili dell'aumento delle portate a parità di tempo di ritorno dell'evento
- trasformazioni di tipo intensivo, responsabili dell'aumento del tirante idrico a parità di portata[22];

Di fianco, l'aumento del *danno* causato è attribuibile a:

- aumento del *valore* dei beni esposti al rischio, ad esempio derivante dalla localizzazione di insediamenti residenziali o industriali in aree storicamente inondabili;
- aumento della *vulnerabilità* dovuto alla mancanza di una coscienza del rischio da parte delle comunità, alla sovrapposizione di competenze in capo alle autorità addette alla pianificazione e programmazione del rischio nonchè la costruzione in aree soggette a frana o inondazione.

Tali considerazioni ci rimandano all'idea di un limite dello sviluppo ormai oltrepassato, dal quale è impossibile tornare indietro e sul quale la natura, a intervalli sempre più frequenti, ci obbliga a riflettere.

3.1 Comunita' e territori resilienti al rischio

Alla luce di quanto descritto fin ora, la comunità scientifica nazionale e internazionale è sempre più propensa a valutare l'emergenza idrologico-idraulica, non più come fenomeno straordinario e limitato a contesti remoti, bensì come fenomeno ordinario, legato al "tempo" e al "luogo" della nostra quotidianità.
La nuova *forma mentis* che si sta affermando e verso la quale si spera di riuscire ad indirizzare anche la macchina decisionale è fortemente incentrata sul concetto di *resilienza* al rischio.

[22] Una possibile trasformazione di questo tipo potrebbe essere il restringimento degli alvei mediante criteri di intervento non razionali

Il termine resilienza deriva dal latino *resalio*, iterativo di *salio*, che significa saltare, rimbalzare, per estensione danzare. Il vocabolo trova la sua origine in fisica dei materiali per indicare *"la resistenza a una rottura dinamica determinabile con una prova d'urto"*[66]. Il termine è stato poi adottato in differenti discipline e a livello generale fa riferimento alla capacità di un sistema di adattarsi ad un cambiamento. Nella fattispecie, la resilienza alle inondazioni può essere definità come *"the ability to cope with and recover from a disturbance and to anticipate and adapt to slow changes"* [67] ossia la capacità di far fronte e riprendersi da un evento sfavorevole nonchè anticipare e adattarsi ai piccolo e grandi cambiamenti.

Va sottolineato che la capacità di resilienza non designa la semplice abilità di resistere agli eventi negativi, ma definisce una dinamica positiva volta al controllo degli eventi sfavorevoli mediante il mantenimento di un senso di padronanza profondo che permette di inglobare, acquisire e porre le basi del futuro proprio sul cambiamento stesso [68]. Inoltre, è un termine che fa riferimento non ad una qualità statica, quanto piuttosto a un processo attivo che trova la sua ragion d'essere proprio nella relazione dinamica fra la persona ed il proprio contesto sociale, territoriale ed istituzionale.

Mirare alla costruzione di comunità e territori resilienti al rischio non significa quindi lavorare in vista della loro totale immunità di fronte ad eventi avversi, ma piuttosto puntare su una maggiore consapevolezza delle proprie caratteristiche, limiti e qualità per affrontare le difficoltà di un cambiamento che sicuramente si presenterà. Tale consapevolezza si sostanzia nel prepararsi a rispondere in modo efficace alle avversità che sfidano le proprie risorse ed il proprio ambiente fisico e sociale, raggiungendo nel contempo un livello di funzionamento migliore rispetto alla condizione precedente l'evento critico e mostrandosi capace di ritrovare un equilibrio dopo la situazione di crisi.

Di fatto tale approccio rappresenta una inversione di tendenza nel paradigma della gestione del rischio che ha cominciato ad affermarsi, seppur molto lentamente, a partire dal nuovo millennio: è infatti solo durante la *World Conference on Disaster Reduction* tenuta in Giappone nel 2005[23] che viene posto l'accento sulla capacità di resilienza come risposta alle crisi ed ai disastri naturali che affliggono le comunità ed i territori del pianeta, ed è nella stessa occasione che ha inizio di fatto il dibattito sul rapporto tra resilienza e vulnerabilità.

Va sottolineato che prima di giungere al concetto di resilienza, l'approccio scientifico rispetto alle "cause del disastro" ha subito nel tempo numerose modificazioni, attraversando tre fasi principali: come Atto di Dio prima, poi come Atto della Natura e per ultimo come Atti di

[23] 18-22 Gennaio 2005, Kobe, Hyogo, Giappone

Uomini e di Donne. Nei tempi antichi il disastro era infatti spiegato come manifestazione della rabbia di Dio verso i suoi uomini e ciò implicava che niente poteva esser fatto per prevenirlo o arginarlo. Durante l'Illuminismo invece, con l'avvento della scienza, la causa dei disastri viene attribuita alla Natura: i disastri in questo caso vengono associati ai rischi ed i rischi considerati dei disastri in se stessi. Infine dopo il 1970, l'attenzione viene spostata alla causa antropica e quindi il diastro viene interpretato come conseguenza necessaria della vulnerabilità.

Come anticipato, soltanto recentemente si prenderà in considerazione il concetto di resilienza, secondo un percorso evolutivo abbastanza confuso e non lineare.

In prima istanza infatti, la resilienza veniva strettamente legata alla vulnerabilità, secondo un approccio che valutava entrambe come facce diverse di una stessa medaglia: estremi opposti di uno stesso dominio in cui la vulnerabilità rappresentava il polo negativo e la resilienza quello positivo. Letto secondo questa ottica, ciascun riferimento alla resilienza implicava di fatto anche quello alla vulnerabilità e viceversa.

Recentemente è emersa però l'idea che i due concetti siano assolutamente distinti e indipendenti, erroneamente associati a causa di una interpretazione eccessivamente letterale e a-contestuale della traduzione latina "resilio" [69]. Tale termine venne associato in prima istanza al concetto di "salto indietro" o "bounce back" ed è proprio tale termine che costituisce lo spartiacque tra resilienza e vulnerabilità.

La capacità di "saltare indietro" possiede un limite intrinseco: essa può essere ben adattata ad un materiale plastico[24], ma con estrema difficoltà invece ai sistemi umani e questo perché la materia elastica può essere allungata e deformata e nonostante ciò ritornare poi alla sua condizione iniziale senza aver riportato modificazioni permanenti. I disastri invece sono sempre accompagnati da un cambiamento: anche se la comunità volesse fortemente tornare allo stato precedente il disastro, la modificazione degli aspetti fisici, sociali e psicologici della realtà è ormai avvenuta e ciò rende di fatto impossibile ritornare allo *status quo ante*. La realtà post-disastro, pur riflettendo le conseguenze dirette delle attività di recupero e ricostruzione intraprese, si presenta ai membri della comunità come una nuova realtà, che differisce da quella pre-distastro in diversi aspetti fondamentali. Ed è proprio alla nuova realtà modificata, sia dal disastro stesso che dalla risposta sociale ad esso, che la comunità deve adattarsi.

Se associata al concetto di "salto indietro" la resilienza non prende quindi in considerazione il cambiamento ma si mostra anzi come un ritorno alla vulnerabilità in senso stretto – ossia

[24] la fisica dei materiali, come già detto, è il primo campo in cui si afferma il concetto di resilienza.

come capacità di un elemento o di un sistema di elementi di resistere alle pressioni esercitate dall'esterno e di conseguenza di subirne dei danni - fatta proprio delle stesse condizioni che hanno causato l'evento sfavorevole. Mirare al rafforzamento delle strutture e delle istituzioni per resistere ed opporsi ai disastri viene valutato inoltre come un atteggiamento che potrebbe anche causare l'incremento della fragilità del sistema piuttosto che agevolarne la resilienza allo stato di crisi.

Tutto questo ragionamento conduce invece ad associare la resilienza all'idea di "bounce forward" ossia all'abilità di comunità e terriori di fare un "balzo in avanti" rispetto al disastro, sapersi adattare e sopravvivere cambiando i propri attributi non strutturali e riscostruirsi proprio sulla base del cambiamento: il disastro viene qui visto come un catalizzatore di cambiamenti da inglobare nella propria struttura sociale e territoriale mediante l'incremento delle proprie capacità di dialogo con la natura del rischio, anch'essa in continua evoluzione.

Per ultimo vale la pena sottolineare come la resilienza, essendo un concetto altamente sociale e multi-dimensionale, non possa essere applicato come formula risolutiva a-contestuale ed assoluta bensì necessariamente calibrata ed adattata alle peculiarità di ciascun contesto sociale, territoriale, economico e culturale.

4.1 La mitigazione socialmente giusta

Il concetto di resilienza precedentemente introdotto comporta una sostanziale variazione del punto di vista nella gestione del rischio idrologico-idraulico: la focalizzazione non è più limitata alle carenze, ai bisogni e alle vulnerabilità del territorio e delle relative comunità, bensì centrata sulle potenzialità e le risorse presenti, sulla loro conoscenza approndita in modo da poterle sfruttare al meglio per far fronte e convivere con gli eventi che sicuramente, entro un termine più o meno prossimo, avverranno. Rendere un territorio ed una comunità resilienti al rischio significa quindi lavorare per renderli in grado di reagire e di modificarsi in rapporto alle pressioni provenienti dall'esterno che ne solleciteranno fortemente le strutture e le risorse.

L'approccio "resiliente" viene efficacemente sintetizzato nella frase: "*Thus, the flood risk mitigation framework must be nowadays concerned not only with protecting from floods but also with understanding flood risk, preparing for flood risk and knowing how to live with flood risk*." [1]: la nuova strada da percorrere è quindi quella che tende ad effermare la necessità di comprendere il rischio, prepararsi al rischio e conoscere il modo più adatto per convivere con

esso. Di seguito si riportano schematicamente le principali differenze riscontrabili tra una gestione del rischio classica ed una orientata alla resilienza.

APPROCCIO TRADIZIONALE		APPROCCIO ORIENTATO ALLA RESILIENZA
"COMBATTERE IL RISCHIO"	→	"CONVIVERE CON IL RISCHIO"
MISURE STRUTTURALI DI MITIGAZIONE	→	MISURE NON STRUTTURALI DI MITIGAZIONE
COSTOSO E NON FLESSIBILE	→	ADATTABILE
RESPONSABILITA' STATALE	→	RESPONSABILITA' CIVILE E STATALE

Caratteristiche dell'approccio tradizionale e resiliente a confronto [70]

La crisi dell'approccio classico e l'ascesa dell'approccio "resiliente" sottointendono essenzialmente il discorso effettuato nel paragrafo precedente circa la migrazione dal concetto di vulnerabilità a quello di resilienza.

Nelle ultime due decadi, comunità scientifica, macchina decisionale, *risk managers* e comunità sociale sono progressivamente sempre più coesi nel pensare, soprattutto a fronte dell'esponenziale intensificarsi degli eventi e dei danni, che il solo ricorso a misure strutturali di mitigazione del rischio non stia conducendo ai risultati attesi. La messa in pratica di tali misure si scontra di fatto con innegabili limiti economici, evidenti ritardi temporali di realizzazione e complessità amministrative.

Inoltre l'affermazione del concetto di resilienza, puntando prima di tutto sul riconoscimento delle peculiarità sociali e territoriali come strumento per affrontare e convivere con il rischio, implica una presa di coscienza dei limiti intrinseci dello sviluppo urbano. Le attività ed i modelli di vita antropici hanno condotto ad una progressiva modificazione del territorio secondo forme e finalità che mal si conciliano con i fenomeni naturali: pensare di poter riportare il territorio ad una forma tale da poter consentire ai fenomeni naturali di manifestarsi in tutta la loro pericolosità senza però costituire un rischio, implicherebbe riportare i luoghi della nostra quotidianità ad una conformazione precedente alla presenza dell'uomo sulla terra e ciò non è ne pensabile ne assolutamente possibile. Inoltre, non esiste, allo stato dell'oggi, una misura di difesa strutturale che ci assicurerebbe totalmente dal rischio: ci sarà sempre, nella storia, un evento la cui intensità sarà in grado di mettere in crisi le misure fino a prima considerate ottimali.

Da queste considerazioni muove la crisi dell'apporccio classico alla gestione del rischio idrologico-idraulico, basato essenzialmente, come già anticipato, su un atteggiamento passivo

di protezione e difesa dalle inondazioni, attuato prevalentemente ricorrendo a misure strutturali di mitigazione scelte sulla base dell'efficienza economica.
Di contro, l'approccio orientato alla resilienza è finalizzato a creare una mitigazione del rischio ***socialmente giusta***, capace di costituire il substrato necessario per una convivenza consapevole con il rischio. Tale evoluzione pone le sue basi sull'idea che per produrre politiche di mitigazione del rischio sostenibili si debba far ricorso più frequentemente a misure non strutturali di mitigazione, fin'ora scarsamente analizzate ed evidentemente sottovalutate. Inoltre, particolare attenzione viene rivolta al coinvolgimento attivo della comunità sociale e di tutti i portatori di interessi all'interno del processo decisionale, che conduca ad una redistribuzione più equa delle responsabilità e dei diritti associati ai fenomeni di rischio.

3.2.1 *L'importanza degli interventi non strutturali*

Come anticipato, la finalità principale degli interventi non strutturali è quella di ridurre l'entità del danno.
I danni causati da un alluvione posso essere essenzialmente di 3 tipi:

- fisici
- economici
- ambientali

Mentre in contesti prevalentemente agricoli il danno essenzialmente si risolve in una perdita di produttività agricola, il danno in aree urbane è decisamente piu complesso.
In questo ultimo contesto è infatti possibile distinguere le perdite prima di tutto in 3 tipi di categorie: *primaria*, *secondaria* e *terziaria*.

Dopodichè è possibile operare una seconda distinzione in[71]:

- *Perdite dirette*: risultanti dal contatto diretto con l'acqua di inondazione con edifici ed infrastrutture.
- *Perdite indirette*: risultanti dall'evento ma non dal suo impatto diretto, per esempio, interruzione dei trasporti, perdite econimiche, perdita di redditi familiari.

Per entrambe queste categorie è possibile individuare inoltrre due sottocategorie:

- *Perdite tangibili*: perdita di cose che abbiano un valore monetario ad esempio edifici, bestiame, infrastrutture, mezzi.
- *Perdite intangibili*: perdita di cose che non possono essere ne ri-acquistate ne vendute, per esempio vite, lesioni, eredità, reliquie….

Di seguito viene riportato un elenco delle principali perdite causate da una inondazione, discretizzate in base alle categorie sopra elencate.

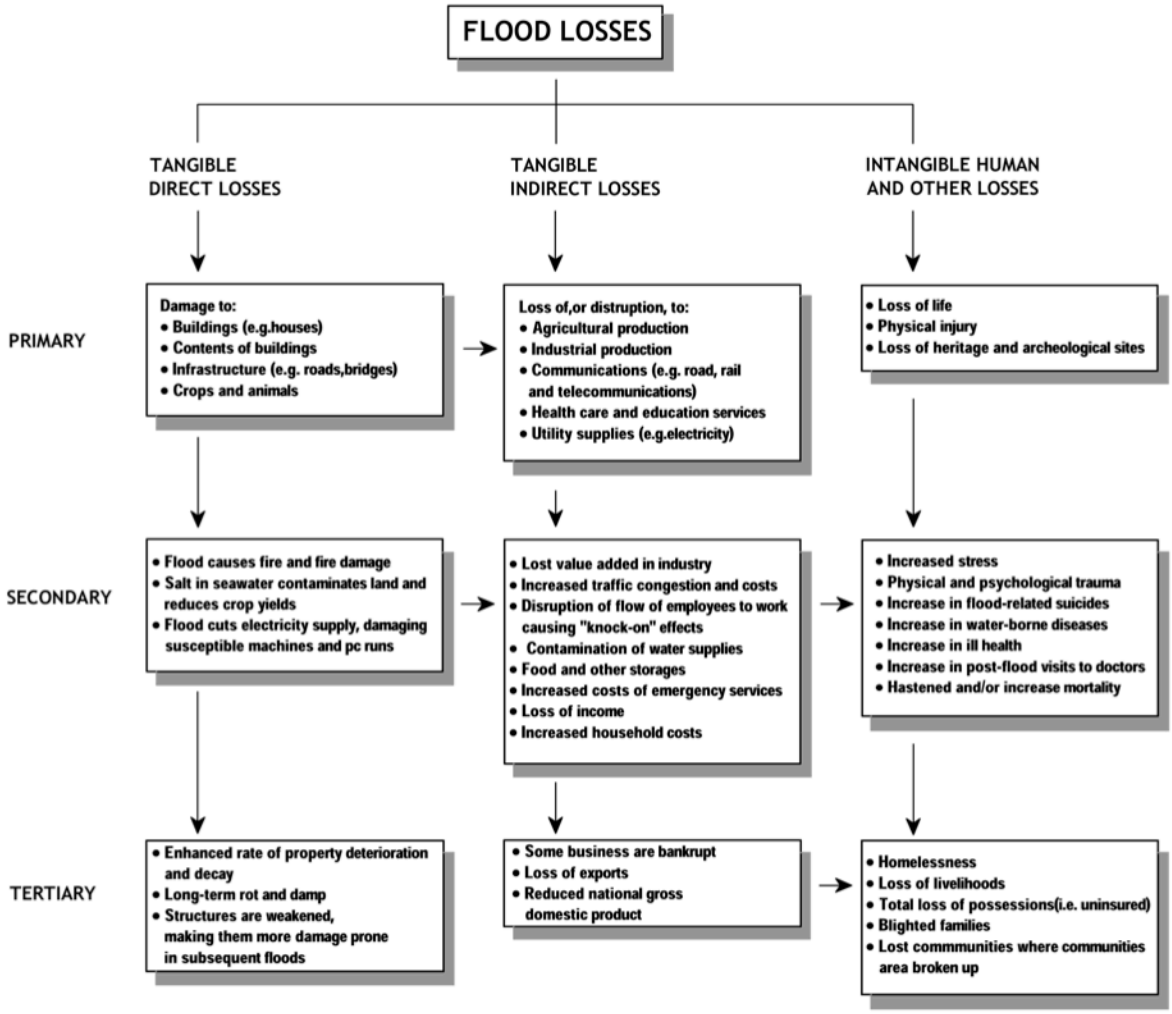


Fig.3.1 - Categorizzazione di perdite da alluvione [71]

La costruzione di efficaci scenari di possibile inondazione risulta di fondamentale importanza per programmare azioni mirate di mitigazione dei probabili danni. In questo senso le misure di tipo non strutturale rappresentano una importante risorsa nella attenuazione delle diverse categorie di perdite sopra descritte, soprattutto primarie e secondarie dirette o indirette.

3.2.1.1 Sistemi di previsione e preannuncio

I sistemi di previsione e preannuncio, la cui responsabilità risiede primariamente in capo alle strutture di Proteziona Civile, costituiscono i principali metodi non strutturali di tipo attivo per la mitigazione del rischio alluvionale (Landrini, 1997), avendo lo scopo di fronteggiare il rischio residuale, ossia la quota di rischio che i metodi strutturali lasciano scoperta [57].

Va ricordato che secondo la Legge 24 Febbraio 1992, n. 225 – "Istituzione del Servizio nazionale della protezione civile" sono definibili come attività di protezione civile "*quelle volte alla previsione e prevenzione dei vari tipi di rischio, al soccorso delle popolazione sinistrate ed ogni altra attività necessaria ed indifferibile a superare l'emergenza*" connessa ad eventi naturali o legati all'attività dell'uomo, calamità naturali e catastrofi.

Con la stessa legge lo Stato Italiano ha organizzato le attività di protezione civile come "Servizio nazionale", coordinato dal Presidente del Consiglio dei Ministri e composto dalle amministrazioni dello Stato, centrali e periferiche, dalle regioni, dalle province, dai comuni, dagli enti pubblici nazionali e territoriali e da ogni altra istituzione ed organizzazione pubblica e privata presente sul territorio nazionale.

Negli anni, la competenza in materia di protezione civile è però progressivamente passata dallo Stato ai governi regionali e alle autonomie locali. Le tappe principali di questo processo sono state il Decreto Legislativo n. 112 del 1998 e la modifica del titolo V della Costituzione con la legge costituzionale n. 3 del 18 ottobre 2001. Con quest'ultima legge la protezione civile è divenuta materia di legislazione concorrente, per cui, salvo che per la determinazione dei principi fondamentali, il potere legislativo spetta ai Governi regionali. Ogni regione ha implementato i principi della legge n. 225 del 1992 in leggi regionali e si è organizzata con un proprio sistema di protezione civile.

L'attività di *previsione* si sostanzia essenzialmente nella capacità di conoscenza delle grandezze pluviometriche ed idrometriche mediante un monitoraggio costante delle condizioni metereologiche e dello stato delle precipitazioni. Ciò avviene mediante la stima preventiva delle altezze di precipitazione al suolo e delle relative dinamiche di deflusso. Per il perseguimento del primo obiettivo si ricorrerà a modelli metereologici, osservazioni satellitari della copertura nuvolosa da sensore ottico o radar, o modelli stocastici su serie pluviometriche a disposizione; per il perseguimento del secondo invece a modelli afflussi-deflussi su dati

pluviometrici e a modelli per la simulazione della propagazione dell'onda di piena su dati idrometrici.
Primo e secondo obiettivo si differenziano in modo decisivo per quanto riguarda l'anticipo della previsione rispetto all'innesco dell'evento: nel caso della previsione dei deflussi infatti l'anticipo è molto esiguo e quindi può risultare utile solo nel caso di bacini molto grandi.

Con il termine *preannuncio* si intende invece l'attività che permette di identificare, attraverso l'osservazione di precursori di evento e con un margine di errore accettabile, la probabilità che in un orizzonte temporale ristretto (ore, giorni) si verifichi l'evento temuto.
Il preannuncio ha dunque uno scopo differente da quello della previsione, la quale si limita ad individuare tipologia e localizzazione dell'evento senza considerare però il tempo di accadimento.
Il sistema di preannuncio permette l'individuazione delle soglie critiche che determinano l'attivazione delle tre diverse fasi nella gestione dell'emergenza: pre-allerta, allerta e allarme.
La complessità e l'efficacia di tale attività dipende soprattutto dalla capacità di ricezione ed elaborazione in tempi molto ristretti di dati idrometrici e pluviometrici derivanti da stazioni di monitoraggio in telemisura, ossia capaci di trasmettere in tempo reale ad una centrale remota di raccolta dati le misure registrate; altrettanta complessità risiede nella individuazione dei precursori di evento, ossia "campanelli di allarme" che, in base alle attività di previsione precedenti, riescano ad associare le altezze di pioggia per varie finestre temporali alla relativa superficie dell'area interessata e, qualora superata una soglia critica prefissata, far scattare l'allerta e/o l'allarme. L'efficacia di tali attività, soprattutto in termini di individuazione localizzata delle allerte/allarmi e in archi temporali brevissimi, risulta estremamente importante per l'attuazione dei soccorsi [25] e del superamento delle emergenze [26].

[25] Secondo quanto afferma l'art. 3, comma 4, Legge 24 Febbraio 1992, n. 225 "Il soccorso consiste nell'attuazione degli interventi diretti ad assicurare alle popolazioni colpite dagli eventi ogni forma di prima assistenza". L'attività di soccorso ricade tra le attività e competenze di protezione civile.
[26] Secondo quanto afferma l'art. 3, comma 5, Legge24 Febbraio 1992, n. 225 "Il superamento dell'emergenza consiste unicamente nell'attuazione, coordinata con gli organi istituzionali competenti, delle iniziative necessarie ed indilazionabili volte a rimuovere gli ostacoli alla ripresa delle normali condizioni di vita".

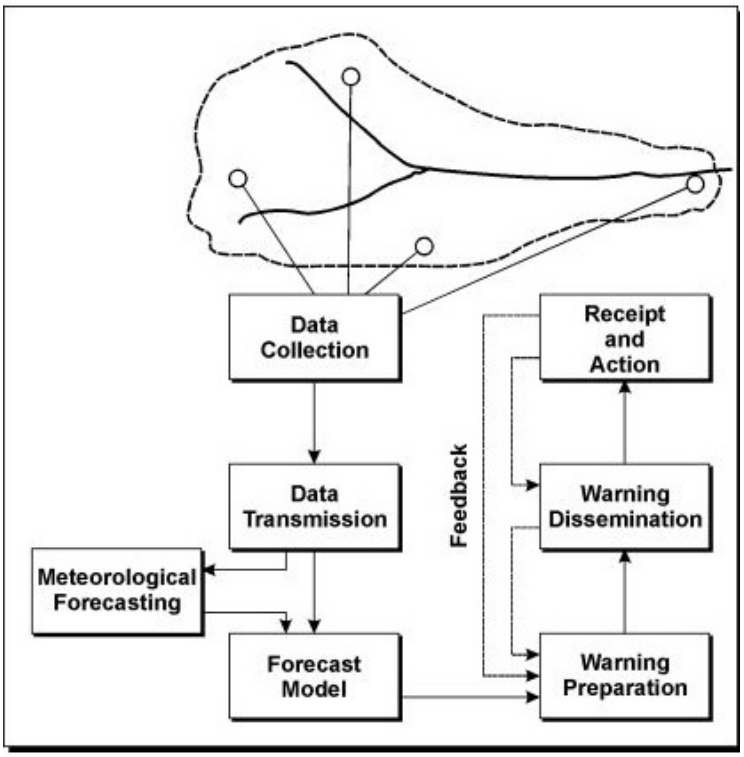


Fig.3.2 - Schema a blocchi delle principali attività di previsione e preannuncio [62]

3.2.1.1.1 SAFER with GMES

GMES (Global Monitoring of Environment and Security) è un programma finanziato dalla Commissione Europea e dall'Agenzia Spaziale Europea con lo scopo di creare una rete per l'osservazione della Terra per il monitoraggio globale per fini ambientali e di sicurezza. L'obiettivo primario è quello di offrire servizi e prodotti che siano di supporto sia ai decisori istituzionali e privati degli Stati Membri sia di beneficio per i cittadini dell'Unione. Basandosi sull'idea che *"To take decisions, it is necessary to anticipate, intervene and control"*[72], l'obiettivo viene perseguito mediante l'integrazione dell'infrastruttura di monitoraggio in situ, costituita da sensori di terra, aerei e marini, con la tecnologia di osservazione da sensore satellitare.

L'idea del progetto è stata in prima istanza lanciata nel 1998 all'interno del "Manifesto di Baveno", per poi essere avviato a partire dal 2001 e a giungere alla piena operatività nel 2011 in termini di servizi di monitoraggio offerti.

I tre assi principali del programma GMES sono i seguenti:

- Uso del Suolo
- Sicurezza e Protezione Civile
- Qualità delle acque

La definizione dei servizi operativi e dei relativi prodotti che GMES si propone è stata riconosciuta ai progetti finanziati dal programma di Ricerca e Sviluppo del FP7 dell'Unione Europea. Tra di essi, particolarmente importante per la tematica di gestione del rischio alluvione, risulta essere il progetto SAFER (*Services and Applications for Emergency Responce*), che ha lo scopo di attuare la fase pre-operativa per il servizio di "Emergency Response Service" del programma GMES.

L'obiettivo del servizio è di rinforzare la capacità europea di risposta alle situazioni di emergenza derivante da disastri naturali o umani (incendi, alluvioni, terremoti, eruzioni vulcaniche, frane, tsunami e incidenti tecnici quali fuoriuscite di olio, emissioni di inquinanti, ecc..) e crisi umanitarie.

Il progetto ha sostanzialmente due priorità [73]:

- diminuire i termpi di risposta in occasione di crisi, in special modo mediante il ricorso a capacità di *rapid mapping*
- rendere i prodotti ed i servizi offerti a servizio sia delle operazione pre che post crisi

Gli utenti di tale servizio sono tutti gli attori internazioni addetti alle attività di protezione civile e aiuto umanitario.

La società e-GEOS SpA rappresenta attualmente il Rapid Mapping Service Provider del progetto SAFER: sono quindi in capo a tale società gli obblighi di ricezione delle rischieste di attivazione dei servizi e l'elaborazione dei relativi prodotti.

L'attivazione del servizio avviene a seguito di una richiesta da parte degli utenti autorizzati inviata attraverso un sistema di ricezione definito "Focal Point" attivo 24 ore su 24, 7 giorni su 7 (24H/7D).

Fig.3.3 - Organizzazione del servizio SAFER [74]

I prodotti forniti da SAFER riguardano le differenti fasi di una possible crisi e sono raggruppati a seguire second tre categorie di prodotto:

- ***Preparedness / Prevention*****:** tali prodotti sono realizzati prima dell'arrivo dell'evento di crisi. Essi sono distinti in due categorie: *Geographic Reference Maps* e *Pre-Disaster Situation Maps*. I primi sono composti da elementi chiave che formano la base di semplici mappe topografiche prodotte sulle aree vulnerabili ai fenomeni naturali, così da permetterne la consegna rapida in caso di crisi. I secondi invece prevedono gli stessi elementi chiave dei precedenti con l'aggiunta però di informazioni dettagliate specifiche ad un potenziale evento di crisi in corso o di prossimo avvento. Lo scopo di entrambi i prodotti è quello di tenere pronto in anticipo un database di prodotti di riferimento per tutte i possibili casi di elevata vulnerabilità presenti nel mondo. Nel caso in cui tali prodotti non siano presenti in archivio al momento dell'attivazione dell'emegenza, vengono creati al momento a partire dal set di immagini satellitari presenti in archivio.

- ***Emergency Response*****:** L'attività di elaborazione di mappe in condizioni di emergenza è basata su dati acquisiti dopo la crisi ed ha lo scopo di fornire una valutazione rapida dell'estensione dell'evento, dei danni causati e/o la valutazione della situazione in corso post-evento. In questo senso sono definite due categorie di prodotti: *Disaster Extent*

Maps e *Damage Assessment Maps*. I prodotti derivanti dalla modalità Emergency è previsto che siano consegnati entro 8 ore dal momento in cui il fornitore del servizio abbia ricevuto le immagini satellitari e massimo entro quattro settimane con crisi in corso in modo da monitorare l'evoluzione dell'evento nel tempo.

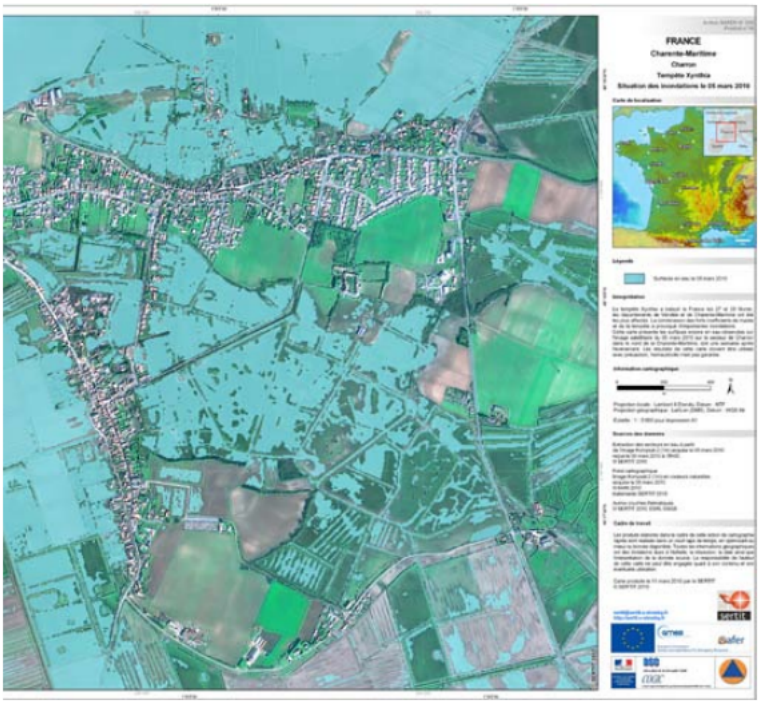


Fig.3.4 - EMERGENCY RESPONSE SERVICE: Disaster Extent Map – Francia 2010 – evento alluvionale [74]

• ***Recovery*****:** sostanzialmente *Post-Disaster Situation Maps* che seguono alle elaborazioni effettuate nella fase di Emergency e mirano ad indagare la situazione post-disastro. Possono essere realizzate anche molte settimane o mesi dopo la manifestazione dell'evento.

3.2.1.1.2 OPERA PROJECT – Protezione civile dalle alluvioni

OPERA (*Operational Eo-based Rainfall-runoff forecast*) "Protezione civile dalle alluvioni" è un Progetto Pilota dell'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) realizzato nell'ambito del suo programma di sviluppo di applicazioni dedicato ai rischi naturali e indotti dalle attività dell'uomo. Tale progetto è pensato per ricoprire il ruolo di "*downstream service*" ossia servizio di fornitura di prodotti specifici integrabili in tutte le componenti nazionali dei servizi GMES (Global Monitoring for Environment and Security) per le emergenze.

L'utente finale del progetto è rappresentato dall'Ufficio Rischi Idrogeologici e Antropici – Servizio Centro Funzionale Centrale – del Dipartimento della Protezione Civile. Le analisi derivanti da OPERA sono poste in dialogo diretto con il sistema DEWETRA[27], la piattaforma operativa di riferimento del Dipartimento della Protezione Civile, creando così valore aggiunto dall'integrazione con il resto del patrimonio informativo già presente.

Il team industriale alle spalle è guidato dal Consorzio COS(OT), nato nel 2002 proprio con l'obiettivo dello "Sviluppo dei Distretti Industriali per le Osservazioni della Terra" ed è coadiuvato da una serie di partner scientifici di valore internazionale. Il ruolo di "downstream service provider" è svolto da FondazioneCIMA, Centro di Competenza per il rischio di inondazioni che si avvale, per la realizzazione dei prodotti, di altri soggetti pubblici e privati. Risulta importante sottolineare che, proprio grazie all'ASI, il progetto OPERA può perseguire i propri obiettivi avvalendosi dell'iintegrazione diretta, anche in tempo reale, di tutti i dati derivanti da tutti satelliti ottici e radar che nell'ambito del progetto GMES sono stati individuati come "*Space Segment*" di riferimento per le attività di "*Emergency Response*".

Di seguito si riporta uno schema utile che esemplifica le fasi di protezione civile dal rischio alluvione e le relative funzionalità previste dal sistema OPERA.

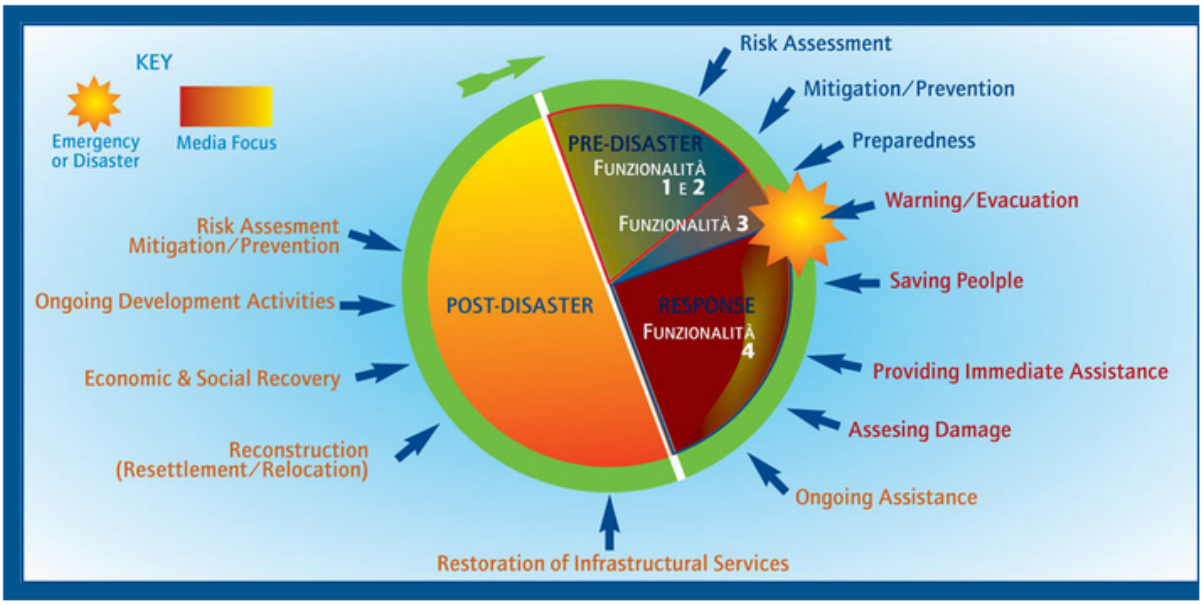


Fig.3.5 - Schema delle fasi di protezione civile dal rischio alluvione e delle relative funzionalità del sistema OPERA [75]

[27] E' un sistema integrato per il monitoraggio strumentale, la vigilanza e la valutazione degli scenari di rischio e della loro possibile evoluzione

Come emerge dallo schema sopra riportato, il progetto è stato pensato per rispondere alle esigenze dell'utente finale mediante quattro funzionalità principali:

- FUNZIONALITA' 1 : Conoscenza a propri per le attività di protezione civile, perseguita mediante le seguenti funzionalità specifiche:
  - Acquisizioni satellitari delle aree di studio
  - Modelli digitali degli alvei ad alta risoluzione
  - Modelli virtuali 3D dell'ambiente urbano
  - Mappa degli esposti vulnerabili
  - Mappe di censimento delle infrastrutture idrauliche
  - Caratterizzazione della scabrezza degli alvei fluviali
  - Mappe di vulnerabilità
  - Mappe di condizioni antecedenti di bagnamento
  - Soglie pluviometriche e soglie di livello idrometrico critiche

- FUNZIONALITA' 2: Monitoraggio dell'umidità del suolo, realizzato mediante le seguenti funzionalità specifiche:
  - Mappa dei flussi di energia all'interfaccia suolo-atmosfera
  - Mappe di coefficienti di scabrezza aerodinamica alla superficie del suolo
  - Mappe di copertura nuvolosa
  - Mappe di copertura vegetale
  - Mappe di uso del suolo
  - Mappe di indici di vegetazione
  - Mappe di radiazione solare
  - Mappe di albedo
  - Mappe di temperatura alla superficie del suolo
  - Indici di umidità nel suolo "near real-time" a risoluzione media
  - Mappe HR [28] del contenuto volumetrico d'acqua nello strato superficiale del terreno

- FUNZIONALITA' 3 : Previsione e monitoraggio delle inondazioni, che si sostanzia nella assimilazione dei prodotti EO derivanti dalle altre funzionalità all'interno dei modelli

[28] HR (High Resolution), diverse dalle immagini VHR (Very High Resolution)

operativi di previsione delle piene utilizzati nel Sistema Nazionale dei Centri Funzionali della Protezione Civile:

- Mappe di estensione dei corpi idrici
- Output delle catene operative

❖ FUNZIONALITA' 4: Monitoraggio in fase d'emergenza e valutazione dei danni, realizzati mediante le seguenti funzionalità specifiche:

- Mappe dei cambiamenti post-evento
- Mappe delle aree inondate
- Mappe dei danni post-evento

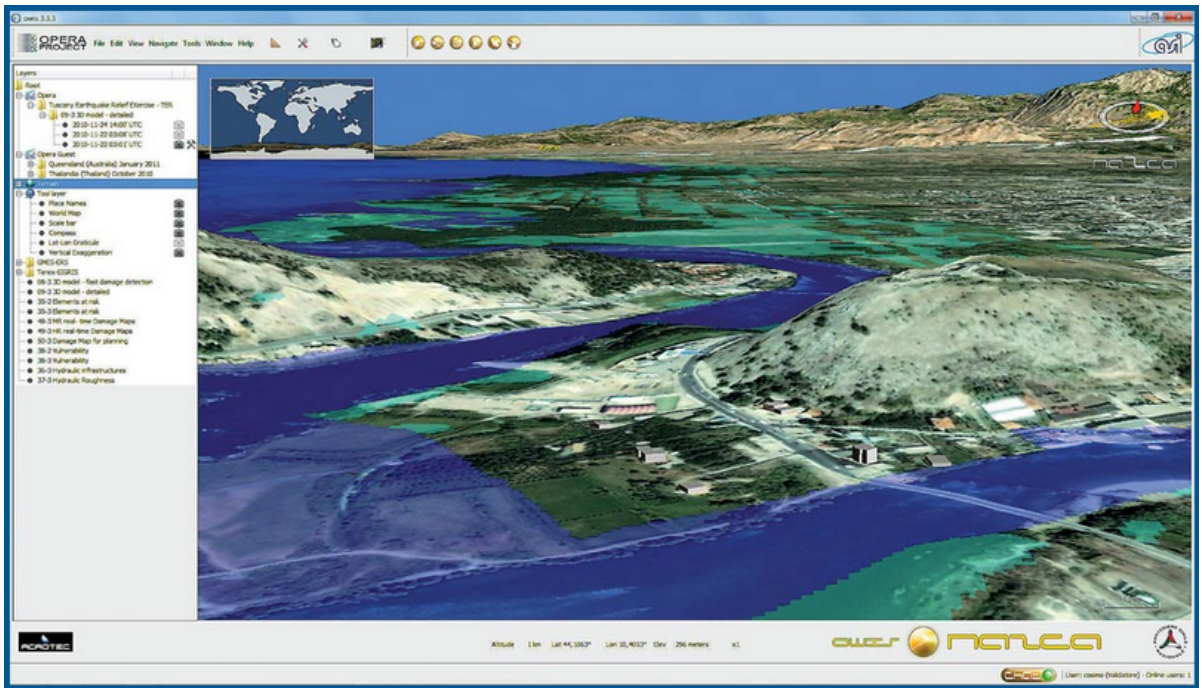


Fig.3.6- Scenario tridimensionale del progetto OPERA mediante l'applicativo WEB GIS 3D "NAZCA" [75]

3.2.1.2 Flood proofing

Tra le misure di manutenzione ordinaria, una progressiva e sempre più accentuata importanza viene attribuita alle tecniche di *Flood proofing*, soprattutto in vista del perseguimento degli obiettivi di resilienza al rischio prima enunciati. Il decremento della suscettibilità ai danni alluvionali può essere conseguito tenedo l'acqua lontana e fuori dalle strutture nonché mantenendo le struttutture stesse lontane dall'acqua [62]. In quest'ottica il *flood proofing* può essere definito come quel complesso di azioni di adattamento e di opere

d'ingegneria utili alla riduzione dei danni potenziali conseguenti alle piene operante mediante tecniche permanenti, contingenti o emergenziali in grado di prevenire che l'acqua danneggi strutture e contenuti di edifici e infrastrutture.

Va sottolineato che il *flood proofing* non costituisce un'alternativa alle norme di uso del territorio bensì una valida integrazione ad esse per convivere consapevolmente con il rischio residuale derivante direttamente dai limiti sia degli interventi strutturali che della pianificazione territoriale stessa.

Le possibili tecniche mediante le quali opera il *flood proofing* vengono schematizzate a seguire.

	"Relocation" riposizionamento di una struttura in un'area al sicuro dai danni di allagamento. Rappresenta la più affidabile ma anche più costosa misura di *flood proofing*
	"Elevation" innalzamento degli edifici, in modo che il livello idrico della piena non possa raggiungerne alcun elemento danneggiabile
	"Floodwalls" costruzione di barriere tra gli edifici e i volumi di inondazione, quali muri esterni intorno a case o gruppi di case
	"*Dry flood proofing*" isolamento delle pareti esterne degli edifici con materiali sigillanti che impediscano l'ingresso dell'acqua
	"Wet flood proofing" modifica delle strutture e riposizionamento dei contenuti sensibili in modo che l'ingresso dell'acqua, comunque previsto, determini danni ridotti

Fig.3.7 - Esempi di flood proofing [71]

Oltre alle cinque tecniche principali sopra schematizzate e descritte è possibile inoltre annoverare tra le tecniche di *flood proofing* anche la "prevenzione delle situazioni di rigurgito delle reti fognarie"[58] al fine di evitare l'allagamento dei piani cantinati. Mediante la semplice installanzione di valvole di non ritorno lungo le tubazioni di scarico è possibile prevenire danni spiacevoli sia dal punto di vista economico che sanitario.

Va sottolineato che l'efficacia di alcuni tra gli approcci sopra elencati è subordinata all'intervento umano, cioè alla necessità che una o più persone siano presenti al momento dell'evento di piena: tali misure sono considerate meno affidabili, in particolare nel caso in cui i tempi di allerta siano ridotti.

3.1.2.3 Norme d'uso del territorio

Tradizionalmente, gli interventi di pianificazione territoriale quali misure non strutturali della mitigazione del rischio idrologico-idraulcio, trovano definizione nell'attività di programmazione dello sviluppo delle attività antropiche all'interno delle aree a rischio inondazione.

Visto in questi termini essi si "limitano" a prevedere un'analisi delle varie tipologie d'uso possibili nell'area inondabile e a introdurre vincoli di tipo amministrativo fortemente restrittivi, correlati alle caratteristiche idrogeologiche del corso d'acqua, agli ecosistemi interessati e alle attività economiche che si svolgono nelle aree confinanti [58].

L'approccio "resiliente" al rischio chiede però alla pianificazione urbana-territoriale nella sua accezione più ampia uno sforzo in più, un "balzo in avanti" rispetto alla semplice attività di protezione dal rischio basato esclusivamente sul limitare passivamente le vulnerabilità mediante la Norma.

3.2.1.3.1 Water-smart cities

Come anticipato, l'approccio orientato alla resilienza al rischio idrologico-idraulico in ambito urbano chiede uno sforzo anche alla pianificazione urbano-territoriale: ciò implica di fatto una messa in discussione degli assi convenzionali sui quali la pianificazione attualmente si fonda. La necessità nasce dal fatto che, quando una città è dotata di un sistema resiliente, i distrurbi al sistema stesso producono il potenziale per creare opportunità per innovazione e sviluppo; al contrario, quando una città è vulnerabile, anche i più piccoli disturbi sono in grado di produrre conseguenze sociali drammatiche.

Un valido esempio del tentativo di realizzare quel "balzo in avanti" che il processo di resilienza richiede, emerge dal concetto di *"Water sensitive cities"*, parte della nuova iniziativa politica - National Water Initiative (NWI) – che da un decennio a questa parte il Governo Australiano sta promuovendo. L'idea nasce sulla spinta delle riflessioni promosse dall' IWA (International Water Association) per rispondere alla sfida a cui le città del futuro sono costrette per

sopravvivere di fronte dei problemi posti dal cambiamento climatico, urbanizzazione, crescita della popolazione e deperimento delle risorse.

Nonostante ancora non esistano di fatto ne in Australia, ne altrove, città che possano essere di fatto identificate come *"water sensitive"* e benchè una definizione formale non sia stata ancora stabilità, una *"Water sensitive cities"* può essere definita come quella città che riconosce l'importanza dei valori di ripristino e protezione ambientale, sicurezza nelle forniture idriche, l'efficacia nella mitigazione dalle inondazioni, promozione della salute pubblica, vivibilità e sostenibilità economica, insieme alla protezione dell'equità inter-generazionale e la promozione della resilienza ai cambiamenti climatici. I principi chiave di una *water-sensitive cities,* secondo Wong and Brown (2008), sono quelli ritenuti nel complesso appropriati a creare un quadro istituzionale valido e solido per la gestione del rischio idrologico-idraulico in ambito urbano orientato alla resilienza. Nel dettaglio quindi la città del futuro dovrebbe essere in grado di assicurare [76]:

- EQUITA' INTER-GENERAZIONALE: comunità e governi devono comprendere che le generazioni future devono essere in grado di godere della sicurezza dell'approvviggionamento idrico e che la salute delle acque non deve essere compromessa dall'attuale sviluppo;
- TRIPLICE APPROCCIO DAL BASSO: l'acqua ed i servizi idrici necessitano di essere sottoposti a valutazioni di tipo sociale, ambientale ed economico piuttosto che esclusivamente economico;
- APPROCCIO INTEGRATO: è richiesto un approccio orientato al ciclo globale idrologico nella gestione delle risorse idrico, inclusa la fornitura idrica, la gestione delle acque reflue e degli allagamenti in forma tale che sia di beneficio alla salute idrica, pubblica ed ecosistemica e al benessere sociale;
- DIFFERENZIAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE: necessità di sistemi istituzionali che offrano un portafoglio di risorse idriche sostenute da una serie di infrastrutture centralizzate e decentralizzate, al minor costo e impatto per i bisogni rurali e ambientali;
- CITTA' COME BACINO: la riduzione al minimo dell'importazione di acqua potabile e l'esportazione di acque reflue alle aree esterne alla città risulterebbe utile per l'ottimizzazione delle risorse idriche all'interno della città stessa. Sia le acque piovane

che le acque reflue trattate vengono infatti considerate in quest'ottica come importanti risorse idriche;

- RUOLI ECOSISTEMICI: considerare i corsi d'acqua come parte integrale della città ed riconoscere il ruolo ecosistemico fornito in termini di vivibilità della città stessa;
- RESILIENZA AI CAMBAIMENTI CLIMATICI: la differenziazione delle risorse idriche assicura una certa adattabilità della città ad eventuali condizioni di scarsità o abbondanza idrica. La resilienza dei corsi d'acqua e delle risorse idriche al rischio dei cambiamenti climatici sono valorizzati mediante la pianificazione strategica di interventi ripristino e protezione dei corsi d'acqua;
- CAPITALE SOCIALE: la comunità diventa "water-smart" e socialmente responsabile quando vive uno stile di vita sostenibile ed è sensibile all'impatto tra edificato e ambiente naturale. Il capitale sociale deve inoltre prevedere la valorizzazione, promozione e creazione di capacity-building per la gestione innovativa e sostenibile delle sue risorse idriche, nonchè il miglioramento della regolamentazione governativa alla base del quadro normativo ed amministrativo;
- MULTI ATTORIALITA': Governo e settore privato devono collaborare nella creazione di misure istituzionali ed economiche che permettano di investire in soluzione sostenibili .

La pianificazione urbanistica e territoriale, all'interno di questo vasto quadro, è chiamata a rinnovarsi e a migrare verso un *Water Sensitive Urban Design (*WSUD*)*, ossia un approccio alla pianificazione e al design urbano che integri tanto la pianificazione e gestione del territorio quanto quella delle acque nelle attività di design urbano. Visto in questi termini un approccio orientato al WSUD deve permeare l'intero processo decisionale, dalla prima all'ultima fase. Si tratta di fatto di un approccio olistico alla gestione del ciclo urbano delle acque, dove tutte le parti del ciclo vengono gestite in modo assolutamente integrato.

Nella figura a seguire viene esemplificata la migrazione dal ciclo idrico naturale, al bilancio idrico urbano, fino a giungere a quello prefigurato con il WSUD: l'obiettivo del nuovo approccio è proprio quello di integrare le caratteristiche dell'ambiente urbano a favore di un ritorno, suppur forzato, all'equilibrio idrico naturale.

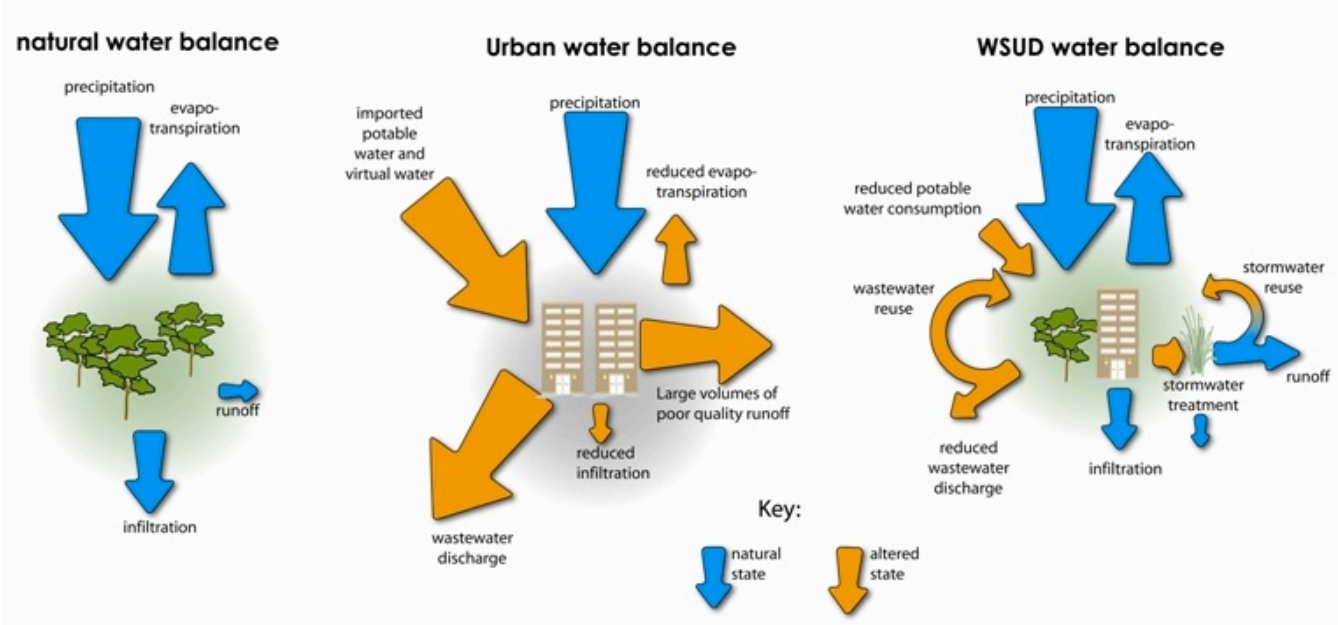


Fig.3.8 - Migrazione verso un Water Sensitive Urban Design [77]

Gli obiettivi specifici del *Water Sensitive Urban Design* sono [78]:

- minimizzare gli impatti sugli elementi naturali esitenti e sui processi ecologici
- minimizzare gli impatti sul ciclo naturale idrologico dei bacini
- preservare la qualità delle acque superficiali e sotterranee
- minimizzare la domanda sulla rete di approvviggionamento idrico
- migliorare la qualità dell'ambiente e minimizzare l'apporto di acque inquinate in esso
- integrare il trattamento e riuso dei deflussi, incluse le acque piovane accumulate sui tetti ed degli altri tipi di acque piovane
- ridurre i flussi ed i picchi di deflusso derivanti dallo sviluppo urbano incontrollato
- riutilizzare le acque trattate e minimizzare la generazione di acque reflue
- incrementare la serenità sociale nelle aree urbane attraverso spazi versi multi-funzionali, maggiore attenzione al paesaggio urbano e integrazione dell'acqua nel paesaggio per il miglioramento dei valori paesaggistici, sociali culturali ed ecologici
- creare valore aggiunto, riducendo al minimo i costi di sviluppo (ad esempio i costi delle infrastrutture di drenaggio)
- tenere in forte considerazione il legame tra utilizzo dell'acqua e le più ampie questioni di risorsa sociale

- armonizzare le pratiche relative al ciclo dell'acqua attraverso e all'interno delle istituzioni responsabili della salute dei corsi d'acqua, della gestione delle inondazioni e la prevenzione dall'inquinamento e del benessere sociale

Un effetto importante del WSUD è proprio quello di contribuire al processo di "place-making"[79], ossia di costruzione o ri-costruzione del senso dei luoghi e dell'identità locale, in quanto contribuisce a generare sentimenti di sicurezza, incolumità, senso di orgoglio e appartenenza nelle comunità rispetto a loro territorio. Il concetto di place-making risulta importante non soltanto perché permette di valorizzare le capacità strettamente funzionali degli elementi fisici di un luogo, bensì soprattutto perché valuta il modo in cui tali elementi possono o meno contribuire nella creazione del senso di città e quindi sui valori psicologici che vi sono alle spalle. La capacità di fronteggiare allo stesso tempo sia esigenze fisico-funzionali che psicologiche è un requisito fondamentale nel momento in cui ci pone l'obiettivo della creazione di luoghi attrattivi.

Una città *water-sensitive* è una città di fatto in corsa verso il processo di resilienza al rischio idrologico-idraulico. Tale capacità, ricoleggandoci anche al concetto di "place-making", rappresenta il substrato necessario per qualsiasi idea di *"Smart cities"*, ossia l'idea di città intelligente, promossa dalla Comunità Europea negli ultimi anni e ampiamente condivisa a livello mondiale.
Una città può essere definita *"smart"* quando gli investimenti effettuati nel capitale umano e sociale, nei trasporti e nelle infrastrutture di comunicazione favoriscono uno sviluppo economico sostenibile e stili di vita elevati, con un ampia attenzione alla gestione delle risorse naturali e attraverso un processo di governance partecipato. Tale idea è stata formalizzata mediante il suo inserimento nel Piano strategico per le Tecnologie energetiche (SET), all'interno del quale l'Unione Europea prevede la creazione di una rete di trenta città "intelligenti", da selezionare entro il 2020 tra città di medie dimensioni che abbiano sviluppato la loro attrattività su criteri di ranking ben definiti:

- *SMART ECONOMY*: il fine principale è la valutazione della *competitività* raggiunta mediante spirito innovativo, imprenditorialità, immagine economica e marchi, produttività, flessibilità del mercato del lavoro, globalizzazione, abilità alla trasformazione.

- *SMART MOBILITY*: il fine principale è la valutazione dei *trasporti e ICT* (Information and Communication Technology) raggiunti mediante l'accessibilità locale e (inter)nazionale, la disponibilità di infrastrutture ICT e di sistemi di trasporto sostenibili, innovativi e sicuri.
- *SMART PEOPLE*: il fine principale è la valutazione del *capitale umano e sociale* raggiunto mediante il livello di qualificazione, passione per l'apprendimento permanente, pluralità sociale ed etnica, flessibilità, creatività, cosmopolitismo/apertura mentale, partecipazione alla vita pubblica .
- *SMART GOVERNANCE*: il fine principale è la valutazione della *partecipazione* raggiunta mediante la partecipazione all'attività decisionale, la presenza di servizi pubblici e sociali, la trasparenza della governance, strategie e prospettive politiche.
- *SMART LIVING*: il fine principale è la valutazione della *qualità della vità* i termini di strutture culturali, condizioni di salute, sicurezza individuale, qualità dell'abitare, strutture scolastiche, attrattività turistica e coesione sociale.
- *SMART ENVIRONMENT*: il fine principale è la valutazione delle *risorse naturali* in termini di attrattività delle condizioni naturali, inquinamento, protezione ambientale, gestione sostenibile delle risorse.

"Una città di media grandezza viene considerata una smart city quando, basandosi sulla combinazione fra i dati di fatto locali e le attività realizzate da parte dei politici, dell'economia e degli abitanti stessi, presenta uno sviluppo duraturo nel tempo delle sei caratteristiche sopra citate"[80].
Il MIT (Massachusetts Institute of Technology) di Boston, contribuisce con un'altra definizione, mirando ad un concetto di *smart city* dove ci si prefigge di raggiungere "*sustainability, livability, and social*
equity through technological and design innovation" mediante l'introduzione di *"digital nervous systems, intelligent responsiveness, and optimization at every level of system integration"*.

Il pre-requisito di ogni possibile *smart cities* è però proprio la resilienza in quanto capacità della città stessa di conoscere, prepararsi e convivere con i possibili disturbi derivanti dall'esterno che potrebbero, in vario modo, minare strutture e risorse di attrattività urbana costruite e valutate secondo le diverse dimensioni proprie della smart cities.

3.2.1.4 Coperture assicurative

Nonostante l'intensificarsi degli eventi e dei relativi danni da alluvione, l'Italia versa attualmente ancora in un regime assicurativo contro il danno da catastrofe naturale totalmente volontario e talvolta non realizzabile[29].

A ciò si affianca un approccio assolutamente emergenziale ai fenomeni di questo tipo, che si è tradotto nel gestire il recupero dei danni mediante l'emanazione di provvedimenti *ad hoc*. Tale atteggiamento ha comportato di fatto il convogliamento di ingenti risorse dello Stato verso politiche di riparazione piuttosto che verso politiche di prevenzione, alle quali i fondi erano invece originariamente destinati.

Il ricorso ad un efficace sistema delle assicurazioni permetterebbe invece di affrontare in modo più efficiente, efficacie e trasparente il problema dell'indennizzo dei danni provocati dalle catastrofi naturali, permettendo inoltre allo Stato di limitare le risorse finanziarie destinate alle emergenze e a concentrarle invece sulle politiche di prevenzione di difesa del suolo e dell'acqua, proprio secondo quanto fu definito dalla Legge 183/89 in materia di Difesa del Suolo [57].

Rispetto a questa necessità, va sottolineato che in Italia, il mercato delle coperture assicurative contro le catastrofi naturali per le abitazioni civili non è ancora decollato e questo per ragioni di carenze sia in termini di domanda che di offerta imputabili a varie ragioni quali [81]:

- convinzione errata da parte dei cittadini dell'esistenza di un diritto al risarcimento, di fatto invece non previsto dal nostro sistema legislativo. L'esperienza passata, dovuta anche ai vari finanziamenti ex-post emessi a seguito di catastrofi naturali, fa pensare che ci sia una sorta di patto sociale o di obbligo morale per i Governi di occuparsi del risarcimento dei danni. Questo fatto fa sì che non ci sia dal lato della domanda una particolare sensibilità sulla materia con conseguente scarsa propensione ad atti di prevenzione individuale;
- i cittadini maggiormente sensibili alla copertura assicurativa sono quelli che vivono nelle aree decisamente più pericolose dal punto di vista della frequenza e severità delle catastrofi naturali e ciò rende la già scarsa domanda ad essere estremamente "anti-selezionata", cioè relativa esclusivamente alle zone ad alto rischio. Di

[29] caso degli insediamenti abusivi

conseguenza, ciò rende la commercializzazione massiva di questo tipo di polizze oltre che costosa anche di difficile avviamento;

- nel nostro ordinamento civile vige il principio secondo il quale non ci possa essere una sorta di arricchimento indebito derivante dai risarcimenti ricevuti per eventuali danni ai beni. Infatti gli eventuali risarcimenti, nel loro complesso, non possono essere superiori al danno effettivamente subito. Pertanto in caso di catastrofe naturale i risarcimenti che si dovessero ricevere non potrebbero superare l'entità del danno. Chi si fosse assicurato, pagando il relativo premio, correrebbe il rischio di vedersi negare l'eventuale contributo per il ristoro dei danni da parte dello Stato o di vederselo ridotto rispetto a chi invece non si fosse assicurato. Tale aspetto non funge certamente da incentivo a comportamenti previdenti, benchè resti fermo il valore della copertura assicurativa quale certezza contrattuale in termini di diritto e tempistiche di risarcimento.
- il costo relativamente contenuto delle polizze antincendio (con estensione a danni per fenomeni alluvionali) per le abitazioni private, il problema antiselettivo descritto in precedenza, la mancanza di una domanda massiva di coperture e l'elevata quantità di capitale necessario per sviluppare l'attività assicurativa in un paese ad altissimo potenziale distruttivo come l'Italia, costituistono i principali fattori che all'oggi ancora limitano i soggetti lato offerta nel condurre le onerose e diffuse campagne di sensibilizzazione e collocamento delle polizze invece necessarie.

La tabella a seguire risulta utile per avere un'idea dell'esiguità del fenomeno di copertura assicurativa contro catastrofi naturali in Italia: il 99,5% delle polizze non presenta infatti alcuna estensione ai potenziali danni derivanti da fenomeni naturali [30].

[30] Analisi basate su un campione di 17 imprese assicurative rappresentative del 64% del mercato incendio [81]

Estensione alle catastrofi naturali	*Numero Polizze*	*Distr. % Num. Pol.*	*Somme Ass.te (mln €)*	*Distr. % Somme Ass.te*
Nessuna estensione	4.459.556	99,5%	1.815.552	97,6%
Almeno rischio terremoto	6.933	0,2%	6.551	0,4%
Almeno rischio alluvione	1.317	0,0%	3.695	0,2%
Almeno terremoto e alluvione congiuntamente	11.958	0,3%	35.273	1,9%
Totale	**4.479.763**	**100,0%**	**1.861.071**	**100,0%**

Tab.3.1 - Polizze assicurative in Italia con estensione a catastrofi naturali [81]

Stime dei danni provocati in Italia negli ultimi anni dalle principali alluvioni

Anno	Zona	Danno economico [mld Lit]	danno assicurato [mld Lit]	Danno assicurato come % danno economico
1994	Nord-Italia	11.000	200	1,8%
1996	Calabria	200	n.d.	-
1996	Versilia	n.d.	n.d.	-
1998	Liguria	20	n.d.	-
2000	Nord-Italia	10.000	800-1.000(*)	8% -10%
2000	Calabria	100	n.d.	-

(*) di questi danni circa l'80% è stato a carico dei riassicuratori

Tab.3.2 - Stime dei danni provocati in Italia dalle principlai alluvioni (1994-2000) [55]

3.2.1.4.1 Regime assicurativo italiano

Attualmente il nostro Codice Civile nella sezione dedicata ai contratti assicurativi sui beni esclude la copertura assicurativa ai danni derivanti da catastrofi naturali, che però può essere derogata con specifico patto contrario fra le parti: di conseguenza l'unico regime assicurativo previsto in Italia contro le catastrofi naturali è quello basato sulla scelta volontaria individuale.

Benchè nulla sia stato di fatto attuato, nel recente passato è possibile rintracciare alcune proposte legislative finalizzate alla creazione di un sistema assicurativo basato sulla collaborazione tra settore assicurativo privato e Stato. Tali proposte nacquero di fatto dalla consapevolezza che l'attuale *modus operandi* non rappresenta una situazione ottimale perché partecipa alla disincentivazione della responsabilità individuale, non fornisce i giusti stimoli ne

per l'attuzione delle politiche di prevenzione ne per una più razionale gestione delle relative risorse ec inoltre non incentiva alle buone pratiche costruttive ai fini della limitazione dei possibili danni. A ciò si aggiunge il riconoscimento del ruolo del sistema assicurativo nelle attività di accantonamento delle risorse necessarie e di convogliamento di proventi derivanti dagli investimenti, quali garanzia per la copertura dei costi complessivi del sistema nel lungo periodo.

Le proposte legislative in materia sono state essenzialmente di due tipi: la prima per l'istituzione di un regime assicurativo obbligatorio contro l'incendio e le catastrofi naturali alle unità abitative private a qualunque uso destinate purché non abusive; la seconda invece sull'istituzione di regime assicurativo semi-obbligatorio, ossia copertura incendio libera ma, qualora sottoscritta, con estensione obbligatoria alle catastrofi naturali per danni ad abitazioni civili comprensive delle attività commerciali annesse.

Gli eventuali obblighi o semi-obblighi prevdevano inoltre il ricorso ad un apposito meccanismo di franchigie e di scoperti utili a mantenere a carico del danneggiato i danni inferiori ad una determinata soglia o percentuale: tali strumenti risultano utili da una parte a mitigare i costi dei risarcimenti e di conseguenza delle coperture, dall'altra a responsabilizzare l'assicurato nella prevenzione e nel contenimento dei danni.

Prerequisito necessario per limitare il fenomeno del mancato rispetto dell'obbligo assicurativo sarebbe quello di non prevedere esplicitamente alcun risarcimento nel caso di calamità naturale che colpisse beni sottoposti ad obbligo assicurativo ma non assicurati.

Va sottolineato come, nell'evoluzione futura della materia, resta comunque da definire e valutare attentamente l'atteggiamento del sistema assicurativo nei confronti di danni ad abitazioni abusive o ex-abusive, fenomeno affatto trascurabile nel nostro Paese.

Fin'ora, come anticipato, nessuna delle due proposte ha trovato attuazione. Il fallimento nei vari tentativi di regolamentazione della materia sono principalmente riconducibili sia al mancato accordo tra le forze politiche sia alle esplicite resistenze del mondo assicurativo dovute alla insostenibilità finanziaria delle proposte avanzate, in particolare a causa della mancata previsione di un "tetto"oltre il quale deve essere lo Stato ad intervenire[83].

3.2.1.4.2 Best practices europee

Pensando al futuro, particolarmente significative risultano le buone pratiche adottate nel settore da alcuni stati esteri, soprattutto Francia e Spagna, ai quali l'Italia dovrebbe auspicabilmente guardare con interesse e ammirazione.

La **Francia** si avvale a partire dal 1992 di un regime assicurativo basato su forma semi-obbligatoria di copertura dei danni da calamità naturali, ossia polizze incendio a sottoscrizione libera ma con estensione contro "calamità naturali" obbligatoria. I fenomeni che rientrano nella copertura obbligatoria sono tutti i fenomeni naturali (alluvioni, frane, smottamenti, siccità, maremoto, terremoto, eruzioni vulcaniche e valanghe) ad esclusione di uragani, tempeste, grandine, peso della neve e ghiaccio. È il Governo, con un apposito Decreto Interministeriale, a decidere se un evento è definibile "catastrofe naturale" ed è sempre il Governo a decidere quali sono i limiti delle aree colpite e quindi eventualmente da risarcire [55].

Questo sistema di semi-obbligatorietà risulta estrememente sostenibile anche grazie al fatto che la penetrazione assicurativa è molto alta: quasi tutte le Società, piccole o grandi, sono coperte e più del 90% dei privati sono assicurati. La copertura è prestata sostanzialmente dalle singole compagnie assicurative private, che si possono riassicurare sia sul mercato privato sia presso la *Caisse Céntrale de Réassurance* (CCR), una Società per Azioni a capitale interamente statale. Nel caso di una catastrofe naturale di proporzioni eccezionali è lo Stato stesso a fornire tutte le garanzie finanziarie necessarie per coprire l'eventuale insolvenza della CCR per mancanza di fondi.

Un ulteriore aspetto interessante del programma francese è rappresentato dai "Piani di prevenzione del rischio naturale" (PPR) introdotti nel 1995 con la Legge Barnier[81]. Oltre ad identificare le aree ad alto, medio e basso rischio, la legge Barnier prevede le relative misure di prevenzione da adottarsi da parte degli enti locali entro i 5 anni successivi dall'approvazione dei Piani. Dal 1997 le Compagnie possono rifiutare la copertura di beni situati in zone ad alto rischio nel caso gli insediamenti risalgono ad epoca successiva l'approvazione dei Piani. Anche se le novità introdotte dalla Legge Barnier hanno incontrato forti resistenze presso molti Comuni per il timore di una svalutazione degli immobili in aree ad alto rischio, tale Legge è considerata importante proprio per l'incentivazione alla prevenzione.

Anche la **Spagna** si avvale, a partire dal 1990, di un regime assicurativo contro le catastrofi naturali di tipo semi-obbligatorio [81]. Come nel caso precedente quindi, i privati che stipulano una polizza incendio

devono obbligatoriamente sottoscrivere una clausola di garanzia contro le catastrofi naturali. Il flusso dei premi incassati per fornire la garanzia finanzia le casse del *Consorcio de*

Compensacion de Suguros (CSS), ente statale con proprio stato giuridico che gestisce il rischio in base alle leggi in vigore nel settore
privato. I mezzi finanziari del Consorzio sono indipendenti dallo Stato, il cui ruolo è quello di riassicuratore di ultima istanza in caso di insufficienza dei mezzi finanziari del Consorzio.

Nel **Regno Unito**, nonostante il regime assicurativo in vigore sia totalmente volontario, la penetrazione assicurativa contro catastrofi naturali è molto elevata [55]: l'80% dei proprietari residenziali e quasi la totalità dell'industria hanno stipulato polizze danni a copertura del rischio alluvione, inclusa la mareggiata.
La scelta di non includere tale "vincita" tra le *best practices* è legata al fatto che il buon esito del settore dipende sostanzialmente da motivi strettamente culturali legati alla elevata sensibilità degli inglesi per la copertura assicurativa nella sua accezione più ampia, nonché all'ampia differenziazione dell'offerta assicurativa stessa. Nel contesto inglese di fatto non è previsto alcun intervento da parte dello Stato: le assicurazioni cedono, laddove necessario, parte dei rischi di riassicurazione allo stesso mercato privato.

3.2.1.4.3 SIGRA (Sistema Integrato per la Gestione del Rischio assicurativo da Alluvioni)

La stima dei premi assicurativi da parte dell'ANIA (Associazione Nazionale fra le Imprese Assicuratrici) avviene attualmente mediante il ricorso al sistema informativo geografico di simulazione degli allagamenti SIGRA (Sistema Integrato per la Gestione del Rischio assicurativo da Alluvioni). Lo sviluppo del sistema è stato commissionato da ANIA nel 2004 alle società Telespazio (Finmeccanica/Thales Alenia Company) e Agricolsulting Spa ed è attualmente in fase di implementazione. Il progetto integra competenze di tipo ingegneristico, statistico e assicurativo, che sono state necessarie per lo sviluppo dei modelli di simulazione e per la costruzione di un'unica base dati di riferimento contenente le informazioni storiche, idrografiche, idrogeologiche e territoriali necessarie per la mappatura dei rischi.
In estrema sintesi il sistema restituisce la simulazione, mediante il ricorso a modelli idrologici ed idraulici, dei possibili eventi alluvionali, l'intensità degli stessi sul territorio e conseguentemente, con l'utilizzo di appropriate tavole di vulnerabilità, la stima dei possibili danni al patrimonio abitativo esposto all'evento. La struttura generale dei modelli simulativi degli eventi catastrofali su cui opera il SIGRA può essere rappresentata dal seguente schema:

Fig.3.9 - Schema della struttura generale per la stima dei danni su SIGRA [81]

Analizzando nel dettaglio i singoli blocchi della struttura è possibile comprendere meglio il funzionamento del sistema:

1) il *generatore di eventi catastrofali* è tarato su dati storici, generalmente eventi alluvionali passati in un arco temporale particolarmente esteso, nonché su modelli statistici applicati a principi fisici che replicano il comportamento del fenomeno da simulare. Nel complesso tale fase restituisce come output la frequenza dell'evento e la sua intensità con un particolare dettaglio di localizzazione dell'area interessata. L'intensità di un evento alluvionale è espressa in termini di altezza del tirante idrico, oppure in termini di velocità di percorrenza dell'acqua.

2) per ciascun elemento a rischio, che costituisce il *portafoglio* di cui si vuole calcolare l'esposizione al rischio catastrofale, devono essere inserite nel modello simulativo almeno le seguenti informazioni:

- la somma assicurata distinta per partita (fabbricato, contenuto, etc.)
- gli eventuali limiti d'indennizzo (franchigie, scoperti, massimali)
- l'indirizzo (provincia, comune, via, numero civico e cap)

Tale fase si conclude con la georeferenziazione di un rischio, ossia l'associazione dell'indirizzo alle coordinate latitudine-longitudine su cui viene simulata la frequenza e l'intensità dell'evento catastrofale.

3) una volta simulato l'evento e georeferenziato il portafoglio, il passo successivo consiste nell'identificare il grado medio di danno, tramite le tavole di *vulnerabilità*. Quest'ultime individuano per differenti livelli di intensità dell'evento, il danno atteso espresso in percentuale della somma assicurata. Generalmente il grado medio di danno, per quanto riguarda i fabbricati, è distinto per tipologia e anno di costruzione. Le tavole di vulnerabilità

sono costruite sulla base di esperienze passate (raccolte tramite interviste, questionari, test di laboratorio di natura scientifico-ingegneristica).

4) l'output del modello consiste nella distribuzione di probabilità di *danno* del portafoglio modellato, tenendo conto anche delle eventuali caratteristiche contrattuali delle polizze assicurative.

SIGRA utilizza tre mappe di pericolosità corrispondenti a differenti tempi di ritorno (50, 200, 500 anni) dell'evento: tali mappe sono possono essere eventualmente sovrapposte fra loro permettendo così di valutare anche visivamente i differenti livelli di rischio.
Il Database dei dati storici ai quali ricorre il SIGRA per la simulazione è il Catalogo Piene AVI (Aree storicamente Vulnerate Italiane) prodotto dal Consiglio Nazionale delle Ricerche, nel quale sono presenti l'insieme di tutti gli eventi alluvionali che hanno colpito il territorio italiano tra il 1900 ed il 2002. Nello stesso Catalogo sono presenti, anche se non per tutti gli eventi, la localizzazione del singolo danno prodotto dall'evento considerato, che permette l'associazione alla corrispondente mappa di pericolosità.

Nel caso in cui il singolo evento ricada in un'area interessata da più di una mappa di pericolosità delle tre disponibili in SIGRA (Tr=50, Tr=200, Tr=500), interviene un algoritmo che associa all'evento una sola delle mappe di pericolosità interessate, sulla base dei seguenti criteri:

- se almeno uno dei punti che indicano un sito vulnerato ricade nella mappa di pericolosità tempo di ritorno (Tr) pari a 500, allora la mappa di riferimento è quella con Tr=500;
- se almeno uno dei punti che indicano un sito vulnerato ricade nella mappa di pericolosità tempo di ritorno (Tr) pari a 200, allora la mappa di riferimento è quella con Tr=200;
- se tutti i punti che indicano un sito vulnerato ricadono nella mappa di pericolosità tempo di ritorn (Tr) pari a 50, allora la mappa di riferimento è quella con Tr=50

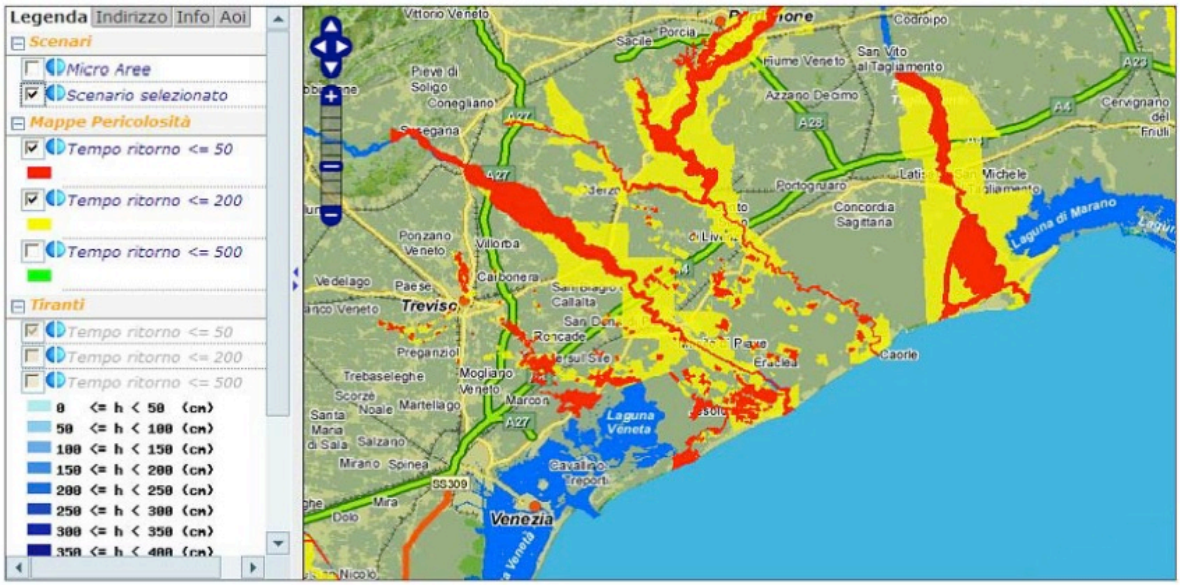


Fig.3.10 - Visualizzazione in SIGRA delle mappe di pericolosità per la Provincia di Venezia [81]

Come già anticipato, l'intensità dell'evento alluvionale è espressa in altezza del tirante idrico: l'immagine che segue mostra i diversi livelli di massima altezza che l'acqua raggiungerebbe nel caso in cui si verifichino gli eventi alluvionali con tempo di ritorno 50 e 200 anni nella provincia di Venezia.

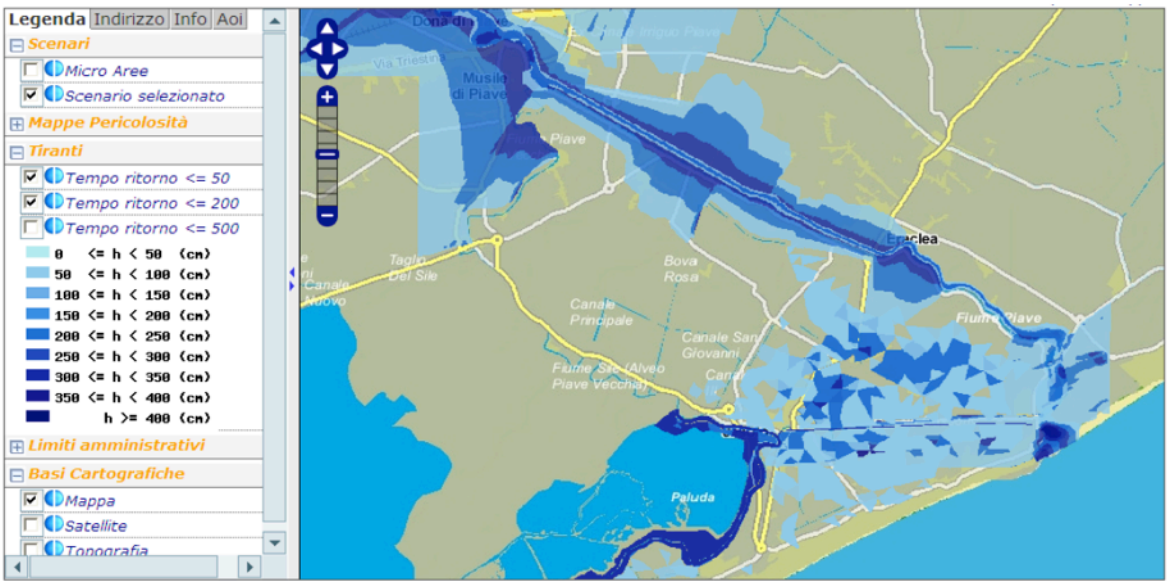


Fig.3.11 - SIGRA: Intensità dell'evento alluvionale nella Provincia di Venezia per tempo di ritorno Tt =50 e Tr=200 [81]

Va sottolineato che le tavole di vulnerabilità SIGRA sono frutto di dati derivanti dalle perizie assicurite sottoscritte nel tempo. Ciascuna mappa individua, per classe di altezza del tirante idrico, i parametri media e varianza che identificano la distribuzione del grado medio di danno

ipotizzata. A causa della mancanza di sufficienti dati per la stima, la vulnerabilità non è distinta per tipologia di fabbricato, ma solo per partita di danno (fabbricato, macchinari, merce).
L'output finale del sistema e quindi la stima del danno, consiste nel calcolo dei parametri assicurativi (AEL[31] e MPL[32]) per il portafoglio e per ogni suo singolo elemento.

4. IL TELERILEVAMENTO ATTIVO NEL PROCESSO DI RESILIENZA

Attualmente, soprattutto a livello internazionale, si sta progressivamente consolidando l'idea, tanto da parte della comunità scientifica che degli addetti al settore, che il ricorso a sensori per il telerilevamento SAR e LiDAR sia assolutamente auspicabile e necessario nel campo della mitigazione del rischio idrologico-idraulico, essendo considerate due tecnologie altamente di avanguardia e potenzialmente determinanti nell'indagare gli ampi termini di incertezza caratteristici del fenomeno in questione.
Prima di illustrarle nel dettaglio, risulta opportuno ricordare che il *Telerilevamento*, insieme anche alla *Fotogrammetria*, rappresentano l' *"Arte, scienza e tecnologia in grado di ottenere valide informazioni degli oggetti fisici e dell'ambiente, attraverso il processo di raccolta, misura e interpretazione di immagini (fotografiche e digitali) e rappresentazione analogica o digitale dei modelli di energia elettromagnetica derivanti da sistemi di rilevamento (camere fotografiche o sistemi a scansione) non a contatto con gli oggetti"* [84]: nello specifico il Telerilevamento o *Remote Sensing* può essere inoltre definito come l' *"acquisizione a distanza di dati riguardanti il territorio e l'ambiente nonché l'insieme dei metodi e delle tecniche per la sucessiva elaborazione e interpretazione"*.
In questo senso è però importante distinguere prima di tutto i sistemi di Osservazione della Terra (OT) rispetto ad altri tipi di sistemi di osservazione, quali ad esempio GPS o Galileo: i primi hanno l'obiettivo di indagare i fenomeni riguardanti la superficie terrestre, i mari e l'atmosfera ed afferiscono al Telerilevamento in senso stretto, mentre i secondi sono mirati alle comunicazioni e alla navigazione. In questo lavoro ci occuperemo esclusivamente di valutare le caratteristiche e le capacità del primo gruppo di sistemi, i cui vantaggi sono a livello generale identificabili in termini di [85]:

---

31 AEL (Annual expected loss): corrisponde al danno annuo atteso, ossia il danno su finestra temporale annuale, quando viene considerato per la sua valutazione un periodo sufficientemente lungo ed al limite infinito. Esso costituisce la media di tutti i danni che possono verificarsi, pesati con la loro probabilità di occorrenza.

32 MPL (Maximum Possible Loss): corrisponde al danno massimo possibile per un rischio o un portafoglio. Poiché generalmente il danno massimo possibile è pari alla somma assicurata, viene indicato come valore di MPL il massimo danno X che è ragionevole attendersi, cioè che la probabilità che un danno sia minore o uguale ad X sia pari ad una soglia elevata.

- osservazione del territorio uniforme, su superfici di dimensioni vaste ed in formato numerico
- rapidità di accesso all'informazione
- informazioni in diverse parti dello spettro elettromagnetico e quindi sensibilità a molteplici fenomeni
- osservazioni ripetibili nel tempo

Va sottolineato che un sistema di Telerilevamento, per essere definito tale, deve essere costituito da:

1. *Sorgente di Energia o Illuminazione (A)* : il primo requisito per il Telerilevamento è avere una sorgente di energia che illumini o fornisca energia elettromagnetica al bersaglio di interesse;
2. *Radiazione e Atmosfera (B)* : nel momento in cui l'energia viaggia dalla sorgente verso il bersaglio, essa entra in contatto e interagisce con l'atmosfera che attraversa. Tale interazione può avvenire due volte, nel momento in cui l'energia viaggia all'indietro dall'oggetto verso il sensore;
3. *Interazione con il Bersaglio (C)* : una volta che l'energia fa il suo percorso verso il bersaglio attraverso l'atmosfera, essa interagisce con l'oggetto in funzione delle proprietà sia dell'oggetto stesso che del tipo di radiazione emessa;
4. *Registrazione dell'Energia da parte del Sensore (D)* **:** dopo che l'energia è stata riflessa o emessa dal bersaglio, è necessario che un sensore remoto, quindi non in contatto con il bersaglio stesso, accumuli e registri la radiazione elettromagnetica;
5. *Trasmissione, Ricezione e Processamento (E)* **:** l'energia registrata dal sensore deve essere trasmessa, di solito in forma elettronica, verso una stazione di ricezione e processamento dove i dati verrano processati in immagine o altro formato non-immagine;
6. *Interpretazione ed Analisi (F)* **:** l'output così processato dovrà essere interpretato, in modo visivo, digitale o elettronico, per estrarre le informazioni riguardanti il bersaglio precedentemente illuminato;
7. *Applicazioni (G)* **:** l'elemento finale del processo di Telerilevamento si ottiene quando le informazioni estratte dall'interpretazione e dall'analisi degli output relativi al

bersaglio vengono utilizzate per meglio comprendere o portare alla luce nuove informazioni o come ausilio alla risoluzione di un particolare problema.

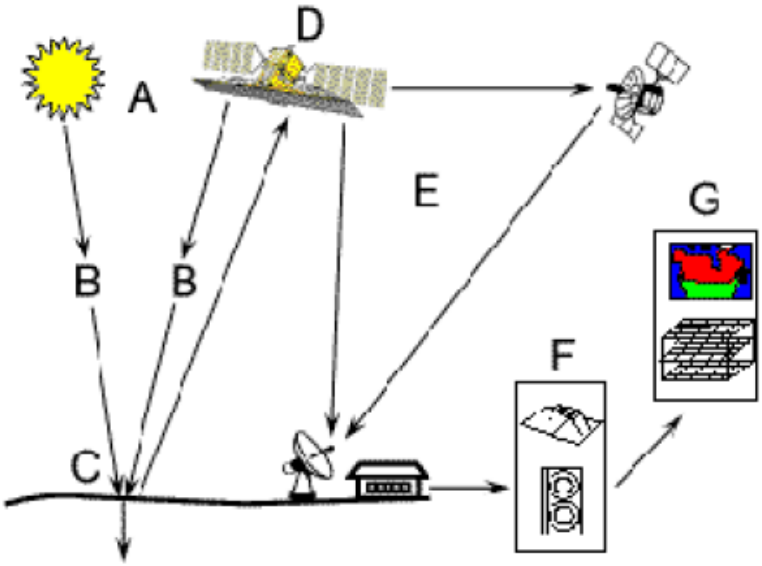


Fig.4.1 - Sistema di Telerilevamento [86]

4.1 Principi fisici del Telerilevamento

Prima di addentrarci in considerazione specifiche è bene condurre alcune premesse fondamentali. Come accennato nello schema precedente relativo ai sistemi di Telerilevamento, il primo principio fondamentale su cui esso si fonda riguarda la t*eoria della radiazione elettromagnetica*, dove per campo elettro-magnetico si intende un campo di forze descritto da due quantità vettoriali che sono rispettivamente il campo elettrico *E* ed il campo magnetico *M*. Un'onda elettromagnetica corrisponde ad una perturbazione per cui i campi *E* ed *M* variano nello spazio e nel tempo secondo una funzione di tipo sinusoidale. La direzione in cui avviene l'oscillazione del vettore *E* definisce la *polarizzazione* dell'onda elettromagnetica: tenendo come riferimento la figura riportata di seguito, si parlerà di polarizzazione orizzontale ovvero verticale a seconda se il segmento di oscillazione giace su un piano orizzontale piuttosto che verticale.

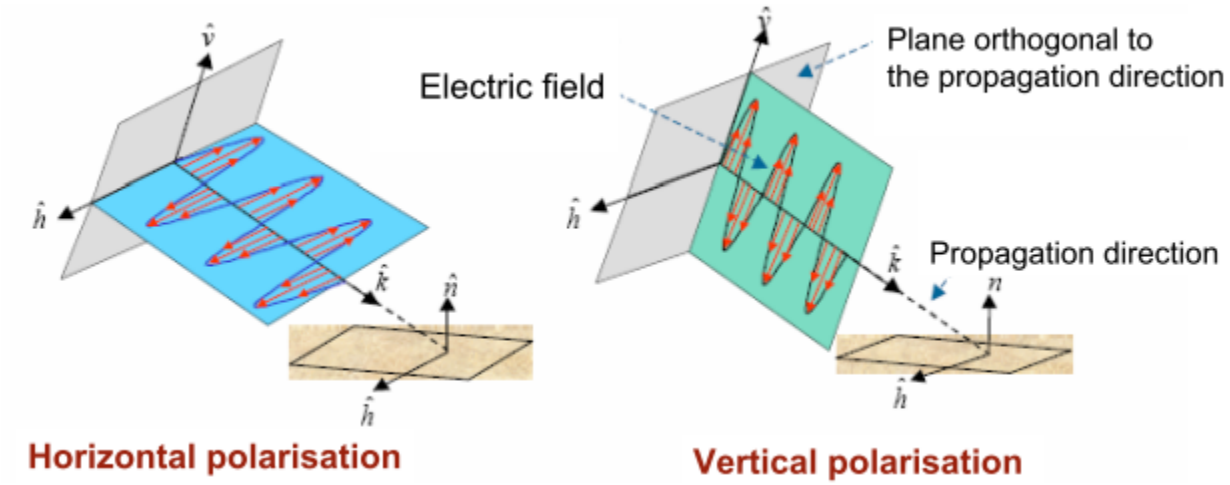


Fig.4.2 - Polarizzazione orizzontale o verticale di un'onda elettromagnetica [87]

Un'onda elettro-magnetica è descritta da:

- ***Lunghezza*** λ, ossia la distanza cHe separa due picchi consecutivi dell'onda; l'unità di misura è il metro e le sue frazioni, solitamente il nanometro (nm, 10^{-9} m) e il micron (mm, 10^{-6} m);
- ***Frequenza*** ν, ossia il numero di picchi che passano in un dato punto nell'unità di tempo; l'unità di misura è l'Hertz (Hz), equivalente ad un ciclo al secondo, ed i suoi sottomultipli.

Lunghezza λ e Frequenza ν sono strettamente legati tra loro dalla formula:

$$c = \lambda \nu$$

dove c è la velocità della luce (3×10^8 m/s).
Lunghezza e Frequenza sono inoltre inversamente proporzionali l'una all'altra: minore sarà la lunghezza, più alta sarà la corrispondente frequenza.

Una volta descritte le sue componenti, è possibile definire lo spettro elettromagnetico, ossia l'insieme continuo delle onde elettromagnetiche ordinate secondo la loro frequenza, lunghezza o numero d'onda [84], suddivisibile, per comodità operativa, in regioni a seconda della lunghezza d'onda considerata.

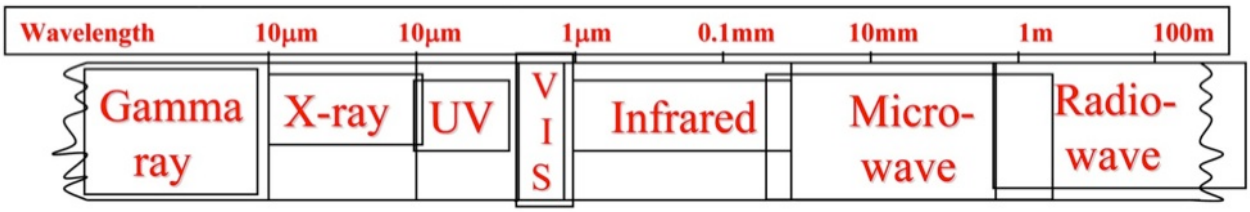


Fig.4.3 - Regioni dello spettro elettromagnetico [85]

Il secondo principio fondamentale è quello relativo all'***interazione energia – materia*** secondo la quale un'onda elettromagnetica incidente su una superficie reale può andare incontro a tre tipologie di fenomeni: riflessione (E_r)[33], assorbimento (E_a)[34] e trasmissione (E_t)[35]. Secondo il principio di conservazione dell'energia, la somma delle energie dovute a queste interazioni è costante ed uguale alla radiazione incidente (E_i), secondo la formula:

$$E_i = E_a + E_t + E_r$$

La variabilità di tali elementi dipende essenzialmente dalla lunghezza d'onda dell'energia incidente, dalla natura chimico-fisica e dalla rugosità della superficie del bersaglio stesso.
Concentrandosi sul fenomeno della riflessione dell'energia, si possono notare due comportamenti estremi nei modi in cui un bersaglio può riflettere l'energia incidente:

- *RIFLESSIONE SPECULARE*: interessa bersagli caratterizzati da superfici lisce; in questo caso tutta o comunque la maggior parte dell'energia incidente tocca il bersaglio per poi essere riflessa via in una singola direzione secondo un angolo pari a quello di incidenza;
- *RIFLESSIONE DIFFUSA o LAMBERTIANA*: interessa bersagli sono caratterizzati da superfici ad elevata rugosità; in questo caso la rflessione è di tipo isotropo, ossia l'energia incidente viene uniformemente riflessa in tutte le direzioni.

Tra i due fenomeni di riflessione incidono, oltre alle caratteristiche superficiali della materia, anche la lunghezza d'onda con la quale l'energia colpisce il bersaglio.

[33] Il fenomeno di riflessione avviene quando l'energia rimbalza sul bersaglio ed ridirezionata fuori da esso.
[34] Il fenomeno di assorbimento avviene quando l'energia viene assorbita all'interno del bersaglio.
[35] Il fenomeno di trasmissione avviene quando l'energia passa attraverso il bersaglio.

Il terzo principio del Telerilevamento infine è quello relativo all'***interazione energia-atmosfera***. Prima che la radiazione, di fonte naturale o artificiale che sia, raggiunga la superficie terrestre, è obbligata ad attraversare lo strato atmosferico. I costituitenti dell'atmosfera, quali particelle e gas, incidono sulla radiazione a causa di meccanismi di *diffusione e assorbimento*. Ricordando che per *diffusione* si intende il fenomeno di ridistribuzione della radiazione causandone un cambiamento nella direzione di propagazione, tale fenomeno, anche detto di *scattering*, si verifica quando particelle o grandi molecole di gas presenti in atmosfera interagiscono con la radiazione elettromagnetica causandone il re-indirizzamento verso il suo percorso originale. L'entità del fenomeno di diffusione dipende da numerosi fattori quali la lunghezza d'onda della radiazione, l'abbondanza di particelle o gas e la lunghezza del percorso che l'onda elettromagnetica deve effettuare attraverso l'atmosfera.
Il fenomeno di *diffusione* assume tendenzialmente tre diverse forme:

- *diffusione di Rayleigh*: si verfica quando le particelle e gas sono molto più piccole della lunghezza d'onda della radiazione; in questo caso si verifica una radiazione diffusa in tutte le direzioni e proporzionale a $1/\lambda^4$;

- *diffusione di Mie*: si ha quando la lunghezza d'onda della radiazione è comparabile con la grandezza delle particelle atmosferiche; in questo caso l'energia è fortemente retrodiffusa in direzioni prossime a quella della radiazione incidente e decade sensibilmente nelle altre direzioni;

- *diffusione non-selettiva*: si ha quando il diametro delle particelle sospese in atmosfera è molto più grande della lunghezza d'onda della radiazione; tale tipologia di diffusione è poco dipendente dalla lunghezza d'onda e le radiazioni vengono diffuse tutte pressochè allo stesso modo, dal visibile all'infrarosso

Si ha invece *assorbimento* atmosferico quando l'atmosfera impedisce o attenua la trasmissione della radiazione in determinate lunghezze d'onda. L'energia, che in questo modo l'atmosfera guadagna, è ri-emessa a lunghezze d'onda maggiori soprattutto a causa di ozono, anidride carbonica e vapore acqueo. Poiché il fenomeno di assorbimento avviene esclusivamente in regioni molto specifiche dello spettro, è possibile selezionare le restanti, ossia quelle insensibili al fenomeno ed in quante tali definite *finestre atmosferiche*.

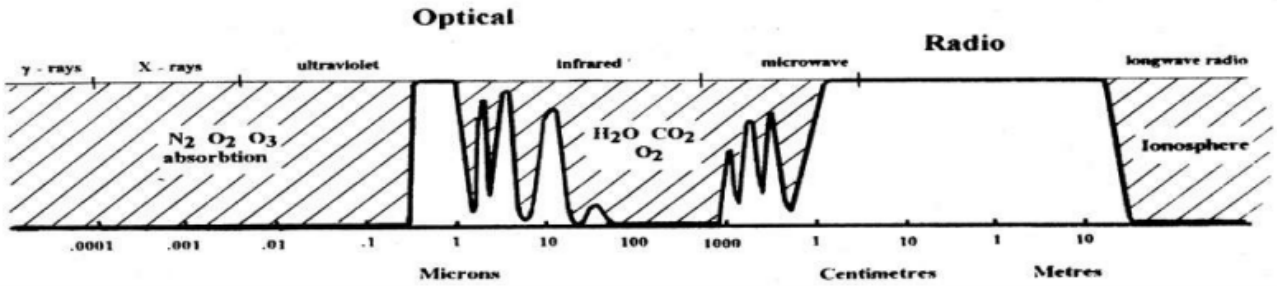


Fig.4.4 - Finestre atmosferiche [88]

Viste sotto questo punto di vista esse rappresentano l'intervallo dello spettro nel quale la radiazione elettromagnetica presenta la massima trasmissione e la minima attenuazione nell'atmosfera: le finestre atmosferiche più note sono, oltre a quella del visibile, parte dell'infrarosso termico (3-5 micron e 8-15 micron) e quasi tutta la banda delle microonde.

4.2 I sensori attivi: definizioni

La necessaria premessa riguardo i principi fisici del Telerilevamento risulta fondamentale per qualsiasi altro approfondimento successivo della materia. In particolar modo, risulta propedeutica qualora si intenda operare una valutazione delle tecnologie a disposizione sulla base di una delle distinzioni fondamentali che si è solita fare nel Telerilevamento, ossia tra sensori passivi e attivi, a seconda della sorgente luminosa che incide sulla superficie terrestre e agli intervalli di lunghezze d'onda utilizzati. Nei sistemi passivi infatti, i sensori risultano sensibili a intervalli di lunghezze d'onda comprese tra l'ultravioletto e l'infrarosso termico, in quello attivo invece si lavora nell'intervallo delle microonde o nell'infrarosso visibile. La distinzione fondamentale tra le due categorie di sensore risulta però essere proprio la sorgente elettromagnetica incidente: mentre i sensori passivi si limitano a registrare la quantità di energia riflessa dalla superficie terrestre e proveniente dal Sole o emessa dalla Terra, nel caso dei sensori attivi invece è il sensore stesso ad assumere il ruolo di sorgente mediante l'emissione di energia che irradia la superficie terrestre e per effetto di retrodiffusione viene più o meno restituita al sensore.

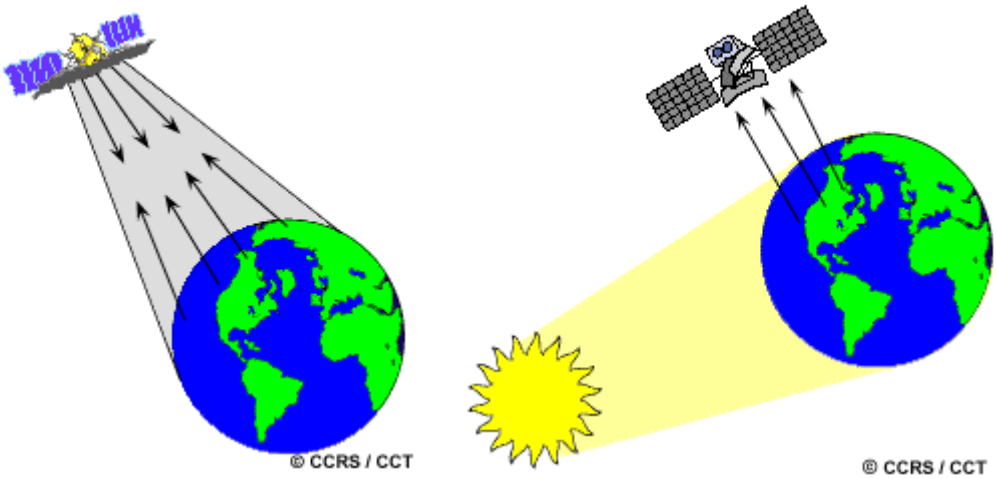


Fig.4.5 - A destra: Sensore attivo; A sinistra: Sensore passivo [86].

Nel caso dei sensori attivi quindi la fonte di energia non è più naturale, bensì artificiale e la frazione di energia riflessa viene registrata e misurata da sensori specifici tra i quali il *RADAR (RAdio Detection And Ranging) o* il *Lidar (Light Detection and Ranging)* a seconda che si lavori rispettivamente nelle microonde o nell'infrarosso visibile.

In questo lavoro ci concentreremo sull'analisi di questi due sensori specifici che, nonostante siano entrambi attivi, si differenziano come già detto non solo per la lunghezza d'onda utilizzzata ma anche in base al prodotto offerto: per il *RADAR* [36]si parlerà infatti di sensore di tipo *imaging* in quanto l'output sarà fondamentalmente un immagine raster, ossia una matrice righe e colonne in cui vengono registrati, dopo le opportune ed accurate attività di processamento, i valori registrati dal sensore, nel secondo del LiDAR invece si parlerà di sensore *non-imaging* in quanto i segnali registrati e dati in output non sono direttamente traducibili in mappe, ma sono solitamente misure monodimensionali quali principalmente altezze, dalle quali è possibile in seguito derivare mappe bidimensionali mediante opportune tecniche di interpolazione.

4.3 L'apporto dei sistemi di OT a microonde RADAR

Sulla base delle considerazioni introduttive fin'ora effettuate è già possibile accennare un confronto tra vantaggi e svantaggi apportati dall'uso di sensori attivi radar piuttosto che di sensori passivi ottici.

[36] Per semplicità si fa qui riferimento al radar ad immagine, tralasciando la trattazione delle varianti di sensori a microonde di tipo non-imagine quali scatterometro e radar altimetrico e radiometro a microonde

VANTAGGI	SVANTAGGI
• ***capacità ogni-tempo***: totale indipendenza dalle condizioni metereologiche e di illuminazione solare che permette una piena operatività sia di notte che di giorno ed in presenza di pioggia e copertura nuvolosa;	• ***interazione complessa***: difficoltà nel processamento e nell'analisi delle immagini di output
• ***complementarietà***: le proprietà dei sistemi radar consentono di descrivere oltre a forma e struttura degli oggetti anche il relativo contenuto in termini di umidità, mentre i sistemi ottici rispondono al colore a alla temperatura degli oggetti;	• ***distorsioni radiometriche***: che generano ambiguità nell'analisi dei fenomeni e relativa difficoltà di interpretazione degli stessi
• ***sensibilità ai rilievi***: l'illuminazione laterale tipica dei sistemi radar permette una forte sensibilità alle variazione di quota e alle rugosità superficiali;	• ***distorsioni geometriche:*** dovute alla ripresa laterale
• ***illuminazione coerente***: permette di ottenere informazioni sia riguardo la natura che la distanza delle superfici illuminate in modo da poter effettuare misurazioni molto accurate su entrambi i fronti, capacità particolarmente rilevante nel caso di valutazione di cambiamenti nel tempo.	• effetti legati alla ***rugosità*** degli oggetti
• ***costo minore***: l'acquisto di un immagine di radar ha un costo minore rispetto a quello di un immagine ottica. Tale considerazione si basa sul confronto di immagini radar e ottiche a più alta risoluzione presenti attualmente sul mercato: il costo di una immagine Spotlight-2 risoluzione 1 m da sensore COSMO-SkyMed, in caso di nuova acquisizione, è di 9,45 euro per una Standard Scene di 10x10 Km al quale va aggiunto un 75% di maggiorazione dovuto a richieste di acquisizione in modalità *Emergency*, sulla base del quale si giunge ad un costo finale di 16,54 euro per scena [89]; il costo è ugualmente contenuto anche qualora si decida di far ricorso, a parità di prodotto offerto, a sensori SAR diversi [90]. Di contro, un'immagine ottica pancromatica a risoluzione di 0,61 m da sensore ottico Quickbird ha un costo di 16,57 Euro per km^2, prezzo che si riferisce a nuova acquisizione in modalità *Single Shot*, ossia servizio di livello avanzato per rispondere a esigenze di nuova acquisizione immediata o per un giorno specifico [89].	

4.3.1 Synthetic Aperture Radar (SAR) : principi di funzionamento

Il RADAR *(RAdio Detection And Ranging),* ossia rilevazione e valutazione della distanza tramite onde radio, è, come anticipato, il principale sensore attivo *imaging* che opera nella regione del microonde in lunghezze d'onda comprese tra 3 mm e 1 m, ossia le più ampie lunghezze d'onda usate per scopi di Telerilevamento. Tale sensore può essere installato sia su piattaforma aerea che satellitare. Tra i possibili generatori di immagini radar troviamo: il *Real Aperture Radar* (RAR), il *Side-Looking Airborne Radar* (SLAR) e il *Synthetic Aperture Radar* (SAR).

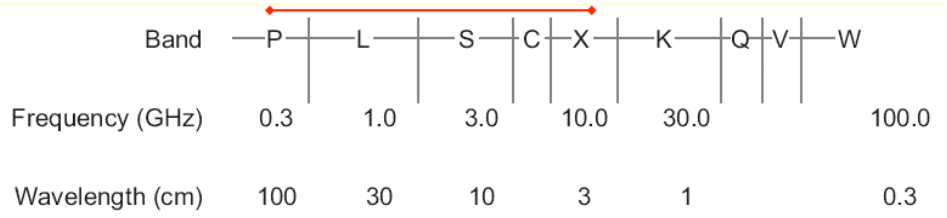


Fig.4.6 - Caratterizzazione dello spettro EM delle microonde [91]

I primi studi sul radar ebbero inizio contemporaneamente negli USA e in Europa negli anni trenta: l'imminenza del secondo conflitto militare accellerò e secretò le ricerche, che si svilupparono separatamente nei vari Stati interessati dal conflitto rivolgendo l'attenzione principalmente agli scopi militari. Solo più recentemente il Telerilevamento attivo ha avuto un ruolo in applicazioni civili e in particolare per l'Osservazione della Terra. Il primo strumento radar per questo scopo fu montato sul satellite Seasat e lanciato in orbita nel 1978 fornendo dati e immagini della Terra per 105 giorni aprendo alle successive missioni dell'Agenzia Spaziale Europea (ERS-1 e 2, Envisat), Canadese (Radarsat), giapponese (Jers-1, Adeos) e altre.
Come già accennato il RADAR si basa sull'emissione di onde *EM* e sulla registrazione, misurazione e processamento delle relative diffusioni. Dalle caratteristiche del segnale di ritorno si estraggono informazioni sulle caratteristiche e sulla posizione dell'oggetto scelto come bersaglio. L'interpretazione delle immagini RADAR è meno intuitiva e molto più complessa rispetto all'interpretazione delle immagini ottiche; inoltre le interazioni tra energia e materia alle frequenze delle microonde seguono modalità diverse rispetto al caso ottico.

Il radar è un sensore attivo costituito da un sistema di rilevamento funzionante sul principio dell'eco, in cui il trasmettitore irradia la scena osseravata periodicamente emettendo energia sotto forma di impulsi a microonde di grande potenza, ma di durata molto breve, registrando e

misurandone infine il ritorno. Come già anticipato ciò gli permette di acquisire dati anche in presenza di copertura nuvolsa e in qualsiasi ora di giorno, indipendentemente quindi dalla presenza o meno di luce solare. Il radar nel quale l'antenna ricevente coincide con quella trasmittente si chiama *radar monostatico*, ed è il caso più comune nei satelliti per l'Osservazione della Terra; diversamente si parlerà di *radar bistatico*. A differenza di altri, soprattutto dei sensori ottici, il radar si caratterizza per le sue capacità di fornire informazioni *coerenti* del segnale retrodiffuso o *radiazione di backscattering*, in quanto capace di registrarne sia il dato di ampiezza (*valore di modulo*) sia l'informazione associata alla distanza sensore-bersaglio (*valore di fase*), valutando rispettivamente l'intensità e il ritardo temporale tra segnale inviato ed eco ricevuto.

Poiché infatti la velocità di propagazione degli impulsi radar è perfettamente nota in quanto pari alla velocità della luce, dal tempo impiegato dal segnale a raggiungere il bersaglio e tornare al sensore, si può ricavare la distanza dello stesso. A differenza dei sensori ottici, in cui la ripresa del bersaglio è di tipo *nadir-looking*, i sensori radar operano in modalità di ripresa *side-looking* ossia il fascio di microonde emesso dall'antenna illumina una strisciata (o *swath*) a terra con una certa obliquità rispetto alla direzione del nadir. Ciò implica che, mentre gli strumenti di rilevazione ottica sono in grado di distinguere i bersagli sulla base della loro distanza angolare dal nadir[92] del sensore potendo così raccogliere dati su entrambi i lati intorno alla direzione di volo nadirale, un radar invece può distinguere i ritorni provenienti da vari bersagli generalmente solo sulla base del tempo di ritorno del segnale. Quindi un radar nadirale non sarebbe in grado di distinguere tra due segnali posti alla stessa distanza a sinistra ed a destra dell'antenna, dato che il fronte d'onda emesso illuminerebbe i due punti nello stesso istante e di conseguenza i ritorni retrodiffusi arriverebbero simultaneamente, comportando notevoli ambiguità.

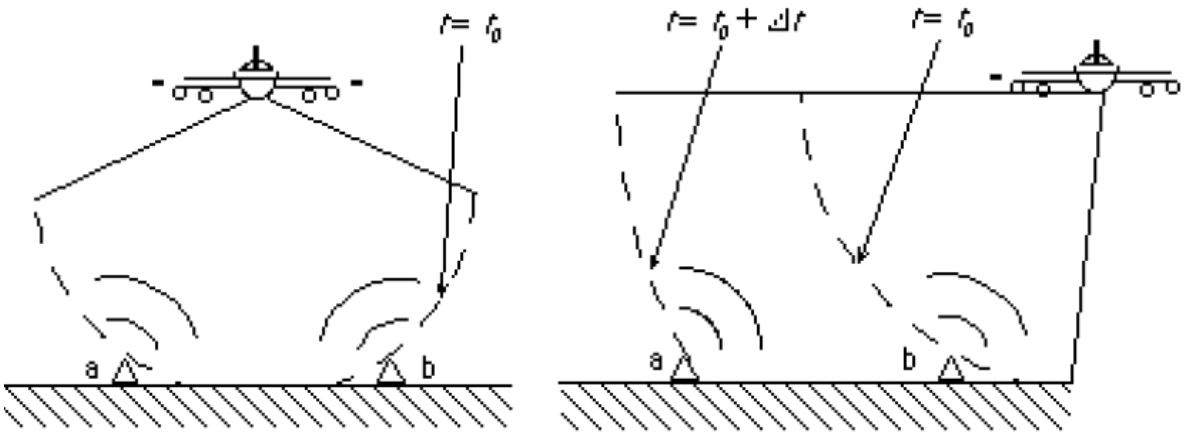


Fig.4.7 - A sinistra: direzione di ripresa nadirale nei sensori ottici; A destra: direzione di ripresa side-looking nei sensori radar [91]

In questo modo, dal ritardo del ritorno dell'impulso emesso si ricava la distanza del bersaglio da sensore, mentre dalla posizione del sensore stesso si ricava la posizione in direzione perpendicolare al fascio di microonde emesso: in tal modo ogni ritorno e quindi ogni pixel del'immagine radar che si otterà dalla scansione sarà dotato di una ben determinata posizione sulla superficie terrestre. Si ricorda che tale sistema di ripresa è particolarmente importante proprio per il fatto che il radar funziona nel dominio del tempo essendo lo spazio una misura esclusivamente ricavata, data la costanza della velocità della luce.

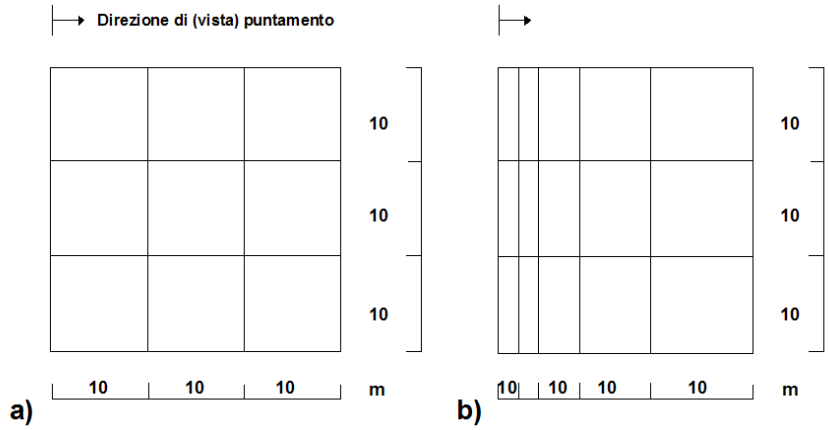


Fig.27 - Confronto geometrico tra sistemi di ripresa ottica e radar: a) geometria di una ripresa verticale (nadir) di un sistema ottico, b) geometria di ripresa di un sistema radar [84]

Risulta inoltre utile sottolineare, che la geometria di acquisizione può essere distinta in due tipologie a seconda della direzione di percorrenza dell'orbita da parte del satellite: Ascendente (*Ascending*) o Discendente (*Descending*) a seconda che l'orbita sia rispettivamente percorsa da sud verso nord ovvero da nord verso sud. La diversa geometria di acquisizione, associata alla caratteristica ripresa *side-looking*, incide sulla direzione di origine del fascio illuminante, producendo di conseguenza una modifica delle risposte da parte dei bersagli della scena.

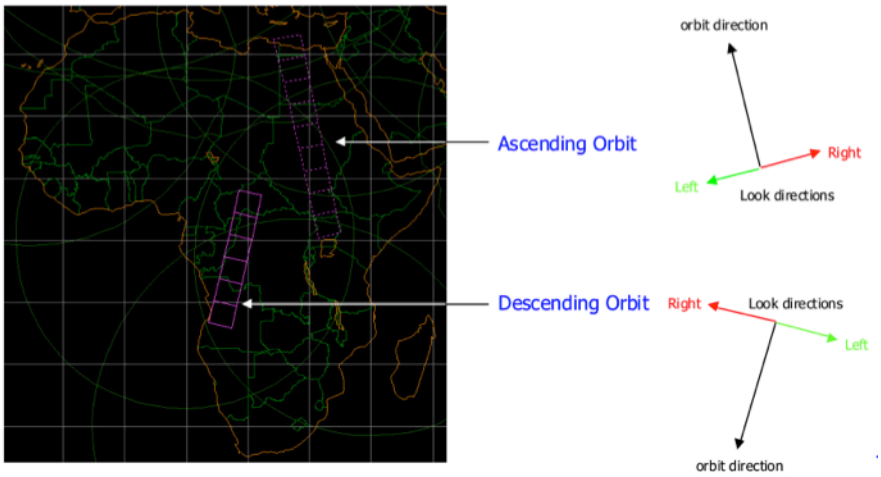
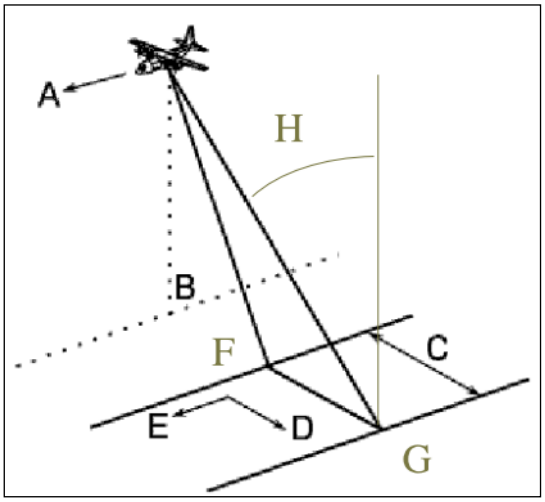


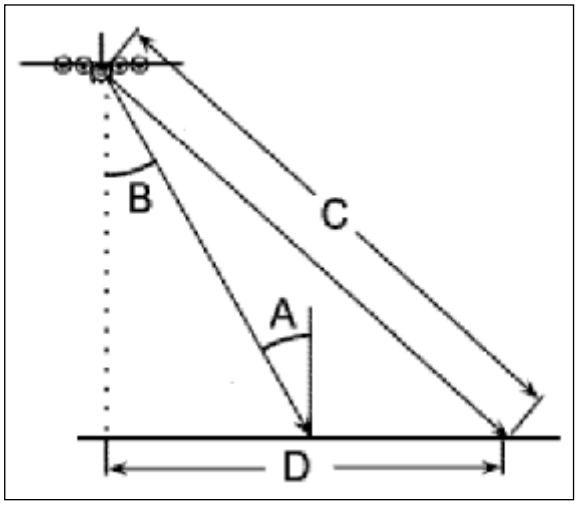
Fig.4.8 - Geometria di acquizione in base all'orbita percorsa dal sensore [93]

Nel dettaglio, la geometria di acquisizione del radar può essere schematizzata come segue:



dove:

A) DIREZIONE DI VOLO (*Flight Path o Satellite Track*)
B) NADIR DELLA PIATTAFORMA (*Nadir Track*)
C) STRISCIATA (*Swath*)
D) DIREZIONE DISTANZA A TERRA (*Across-Track*)
E) DIREZIONE AZIMUTH[37] (*Along-Track*)
F) PORTATA PROSSIMA (*Near Range*)
G) PORTATA LUNGA (*Far Range*)
H) ANGOLO D'INCIDENZA



dove:

A) ANGOLO DI INCIDENZA LOCALE
B) ANGOLO DI OSSERVAZIONE
C) ASSE PORTATA (*Slant Range*)[38]
D) ASSE DISTANZA A TERRA (*Ground Range*)

[37] Per *Azimuth* si fa riferimento alla direzione parallela dell'orbita o di volo, coincidente approssimativamente con la direzione Nord-Sud

[38] Per *slant range* o *range* si intende la direzione congiungente sensore-bersaglio, perpendicolare all'orbita o alla direzione di volo ed inclinata di un preciso angolo (off-nadir) rispetto alla verticale

Le immagini radar ottenibili sono costituite da pixel il cui valore è proporzionale alla potenza del segnale riflesso verso l'antenna dalla corrispondente cella sul terreno. L'*equazione radar* che fornisce la potenza media retrodiffusa per ogni punto dell'immagine è la seguente:

$$< P_r >= P_t \left[\frac{G^2 \lambda^2}{4\pi^3 R^4} \right] \sigma^0$$

dove:

$< P_r >$: potenza media ricevuta dall'antenna

P_t : potenza inviata dall'antenna

G : guadagno d'antenna

λ : lunghezza d'onda del fascio radar incidente

R : distanza obliqua fra antenna e bersaglio

σ^0 : coefficiente di retrodiffusione o *backscattering coefficient, espresso in decibel (dB)*

Risulta importante specificare che per coefficiente di *backscattering* σ^0 si fa riferimento alla quantità di energia retrodiffusa per unità di area in *ground range*; la retrodiffusione infatti può essere stimata anche come diffusione β^0 o γ^0 a seconda che si faccia rispettivamente riferimento alla quantità di retrodiffusione per unità di area in *slante range*[39] ovvero del fascio incidente, perpendicolare allo *slant range*.

Il backscattering coefficient σ^0 risponde alla seguente formula:

$$\sigma^0 = \beta^0{}_{jk} + 10 * \log_{10}(\sin(\theta))$$

dove θ è l'angolo di incidenza locale.

Tale coefficiente, particolarmente importante in quanto dalla sua valutazione è possibile identificare le modalità di risposta dellediverse superfici alla banda radar, dipende essenzialmente dai seguenti parametri:

---

[39] β^0 è la RADAR BRIGHTNESS, espresso in dB; rappresenta la radioemetria osservabile nell'immagine radar e non richiede la conoscenza dell'angolo d'incidenza per essere stimata

- *parametri degli oggetti della superficie terrestre*: rugosità, contenuto d'acqua o umidità, costante dielettrica[40], resistività elettrica, geometria della superficie, giacitura della superficie;

- *lunghezza d'onda del segnale incidente (λ)*: l'intervallo teorico di λ utilizzabile per osservazioni radar, come già detto, è compreso tra 1 mm e 1 m. Poiché un corpo, per interagire con un'onda elettromagnetica deve avere dimensioni simili alla lunghezza d'onda stessa, i componenti dell'atmosfera non costituiscono ostacolo alla penetrazione delle onde radar. Inoltre la capacità di attraversare le idrometeore e di penetrare le superfici investigate cresce al crescere della lunghezza d'onda. Di seguito se ne riporta una esemplificazione.

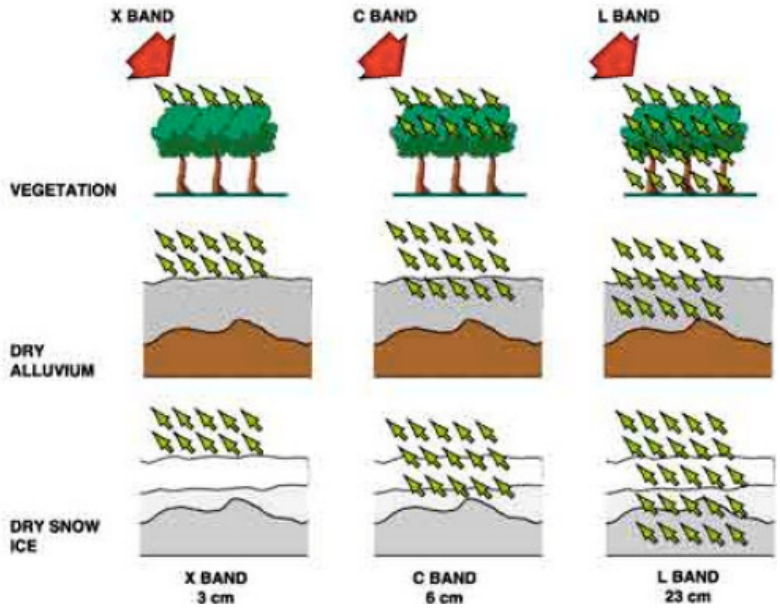


Fig.4.9 - Capacità di penetrazione dei bersagli in differenti lunghezze d'onda delle microonde [93]

In generale è utile accordare la scelta della lunghezza d'onda con l'ordine di grandezza delle caratteristiche da indagare: ad esempio per il ghiaccio è consigliata la banda X, per l'osservazione geologica la banda L mentre per la penetrazione attraverso le chiome degli alberi la banda P. Tra le varie alternative la banda C è quella che fornisce il miglior compromesso.

[40] Per costante dielettrica o permittività elettrica si intende una grandezza fisica che descrive la capacità di un ateriale di trsmettere il campo elettrico. La sua unità di misura è F/m ossia Farad su metro.

- *polarizzazione del segnale*: un segnale radar può essere generato in modo tale che le oscillazioni dell'onda siano limitate ad un solo piano perpendicolare alla sua direzione di propagazione: in questo caso l'onda si dice "polarizzata". Indipendentemente dalla lunghezza d'onda, essa può essere trasmessa o ricevuta in diverse polarizzazioni: normalmente si considerano i piani verticali (V) e orizzontali (H). Si hanno così quattro diverse combinazioni:
    - HH e VV, onde trasmesse e ricevute polarizzate, rispettivamente in modo orizzontale e verticale;
    - HV e VH, onde trasmesse e ricevute con polarizzazioni incrociate.

  Le diverse forme degli oggetti possono influenzare la polarizzazione dell'onda riflessa, che quindi fornisce indicazioni sulla loro identità. Inoltre, il tipo di polarizzazione influenza anche la penetrazione del segnale radar nei bersagli: le polarizzazioni incrociate sono in tal senso meno effeicaci rispetto alle altre.

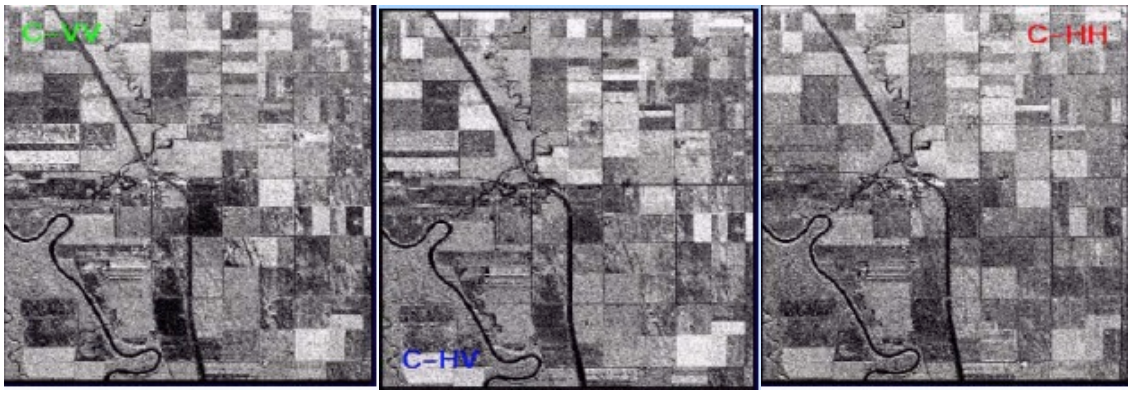


Fig.4.10 - Confronto tra metodi di Polarizzazione in banca C: da destra VV, HV, HH [94]

- *angolo di incidenza della ripresa*: la radiazione riflessa è influenzata dalla variazione dell'angolo di inclinazione. Maggiori angoli di inclinazione permettono una più vasta esplorazione del territorio e una migliore risoluzione delle immagini, tuttavia diminuisce l'intensità del segnale di backscattering

Uno dei principali obiettivi del radar nel Telerilevamento è quella di fornire immagini con una buona risoluzione. Da questo punto di vista è possibile distinguere due tipi di *risoluzioni*: la risoluzione in distanza e quella in azimuth.

La *risoluzione in distanza* ossia in *ground range*, dipende dalla durata dell'impulso e si intende la minima distanza che deve intercorrere tra due oggetti che generano un ritorno (diffusori o *scatters*) in modo tale che il ritorno dal primo sia cessato prima che il ritorno del secondo abbia inizio: affinchè questo sia possibile la distanza minima tra i due elementi deve essere maggiore della metà della durata dell'impulso, in caso contrario i due eco si sovrappongono e vengono visti come un unico oggetto.

.

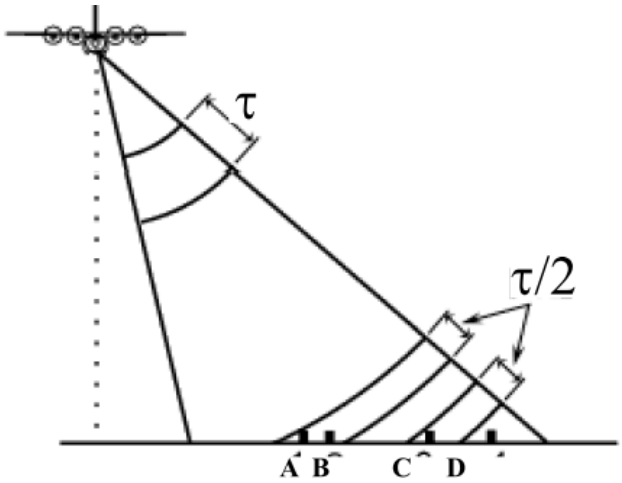


Fig.4.11- Limiti della risoluzione in range [95]

La figura 31 esemplifica bene quanto accennato: la distanza che intercorre tra i bersagli A e B è minore di $\tau / 2$ ossi della metà della durata dell'impulso, cioè fa sì che quando l'impulso arriva a B e comincia ad essere riflesso, il fenomeno di riflessione di A è ancora in corso determinando così una sovrapposizione dei due segnali e corrispondente indistinguibilità degli oggetti stessi.

Diffusori troppo vicini sono causa della comparsa del tipico *Speckle* nelle immagini, ossia un effetto di rumore che verrà descritto più approfonditamente in seguito.
Detto ciò la risoluzione in *range* può essere descritta dalla seguente formula:

$$r_{range} = \frac{c\tau}{2}$$

dove

c è la velocità della luce

τ è la durata dell'impulso

γ è l'angolo di depressione

Bisogna ricordare che la distinguibilità di due diffusori non dipende dalla loro distanza dal trasmettitore: la risoluzione in distanza di un sistema radar è infatti costante in direzione *slant range*, mentre non è altrettanto costante in direzione *ground range*, dove invece migliora con l'aumentare della distanza. Maggiori risoluzioni richiedono quindi piccoli impulsi ad elevata energia, cosa difficilmente praticabile. Per tale ragione i sensori radar in piattaforme spaziali utilizzano segnali a modulazione di frequenza (*chirp*) che hanno i medesimi vantaggi di impulsi corti da un punto di vista di risoluzione e di impulsi lunghi per quanto concerne l'energia trasmessa.

La *risoluzione azimuthale* ossia in *along-track*, peggiora con la lontananza del bersaglio dal sensore, sia in termini di distanza che di altezza del sensore stesso. L'apertura del fascio dipende a sua volta dalle dimensioni dell'antenna rispetto alla lunghezza d'onda emessa: più stretto è il fascio, migliore è la risoluzione. Per essere distinguibili quindi due oggetti devono essere separati lungo l'azimuth da una distanza maggiore di quella del fascio misurato a terra. La figura a seguire esemplifica bene quanto accennato: i bersagli 1) e 2) risultano distinguibili, mentre il 3) ed il 4) no proprio perché nel secondo caso l'ampiezza del fascio emesso, che è data dal rapporto tra lunghezza d'onda e e lunghezza dell'antenna nella direzione di aimuth, risulta maggiore rispetto alla distanza che intercorre tra i due bersagli, determinando così la non distinguibilità.

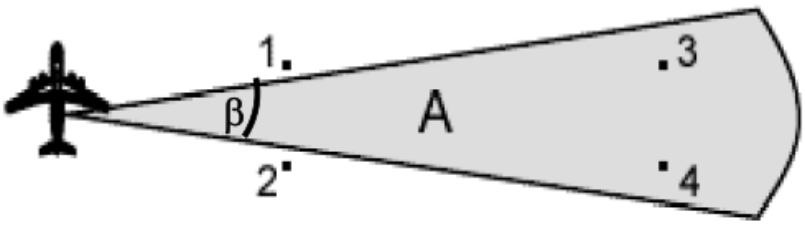


Fig.4.12 - Limiti della risoluzione azimuthale [95]

Nei sistemi classici quali Radar ad Aperura Reale (RAR) la risoluzione azimuthale può essere descritta mediante la seguente equazione:

$$r_{azimuth} = \frac{\lambda R}{L}$$

dove

R è lo slant range ossia la distanza antenna-oggetto

λ è la lunghezza d'onda

L è la lunghezza dell'antenna

Come anticipato questo tipo di risoluzione varia al variare dello *slant range* e può essere migliorata esclusivamente aumentando le dimensioni dell'antenna: la sua efficacia costituisce quindi un limite oggettivo soprattutto per i sensori su piattaforme orbitanti dove l'elevato *slant range* richiederebbe lunghezze delle antenne improponibili. Tale problema viene però risolto mediante il ricorso a sistemi SAR *(Sinthetic Aperture Radar)* ossia un metodo di elaborazione dei segnali che permette di ottenere risoluzioni indipendenti dalla distanza e l'uso di un'antenna di piccole dimensioni.

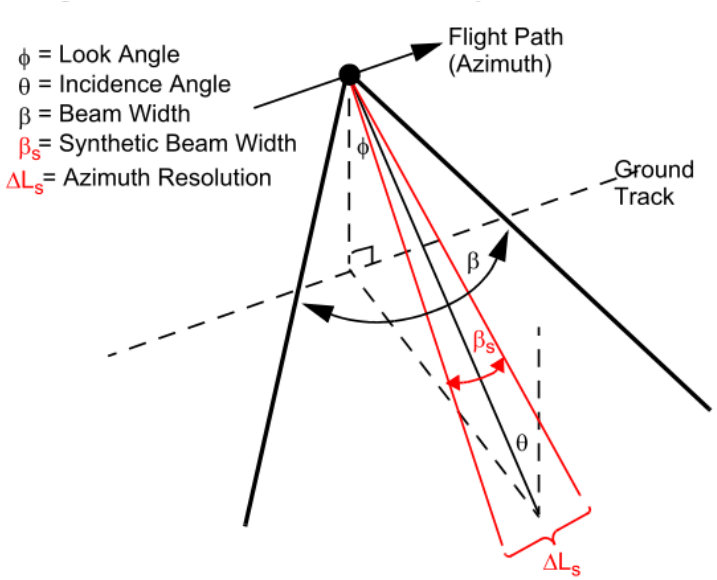


Fig.4.13 - Risoluzione geometrica azimuthale con sensore SAR [96]

La risoluzione in azimuth è in tal modo migliorata grazie al fatto che il bersaglio in questo caso viene illuminato per un tempo maggiore quanto è più lontano dal sensore: la disponibilità di un eco più lungo contrbilancia in questo modo la perdita di risoluzione dovuta alla distanza. Tale capacità deriva dalla simulazione di un'antenna più lunga rispetto a quella effettivamente presente, pari, a titolo esemplificativo, al segmento (B) presente nella figura riportata a seguire.

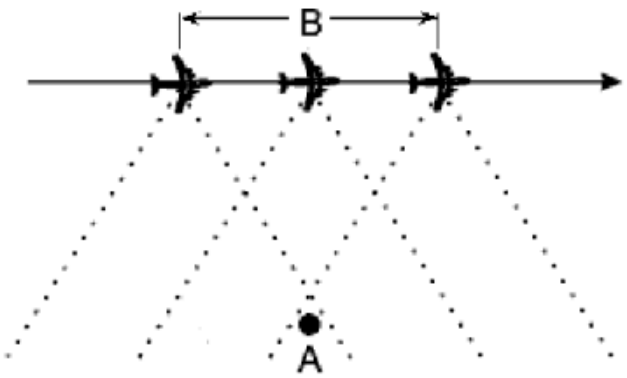


Fig.4.14 - Schematizzazione del sistema di apertura sintentica – [91]

La registrazione della fase e dell'ampiezza dei segnali di ritorno lungo la traccia di volo permette di avere a disposizione la storia di fase (o *Doppler history*) di ogni bersaglio colpito dal fascio e di ricostruire le risoluzioni azimuthali che si avrebbero in un sistema ad apertura reale con un'antenna pari alle dimensioni della porzione della linea di volo presa in considerazione. Ciò è reso possibile sostanzialmente dal cosiddetto *effetto Doppler*, che consiste nel memorizzare e confrontare nel tempo i segnale di ritorno dalla superficie investigata proprio mentre il sensore si sposta lungo la linea di volo. I molteplici segnali inviati sono di frequenza costante, mentre i segnali di risposta hanno una frequenza variabile poiché antenna e oggetto indagato sono in moto relativo tra loro. Elaborando l'insieme dei segnali di risposta è possibile simulare quindi un'antenna di apertura o dimensioni molto più grandi rispetto a quella realmente posseduta dal sensore. Gli svantaggi principali del sistema ad apertura sintentica risiedono in elaborazioni complesse e pesanti del segnale e nello spostamento degli oggetti in movimento.

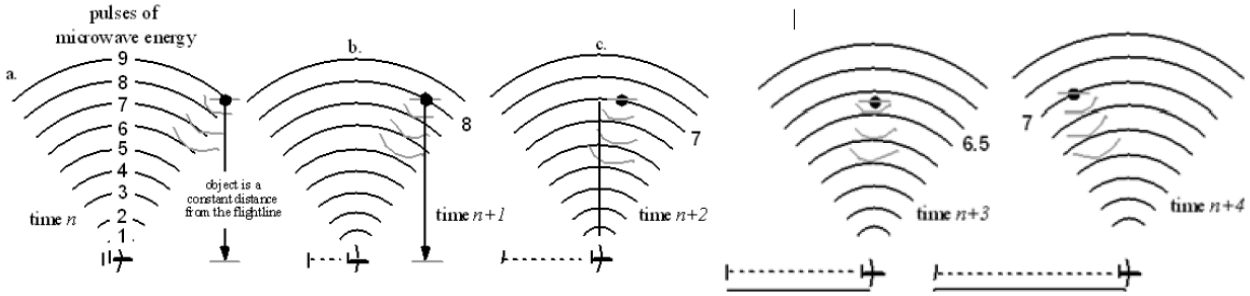


Fig.4.15 - Effetto Doppler [95]

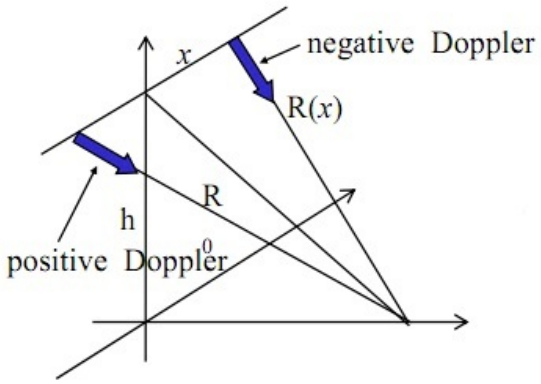


Fig.4.16 –Caratterizzazione dell'effetto Doppler [97]

Tenendo fermo il concetto per cui più ampia è la lunghezza d'onda (e quindi minore la frequenza), maggiore sarà la capacità di penetrazione del fascio illuminante nelle superfici, viene di seguito riportata una breve lista delle principali missioni radar SAR attualmente operative, relativa categoria di lunghezza d'onda utilizzata e ripettive capacità di penetrazione.

P-band = ~ 65 cm AIRSAR
L-band = ~ 23 cm JERS-1 SAR, ALOS PALSAR
S-band = ~ 10 cm Almaz-1
C-band = ~ 5 cm ERS-1/2 SAR, RADARSAT-1/2, ENVISAT ASAR, RISAT-1
X-band = ~ 3 cm TerraSAR-X-1 , COSMO-SkyMed
K-band = ~ 1.2 cm Military domain

Fig.4.17 - Principali categorie di lunghezze d'onda utilizzate dal SAR [93]

Dataset	Polarization	Wavelength	Revisit Time
ERS-1,-2	C-VV	5.7 cm	35 days (tandem: 24 hrs)
JERS-1	L-HH	23 cm	46 days
Radarsat-1	C-HH	5.6 cm	24 days
Envisat ASAR	C-band dual-pol	5.6 cm	35 days
ALOS PALSAR	L-band dual-pol, quad-pol	23.6 cm	46 days
Radarsat-2	C-Band dual-pol, quad-pol	5.6 cm	24 days
TerraSAR-X	X-band dual pol, quad-pol	3.1 cm	11 days
COSMO-SkyMed	X-band dual pol	3 cm	**min 3,5 h, max 12h**
TanDEM-X (2010)	X-band dual pol, quad-pol	3.1 cm	bistatic

Tab.4.1 - Caratteristiche missioni sensori SAR [96]

4.3.1.1 Modalità di acquisizione

La risoluzione spaziale e le dimensioni della copertura a terra restituibile dipendono anche dalla modalità di acquizione o *imaging mode* in cui il sensore SAR è chiamato ad operare. In questo senso è possibile distinguere tre diverse modalità di acquisizione: Stripmap, ScanSAR e Spotlight.

La modalità Stripmap rappresenta la modalità di acquisizione più comunemente utilizzata soprattutto per le analisi interferometriche. In essa l'angolo nominale di ripresa è fisso, la dimensione in range dell'immagine è determinata dai limiti del Near-range e Far-range del sensore e la dimensione in Azimuth dipende dal moto del sensore. Per i satelliti ERS-1, ERS-2 e JERS-1 la direzione e l'angolo di ripresa sono fissi, mentre per gli altri satelliti attualmente operativi è possibile modificare entrambi entro certi limiti per consentire la registrazione della

scena secondo una certa flessibilità in termini di angolo di ripresa e localizzazione sulla superficie.

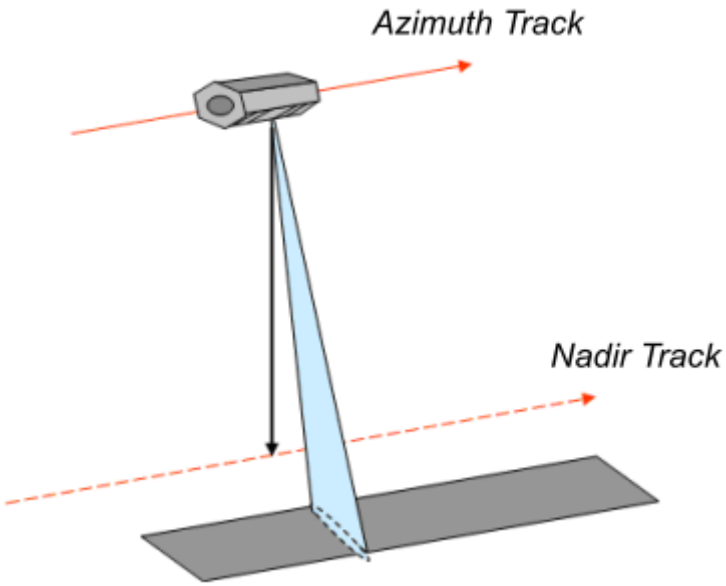


Fig.4.18 - Acquisizione in modalità Stripmap [96]

La modalità Scan SAR invece può essere definito come un derivato della modalità Stripmap in quanto il fascio radar viene elettronicamente indirizzato in modo consecutivo su strisciate adiacenti. In questo modo si ottiene una scena che registra la copertura di una vasta area della superficie terrestre, ma al prezzo di una risoluzione spaziale decisamente inferiore rispetto alla precedente.

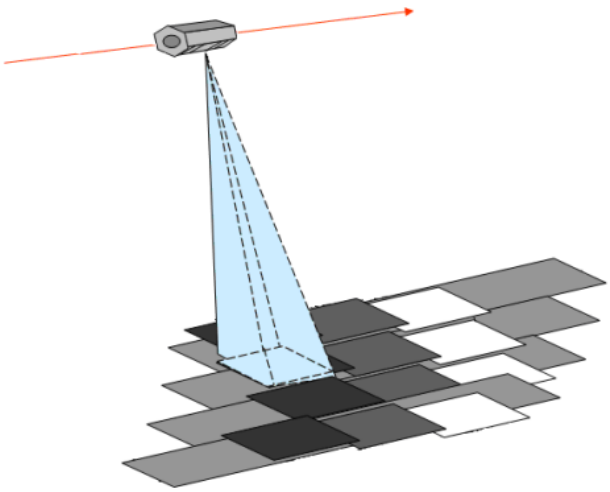


Fig.4.19 - Acquisizione in modalità ScanSAR [96]

In ultimo abbiamo la modalità Spotlight nella quale il fascio dell'antenna è indirizzato in modo tale da illuminare continuamente una regione specifica, di solito di limitate dimensioni. Questa

modalità offre risoluzione azimuthale molto elevate al prezzo di una copertura della superficie terrestre molto minore rispetto alle precedenti.

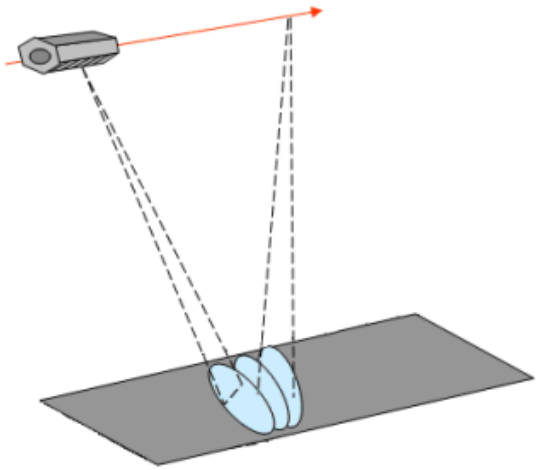


Fig.4.20 - Acquisizione in modalità Spotlight [96]

4.3.1.2 Distorsioni

A causa della geometria di vista del sensore radar, che ricordiamo osserva lateralmente la scena e colloca i diffusori (*scatters*) sulla base del tempo di ritorno dell'onda, le immagini radar risentono di diversi tipi di distorsione, essenzialmente distinguibili in due categorie: distorsioni di tipo geometrico e distorsioni di tipo radiometrico.

Per quanto riguarda le *distorsioni geometriche* si tratta essenzialmente di deformazioni prospettiche dovute alla topografia del terreno e alla geometria degli elementi illuminati.
La creazione del dato radar dipende dall'intensità e dal tempo di ritorno dell'eco riflesso dalla superficie ed in questo modo è possibile quindi misurare la distanza tra il bersaglio e l'antenna, ossia la distanza in *slant range*. L'angolo di illuminazione però, diminuisce man mano che si passa da posizione prossime al sensore (*near range*) a posizione più lontante (*far range*): tale fenomeno comporta che punti vicini alla linea di volo (*near range*) appariranno compressi in direzione ground range, se confrontati con gli oggetti più lontani (*far range*). Conoscendo l'altezza del sensore ed assumendo il terreno piatto, è possibile approssimare le posizioni reali dei ritorni radar. Questa operazione viene detta *slant-to-ground projection*, ossia mediante la correzione geometrica dell'immagine in *slant range*.

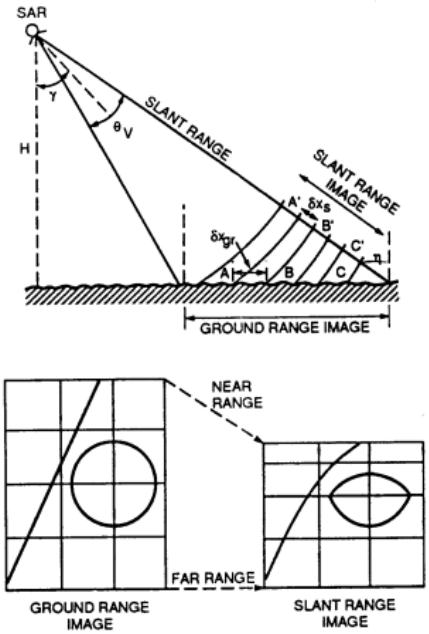


Fig.4.21 – Proiezione *slant-to-ground range*[94]

Per una ideale superficie liscia la correzione si limita a seguire la seguente formula:

$$ground_range = slant_range / sen(i)$$

Nella maggior parte dei casi però le superfici non sono perfettamente liscie e quindi si va incontro ad ulteriori distorsioni geometriche, identificabili essenzialmente in tre fenomeni:

- *FORESHORTENING* (o accorciamento) : compressione degli elementi della scena che sono inclinati verso il radar ossia che tendono ad essere perpendicolari alla congiungente sensore-bersaglio. Tale fenomeno comporta una maggior brillantezza di tali superfici nell'immagine di ampiezza e deve essere quindi tenuto in forte considerazione da parte del fotointerprete. Il Foreshortening raggiunge il massimo quando un pendio molto ripido è ortogonale al fascio radar: in questo caso, l'angolo locale di incidenza è pari a zero e ciò comporta che, base, corpo e cima del pendio sono illuminati simultaneamente e quindi occupano la stessa posizione nell'immagine di output. Per una data pendenza, l'effetto di accorciamento può essere ridotto aumentano l'angolo di incidenza del fascio radar. Con angoli di incidenza vicini ai 90°, l'effetto viene automaticamente eliminato, ma di contro si verifica un effetto di

shadowing molto pronunciato. Nella maggior parte dei casi si verifica di fatto una compensazione tra l'effetto di foreshortening e quello di shadowing nell'immagine;

- *SHADOWING*: la presenza di ombre nell'immagine radar indica aree a terra non illuminate dal fascio di onde emesso. Dato che in questo caso nessun segnale viene retro-diffuso verso l'antenna, le aree in ombra appaiono nell'immagine in toni molto scuri. Nel momento in cui l'angolo di incidenza aumenta dal near-range verso il far-range, illuminazione della scena avviene in modo più obbliquo, il che implica che le ombre diventano sempre più prominenti verso il far-range. Il fenomeno dello shadowing non è però esclusivamente negativo: tramite la sua analisi è possibile infatti derivare informarzioni utili relativamente all'altezza degli oggetti o per l'interpretazione dei rilievi.

- *LAYOVER:* si verifica quando la pendeza del terreno è maggiore rispetto all'angolo di off-nadir e quindi l'energia riflessa dalla porzione superiore di un elemento viene ricevuta dall'antenna prima del ritorno relativo alla parte bassa del bersaglio stesso. In questo, la parte più alta dell'elemento viene spostato o "laid over" ossia steso sopra alla sua base quando viene processato all'interno dell'immagine. In generale tale fenomeno è più accentuato per riprese con angoli di incidenza molto piccoli.

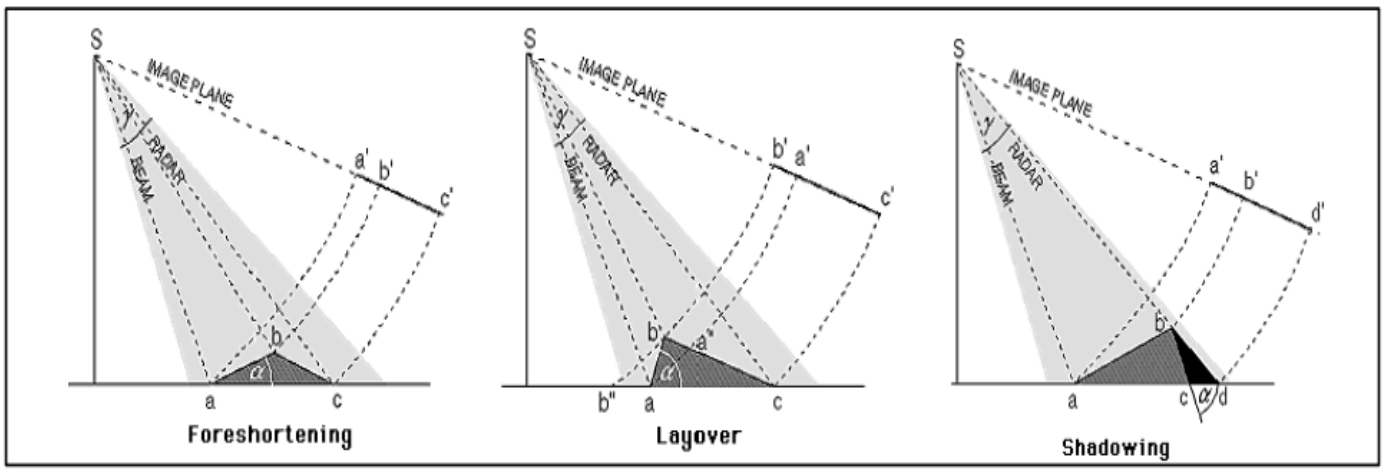


Fig.4.22 - Distorsioni geometriche in *range* [93]

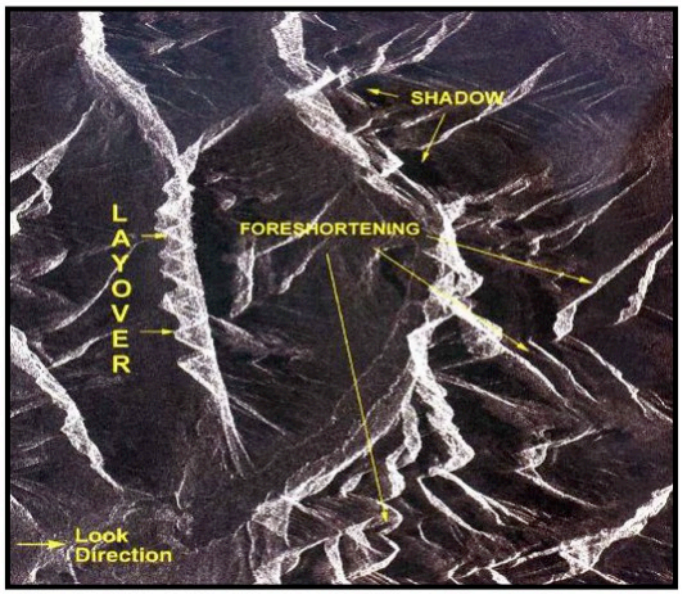


Fig.4.23 - Artefatti geometrici collegati alla visione in *range* in immagine RADARSAT [98]

Le **distorsioni radiometriche** dipendono essenzialmente dal modo in cui l'energia viene ricevuta dal sensore.

Prima di approfondire l'argomento risulta importante dire che nelle immagini radar è fondamentale il concetto di tessitura, definito com la disposizione geometrica delle macro-rugosità superficiali [84]. Essa è legato alla dimensione e all'organizzazione media nello spazio di celle elementari, cioè dei più piccoli elementi omogenei con la stessa radiometria [84]. Si possono distinguere tre livelli di analisi della tessitura: micro, meso e macro scala.

Scala	Tipologia	Dimensione	Proprietà
micro	Speckle	Ct = Cr	Presente in tutte le immagini; Indipendente dalla risoluzione; Distribuzione casuale.
meso	Tessitura	Ct > Cr	Dipendente dalla scena; Dipendente dalla risoluzione; Nozione di ripetitività.
macro	Struttura	Ct >> Cr	Dipendente dalla scena; Dipendente dalla risoluzione; Ripetitività non necessaria;

Ct = cella tessiturale; Cr = cella di risoluzione

Tab.4.2 - Le tre componenti della tessitura di immagini radar *[84]*

In particolare lo *Speckle* (macchia), è una tipica distorsione radiometrica che caratterizza tutte le immagini radar con un effetto grana o granularità indotto dalla fluttuazione statistica associata ai pixel. Nel dettaglio esso è dovuto alla variazione della fase dell'eco di ritorno

associata alla presenza di bersagli multipli in una stessa cella di risoluzione aventi una variazione a terra che differisce per meno di una lunghezza d'onda [94]. In questo modo all'interno della stessa unità elementare si verificano interferenza costruttive e distruttive casuali che danno origine rispettivamente a toni chiari e scuri tipici dell'effetto sale-pepe. Nella visualizzazione ed interpretazione delle immagini lo *speckle* è di norma oggetto di disturbo, ma l'applicazione di appositi filtri che operano a livello generale una media dei valori dei pixel incoerenti adiacenti può apportare significativi miglioramenti dal punto di vista della risoluzione radiometrica. Di contro però l'applicazione di tali filtri induce necessariamente una perdita in termini di risoluzione geometrica: in quanto fonte d'informazione lo speckle viene infatti accuratamente preservato nel caso le finalità di analisi siano di natura interferometrica.

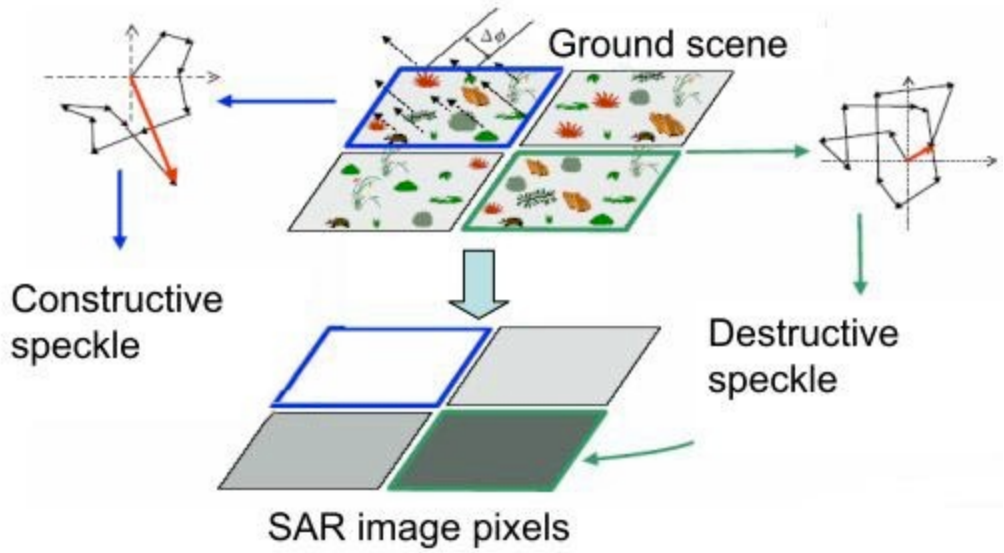


Fig.4.24 - Origine fisica dello *Speckle* [87]

Altro fenomeno di distorsione radiometrica è dato dallo *Scattering*. Il segnale emesso e retro-diffuso verso l'antenna del sensore è il risultato dell'interazione con superficie, volumi o combinazioni di entrambi, il cui risulato dipende fondamentalemnte sia dall'oggetto investigato, in termini di rugosità superficiale e proprietà dielettriche del mezzo interessato dal fascio illuminante, sia dalle caratteristiche del segnale in termini di frequenza o lunghezza d'onda, polarizzazione e angolo di incidenza[87]. Le aree scure in un'immagine rappresentano quindi bassi coefficienti di retrodiffusione, ossia solo una piccola frazione dell'energia emessa è stata nuovamente diffusa verso il sensore, mentre quelle più chiare invece alte retrodiffusioni e quindi frazioni consistenti di energia elettromagnetica sono tornate alla sorgente[93].

Nel dettaglio si può far riferimento a tre tipologie di scattering: *surface scattering*, *volume scattering* e *corner scattering*.

Il *surface scattering* si manifesta nel momento in cui il fascio illuminante incide su superfici, dove la risposta in questo caso varia in base alla rugosità delle stesse: più rugosa sarà la superficie, più gli elementi nell'immagini risulteranno chiari o addirittura brillanti. Ciò dipende dal fatto che in caso di superfici molto piatte e lisce si assiste ad un fenomeno di riflessione speculare dell'energia secondo una direzione di angolo pari a quello di incidenza: acque calme e strade asfaltate sono i tipici esempi di questo fenomeno che si manifesta nell'immagine con toni particolarmente scuri. Nel caso invece di superfici particolarmente rugose, come per esempio nel caso della vegetazione bassa, si assisterà ad una riflessione diffusa in tutte le direzioni tra le quali quella propria del sensore emittente, che registrerà la frazione di energia ricevuta e darà luogo ad una rappresentazione del bersaglio secondo toni chiari.

Fig.4.25 - *Surface scattering* [93]

Il volume scattering è invece relativo al processo di diffusione multipla all'interno del bersaglio stesso, come può essere all'interno di alberature, foreste o campi di grano ovvero in caso di suoli molto secchi, sabbia o ghiaccio. Questo tipo di scattering ha una influenza molto pronunciata sulla quantità di energia retro-diffusa al sensore e registrata quindi poi nell'immagine proprio perché in questo caso l'energia re-irradiata non è soltanto quella della superficie del bersaglio ma anche di tutto il suo volume: l'effetto nell'immagine è quello di toni di color grigio o grigio chiaro. Il fenomeno dipende in particolar modo dalle caratteristiche fisiche del volume osservato, soprattutto in termini di costante dielettrica, nonché dalle caratteristiche fisiche e geometriche della ripresa.

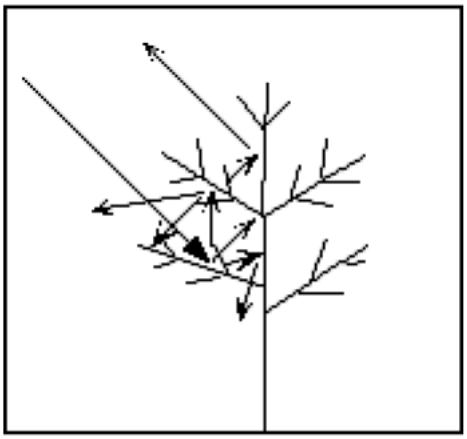


Fig.4.26 - *Volume scattering* [93]

Per ultimo il fenomeno di *corner scattering*, legato principalmente alle caratteristiche geometriche del bersaglio stesso o dell'insieme di bersagli vicini, per questo definiti *corner reflectors*, che ha come effetto di fare apparire tali bersagli particolarmente brillanti nell'immagine. L'esempio classico del fenomeno fa riferimento alla dinamica che si instaura due superfici poste ad angolo retto e aperte verso il fascio radar, in modo tale da formare un angolo riflettore diedro: tipico esempio è il caso di una strada asfaltata in rapporto al lato di un edificio o di un ponte ad essa prospicienti.

In questo caso infatti si assiste al cosiddetto fenomeno di *double-bounce* ossia "doppio rimbalzo" per cui l'impulso radar incidente rimbalza sulla strada, tocca l'edificio per poi essere ridirezionata verso il sensore stesso. L'edificio perfettamente perpendicolare al raggio apparirà estremamente brillante, strade ed autostrade essenso piatte molto scure, mentre gli edifici non perfettamente in asse con l'impulso apparirannno grigio chiaro, ossia come una superficie rugosa.

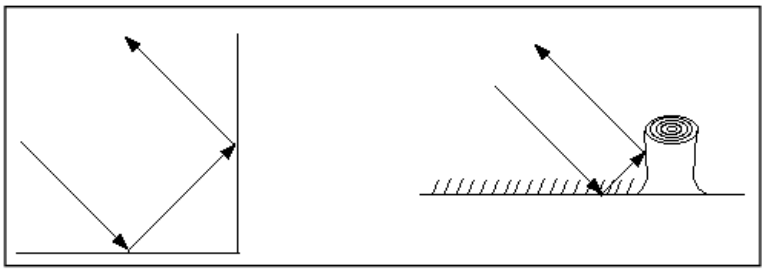


Fig.4.27 - *Double-bounce* [93]

L'eco di ritrono proveniente da una situazione di questo tipo è forte solo quando la superficie riflessa è quasi perpendicolare alla direzione di illuminazione. Riflessioni invece molto e sempre forti sono invece causate da un angolo riflettore triedro, ossia quello che si forma dall'intersezione di tre superfici piane perpendicolari tra loro aperte verso il fascio radar.

Questo tipo di riflettori sono a volte posti appositamente nella scena da riprendere in modo da avere punti di riferimento certi sull'immagine.

Aseguire si riporta una imagine radar di esempio in cui sono identificati I tre fenomeni sopra.

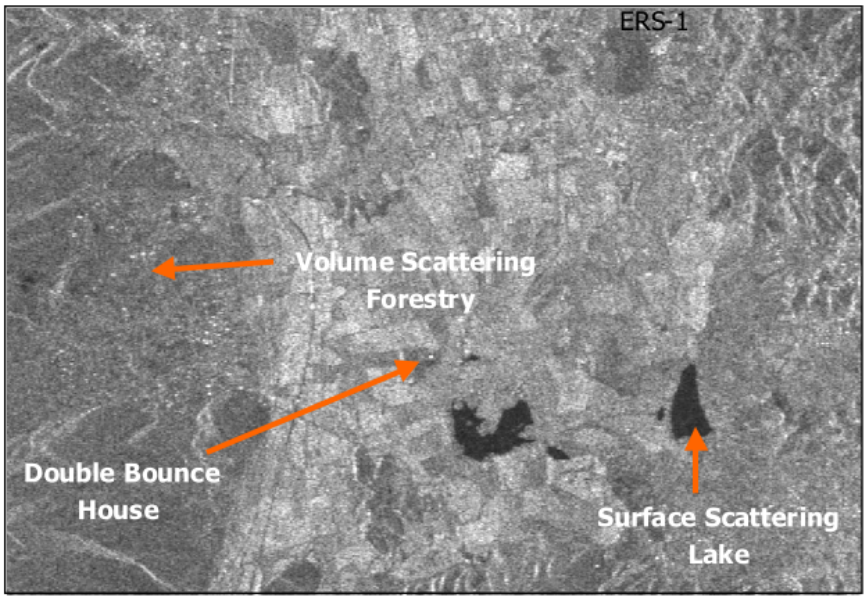


Fig.4.28 - Esempi di scattering su immagine ERS-1 SAR (C-band) sample (ca. 17 km x 10 km) [93]

Come notato, una parte importante della risposta radiometrica dei bersagli dipende dalla rugosità dello *scatters* stesso. La *rugosità* di una superficie riflettente è direttamente collegata alla lunghezza d'onda e all'angolo di incidenza della ripresa. In genere, una superficie viene considerata liscia se le sue variazioni di quota sono valutate inferiori rispetto alla lunghezza d'onda utilizzata dal radar. A parità di stessa lunghezza d'onda, una data superficie appare caratterizzata da una maggiore rugosità nel momento in cui l'angolo di incidenza aumenta[94]. Le superfici rugose appaiono infatti generalmente più chiare nell'immagine radar rispetto a quelle meno rugose composte dello stesso materiale. A livello generale si può dire che una superficie è rugosa se ha una variazione di quota di circa la metà della lunghezza d'onda del fascio radar illuminante.

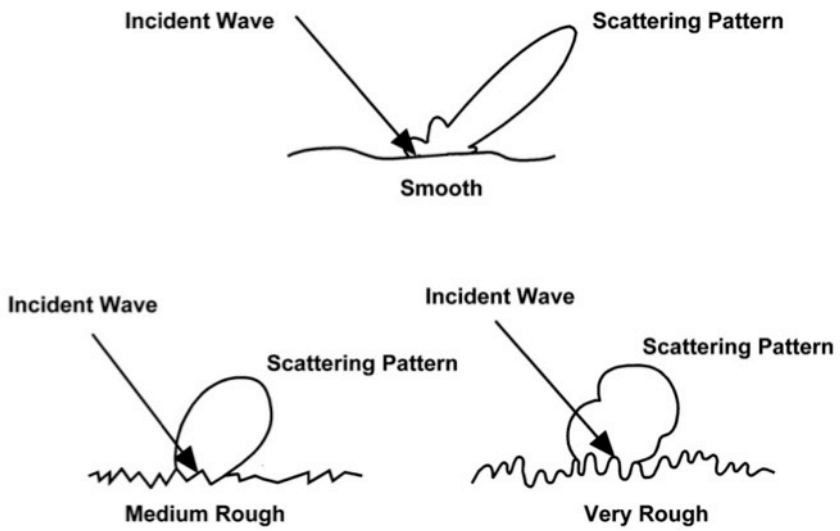


Fig.2.29 - Scattering a differenti livelli di rugosità superficiale [94]

Un altro elemento a cui abbiamo accennato è il contenuto d'umidità degli elementi investigati in quanto la variazione della costante dielettrica governa la capacità di retrodiffusione dei bersagli. La presenza di umidità, aumentando infatti la costante dielettrica, riesce ad influenzare significativamente la capacità di un materiale di assorbire, riflettere o trasmettere energia in microonde e ciò ha ricadute dirette anche sul modo in cui un determinato materiale appare nell'immagine di output. Di massima le capacità di riflessione e quindi la brillantezza dell'elemento nell'immagine aumenta all'aumentare del contenuto di umidità: terreni umidi appaiono di norma molto chiari mentre quelli particolarmente secchi molto scuri. L'unica eccezione a tale regola risultano le superfici coperte d'acqua, come aree allagate, fiumi, laghi, in cui la presenza di acqua calma e quindi perfettamente piatta, da origine ad una riflessione speculare che annulla la retro-diffusione di energia verso il sensore, facendole apparire particolarmente scure.

4.3.2 SAR e Flood mapping: un rapporto privilegiato

Sebbene le missioni spaziali radar siano nate con l'intento di sfruttare le capacità operative *ogni-tempo* dei sensori attivi utlizzando le immagini di intensità, di fatto nel tempo si sono sviluppate e affinate tecniche che fossero in grado di sfruttare al meglio la capacità di *coerenza* del SAR, ossia di fornire informazioni di [84]:

- *intensità*: un'ampiezza radiometrica, che esprime la riflettività dell'oggetto alla frequenza di osservazione, legata alle caratteristiche di retrodiffusione della radiazione dagli oggetti presenti in una scena;

- *fase*: dipendente dalla distanza sensore-oggetto o anche lunghezza del percorso tra radar e bersaglio, dalle caratteristiche dielettriche dello *scatter* e, in misura minore, dalle caratteristiche dielettriche del mezzo (aria) in cui avviene la propagazione.

Sulla base di ciò, le possibilità di utilizzo delle immagini radar sono in sintesi orientate ai seguenti scopi:

- immagini radar ad apertura sintetica (SAR), che forniscono una localizzazione molto precisa degli oggetti e le varie caratteristiche delle superfici ad elevate risoluzioni in range fino a 1 metro;
- *inteferometria* SAR satellitare In-SAR (*SAR Interferometric Technicque)*, ossia la tecnica che sfrutta le osservazioni di una stessa scena da due orbite parallele e non coincidenti che consente di generare un modello digitale del terreno (DTM) come differenza delle distanze tra le due posizioni del satellite e ogni punto a terra;
- *interferometria differenziale* SAR satellitare D-InSAR (*Differential SAR Interferometric Technicque*), ossia la tecnica che sfrutta le osservazioni di una stessa scena dalla stessa orbita ripercorsa dal satellite in tempi successivi (*tandem*) con la possibilità di generare una mappa degli spostamenti relativi dei punti osservati come differenza delle distanze dal satellite, con una precisione verticale dal centimetro al millimetro in quanto la misura della fase consente precisioni dell'ordine di una frazione della lunghezza d'onda utilizzata. Più dettagliatamente la tecnica differenziale consiste nel confrontare due immagini radar acquisite da due antenne durante due orbite separate da una nota distanza o base di presa (*baseline*), che nel caso di riprese in tempi diversi deve essere nulla. La differenza tra i valori di fase per ogni pixel corrispondente alla stessa area a terra nelle due riprese producono un interferogramma, cioè un'immagine che contiene solo l'informazione sulle differenze di fase alle diverse distanze dei pixel dall'antenna SAR. La differenza di distanza di ogni cella di risoluzione o pixel dalle due posizioni relative rispetto all'antenna radar consente di stimare e segnalare spostamenti o modifiche di elementi dislocati sul territorio e/o del territorio stesso.

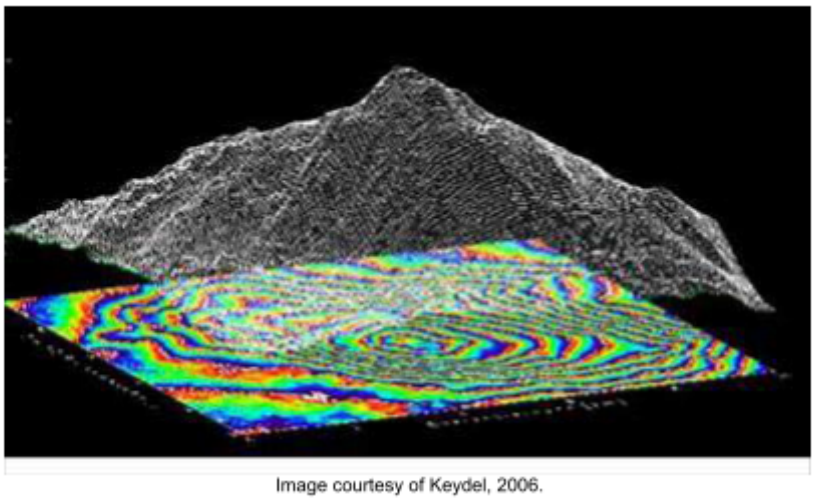


Fig.4.30 - Relazione tra l'interferogramma e l'elevazione reale del terreno – [96]

Tutte e tre le applicazioni risultano importanti nella tematica del rischio idrologico-idraulico. La capacità di poter osservare il territorio in ogni condizione atmosferica e di illuminazione, unità alla possibilità di poter ricostruire con un livello di dettaglio molto spinto la morfologia del territorio e le sue variazioni in modo sistematico è un aspetto affatto trascurabile quando si parla di rischio.

L'applicazione ancor più utile in quanto strettamente legata all'emergenza alluvioni in ambito urbano è però quella che vede il SAR come via preferenziale nell'identificazione di acqua sul terreno. Prima di tutto ricordiamo che la capacità del SAR di poter operare in qualsiasi condizioni di illuminazione solare e metereologica, permette di osservare con buon dettaglio scene interessate dall'emergenza anche in momenti molto prossimi all'evento: i territori che risultano interessati da tali eventi sono caratterizzati dalla permanenza di coperture nuvolose o comunque condizioni atmosferiche avverse sia durante che in momenti successivi al picco di emergenza, condizioni che rappresentano invece un limite per i sistemi ottici di ripresa. Inoltre, tali osservazioni possono avvenire con un preavviso molto breve e con tempi di rivisitazione esigui della stessa scena, cosa affatto trascurabile in sistuazioni di emergenza.
Questo rapporto privilegiato tra SAR e allagamenti superficiali nasce dal fatto, come anticipato, che il fenomeno di retrodiffusione dell'eco emesso dal segnale radar subisce una riflessione speculare nel momento in cui incide su superfici perfettamente lisce e piatte quali si presentano tipicamente gli allagamenti superficiali, neutralizzando o comunque diminuendo drasticamente la quantità di *coefficiente di backscattering* diffuso verso il sensore. La capacità di riflessione inoltre aumenta in quanto l'acqua ha una costante dielettrica molto elevata, di solito pari ad 80 F/m, valore di gran lunga superiore a quello del suolo che in genere varia tra 3

ed 8 F/m. Quanto detto porta tali superfici ad assumere toni particolarmente scuri ed omogenei rispetto a condizioni in assenza di acqua e questo perché la risposta elettromagnetica è sostanzialmente diminuita rispetto alle condizioni "normali". Al contrario in condizioni di allagamento si assiste ad una accentuazione del fenomeno di riflessione angolare che interessa la vegetazione: la presenza di acqua alla base intensifica infatti l'effetto di double bounce tra suolo e rami facendo apparire la vegetazione allagata in toni molto più chiari rispetto a condizioni normali e questo la quantità di retrodiffusione è in questo caso aumentata.

Queste considerazioni costituiscono un quadro di riferimento importante qualora ci si ponga l'obiettivo di sfruttare a pieno le capacità dei sistemi radar SAR per l'identificazione degli allagamenti. L'obiettivo può essere perseguito facendo ricorso a varie tecniche. La condizione migliore è quella di avere a disposizione due coppie di immagini che riprendano la stessa scena con la stessa geometria di acquisizione in modo da poter operare un confronto tra una situazione pre-evento ed una con evento in corso, ossia senza e con allagamento. In questo caso si possono realizzare prima di tutto analisi di *change-detection* tra le due immagini valutando il rispettivo dato di ampiezza e quindi la risposta radiometrica delle superfici ed in questo caso gli allagamenti sono individuati proprio in virtù del fatto che in situazioni di allagamento le relative superfici tenderanno ad assumere toni scuri. In secondo luogo è possibile operare una valutazione della *coerenza interferometrica* tra le due immagini: il principio della coerenza si basa sul presupposto che se i diffusori sul terreno cambiano tra un'osservazione SAR e la successiva, la fase interferometrica risulta affetta da un rumore casuale. L'entità di questo rumore viene valutata attraverso le immagini di coerenza cioè mediante la stima del *coefficiente di cross-correlazione* locale delle immagini che è associabile alla misura della deviazione standard della fase interferometrica stimata tra due immagini. In teoria ad ogni pixel delle immagini è legato un valore di coerenza differente, ma in pratica, avendo a disposizione solo due immagini per stimare la coerenza, si suppone che il segnale sia stazionario in un'area di qualche pixel. La coerenza è compresa tra 0 (retrodiffusori completamente diversi nelle due immagini) e 1 (retrodiffusori identici nelle due immagini): le aree interessate da allagamento superficiale risulteranno affette da bassi valori di coerenza ineterferometrica e quindi più vicine allo 0.

La prima applicazione dell''immagine di coerenza in effetti è quella di valutare la qualità intereferometrica di due coppie di immagini al fine di poter effettuare o meno un buon modello digitale del terreno oppure per identificare eventuali spostamenti di esso. In questo

caso invece viene considerato come criterio di identificazioni di possibili cambiamenti sul territorio in termini di copertura acquosa, ma in ogni caso può essere utilizzato in modo efficace come parametro di classificazione delle superfici. Nel dettaglio è infatti possibile identificare tre classi di coerenza in genere relative a diversi tipi di diffusori[94]:

- Bassa (0.3 – 0.5), associabile ad acqua;
- Media (0.5 – 0.7), associabile a vegetazione in crescita o comuque soggetta a spostamento in termini di chiome e fogliame;
- Alta (0.7 – 1.0), associabile ad aree deseritiche, città ed altri elementi prevalentemente stabili.

Vari fenomeni fisici contribuiscono ad abbassare la coerenza interferometrica. Possibili sorgenti di
decorrelazione in questo senso possono essere:

- effetti di decorrelazione di *baseline* (o decorrelazione geometrica), dovuti alle diverse regioni dello spettro di riflettività della superficie terrestre che il SAR esplora riprendendo la scena da direzioni diverse;
- effetti di decorrelazione spaziali dovuti a cambiamenti geometrici o dielettrici della superfici che
- avvengono fra le due acquisizioni (per l'interferometria multipassaggio);
- effetti rotazionali dovuti ad orbite non perfettamente parallele;
- decorrelazione dovuta ad effetti scattering di volume;
- decorrelazione residua dovuta alla non perfetta registrazione;
- effetti del rumore termico.

Qualora invece non si abbiamo a disposizione due immagini (pre e post) della stessa scena oppure le due immagini risultino prive di geometrie di acquisizione compatibili, è possibile ricorrere infine a tecniche di classificazione più o meno automatica dell'immagine stessa in modo da poter, secondo opportuni algoritmi, discretizzare il territorio in classi tra le quali isolare quella relativa all'acqua. Necessario in questo caso è comunque poter far riferimento a dati ancillari che permettano di distinguere quale sia l'apporto di acqua indotto dall'evento piuttosto che elemento idrico permanentemente presente sul territorio nonché l'integrazione, qualora disponibile con immagini radar od ottica della stessa scena come riferimento per valutazioni specifiche in fase di fotointerpretazione.

Le tecniche descritte applicate ad immagini SAR risultano poteznialmente utili ad identificare possibili areali di allagamento. Le eventuali limitazioni all'obittivo sono però costituite da:

- disponibilità di immagini relative al giorno dell'evento;
- disponibilità di coppie interferometriche di immagini (base line nulla o prossima allo zero, stessa geoemtria di acquisizione, minimo intervallo temporale);
- immagini con angoli di incidenza bassi (12-18) in modo da avere una ripresa il più possibile nadirale che accentui il fenomeno di riflessione speculare da parte delle superfici interessate dall'allagamento. Ciò permetterebbe di diminuire sensibilmente le ambiguità di una scena urbana che, nella quale l'elevata presenza di *scatters* costituisce un limite operativo forte ed affatto trascurabile nel nel momento in cui ci si pone l'obiettivo di valutare la presenza di acqua da allagamento su una strada urbana o tra un edificio e l'altro.

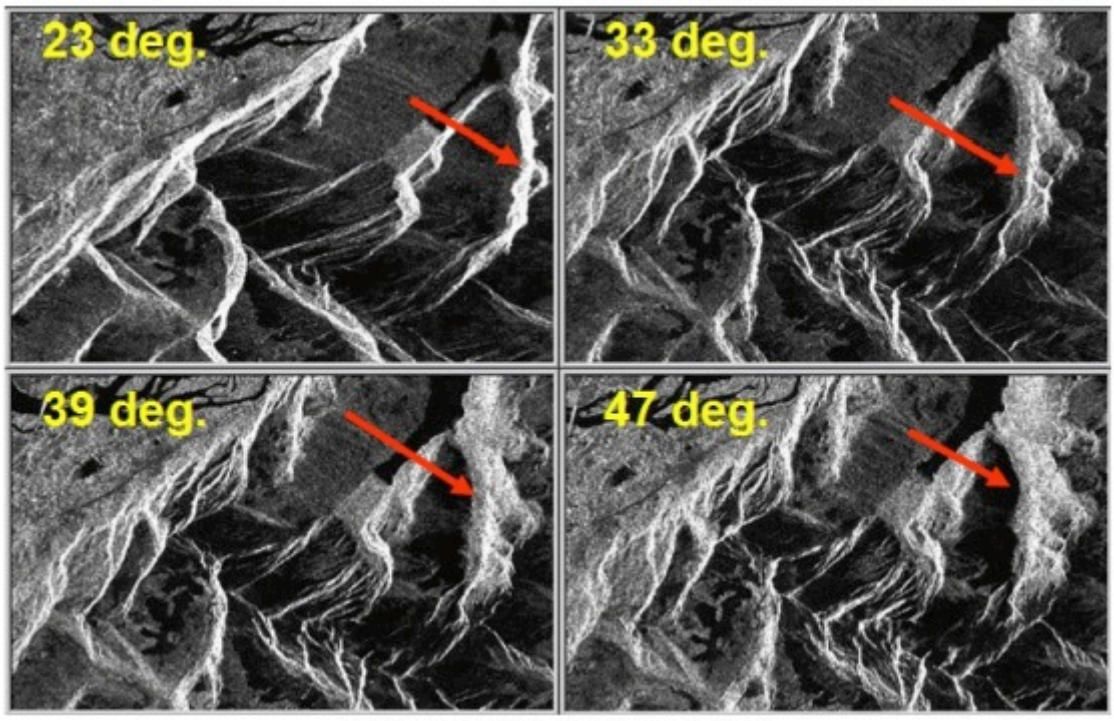


Fig.4.31 - Immagini SAR della stessa scena con angoli di ripresa differenti [96]

4.4 L'apporto del Laser Scanning Aereo

L'accurata conoscenza della morfologia del terreno riveste un ruolo fondamentale nella comprensione, modellazione ed analisi dei processi fisici che hanno agito ed agiscono sul

territorio ed è proprio in questo senso che la necessità di avere a disposizione Modelli Digitali del Terreno (DTM) sempre più accurati si fa sempre più improcrastinabile. Numerose sono infatti le applicazioni, nelle ultime due decadi, che utilizzano rappresentazioni digitali della morfologia del terreno come base informativa fondamentale in vari settori applicativi dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale, come pure per finalità di ricerca in geomorfologia ed idrologia. In questo senso, la tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) rappresenta uno strumento in grado di contribuire significativamente ad una miglior rappresentazione della morfologia del terreno mediante il rilievo ad alta risoluzione del territorio e, dunque, ad una migliore analisi dei processi superficiali ad essa connessi (TAROLLI et *al.*, 2009). Le tecniche fotogrammetriche, metodologia tradizionale per la costruzione dei modelli digitali, risultano sufficientemente accurate esclusivamente per le zone prive di ostacoli, incontrando invece evidenti limiti altrove. È proprio in questi ambiti che il LiDAR aereo si dimostra più efficiente rispetto ai metodi tradizionali. Un aspetto particolarmente qualificante di questa recente tecnologia, che la rende decisamente vantaggiosa rispetto alle tradizionali tecniche di rilievo del territorio, è la capacità di distinguere, con processi di filtraggio automatizzati, i punti relativi agli oggetti giacenti al di sopra del terreno, come vegetazione ed edifici, da quelli corrispondenti al suolo. Di contro è possibile affermare che la tecnolgia in questione non sia esente da problematiche tra le quali l'assorbimento dell'impulso laser da parte delle superfici bagnate e la necessità di operatore esperto per ottenere risultati accurati[99].

Nel dettaglio il termine LiDAR fa riferimento ad un sensore LASER (*Light Amplification by Stimulated Emissioni of Radiation*) per la misura di distanze di bersagli, senza alcun riferimento alla piattaforma - terrestre o aerea - sulla quale il sensore è montato. In letteratura viene proposto l'utilizzo del termine di *Airborne Laser Scanning* (ALS) (EHR & OHR, 1999) quando si vuole fare riferimento agli apparati laser scanner montati su elicotteri o aeroplani e quindi aviotrasportati, per distinguerlo dal sistema LiDAR terrestre[99]. In questo lavoro, per semplicità, sarà utilizzato il termine generico LiDAR per indicare la scansione laser da aeromobile. A sua volta il LIDAR aereo può essere distinto in LiDAR topografico e LiDAR batimetrico: quest'ultimo, conosciuto anche come *green*-LiDAR, si distingue dall'altro per la sua capacità di penetrazione nell'acqua.

4.4.1 Light Detection and Ranging (LiDAR): principi di funzionamento

Visto nel suo complesso il LiDAR può essere definito come una tecnologia di telerilevamento di tipo elettro-ottico, attiva, *no-imaging* [100]. Elettro-ottico perché trasforma l'irradianza in un segnale elettrico utilizzando un rilevatore fotosensibile. Attivo perché viene impiegato un trasmettitore laser in grado di liberare un fascio di energia elettromagnetica compresa nella regione dello spettro appartenente alle lunghezze d'onda dell'infrarosso visibile: ciò gli permette di essere indipendente, proprio come il radar, da qualsiasi condizione di illuminazione solare e di poter operare quindi 24 ore su 24. Per ultimo, è di tipo *No-imaging* perché non produce immagini bensì misure puntuali di elevato dettaglio, in particolar modo di natura topografica, dalle quali è in seguito possibile derivare mappe bidimensionali e tridimensionali mediante oppurtune tecniche di interpolazione.

Risulta importante sottolineare che il laser è una radiazione elettromagnetica avente le seguenti caratteristiche [101]:

- *Monocromaticità*: deve essere composta da una sola frequenza di luce
- *Unidirezionalità* (o coerenza spaziale): si propaga a grande distanza con un'unica direzione;
- *Coerenza temporale*: è composto da onde della stessa frequenza e della stessa fase.

Più dettagliatamente il LiDAR costituisce la convergenza di più tecnologie in quanto si avvale contemporaneamente dei seguenti componenti [102]:

- Telemetro laser: misura la distanza tra il punto di emissione dell'impulso sull'aeromobile e la superficie illuminata;
- Dispositivo inerziale INS (*Inertial Navigation Systems*) o IMU (*Inerzial Measurement Unit*): determina l'assetto del velivolo in ogni istante rilevandono i tre gradi di libertà dovuti a rollio, beccheggio e deriva;
- Sistema di posizionamento differenziale GPS: fissa posizione ed orientamento assoluto del mezzo con misure differenziali, tramite stazioni – o reti di stazioni – a terra e il ricevitore multicostellazione posto a bordo dell'aeromobile.

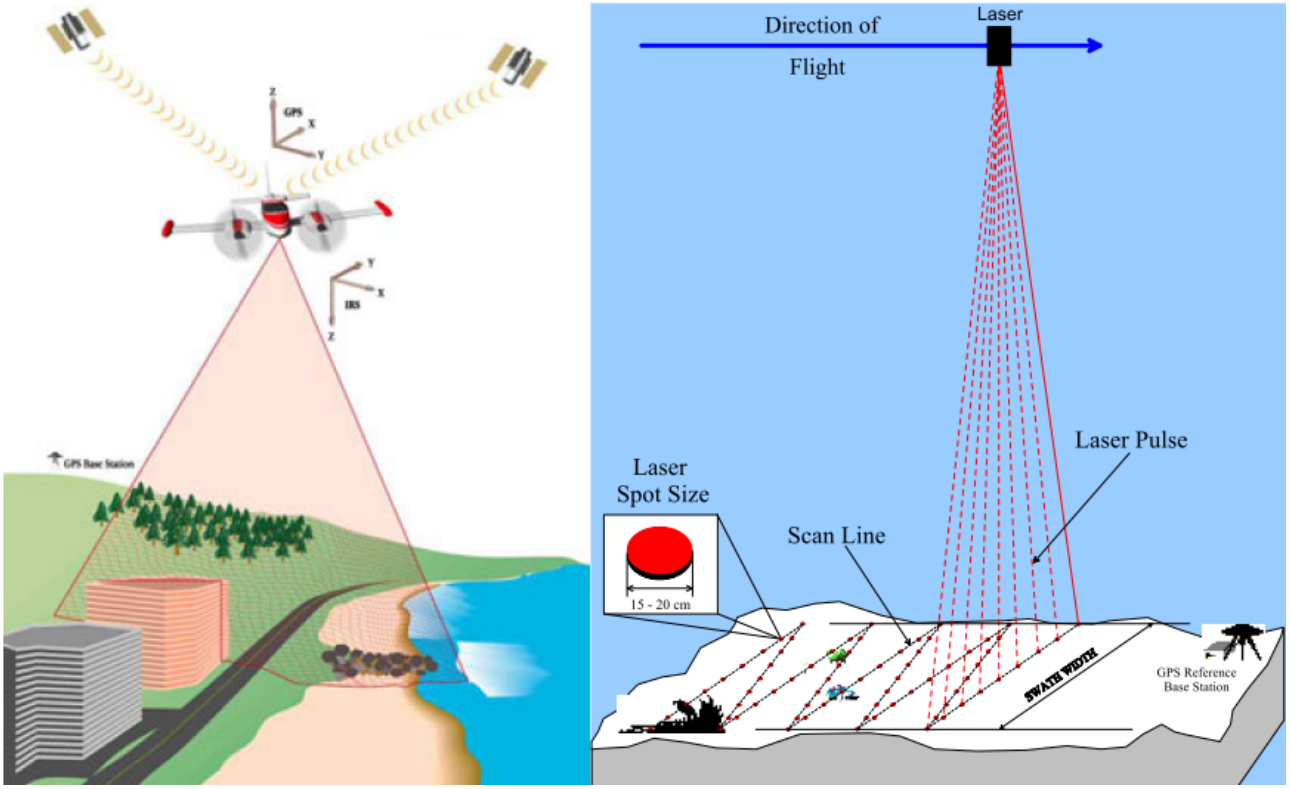


Fig.4.32 - Componenti e funzionamento del sistema LiDAR aviotrasportato [103]

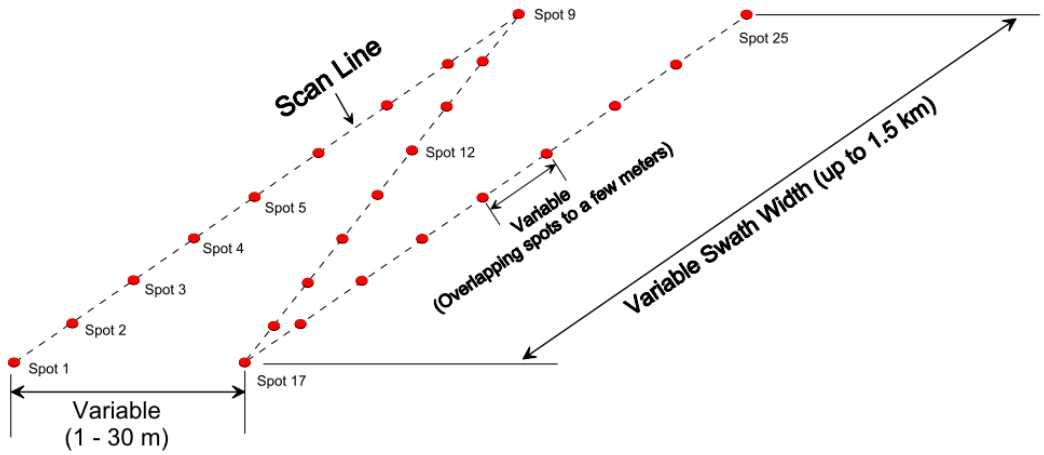


Fig.4.33 - Sistema di scansione LIDAR [103]

Il modo molto semplificato il funzionamento del LiDAR topografico è il seguente [101]:

1) il generatore laser produce un impulso elettrico creando un raggio di luce infrarossa (lunghezza d'onda λ = 1064 nm), con una divergenza variabile a seconda della qualità dello strumento;
2) il segnale rifl esso dall'elemento colpito viene captato da un fotodiodo ricevitore che genera un segnale elettrico di ricezione in seguito alla riflessione da parte del bersaglio;

3) Il telemetro misura il tempo Δt, denominato tempo di volo, impiegato dall'impulso laser a percorrere il percorso di andata e ritorno. Il tempo di volo è misurato tramite un orologio con una frequenza stabilizzata al quarzo. La distanza di presa (D) è una funzione del tempo di volo Δt:

$$D = \frac{\Delta t \cdot c}{2}$$

dove c rappresenta la velocità di propagazione del segnale e, quindi, in questo caso, della velocità della luce ($3x10^8$ m/s);

4) l'interazione degli strumenti GPS e IMU permette di determinare posizione ed assetto del mezzo in movimento nel tempo a partire da una data posizione iniziale, sfruttando le leggi fisiche di accellerazione lineare ed angolare mediante accelerometri e giroscopi;
5) sulla base del tempo di volo Δt fornito dal telemetro, nonché delle coordinate assolute del telemetro stesso e dell'orientamento della retta normale all'aereo stimati tramite GPS e INS/IMU, è possibile a questo punto ricavare l'equazione della retta passante per il sensore montato sull'aereo ed il punto colpito dall'impuslo laser in modo tale da avere una restituzione delle coordinate x, y, z di ogni misura.

I valori altimetrici così registrati, variabili tra gli 8.000 e i 30.000 punti/secondo, presentano un'accuratezza verticale di 0.1-0.2 m e un'accuratezza orizzontale di 0.5-2 m.

Va sottolineato che alcuni strumenti misurano, oltre al tempo di volo necessario per determinare la posizione del bersaglio, l'ampiezza del segnale di ritorno, che dipende dal materiale di cui è composto il bersaglio. In questo modo è possibile ottenere una sorta di mappa qualitativa degli oggetti e superfici registrate, potenzialmente sfruttabile per una classificazione quali-quantitatva del territorio indagato.

L'interazione di ben tre strumentazioni diverse per la generazione delle misure comporta la presenza di tre diversi sistemi di riferimento, uno per il Telemetro, uno per il GPS ed uno per il INS/IMU. Ciò implica evidenti esigenze di *calibrazione* dei dati[101], ossia per determinare in modo efficace le coordinate dei punti colpiti è necessario saper ricordurre le diverse coordinate dei singoli sistemi ad un sistema di riferimento univoco. Il perseguimento di tale obiettivo è strettamente legato alla conoscenza di:

- posizioni reciproche delle origini dei vari sistemi di riferimento in modo da poter operare sulle traslazioni;
- disallineamenti fra i sistemi di riferimento, ossia le rotazioni da applicare ad un determinato sistema di riferimento geografico per poterlo far coincidere coun un altro, una volta annulate le traslazioni.

Tali parametri vengono misurati direttamente con metodi topografici e determinati indirettamente mediante poligoni e/o voli test.

Un poligono di calibrazione è una zona costituita da aree piatte e da oggetti di forma regolare (edifici semplici) dalla geometria nota. In questo modo si è messi nelle condizioni di conoscere il risultato che il LiDAR dovrebbe in via teorica dare del poligono, in modo tale da poter ricavare i prametri incogniti. Per quanto riguarda invece l'attività di voli test o strisciate di controllo, queste consistono nell'eseguire strisciate ripetute in senso opposto oppure ortogonali. Qualora i parametri di calibrazione non fossero corretti, gli stessi oggetti verrebbero collocati in posizione diverse: tale procedura permette di verificare la consistenza dei parametri di calibrazione. Un elemento affatto trascurabile nel sistema di scansione LiDAR è l'altezza di volo. Di seguito viene riportata l'elenco degli elementi dipendenti da quest'ultimo ovvero indipendenti, in modo da rendere un'dea della sua rilevanza in termini di risultati attesi.

PARAMETRI DIPENDENTI DALL'ALTEZZA DI VOLO h (m)	**PARAMETRI NON DIPENDENTI DALL'ALTEZZA DI VOLO h (m)**
• Larghezza strisciata (m) → $L = 2 \cdot \tan(\alpha)$ • Distanza fra due punti della stessa strisciata (m) → $D_t = L/(n-1)$ • Densità media punti (pt/m^{-2}) → $d = f/(L \cdot v)$ • Area coperta in un'ora (km^2) → $A = (3600 \cdot v \cdot L)/10^6$	• numero punti al secondo (f) • numero punti per strisciata (n) • semiangolo di apertura (α) • Velocità aereo (v) • Numero strisciate al secondo ($n_s = f/n$) • Spostamento aereo fra due strisciate v/n_s • Numero punti misurati in un'ora ($3600 \cdot f$) • Quantità di memoria necessaria a memorizzarli (3 coord, 4 Byte per coord)

Come anticipato, una delle caratteristiche d'avanguardia del LiDAR rispetto alle tecniche di rilievo topografico tradizionale è legata alla capacità di distinguere gli oggetti presenti sulla superficie del terreno rispetto alla morfologia territoriale in senso stretto. Questa capacità è legata al concetto di *eco multiplo* (indotti ad esempio da alberature, balconi, tralicci,ecc…) in cui ciascun eco rappresenta il segnale di ritorno al sensore una volta incontrato un ostacolo. In questo caso infatti il raggio laser viene diviso in più componenti che vengono riflesse verso l'alto in tempi diversi e dall'analisi dei differenti sfasamenti temporali tra raggio emesso ed eco ricevuto è possibile identificare diversi livelli di acquisizione[101]:

- *First pulse mode* (prima riflessione), ossia risposta del primo ostacolo incontrati dal raggio laser;
- *Last pulse mode* (ultima riflessione), ossia risposta dell'ultimo ostacolo incontrato dal raggio laser;
- *First & Last pulse*;
- *Multiple pulse mode* (riflessioni multiple).

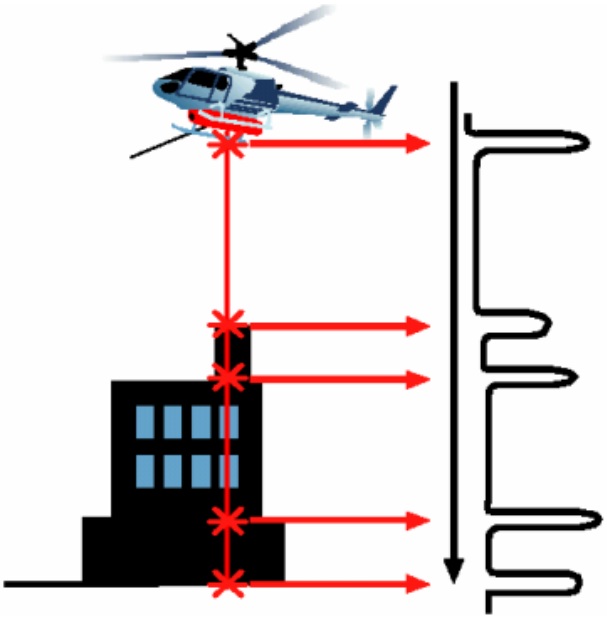


Fig.4.34 - Eco multiplo - "Laser Scanner", D.Godone

Mediante opportune operazioni di filtraggio e interpolazione è possibile ricavare rappresentazioni tridimensionali delle misure registrate generando prodotti DSM (Digital Surface Model) e DTM (Digital Terrain Model) rispettivamente dal *First Pulse* e dal *Last Pulse*.

Gli interpolatori utilizzabili possono essere distinti essenzialmente in due categorie, di tipo globale o locale[103]:

- *Globale*: utilizzano tutti i punti a diposizione per determinare l'elevazione dei punti della griglia della mappa. Essi richiedono elevate risorse computazionali ed inoltre alcune volte non tutti i punti vengono interpolati in modo efficiente. In generale risultano più efficaci dove la densità di punti è bassa. Un esempio di interpolatore globale è il Kriging o lo splines;
- *Locale*: utilizzano solo quei punti nelle vicinanze delle intersezioni della griglia. Computazionalmente più effcienti, lavorano in modo efficace laddove la densità di punti è sufficientemente elevata (5 punti/m^2 per una griglia di 1mx1m)

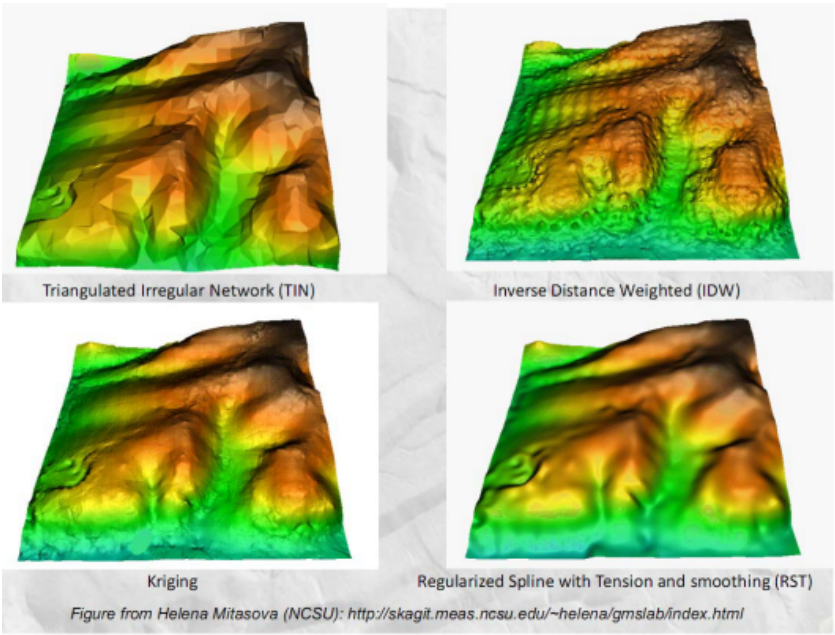


Fig.4.35 - DTM e interpolatori [103]

Nel dettaglio quindi le caratteristiche del LiDAR possono essere riassunte a seguire:

- operatività giorno e notte;
- elevata accuratezza verticale;
- indipendenza dalle ombre;
- indipendeza da copertura nuvolosa al di sopra della quota di volo;
- dipendenza da copertura nuvolosa al di sotto della quota di volo in quanto non riesce a penetrare nella coltre nuvolosa;

- impenetrabilità della vegetazione, benchè tuttavia abbia buone possibilità di raggiungere il terreno in quanto si avvale di una tecnica di ripresa monoscopica, avente piccoli angoli di scansione rispetto alla fotogrammetria e data la larghezza finita dei segnali riesce a creare un varco di scansione in gran parte dei punto del territorio;
- per altezze di volo elevate aumenta la produttività, diminuiscono le occlusioni, ma di contro diminuisce la densità di punti registrata, la precisione e la frequenza massima di emissione del sensore;
- può fornire misurazioni sia tipo quantitativo che qualitativo della superficie investigata;
- l'aumento dell'angolo di apertura del sensore provoca un aumento della produttività mentre di contro aumentano le occlusioni, diminuisce la densità di punti e la precisione;
- La componente economica non è inoltre affatto trascurabile: il costo approssimativo di un rilievo LiDAR si aggira intorno ai 250 – 500 Euro per Kmq ma con tempi di esecuzione molto inferiori rispetto a quelli fotogrammetrici tradizionali a parità si superficie rilevata;
- assenza della componente di soggettività nel rilievo rispetto a quello tradizionale tramite operatore nella quale è il soggetto stesso a selezionare quali siano gli elementi del territorio ritenuti importanti da rilevare;
- Necessità di competenze tecniche molto solide per il trattamento dei dati qualora si vogliano ottenere risultati accurati.

Sulla base delle considerazioni fin'ora realizzate, l'eventuale pianificazione di un rilievo LiDAR deve curare i seguenti aspetti, variabili in base a finalità del rilievo, risorse economiche e tecnolgiche a disposizione:

- altezza di volo
- angolo di apertura
- lunghezza strisciata (funzione dei primi due)
- frequenza emissione punti
- numero punti per linea
- numero linee per secondo (funzione dei primi due)
- FP o LP (strategie di acquisizione)
- distanza media tra i punti

- densità media punti
- velocità dell'aeromobile

4.4.2 Applicazioni

L'elevata risoluzione spaziale e accuratezza geometrica offerta dal dato LiDAR consente di ottenere una conoscenza della morfologia territoriale che non ha paragoni con le tecniche tradizionali. In questo senso, come già accennato, nelle ultime due decadi essa desta sempre di più l'interesse da parte di numerose discipline specifiche legate alla pianificazione e gestione del territorio e dei relativi enti ad esso preposti. In particolare i settori più interessati al rilievo del territorio mediante tale tecnolgia risultano essere[99]:

- studi geomorfologici: orientati alla caratterizzazione dei movimenti franosi, definizione di inventari di frane e riconoscimento di forme deposizionali sui conoidi alluvionali
- studi idrologici ed idraulici: modellistica idraulica ed idrologica, mappatura geomorfologica ed estrazione informazioni quantitive nelle piane inondabili, estrazzione di sezioni trasversali di corsi d'acqua, monitoraggio e quantificazione delle variazioni morfologiche recenti integrando il dato LiDAR con sensori sonici o usando il LiDAR batimetrico, classificazione automatica delle superfici bagnate, quantificazione delle variazioni morfologiche di lungo termine, analisi dell'erosione di sponda e caratterizzazione morfologica dell'alveo

In particolare nel campo rischio idrologico-idraulico la sua valutazione in termini di previsione dell'estensione delle aree di esondazione è particolarmente positiva in quanto si ritiene che il LiDAR restituisca una rappresentazione topografica informazioni più attendibili della piana inondabile rispetto alle tecniche di rilievo tradizionali, consentendo così un più accurato ed efficace impiego dei modelli idraulici bidimensionali. Inoltre la capacità del LiDAR di registrare i ritorni multipli può essere d'ausilio nell'individuare le strutture tridimensionali presenti sul territorio quali vegetazione, rilevati stradali ed edifici ma anche nello stimare la scabrezza della superfi cie. Nel complesso tali elementi rappresentano un ulteriore fonte di conoscenza dettagliata del territorio da integrare nei modelli permettendo così una migliore mappatura del pericolo di piena e dei relativi rischi per i beni e le persone.

Un riscontro oggettivo e pratico dell'importanza che la tecnologia LiDAR sta assumendo si ha negli Stati Uniti dove la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) prevede espressamente l'utilizzo dei DTM ricavati da LiDAR topografico come base per la realizzazione

delle *Flood Insurance Rate Maps* (FIRMs), che sono mappe utilizzate per determinare le quote assicurative per i proprietari di case e terreni in aree a rischio di piena. A tale scopo la FEMA ha prodotto dettagliate linee guida e specifiche tecniche che auspicabilmente utilizzabili da tutti i soggetti che si occupano del rilievo LiDAR per l'acquisizione dei dati necessari alla creazioni dei modelli digitali da utilizzare come base per la modellazione idraulica (FEMA, 2003).

4.5 Disegno strategico

Sulla base delle considerazioni effettuate fino ad ora la figura a seguire riporta uno schema qualitatitvo-funzionale utile a delineare gli elementi fondamentali caratterizzanti il percorso di progressiva costruzione di comunità e territori resilienti al rischio idrologico-idraulico. Ciascuna fase, seppur in modalità diverse, partecipa significativamente al processo evolutivo e interagisce con le altre ponendosi allo stesso tempo tanto da substrato quanto da obiettivo secondo un processo di feed-back costante.

Fig.4.36 - Fasi ed elementi dell'approccio resiliente al rischio idrologico-idraulico

La mitigazione del rischio assume, secondo la *vision* strategica orientata alla resilienza, una multidimensionalità più spiccata rispetto alla politica tradizionale proprio perchè riconosce in sé il concetto di responsabilità, non solo istituzionale, bensì sociale. Conoscenza, preparazione e convivenza con il rischio diventano quindi tappe di un percorso di pro-attività combinata all'azione facente capo, in forme diverse ma in tutti e tre i casi, ad aspetti tecnici, sociali ed istituzionali. Non esiste quindi più un referente unico in nessuna delle tre fasi, ma anzi tanto la comunità tecnico-istituzionale tanto la società e gli individui sono chiamati ad essere responsabili in prima persona ad agire attivamente in modo da conoscere, prepararsi e convivere con il rischio in un'ottica di consapevole resilienza.

Abbiamo più volte detto che la nuova politica di resilienza si basa proprio sul concetto di responsabilità, non più esclusivamente istituzionale, bensì sociale nell'accezione più ampia del termine, che deriva dalla necessità di inglobare la consapevolezza di una partecipazione umana costante all'affermarzione di fenomeni naturali destabilizzativi indifferenti alle logiche umane. In quest'ottica, l'efficacia di tutti i possibili atteggiamenti di mitigazione del rischio è strettamente e necessariamente legata, non solo alla capacità da parte degli organi competenti di prevedere misure adeguate di mitigazione, ma anche e soprattutto al livello di motivazione che spinge le popolazioni stesse ad assumere misure preventive in modo autonomo e/o nel rispetto di quanto emerso e portato alla loro attenzione ad opera dei processi decisionali. Si è riscontrato, ed in parte lo abbiamo già accennato, che tale motivazione è presente in livello sufficiente esclusivamente in quelle parti di popolazione che sono state recentemente colpite da un fenomeno destabilzzante, nella fattispecie un allagamento, che ha portato quindi ad un aumento dei livelli di sensibilità e percezione rispetto al tema. L'aver subito direttamente un evento è quindi un fattore che incide in modo determinante sulla capacità di comprensione del rischio e sulla relativa consapevolezza di dover porre in essere atteggiamenti individuali pro-attivi orientati alla mitigazione[104]. Se però l'esperienza diretta e recente risulta, ad oggi, l'unico elemento capace di far sorgere nella popolazione un atteggiamento di azione reale contro il rischio, viene a costituirsi un problema di fatto qualora questa esperienza preliminare non sia presente: come realizzarla allora? come stimolarla?

Per giungere ad una risposta bisogna prima analizzare bene i meccanismi sociali che vi sono dietro[104]:

- *fattori socio-politici che pongono l'attenzione sugli eventi di rischio naturale*: l'esperienza del rischio non viene posta in essere soltanto attraverso danni fisici, ma anche come risultato di un processo a partire dal quale gruppi e persone imparano, acquisiscono e creano l'interpretazione del rischio. Sotto questo punto di vista quindi, i fattori sociali ed economici influenzano la risposta, anche in assenza di esperienza, mentre quelli esclusivamente economici hanno una forte influenza sulle attività di mitigazione. I messaggi di allerta per rischio allagamento per esempio, sono una importante risposta immediata all'evento, ma il modo in cui ciascuna persona comprende tali messaggi è funzione non solo di come e quando essi sono disseminati, ma anche del contesto. Come in tutti i tipi di comunicazione di rischio, la fiducia in colui che divulga il messaggio di allerta diventa anche qui cruciale: chi ha dubbi circa la fonte tenderà a fare affidamento più sulle reti sociali che sulla comunicazione uffiale;
- *attenuazione/amplificazione selettiva del rischio*: si fa in questo caso riferimento alle cause che innescano una amplificazione o attenuazione, da parte della società, di alcuni rischi piuttosto che di altri, fino anche ad essere del tutto ignorati. A questo proposito il SARF (*Social Amplification of Risk Framework*)[41] afferma che l'amplificazione ovvero attenuazione avviene sia nella divulgazione dell'informazione del rischio da fonte ufficiale sia in termini di meccanismi di risposta da parte della società. Ciò perché gli eventi di rischio sono ampiamente irrilevanti per la popolazione, intesa allo stesso tempo come istituzione e come comunità sociale, fino al momento in cui non li osserva direttamente per poi darne, eventualmente, anche comunicazione ad altri;
- *negazione psicologica del rischio*: il fatto di continuare a vivere in aree consapevolmente ad alto rischio è collegato alla idealisticamente positiva rappresentazione sociale del concetto di "casa". In modo apparentemente irrazionale infatti è come se la popolazione rifiutassse di prepararsi ad una eventuale alluvione per questioni strettamente legate ad espetti emotivi, alla rappresentazione personale della propria casa come luogo sicuro per definizione e alla natura intrinsecamente benigna delle forze naturali;

[41] Quadro teorico proposto e sviluppato da Kasperson e *al.* nel 1998 basato sull'assunto che gli eventi di rischio interagiscono con i processi psicologici, sociali, istituzionali e culturali in un modo tale da poter amplificare o attenuare la percezione sociale ed individuale del rischio stesso e modellare l'atteggiamento nei confronti del rischio.

- *limite intrinseco dell'esperienza diretta*: le persone, qualora in possesso di esperienza diretta recente, possono essere in grado di prevedere che la loro abitazione verrà colpita da un alluvione ma non possono essere in grado di prevedere gli effetti negativi che essa produrrà, compresi quelli di natura emotiva e psicologica. Questo per dire che nonostante l'esperienza comunque esista, essa potrebbe essere non sufficientemente avanzata per una presa di coscienza di ciò che realmente l'evento potrebbe provocare;
- *sottostima individuale dei danni potenziali*: una scarsa comprensione delle potenziali perdite personali che possono incorrere a seguito di evento di allagamento innesca la sensazione di una certa incapacità di agire in termini individuali;
- *delegare le responsabilità*: la mancanza di percezione di una responsabilità personale sia per le cause che per le soluzioni, costituisce una importante barriera per l'azione, come se il problema di fatto fosse stato provocato da qualcun altro e da qualcun altro deve essere risolto.
- *importanza del contesto sociale*: anche nel caso in cui le persone siano dotate delle risorse e delle capacità necessarie per agire, possono scegliere di non farlo proprio perchè influenzate dal contesto, che a seconda del singolo caso può manifestare un atteggiamento di sopravalutazione ovvero di attenuazione fino alla totale negazione di quello che sta per accadere. Ciò invece cambia quando le persone hanno esperienza diretta e recente di un serio evento di allagamento.

Sulla base di meccanismi sociali così complessi, la comunità scientifica è propensa a sottolineare come un dialogo istituzionale specificatamente locale e il coinvolgimento costante delle comunità in tutte le dinamiche associate al rischio sia la sola cosa che possa avere un peso determinante nella sensibilizzazione e percezione del rischio da parte delle popolazioni.
In questo senso la comunicazione rappresenta quindi l'unico strumento capace di creare il collegamento necessario tra la capacità di comprendere il potenziale effetto del rischio naturale e la capacità di porre in atto appropriate misure protettive anche laddove l'esperienza personale manca o nel caso in cui si stia allontanando nella memoria[104].
Oltre al dialogo attivo con le comunità in tutte le fasi previste dal processo di resilienza, va sottolineato inoltre che, tutte le eventuali decisioni prese dalle autorità competenti e le indicazioni in materia di azioni individuali da intraprendere per la mitigazione del rischio alluvioni, potranno risultare efficaci esclusivamente qualora l'istituzione di riferimento venga considerata dalla società una fonte attendibile e meritevole di fiducia. I social networks

costituiscono ad oggi una importantissima risorsa locale di informazione, spesso più efficace delle stesse risorse ufficiali: l'istituzione sarà quindi chiamata ad impostare la propria azione divulgativa anche sulla base di canali comunicativi locali, anche di tipo alternativo, purchè di pari potenzialità.

La comunicazione condivisa della conoscenza in tutte le fasi del processo di resilienza diventa quindi il motore del sistema, punto nevralgico della *vison* strategica. Il processo prende forma come già detto esclusivamente sulla base dell'affermazione e interazione sinergica e costante di tutti i suoi elementi. Nonostante ciò la fase di "conoscenza" risulta avere, sulla base anche delle considerazioni fin'ora effettuate, non tanto un ruolo più importante nel perseguimento dell'obiettivo, bensì necessariamete ed innegabilmente propedeutico. Senza un sistema conoscitivo solido in termini di struttura, aggiornamento e multidimensionalità, di fatto tutto ciò che a vario modo viene posto sopra di esso risulterebbe avere basi troppo fragili, pregiudicandone già in partenza i risultati.

E' proprio in questa fase quindi che si valutano le potenzialità derivanti dall'uso integrato di sensori SAR e LiDAR per l'analisi dei fenomeni di allagamento, prima di tutto relativamente all'apporto conoscitivo che potrebbe derivare dalla loro messa a sistema all'interno del processo di costruzione della valutazione del rischio. Sotto questo punto di vista si è quindi ragionevolmente posta attenzione su una delle tre dimensioni della conoscenza, la "dimensione tecnica", i cui risultati, una volta strutturati, acquistano significato esclusivamente nel momento in cui riescono ad essere "localmente" comunicati, condivisi e ricalibrati sulla base dell'interazione con la popolazione, in modo sia da stimolare una consapevolezza individuale radicata del rischio e del danno associato e delle azioni di mitigazione da intraprendere verso di esso.
La solidità della "dimensione tecnica" costituisce quindi l'affidabilità del contenuto del messaggio, ma è compito dell'istituzione trovare forme e modalità idonee allo scopo: la loro presa sulla società dipende strettamente dai fattori locali che caratterizzano la storia di un certo territorio, in termini culturali, economici e politici, ed è quindi strettamente legata al contesto in cui si opera.
Lo schema che ne consegue non necessita di spiegazioni in quanto tutti i suoi elementi ed i relativi collegamenti tra di essi sono stati a vario titolo già enunciati. Esso costituisce una proposta metodologica, i cui risultati applicativi saranno valutati in larga parte nei capitoli a

seguire del presente lavoro, così da poterne stabilire la coerenza con le aspettative di conoscenza che un processo di resilienza al rischio si prefigge. La conoscenza del rischio che potenzialmente ne deriva costituisce punto di partenza e riferimento anche per le fasi successive di preparazione e convivenza con il rischio: qualora portatore di risultati soddisfacenti, ogni qual volta si presenterà la necessità di effettuare, seppur con finalità diverse, una valutazione del rischio idrologico-idraulico, si farà riferimento al processo conoscitivo così strutturato.

5 CASO DI STUDIO: VICENZA NELL'EMERGENZA VENETO 2010

A cavallo tra la fine di ottobre ed inizio Novembre 2010, la città di Vicenza e in modo più o meno esteso tutte le province del Veneto, sono state interessate da una piena diffusa dei maggiori fiumi presenti sul territorio che ha comportato vastissimi allagamenti con un impatto devastante sul territorio in termini sia di danni tangibili che intangibili.

5.1 Dinamica dell'evento

Come anticipato, nel periodo compreso tra il 31/10/2010 ed il 04/11/2010 la città di Vicenza prima e la provincia di Padova, Verona, Treviso e Belluno poi, sono state interessate da una crisi della rete idrografica con effetti drammatici per popolazioni e beni posti sul territorio. Le portate generate nei bacini montani del sistema idrografico, una volta propagatesi nei tratti vallivi e incrementate dai contributi dei bacini dell'alta pianura, hanno provocato tracimazioni e rotture arginali diffuse che hanno comportato l'allagamento di estese porzioni dei diversi territori provinciali sia in ambito urbano che extra-urbano. Nel particolare le cause fondamentali che hanno scatenato l'evento possono essere riassunte come segue:

1. *NEVE PREMATURA*: il giorno 25 ottobre 2010 un'abbondante nevicata, in netto anticipo sulla stagione, ricopre le montagne venete e le Prealpi. Si tratta di una neve fresca, fragile, che cade a quote relativamente basse. Una massa d'acqua pronta a sciogliersi velocemente in una stagione in cui il freddo non si è ancora insediato;
2. *PIOGGIA IMMEDIATA E MOLTO INTENSA*: A partire dal 31 ottobre inizia a piovere in modo diffuso ed intenso. Non si tratta di pioggia torrenziale ma è continua con livelli da primato in alcune zone venete e sulla montagna vicentina, dove contribuisce allo scioglimento delle nevi e relativo aumento delle portate dei fiumi verso valle.

PROVINCIA	**PIOGGIA CADUTA(mm) IN 48 ORE**
Vicenza	530
Padova	100
Verona	386
Treviso	370
Belluno	586

Tab.5.1 - Afflusso meteorico nelle 48 dal 31/10 al 01/10 nelle province della Regione Veneto [105]

3. *VENTO DI SCIROCCO*: negli ultimi giorni di ottobre 2010 una perturbazione di origine atlantica che si è spinta fino alle coste africane, convoglia un intenso e persistente flusso di correnti sciroccali caldo-umide sul Veneto che scioglie le nevi ed aumenta le piogge. Il 31 Ottobre si registrano a Vicenza ben 14 gradi. Lo scirocco inizia a soffiare fin dal basso Adriatico, provocando nella laguna veneta un innalzamento del livello delle maree che si oppone al deflusso delle acqua fluviali verso valle;
4. *DISBOSCAMENTO ED URBANIZZAZIONE*: alle cause sopra citate si aggiungono i diffusi fenomeni di disboscamento ed urbanizzazione nonché la solo parziale realizzazione degli interventi di regimazione fluviale segnalati come necessari dal Genio Civile già a seguito dell'alluvione del 1966, considerato l'ultimo evento alluvionale di rilievo per il Veneto e nel particolare per la città di Vicenza.

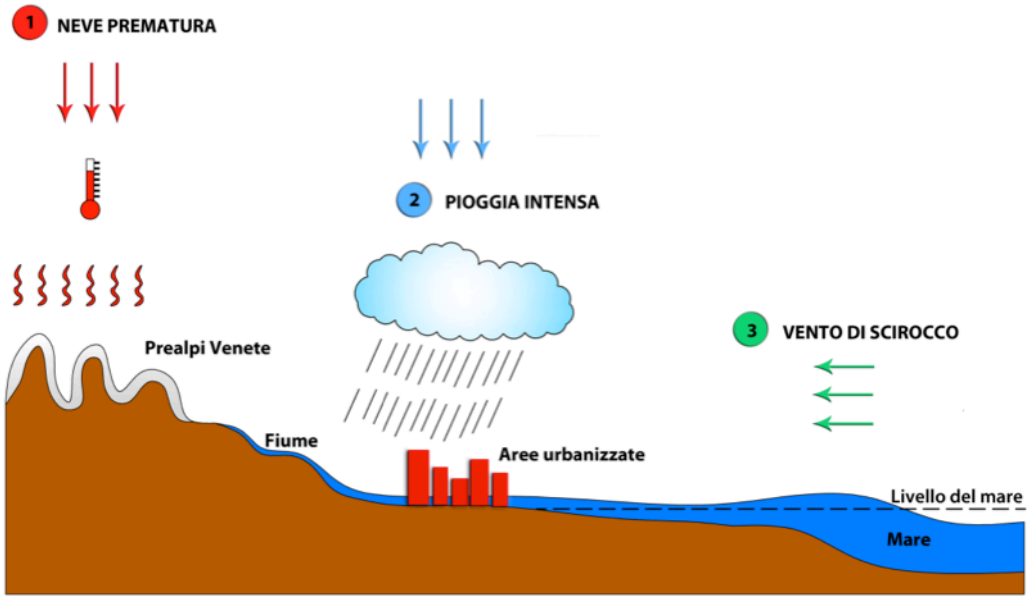


Fig.5.1 - Principali cause dell'evento di emergenza 31/10 – 02/11/2010

Tali elementi hanno di fatto comportato una profonda sofferenza idraulica con conseguente esondazione e collasso di sbarramenti diffusi su tutto il territorio regionale e numerose situazioni di dissesto idrogeologico. Compessivamente in soli 3 giorni e per tutta la Regione si sono registrati 16 fenomeni di esondazione, 13 rotte arginali e 516 fenomeni di dissesto tra frane e colate detritiche[106]. Inoltre nei mesi successivi a Novembre viene registrato una modificazione delle caratteristiche chimiche del mare Alto Adriatico proprio a seguito dell'eccezionale apporto di acqua e materiale causato dalle piene dei fiumi di novembre: minore salinità e ossigenazione, nonché aumento della torbidità.

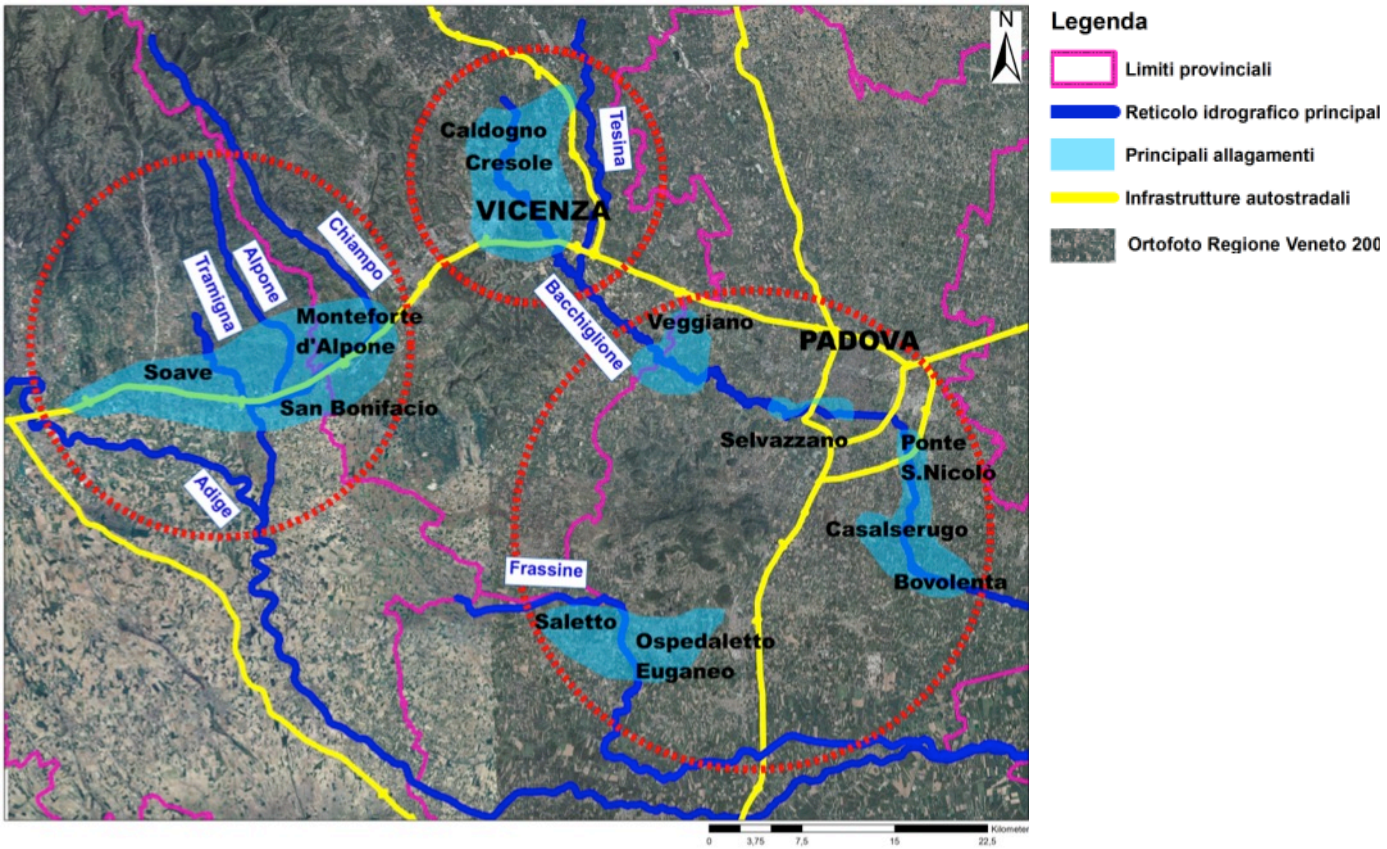


Fig.5.2 - Principali nuclei coinvolti nell'evento di emergenza allagamento Veneto 2010 – rielaborazione da[107]

La figura 5.2 permette di apprezzare qualitativamente le aree il cui il fenomeno di emergenza si è dimostrato maggiormente concentrato, provocando i maggiori danni a persone e beni.

L'analisi dell'evento di emergenza proseguirà limitando la nostra attenzione alla sola Provincia di Vicenza, la quale si è dimostrata essere quella più colpita in termini di intensità e danno soprattutto in ambito urbano e peri-urbano. L'unità minima di riferimento in questo caso è il bacino del fiume Bacchiglione, che attraversa l'intero centro urbano di Vicenza, e dell'Astico-Tesina, suo principale affluente subito a sud del nucleo cittadino. Il fiume Bacchiglione costituisce il collettore finale di una vasta rete idrografica che si estende su gran parte delle zone montana e pedemontana del territorio della provincia vicentina. Esso nasce a nord di Vicenza dalla confluenza di un corso d'acqua di risorgiva, il

Bacchiglioncello, con il Leogra-Timonchio recante i contributi di un bacino montano piuttosto limitato e di una vasta area di pianura attorno a Schio. Nel successivo tratto fino a Longare, sezione di chiusura del bacino montano, il Bacchiglione riceve una serie di affluenti che convergono a ventaglio e che completano gli apporti della zona montana. Nel particolare, risulta utile specificare che le piene del Bacchiglione per la città di Vicenza sono sostanzialmente generate a monte dal sistema Leogra – Timonchio – Orolo: all'altezza di

Marano Leongra e Timonchio, confluiscono e proseguono con il nome di Timonchio, mentre poco più a sud, all'altezza di Caldogno e Dueville, nel momento in cui i torrenti Igna e Bacchiglioncello si immettono nel Timonchio il corso d'acqua assume il nome di Bacchiglione. L'ingresso del Bacchiglione nel comune di Vicenza avviene all'incirca al Ponte Marchese, dopodichè riceve in destra orografica il torrente Orolo ed entra nel nucleo cittadino vero e proprio, dove in un percorso di circa 5 Km è interessato da numerosi attraversamenti. Il tratto cittadino del Bacchiglione, proprio per le caratteristiche geometriche delle sue sezioni, forma in qualche modo un vero e proprio imbuto per le acque provenienti da monte, costrette a defluire entro spazi molto limitati e superando numerosi ostacoli. Dei tre corsi principali che sostanzialmente generano le piene del Bacchiglione a Vicenza (Leogra, Timonchio e Orolo) il maggior contributo è fornito dal Leogra, sia per la maggiore estensione del suo bacino sia per la sua maggiore piovosità (Valli del Pasubio). Nel tratto cittadino, all'altezza del nuovo tribunale, il Bacchiglione riceve il torrente Retrone: le criticità del Retrone sono principalmente legate ai ponti storici che lo attraversano, i quali, in concomitanza di elevati livelli del Bacchiglione alla confluenza, rigurgitano il Retrone stesso, ostacolando le maggiori portate attese. L'azione integrata degli elementi precedentemente citati sul sistema idrologico appena descritto, quali fusione delle nevi in alta quota, vento di scirocco, pioggia intensa e prolungata in Pedemontana unita all'alta marea in Adriatico, ha comportato una saturazione dei suoli ed un innalzamento del livello delle portate a valle tali da generare diffuse esondazioni e ben 4 rotte arginali che hanno di fatto segnato l'inizio del vero e proprio evento di emergenza nel suo complesso.

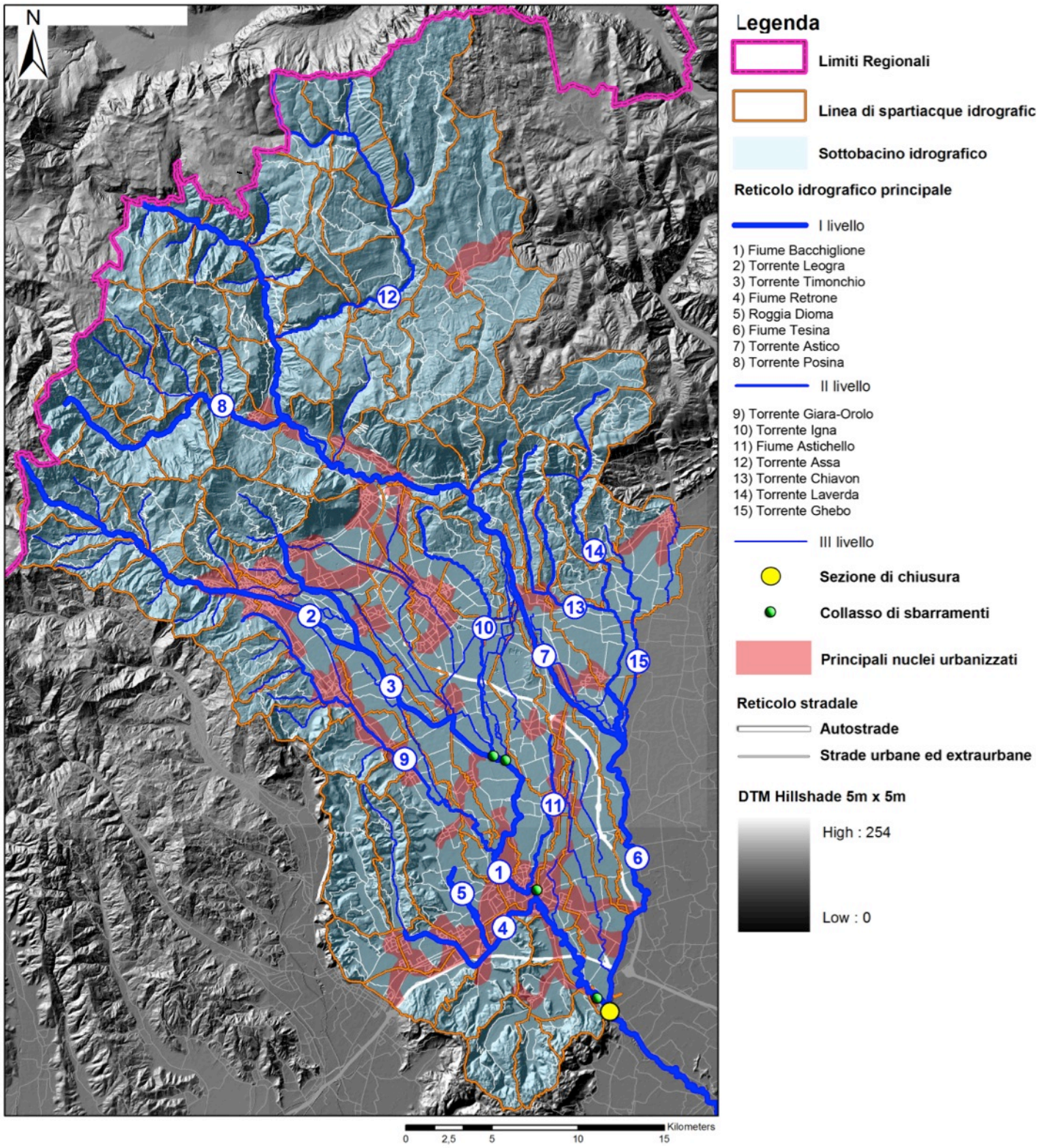


Fig.5.3 - Inquadramento territoriale e localizzazione delle principali rotte arginali – Elaborazione ArcGis 10 Demo

Come anticipato ci troviamo all'interno del bacino idrografico di I livello del fiume Brenta, rispetto al quale scendiamo a considerare esclusivamente il bacino idrografico di II livello frutto del sistema Leogra-Timonchio-Bacchiglione alla sezione di chiusura del bacino montano presso

Longare, per una superficie complessiva di 1316.95 km^2 la cui complessità idrografica viene a sua volta discretizzata in una rete di 128 sottobacini, due dei quali ricadenti nella Provincia Autonoma di Trento nella Regione Trentino Alto Adige.

Una ricostruzione cronologica degli eventi ci porta ad identificare la prima rotta come registrata alle ore 7:30 del 1 Novembre. L'argine destro del Timonchio in corrispondenza con l'immissione con l'Igna in località Due Ponti veniva infatti a quell'ora tracimato e via via eroso per una lunghezza di 80 metri, allagando i campi e le frazioni di Cresole, Rettorgole e Lobbia nel comune di Caldogno. Ancora più o meno alla stessa ora, le acque del Timonchio hanno tracimato al di sopra dell'argine sinistro del Bacchiglioncello, allagando case e vie della frazione di Vivaro in comune di Dueville. Sempre verso le ore 7:30 il Bacchiglione supera il livello di 5,70 m ed esonda in centro di Vicenza, dove crolla anche un muro sottoscarpa nel quartire San Pietro provocando così il totale allagamento della zona. Allo stesso tempo si allaganano numerosi altri quartieri anche in virtù dell'andata in pressione del sistema fognario, con un picco in zona Ponte degli Angeli, Piazza Matteotti, Contrà Araceli e Parco Querini.
Un'ora dopo, una seconda tracimazione con rottura dell'argine destro del Timonchio è avvenuta anche in località Boschi, circa 1000 m a monte di quella in località Due Ponti. Nel pomeriggio sempre del 1 Novembre il Bacchiglione esonda di nuovo a sud della città di Vicenza, in zona Riviera Berica, allagando completamente da Campedello a Debba, mentre in località Longara la violenza e la quantità dell'acqua trasportata dal fiume producono un vero e proprio sfondamento di un altro pezzo di argine in riva destra.
Un significativo innalzamento del torrente Retrone e la messa in pressione del sistema fognario provocano inoltre numerosi allagamenti al nucleo industriale della città vicentina, in località Sant'Agostino, Nogarazza e Arcugnano.
L'emergenza perdurerà generalizzata per tutto il giorno 2 novembre. Soltanto a partire dalla metà del giorno 3 Novembre i livelli idrometrici risulterranno rientrare nella normalità e benchè alcune aree siano ancora invasate dall'acqua, in molti quartieri della città di Vicenza e nei principali nuclei urbanizzati colpiti dall'evento si da inizio ai difficili interventi di pulizia e di recupero.

Prima del 2010 la provincia di Vicenza era stata già interessata da fenomeni alluvionali, tra i quali i più significativi in termini di intensità del fenomeno e di danno casuato a beni e persone presenti sul territorio risultano essere quelli del 1882, 1905 e 1966. L'intensità dell'evento del

2010 supera però tutti i precedenti, portando alla registrazione del massimo livello idrico storico mai registrato del fiume Bacchiglione (6.18 mt). Massimo che è stato aggravato inoltre dalla notevole durata della piena, che per ben 16 ore ha comportato quote idrometriche superiori a 6.0 mt, mentre a confronto si ricorda che in occasione della piena del novembre 1966 il colmo durò soltanto 4 ore[42].

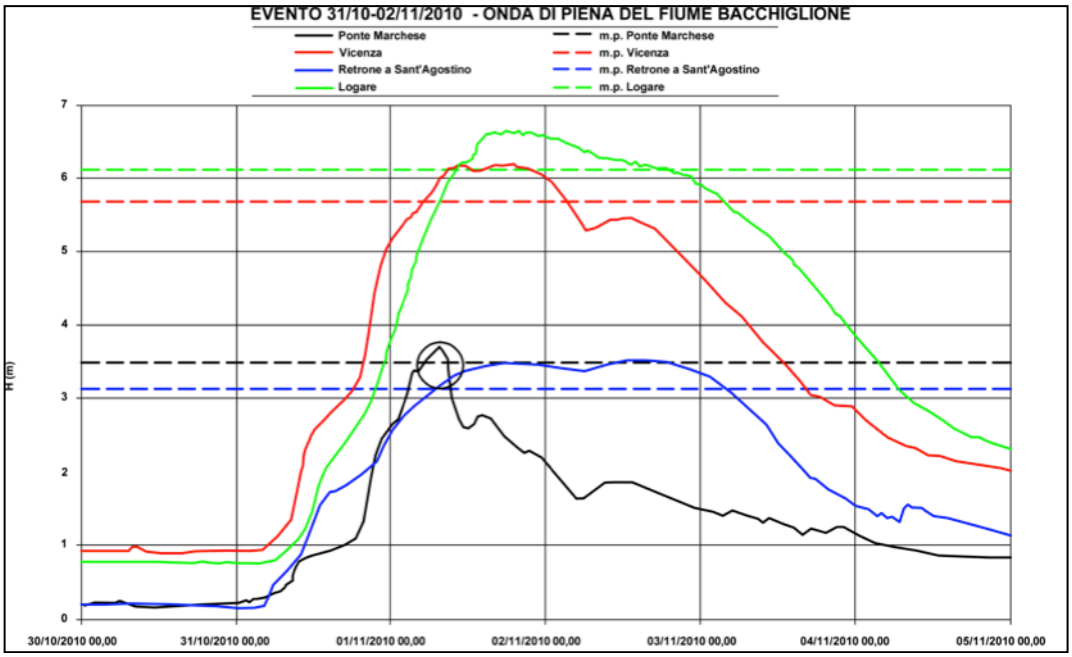


Fig.5.4 - Propagazione della piena del Fiume Bacchiglione nel corso dell'evento del 30/10 – 5/11.
Il cerchio indica il probabile momento della rotta arginale.[109]

Anche gli affluenti del Bacchiglione hanno evidenziato livelli idrometrici superiori o molto prossimi ai massimi valori registrati. In particolare il Tesina a Bolzano Vicentino ha superato il livello della massima piena storica ed il Posina a Stancari ha di fatto eguagliato il massimo livello mai registrato.

[42] testimonianza dei tecnici del Genio Civile di Vicenza. [108]

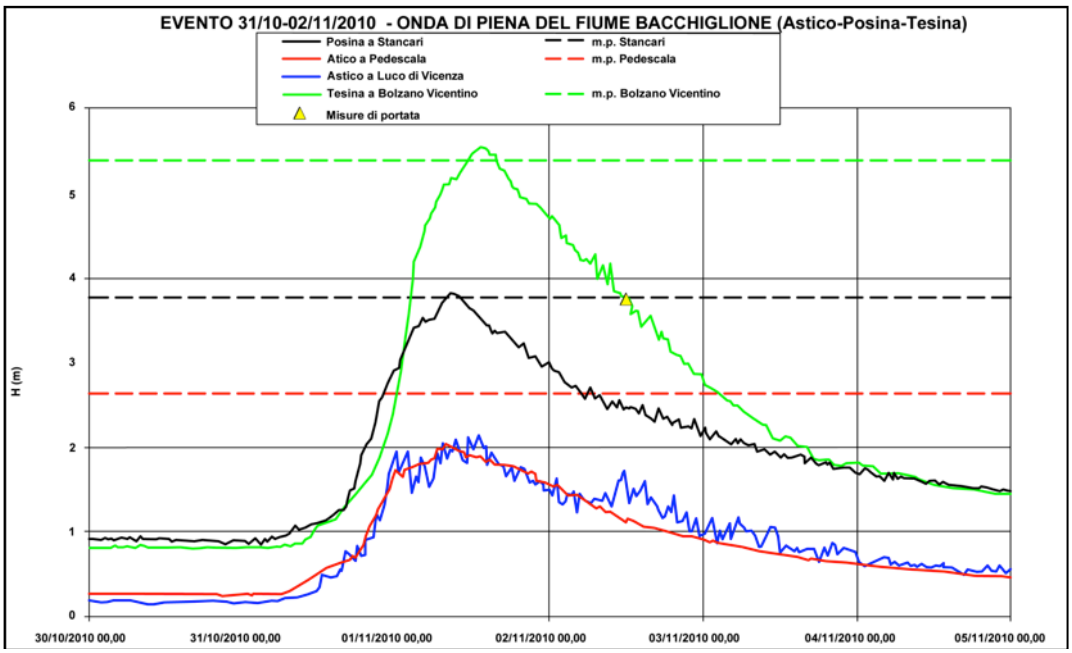


Fig.5.5 - Propagazione della piena lungo i principali affluenti del Bacchiglione nel corso dell'evento del 30/10 – 5/11.[109]

5.1.1 L'inefficacia del sistema di previsione e preannuncio

L'evento di emergenza preso in considerazione ha suscitato non poche polemiche prima di tutto riguardo l'inefficacia del sistema di previsione e di allerta meteo che avrebbe dovuto, in tempi efficaci, agira da preziosa fonte di informazione per la messa in sisurezza delle popolazioni residenti. Ciò non è avvenuto. Ed il fallimento in tale situazione ha riguardato anche l'attività di previsione preannuncio operata dal Progetto OPERA (Protezione Civile dalle Alluvioni) già discusso. La popolazione è stata di fatto colpita senza aver nessun termine di preavviso, trovandosi impreparata e totalmente in balia della forza dell'evento. Un evento innescato da fattori totalmente ed ampiamente prevedibili, frutto di una situazione metereologico-territoriale in evoluzione critica da giorni.

Se si tenta di ricostruire la cronologia dell'evento è possibile identificare non poche inefficienze da parte degli organi preposti alla sicurezza del territorio che hanno portato, se non possiamo dire ad un aggravamento, sicuramente ad una possibile mancata limitazione degli effetti che l'evento ha avuto su beni e persone presenti sul territorio. L'emergenza era stata di fatto già prevista da un gruppo di metereologi ben 5 giorni (giovedì 28 Novembre) prima del suo innesco, mediante una pubblicazione sul sito web "nordestmeteo.it" che preannunciava come "l'alluvione peggiore degli ultimi anni stava per arrivare" e, nel Venerdì 29 Novembre, che "martedì sarà uno dei giorni più a rischio esondazione degli ultimi anni". Tale previsione non fu dettata da istinti visionari bensì fondata su elementi certi e oggettivamente riscontrabili:

“perché il terreno è impreganto d’acqua, il manto nevoso in fusione quasi totale, fiumi e torrenti già ingrossati per lo scorso peggioramento, c’è scirocco intenso ed acqua alta in Adriatico che ostacola i fiumi e accumuli enormi di acqua sulle Prealpi dove sono previsti da 150 a 350 mm di pioggia”. Inoltre secondo il dossier che il Comune di Vicenza invierà dopo l’alluvione alla Procura della Repubblica, lo stesso venerdì 29 Novembre il Centro Funzionale Decentrato della Regione Veneto inviava un primo sms di allerta alle amministrazioni locali, che il responsabile della Protezione Civile di Vicenza, poi inquisito, dichiarerà di non aver mai ricevuto.

Il giorno successivo, sabato 30 Novembre alle ore 14:00, il Centro Funzionale Decentrato lancia l’ “avviso di condizioni meteo avverse” con allerta “elevata” per la zona Pedemontana ma esclusivamente “moderato” per le aree in pianura: in generale si faceva riferimento a “disagi al sistema fognario, innesco di fenomeni franosi precipitazioni che potrebbero far registrare un innalzamento del livello idrometrico dei fiumi”. Frasi nel complesso generiche e di dubbia interpretazione. Per tutto il giorno 31 Ottobre i bollettini metereologici si mantengono “moderati” come il giorno precedente, non risultano “segnalate situazioni di criticità su tutto il territorio regionale”, quando invece in zona Pedemontana si registrano fino a 500 mm di pioggia caduta e livelli idrometrici del Bacchiglione già molto elevati. I tecnici del Genio Civile informano telefonicamente il Capo della Protezione Civile che il fiume Bacchiglione in zona Ponte degli Angeli a Vicenza ha già superato i livelli di guardia, ma lo stesso non ricorderà nuovamente di essere stato informato.

Sarà solo alle ore 13:00 del giorno Lunedì 1 Novembre, quando numerose esondazioni e rotte arginali sono già avvenuti ed hanno concretizzato la loro azione su persone e beni, che dal Centro funzionale decentrato della Regione Veneto arriva ai Comuni la “dichiarazione di stato di allarme”, quando ormai non risulta assolutamente più necessaria, bensì totalmente inefficace.

Per far luce su tutte queste inefficienze sono state aperte dalla Procura della Repubblica di Vicenza due inchieste per distastro colposo, una già archiviata contro l’ing. Vittorio Carli, responsabile della protezione civile del Comune di Vicenza e l’altra, ancora in corso di accertamento, contro Sindaco, Assessore e Responsabile tecnico dei Lavori Pubblici del Comune di Caldogno per uno dei decessi avvenuti a causa dell’alluvione. La prima inchiesta valutava due profili: l’allerta meteo in tempo utile e quello dell’apprestamento delle risorse umane e di materiali atti a contenere le acqua e a portare soccorso. Riguardo il primo profilo il Pubblico Ministero ha dichiarato che l’allarme fu diramato in maniera tempestiva, anche se

avrebbe dovuto essere proseguita l'attività di informazione ai cittadini durante la notte. Per quanto riguarda invece il secondo aspetto, l'emergenza risulta esser stata sottovalutata essendo stata dichiarata esclusivamente come "moderata", nonché non totalmente compresa da chi era preposto a far scattare in maniera preventiva la macchina dei soccorsi. La mancanza di professionalità in capo ai responsabili non viene in questo caso ritenuta punibile in quanto si afferma che l'esondazione fu di una portata tale che difficilmente avrebbe potuto essere contrastata in maniera efficace. Nel complesso quindi tale inchiesta si conclude con una decisa archiviazione basata sul fatto che *"la rete di potenziali responsabilità che viene a delinearsi è talmente disseminata sia sotto il profilo territoriale che funzionale da renderne vana ogni indagine tesa a delinerarne con precisione i contorni"*[107].

Risulta importante come gli eventi passati non siano stati fonte di insegnamento, ne tantomeno risorsa conoscitiva per una previsione tempestiva degli eventi. L'Autorità di Bacino del Fiume Brenta-Bacchiglione, nella Relazione Tecnica del Progetto di Piano stralcio per l'assetto idrogeologico, al capitolo relativo al "Profilo Storico degli eventi di piena" analizza le dinamiche di innesco e relative conseguenze della piena che allagò la città di Vicenza già nel 1966 (3-5 Novembre) come base per la valutazione della pericolosità idraulica del territorio. In questa sede, l'Ente, fa riferimento all'evento storico come a una *"alluvione eccezionale provocata dal verificarsi contemporaneo di piogge intense ed alta marea dopo un lungo periodo di piogge continue. Le precipitazioni, che si riversano praticamente su tutto il territorio dei bacini dei fiumi Brenta e Bacchiglione durante il mese di ottobre, determinano la saturazione dei terreni, l'innalzamento della falda freatica e caricano la rete idrografica capillare. Nei primi giorni di novembre le intense precipitazioni, che si riversano negli stessi bacini, trovano il terreno già saturo e non in grado di allontanare velocemente il surplus di deflusso, deflusso incrementato dal contemporaneo scioglimento delle nevi, precocemente cadute, da parte del vento di scirocco."*[43]

Di fatto una situazione completamente coincidente con quella delineatasi per l'evento del 2010. E quindi, proprio a fronte dell'esperienze passate, ancor più prevedibile.

Nonostante il sistema di previsione e preannuncio sia risultato non efficace ed efficiente rispetto a quanto atteso e previsto nei suoi compiti, va sottolineato che in fase strettamente emergenziale sono state realizzate mappe di allagamento superficiale, per la provincia di Vicenza prima e di Padova poi, a partire dalla data del 3 Novembre da parte del servizio SAFER

[43] pag.75, [110]

di GMES. Tali mappe, indirizzate a supportare l'attività di Protezione Civile, sono anche state pubblicate sul sito web del progetto per alcuni giorni dopo l'evento. Nonostante l'importanza dell'apporto conoscitivo così creato, non si può far a meno di sottolineare come tale fonte di conoscenza venga di fatto limitatamente indirizzata a rafforzare il sistema di risposta all'emergenza, piuttosto che costituire fonte condivisa per tutti gli attori incaricati alla valutazione del rischio e al recepimento della pianificazione di settore nel sistema decisionale locale. Primo fra tutti, l'Autorità di Bacino: l'Ente non risulta infatti ufficialmente previsto tra i soggetti destinatari di tali mappe informative. L'unico ed esclusivo riferimento è il Dipartimento di Protezione Civile e nonostante di fatto le mappe siano state, subito a seguito dell'emergenza, pubblicate sul sito ufficiale del progetto *SAFER*, il canale di comunicazione risulta troppo limitato agli "addetti al settore" e quindi non efficace in termini di sensibilizzazione della popolazione, direttamente o indirettamente interessata che fosse.

Alle eventuali inefficienze dei sistemi di allerta si aggiunge inoltre una inadeguata pianificazione degli interventi per la messa in sicuezza del territorio dal rischio idrologico-idraulico: ciò che manca è una visione organica, che sia mirata alle singole esigenze e che allo stesso tempo mantenga saldo uno sguardo di insieme fondato sull'equilibrio tra forze naturali ed esigenze di sviluppo territoriale. Nel particolare va detto infatti che a seguito dell'alluvione che interessò il Veneto e soprattutto la città di Vicenza nel 1966, sempre innescata da un significativo straripamento del sistema idrografico principale, fu istituita la Comissione De Marchi[44], responsabile di identificare le misure necessarie per la messa in sicurezza del territorio appena interessato dal disastro. In questa occasione vennero individuati due possibili soluzioni: adeguare alle massime portate di piena i corsi vallivi dei fiumi o limitare temporaneamente i colmi di piena trattenendoli con invasi artificiali da costruire. La scelta ricadde sulla realizzazione di una serie di serbatoi di laminazione, di cui però ne fu realizzato soltanto uno, per il fiume Livenza, nessuno invece per il sistema Brenta-Bacchiglione per il quale erano previsti invasi artificiali in prossimità del corso del fiume Astico e per quelli che incidono sulle portate del fiume Bacchiglione nella città di Vicenza, quindi Timonchio-Leogra e Retrone. Questi interventi non sono stati di fatto ancora realizzati, per limiti economici, questioni burocratiche, concomitanza di interessi diversi sulle zone da sfruttare a serivizio di una limitazione del rischio piuttosto che per fini speculativi.

[44] "Commissione per lo Studio della Sistemazione idraulica e della Difesa del suolo", istituita ai sensi dell'art.14 della Legge 27 luglio 1967, n.362, avente il compito di esaminare i problemi tecnici, economici, amministrativi e legislativi tuili al fine di proseguire e intensificare gli interventi necessari per la generale sistemazione idraulica e di difesa del suolo, sulla base di una completa ed aggiornata programmazione [111].

Inoltre esiste di fatto un vizio di fondo dovuto alla mancanza di comunicazione ed interazione attiva tra popolazione, enti di ricerca ed istituzioni a più livelli. L'eventuale rotta arginale poteva essere prevista, così come tempi e severità di propagazione lungo tutto il sistema. Era stato previsto sul web con largo anticipo da appassionati metereologici. L'esperienza passata inoltre poteva risultare preziosa risorsa di memoria tecnica e collettiva. Poteva inoltre essere previsto, limitando così i danni, anche dagli istituti di ricerca universitaria che si occupano di rischio idrologico-idraulico: il Dipartimento di Ingegneria Idraulica dell'Università di Padova ha sviluppato e perfezionato da lungo tempo accurati modelli idrodinamici che sono in grado di simulare in anticipo (da uno e quattro giorni) le quote idrometriche massime dei singoli fiumi, prevedendo così l'onda di piena e la sua propagazione a valle. Tali studi sono stati mandati dagli enti di ricerca agli organi di competenza regionale, ma di fatto con scarsi risultati in termini di integrazione con il sistema di previsione posto ufficialmente in atto[107].

5.2 Il danno subito

Con Decreto n. 236 del 2 novembre 2010, il Presidente della Regione del Veneto, ha dichiarato lo stato di crisi in ordine agli eccezionali eventi alluvionali che hanno colpito il territorio della Regione nei giorni dal 31 ottobre al 2 novembre 2010. Sulla base di tale costatazione, il Presidente del Consiglio dei Ministri, d'intesa con la Regione Veneto e con apposita Ordinanza n. 3906 del 13 novembre 2010, mediante si è proceduto, oltre a stabilire gli interventi urgenti di protezione civile da porre in atto, anche a nominare il "*Commissario delegato per il superamento dell'emergenza concernente gli eccezionali eventi alluvionali che hanno colpito il territorio della Regione Veneto nei giorni dal 31 ottobre al 2 novembre 2010*"[45].
Tale figura *"provvede all'individuazione dei Comuni danneggiati dagli eventi alluvionali, all'accertamento dei danni, all'adozione di tutte le necessarie e urgenti iniziative volte a rimuovere le situazioni di rischio, ad assicurare la indispensabile assistenza alle popolazioni colpite dai predetti eventi calamitosi e a porre in essere ogni utile attività per l'avvio, anche in termini di somma urgenza, della messa in sicurezza delle aree colpite e degli interventi urgenti di prevenzione".*
Tali considerazioni introduttive risultano fondamentali nel momento in cui ci si vogliano valutare in modo oggettivo le conseguenze dell'evento in termine di danno causato dall'evento alle popolazioni ed ai beni posti sul territorio di riferimento. Nel complesso, avendo colpito in

[45] Dal 15 Novembre 2010 al 16 Agosto 2011 IL Commissario Delegato è stato nominato nella persona di Luca Zaia, Presidente della Regione Veneto; a partire dal 17 Agosto tale figura viene ricoperta dalla Dott.ssa Perla Stancari, Prefetto di Verona

modo più o meno incisivo quasi tutta la Regione del Veneto, i danni causati dall'emergenza del Novembre del 2010 sono state quantitativamente valutate come corrispondenti a[105]:

Morti	3
Persone coinvolte	500.000
Famiglie	7.708
Abitanti sfollati/isolati	6.670
Imprese	2.114
Danno complessivo segnalato tramite i Comuni per privati cittadini, imprese e opere pubbliche	426 milioni
Capi di bestiame annegati (112 mila polli, 36 mila tacchini, 3 mila conigli, 59 capi di grossa taglia)	151.000
Comuni che hanno segnalato danni	262
Comuni che hanno dichiarato danno superiore al milione di euro	61
Autostrade chiuse	A4 per 4 giorni
Strade principali chiuse	55
Frane e smottamenti	51
Esondazioni e allagamenti	29
Rotture di argini	15
Superficie interessata da allagamenti	140 kmq
Ospedali evacuati	1
Strutture sociosanitarie evacuate	2
Volontari di Protezione Civile attivati	2.350
Vigili del Fuoco impiegati	800 (700 dei Comandi provinciali del Veneto e 100 da altre Regioni)
Militari impiegati	285
Forza dell'Ordine impiegate	Tutte quelle disponibili nelle province coinvolte
Centri di accoglienza attivati	14
Sale operative di gestione dell'emergenza	8
Saccature utilizzate	Oltre 250.000
Strutture pubbliche coinvolte	Regione del Veneto, Dipartimento Nazionale di Protezione Cvile, Comuni Province, Prefetture, ULSS, Consorzi di Bonifica, Autorità di Bacino; Regioni intervenute a supporto: Friuli Venezia Giulia, Valle d'Aosta, Marche, Emilia Romagna, Piemonte, Lombardia
Interventi aerei specialistici	2 elicotteri pesanti; decine di interventi di salvataggio con verricello

Tab.4.2 - I numeri dell'alluvione [106]

Complessivamente, per l'intera regione l'emergenza del Novembre 2010 ha causato danni per un importo totali pari a 426.295.206[46] relativo a 262 comuni del Veneto. Di tale somma, ben il 44,07% è relativo ai soli danni subiti dai 93 Comuni colpiti sul territorio della Provincia di Vicenza.

		DANNI DICHIARATI – nov.2010	**DANNI DICHIARATI al 21 luglio 2011**
PROVINCIA	**COMUNE**	Danno totale (famiglie, imprese e opere pubbliche)	Danno totale (famiglie, imprese e opere pubbliche)
VICENZA	Vicenza	160.453.000	62.027.376
VICENZA	Caldogno	80.531.000	25.742.656
VICENZA	Valli del Pasubio	10.027.100	17.328.073
VICENZA	Torrebelvicino	2.300.000	10.897.134
VICENZA	Recoaro Terme	4.007.822	7.788.994
VICENZA	Monte di Malo	2.700.000	4.743.259
VICENZA	Schio	3.000.000	3.814.924
VICENZA	Longare	3.670.000	3.727.654
VICENZA	Castelgomberto	402.000	2.965.688
VICENZA	Chiampo	1.960.000	2.964.859
VICENZA	Cornedo Vicentino	1.306.550	2.794.071
VICENZA	Nogarole Vicentino	1.389.200	2.528.922
VICENZA	Marostica	1.132.000	2.281.323
VICENZA	Fara Vicentino	1.070.000	2.216.878
VICENZA	Arcugnano	1.220.000	2.167.315
VICENZA	Trissino	1.077.000	2.043.562
VICENZA	Lusiana	1.900.000	1.957.051
VICENZA	Brogliano	1.658.000	1.786.834
VICENZA	Arzignano	1.268.820	1.734.250
VICENZA	Crespadoro	1.434.000	1.554.801
VICENZA	Dueville	2.050.000	1.329.047
VICENZA	Altissimo	800.000	1.243.239
VICENZA	Altavilla Vicentina	0	1.149.148
VICENZA	Montebello Vicentino	410.000	1.129.219
VICENZA	Villaga	1.030.000	1.030.000
VICENZA	Foza	1.000.000	1.000.000
VICENZA	Creazzo	950.000	917.030
VICENZA	Valdagno	836.000	847.034
VICENZA	Isola Vicentina	20.000	810.083
VICENZA	Valdastico	580.000	617.135
VICENZA	San Vito di Leguzzano	100.000	600.000
VICENZA	Montegaldella	840.000	591.007
VICENZA	Bolzano Vicentino	436.950	559.640
VICENZA	Carrè	450.000	559.039
VICENZA	Lugo di Vicenza	337.550	557.689

[46] stima effettuata sulla base delle dichiarazioni presentate dai danneggiati al 21/07/20100 [106]

VICENZA	Montegalda	412.000	556.939
VICENZA	Posina	325.200	545.000
VICENZA	Molvena	435.000	532.327
VICENZA	Torri di Quartesolo	150.000	523.833
VICENZA	Montecchio Precalcino	100.000	522.000
VICENZA	San Pietro Mussolino	590.000	510.000
VICENZA	Noventa Vicentina	492.000	493.819
VICENZA	Villaverla	154.100	490.430
VICENZA	Gambellara	50.000	475.630
VICENZA	Malo	155.000	473.769
VICENZA	Costabissara	520.000	465.465
VICENZA	Zugliano	60.000	465.000
VICENZA	Monteviale	0	444.195
VICENZA	Mason Vicentino	0	437.343
VICENZA	Pojana Maggiore	400.000	400.000
VICENZA	Camisano Vicentino	400.000	360.000
VICENZA	Romano d'Ezzelino	70.000	358.000
VICENZA	Salcedo	0	345.000
VICENZA	Velo d'Astico	262.000	324.322
VICENZA	Pianezze	750.000	294.318
VICENZA	Gambugliano	54.650	285.676
VICENZA	Montorso Vicentino	0	266.397
VICENZA	Sandrigo	150.000	240.210
VICENZA	Sovizzo	0	232.827
VICENZA	Chiuppano	470.000	228.000
VICENZA	Valstagna	200.000	200.000
VICENZA	Arsiero	120.000	150.000
VICENZA	Laghi	140.000	140.000
VICENZA	Solagna	27.000	138.000
VICENZA	Cismon del Grappa	21.000	134.873
VICENZA	Lastebasse	0	100.000
VICENZA	Conco	0	93.000
VICENZA	Sarego	98.500	81.176
VICENZA	Grumolo delle Abbadesse	26.400	71.873
VICENZA	San Germano dei Berici	70.000	70.000
VICENZA	Grancona	68.000	68.000
VICENZA	Roana	0	60.000
VICENZA	Schiavon	0	59.230
VICENZA	Grisignano di Zocco	50.000	42.750
VICENZA	Calvene	0	37.240
VICENZA	Montecchio Maggiore	0	29.846
VICENZA	Monticello Conte Otto	18.700	20.387
VICENZA	Nanto	0	20.000
VICENZA	Campolongo	9.500	19.709

	sul Brenta		
VICENZA	Caltrano	0	15.000
VICENZA	Nove	0	14.500
VICENZA	Enego	250.000	9.473
VICENZA	Orgiano	0	6.500
VICENZA	Santorso	2.000	3.239
VICENZA	Bressanvido	0	3.200
VICENZA	Pedemonte	1.000	3.000
VICENZA	Castegnero	0	2.350
VICENZA	Lonigo	805.000	696
VICENZA	Thiene	0	215
VICENZA	Asiago	6.230	0
VICENZA	Breganze	90.000	0
VICENZA	Cassola	20.000	0
VICENZA	Cogollo del Cengio	45.000	0
VICENZA	Zermeghedo	78.000	0
TOTALE	**93**	**300.493.272**	**187.869.691**

Tab.4.3 - Confronto tra i danni dichiarati al Novembre 2010 e danni definitivi dichiarati a luglio 2011 – rielaborazione selettiva della tabella dei danni ai soli Comuni appartenenti alla Provincia di Vicenza [106].

Le differenza tra l'entità dei danni dichiarati al 20/11/2010 ed al 21/07/2010 danno la dimensione delle difficoltà in cui la strutture Commissariale e le Amministrazioni locali hanno operato nell'immediatezza dell'intervento per attuare le verifiche sui siti danneggiati e fornire ai cittadini le informazioni idonee relative alle modalità di richiesta e sulla ammissibilità dei danni dichiarabili. La stima definitiva del danno è stata effettuata esclusivamente a seguito di un censimento speditivo dei danni avviato a partire dal 6 Dicembre 2010 [106] che fosse utile a definire modalità ed entità di un primo acconto da poter erogare ai Comuni interessati dai danni più ingenti.

I danni così stimati per la Provincia di Vicenza, per un totale di 187.868.691 euro, sono appunto relative alle dichiarazione rilasciate dai danneggiati, siano essi privati cittadini, imprese o strutture pubbliche, riguardanti danni diretti e materiali casuati dall'evento: altrettanta importanza riveste però quel vasto nucleo di danni immateriali causati alle attività produttive e commerciali difficilmente quantificabili in termini di conseguenze sulla competitività e sulla determinazione a ripartire; altrettanta difficoltà si ha nel determinare il danno psicologico arrecato alla popolazione, che ha visto nel giro di qualche giorno, modificare i luoghi del proprio vivere quotidiano e, in alcuni casi, perdere cari e conoscenti.

La provincia di Vicenza, come già detto, è stata all'interno del territorio della Regione Veneto, quella più gravemente colpita. Nel solo Comune di Vicenza, che ha dichiarato danni per un

importo definitivo di 62 milioni di euro, il fenomeno di allagamento ha provocato ben 2 decessi ed il coinvolgimento di[107]:

- 1.236 residenti;
- 5.202 famiglie;
- 1.616 edifici ad uso abitativo;
- 274 negozi;
- 63 pubblici esercizi;
- 55 edifici dedicati ad attività artigianali, industriali, magazzi e officine;
- 8 strutture sanitarie;
- 3 farmacie;
- 23 scuole;
- 9 servizi pubblici;
- 22 strutture sportive;
- 1 struttura di accoglienza;
- 6 distributori di carburante;
- 11 strutture religiose;
- 13 monumenti;
- 49,50 km di strade;
- 1000 tonnellate di rifiuti provenienti da case, negozi, studi professionali[47];
- 16 kmq di superficie allagata complessiva per una percentuale di allagamento dell'intero territorio comunale pari al 5,03%.

[47] la quantità media giornaliera di rifiuti raccolti in città di Vicenza è di circa 90 tonnellate al giorno

A seguito dell'evento sono stati emessi una serie di contributi provenienti sia da enti pubblici e da soggetti privati per il sostegno ai danni causati dall'alluvione, così riassumibili:

Contributi pubblici	***Importo in euro***
Governo	360.000.000,00
Regione del Veneto	6.450.000,00
Altri contributi pubblici e privati	
Versamenti sul conto solidarietà della Regione del Veneto	2.063.293,60
versamenti tramite sms al numero breve 45501	2.010.423,00
versamenti sulla Contabilità Speciale	1.246.969,98
Totale al 1 Settembre 2011	**371.770.686,58**

Tab.4.4 - Quadro riassuntivo delle risorse per il sostegno ai danni da alluvione per l'intera Regione Veneto [106]

Di tali somme è stata prevista la ripartizione secondo modalità e tempistiche differenti a seconda del soggetto interessato:

A) alle famiglie	87.702.072,50
B) alle imprese	64.671.221,90
C) opere pubbliche	210.750.000,00
D) altri oneri dell'emergenza[48]	8.647.392,18
Totale	**371.770.686,58**

Tab.4.5 - Sintesi ripartizione delle risorse per il sostegno ai danni da alluvione per l'intera Regione Veneto [106]

I contributi alle famiglie e alle imprese sono stati concessi al massimo della somma consentita dalla legge e sulla base del rispetto di alcuni criteri:

- per le famiglie:
  - entro il 75% dei danni ai beni immobili adibiti ad abitazione principale;
  - limite del rimborso a 30.000,00 € salvo deroghe per particolari situazioni segnalate e verificate;
  - entro il 75% dei danni ai beni mobili registrati e non con il limite di 30.000,00 €;
  - 80% delle spese per trasloco con il limite di 5000,00 €;

[48] Tali spese si riferiscono al rimborso degli oneri derivanti dall'impiego dei componenti delle organizzazioni di volontariato di Protezione Civile nelle operazioni di soccorso. [106]

- 100% delle spese di autonoma sitemazione con il limite di 400,00 € mese per famiglia salvo presenza di persone con inabilità.

- per le imprese:
  - 75% dei danni ad attrezzature, strutture e impianti;
  - 75% dei danni ai beni mobili registrati e non con il limite di 30.000,00 €;
  - 30% delle spese scorte, semilavorati o prodotti finiti;
  - 100% delle spese per fermo attività;

Per quanto riguarda i contributi per opere pubbliche si fa riferimento alle opere di messa in sicurezza del territorio di competenza dei Geni Civili, Servizi forestali e Consorzi, le urgenze affrontate dai Comuni e dalle Province per la prima risposta all'emergenza, l'intervento nel Comune di Vicenza in località Ponte Pusterla, gli interventi di mitigazione del rischio necessari nonché ulteriori interventi degli enti locali in corso di valutazione da parte degli organi ad esso preposti dal Commissario Delegato Alluvione Veneto.
Oltre alle seguenti risorse si è provveduto, con appositi decreti ministeriali emessi nel novembre 2010, a:

- sospendere temporaneamente i termini per i versamenti del secondo o unico acconto delle imposte dirette o dell'imposta regionale sulle attività produttive;
- sopendere temporaneamente i termini relativi ai versamenti dei contributi previdenziali ed assistenziali e dei premi per l'assicurazione obbligatoria contro gli infortuni e le malattie professionali;
- sospendere temporaneamente il termine relativo ai pagamenti fiscali e previdenziali ai soggetti compresi in un elenco espressamente redatto dagli organi competenti in materia fino al 30/06/2011.

5.2.1 Condivisione e sensibilizzazione: l'importanza del Web

La popolazione del vicentino, oltre ad esser stata trovata impreparata a causa della fallacia del sistema di previsione e di allerta, è rimasta sorpresa dalle potenzialità distruttive di un fiume, il Bacchiglione o "Livelòn" in linguaggio dialettale, fino ad allora considerato e percepito come un piccolo torrente innocuo, incapace di tracimare. Delle esperienze passate, quali quella del 1966 (e ancora prima del 1882), è rimasta traccia forse solo nell'animo di pochi, forse di quei soli pochi che vi assistettero e che ancora vivono e posso comunicare la propria esperienza. Nel resto della popolazione non vi era traccia quindi di una consapevolezza

del rischio insito nel rapporto tra caratteristiche naturali del proprio territorio e forme e modalità con le quali esso è stato, erroneamente, stravolto. Le potenzialità di accadimento di un evento di intensità come quello del 2010 sono state sottovalutate quindi, sia dalla popolazione, sia dagli stessi enti preposti alla sicurezza del territorio dal rischio idrologico-idraulico. Lo stesso Genio Civile è rimasto del tutto sorpreso dalle rotte arginali che si sono verificate: la loro localizzazione ha interessato punti del sistema idrografico superficiale che non erano considerati a rischio.

Inoltre un elemento che ha suscitato numerose polemiche soprattutto nella popolazione è stato il silenzio mediatico a livello nazionale riguardo l'evento, rotto solo dopo il rientro dell'emergenza, a seguito delle minacce di richiesta di aiuto finanziario e assistenziale da parte degli imprenditori, delle associazioni di categoria e per le proteste dei cittadini. In effetti i media nazionali hanno guardato il disastro che ha interessato il Veneto e nel particolare la città di Vicenza in modo distaccato, senza rendersi conto e, di conseguenza, senza porsi da veicolo di diffusione dell'effettiva drammaticità dell'avvenimento.

Per contro invece è stato il mondo del Web a dimostrarsi fonte fondamentale di sensibilizzazione e condivisione delle conseguenze dell'evento, sia durante che dopo l'emergenza. In seguito infatti alla sensazione di una certa sottovalutazione da parte dei media, sono nati molti siti web gestiti da comuni cittadini: alcuni hanno offerto la possibilità di geolocalizzare gli eventi disastrosi utilizzando la piattaforma africana "Ushahidi", altri invece hanno facilitato l'accesso alle procedure burocratiche per ottenere i risarcimenti messi a diposizione dallo Stato attraverso la Regione Veneto. Anche i Social Network, in particolar modo *Facebook* e *Youtube*, hanno dato notevole impulso alla condivisione dell'informazione in *real-time*, legata proprio alle ore dell'emergenza, nonché a raccogliere una quantità non trascurabile di fondi per le attività di ricostruzione, esprimere opinioni e sottolineare la drammaticità dell'evento. Youreporter, la principale piattaforma di giornalismo partecipativo italiano, ha registrato in quei giorni un vero e proprio record di connessioni, risultando caricati ben 1521 contenuti multimediali relativi all'emergenza. Tale fonte viene considerata particolarmente importante per la percezione dell'emergenza e per l'aggiornamento in tempo reale sulla situazione delle zone colpite, in modo da poterne monitorare costantemente l'evoluzione.

Nel complesso quindi, un approccio "wiki" al rischio risulta particolarmente importante proprio per sedimentare nella popolazione la percezione del rischio, per conoscerlo e diventare consapevoli della sua vicinanza alla vita quotidiana e ai luoghi dell'abitare, in modo da

allontanarsi dalla falsa concezione della sua esistenza soltanto il zone isolate e remote. Come già anticipato la città è il luogo dove la catastrofe, in una forma o nell'altra, finisce prima o poi per manifestarsi e questo proprio perché "*Progresso e catastrofe sono due facce della stessa medaglia*"[112]: posto in questi termini catastrofe e progresso sono uniti dal un legame biunivoco secondo il quale il progresso è sì causa di catastrofe ma è anche la catastrofe stessa ad essere vettore di progresso. Proprio in un ottica di resilienza è la catastrofe stessa che, producendo conseguenze sensibili sulla consapevolezza dei limiti umani e sulle prospettive del suo operare, acquista significato quando colui che la subisce sa farsi carico della "occasione". L'occasione dell'evento del 2010, nella fattispecie, potrebbe portare a ragionare sulla necessità di rinnovamento degli schemi mentali, sugli approcci consolidati, sulle scelte urbanistiche e di mitigazione del rischio evidentemente inadeguate, mal poste in atto o trascurate rispetto ad altre, ritenute più importanti. Si è già detto infatti che l'azione della natura in sé, non si può considerare ne buona ne cattiva, semplicemente essa opera organicamente secondo forme e tempi che sono indifferenti al destino umano, secondo logiche autonome che prescindono dai nostri progetti. E se esiste un punto debole nella catena degli eventi naturali è solo quello rappresentato dall'uomo: è infatti l'habitat umano ad esserne minacciato, non l'ambiente stesso. Nell'evento catastrofico quindi, non cè distruzione di natura, ma solo di quanto, nel tempo, l'uomo ha posto sul territorio: tanto più tale azione risulterà tenere in scarsa considerazione il rapporto con la natura, tanto più la catastrofe che si verificherà sarà grande. E continuerà a verificarsi in modo sempre più catastrofico se si mantiene fisso lo schema mentale secondo il quale l'alluvione sia un evento puramente eccezionale, imprevedibile, che si manifesterà di nuovo soltanto in situazioni altrettanto eccezionali. Quasi fosse qualcosa che non ci rigurdasse, indipendente da noi. Ogni azione umana comporta invece la creazione di un tassello avente proprietà più o meno destabilizzanti e ostacolanti l'azione della natura: consapevoli di questo, perseverare sulla eccezionalità di fenomeno come quello che ha interessato il Veneto nel 2010 significa invece ignorare la necessità di permeare tutto il nostro *modus vivendi* di un principio di responsabilità delle azioni umane verso la natura, che sia orientato ad interrogarsi sulle loro conseguenza nel futuro. Essere responsabili verso la natura appare in questa ottica il primo modo per essere responsabili rispetto al proprio destino e a quello delle future generazioni.

Come anticipato, si ritiene che la nascita di tutto ciò trovi terreno particolarmente fertile proprio all'interno del mondo web, che risulta essere, all'oggi, il più vicino alla popolazione e

quindi il più idoneo, ricollegandoci ad una sorta di principio di sussidiarietà introdotto da un decennio nella nostra Costituzione, a veicolare gli sforzi verso la costruzione di una coscienza e responsabilità del rischio.

5.3 Quadro regionale di riferimento normativo e programmatico

Come già detto l'art.12 della Legge 18 maggio 1989, n.183 "*Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo*", ha istituito le Autorità di bacino quale organo competente in tema di bacini idrografici di rilievo nazionale: esse rappresentano un organismo misto, costituito da Stato e Regioni, operante in conformità agli obiettivi della legge sui sistemi idrografici presenti sul territori così come definiti dalla normativa nazionale.

Il bacino del fiume Bacchiglione, sempre ai sensi della legge 18 maggio 1989 n.183, risulta far parte dei Bacini di rilievo nazionale e, come tale, l'autorità competente è l'Autorità di Bacino dei fiumi dell'Alto Adriatico (fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave e Brenta-Bacchiglione); a sua volta essa costituisce parte integrante del Distretto Idrografico delle Alpi orientali, quale unità territoriale di riferimento per la gestione integrata del sistema delle acque superficiali e sotterranee così come definiti dagli Stati Membri nel recepimento dalla Direttiva 2000/60/CE "Direttiva Quadro sulle Acque".

Nel dettaglio, nel marzo 2004, l'Autorità di Bacino sopra citata ha provveduto ad adottare, per i bacini idrografici di sua competenza, il "Progetto di Piano stralcio per l'assetto idrogeologico dei bacini dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Piave, Brenta-Bacchiglione.(P.A.I)" Nell'attesa però di completare l'adozione definitiva e della successiva approvazione del suddetto Piano, è stato ritenuto necessario adottare, nel giugno 2007, una prima variante di Piano in modo da mantenere aggiornato il piano rispetto all'evoluzione temporale delle criticità territoriali.

In base a quanto stabilito in sede di conferenza programmatica[49] convocata, dalla Regione Veneto di concerto con le sezioni provinciali nel maggio 2011[50] , la I variante di Progetto di Piano Stralcio risulta attualmente approvato con apposita Delibera n.953 del luglio 2011. Nello specifico ricordiamo che Il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) ha *"valore di piano territoriale di settore ed è lo strumento conoscitivo, normativo, tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate le azioni e le norme d'uso riguardanti l'assetto idraulico ed idrogeologico del bacino."* Esso *"persegue finalità prioritarie di protezione di abitati, infrastrutture, luoghi e*

[49] l'art. 68 del citato D.lgs. 152/2006 "Norme in materia ambientale", prevede che ai fini dell'adozione e attuazione dei progetti di PAI, la Regione debba convocare una Conferenza programmatica, articolata per sezioni provinciali, o per altro ambito territoriale deliberato dalla Regione stessa, alla quale partecipano le Province ed i Comuni interessati, unitamente alla Regione e ad un rappresentante dell'Autorità di bacino.

[50] Allegato A, Decreto Giunta Regionale Veneto n.953 del 05 Luglio 2011

ambienti di pregio paesaggistico e ambientale interessati da fenomeni di pericolosità, nonché di riqualificazione e tutela delle caratteristiche e delle risorse del territorio."[51]

Tali obiettivi vengono perseguiti mediante:

- individuazione e perimetrazione delle aree di pericolosità o rischio geologico ed idraulico;
- indicazioni relative a tipologia e programmazione preliminare degli interventi di mitigazione o eliminazione delle condizioni di pericolosità;
- emenazione di norme di attuazione e prescrizioni per le aree classificate secondo i diversi gradi di pericolosità.

Come anticipato quindi il Piano provvede alla perimetrazione delle condizioni di pericolosità idraulica, (nonché geologica e da valanga), punto di partenza fondamentale per l'identificazione delle aree a rischio secondo la definizione data dal D.P.C.M. 29 settembre 1998.

A tale scopo l'Ente al cap. 2.1.1 della Relazione Tecnica del Progetto di Piano Stralcio definisce il grado di pericolosità come *"La valutazione in termini probabilistici dell'instabilità o dell'allagabilità potenziale di un'area, indipendentemente dalla presenza antropica…..funzione della tipologia, della quantità e della frequenza dei processi che vi si possono innescare."*. Allo stesso tempo afferma come *"la pericolosità si traduce in rischio non appena gli effetti dei fenomeni naturali implicano un costo socio-economico, comprensivo anche dei valori non materiali, da valutarsi in relazione alla vulnerabilità, intesa come propensione a subire un danno, ed all'indice di valore attribuibile a ciascun elemento coinvolgibile"*.

Per la valutazione dei diversi gradi di pericolosità idraulica del territorio, l'Ente ha individuato prima di tutto le aree potenzialmente allagabili sulla base di modelli matematici di generazione afflussi-deflussi e modelli propagatori dell'onda di piena sia monodimensionali che, qualora disponibili per la zona in esame, bidimensionali, per un tempo di ritorno dell'evento centenario. Il confronto delle aree così individuate con gli esiti dei modelli bidimensionali e con le aree storicamente allagate ha consentito poi di verificare l'affidabilità degli previsionali di calcolo. Tra le aree storicamente allagate è stato tenuto conto, ai fini della stima della pericolosità, esclusivamente dell'evento del 1966 *"in quanto gli eventi alluvionali precedenti in*

[51] cap.4, titolo 1, art. 2 [110]

relazione alla mutata morfologia degli alvei e del territorio, nonché alla realizzazione di opere idrauliche, non sono da ritenere significativi delle corrispondenti condizioni di criticità".

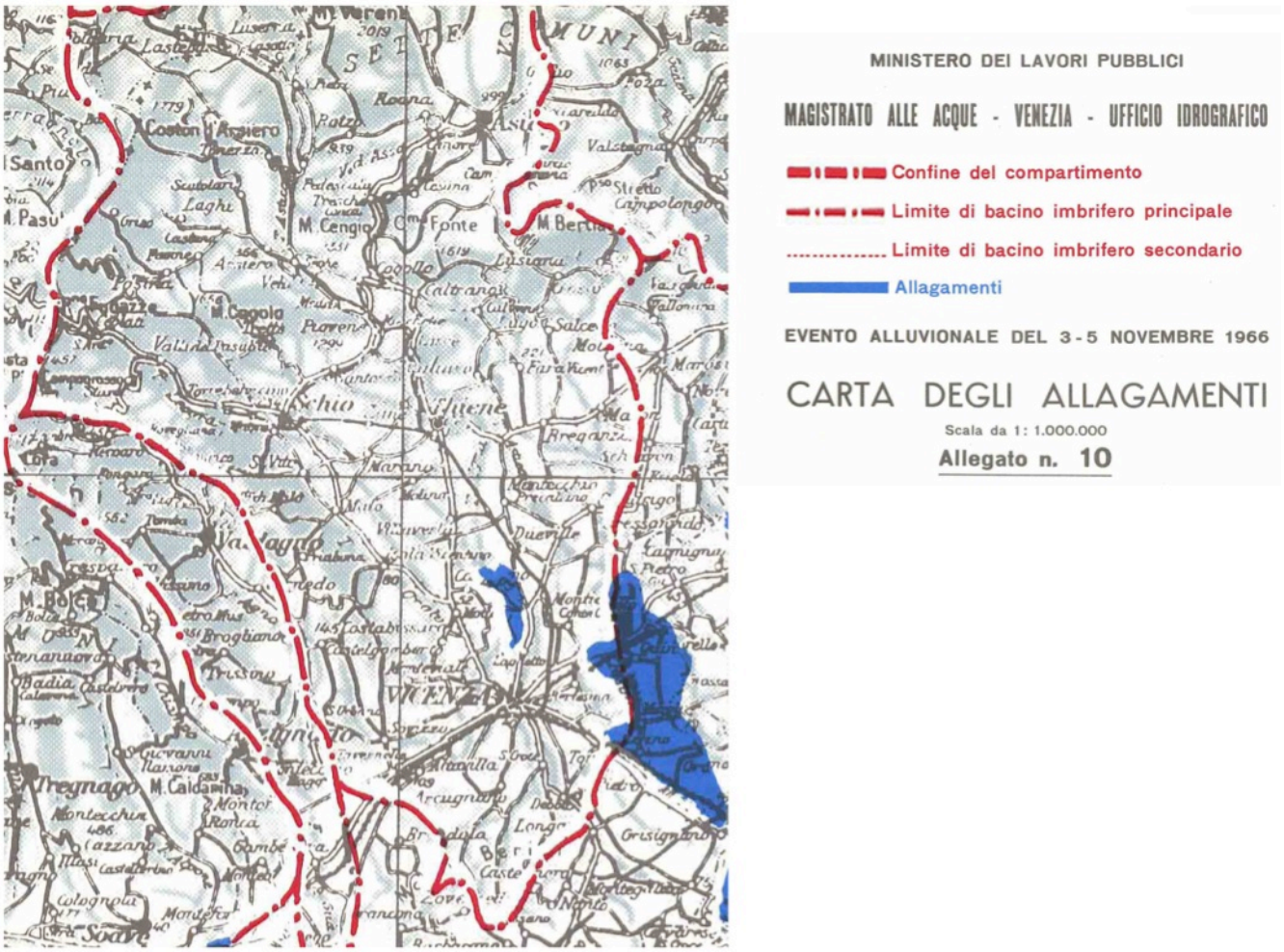


Fig.5.6 - Bacino del Bacchiglione nella carta degli allagamenti dell'evento alluvionale del Novembre 1966 [113]

Inoltre, risulta importante sottolineare come, nell'analisi di quanto previsto dal Piano, non risulti chiaro se, per l'elaborazione dei relativi modelli bidimensionali e di conseguenza per la valutazione della pericolosità idraulica stabilità dal Piano attualmente adottato, l'Ente si sia avvalso del rilievo laser altimetrico ad alta precisione di sua proprietà realizzato nel 2004 per le aste idriche principali presenti nel bacino idrografico del Fiume Bacchiglione. Il dubbio sorge dalla frase, riportata al capitolo 2.2.1.1 "Criteri di conterminazione delle aree di pericolosità idraulica dei fiumi principali in pianura (carte delle aree inondabili in pianura)" della Relazione Tecnica del in oggetto, dove si afferma che *"Sono in corso ulteriori approfondimenti, a cura dell'Autorità di Bacino, mediante l'accoppiamento di dati territoriali derivanti da rilievi laser-altimetrici ad alta precisione con un sofisticato modello bidimensionale di propagazione delle*

piene." Di fatto il Progetto di Piano Stralcio dalla data di adozione (giugno 2007) non risulta aver subito, nella perimetrazione delle aree a pericolosità idraulica, variante alcuna.

Per quanto riguarda l'identificazione dei diversi livelli di pericolosità idraulica, Il Progetto di Piano Stralcio assume quale pioggia di riferimento quella caratterizzata da un tempo di ritorno di 100 anni e da una durata di 24 ore, ritenendo che la *"predetta durata é quella che meglio approssima la cosiddetta "durata critica" e che determina conseguentemente le condizioni di maggior pericolo."*

Le aree di potenziale esondazione così stimate e generanti un tirante idrico non inferiore al metro[52] sono state poi assegnate alle diverse classi di pericolosità sulla base delle seguenti considerazioni:

- P3 – pericolosità elevata: tratte fluviali (e fascia di rispetto) storicamente sede di rotte arginali ovvero che presentano condizione di precaria stabilità delle arginature e per le quali le analisi modellistiche confermano la criticità;
- P2 – pericolosità media: aree contigue alle precedenti ed eventualmente riconosciute come suscettibili di allagamento in base alle procedure di modellazione idraulica nonchè fascia contigua a tratte fluviali artificialmente regimate che, seppur critiche in base modellazione idraulica, non sono tuttavia mai state sede di rotte arginali;
- P1 – pericolosità moderata: aree esondate nel passato ma naturalmente residuali rispetto alle precedenti nonché aree esondabili residuali derivanti da modellazione idraulica

Come si noterà esiste una certa differenziazione in termini di pericolosità idraulica attribuita alle tratte fluviali qualora esse sia interessate da opere idrauliche o meno. Questo perché l'Ente ha ritenuto importante valutare in modo diverso i termini di incertezza relativi al comportamento, in sede di piena, delle tratte fluviali arginate o comunque artificialmente controllate da quelle il cui corso d'acqua è a regimazione naturale. E questo essenzialmente perché, nonostante il rischio idraulico derivi in entrambi i casi da fenomeni legati al flusso delle acque, in presenza di difese arginali cresce esponenzialmente l'incertezza circa gli effetti che la

[52] La scelta di tale soglia non è casuale: essa corrisponde alla quota idrometrica massima che si ritiene compatibile con la salvaguardia, l'incolumità e la capacità di movimento di persone e cose.

piena potrebbe causare sul territorio anche in conseguenza della buona efficienza del manufatto.

L'incertezza maggiore in questo caso interessa quindi proprio il Bacino del fiume Bacchiglione, dove una ampia porzione di territorio, peraltro densamente urbanizzato e sede di importantissime attività produttive, è protetto da arginature. *"In molte situazioni la difesa contro le inondazioni, affidata a queste opere, non ha sufficiente grado di sicurezza in quanto, molto frequentemente, non sono note né le caratteristiche geotecniche delle strutture, né i rimaneggiamenti subiti nel tempo. In altri termini, per il sistema arginale, non vanno mai trascurati i fattori di degenerazione e di imprevedibilità e nelle quali l'incertezza può essere limitata esclusivamente mediante il ricorso ad assidue e mirate attività di monitoraggio, presidio e manutenzione."*[53]

Oltre alle aree extra-arginali sono state perimetrate le "aree fluviali", ossia quelle aree che più direttamente sono legate al corso d'acqua e che quindi sono soggette ad un grado di pericolosità intrinseco: a tali aree viene associata una pericolosità P4 (molto elevata).

Per tutte le aree in cui non è ancora stata adottata la cartografia di perimetrazione della pericolosità idraulica, *"in assenza di specifici progetti, valutazioni o studi approvati dai competenti organi statali o regionali, ovvero in assenza di specifiche previsioni contenute nel Piano regolatore vigente sono considerate pericolose le aree che sono state soggette ad allagamento nel corso degli ultimi cento anni"*[54].

Prima di continuare risulta importante sottolineare che, tra la data di redazione e di adozione del Progetto di Piano (giugno 2007) alla data della sua approvazione (luglio 2011), sulla base esclusiva dell'evento di emergenza del 31 ottobre – 2 Novembre 2010, non è stata apportata nessuna modificazione alla perimetrazione delle aree a pericolosità idraulica ricadenti all'interno del bacino idrografico considerato in tale studio, ossia quello del fiume Bacchilgione chiuso a Longare. Questo perché l'Ente valuta l'evento accaduto come evento eccezionale, mentre il suddetto Progetto di Piano è di fatto pensato per eventi con tempo di ritorno centenari.

[53] cap.2.2.1, [110]

[54] art. 7, Norme di attuazione, [110]

Allo stesso tempo però risulta utile ricordare che, sulla base di quanto previsto dalla Direttiva 2007/60/CE - "Direttiva Alluvioni" e dal D.Lgs. 49/2010 in sua attuazione, l'Autorità di Bacino dei fiumi dell'Alto Adriatico (insieme a quella del Bacino dell'Adige), ha provveduto ad adottare nel febbraio 2010 il Piano di Gestione del Distretto Idrografico delle Alpi Orientali. *"Tale Piano intende fornire una visione comune, a livello europeo, sull'identificazione dei corpi idrici, sulla loro designazione, sul conseguimento degli obiettivi di qualità ambientale e più in generale sulla tutela quali-quantitativa delle acque."*

A fronte delle scadenze imposte dalle suddette norme, lo stesso Ente predisposto ad agosto 2011 una serie di elaborati cartografici[55] finalizzati ad approfondire l'esistenza di eventuali ulteriori situazione di pericolosità idraulica e rendere così il P.A.I. conforme agli indirizzi della Norma. Le perimetrazione e gli studi relativi alle nuove situazioni di pericolosità riscontrate dal PAI, così aggiornate, sono state fatte pervenire sia alla Direzione Difesa del Suolo della Regione Veneto, sia alla Direzione Ambiente Energia e Politiche per la montagna della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.

Anche in questo caso l'Ente specifica di aver fatto effettuato le analisi idrologiche facendo riferimento al tempo di ritorno centenario, nonché di aver preso in considerazione tutte le possibili aree allagabili, senza distinzione tra quelle prodotte dalla rete idraulica principale ovvero secondaria, ne tantomeno in base all'entità del tirante idrico che potrebbe potenzialmente interessare il territorio.

L'insieme delle classificazioni e perimetrazioni delle aree a diversa pericolosità idraulica così come adottate all'interno del PAI al 2007 e approvate al luglio 2011, nonché il sistema di nuove conoscenze emerse a seguito di studi realizzati dopo il 2007 che sostanziano l'aggiornamento del P.A.I all'agosto 2011, vengono nel complesso rappresentate a seguire, in modo da poter apprezzare lo stato attuale della pianificazione di settore all'interno del bacino idrografico di nostro interesse.

[55] Prot. n. 2335/L.365/00 del 12/08/2011 – Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Piave, Livenza e Brenta-Bacchiglione

La determinazione della pericolosità idraulica per le diverse aree presenti nel bacino idrografico di riferimento costituirebbe, come già accennato, il punto di partenza per la successiva identificazione dei livelli di rischio associati. Nel caso però del Progetto di Piano Stralcio qui considerato, l'Ente si riserva di rimandare tale attività ad una fase esclusivamente successiva e non ancora posta in essere. Questo perché si ritiene che *"la perimetrazione delle aree a rischio rappresenta un punto di partenza e non di arrivo, che va maturata, fatti salvi gli aspetti tecnici connessi con i concetti di pericolosità e rischio, culturalmente assieme alle collettività locali, le quali possono comunque contribuire ad una migliore qualificazione degli aspetti tecnici. Il Piano quindi prevede che questa fase avvenga contestualmente alla fase istruttoria del progetto di piano, ed in particolare in occasione delle previste conferenze programmatiche…..In tale contesto i soggetti pubblici coinvolti, per ogni singola situazione identificata nelle aree di pericolosità, potranno collaborare direttamente con l'Autorità di bacino e le Regioni, per la perimetrazione dell'area a rischio, ottenendo così una maggiore precisione e collegialità del lavoro."*

Sulla base esclusiva delle classi di pericolosità individuate, il Progetto di Piano Stralcio provvede a definire norme d'uso del territorio da assegnare alle aree ricadenti nelle rispettive perimetrazioni [56]:

- *aree a pericolosità moderata* – P1: in questo caso spetta agli strumenti urbanistici comunali e provinciali ed ai piani di settore regionali prevedere e disciplinare, nel rispetto dei criteri e indicazioni generali del Piano, l'uso del territorio, le nuove costruzioni, i mutamenti di destinazione d'uso, la realizzazione di nuove infrastrutture, gli interventi sul patrimonio edilizio esistente;

- *aree a pericolosità media* – P2: per tali aree viene stabilito che l'attuazione degli strumenti urbanistici vigenti alla data di adozione del progetto di Piano sia subordinata alla verifica, da parte dell'Amministrazione comunale, della compatibilità degli interventi con le situazioni di pericolosità da esso evidenziate; per quanto riguarda invece eventuali varianti agli strumenti urbanistici vigenti, essi dovranno tenere ferma la non

[56] art.9, Titolo II [110]

idoneità per nuove zone edificabili di espansione o per edifici pubblici o di pubblica utilità destinati ad accogliere persone che non costituiscano ampliamento, prosecuzione o completamento di strutture già esistenti. non può comunque essere consentita la realizzazione di:

- impianti di smaltimento e di recupero dei rifiuti pericolosi;
- impianti di trattamento delle acque reflue diverse da quelle urbane;
- nuovi depositi, anche temporanei, in cui siano presenti sostanze pericolose.

- *aree a pericolosità elevata* – P3: in tali aree viene consentita l'esclusiva realizzazione di:

  a) opere finalizzate ad eliminare, ridurre o mitigare le condizioni di pericolosità;

  b) opere connesse con le attività di gestione e manutenzione del patrimonio forestale e boschivo, interventi di riequilibrio e ricostruzione degli ambiti fluviali naturali nonché opere di irrigazione, purché non in contrasto con le esigenze di sicurezza idraulica;

  c) interventi di realizzazione e manutenzione di sentieri, purché siano segnalate le situazioni di rischio;

  d) interventi di manutenzione, restauro e risanamento di opere pubbliche o di interesse pubblico;

  e) interventi di realizzazione o ampliamento di infrastrutture a rete pubbliche o di interesse pubblico, diverse da strade o edifici, non diversamente localizzabili ;

  f) interventi di realizzazione o ampliamento di infrastrutture viarie, ferroviarie e di trasporto pubblico, purché siano realizzati a quote compatibili con la piena di riferimento, non comportino l'incremento delle condizioni di pericolosità e non compromettano la possibilità di realizzazione degli interventi di mitigazione del rischio;

  g) interventi di demolizione senza ricostruzione;

  h) sistemazioni e manutenzioni di superfici scoperte di edifici esistenti (rampe, muretti, recinzioni, opere a verde e simili);

  i) interventi strettamente necessari per la tutela della pubblica incolumità e per ridurre la vulnerabilità degli edifici;

  j) interventi di manutenzione ordinaria, straordinaria, restauro, risanamento conservativo e ristrutturazione di edifici ed infrastrutture, qualora non comportino aumento di superficie o volume e prevedano soluzioni volte a mitigare la vulnerabilità degli edifici e delle infrastrutture;

  k) interventi di ampliamento degli edifici o infrastrutture, sia pubblici che privati, per

motivate necessità di adeguamento igienico-sanitario o per abbattimento delle barriere architettoniche e di sicurezza del lavoro, purché realizzati al di sopra del piano campagna;

l) modesti locali accessori (legnaie, impianti tecnologici, box auto), realizzati al di sopra del piano campagna, a servizio degli edifici esistenti e che non comportino aumento del carico urbanistico;

m) attrezzature e strutture mobili o provvisorie, non destinate al pernottamento di persone, per la fruizione del tempo libero o dell'ambiente naturale ovvero le attrezzature temporanee indispensabili per la conduzione dei cantieri, a condizione che non ostacolino il libero deflusso delle acque e che siano compatibili con le previsioni dei piani di protezione civile;

- *aree a pericolosità molto elevata* - P4: in tali aree viene consentita l'esclusiva realizzazione di:

  a) opere di difesa e di sistemazione idraulica, di bonifica e di regimazione delle acque superficiali, di manutenzione idraulica, di monitoraggio o altre opere comunque finalizzate a eliminare, ridurre o mitigare le condizioni di pericolosità o a migliorare la sicurezza delle aree interessate;

  b) opere connesse con le attività di gestione e manutenzione del patrimonio forestale e boschivo, interventi di riequilibrio e ricostruzione degli ambiti fluviali naturali nonché opere di irrigazione, purché non in contrasto con le esigenze di sicurezza idraulica;

  c) interventi di realizzazione e manutenzione di sentieri;

  d) interventi di manutenzione di opere pubbliche o di interesse pubblico;

  e) interventi di realizzazione o ampliamento di infrastrutture a rete pubbliche o di interesse pubblico, diverse da strade o edifici, riferite a servizi essenziali non diversamente localizzabili;

  f) interventi di realizzazione o ampliamento di infrastrutture viarie, ferroviarie e di trasporto pubblico, purché siano realizzati a quote compatibili con la piena di riferimento e non comportino significativo ostacolo o riduzione apprezzabile della capacità di invaso delle aree stesse;

  g) interventi di demolizione senza ricostruzione;

  h) sistemazioni e manutenzioni di superfici scoperte di edifici esistenti (rampe, muretti, recinzioni, opere a verde e simili);

i) interventi strettamente necessari per la tutela della pubblica incolumità e per ridurre la vulnerabilità degli edifici;

j) interventi di manutenzione ordinaria, straordinaria, restauro e risanamento conservativo di edifici ed infrastrutture a condizione che gli interventi stessi non comportino aumento del carico urbanistico ed aumento di superficie o volume, a condizione che non comportino significativo ostacolo o riduzione apprezzabile della capacità di invaso delle aree stesse;

Il Piano inoltre ha inoltre il compito di definire le misure strutturali e non strutturali di mitigazione del rischio idrologico-idraulico per il bacino idrografico di riferimento. Per quanto riguarda il bacino del fiume Bacchiglione si fa per lo più esclusivo riferimento a misure di tipo strutturale miranti a "ridare sicurezza e protezione idraulica al bacino" e distinte essenzialmente in tre tipologie di interventi:

- l'adeguamento degli alvei alle portate massime stimate in funzione dei tempi di ritorno considerati;
- la moderazione dei colmi di piena fino a ridurli in limiti accettabili per lo stato attuale dei fiumi;
- una combinazione delle due precedenti.

Sulla base delle criticità individuate all'interno del bacino del Bacchilgione vengono nel dettaglio previste le seguenti opere di mitigazione:

Bacino del Bacchiglione - asta principale

manutenzione dell'asta principale e dei suoi affluenti per eliminare stati di criticità locale nella Città di Vicenza (Astichello-Parco Querini)	7.747
cassa di espansione sul Timonchio (comprensivo costi degli espropri)	25.823
casse di espansione di Breganze-Sandrigo (comprensivo costi degli espropri)	22.208
interventi di mitigazione del rischio idraulico nella rete fluvio-torrentizia montana	5.165
Interventi proposti dalla Regione del veneto riguardante i comuni di Lastebasse, Pedemonte, Valdastico (scheda B55)	1.136
TOTALE	62.079

Bacino del Bacchiglione - fiume Retrone

opere complesse di laminazione delle piene e di sistemazione del Retrone e dei suoi affluenti (roggia Dioma, fosso Cordano, rio Riello) per mettere in salvaguardia dalle esondazioni la Città di Vicenza	51.646

Tab.4.6 - Interventi da realizzare per la mitigazione della pericolosità idraulica nel bacino del Brenta-Bacchiglione [110]

Nonostante la indubbia efficacia di tali interventi, il Piano risulta però sostanzialmente fermo ad un approccio al rischio fortemente tradizionalista, radicato al concetto passivo di protezione e difesa: il ricorso ad interventi non strutturali è del tutto insufficiente, limitandosi esclusivamente a combinare interventi strutturali con opere di manutenzione ordinaria, insieme alle già citate norme di uso del territorio compatibili con i livelli di pericolosità riscontrati sull'area del bacino.

Tali interventi, previsti al giugno 2007 come *"azioni di breve periodo che comprendono quegli interventi che per importanza ed efficacia vanno immediatamente attuati."*[110], non risultano attualmente ancora poste in essere se non per il caso dell'invaso artificiale in comune di Caldogno, attualmente in corso di realizzazione. Nonostante si sia già detto che la programmazione di misure strutturali, come quelle previste dall'Ente per il bacino del Bacchiglione, non escluda la presenza di un rischio residuale, è altrettanto palese come la loro presenza sul territorio, di fatto ritenuta necessaria alla riduzione della pericolosità prima di tutto dagli Enti ad esso preposti, sia pregiudicata da limiti derivanti da iter di approvazione, tempistiche amministrative e risorse finanziarie a disposizione. Tali limiti costituiscono una realtà di fatto che non deve essere trascurata e che interessa, in modi più o meno diversi, tutti gli interventi di pubblica utilità. Ignorare tale realtà implica di fatto un atteggiamento che va in direzione contraria a quello che una politica di resilienza al rischio dovrebbe promuovere.

Continuando nell'analisi del quadro programmatico soprattutto in termini di azioni di risposta all'emergenza considerata nel presente lavoro, è intiuibile come l'evento stesso abbia in modi e forme diverse interessato trasversalmente tutti gli aspetti che interessano il tema del governo del territorio. A questo proposito infatti, a fronte del parere richiesto dalla Provincia di Padova all'Autorità di Bacino riguardo le "Azioni da intraprendere nell'ambito della pianificazione territoriale per le aree recentemente allagate a seguito degli eventi verificatisi nei giorni 31 ottobre – 2 novembre[57]" viene posta l'attenzione sull'atteggiamento da osservare in tali aree in sede di approvazione dei Piani di Assetto del Territorio.
Rispetto a tale questione, l'Autorità di Bacino si pone in un'atteggiamento conservativo definendo le seguenti linee di valutazione della pericolosità idraulica:

- le aree in prossimità delle sedi di rotte arginali (indicativamente una fascia complessiva di 1 km contigua al punto di rotta e della lunghezza orientativa di 150 m), si attribuisce la classe P3;
- alle aree esondate nel corso dell'evento con tirante superiore a 1 m e aree in prossimità delle sedi di rotte arginali (indicativamente una fascia di 1 km a monte e 1 km a valle contigua alla fascia classificata precedentemente P3) si attribuisce la classe P2;
- aree esondate nel corso dell'evento con tirante inferiore a 1 m, si attribuisce la classe P1.

A tale proposito è risultato importante in prima analisi effettuare una verifica tra quanto classificato dal P.A.I. (tanto all'adozione del 2007 e all'aggiornamento del 2011) in tema di pericolosità idraulica e gli allagamenti invece riscontrati a seguito dell'evento sulla base di attività speditive di rilievo diretto effettuate dai tecnici sia dell'Autorità di Bacino[58] che del Comune di Vicenza[59]. Le attività sono state eseguite in modo indipendente tra i due Enti ma, in entrambi i casi, hanno avuto luogo nella giornata del 2 Novembre. Sulla base degli esiti derivanti da ciascun rilievo si è quindi realizzata una mappa utile all'apprezzamento dell'estensione delle aree rilevate come allagate distinte per classi di pericolosità idraulica in quanto ricadenti all'interno delle perimetrazione già previste dal PAI, ovvero tutte le restanti aree interessate dall'allagamento ma non presenti all'interno del Progetto di Piano Stralcio attualmente in vigore.

[57] Parere n 3/2011 del Comitato tecnico dell''Autorità di bacino dei fiumi Isonzo Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione
[58] gentilmente fornito dall'Ing. Roberto Fiorin, Tecnico dell'Autorità di Bacino nonché soggetto rilevatore degli allagamenti.
[59] gentilmente fornito dall'Ufficio SIT del Comune di Vicenza

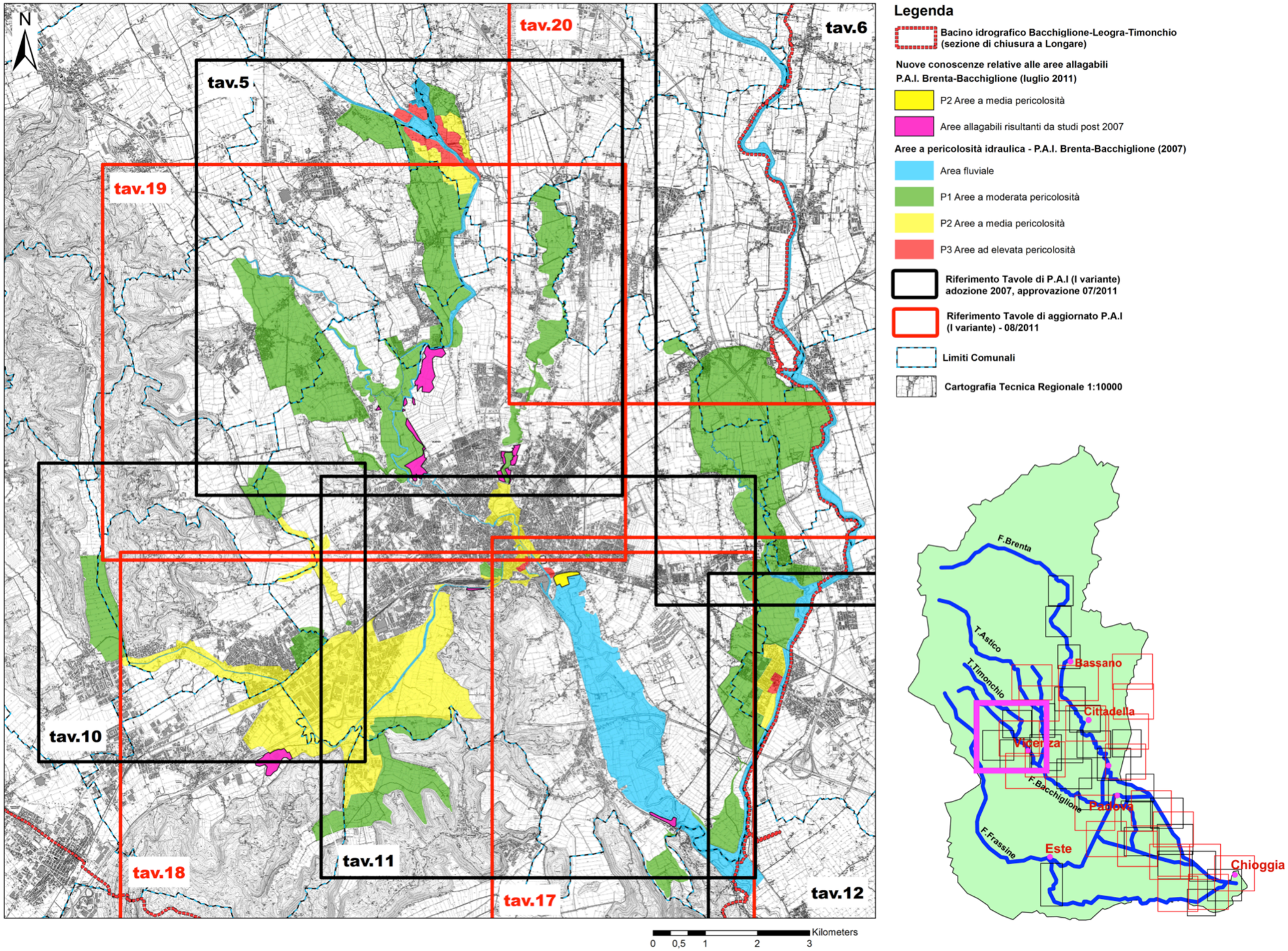


Fig.5.7 - Combinazione della Carta della pericolosità idraulica (P.A.I. I variante, adozione 2007, approvazione 2011) e Carta delle nuove conoscenze in merito alle possibili aree allagabili prodotta a seguito degli studi eseguiti dopo il 2007 (Aggiornamento P.A.I a Luglio 2011); Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Piave, Livenza e Brenta-Bacchiglione; rielaborazione in ArcGis 10 Demo

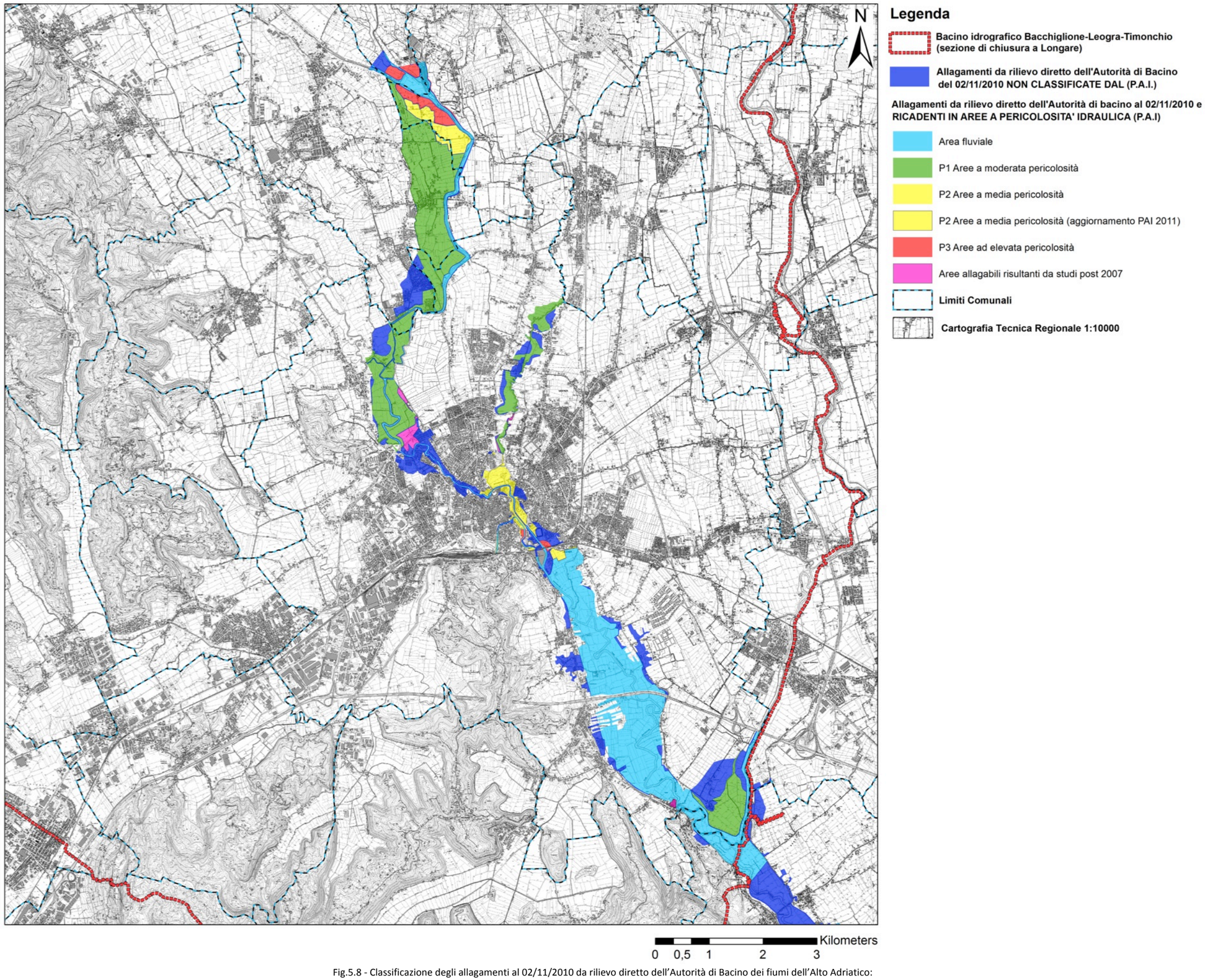


Fig.5.8 - Classificazione degli allagamenti al 02/11/2010 da rilievo diretto dell'Autorità di Bacino dei fiumi dell'Alto Adriatico:
aree allagate non previste dal PAI a aree allagate ricadenti nelle perimetrazioni del PAI e classificate secondo le rispettive classi di pericolosità idraulica – Elaborazione ArcGis 10 Demo

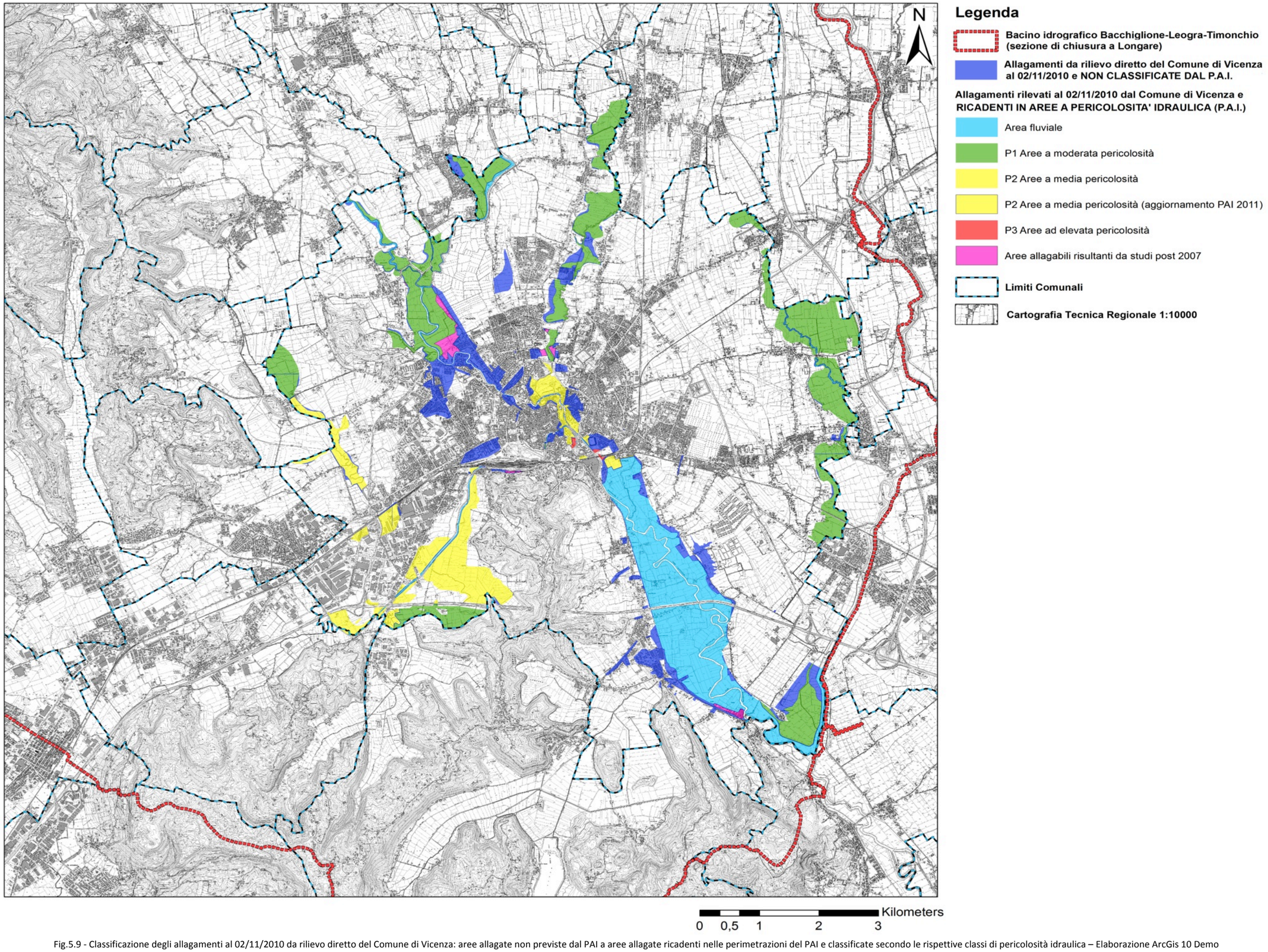


Fig.5.9 - Classificazione degli allagamenti al 02/11/2010 da rilievo diretto del Comune di Vicenza: aree allagate non previste dal PAI a aree allagate ricadenti nelle perimetrazioni del PAI e classificate secondo le rispettive classi di pericolosità idraulica – Elaborazione ArcGis 10 Demo

Ciò che emerge è innanzitutto una prima differenza sostanziale negli esiti derivanti dai due rilievi che risiede nel limite stesso della tecnica utilizzata: il rilievo diretto, sebbene riporti il vantaggio di una maggiore affidabilità circa gli effetti del fenomeno sul territorio, porta con se il limite della soggettività della scelta dell'operatore che lo pone in essere. Come si può osservare, gli allagamenti riscontrati dall'Autorità di Bacino sono concentrati in prossimità delle aste principali, trascurando invece le altre parti del territorio; per contro, quelli derivanti dall'osservazione dei tecnici del Comune di Vicenza, pur registrando anche allagamenti sul resto del territorio, limitano la loro opera al confine comunale, trascurando quindi l'eventuale azione del fenomeno al suo esterno.

Rispetto al sopra citato parere, in generale, l'Ente afferma inoltre che *"tutte le aree allagate a seguito dell'evento sono da ritenersi affette da pericolosità fino a quando non saranno realizzati gli interventi di mitigazione previsti dal Piano delle azioni e degli interventi di mitigazione del rischio idraulico e geologico*[60]*."* Infatti, tra i compiti affidati al Commissario Delegato per il Superamento dell'Emergenza così come stabilito dall'l'OPCM 3906/2010, viene prevista anche l'adozione entro 45 giorni dalla pubblicazione dell'Ordinanza e anche per stralci funzionali, di un "*Piano delle azioni e interventi di mitigazione del rischio idraulico e geologico*", con il fine di ridurre gli effetti dei fenomeni alluvionali e comunque in coerenza con gli altri progetti di regimazione delle acque, già predisposti per la tutela e la salvaguardia del territorio. A questo fine il Commissario si è avvalso di un soggetto attuatore per la pianificazione degli interventi[61] e di un Comitato tecnico scientifico sul rischio idraulico e geologico[62], cosiddetta "Commissione Grandi Rischi", incaricato di garantire il necessario supporto tecnico alle attività commissariali, relativamente agli aspetti che riguardano tanto la programmazione degli interventi quanto la definizione delle priorità di realizzazione. Il Piano è stato redatto in data 30 marzo 2011,sottoscritto in data 12 aprile 2011 dal Commissario Delegato e dal Comitato Tecnico Scientifico e recepito dalla Giunta Regionale con Delibera n. 1643 del 11/10/11.Esso analizza i bacini idrografici dell'Adige e del Brenta - Bacchiglione, considera le principali criticità presenti nei bacini del Piave, del Livenza e del bacino scolante in laguna di Venezia e riporta, infine, alcuni interventi nei bacini del Tagliamento, Lemene, Sile e Fissero Tartaro, Canal - Bianco e Po.

---

60 comma 3, art.1, OPCM n.3906/2010

61 Nominato con Ordinanza Ministeriale n. 2 del 23 novembre 2010 nella persona dell'Ing. Roberto Casarin, Segretario Generale dell'Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione e dell'Adige

62 Comitato nominato con Ordinanza commissariale n. 11, in data 30 dicembre 2010 e composto da prof. ing. Luigi D'Alpaos, dal prof. ing. Marco Marani e dal prof. ing. Alberto Mazzucato

Prima di addentrarci in considerazioni specificatamente legate a quanto previsto dal Piano per il territorio di nostro interesse, risulta importante soffermarci sull'atteggiamento assunto in generale da esso nei confronti del suo obiettivo, ossia la mitigazione del rischio. A questo proposito si è già detto infatti, fra le altre cose, che un approccio resiliente al rischio è basato anche e soprattutto sulla consapevolezza del fatto che nessuna misura, ne strutturale ne non strutturale, possa eliminare definitivamente e completamente il rischio per un territorio e per le popolazione che lo abitano. Oltre infatti al rischio residuale intrinseco di cui è portatrice ciascuna opera ed azione, sussiste un altro elemento importante, ossia la consapevolezza che esisterà sempre, nel tempo, un evento di un intesità tale capace di mettere in crisi quanto previsto a sua difesa e questo proprio per l'imprevedibilità degli eventi naturali, o meglio per la loro indifferenza alle logiche di vita e pensiero umani. Questo per dire dunque che, quando il Commissario Delegato per il Superamento dell'Emergenza, all'art.1 dell'OPCM 3906/2010, afferma di provvedere *"alla predisposizione di un piano degli interventi per il superamento dell'emergenza…"* che dovrà contenere, così come indicato alla lettera g), la *"pianificazione di azioni e interventi di mitigazione del rischio idraulico e geologico, al fine della riduzione* ***definitiva*** *degli effetti dei fenomeni alluvionali….predisposti per la tutela e la salvaguardia del territorio"* di fatto pone in essere una strategia risolutiva intrinsecamente già fallace per i motivi sopra esposti.

Di fatto però questa è l'attuale strategia in vigore. E di seguito riportiamo gli importi complessivi, distinti per provincia, degli interventi ritenuti necessari dal Piano di Azioni per la messa in sicurezza idraulica del Veneto, nonché le relative somme da sottoporre a finanziamento.

	Provincia	*importo complessivo*	*importo da finanziare*
1	Provincia di Verona	148.854.000	130.578.000
2	Provincia di Vicenza	807.184.000	718.802.000
3	Provincia di Padova	859.358.000	814.480.000
4	Provincia di Venezia	587.356.000	582.719.000
5	Provincia di Treviso	151.254.000	121.104.000
6	Provincia di Belluno	166.466.000	153.166.000
7	Provincia di Rovigo	11.500.000	11.500.000
Totale per tutte le Province		**2.731.972.000**	**2.532.349.000**

Tab.4.7 - Prospetto riassuntivo degli interventi di mitigazione del rischio idraulico e geologico, individuati e suddivisi per Provincia. Gli importi sono aggiornati a tutto il 30 marzo 2011, data di redazione del piano. [106]

Il costo presunto degli interventi strutturali di mitigazione del rischio idraulico, geologico e forestale, previsti complessivamente dal piano, ammonta a euro 2.731.972.000, dei quali il 95,4% (2.607.434.000 di Euro) destinati al dissesto idraulico, il 4,1 % (112.075.000 di Euro) al dissesto geologico e lo 0.5% (12.463.000 di Euro) al dissesto idraulico - forestale.

Gli interventi sono stati classificati assegnando a ciascuno una priorità sulla base dei seguenti criteri:

1. interventi di *somma urgenza* e *indifferibili*, finalizzati ad eliminare le situazioni più critiche per la salvaguardia della pubblica incolumità e alla sicurezza dei territori; in particolare si fa riferimento a condizioni di rischio per le abitazioni e gli edifici, condizioni di rischio per le infrastrutture di viabilità statale e provinciale e condizioni di rischio per la viabilità comunale priva di alternative di percorso, nonché condizioni di rischio per i sottoservizi essenziali (116.297.000 euro);
2. interventi *molto urgenti*, ossia interventi selezionati nella prima fase di breve periodo per i quali vada prontamente organizzata la progettazione, l'appalto e la cantierizzazione; in particolare si fa riferimento a condizioni di rischio per gli edifici e strutture ad uso produttivo, commerciale e sportivo-ricreativo, nonché a condizioni di rischio per la viabilità comunale con alternative di percorso (1.259.068.000 euro);
3. interventi *urgenti* e *necessari*, ossia interventi a cui dare attuazione solo a conclusione delle verifiche previste nella seconda fase di medio e lungo periodo o ai quali dare attuazione solo reperendo le necessarie risorse economiche; in questo caso si fa riferimento a condizioni di rischio per gli ambiti agricoli e forestali, per la viabilità interpoderale e silvo-forestale (1.356.607.000 di euro)

Tra gli interventi di somma urgenza e indifferibili relativi alla Provincia di Vicenza troviamo:

- Cantieri per il rifacimento degli argini del torrente Timonchio dove si sono verificate due rotte arginali.Comuni di Caldogno e Dueville;
- Ripresa di franamenti di sponda e dissesti alle opere di difesa del torrente Liveron-Giara - Orolo nei Comuni di Malo e Costabissara.

Gli interventi strutturali individuati per mitigare la condizione di rischio idraulico rientrano tra le seguenti tipologie:

1. interventi di manutenzione straordinaria sui corpi arginali quali rinforzi, risagomature, rialzi, ecc.;
2. interventi di adeguamento degli alvei alle portate massime da definire in funzione dell'evento di progetto assegnato a ciascuna classe di opere;
3. interventi di moderazione dei colmi di piena fino a ridurli a valori compatibili con lo stato attuale degli alvei dei fiumi;
4. una combinazione delle due azioni precedenti.

Nella fattispecie, per quanto riguarda il bacino del Bacchiglione sono stati individuati come prioritari interventi miranti a [114]:

- laminazione dei colmi di piena a monte del centro di Vicenza, con la realizzazione di opere di invaso sul torrente Timonchio a Caldogno (3,3 milioni m^3) e a Malo (2 mioni di m^3)
- interventi sull'asta principale e sugli affluenti per ridurre gli stati di criticità locale nel capoluogo;
- invasi sul torrente Orolo (1 milione di m^3) nei Comuni di Costabissara e Isola Vicentina;
- modifica morfologica delle aree di espansione del Bacchiglione nei Comuni di Vicenza, Longare, Montegalda, Montegaldella (circa 14 milioni di m^3);
- opera d'invaso sulla roggia Dioma (0,5 milioni di m 3) in Comune di Monteviale e Vicenza;
- invaso sul torrente Onte (0,5 milioni di m^3) in Comune di Sovizzo;
- aree di espansione naturale del Retrone in località Sant'Agostino in Comune di Vicenza e in Comune di Arcugnano (75 ha e volume di circa 1,5-2 milioni m^3);
- by-pass diversore del Bacchiglione in Retrone a Vicenza città;
- opera d'invaso sultorrente Astico (10 milioni di m^3) nei Comuni di Sandrigo e Breganze;
- opera d'invaso sul torrente Tesina (2 milioni di m^3) in località Marola in Comune di Torri di Quartesolo;
- opera di invaso in località Meda (7milioni di m^3).

Inoltre il Piano sottolinea la necessità di intervenire in modo esteso e radicale per la messa in sicurezza della vasta e imponente rete di corpi arginali che caratterizza tutto il territorio della pianura veneta.

Benchè particolarmente importante risulti la consapevolezza che "gli interventi previsti rispondono alle esigenze evidenziate dagli eventi alluvionali del 2010, ma non esauriscono gli interventi necessari per porre in condizioni di sufficiente sicurezza il territorio"[106], di fatto ciò che nel dettaglio viene previsto non risponde alle aspettative della nuova politica di resilienza.

Il Piano infatti fa propria la consavolezza del rischio residuale derivante dall'azione medianti interventi strutturali facendo ricorso anche ad azioni non strutturali, considerate necessarie per completare l'azione di presidio del territorio. Tali azioni non strutturali riguardano però esclusivamente i seguenti ambiti:

1. aggiornamento dei rilievi topografici degli alvei;
2. predisposizione di un sistema per la previsione delle piene;
3. adeguamento della rete di monitoraggio idrometrico e pluviometrico;
4. indagini geotecniche sui corpi arginali e nei terreni di fondazione;
5. adozione di norme transitorie per evitare interventi territoriali nelle aree interessate dall'evento;
6. difesa dall'antropizzazione dei territori dove sono state individuate le future opere di mitigazione.

Il costo di tali azioni non strutturali, contenute nella "Relazione di Sintesi" del Piano, è previsto ammontare a complessivi 5.422.600 euro.

Come si potrà notare però, nonostante si registri un certo passo avanti rispetto a quanto previsto dal Progetto di Piano stralcio per l'assetto idrogeologico, le possibili misure non strutturali di mitigazione del rischio idraulico risultano comunque limitate ed ancora lontane da una *forma mentis* che miri alla resilienza al rischio. Anche in questo caso infatti si nota una propensione abbastanza netta verso il principio passivo di "protezione dalla piena". Nessun riferimento viene infatti posto relativamente alla necessità di avvalersi di tecniche di *flood-proofing*, ne tantomeno di forme assicurative obbligatorie o semi-obbligatorie. Seppur nella Relazione di sintesi del Piano venga fatto un certo riferimento a queste ultime secondo, la loro necessità non viene formalizzata all'interno delle misure non strutturali ritenute

espressamente necessarie dal Piano. Ciò che emerge è semplicemente una riflessione sulla loro necessità in via teorica, ma siamo ancora lontani però dall'assumere un atteggiamento che ufficializzi la cogenza dello strumento. A questo proposito, l'unico provvedimento di qualche rilievo risulta essere contenuta all'interno dell'Ordinanza n.6 del 22/02/2011 "Redazione di uno Studio di fattibilità per la copertura assicurativa dei rischi da catastrofi naturali per gli edifici privati ubicati nella Regione Veneto.", studio di cui risulta incaricato un soggetto attuatore[63] definito dallo stesso Commissario al fine di porre in essere tutte le iniziative necessarie al superamento dell'emergenza del Novembre 2010. Le riflessioni indotte dai recenti eventi spingono quindi la struttura Commissariale a interrogarsi sulla necessità di una forma assicurativa mediante la realizzazione dello studio di fattibilità sopra citato mirante a:

1. predisposizione del piano di progetto (obiettivi di dettaglio, attività, tempi, competenze richieste);
2. recupero e analisi dei principali studi già eseguiti sull'argomento da Enti, Istituti, Compagnie,Broker;
3. illustrazione dell'attuale scenario in merito all'assicurazione CAT NAT [64]e dei principali punti d'attenzione;
4. contatto con enti interni ed esterni (quali ANIA, brokers di assicurazione, riassicuratori, etc), per i necessari approfondimenti, recupero di informazioni o dati necessari per lo sviluppo dello Studio;
5. elaborazione di un data base a supporto dello Studio;
6. formalizzazione dei risultati dello Studio;
7. allineamento periodico, almeno mensile, dell'avanzamento dello studio.

Nonostante lo sforzo venga apprezzato, ricordiamo però, come già detto in precedenza, che la necessità di una copertura assicurativa obbligatoria o semi-obbligatoria è già stata avanzata più volte avanzata con apposite proposte di Legge statale, che non si sono concretizzate proprio a causa del conflitto tra gli interessi dei diversi operatori in gioco. Tale riflessione porta a concludere che, eventuali studi di fattibilità in questo settore, oltre ad interrogarsi su forme e contenuti dei possibili approcci assicurativi, dovrebbero prendere in seria considerazione

[63] Attività svolta a titolo gratuito dal soggetto attuatore identificato nella persona dell'Ing. Mario Martinuzzi – Consulente nel settore delle perizie assicurative.

[64] Catastrofi Naturali

l'aspetto strettamente legato alla risoluzione dei conflitti prima citati, nell'ottica di porre in essere un atteggiamento efficace e concreto, in modo che una necessità di fatto non rimanga lettera morta.

Inoltre, anche nel ricorso a norme d'uso del territorio più lungimiranti e attente, si fa riferimento sistematico ed esclusivo ai termini "evitare" e "difesa", mancando quindi un atteggiamento pro-attivo che capace di sfruttare la consapevolezza degli eventi a sostegno di una pianificazione di tipo *water sensitive*. Allo stesso modo viene ignorata la necessità di ricorrere e tecnologie avanzate quali SAR e LiDAR.

E' possibile notare inoltre come gli interventi di mitigazione del rischio previsti dal Piano di azione ricalchino in parte le necessità già emerse a seguito dell'adozione del PAI al 2007. Uno fra i tanti, la cassa di espansione prevista nel Comune di Caldogno, attualmente prossima alla realizzazione. Le risorse finanziare utili alla sua concretizzazione, evidentemente prima non disponibili, si sono però realizzate in seguito alle necessità di ripristino della sicurezza del territorio dopo gli eventi del Novembre 2010. Di fatto però tale necessità erano già state ampiamente palesate e ciò che emerge di nuovo è quindi un atteggiamento, tipico della politica di approccio al rischio a posteriori, di intervento a recupero di situazioni già di fatto compromesse. Tale approccio viene in parte giustificato dal meccanismo decisionale sulla base del fatto che "grandi interventi, necessitano di grandi risorse", ma se nella realtà di fatto questi interventi non sono realizzati, la loro stessa programmazione risulta priva di un riscontro oggettivo con la realtà già nel momento stesso in cui sono posti come chiave risolutiva dagli stessi strumenti di pianificazione. L'importanza di un uso combinato di interventi strutturali ed anche non strutturali, scelti sulla base delle nuova politica orientata alla resilienza, conferirebbe la possibilità di rendere gli strumenti per la mitigazione del rischio pèiù flessibili ed in linea con il reale "stato delle cose", senza nascondersi dietro falsi miti.

6. IL PROTOTIPO

6.1 Estrazione allagamenti da immagini SAR

6.1.1 Reperimento delle immagini SAR

Sulla base degli ingenti danni provocati dall'evento emergenziale che ha colpito la Regione Veneto nel 2010 ed in particolar modo la città di Vicenza, si è proceduto per prima cosa ad effettuare una ricerca sui vari portali di diffusione di dati SAR che avessero potuto riprendere il territorio in fase di evento così da avere a disposizione un set di dati utile a verificare le capacità del sensore in rapporto alla stima di allagamenti superficiali in ambito urbano. Il buon esito della ricerca era vincolato non solo al criterio temporale ma anche a quello di risoluzione spaziale: trattandosi di un'analisi in ambito urbano la necessità era quella di avere immagini esclusivamente ad alta o media risoluzione.

Tra i possibili fornitori di dati SAR, sia per fini di ricerca istituzionale che commerciale, la missione COSMO-SkyMed (*COstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation*) è quella che si è dimostrata più efficace ed efficiente.

La prima verifica è stata effettuata tra i satelliti delle missioni SAR dell'ESA (*European Space Agency*) mediante l'accesso al portale EOLI-SA (*Earth Observation Link*): la ricerca non ha portato a risultati di rilievo in quanto le uniche immagini di nostro potenziale interesse in termini temporali erano quelle relative al 1/11/2010 e 4/11/2010, entrambe prodotte all'interno della missione ENVISAT-1 dal sensore ASAR (*Advanced Sinthetic Aperture Radar*) in modalità di acquisizione *WIDE SWATH o ScanSAR* con una risoluzione spaziale in range di 150m x 150m. Una risoluzione spaziale del tutto indaguata per le nostre finalità di analisi.

Concentrandoci esclusivamente su satelliti capaci di alte risoluzioni si è passato a verificare la disponibilità di immagini da parte della missione Terra-SAR X della società ASTRIUM: anche in questo caso la ricerca non condotto a risultati soddisfacenti in quanto l'unica immagine SAR relativa alla città di Vicenza era una immagine in modali StripMap con risoluzione spaziale di 3m x 3m del giorno 06/11/2010, quindi troppo lontana dall'evento.

L'obiettivo è stato raggiunto grazie alla consultazione del portale CUGS (*COSMO-SkyMed User Ground Segment*) dell'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) che si occupa di effettuare tutte le attività relative alla fornitura dei servizi COSMO sia per gli scenari off-line che per quelli vicini al real-time per utenti Scientifici ed Istituzionali, mentre per finalità commerciali la competenza del

servizio è in capo alla società e-GEOS SpA, società a capitale misto 20% ASI e 80% Telespazio SpA. Che la disponibilità delle immagini di nostro interesse, sia in termini temporali che di risoluzione spaziale, fosse frutto dell'attività dei satelliti della missione Cosmo-SkyMed non è fatto casuale. COSMO- SkyMed costituisce infatti la costellazione satellitare nata di fatto per scopi strettamente finalizzati alla protezione dell'ambiente, la gestione delle emergenze, la sorveglianza del territorio e la sicurezza, all'interno di un orizzonte applicativo di natura duale civile e militare[115].

6.1.1.1 La missione COSMO-SkyMed

La missione COSMO-SkyMed *COstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation*) rappresenta attualmente il sistema di satellite SAR a più alta risoluzione operanti per finalità di monitoraggio e protezione territorio-ambiente e sicurezza. Ad esso ricorrono i servizi già descritti SAFER di GMES e del progetto OPERA rispettivamente in termini di necessità *flood mapping* di emergenza e di Protezione Civile dalle alluvioni, nel più ampio contesto del programma GMES.

Le origini del programma COSMO-SkyMed risalgono agli inizi degli anni '90 con la manifestazione di esigenze da parte dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), di un nuovo sistema di monitoraggio e protezione dell'ambiente e del territorio, nonchè del Ministero della Difesa in merito alla necessità di affiancare e poi progressivamente sostituire il sistema militare di ricognizione Helios I, sviluppato in cooperazione con Francia e Spagna.

L'acronimo con cui fu designata la costellazione, "Costellazione di piccoli satelliti per l'osservazione del bacino del Mediterraneo", fa riferimento al fatto che alle origini la costellazione era stata concepita, in termini di tempi di rivisitazione e di banda radar, per l'osservazione preferenziale del bacino del Mediterrano. Solo a valle delle successive verifiche tra ASI e CNES e tra Difesa Italiana e Francese si arrivò, mediante accordo siglato a Torino nel gennaio del 2001, a requisiti comuni e condivisi ed alla idea di una più vasta dimensione internazionale connessa ad un sistema complessivo basato sulla combinazione di quattro satelliti radar e due ottici (Pleiades), sviluppati sotto completa responsabilità italiana in un sistema unico meglio conosciuto come Orfeo (*Optical and Radar Federated Earth Observation*). L'elemento decisivo che ha reso possibile questo "incontro" tra diversi interlocutori (dapprima ASI e Difesa in ambito italiano, e quindi ASI e CNES sul fronte civile, Segretariato Generale della Difesa/DNA e DGA su quello militare) è stata la scelta della tecnologia radar SAR in banda X per tutti i satelliti della costellazione, che ha messo a disposizione di tutte le parti interessate

uno strumento ugualmente idoneo in termini di capacita di osservazione, risoluzione, flessibilità di impiego e complementarietà[115].

Nel marzo 2003 è stato siglato il contratto per la definizione di COSMO-SkyMed sulla base di requisiti di sicurezza espressi dalle componenti militari italiana e francese, mentre nel dicembre 2004 è stato firmato con l'industria il contratto definitivo di realizzazione, pari ad un investimento complessivo per l'intero sistema di circa mille milioni di Euro. In soli due anni e mezzo si è giunti al completamento ed al lancio del primo satellite (SAR1), avvenuto il 7 Giugno 2007 dalla base di Vandenberg in California. Il lavoro è proseguito in modo graduale mediante il lancio del secondo e terzo satellite rispettivamente nel dicembre 2007 e nell'ottobre 2008, per giungere poi a completamento con la messa in orbita del quarto ed ultimo satellite nello scorso Novembre 2010. La vita operativa di ciascun satellite è di almeno 5 anni, mentre quello dell'intero sistema è prevista di quindici anni mediante una ulteriore costellazione di seconda generazione attulmente in via di definizione.

La costellazione di quattro satelliti equipaggiati da sensore a microonde di alta risoluzione SAR utilizza una orbita di tipo polare eliosincrona[117], con altezza nominale di 619 km, inclinazione di 97.8°, periodo orbitale di circa 97 minuti e tempo di rivisitazione massimo di 12 ore [11].

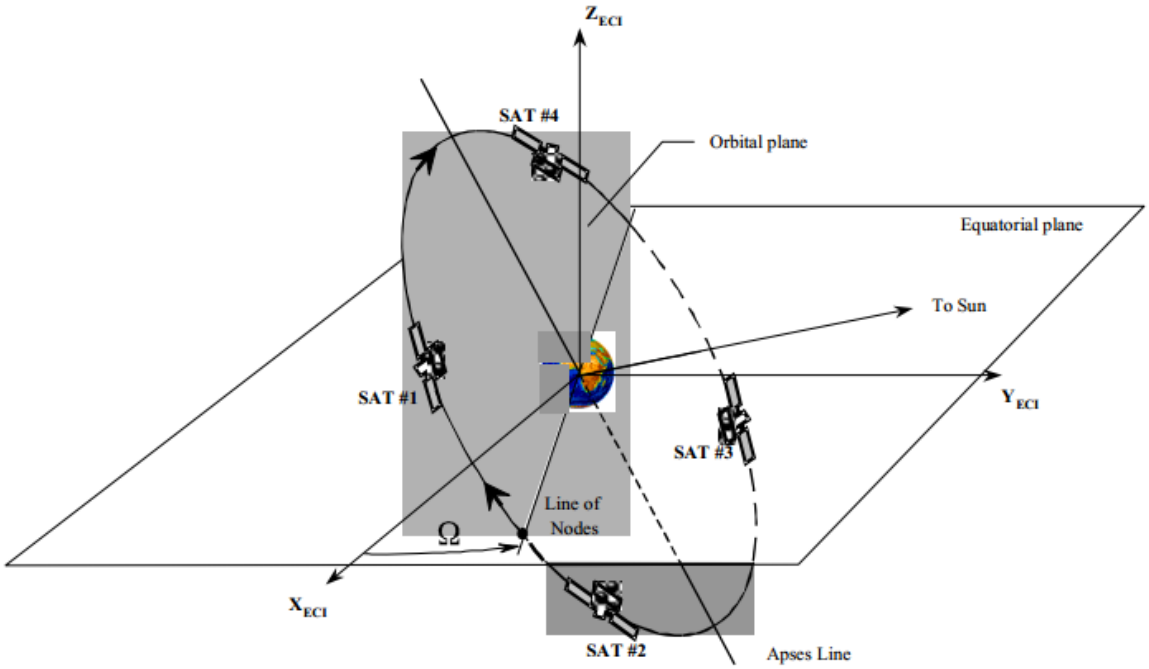


Fig. 6.1 - Assetto della costellazione COSMO-SkyMed in condizioni nominali [65] [118]

[65] l'alternativa è la costellazione in assetto interferometrico di tipo tandem, in cui due satelliti lavorano in modo combinato su due piani orbitali differenti posti a distanza di di 0.08° sul piano e di 151 km in direzione along-track.

Oltre al Segmento Spaziale costituito dai 4 satelliti, il Sistema COSMO-SkyMed include un Segmento di Terra che comprende:

- infrastrutture dedicate alla gestione della costellazione attraverso il Centro di Controllo Satelliti e Centro di Controllo e Pianificazione della Missione situati presso il Centro Spaziale del Fucino, antenne di Kiruna-Svezia e Cordoba-Argentina;
- infrastrutture finalizzate alla pianificazione delle richieste degli utenti ed alla raccolta, archiviazione, processamento e distribuzione dei dati acquisiti attraverso il Centro di Geodesia Spaziale ASI di Matera per la Componente Civile ed il Centro Telerilevamento Satellitare presso Pratica di Mare per la Componente Difesa.

Capo Commessa del Programma è la società Thales Alenia Spazio –Italia, responsabile della fornitura "chiavi in mano" dell'intero Sistema, mentre Telespazio S.p.A. è responsabile della realizzazione e fornitura del Segmento di Terra civile e militare, oltre che della infrastruttura di controllo della costellazione.
Dal punto di vista delle risorse utili alla sua realizzazione va detto che COSMO-SkyMed è quindi parte del Piano AeroSpaziale Nazionale dell'ASI ed è finanziato dal Ministero dell'Università e Ricerca (MiUR), dal Ministero della Difesa e dal Ministero per lo Sviluppo Economico. E' gestito dall'Agenzia Spaziale Italiana nell'ambito di un Ufficio di Programma congiunto ASI/Difesa ed è il primo progetto realizzato al mondo per finalità completamente duale civile-militare.

Nel dettaglio i principali obiettivi del Sistema sono la fornitura di dati, prodotti e servizi secondo standard internazionali per applicazioni relative a [119]:

1. Monitoraggio, Sorveglianza e Gestione dei Rischi ambientali e derivanti dalle attività dell'uomo per conto di Enti Istituzionali;
2. Monitoraggio, Sorveglianza ed "Intelligence" a fini strategici per conto di Enti Militari;
3. Gestione delle Risorse Ambientali, Gestione e Controllo delle Aree Territoriali, Costiere e Marine, Topografia del Territorio, Applicazioni Scientifico-Divulgative e/o commerciali per conto di ulteriori Enti Istituzionali, Comunità Scientifica ed Enti Privati.

Il programma GMES (*Global Monitoring for Environmental and Security*), già trattato al capitolo 3.2.1.1.1., è la forma principale di sfruttamento della missione COSMO-SkyMed.

Attualmente gli utenti Istituzionali risultano essere: primo fra tutti il Dipartimento di Protezione Civile, dopodichè per esigenze specifiche il Ministero dell'Ambiente ed alcune Agenzie ARPA.

In tema di rischio idrologico-idraulico le potenzialità derivanti dall'analisi e trattamento di immagini SAR COSMO avviene soltanto all'interno del progetto OPERA in tema di Protezione Civile dalle Alluvioni e attraverso il servizio SAFER di GMES per il *flood-mapping* in condizioni emergenziali: di fatto quindi le potenzialità della tecnologia iniziano e terminano ufficialmente all'interno del Dipartimento di Protezione Civile senza nessuna invece considerazione di tutti gli Enti, di settore e locali, che sono preposti alla preliminare valutazione del rischio e alla pianificazione delle misure di mitigazione associate, nonché al più generale governo del territorio alle varie scale. Il che implica una certa sottofruttamento delle potenzialità della tecnologia limitatamente ad azioni emergenziali, coerentemente con una politca tradizionale di mitigazione orientata alla protezione dal rischio e non invece di resilienza. Il recepimento di tale tecnologia all'interno anche della macchina tecnica e decisionale e la relativa condivisione con le popolazioni, è di fatto potenzialmente prevista dal sistema qualora se ne faccia richiesta. I possibili utenti previsti dal sistema COSMO-SkyMed sono infatti sia Itituzionali/Scientifici che commericiali e in entrambi i casi, secondo specifici accordi previsti in termini di politica di distribuzione dei dati, è possibile richiedere immagini in archivio, prodotti e la programmazione di nuove acquisizioni. Di fatto ciò non avviene, se non limitatamente alle attività di Protezione Civile sopra descritte, in quanto non è ancora presente una consapevolezza radicata e condivisa delle potenzialità della tecnologia e, come già detto, perché la politica di mitigazione del rischio è ancora legata a concetti conservatori di protezione e di recupero a posteriori e ripristino delle condizioni antecedenti all'evento destabilizzante.

Dal punto di vista strettamente operativo, il Sistema offre tempi di rivisitazione esigui e risoluzioni spaziali molto elevate e comunque flessibili alle esigenze degli utenti, sia civili che militari. Nel dettaglio va detto che , ogni satellite è in grado di acquisire circa 450 immagini al giorno per un totale di costellazione pari a 1800 immagini[66] acquisite secondo un angolo di incidenza nominale variabile tra i 25° ed i 50° in condizioni nominali, ma variabile tra i 20° ed i

[66] di cui 75 immagini Spotlight e 375 immagini Stripmap o ScanSAR per ogni satellite [118]

59,5° sulla base di apposita richiesta[120]. La costellazione prevede infatti tre modalità operative diverse (*System Modes*) [67]:

- *Routine*: le richieste di nuove acquisizioni da parte degli utenti sono pianificate e inviate alla costellazione una sola volta al giorno e la consegna dei relativi prodotti al richiedente avviene in 72 ore;
- *Crisi*: la richiesta di nuove acquisizioni viene effettuata due volte al giorno e la consegna dei relativi prodotti all'utente avviene nel giro di 36 ore;
- *Very Urgent*: la necessità di nuovi acquisizioni è di tipo asincrono e quindi la programmazione ed invio della richiesta alla costellazione viene effettuata nel minor tempo possibile; la consegna del prodotto all'utente avviene entro 18 ore.

Le autorità di governo posseggono la capacità di poter richiedere una modificazione del tipo di *System Mode* adottata dalla costellazione o di richiedere un servizio specifico relativamente all'acquisizione di una relativa parte della superficie terrestre.
Per riassumere l'evoluzione delle performances temporali della costellazione Cosmo-SkyMed può essere riassunta come di seguito:

	1 satellite	2 satellites	3 satellites	Full constellation
Information age	12 h	12 h	12 h	12 h
Response Time	110 h	90 h	85 h	72 h
Revisit time	65 h	40 h	40 h	12 h

Tab. 6.1 - Evoluzione delle performances temporali della costellazione COSMO-SkyMed relativo ad acqusizioni in State Mode nominale di tipo Routine [118]

All'interno della tabella sopra riportata, si intende per:

- *Information Age*: fa riferimento alla latenza del dato, ossia al tempo che intercorre tra l'acquisizione dell'immagine SAR e la disponibilità del prodotto presso USG (*User Ground Segment*)
- *Response time*:è la somma del *Reaction Time*, ossia l'arco di tempo complessivo che intercorre tra l'accettazione della richiesta, il deposito della stessa presso l'UGS fino all'acquisizione dell'immagine SAR, più il tempo di *Information Age*;
- *Revisit Time*: l'arco temporale che intercorre tra due acquisizioni consecutive della stessa area

[67] per i tempi di consegna all'utente si fa esclusivo riferimento ai prodotti appartenenti alla categoria degli Standard Product [118]

Tali performances temporali fanno riferimento esclusivamente a modalità di acquisizione della costellazione di tipo *Routine* nominale; per modalità di tipo *Very Urgent* il *Response Time* arriva fino alle 12 ore ed il *Revist Time* per aree localizzate a latitudini europee varia tra le 3,5 e le 4,5 ore[68].

Ciascun satellite ha inoltre la possibilità di acquisire sia in modalità *right-looking* che *left-looking* in modo da consentire un incremento dell'area di ripresa, di ridurre i tempi di rivisitazione e di rendere più flessibile la propria capacità operativa[119].
Nel dettaglio la costellazione ha la capacità di acquisire immagini in diverse modalità, offrendo così dimensioni di strisciata e risoluzione spaziale variabile secondo le esigenze dell'utenza[121]:

- Immagine SPOTLIGHT: massima risoluzione spaziale; dimensioni di strisciata pari a 10 x 10 km con risoluzione spaziale di 1x1 m per la componente civile (Spotlight 2) mentre la componente militare dispone di immagini Spotlight a risoluzione sub-metrica (Spotlight 1); è l'unico formato di immagine offerto in *Single-look*, a differenza degli altri che sono tutti *Multi-look*;

- Immagine Stripmap HIMAGE: risoluzione media; caratterizzata da risoluzione spaziale pari a 3x3 m o 5x5 m per dimensioni strisciata rispettivamente corrispondenti a 30x30 Km e 40x40 Km;

- Immagine Stripmap PINGPONG: risoluzione media; caratterizzata da risoluzione spaziale pari a 15x15 m, dimensioni strisciata media pari a 30x30 Km;

- Immagine ScanSAR, modalità di ripresa WIDE e HUGE REGION: risoluzione bassa; forniscono strisciate di dimensioni selezionali rispettivamente tra 100 x 100 km per la WIDE REGION fino a 200x200 km per la HUGE REGION con risoluzioni spaziali rispettivamente di 30x30 m fino a 100x100 m.

[68] la variabilità dipende dalla localizzazione dell'area da acquisire e di quella della stazione di terra

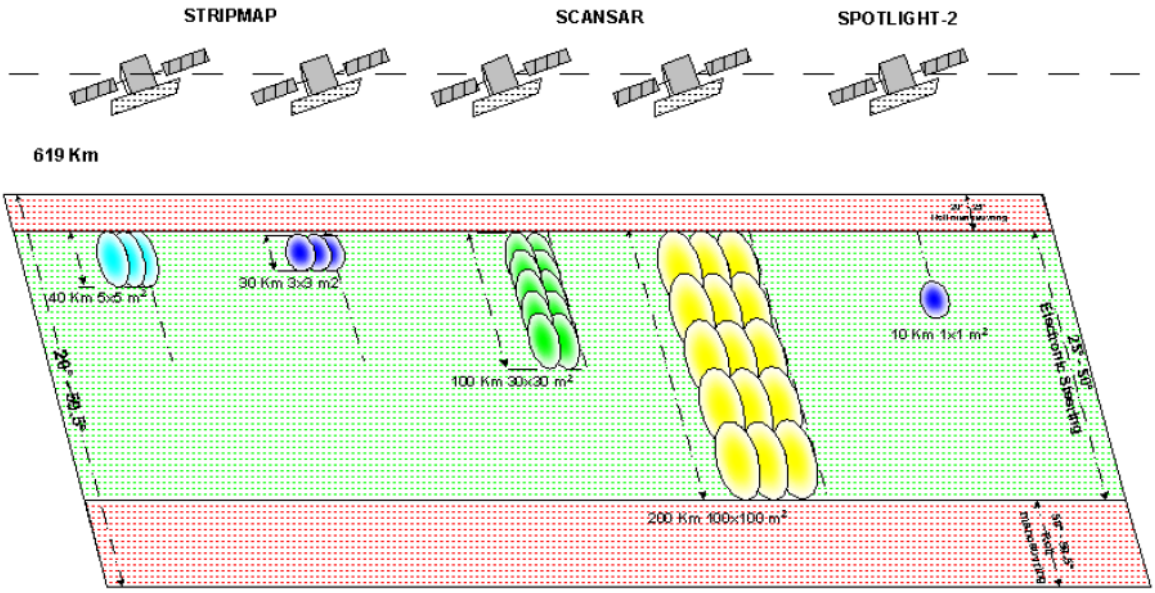


Fig.6.2 - Modalità di misurazione COSMO SAR e relative caratteristiche [121]

Inoltre, le categorie di prodotto a disposizione per gli scopi previsti dal sistema sono i seguenti:

- *Standard Products*: immagini SAR in modalità Spotlight, Stripmap o ScanSAR acquisite e offerte secondo diversi livelli di processamento progressivi richiesti dall'utente;
- *Higher Level Products*: essenzialmente coppie di immagini già co-registrate insieme per fini interferometrici o di change detection, mosaicature di immagini in modo da offrire una maggiore copertura spaziale; immagine de-spekled, immagini di coerenza ed interferogrammi ed infine DEM (Digital Elevation Model) ottenibili mediante interferometria;
- *Service products*: prodotti orbitali e controlli di qualità, disponibili solo per usi interni.

Per comprendere meglio quanto fornito per le nostre analisi, risulta importante soffermarci esclusivamente sulla categoria degli *Standard Products*, caratterizzabile secondo lo schema a blocchi a seguire.

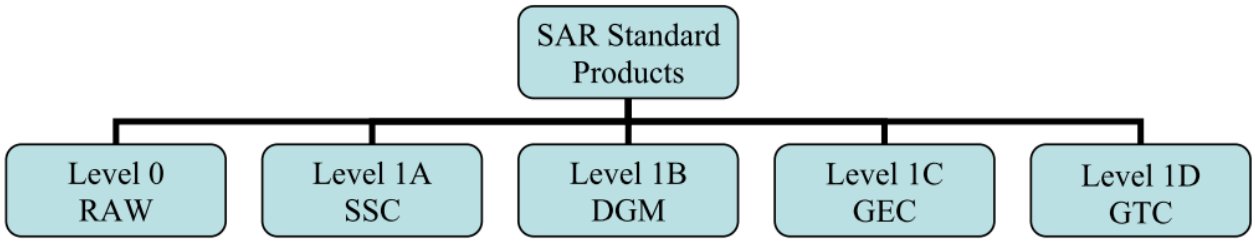


Fig.6.3 - Le cinque tipologie di Standard Products di COSMO-SkyMed SAR [121]

L'organizzazione secondo cinque tipologie di prodotti non è casuale ma risponde alle definizioni fornite in tema di Standard Internazionali per l'Osservazione della Terra all'interno delle Linee Guida EEOS *(European Earth Observation System)*. Nel dettaglio:

- *Level 0 (RAW)*: definiti anche come "on board raw data" ossia "dati grezzi a bordo" intendoli come quelli tipici della fase post decriptazione e pre spacchettamento. I dati nello specifico consistono dati di eco temporalmente ordinati, ottenuto dopo la decriptazione e decompressione e dopo aver applicato una calibrazione interna e una compensazione degli errori. contiene per ciascuna modalità di acquisizione del sensore i dati complessi. Il prodotto RAW DATA include anche tutti i dati ausiliari, quali traiettorie, coordiante e velocità del satellite, modello geometrico del sensore, dati di calibrazione, ecc…, necessari necessari per la produzione degli "Higher Level Products";

- *Level 1A (SCS - SINGLE-LOOK COMPLEX SLANT)*: ossia, a partire dal Lev.0, i dati grezzi sono focalizzati in formato complesso e proiettati in slant-range zero Doppler, che rappresenta la proiezione naturale di acquisizione del sensore. Il prodotto contiene il dato di fase e la quadratura dei dati focalizzati, pesati e radiometricamente equalizzati;

- *Level 1B (DGM – DETECTED GROUNG MULTI-LOOK)*: contiene dati focalizzati di ampiezza radiometricamente normalizzati in cui ciascuna Single-look Complex Slant viene proiettata su griglia regolare al suolo ossia in ground range/azimuth;

- *Level 1C (GEC – GEOCODED ELLIPSOID CORRECTED)*: prodotto ottenuto proiettando il Lev 1° su una griglia regolare dell'ellissoide di riferimento e secondo in un prescelto sistema di riferimento geografico;

- *Level 1D (GTC – GEOCODED TERRAIN CORRECTED)*: prodotto che contiene dati focalizzati proiettati su una superficie di elevazione di riferimento in una griglia regolare ottenuta da un sistema di riferimento cartografico. L'immagine è in tal modo localizzata e ortorettificata all'interno di una determinata proiezione mediante l'uso di Ground Control Points (GCPs) e Digital Elevation Model (DEM).

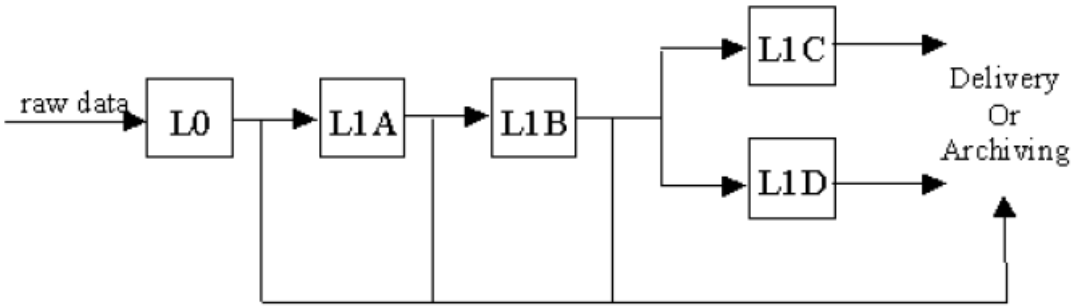


Fig.6.4 - Modello di processamento Standard [121]

Come mostrato dallo schema di processamento sopra riportato, ciascun prodotto può essere poi consegnato all'utente oppure archiviato nella banca dati COSMO.

Di seguito viene riportato a titolo esemplificativo una valutazione delle principali caratteristiche del prodotto StripMap HIMAGE e di come esse subiscano di fatto variazioni all'interno della catena di processamento:

	LEV 0	LEV 1A	LEV 1B	LEV 1C LEV 1D
Swath [km^2]	~40 km x ~40 km			
Incidence angle [deg]	~20° ÷ ~60°			
Polarization	selectable among HH or HV or VH or VV			
Product Size [MB]	800÷1250	1150÷1800	390÷590	≤1118
Equivalent Number of looks	NA	1	~ 3	~ 3
Ground Range resolution [m]	NA	≤3.0	≤5.0	≤5.0
Azimuth resolution [m]	NA	≤3.0	≤5.0	≤5.0
Geolocation Acccuracy	NA		≤25	≤25 ≤15

Tab.4.2 - Caratteristiche di un immagine StripMap HIMAGE per livello di processamento [121]

Il formato caratteristo delle immagini COSMO-SkyMed per uso civile è il HDF5 (*Hierarchical Data Format 5*).

6.1.1.2 Il set di immagini a disposizione

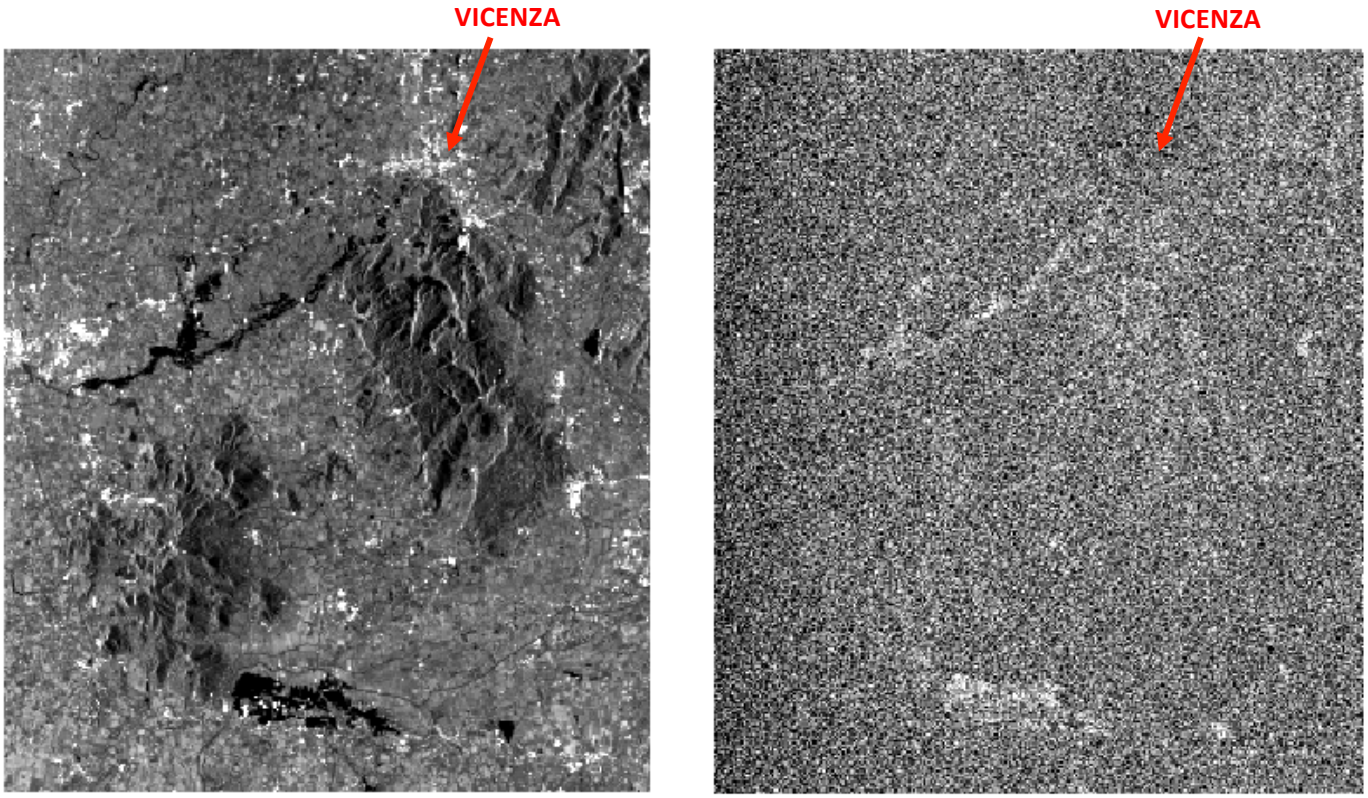
La ricerca di immagini COSMO per l'arco temporale relativo all'emergenza nella città di Vicenza è compreso tra il 30/10/2010 ed il 3/11/2010 ed ha portato ad identificare tre scene potenzialmente di ausilio alle nostre finalità, tenendo in considerazione sia il fatto che la rotta arginale, causa dell'allagamento, è avvenuta all'incirca alle ore 7:20 del mattino del 01/11/2010 e che per poter mettere in pratica parte dei metodi di indagine precedentemente

accennati è necessario essere in possesso non soltanto della scena con allagamento ma anche nella sua configurazione normale, quindi pre-evento.

In questo senso le scene ritenute utili ed attualemente a nostra disposizione sono essenzialmente tre: una immagine di riferimento pre-evento del 29/08/2010 ore 05:00, una immagine pre-rottura arginale ma con evento meteorologico critico già in corso del 01/11/2010 ore 05:00 e una immagine con evento in corso ma fuori dal picco di criticità relativa al 03/11/2010 ore 17:22.

La scelta dell'immagine pre-evento di riferimento è stata effettuata valutando le immagini presenti nell'archivio COSMO che non fossero eccessivamente lontane nel tempo rispetto all'evento di emergenza ma comunque rappresentative di condizioni atmosferiche non avverse. A tal fine si è ricorso ad una valutazione empirica delle previsioni metereologiche storiche presenti sul web relative al Comune di Vicenza.

Data la necessità di effettuare oltre all'analisi di ampiezza anche una di tipo interferometrico (in termini di variazione di coerenza), è stato necessario richiedere un livello di processamento che mantenesse l'informazione di fase e che non avesse quindi subito filtri di rimozione dello *Speckle* ne procedure di ortorettifica. Il livello corrispondente a tali esigenze è stato valutato essere il livello 1A (SCS - *SINGLE-LOOK COMPLEX SLANT*), in cui, come già accennato in precedenza, i dati grezzi sono focalizzati in formato complesso e proiettati in slant-range zero Doppler, che rappresenta la proiezione naturale di acquisizione del sensore. Ciascun pixel dell'immagine ha un valore di DN (Digital Numeber) composto da due elementi: Intensità e Fase o rispettivamente I (Reale) e Q (Immaginario), la quadratura dei dati focalizzati, pesati e radiometricamente equalizzati.

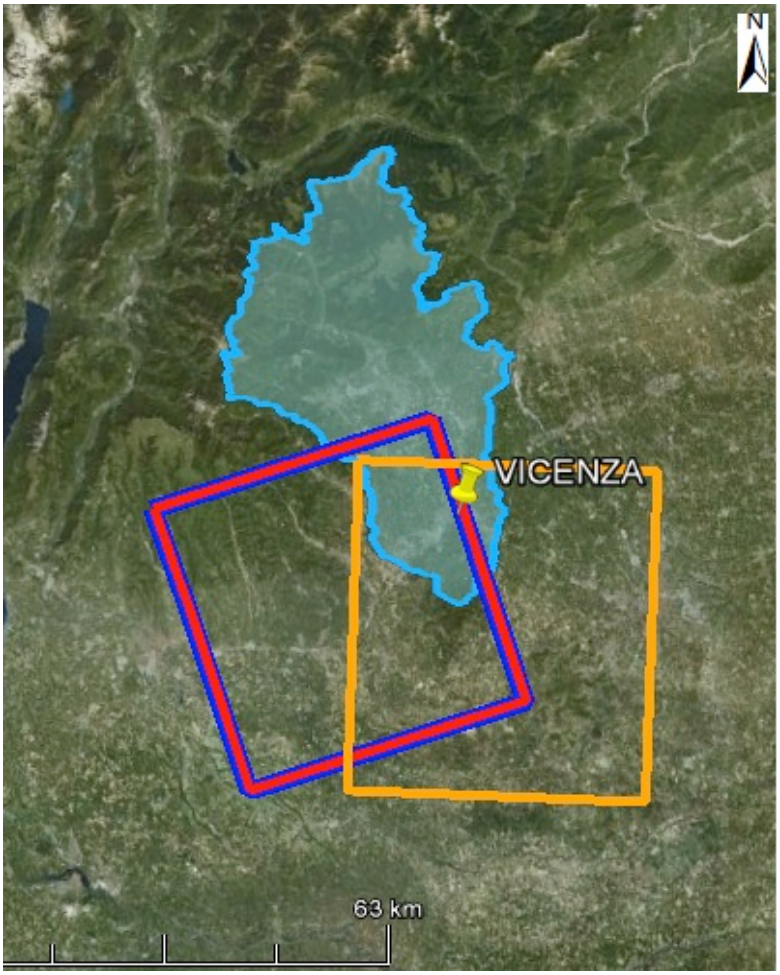


SLC Lev.1A – Immagine di Intensità SLC Lev.1A – Immagine di Fase

Fig.6.5 - SLC Lev.1A del 03/11/2010, Proprietà e gentile concessione di ASI (Agenzia Spaziale Italiana)

L'operazione di focalizzazione è particolarmente importante per i prodotti SLS in quanto, soprattutto per le analisi di natura interferometrica tra coppie di immagini, è necessario che i dati siano correlati tra di loro e quindi che le componenti spettrali Doppler siano comuni ad entrambe le immagini, pena effetti di decorrelazione e quindi introduzione di rumore di fase e degradazione dell'accuratezza verticale.

Di seguito viene riportata una mappa che mostra il bounding box delle immagini in nostro possesso distinte per data in rapporto al bacino idrografico di interesse e alla città di Vicenza, il tutto su base Google Earth.



LEGENDA

BACINO IDROGRAFICO DI RIFERIMENTO (BACCHIGLIONE-LEOGRA-TIMONCHIO)

SAR COSMO - 01/11/2010

SAR COSMO – 03/11/2010

SAR COSMO – 29/08/2010

Fig.6.6 - Estensione e localizzazione delle immagini COSMO su base Google Earth

Le principali caratteristiche delle immagini a disposizione così come forniteci dal CUGS possono essere riassunte mediante la seguente tabella:

	IMMAGINE 1	IMMAGINE 2	IMMAGINE 3
Satellite	SAR1	SAR1	SAR1
Product	CSKS1_20100829050153.h5	CSKS1_20101101050111.h5	CSKS1_20101103172222.h5
Aquisition Date	2010-08-29	2010-11-01	2010-11-03
Start Time	05:01:46	05:01:04	17:22:14
Stop Time	05:01:52	05:01:10	17:22:21
Pass direction	Ascending	AscendinG	Descending
Look Side	right	right	right
Orbit Number	17451	18399	18436
Polarization	HH	HH	HH
Sensor Mode	STR_HIMAGE	STR_HIMAGE	STR_HIMAGE
Near Range Inc. Angle	31,1078	31,1014	37,4104
Far Range Inc. Angle	34,1284	34,1227	40,1348
Azimuth Resolution	3 m	3 m	3 m
Ground Range Resolution	3 m	3 m	3 m

Tab.4.3 - Selezione dei metadati delle immagini SAR COSMO-SkyMed a disposizione

La tabella sopra riportata riassume l'insieme delle immagini *Single-look* in modalità di acquisizione HIMAGE con risoluzione in ground range ed in azimuth di 3m x 3m a nostra disposizione. Per tutte e tre le scene gli angoli di incidenza sono purtroppo decisamente elevati rispetto a quelli auspiscati: ricordiamo che all'aumentare dell'angolo di incidenza locale corrisponde di fatto una minore riflessione speculare delle possibili superfici lisce quali potrebbero essere eventuali aree invasate dall'acqua, il che diminuisce la percentuale di successo nella stima degli areali di allagamento, soprattutto in ambito strettamente urbano.

Va sottolineato, come si evince anche dalla mappa che riporta i bounding box delle immagini a disposizione, che per quanto riguarda le scene pre e post evento rispettivamente del 29/08/2010 e del 1/11/2010 si tratta di immagini aventi pressochè la medesima geometria, entrambe acquisite in direzione Right Ascending ed aventi un *baseline* minimo che permette di poterle utilizzare come coppia interferometrica. Per quanto riguarda invece l'immagine del 03/11/2010 che rappresenta di fatto quella ipoteticamente meglio rappresentabile l'evento di emergenza, sia in termini temporali che di copertura dell'ambito urbano vicentino, ha però una estensione spaziale soltanto in parte coincidente con quella pre-evento (29/08/2010) ed è ripresa secondo direzione opposta ossia in orbita Descending, il che limita di fatto la possibilità di eventuali confronti con una situazione del territorio"normale", ossia in condizioni di assenza di acqua da allagamento.

Una premessa importante prima di introdurre i diversi processi di elaborazione per l'estrazione delle eventuali aree allagate è rappresentata dai software a disposizione per il trattamento delle immagini. Tra quelli attualmente in commercio, ENVI della società EXELIS ed ERDAS di Intergraph rappresentano la fonte di maggiore affidabilità, offrendo una vasta scelta di tools per elaborazioni sia su immagine ottiche che radar con interfacce abbastanza "*user friendly*". Sul versante invece "*free*" ed in ambito strettamente RADAR è possibile ricorrere al software NEST sviluppato dall'ESA, attualmente alla sua versione 4B.

Per la realizzazione delle nostre analisi siamo ricorsi all'uso di Erdas Imagine 2010 in modalità Demo per 30 giorni. Nonostante il dialogo tra il software e le immagini COSMO sia stato migliorato rispetto alla versione 9.2, il rapporto con il sensore non è del tutto perfezionato. Non risiedendo in Stati USA non è stato possibile accedere alla versione gratuita in modalità di prova del software ENVI, il quale grazie al modulo SARScape è ritenuto attualmente quello più utilizzato da professionisti ed industria nel trattamento di dati COSMO. L'incontro di limiti operativi ci ha quindi indotto a ragionare anche sulle capacità del software gratuito NEST, con interfacce meno "user friendly" rispetto agli applicativi commerciali citati e

avente però anch'esso dei limiti per quanto riguarda rapprto con dati COSMO e tools specifici di analisi. Le difficoltà riscontrate saranno oggettivate e discusse nel dettaglio in seguito all'interno delle singole elaborazioni

6.1.2 Pre-processamento delle immagini

I dati raccolti dai sensori per l'Osservazione della Terra, siano essi passivi o attivi, necessitano prima dell'utilizzo nelle applicazioni, di una serie di correzioni per eliminare o limitare i disturbi e le distorsioni introdotte durante l'acquisizione e la trasmissione: nella fattispecie, riguardo alle immagini SAR si fa riferimento alle distorsioni geometriche e radiometriche descritte precedentemente.
Questa fase di pre-elaborazione può essere divisa in due classi principali di correzioni in virtù del fenomeno di origine e del campo su cui operare:

- Correzioni radiometriche
- Correzioni geometriche

Come verrà specificato più dettagliamente in seguito però, per quanto riguarda le immagini SAR, eventuali tempi, modalità ed grado di utilità delle correzioni varia in funzione di vari fattori quali:

- tecnica di analisi utilizzata per l'estrazione di informazioni;
- obiettivi;
- formato di immagini a disposizione;
- fenomeno da indagare.

Tale premessa è necessaria in quanto l'obiettivo di estrazione di arre di allagamento da immagini SAR sarà perseguito mediante tecniche diverse, variabili in base allo specifico subset di immagini a disposizione ed, in quanto tale, varieranno di conseguenza anche le modalità ed i tempi con le quali verranno applicati gli eventuali tipi di correzioni.
Nel particolare l'estrazione di eventuali allagamenti verrà perseguita mediante l'applicazione di una analisi di *change detection coehrence* sulla coppia di immagini del 29/08/2010 – 01/11/2010 nonché attravreso una classificazione supervisionata dell'immagine del 03/11/2010: mentre nella prima analisi le correzioni prima citate, oltre a non essere propedeutiche per il buon esito della procedura, sono altamente da evitare in quanto

sottrarrebbero informazione utile e necessaria all'analisi, nella seconda invece vengono realizzate preventivamente prima di dar luogo al processo vero e proprio di classificazione.

Risulta importante ricordare che entrambe le procedure daranno come esito una classificazione, ossia una discretizzazione dell'immagine sulla base del riconoscimento delle omogeneità interferometriche prima e spettrali poi, proprie di ciascun elemento presente nella scena in modo tale da identificare le classi di copertura delle superfici al suolo. I classificatori sono degli strumenti software che realizzano tale procedura e possono essere prima di tutto distinti in:

- *parametrici*: basati su modelli di distribuzione definiti da parametri geometrico-statistici (distanza, media, deviazione standard, etc…). Appartengono a tale categoria classificatori di tipo media-mobile (K-means), ISODATA, massima verosimiglianza, minima distanza e parallelepipedo;
- *non-parametrici*: basati su modelli operativi i cui parametri interni non hanno una valenza geometrico-statistica. Appartengono a tale categoria operatori del tipo fuzzy set, reti neurali e Change Detection (ossia valutazione di cambiamenti temporali). La *Coherence Change Detection* può essere considerata una forma particolare di analisi di *change detection* su dati SAR.

Sulla base di tali premesse è possibile sottoporre a correzione geometrica e radiometrica esclusivamente l'immagine del 03/11/2010.

CORREZIONE GEOMETRICA

Noto che la *geocodifica* sia la tecnica che permette di associare ad ogni pixel della matrice immagine una coppia di coordinate secondo il sistema di riferimento prescelto, in modo da poterne identificare la corretta posizione sulla superficie terrestre, essa non consente di eliminare o limitare le distorsioni dovute all'angolo di ripresa del sensore rispetto superficie terrestre. Nel caso di dati ottici tale procedura è ritenuta sufficiente ad eliminare le distorsioni geometriche sopra citate in tutti i casi in cui la scena riprenda una porzione di territorio topograficamente non complessa, limitando la procedura di ortorettifica a tutti i restanti casi; diverso è il caso invece di immagini SAR, in cui l'ortorettifica è ritenuta sempre necessaria ed auspicabile proprio per le caratteristiche geometriche intrinseche di ripresa del sensore, che ricordiamo non è nadirale, come nel caso dei sensori ottici, bensì *side-looking*.

Come si può osservare nell'immagine a seguire, un eventuale punto (B) posto ad una altezza (h) sull'ellissoide è registrato da un sensore SAR invece in posizione (B') nonostante la sua corretta posizione sull'ellissoide sia in realtà (B''). Lo scostamento Δ_r tra (B') e (B'') mostra proprio l'effetto della distorsione topografica.

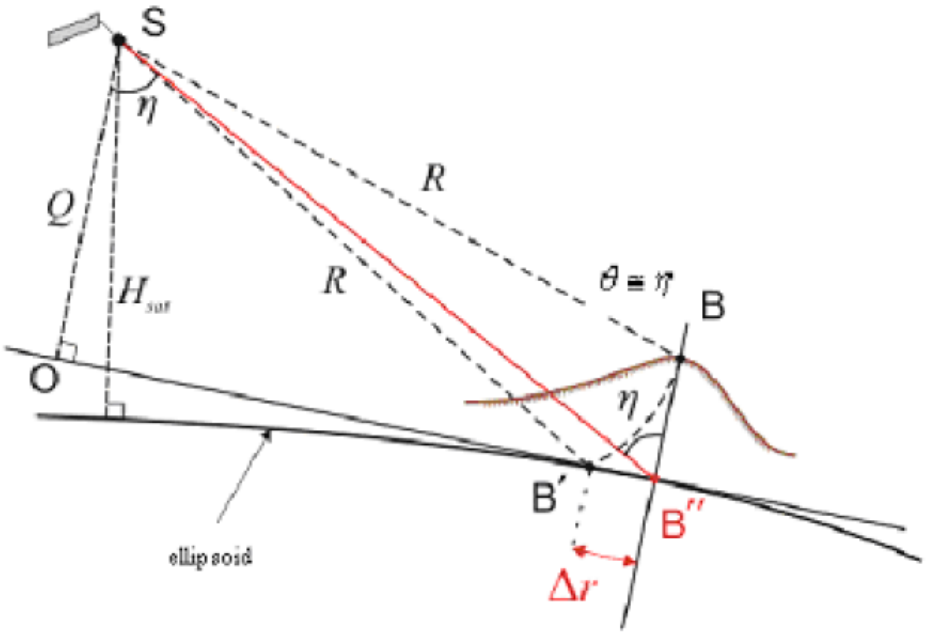


Fig.6.7 - Caratteristiche delle distorsioni topografiche in immagini SAR – NEST 4B User Manual

Come anticipato quindi è necessario ricorrere alla procedura di *ortorettifica* o *ortoproiezione*, la quale permette di trasformare la proiezione dell'immagine in modo tale che nell'immagine corretta ciascun pixel appaia come osservato da una posizione ad esso perpendicolare. Tale procedura ricorre all'uso di dati planimentrici e altimetrici derivanti da Modelli Digitali di Elevazione (DEM) uniti ai dati orbitali del satellite al momento dell'acquisizione sia in termini di orientamento esterno (posizione ed orientamenti del sensore) che interno (caratteristiche della geometria di acquisizione).

L'ortorettifica delle immagini è stata realizzata mediante il tool *OrthoRadar* del Software Erdas Imagine 2010, utilizzando come modello di elevazione il DEM prodotto nel 2002 mediante la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), progetto congiunto NASA/DLR/ASI ossia rispettivamente dalle agenzia spaziali stutunitense, tedesca e italiana, disponibile sul portale USGS (*US Geological Survey*). Nel dettaglio il DEM a nostra disposizione è stato realizzato mediante l'attività del sensore *Spaceborne Imaging Radar-C* (SIR-C) e successiva tecnica di interferometria radar in modalità *single-pass*, ossia valutando la differenza di segnale relativa

ad immagini con *baseline* minima acquisite contemporaneamente da due antenne poste sullo stesso sensore.

Mentre per il territorio statunitense il dato SRTM è offerto con risoluzione spaziale a 30 metri, per il restante globo la risoluzione massima è di circa 90 metri.

Projection	Geographic
Horizontal Datum	WGS84
Vertical Datum	EGM96 (Earth Gravitational Model 1996)
Vertical Units	Meters
Spatial Resolution	1 arc-second for the United States 3 arc-seconds for global coverage
Raster Size	1 degree tiles
C-band Wavelength	5.8 cm

Tab.4.4 - Caratteristiche del DEM SRTM per l'area di Vicenza - USGS (*US Geological Survey*)

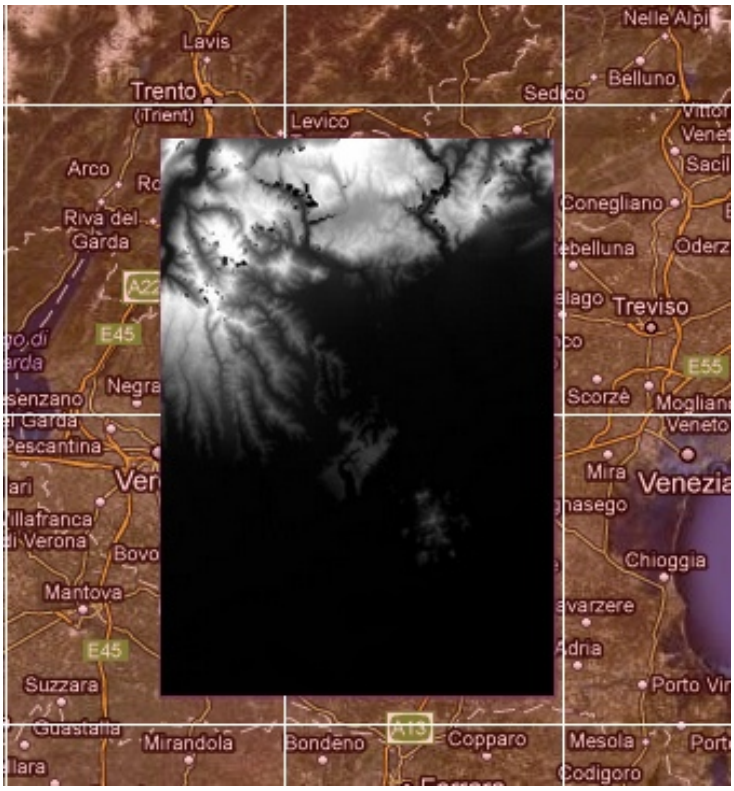


Fig.6.8 - DEM SRTM dell'area di Vicenza - USGS

Il formato del dato a disposizione è di tipo DTED (*Digital Terrain Elevation Data*), formato di mappatura standard di grigliato regolare di punti di elevazione progettato dal NGA statunitense (*National Geospatial-Intelligence Agency*). Il dato è costituito di una matrice di

valori verticali di elevazione disposti ad intervalli orizzontali regolari propri del grigliato misurato secondo le unità di longitudine e latitudine.

Come sì può notare dalla tabella sopra riportata, DATUM orizzontale e verticale non coincidono. A tal fine si è prima di tutto effettuata mediante il tool di Erdas "*Recalculate Elevation Value*" una trasformazione del DATUM verticale da EGM96 (*Earth Gravitational Model 1996*) a WGS84 (*World Geodetic Sistems 1984*) in modo da rendere il tutto coerente.

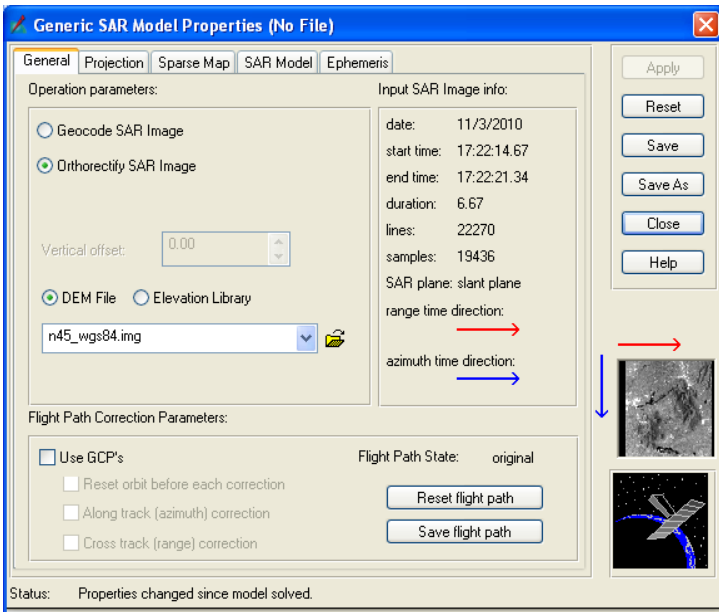


Fig.6.9 - Interfaccia utente del tool "Otho Radar" per la procedura di ortorettifica – Erdas 2010 "Demostration Mode"

La fase finale del processo di ortorettifica consiste nel *resampling* o ricampionamento dell'immagine, il quale permette di attribuire a ciascuna cella della nuova matrice predisposta dal software il rispettivo valore di cella presente nel dato di partenza. La modalità con la quale tale attribuzione viene effettuata è funzione dell'algoritmo di ricampionamento prescelto, il quale a sua volta varia in base alle analisi che si vorranno effettuare sull'immagine. I tre tipi di algoritmi più utilizzati, in ordine crescente di complessità e accuratezza ottenibile sono[122]:

- *Nearest neighbour*: assegna al pixel nell'immagine da ortorettificare il valore del pixel più vicino al punto corrispondente nell'immagine non corretta. È un algoritmo semplice dal punto di vista computazionale che non altera i valori dei pixel nella correzione, mantenendo quindi invariata la risposta spettrale. Il suo limite è però quello di creare nell'immagine delle tipiche deformazioni "a scaletta" soprattutto negli oggetti lineari che presentano un angolo rispetto agli assi cardinali.

  Tempi di elaborazione minimi: FLOPs (*Floating Point Operation per second*) circa 10.

- *Bilinear interpolation*: il valore del pixel nell'immagine di output é il risultato dell'interpolazione, mediante media pesata, dei quattro pixel piu' prossimi alla cella di riferimento nell'immagine di input. Il risultato che si ottiene é esteticamente più gradevole e piu' naturale come aspetto proprio perche' il valore del pixel é il risultato della combinazione di piu' input. Viene eliminato l'effetto "scaletta" presente nell'interpolazione Nearest Neighbor, ma il valore del pixel viene alterato, così come anche la risoluzione spaziale di origine. Questa tecnica é applicabile sui modeli numerici del terreno, pendenze, concentrazioni, cioé in tutte quelle immagini che presentano una certa continuità spaziale. Tempi di elaborazione medi: FLOPs (*Floating Point Operation per second*) circa 50.

- *Cubic convolution*: simile al precedente, con la differenza però che il processo di interpolazione impiega non quattro bensì i sedici pixel piu' prossimi a quello di riferimento per calcolare il valore del pixel centrale finale da attribuire all'immagine di output. L'interpolazione e quindi la determinazione del valore da assegnare in output non avviene mediante la media ponderata bensì attraverso il passaggio della curva interpolante attraverso i sedici valori di input.

  Anche in questo caso, come il precedente, si tratta di un algoritmo che preserva gli elementi lineari ed i bordi degli oggetti anche in seguito alla correzione, ma che determina una modifica dei valori originari dei pixel, con un conseguente effetto di sfocatura (*smoothing*) dell'immagine. Inoltre questo algoritmo permette di ottenere immagini piu' contrastate (*sharpened*) e di eliminare parte del rumore eventualmente presente sull'immagine. Tempi di elaborazione elevati: FLOPs (*Floating Point Operation per second*) circa 350.

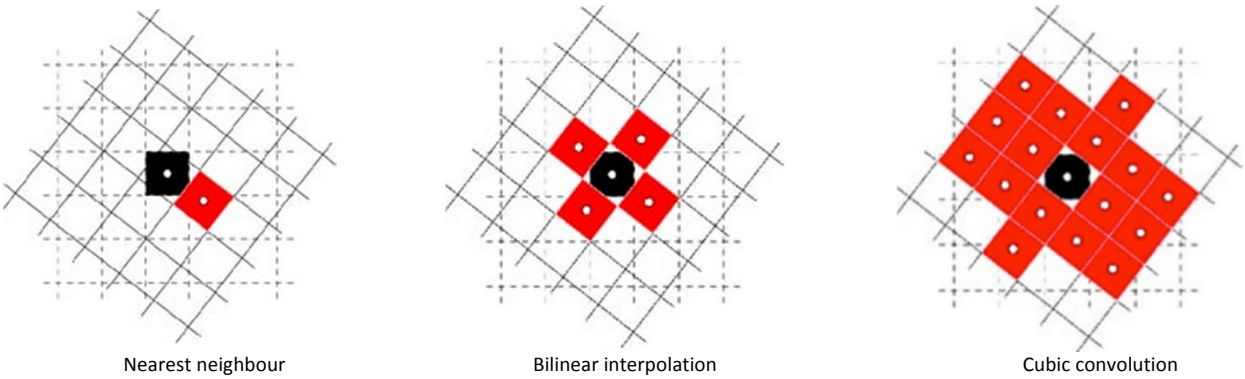


Fig.6.10 – Funzionamento dei diversi algoritmi di ricampionamento [122]

Come già detto, la scelta dell'algoritmo non dev'essere effettuata quindi in maniera casuale, ma in funzione del tipo di immagine che va processata e degli obiettivi che per essa ci si prefigge. I dati raster vengono comunemente suddivisi in "discreti" (*discrete data*) e "continui" (*continuous data*). I primi descrivono informazioni "finite", ossia un oggetto della realtà discreto da confini, limiti certi, ben definiti (strade, particelle catastali, edifici, uso del suolo, geologia, ecc.), mentre i dati continui descrivono fenomeni, caratteristiche della realtà che variano spazialmente in maniera continua con valori compresi all'interno di un dominio (modelli digitali del terreno DTM/DEM, concentrazioni di sostanze nel suolo, salinità della falda, ecc.)[69]. Questa premessa è utile perché il metodo *nearest neighbor* risulta preferibile per dati discreti, poichè opera in modo tale che il dominio di valori complessivo dell'immagine corretta sia identico a quello di partenza ed in questo senso può esser da preferire nel momento in cui ci pone obiettivi di classificazione dell'immagine ortorettificata.

Gli altri algoritmi di interpolazione invece risultano più adatti a dati di tipo "continuo" poiché, effettuando una interpolazione dei valori dei pixel all'intorno di quello in esame, cercano proprio di mantenere la continuità del dato di partenza e risultano adatti per tutti quei fenomeni spazialmente continui o per immagini sulle quali si abbiano esclusivamente finalità di fotointerpretazione, ossia in cui la componente di apprezzamento visivo è fondamentale.

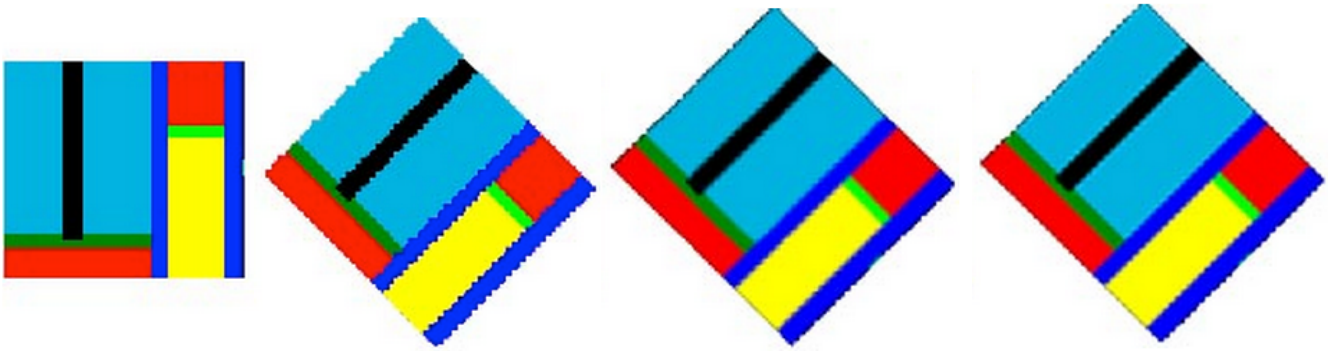
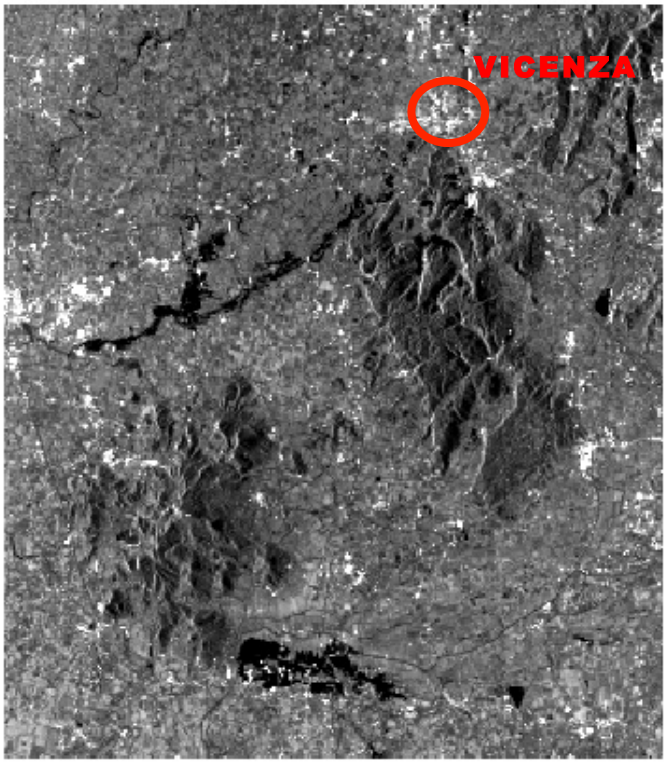


Immagine di input | Algoritmo di ricampionamento Nearest Neighbour | Algoritmo di ricampionamento Bilinear Interpolation | Algoritmo di ricampionamento Cubic Convolution

Fig.6.11 – Confronto tra esiti di ricampionamento su immagine "tipo" [122]

Nella coppia di immagine a seguire si riporta l'immagine SAR del 03/11/2010 così come appare in fase pre e post procedura di ortorettifica.

[69] "RICAMPIONAMENTO" - GFOSS WIKI



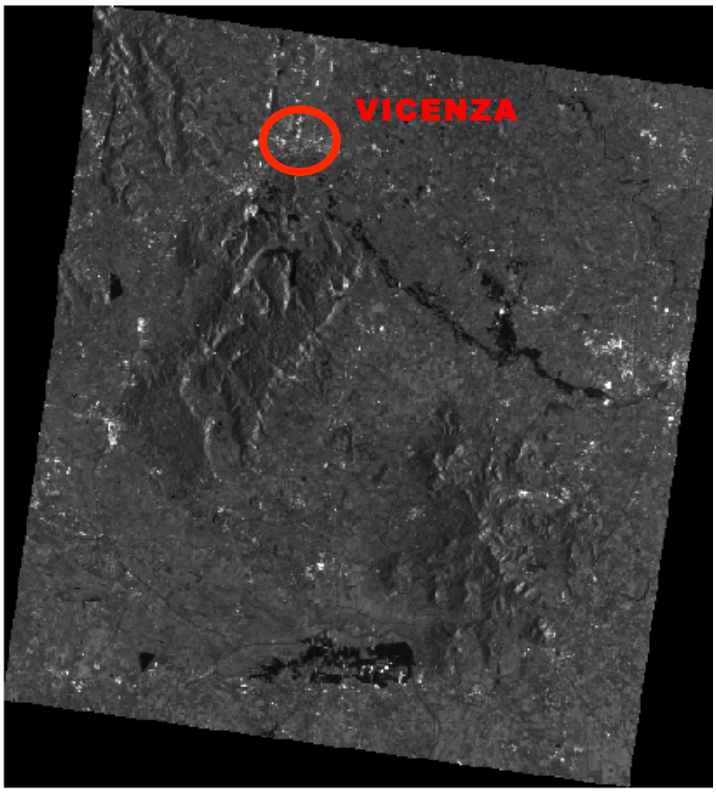


Fig.78 - Immagine SLC COSMO del 03/11/2010 pre - ortorettifica

Fig.79 - Immagine SLC COSMO del 03/11/2010 post - ortorettificata

Fig.6.12 - Immagini di proprietà e gentile concessione di ASI (Agenzia Spaziale Italiana)

CORREZIONI RADIOMETRICHE

Come già anticipato nelle immagini radar il concetto di *tessitura* risulta particolarmente importante. Essa viene definita come la disposizione geometrica delle macro-rugosità superficiali legata alla dimensione e all'organizzazione nello spazio delle celle radiometriche elementari. Potendo identificare ben tre livelli di analisi della tessitura: micro, meso e macro scala[70], ci occuperemo innanzitutto del tipico effetto *Speckle* il quale, lo ricordiamo, appartiene ad analisi tessiturali di micro scala, dove la dimensione della cella tessiturale e quella della cella di risoluzione coincidono. Tale effetto risulta presente in modo casuale in tutte le immagini radar, indipendentemente dalla risoluzione spaziale del dato.

Lo *Speckle* presente nelle immagini radar può essere matematicamente modellato come rumore moltiplicativo avente media 1. La deviazione standard del rumore può essere matematicamente definita come:

[70] *Elementi di Geomatica,* Mario A. Gomarasca, Associazione Italiana di Telerilevamento, 2004

Deviazione standard = $\frac{\sqrt{Varianza}}{Media}$ = Coefficiente di variazione

Sulla base di tali considerazioni si è proceduto ad applicare un filtro per la rimozione dello *Speckle* mediante il tool "*Radar Speckle Suppression*" presente nella sezione *Radar Utilities* di Erdas Imagine 2010. Va sottolineato che l'applicazione di filtri per la riduzione dello speckle implica, indipendentemente dal filtro applicato, una certa perdita in termini di risoluzione spaziale: in base al tipo di filtro applicato è possibile lavorare sul diverso equilibrio instaurabile tra riduzione del rumore e perdita di risoluzione.

I principali filtri messi a disposizione dal sofwtare sono i seguenti:

- *FROST FILTER*: tale filtro sostituisce il pixel di interesse con una somma pesata del valore presente all'interno della finestra mobile n x n definita dall'operatore. Il peso diminuisce con l'aumentare della distanza dal pixel di interesse.

- *GAMMA-MAP*: il filtro MAP acronimo di Maximum A Posteriori si basa su un modello di rumore moltiplicativo con parametri di media e varianza non stazionari. Questo filtro stabilisce che il valore di DN originario è compreso tra la media del pixel di interesse e quello della finestra mobile scelta dall'operatore. La formula che descrive l'algoritmo è la seguente equazione cubica:

  $$\hat{I}^3 - \overline{I}\hat{I}^2 + \sigma(\hat{I} - DN) = 0$$

  dove

  $\hat{I}$ = valore da stimare

  $\overline{I}$ = media locale

  DN = dato di input

  σ = varianza originale dell'immagine

- *MEDIO*: questo filtro non elimina i valori associati al rumore, bensì media tali valori all'interno dei dati. Il filtro opera sull'idea che un pixel chiaro ed uno scuro all'interno della stessa finestra si annullerebbero a vicenda. Tale considerazione sottolinea quindi

l'importanza di una finestra mobile di dimensioni ampie, per esempio 7 x 7. Nonostante ciò, l'applicazione di una media implica una notevole perdita di informazione, il che porterebbe a preferire invece una finestra di piccole dimensioni. In generale il filtro medio risulta il meno soddisfacente fra i metodi per la riduzione del rumore; il suo apporto si può ritenere utile esclusivamentente in apllicazioni veloci o per quelle in cui la perdita di risoluzione non rappresenta un problema.

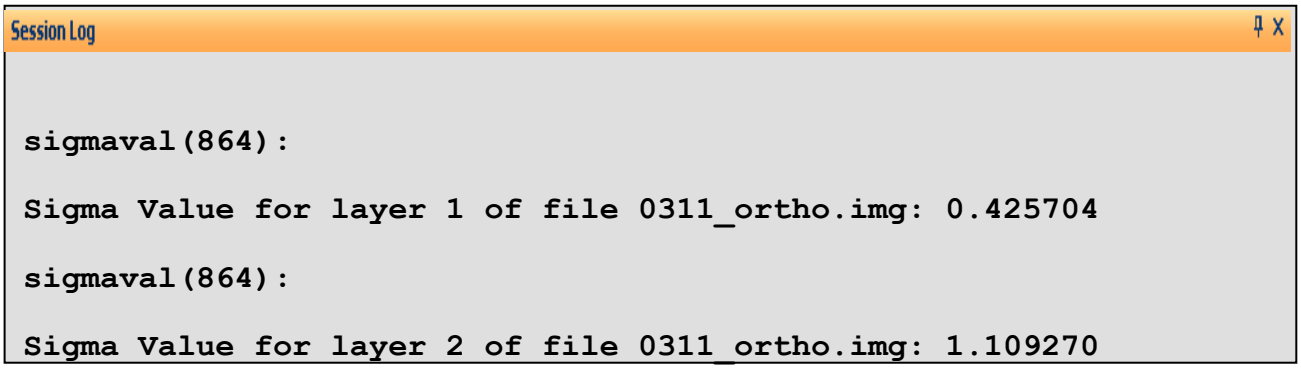
- *MEDIANO*: opera disponendo in ordine sequenziale tutti i valori di DN all'interno della finestra mobile definita dall'operatore. Il pixel di interesse viene sostituito dal valore centrale della distribuzione. Questo tipo di filtro è utile per rimuovere picchi di rumore in quanto meno della meta del peso della finestra mobile viene soppressa o eliminata.

- *LOCAL REGION*: il filtro divide la finestra mobile in 8 regioni basate sulla posizione angolare (Nord, Sud, Est, Ovest, NO, NE, SO e SE) e per ogni regione viene calcolata la varianza. Dopodichèè l'algoritmo compara i valori di varianza delle regioni che cincordano il pixel di interesse, il quale viene sostituito dalla media di tutti i DN della regione con la varianza minore in quanto considerata quella più unforme. Una regione con varianza minima è valutata come essere quella che ha il minor numero di pixel affetti da interferenza di segnale ancora molto simile al pixel di interesse e probabilmente sarà tale per la maggior parte dei pixel circostanti. Il risultato è che l'immagine di output sarà composta di numerose aree uniformi la cui dimensione è determinata dalla dimensione della finestra mobile. In pratica il filtro può essere usato più di una volta e a ciascuna reiterazione viene aumentata la dimensione della finestra mobile. Tale filtro risulta dare output abbastanza appropriati per applicazioni di classificazione.

- *LEE-SIGMA*: utilizza la distribuzione statistica dei valori di DN all'interno della finestra mobile per stimare il valore del pixel di interesse. Tale filtro si basa innanzitutto sull'idea che la media e la varianza del pixel di interesse è uguale alla media e varianza locale di tutti i pixel della finestra mobile scelta dall'operatore.Inoltre viene definito un modello matematico in cui il rumore è moltiplicativo. L'implementazione del filtro richiede di inserire un valore sigma stimato, ossia il coefficiente di variazione all'interno della scena di interesse. Inoltre va sottolineato che il filtro Sigma-Lee si basa

sulla probabilità di distirbuzione Gaussiana dei dati e quindi assume che il 95,5% dei campioni casuali siano all'interno dell'intervallo di 2 deviazioni standard (2 sigma). In questo modo il valore del pixel di interesse viene sostituito con la media di tutti i valori di DN all'interno della finestra mobile che ricade all'interno del range prima definito.

Sulla base delle caratteristiche di ciascun algoritmo di filtro, la scelta applicativa ricade sui filtri GAMMA-MAP, LEE-SIGMA e LOCAL REGION. Va specificato che per i primi due tipi di filtro prescelti (GAMMA-MAP e LEE-SIGMA) dovrà essere specificato un coefficiente di variazione calcolato ad hoc per i dati di input nonché il numero di deviazioni standard da usare (0.5, 1 o 2) in modo da definire l'intervallo di interesse.



Calcolo del coefficient di variazione per l'immagine in input – Session Log Erdas 2010 "Demostration Mode"

Ricordiamo che l'immagine in questione è di tipo SLC, quindi in formato complesso intensità (X_HH_MAGNITUDE_1) – fase (X_HH_PHASE_2), per cui il coefficiente di variazione viene calcolato per entrambe le "bande". Il valore di nostro interesse è però esclusivamente quello reativo al layer 1 (X_HH_MAGNITUDE_1), che è pari a 0.425704. Il tool di riduzione dello speckle verrà a questo punto riavviato specificando tale valore al suo interno. Stessa operazione avviene per l'applicazione del filtro GAMMA-MAP.

A seguire si riporta un dettaglio di confronto tra gli esiti di filtraggio del rumore sulla immagine in analisi.

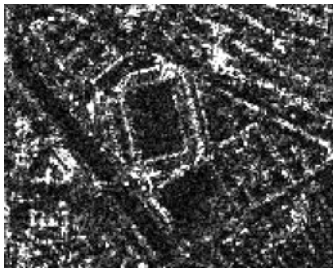
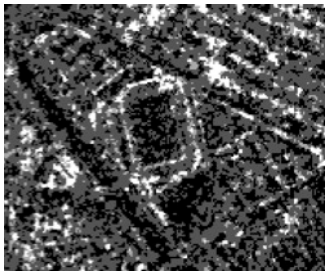
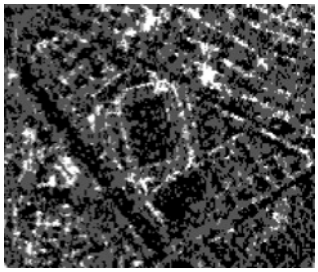


Immagine ortorettificata


Post Filtro Sigma-Lee


Post Filtro Local Region

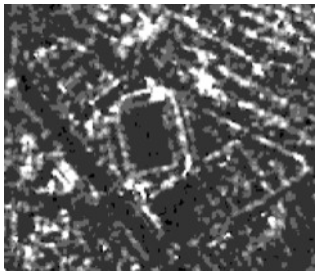

Post Filtro GAMMA-Map

Fig. 6.13 – confronto tra gli esiti dei diversi filtri di rimozione dello Speckle

Il confronto tra i diversi risultati permette di apprezzare le differenze di esito dei diversi filtri: la scelta ricade sull'algoritmo di rimozione GAMMA-MAP in quanto l'immagine risulta, rispetto alle altre, di gran lunga più definite e decisamente meno rumorosa rispetto all'immagine ortorettificata di partenza. Ricordiamo che la rumorosità dell'immagine è qualcosa di caratteristico del sensore radar e l'effetto di Speckle, in quanto anch'esso fonte di informazione, può essere modellato, affinato ma mai totalmente rimosso.

Una volta affrontato e parzialmente limitato il problema della rumorosità e quindi il campo della tessitura a micro scala, si passa ad affrontare la tessitura in senso stretto. Nel telerilevamento l'analisi tessiturale di tipo meso scala, costituisce una delle più importanti caratteristiche per il riconoscimento di oggetti e regioni, in quanto contiene informazioni importantissime sulla disposizione strutturale delle superfici e sulla loro relazione con l'ambiente circostante. Essa è definibile come un micro-cambiamento nella distribuzione dei toni in una immagine, cioè la qualità che consente di distinguere tra due oggetti aventi piccole o nulle differenze totali[84]. Tale ruolo risulta ancor più importante proprio in ambito urbano, dove, data la complessità della scena, la statistica associata al singolo pixel perde di efficacia rispetto al suo contesto ed al concetto di correlazione spaziale intrinseca dell'immagine.

Le tessiture sono contenute proprio nelle relazioni spaziali che i pixel hanno con i vicini all'interno della finestra mobile che l'operatore sceglie come dominio per il calcolo di una matrice delle occorrenze e nella quale la posizione dei valori non ha rilevanza poiché il calolo delle statistiche avviene senza tener conto dell'ordine dei campioni. I vari operatori che il software Erdas 2010 mette a disposizione all'interno delle *Radar Utilieties* "*Texture Analysis*" sono i seguenti:

- *Variance*: sostituisce al pixel centrale della finestra il valore della varianza dei pixel presenti nell'intorno. La mappa di tessitura risultante presenta colori più chiari laddove lavariazione locale dei grigi è maggiore;

- *Skewness*: è un parametro che descrive l'asimmetria (obliquità) della distribuzione della probabilità di una variabile casuale, ed è strettamente dipendente dalla media e dalla deviazione standard di una certa variabile;
- *Kurtosis*: misura la concentrazione o dispersione della distribuzione intorno ad un valore centrale;
- *Mean Euclidean Distance*: sostituisce al pixel centrale della finestra il valore medio dei DN presenti nellafinestra considerata. Questo filtro di tessitura lavora pertanto come un filtro passa-basso[71],andando ad appiattire la variazione locale dell'immagine in maniera tanto maggiore quanto più grande è la finestra usata per il calcolo della matrice delle occorrenze.

Tipologia di operatore e dimensione della finestra mobile rappresentano gli elementi caratterizzanti nella generazione delle mappe di tessitura.
Sulla base di tali premesse si è analizzata l'immagine originale ortorettificata senza filtro per la soppressione dello speckle, come punto di partenza per la creazione di diverse mappe di tessitura per ciascun operatore sopra descritto e secondo varie finestre mobili, in modo da poterne apprezzare e confrontare i risultati.

[71] I filtri passa-basso sono trasformazioni che forniscono immagini più lisce delle originali, ossia in cui sono evidenziate le caratteristiche dominanti (elementi a bassa frequenza) mentre vengono eliminati i dettagli (elementi ad alta frequenza). Essi hanno l'effetto di ridurre il contrasto e di smussare i bordi [84].

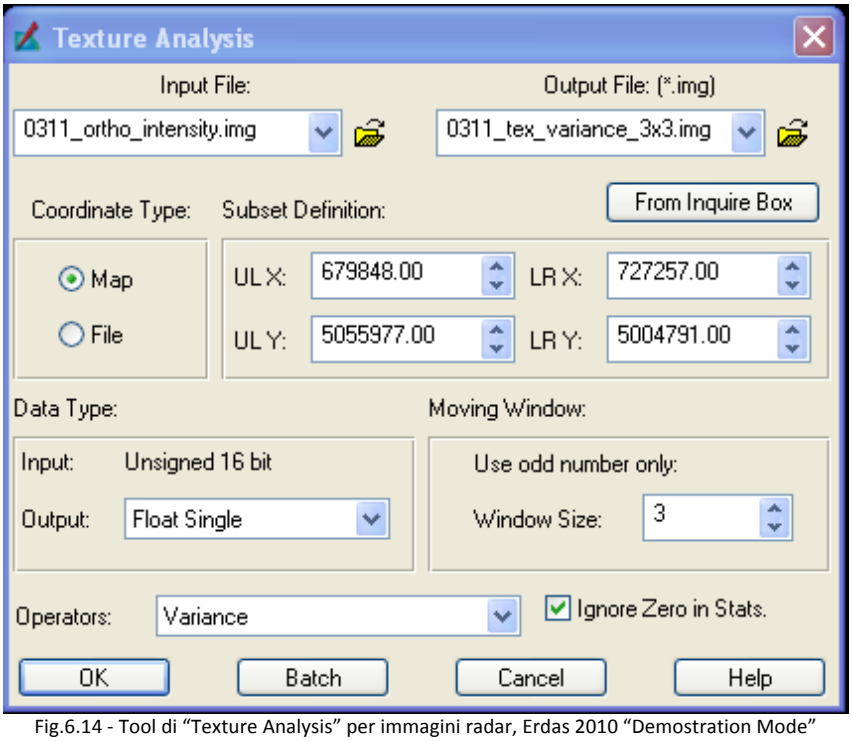
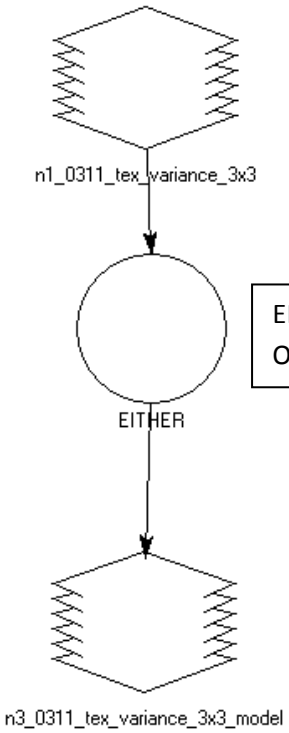


Fig.6.14 - Tool di "Texture Analysis" per immagini radar, Erdas 2010 "Demostration Mode"

Fig.6.15 - Immagine di tessitura esito del filtro "variance"

Fig.84 - Istogramma dell'immagine di tessitura esito del filtro "variance"

Appare chiaro dall'immagine sopra riportata e dal relativo istogramma che il dato di output esito dell'attività di analisi tessiturale debba essere sottoposto ad una ridefinizione della distribuzione delle frequenze dei dati registrati in ciascuna cella. A tal fine mediante il tool "model maker" si costruisce un processo utile ad eliminare tutti quei valori eccessivamente prossimi allo zero inutili nell'immagine.



EITHER $n1_0311_tex_variance_3x3(1) IF ($n1_0311_tex_variance_3x3(1)<5000) OR 5000 OTHERWISE

Fig.6.16 – Processo per l'eliminazione dei valori superiori a 5000+e008, Model Maker, Erdas 2010 "Demostration Mode"

Istruendo il software ad eliminare dall'immagine tutti i valori superiori a 5000+e008, è possibile apprezzare l'esito della immagine di tessitura ottenuta sulla base del algoritmo "variance".

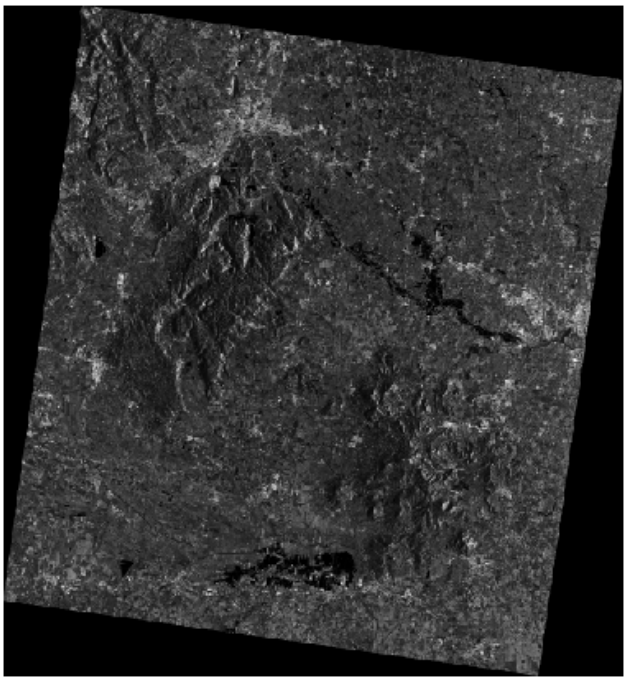


Fig.6.17 - Immagine di tessitura esito del filtro "variance" post ridefinizione dell'istogramma

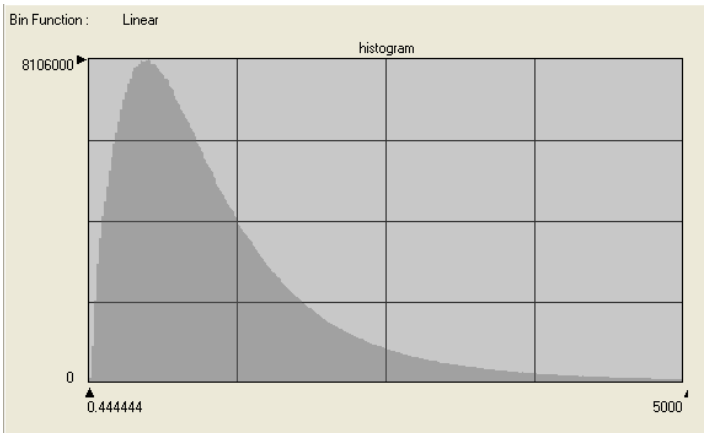


Fig.6.18 - Nuovo istogramma dell'immagine di tessitura esito del filtro "variance"

Le immagini di tessitura sono state realizzate per tutti gli algoritmi prima descritti e messi a disposizione dal Software Erdas in modo da poter effettuare un confronto e valutare quale fosse portatore degli esiti più efficaci.

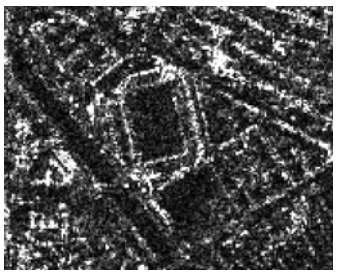
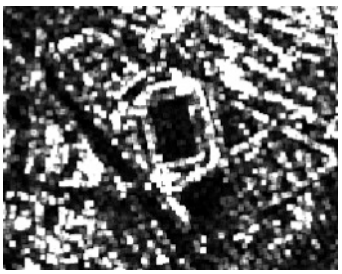
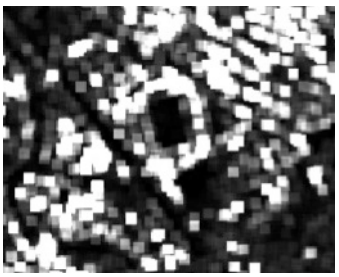


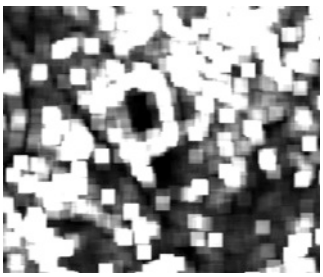
Immagine ortorettificata



Tessitura Variance 3x3



Tessitura Variance 7x7



Tessitura Variance 10x10

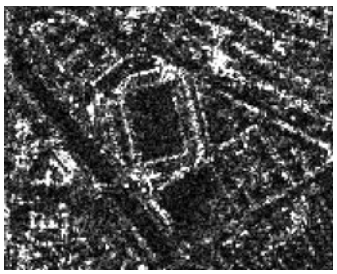
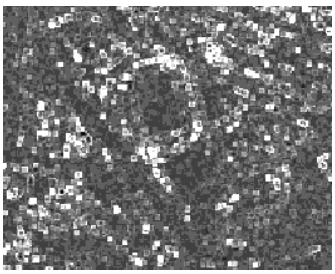
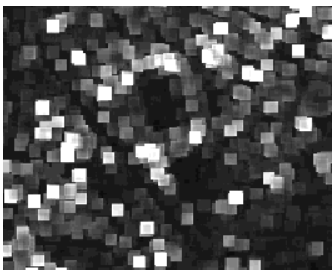


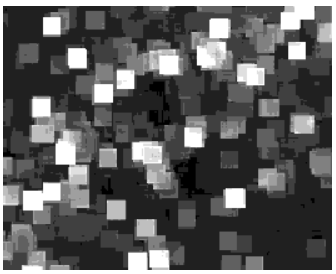
Immagine ortorettificata



Tessitura Skewness 3x3



Tessitura Skewness 7x7



Tessitura Skewness 10x10

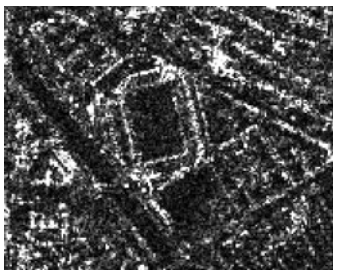
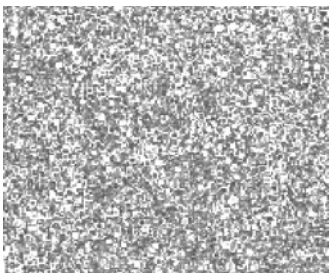
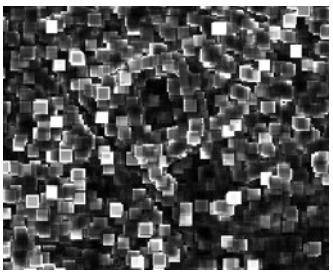


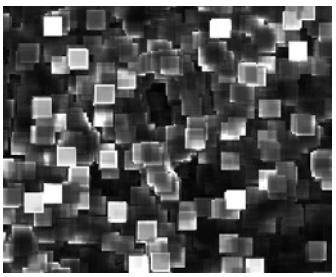
Immagine ortorettificata



Tessitura Kurtosis 3x3



Tessitura Kurtosis 7x7



Tessitura Kurtosis 10x10

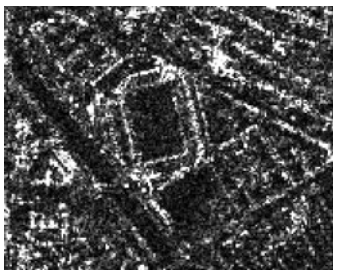
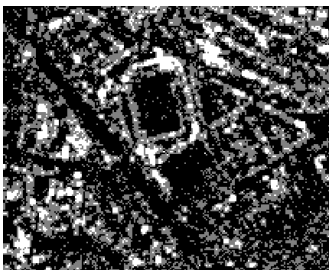
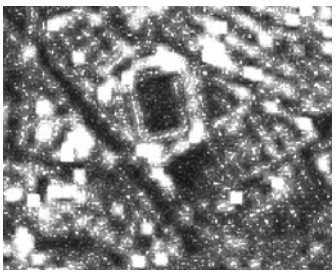


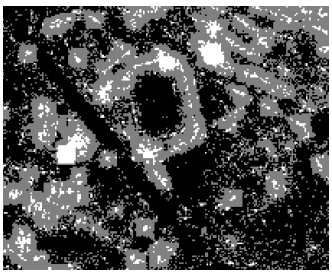
Immagine ortorettificata



Tessitura Mean Euclidean Distance 3x3



Tessitura Mean Euclidean Distance 7x7



Tessitura Mean Euclidean Distance 10x10

Fig.6.19 - Confronto tra dettagli delle immagini di tessitura per ciascun algoritmo di analisi tessiturale – Erdas 2010 “Demostration Mode”

L’esito migliore rispetto alle nostre finalità viene valutato esser dato dall’algoritmo “Variance” operante su una finestra mobile di 3x3 pixel.

A questo punto si procede nel realizzare una unica imagine che sarà composta da due bande:

- Banda 1: imagine ortorettificata de-desplecked con filtro GAMMA-MAP;
- Banda 2: mappa di tessitura ortorettificata con algoritmo “variance” su finestra mobile 3x3.

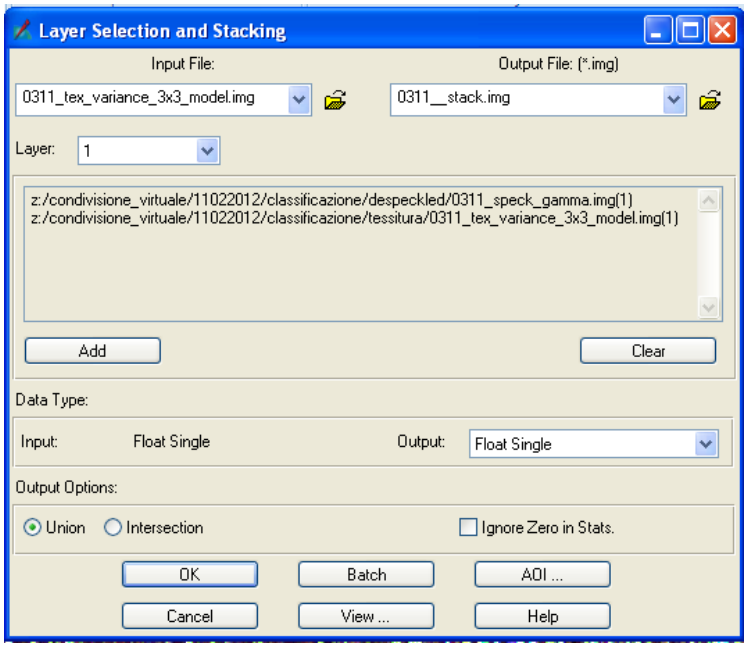


Fig.6.20 - Creazione della nuova immagine a due bande – “Layer Stack”, Erdas 2010 “Demostration Mode”

In tal modo ogni singola mappa realizzata dalle operazioni precedenti andrà a formare una banda della immagine da sottoporre a classificazione supervisionata in modo da aumentare l’informazione spaziale utilizzabile dal classificatore. L’introduzione delle mappe di tessitura all’interno dei criteri di classificazione risulta essenziale qualora si voglia portare alla luce il concetto di “contesto” all’interno di una procedura di classificazione. La necessità di tale affinamento risulta dal fatto che una classificazione strettamente pixel-based, ossia basata esclusivamente sull’analisi di omogeneità radiometrica del singolo pixel rispetto ad altri sull’immagine, qualora applicata ad immagini radar risulta altamente limitante ed inefficace.

6.1.3 Condizioni di allagamento al 01/11/2010: analisi di Coherence Change Detection

La disponibilità di immagini relative al giorno 29/08/2010 e 01/11/2010 aventi geometria di ripresa simile viene sfruttata per indagare la presenza di eventuali allagamenti mediante la tecnica di analisi di variazione di coerenza interferometrica tra le due scene. Ricordiamo che l'immagine relativa al 01/11/2010 è stata acquisita alle ore 05:00 del mattino, mentre la rottura arginale che ha innescato l'emergenza allagamento nella città di Vicenza è avvenuta qualche ora dopo, precisamente alle ore 7:20. Da questo si deduce che eventuali allagamenti apprezzabili dalla analisi delle immagini in questione siano dovute alle condizione meteo avverse già in corso al momento della ripresa e che avrebbero di lì a poco innescato il fenomeno di rottura arginale. La necessità di effettuare comunque tale analisi si inserisce nell'ottica del processo di resilienza che è alla base del presente lavoro. Effettuare infatti una valutazione degli allagamenti esclusivamente ad evento finito è strettamente legato alla pratica attuale di approccio a posteriori al rischio ossia esclusivamente in situazione di emergenza. Utilizzare le immagini SAR per valutare costantemente le dinamiche che potrebbero eventualmente averlo innescato conduce invece ad una valutazione organica e sistematica propria di una quadro conoscitivo strutturato ed orientato al processo di resilienza.

Nel dettaglio, come già accennato la tecnica utilizzata è quella di valutazione delle modificazioni di coerenza interferometrica (*Coherence Change Detection* – CCD) tra immagini della stessa scena di riferimento acquisite dall'antenna in modalità *Repeat-pass* in momenti diversi ma con *baseline* prossima allo zero.

Per la realizzazione di tale analisi nessun tipo di correzione geometrica né radiometrica deve essere operata preventivamente sulle immagini e a seguire se ne enunceranno i motivi.

Essa infatti si basa sul fatto, ricordiamo, che il SAR fornisce immagini complesse (*Single-Look Complex*) in quanto contenenti due tipi di informazioni: ampiezza e fase. La prima è relativa all'intensità dell'eco di ritorno, analogamente a quanto si verifica per le immagini ottiche; la fase invece è la misura della posizione sull'onda sinusoidale in cui l'eco colpisce l'antenna, generalmente compresa tra 0 e 2π o 0 e 360° essendo il ciclo dell'onda radar. Le lunghezza d'onda radar sono quantificate nell'intervallo dei centimetri, nella fattispecie per il sensore COSMO essendo un sensore operante in banda X, intorno ai 3 cm. Il ritorno di ciascun pixel è la somma dei ritorni di molte onde indipendenti, ognuna delle quali avente una sua specifica interazione con il materiale di cui è composto il bersaglio. Inoltre, le onde percorrono una distanza più breve a seconda che interagiscano nel *near range* di un pixel piuttosto che nel suo

far range. Tutti questi effetti implicano che ciascuna onda di ritorno all'interno di un singolo pixel sarà caratterizzata da una posizione di fase leggermente differente: la fase e l'ampiezza di un pixel sono infatti la somma coerente delle fasi e delle ampiezze di tutti gli echi di ritorno provenienti all'interno del pixel stesso.

Ciò premesso è utile a capire come la valutazione della coerenza interferometrica si basi sul fatto che la fase dell'eco radar è composta da due termini: uno deterministico, dovuto alla geometria di acquisizione e l'altro casuale, dovuto alle interferenze tra i ritorni degli oggetti contenuti nella scena. A meno che non esista quindi un bersaglio dominante, la fase complessiva è praticamente casuale e ciò implica che la fase di una sola immagine radar è portatrice di una informazione praticamente inutilizzabile[123].

Se la scena viene però ripresa in momenti differenti, il segnale di ritorno registrato nelle due immagini sarà quindi identico esclusivamente se la geometria di acquisizione e la superficie osservata è invariata e quindi le due scene possono definirsi coerenti tra loro. Assunto che la geometria di acquisizone rimanga invariata, l'eventuale incoerenza deriva quindi da una modificazione dei bersagli presenti nella scena. Tale modificazione, essendo il radar sensibile alle variazioni al suolo alla scala della lunghezza d'onda emessa, può essere apprezzabile con precisione variabile tra il centrimentro fino al millimetro. Mediante la valutazione della consistenza o dei cambiamenti nei valori di fase di ciascun pixel è possibile valutare la stabilità degli elementi al suo interbi e questo avviene misurando la coerenza della scena in quel pixel. In pratica, esse consiste in un calcolo, mediante finestra mobile, della correlazione incrociata complessa normalizzata tra due immagini complesse coregistrate[96]:

$$\gamma = \frac{|\sum s_1(x) \cdot s_2(x)|}{\sqrt{\sum |s_1(x)|^2 \cdot \sum |s_2(x)|^2}}, \gamma \in [0,1]$$

dove S_1 e S_2 rappresentano i valori di fase per ciascuna coppia di pixel presenti nelle due immagini.

Essendo normalizzata, il suo modulo varia tra 0 e 1, registrando la massima correlazione e quindi massima coerenza esclusivamente a fase perfettamente costante tra le due scene e quindi il comportamento dell'oggetto osservato ha una influenza stabile sulla fase; all'opposto valori di coerenza vicini allo zero mostrano una fase con andamento simile al rumore, ossia tra

le due rilevazioni la variazione di fase introdotta dall'oggetto osservato è variata in modo casuale.

La variazione della coerenza o Inter-scene Coherence può essere considerata quindi come una misura della stabilità di fase tra due immagini. La fase totale di un segnale di ritorno radar è il risultato di contributi multipli che può essere definito mediante la seguente equazione[96]:

$$\phi = \phi_{flatearth} + \phi_{topography} + \phi_{atmosphere} + \phi_{motion} + \phi_{noise} + \phi_{decorrelation}$$

dove:

$\phi_{flatearth}$ è il cosiddetto contributo di fase di "*terra piatta*", dovuto al fatto che anche laddove la scena ripresa sia perfettamente piatta, il solo passare a pixel più lontani dal nadir del satellite comporta una variazione nel cammino d'onda, che però non porta informazione sulla topografia ma solo una maggiore complessità nella elaborazione del dato di fase; è quindi necessario eliminare tale contributo in modo tale che le eventuali differenze di fase siano dovute effettivamente solo a differenze altimetriche[123];

$\phi_{topography}$ è il contributo di fase dovuto alla variazione altimetrica e quindi alla topografia; tale contributo viene rimosso sottraendo il DEM (Digital Elevation Model) dell'area alla fase registrata dall'immagine, tanto maggiore sarà la risoluzione del modello di elevazione tanto migliore sarà la rimozione del relativo contributo di fase;

$\phi_{atmosphere}$ è il contributo relativo alla differenza di propagazione dell'onda causata da modificazioni nella troposfera e nella ionosfera; tale contributo può essere minimizzato perando una verifica accurata sui parametri orbitali del sensore di acquisizione;

ϕ_{motion} è il contributo dovuto a movimenti imprevisti della piattaforma su cui si trova il sensore durante il volo. Tale contributo èprossimo allo zero nel caso di sensore

ospitati a bordo di piattaforme satellitari, mentre notevolemnte maggiori nel caso di piattaforme aeree ed in entrambi i casi di difficile modellazione e correzione;

ϕ_{noise} è il contributo del segnale retrodiffuso al sensore dai bersagli; può essere modellato e stimato ma non totalmente soppresso;

$\phi_{decorrelation}$ è sostanzialmente il contributo rimanente e in pratica include la componente non corretta di tutti i precedenti contributi di fase.

Proprio per questa variegata e ampia gamma di parametri che potenzialmente possono contribuire alla perdita di correlazione nella immagine di coerenza, la *Coherence Change Detection* rimane una analisi di tipo strettamente qualitativo; all'interno invece della interferometria differenziale vera e propria, essendo orientata alla identificazione di possibili fenomeni di subsidenza o di fenomeni franosi, tali parametri vengono necessariamente sottoposti ad una valutazione di tipo quantitativo.
Nella CCD l'attenzione è quindi focalizzata sulla componente di Decorrelazione: si assume infatti che una diminuzione di coerenza nel pixel sia dovuta ad un sottile ma presente cambiamento tra le due immagini alla scala della lunghezza d'onda emessa dal sensore[72]. Nella interpretazione dei risultati va operata però particolare attenzione in quanto esistono un vasto numero di fattori naturali che contribuiscono inoltre alla perdita di coerenza della scena, quali ad esempio:

- la crescita delle coltivazioni in un'area agricola provoca una lieve decorrelazione;
- l'aratura dei campi decorrelaziona completamente due acquisizioni;
- la presenza di vento in aree boscate comporta uno spostamento nella direzione di orientamento del fogliame provocando una diminuzione della correlazione;

Inoltre, la coerenza tra due immagini va ricordato è funzione della lunghezza d'onda emessa dal sensore: essa aumenta all'aumentare della lunghezza d'onda.

[72] Ciò nonostante, come mensionato, la variazione include i contributi delle altre compomenti di fase non modellati prima descritti.

Sulla base di tali considerazioni si è proceduto quindi, mediante il software Erdas 2010, ad effettuare una valutazione della decorrelazione presente nelle nostre immagini tenendo presente che la presenza di eventuali aree interessate da una copertura d'acqua anomala generano, sulla base dei principi fisici e geometri del SAR, una totale perdita dell'informazione di fase. Ciò avviene come già detto perché dall'interazione segnale-allagamento si genera una riflessione speculare dell'onda emessa secondo un angolo pari a quello di incidenza, con relativa mancanza di retrodiffusione al sensore. Tale fenomeno, dovuto al perfetto grado di liscivazione della superficie, risulta particolarmente accentuato proprio per la natura stessa della superficie liscia sul quale l'onda incide: trattandosi di acqua si assisterà ad un incremento esponenziale della costante dielettrica che agisce inoltre come fenomeno destrutturante del segnale incidente sul bersaglio. Complessivamente quindi si può dire che nel momento in cui l'onda emessa dal sensore colpisce un'area coperta d'acqua il segnale di fase registrato dal sensore per i rispettivi pixel dell'immagine sarà prossimo allo zero. Nel dettaglio si è proceduto valutando il rapporto tra le geometrie di acquisizione delle due immagini a disposizione. Da adesso in poi, per semplicità, si farà riferimento all'immagine del 29/08/2010 come "Reference" in quanto ripresa pre-evento e a quella del 01/11/2010 come "Match" in quanto rappresentativa dell'evento in corso.

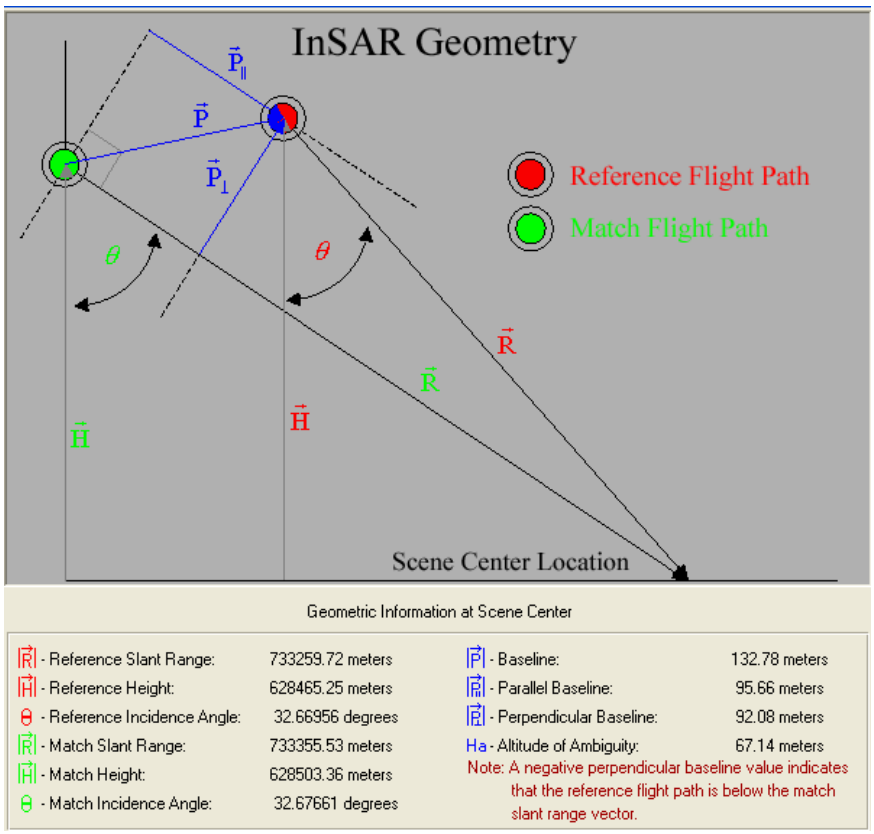


Fig.6.21- Confronto tra le caratteristiche geometriche della coppia di immagini – Erdas 2010 "Demostration Mode"

Come è possibile osservare dall'immagine sopra riportata le due immagini sono state entrambe acquisite secondo un angolo di incidenza di circa 32.6 ° e una baseline di soli 1132.78 mt: tale valore, essendo al di sotto della soglia critica, ci permette di valutarle positivamente come "Coppia interferometrica" e quindi di poter auspicare in risultati soddisfacenti in virtù del fatto che la correlazione tra le immagini cresce al decrescere della *baseline*. In tal modo il campo dei fenomeni responsabili dell'eventuale decorrelazione tra le immagini viene notevolmente limitato.

Dopodichè si è ricorso al tool "Coherence Change Detection", il quale richiede in input le immagini SAR in formato in complesso (SLC) in coordinate proprie della ripresa del sensore: se le immagini sono geocodificate o ortorettificate l'algoritmo non può essere apllicato.

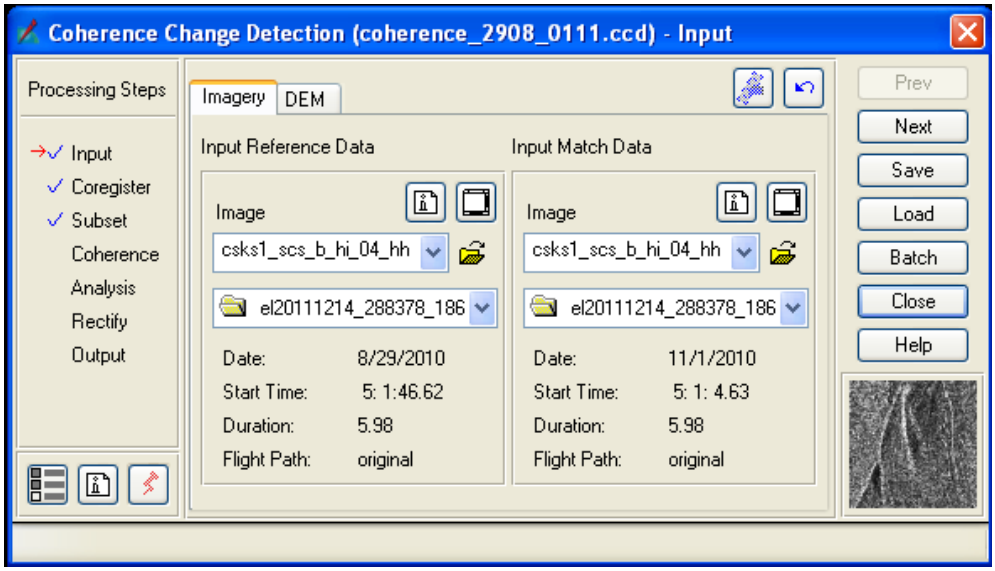


Fig.6.22 - Interfaccia del tool di "Coherence Change Detection", Erdas 2010 "Demostration Mode"

Il tool produce come risultato una immagine di coerenza e una immagine delle variazione in RGB dopo aver proceduto a:

- analizzare le due immagini Reference (29/08/2010) e Match (01/11/2010);
- sottrarre alla fase il contributo della topografia mediante l'ausilio in input del DEM con cella a 25 mt fornitoci dalla Regione Veneto;
- coregistrare le immagini ossia ad allineare l'immagine Match (Slave) rispetto alla Reference (Master) sulla base dei relativi parametri orbitali (SAR Node). L'obiettivo della procedura di coregistrazione è quello di affinare l'allineamento delle due scene nella geometria ground range. Essa può evvenire o in modo automatico o mediante l'individuazione manuale di GCP (Ground Control Point), come per una qualsiasi

procedura di georeferenziazione. Nel nostro caso la scelta ricade sulla modalità automatica dato che le nostre finalità non sono di tipo interferometrico, bensì limitate ad un'analisi multi-temporale, rispetto alla quale la procedura automatica viene considerata in letteratura soddisfacente;

- stimare la coerenza tra le due immagini fornendo in output un immagine in scala di grigi in cui a ciascun pixel corrisponde un DN compreso tra 0 e 1 sulla base di una finestra mobile (Kernel) di dimensioni specificate dall'utente;
- conversione dell'immagine di coerenza in una "mappa di cambiamento" basata sulla differenza di intensità tra le due immagini. Essa viene fornita, a secondo delle esigenze, in scala di grigi, RGB (Red, Green, Blue) o IHS (Intensity, Hue, Saturation). L'immagine a colori RGB contiene per ciascuna banda le seguenti informazioni:
    - R = Immagine di coerenza
    - G = Immagine di Intensità media
    - B = Immagine di differenza di Intensità

  Nella stessa fase viene applicato un filtro Local Regions[73] finalizzato alla riduzione della varianza di regioni di pixel omogenei senza però intervenire drasticamente sui bordi. L'applicazione di tale filtro permette la rimozione di piccole anomalie locali (1-2 pixels) presumibilmente dovute alla rumorosità del sistema e quindi non significativi dal punto di vista dell'informazione restituita;
- geocodifica dell'immagine di Coherence Change Detection in sistema di riferimento WGS 84 UTM Zona 32 Nord e ortorettifica rispetto al DTM a 25 mt;

L'immagine di coerenza ortorettificata e filtrata così come resituita dalla procedura viene riportata a seguire. Ricordiamo che essa assume valore di DN compresi tra 0 e 1 dove i due estremi sono identificati rispettivamente dai toni del nero (coerenza minima) fino a quelli del bianco (coerenza massima).

[73] Filtro Nagao-Matsuyama [96]

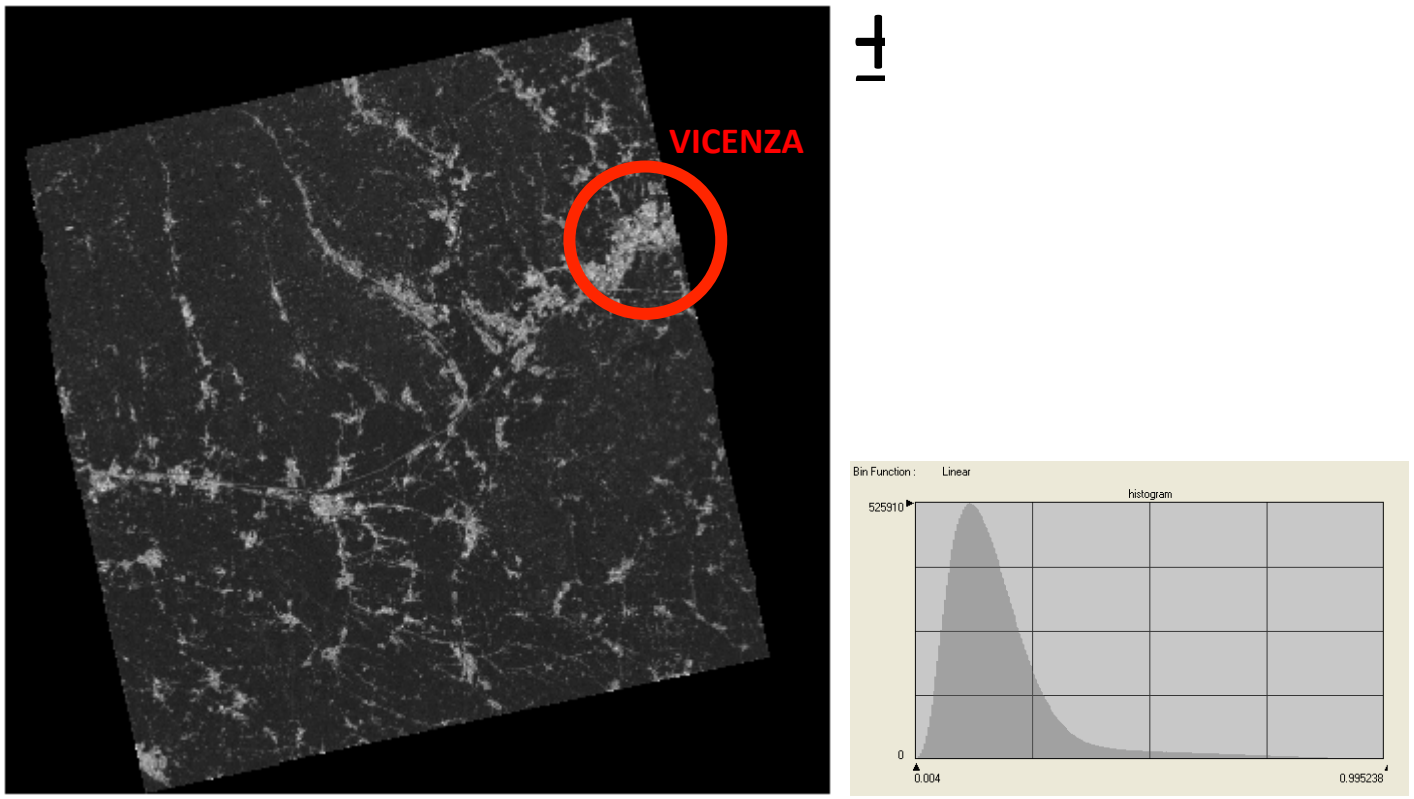


Fig.6.23 - Immagine di coerenza georeferenziata e relativo istogramma – Erdas 2010 “Demostration Mode”

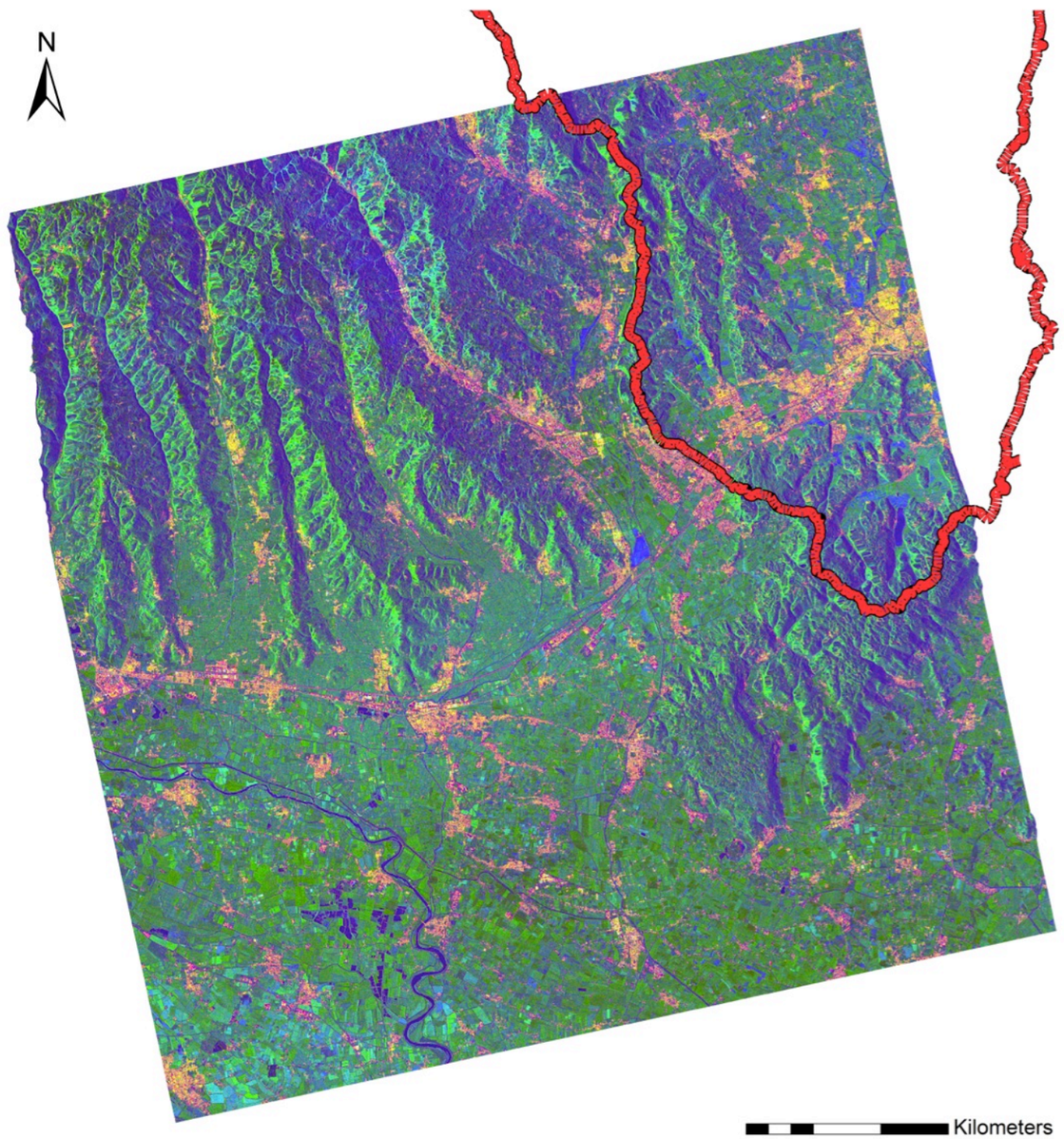
Già ad un primo e semplice approccio visivo si nota come la maggior parte del territorio sia interessato da una coerenza molto bassa che si oppone invece ad una coerenza molto elevata delle strutture insediative.

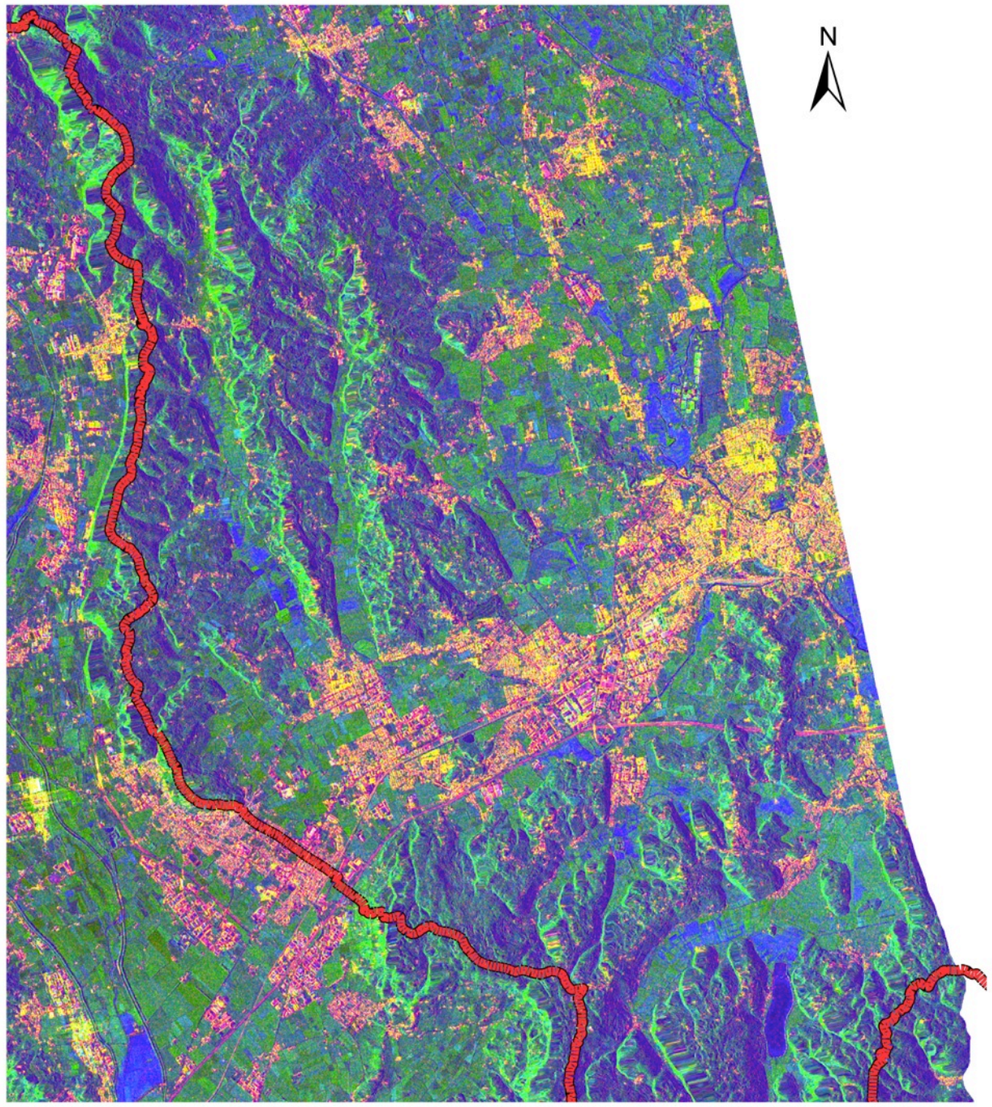
Di seguito è possibile apprezzare invece la relativa mappa di change detection nel suo complesso e per un dettaglio della città di Vicenza. Ricordiamo, come già anticipato, che essa risulta dalla combinazione di 3 bande, ognuna portatrice di una specifica informazione:

- Banda del Rosso, contenente valori di Coerenza interferometrica
- Banda del Verde, contenente valori di Intensità media
- Banda del Blu, contenente valori Variazione di Intensità

In tutti e tre i casi i valori sono compresi in un range tra 0 e 255. Risulta necessario sottolineare che la risoluzione spaziale dell’immagine di *change detection* ottenuta fornisce una risoluzione spaziale minore rispetto a quelle di input: si passa da una cella a 3m in input ad una a 8m in output.

La combinazione delle bande sopra descritte può essere effettuata a discrezione dell'operatore in base alle finalità di analisi che si propone: nel nostro caso manteniamo invariata la combinazione di partenza in quanto, a seguito di vari tentativi, è stata valutata come la migliore per l'identificazione visiva delle variazioni di intensità tipiche del fenomeno dai noi indagato. Sulla base di un primo approccio visivo l'attenzione viene catturata dalla presenza di aree di tono blu intenso, di dimensioni ampie ed omogenee, con una concentrazione spaziale maggiore proprio in prossimità della nostra area di analisi. La loro presenza e localizzazione ci porta subito a formulare l'ipotesi di eventuali allagamenti pre-rottura arginale o intensa saturazione del suolo dovuto alla severità dell'evento atmosferico in corso.





Legenda

Bacino idrografico Bacchiglione-Leogra-Timonchio (sezione di chiusura a Longare)

Carta di *Coherence Change Detection*
29/08/2010 - 01/11/2010

Red: Coerenza interferometrica
Green: Intensità media
Blue: Differenza di Intensità

Fig.6.24 - A destra: Mappa di change detection di coerenza tra le immagini Reference e Match; Fig.94 - a sinistra: dettaglio sul bacino idrografico di riferimento; Elaborazioni Erdas 2010/ ArcGis 10 Demo

A questo punto si proceduto all'estrazione dall'immagine delle sole aree di nostro interesse, ossia isolando tutte le aree in cui si registra una accentuata variazione di intensità. Ciò avviene ricorrendo allo strumento "Model Maker" di Erdas 2010, mediante il quale è possibile costruire modelli grafici utili alla realizzazione di processi di analisi spaziale ad hoc sulla base del linguaggio di modellazione "Spatial Model Language".

Il modello che costruiremo per l'estrazione delle aree potenzialmente già allagate o sature d'acqua avviene sfruttando la banda relativa alla variazione di intensità (banda del blu): mediante un'analisi dei valori assunti dalle aree con toni blu intenso nella banda del blu, si intentifica una soglia di valori utile ad isolare tali aree dal resto dell'immagine. Tale soglia viene stabilita nel valore di 180, ossia il valore minimo di variazione di intensità valutato come idoneo rispetto ai nostri scopi: tutti i pixel aventi valori al di sopra di tale soglia (da 181 a 255) verrano selezionati dall'immagine e registrati in una nuova immagine binaria (1 – allagamento; 0 - non allagamento).

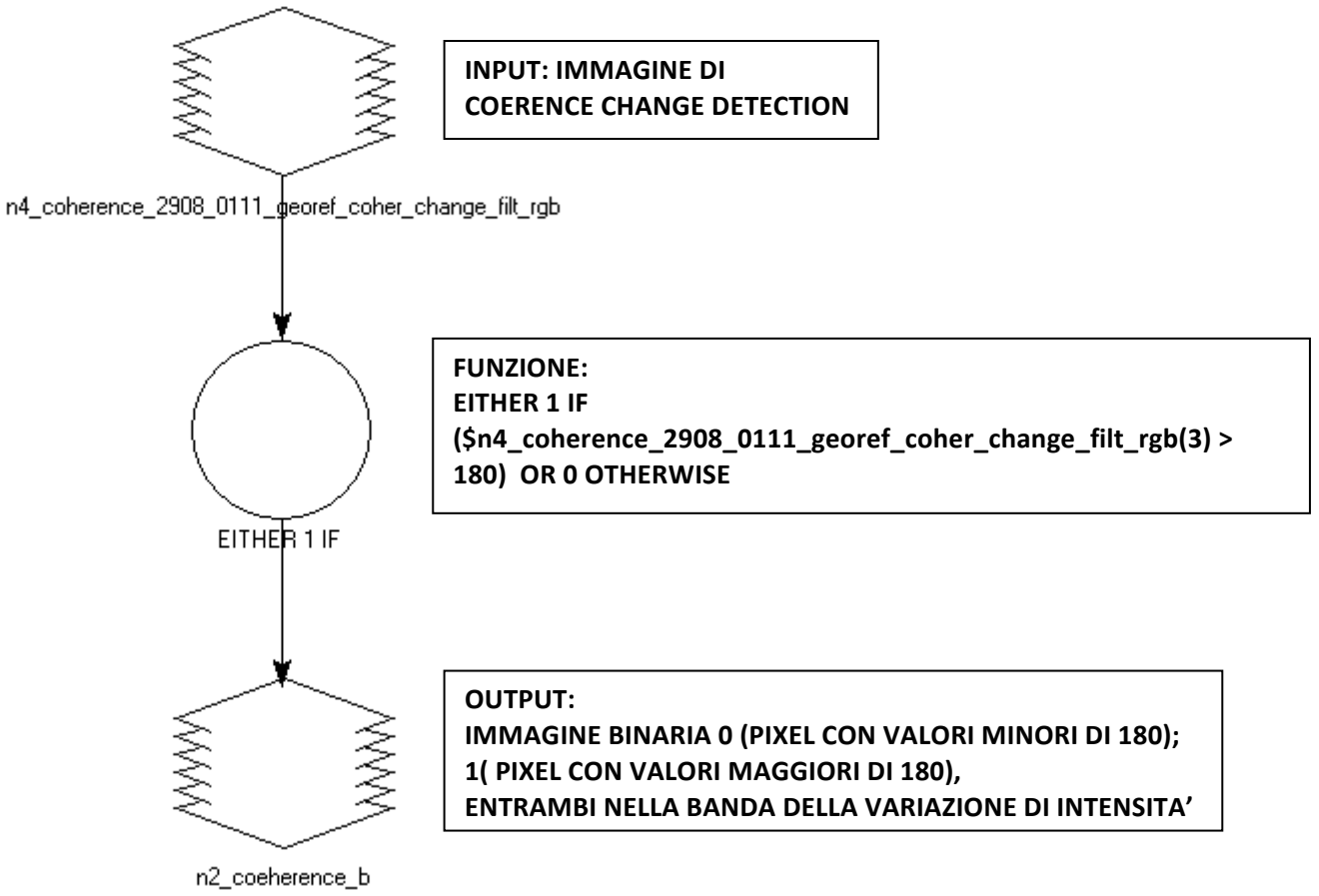


Fig.6.25 - Processo di estrazione delle aree di potenziale allagamento - Model Maker, Erdas 2010 "Demostration Mode"

Dopodichè procediamo ad applicare un filtro statistico spaziale di tipo mediano all'immagine di output: il filtro mediano opera assegnando sulla base di una finestra mobile di dimensioni definite dall'operatore e nella fattispecie 3x3, ad assegnare all'interno della finestra il valore mediano a ciascun pixel. Ricordiamo che la mediana, a differenza della media, consiste nel valore centrale della distribuzione, che coincide con la media esclusivamente nel caso di distribuzione normale.

Fig.96 - Dettaglio dell'immagine binaria pre applicazione filtro mediano

Fig.97 - Dettaglio dell'immagine binaria post applicazione filtro mediano

Come si può osservare il filtro applicato permette di ottenere una migliore definizione dei bordi per le aree di nostro interesse, eliminando gruppi inconsistenti di pixel. In questo caso l'applicazione di tale filtro risulta soddisfacente rispetto alle nostre finalità in quanto, pur essendoci una certa perdita di informazione, la migliore definizione dell'area in questo caso permette un apprezzamento visivo migliore. In questo caso infatti ciò che possiamo trovare sul territorio è esclusivamente qualcosa legato ad una situazione pre allagamento, quindi la finalità di tale analisi non è quella di intersecare eventualmente tali aree con il rilievo LiDAR bensì esclusivamente di poter conoscere meglio modalità e tempi in cui determinate dinamiche hanno portato all'innesco dell'evento di emergenza.

Le aree cosi individuate sono state poi sottoposte ad attività di fotointerpretazione in modo da affinare la ricerca delle eventuali aree di nostro interesse, eliminando ulteriori gruppi di pixel non significativi. L'immagine binaria è stata importata nel software ArcGis 10 (versione Demo per 60 giorni) e trasformata in un file poligonale vettoriale. I poligoni aventi valore di pixel uguale 1 corrispondono alle aree potenzialmente allagate da fotointerpretare. Dopodichè si è proceduto alla sovrapposizione di tali aree con la mappa delle pendenza relative al nostro

bacino di riferimento, in modo da selezionare solo le aree localizzate in zone vallive. L'attività di fotointerpretazione non viene eseguita per tutta l'immagine ma esclusivamente per il bacino idrografico di interesse ossia quelli del fiume Bacchiglione-Leogra-Timonchio.

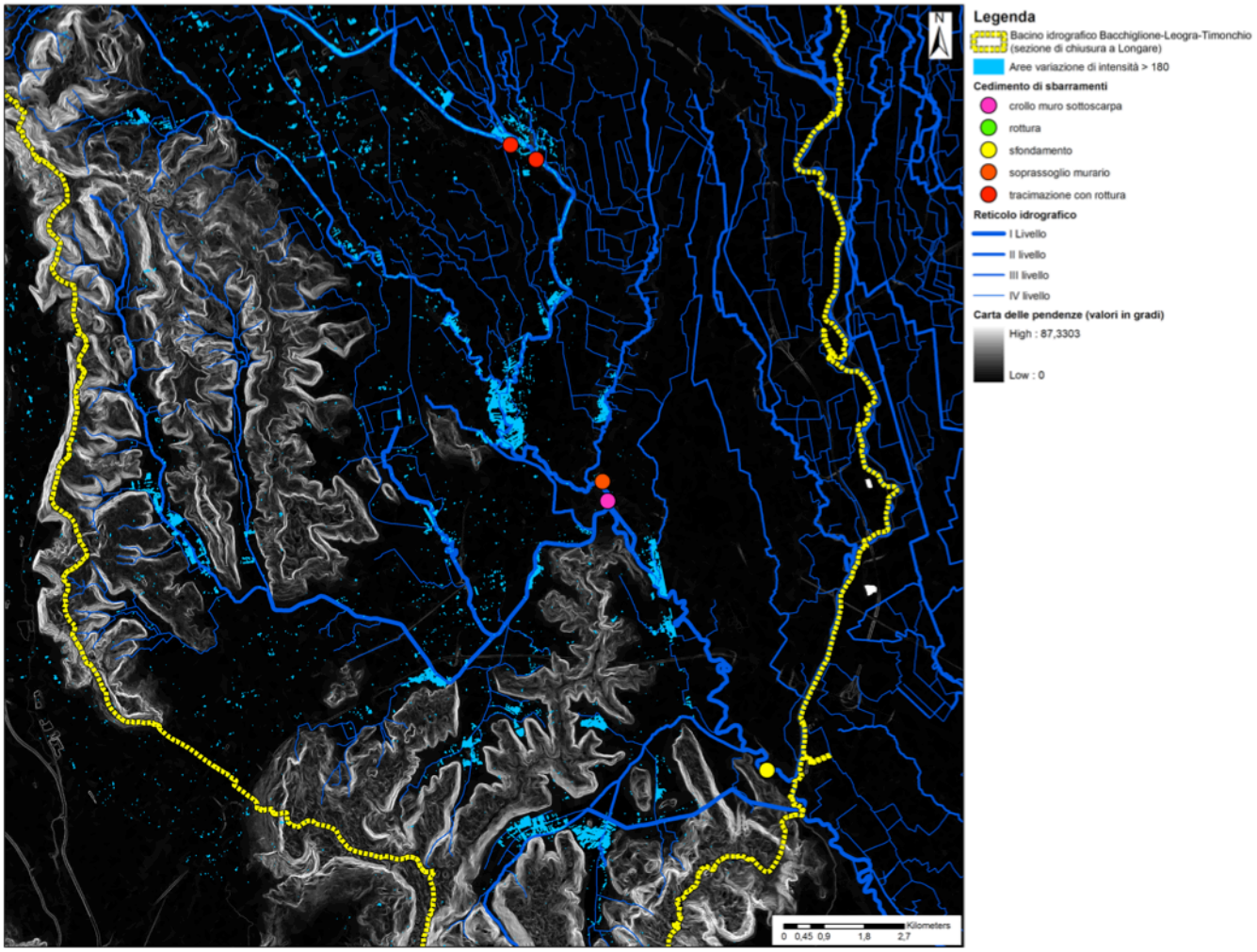


Fig.6.26 - Aree allagate al 01/11/2010, carta delle pendenze e localizzazione di cedimento di sbarramenti relativi all'evento di emergenza considerato – ArcGis 10 Demo

Gli areali di allagamento sono stati poi ulteriormente affinati sulla base del confronto con l'uso del suolo della Regione Veneto del 2009. Ciò che emerge è che le aree a maggiore decorrelazione e potenzialmente allagate si concentrano in ambito peri urbano a copertura prevalentemente agricola. Eventuali decorrelazioni in ambito strettamente urbano sono ritenute poco significative e difficilmente collegabili in modo oggettivo al fenomeno di allagamento.

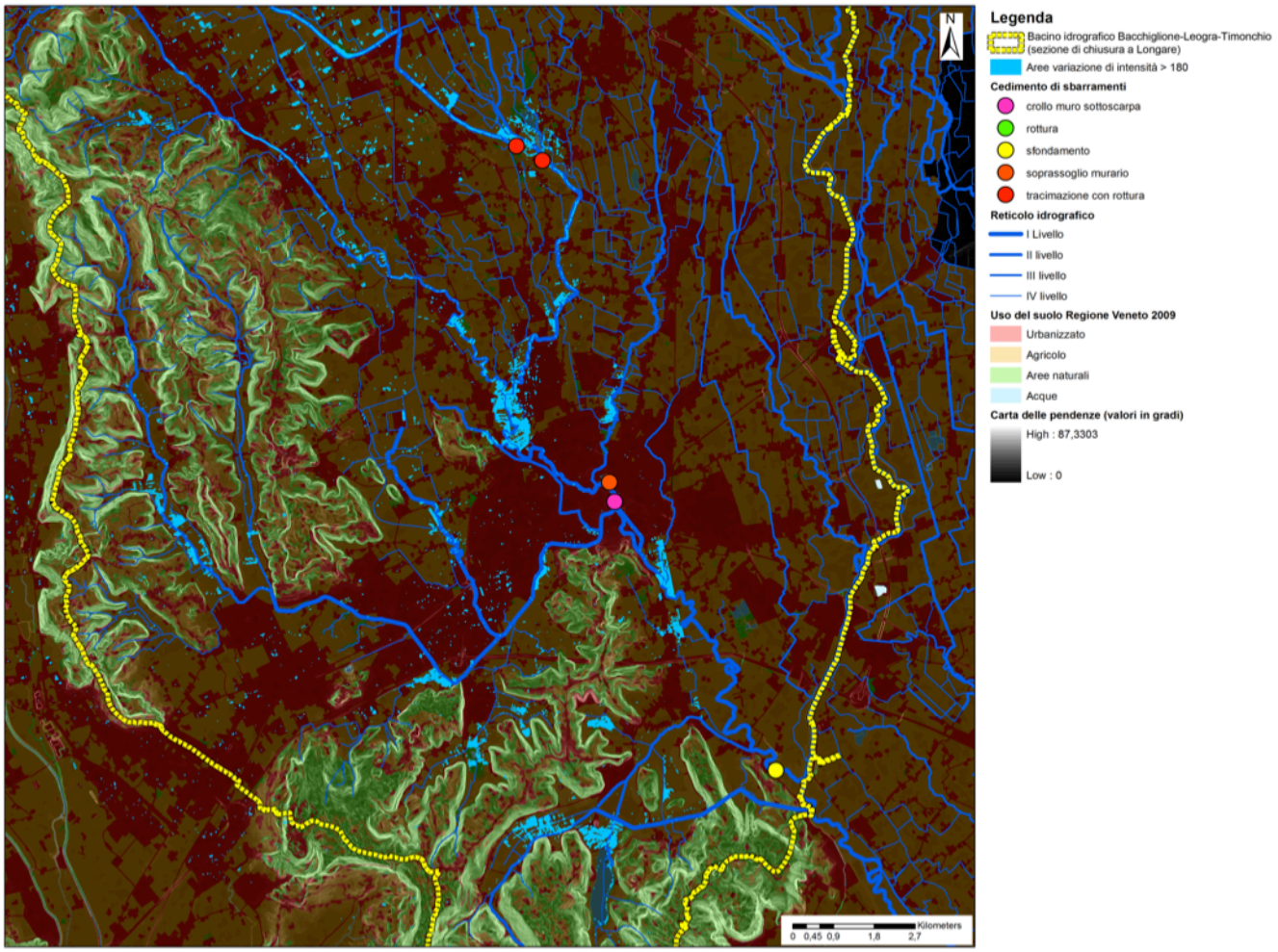


Fig.6.27 - Aree allagate al 01/11/2010 e uso del suolo Regione Veneto 2009 (livello 1) – ArcGis 10 Demo

La procedura di fotointerpretazione risulta a questo punto conclusa e si riporta a seguire un dettaglio dei principali allagamenti riscontrabili nella prima corona urbana al 01/11/2010.

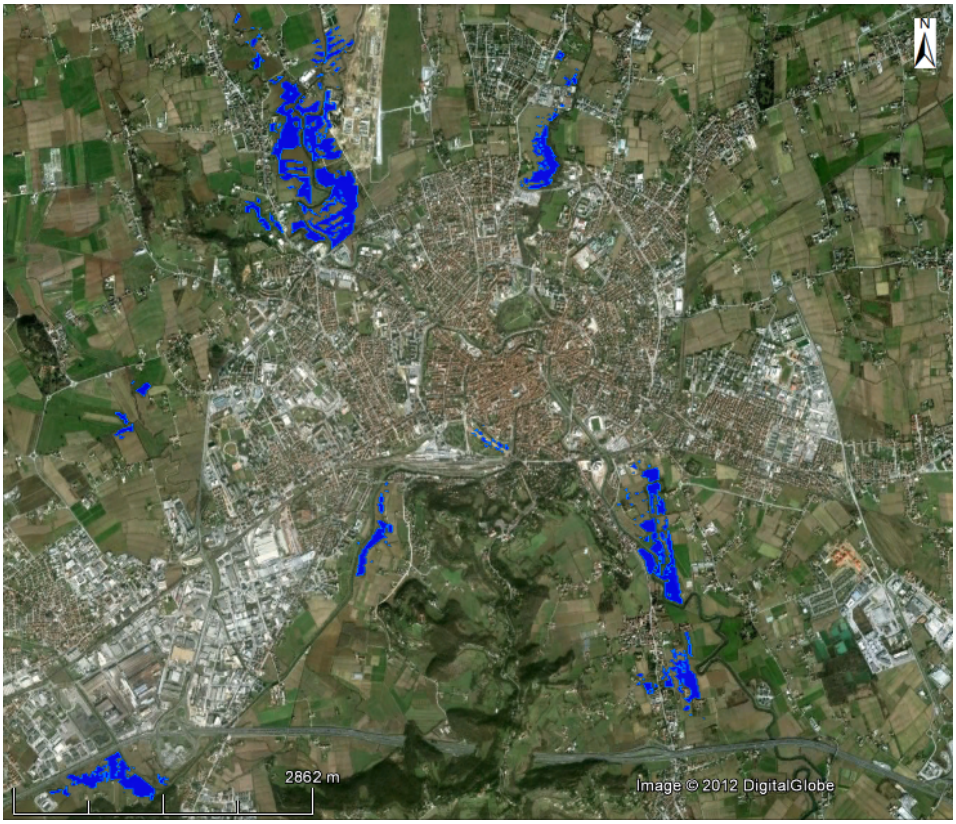


Fig.6.28 - Aree allagate al 01/11/2010 nella corona urbana di Vicenza su base Google Maps

6.1.4 Condizioni di allagamento al 03/11/2010: Classificazione supervisionata

L'immagine del 03/11/2010 come anticipato verrà sottoposta ad una procedura di classificazione parametrica di tipo supervisionato.

Essa, in quanto guidata o semi-automatica, si basa sull'ipotesi di conoscere a priori le classi di copertura al suolo già presenti nell'immagine per un numero sufficiente di pixel omogenei selezionati dall'operatore, chiamati pixel campione o *training sets,* funzionali all'addestramento del classificatore alla discretizzazione dell'intera immagine in aree con caratteristiche radiometriche omogenee. I pixel restanti, comunque in numero molto maggiore, vengono classificati in base alla loro somiglianza con i pixel campione in tutte le bande presenti nell'immagine. In base al tipo di distanza considerata si generano algoritmi di classificazione differenti.

Tra i possibili algoritmi di classificazione troviamo[84]:

- *Maximum Likelihood* (Massima Verosimiglianza): algoritmo di classificazione parametrica che opera assegnando ciascun pixel alla classe per cui è maggiore la probabilità condizionale, ossia i pixel vengono assegnati a una classe piuttosto che un'altra seguendo il criterio di massima propabilità di appartenenza. E' un

classificatore probabilistico che da informazioni circa la distribuzione dei dati in n dimensioni spettrali ma risulta rigido in quanto i pixel con valori di radianza molto diversi da quelli delle categorie inizialmente definite non vengono inseriti in nessuna classe e quindi non sono classificati. Il numero minimo di pixel campione è 10 per classe spettrale, ma in realtà 100 o più è il valore necessario se si auspica ad una classificazione efficace

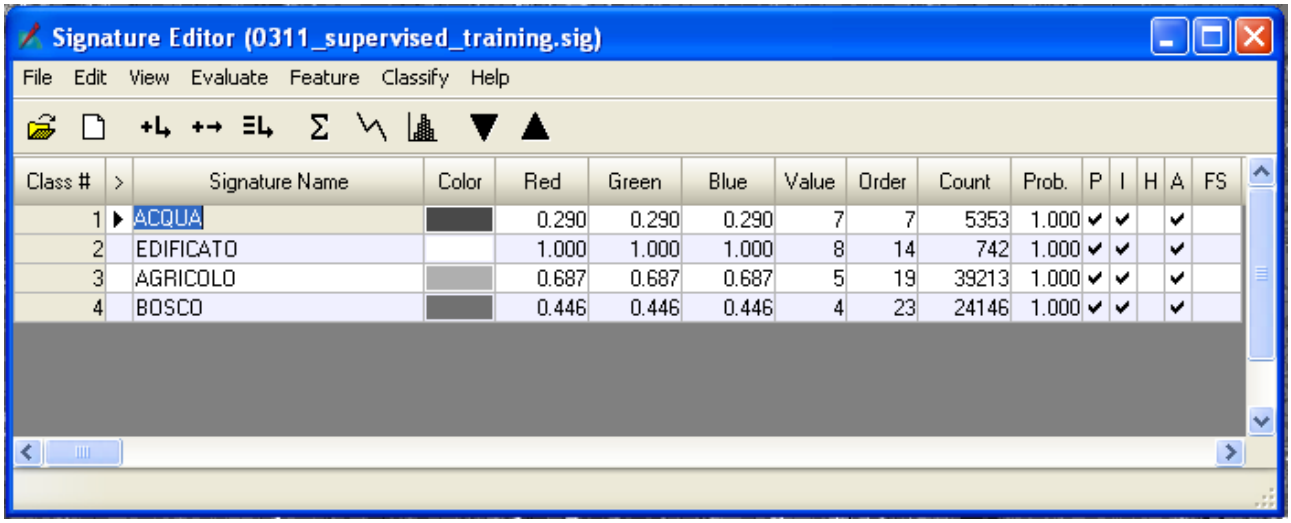
- *Minimum Distance* (Minima Distanza): metodo di classificazione parametrica in cui la direzione di distribuzione dei dati non è considerata per il fatto che sono calcolate solo le distanze tra le medie dei pixel e non le metrici di covarianza. Il numero di pixel per area campione può essere limitato dato che viene calcolato esclusivamente la loro media. Inoltre si assume che il modello sia simmetrico nello spazio spettrale, pertanto esso non dà alcuna indicazione sulla distribuzione dei dati all'interno degli n piani spettrali. Anche in questo caso si tratta quindi di un classificatore di tipo probabilistico in cui quindi ciascun pixel è assegnato alla classe con il valor medio più vicino alle coordinate del punto considerato.

- Parallelepipedo (Box): esso delimita delle regioni nello spazio multipettrale presentando alcune limitazioni per il fatto che la probabilità a priori non viene presa in considerazione dal calssificatore, i dati correlati tra loro danno origine ad una sovrapposizione spaziale tra due o più parallelepipedi ed infine i limiti di separazione tra le classi non sono lineari. Tale metodo risulta il più veloce ed iul più semplice dal punto di vista computazionale in quanto consiste nel ricoprire tutto lo spazio bi o multi-dimensionale da parallelepipedi in modo tale da evitare la possibilità di escludere eventuali pixel. Dopodichè viene effettuata una suddivisione delle classi tematiche sugli istogrammi delle n bande assegnado poi ciascun pixel al corrispondente parallelepipedo che definisce una certa classe. Tale algoritmo non da indicazioni sulla distribuzione dei dati negli n piani spettrali.

Il processo di classificazione supervisionata realizzato sull'immagine del 03/11/2010 può essere riassunto a seguire:

- registrazione dei valori numerici delle firme spettrali tipiche della categoria considerata. Tale attività viene effettuata selezionando per ciascuna area campione un

numero adeguato di pixel omogenei e ricorrendo al tool “Signature Editor” per attribuirgli ad uno specifico training set. Le diverse aree di training definite per ciascuna classe vengono conseguentemente accorpate in modo da formare un training set unico per ciascuna categoria di copertura del suolo;



Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order	Count	Prob.	P	I	H	A	FS
1	ACQUA		0.290	0.290	0.290	7	7	5353	1.000	✔	✔		✔	
2	EDIFICATO		1.000	1.000	1.000	8	14	742	1.000	✔	✔		✔	
3	AGRICOLO		0.687	0.687	0.687	5	19	39213	1.000	✔	✔		✔	
4	BOSCO		0.446	0.446	0.446	4	23	24146	1.000	✔	✔		✔	

Fig.6.29 - Collezione delle aree campione – tool “Signature Editor”, Erdas 2010 “Demostration Mode”

La definizione delle aree campione avviene nel rispetto di alcune regole:

- più l’insieme di addestramento è piccolo, più rappresentativi devono essere i campioni;
- attenzione all’autocorrelazione spaziale, con conseguente preferenza per l’acquisizione di pixel omogeni sparsi piuttosto che spazialmente localizzati. Ciò permette di fornire, a parità di numero di dati, maggiore informazione spaziale al classificatore;
- priorità di classificazione per le classi di maggior peso rispetto ad un dato scopo e, di conseguenza, considerazione per l’importanza relativa delle singole classi;
- l’area campione deve rappresentare l’intera variabilità del fenomeno.

Il passo successivo è quello di valutare la separabilità delle classi di *training* così definite e sulla base delle quali, ricordiamo, il calssificatore verrà istruito per la classificazione dell’intera immagine. Valutarne la separabilità significa calcolare la distanza statistica tra le diverse signature identificate così da identificare quanto sono distinte le classi l’una dall’altra e quindi limitare le ambiguità o eventuslmente eliminare o modificare prima della classificazione aree di training non idonee. Il tool “Evaluate separability” mette a disposizione più di una serie di

formule statistiche sulla base delle quali efefttuare la valutazione e tra le quali viene scelto il metodo della "*Divergence*", il quale è strettamente legato a valutare predfittivamente la bontà dei risultati derivanti da un algoritmo di classificazione di tipo "Maximum Likelihood" che useremo a seguire sulla nostra immagine. La divergenza consiste nel valutare la separabilità delle classi sulla base delle covarianze e della media dei vettori delle signature nelle bande prese in considerazione.

Signature Separability Listing

File: z:/condivisione_virtuale/11022012/classificazione/classificazione/supervised/0311_supervised_training.sig

Distance measure: Divergence

Using bands: 1 2

Taken 2 at a time

	Class
1	ACQUA
2	EDIFICATO
3	AGRICOLO
4	BOSCO

Best Minimum Separability

Bands	AVE	MIN	Class Pairs: 1: 2	1: 3	1: 4	2: 3	2: 4	3: 4
1 2	9991	5	51294	796	166	2556	5130	5

Best Average Separability

Bands	AVE	MIN	Class Pairs: 1: 2	1: 3	1: 4	2: 3	2: 4	3: 4
1 2	9991	5	51294	796	166	2556	5130	5

Fig.6.30 - Separabilità delle classi definite mediante l'identificazione delle aree campione – Report della "Signature Separability", Erdas 2010 "Demostration Mode"

Com'è possibile osservare, la separabilità delle signature viene valutata a coppie di due all'interno di entrambe le bande (immagine de-speckled e mappa di tessitura) che compongono l'immagine da classificare. Emerge una separabilità critica soprattutto tra la classe 3 e 4, ossia tra la classe "Agricolo" e "Bosco", leggermente migliore invece quella tra "Acqua" e "Bosco".

Tale ambiguità risulta difficilmente eliminabile proprio a causa della natura stessa dell'immagine SAR in termini di effetti geometrici e radiometrici limitatamente migliorabili, nonché da una risoluzione spaziale soprattutto in ambito urbano non al limite massimo. Ricordiamo infatti che il sensore COSMO fornisce immagini in risoluzione a terra anche di un 1 mt in modalità Spotlight 2, assolutamente auspicabile qualora si voogliano trattare dinamiche in ambito urbano.

A questo punto si è proceduto ad avviare l'algoritmo di classificazione supervisionata sulla base delle aree campione così definite e valutate. L'esito del processo "Supervised Classification" messo a disposizione dal software Erdas 2010 è riportato a seguire. La risoluzione geometrica dell'immagine classificate è pari a quella dell'immagine di input: 3mt x 3mt.

A questo punto si proceduto all'estrazione dall'immagine delle sole aree di nostro interesse, ossia isolando tutte le aree in cui si registra una accentuata variazione di intensità. Ciò avviene ricorrendo allo strumento "Model Maker" di Erdas 2010, mediante il quale è possibile costruire modelli grafici utili alla realizzazione di processi di analisi spaziale ad hoc sulla base del linguaggio di modellazione "Spatial Model Language".

Il modello che costruiremo per l'estrazione delle aree potenzialmente già allagate o sature d'acqua avviene sfruttando la banda relativa alla variazione di intensità (banda del blu): mediante un'analisi dei valori assunti dalle aree con toni blu intenso nella banda del blu, si intentifica una soglia di valori utile ad isolare tali aree dal resto dell'immagine. Tale soglia viene stabilita nel valore di 180, ossia il valore minimo di variazione di intensità valutato come idoneo rispetto ai nostri scopi: tutti i pixel aventi valori al di sopra di tale soglia (da 181 a 255) verrano selezionati dall'immagine e registrati in una nuova immagine binaria (1 – allagamento; 0 - non allagamento).

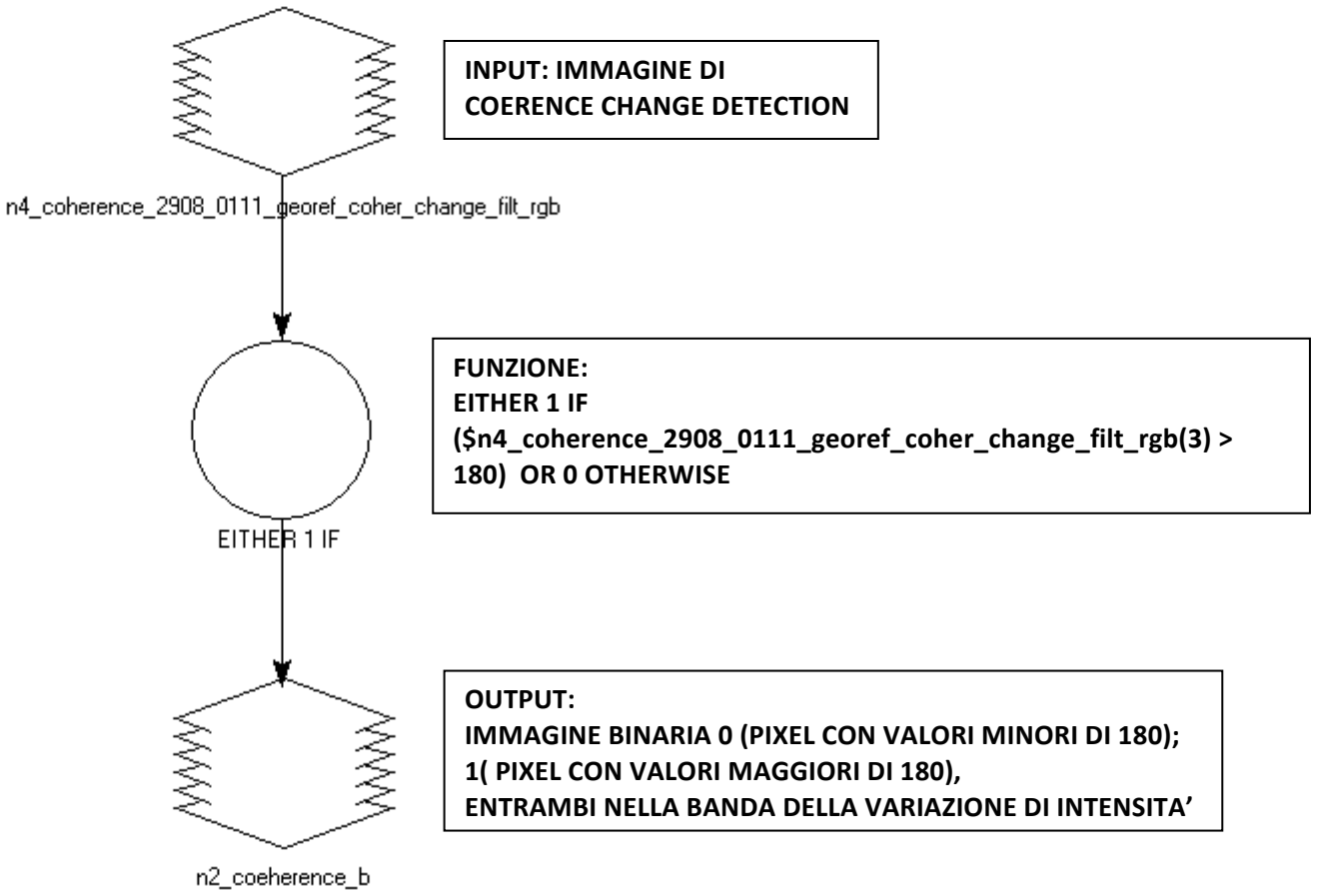


Fig.6.25 - Processo di estrazione delle aree di potenziale allagamento - Model Maker, Erdas 2010 "Demostration Mode"

Dopodichè procediamo ad applicare un filtro statistico spaziale di tipo mediano all'immagine di output: il filtro mediano opera assegnando sulla base di una finestra mobile di dimensioni definite dall'operatore e nella fattispecie 3x3, ad assegnare all'interno della finestra il valore mediano a ciascun pixel. Ricordiamo che la mediana, a differenza della media, consiste nel valore centrale della distribuzione, che coincide con la media esclusivamente nel caso di distribuzione normale.

Fig.96 - Dettaglio dell'immagine binaria pre applicazione filtro mediano

Fig.97 - Dettaglio dell'immagine binaria post applicazione filtro mediano

Come si può osservare il filtro applicato permette di ottenere una migliore definizione dei bordi per le aree di nostro interesse, eliminando gruppi inconsistenti di pixel. In questo caso l'applicazione di tale filtro risulta soddisfacente rispetto alle nostre finalità in quanto, pur essendoci una certa perdita di informazione, la migliore definizione dell'area in questo caso permette un apprezzamento visivo migliore. In questo caso infatti ciò che possiamo trovare sul territorio è esclusivamente qualcosa legato ad una situazione pre allagamento, quindi la finalità di tale analisi non è quella di intersecare eventualmente tali aree con il rilievo LiDAR bensì esclusivamente di poter conoscere meglio modalità e tempi in cui determinate dinamiche hanno portato all'innesco dell'evento di emergenza.

Le aree cosi individuate sono state poi sottoposte ad attività di fotointerpretazione in modo da affinare la ricerca delle eventuali aree di nostro interesse, eliminando ulteriori gruppi di pixel non significativi. L'immagine binaria è stata importata nel software ArcGis 10 (versione Demo per 60 giorni) e trasformata in un file poligonale vettoriale. I poligoni aventi valore di pixel uguale 1 corrispondono alle aree potenzialmente allagate da fotointerpretare. Dopodichè si è proceduto alla sovrapposizione di tali aree con la mappa delle pendenza relative al nostro

bacino di riferimento, in modo da selezionare solo le aree localizzate in zone vallive. L'attività di fotointerpretazione non viene eseguita per tutta l'immagine ma esclusivamente per il bacino idrografico di interesse ossia quelli del fiume Bacchiglione-Leogra-Timonchio.

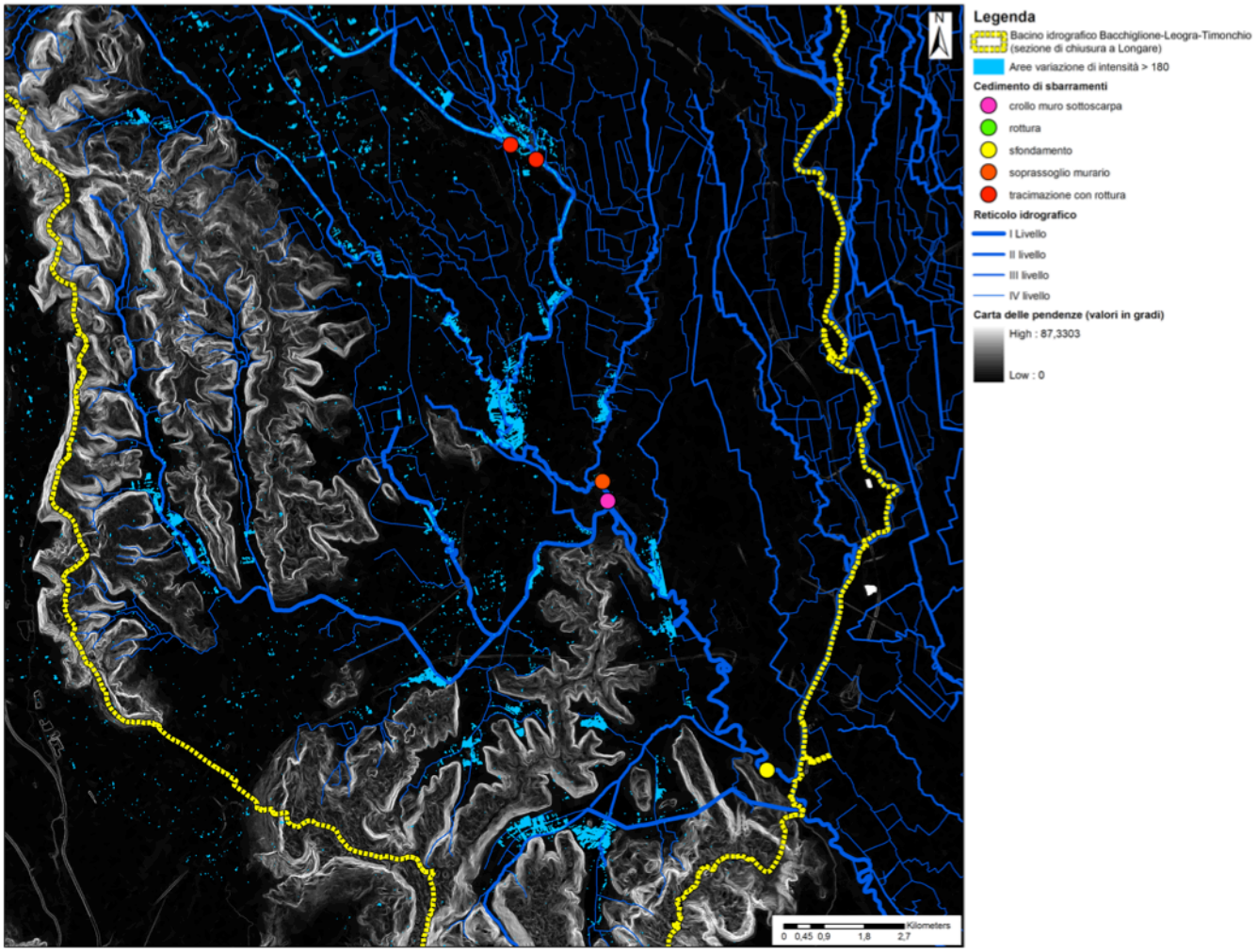


Fig.6.26 - Aree allagate al 01/11/2010, carta delle pendenze e localizzazione di cedimento di sbarramenti relativi all'evento di emergenza considerato – ArcGis 10 Demo

Gli areali di allagamento sono stati poi ulteriormente affinati sulla base del confronto con l'uso del suolo della Regione Veneto del 2009. Ciò che emerge è che le aree a maggiore decorrelazione e potenzialmente allagate si concentrano in ambito peri urbano a copertura prevalentemente agricola. Eventuali decorrelazioni in ambito strettamente urbano sono ritenute poco significative e difficilmente collegabili in modo oggettivo al fenomeno di allagamento.

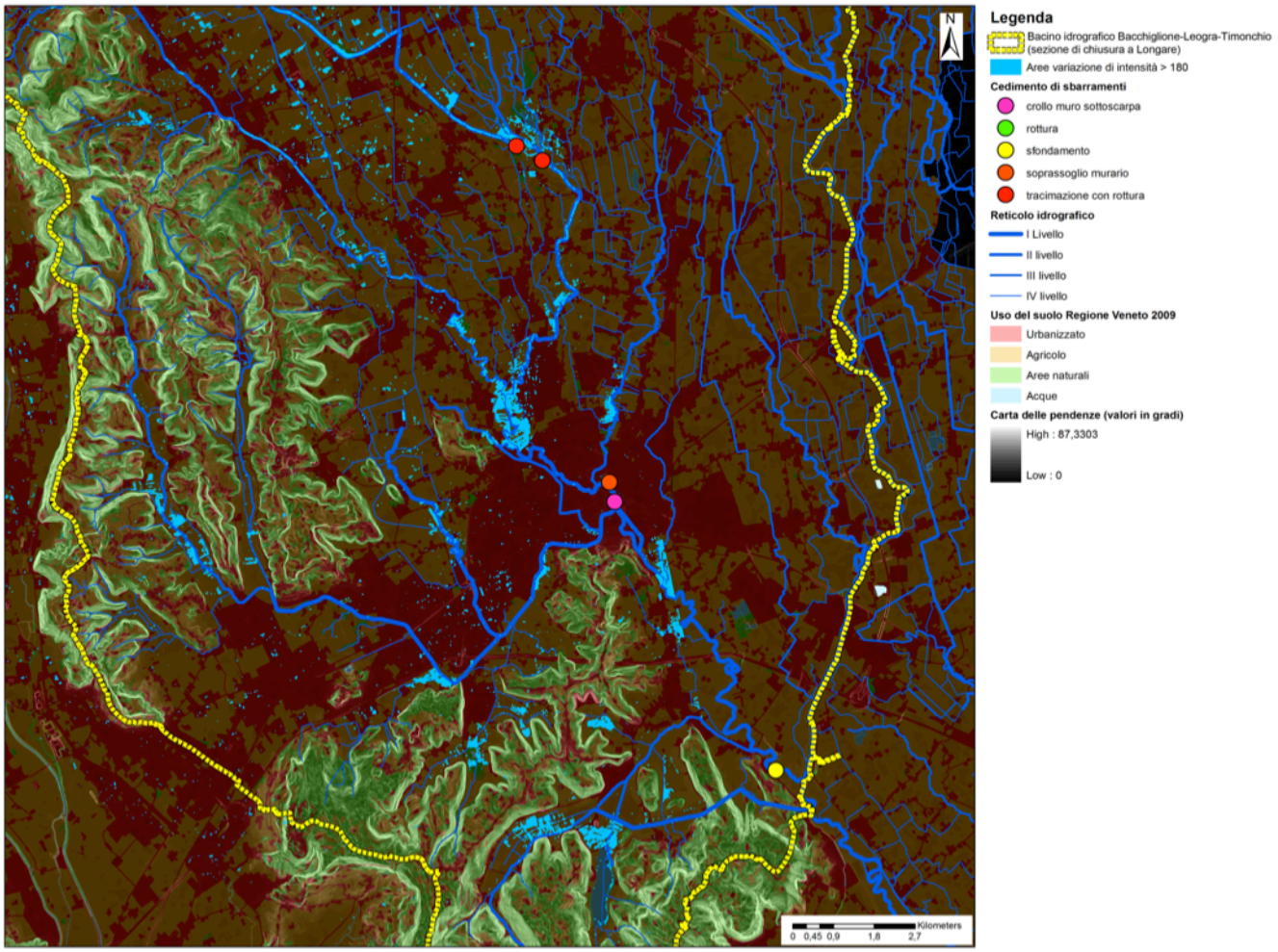


Fig.6.27 - Aree allagate al 01/11/2010 e uso del suolo Regione Veneto 2009 (livello 1) – ArcGis 10 Demo

La procedura di fotointerpretazione risulta a questo punto conclusa e si riporta a seguire un dettaglio dei principali allagamenti riscontrabili nella prima corona urbana al 01/11/2010.

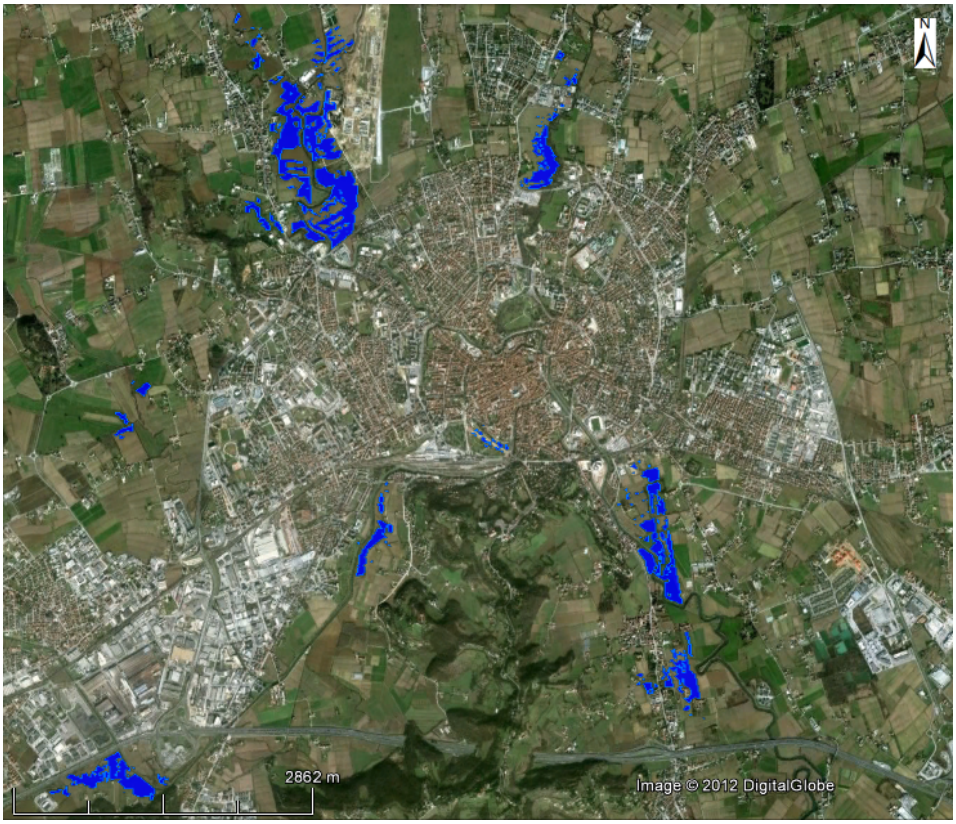


Fig.6.28 - Aree allagate al 01/11/2010 nella corona urbana di Vicenza su base Google Maps

6.1.4 Condizioni di allagamento al 03/11/2010: Classificazione supervisionata

L'immagine del 03/11/2010 come anticipato verrà sottoposta ad una procedura di classificazione parametrica di tipo supervisionato.

Essa, in quanto guidata o semi-automatica, si basa sull'ipotesi di conoscere a priori le classi di copertura al suolo già presenti nell'immagine per un numero sufficiente di pixel omogenei selezionati dall'operatore, chiamati pixel campione o *training sets,* funzionali all'addestramento del classificatore alla discretizzazione dell'intera immagine in aree con caratteristiche radiometriche omogenee. I pixel restanti, comunque in numero molto maggiore, vengono classificati in base alla loro somiglianza con i pixel campione in tutte le bande presenti nell'immagine. In base al tipo di distanza considerata si generano algoritmi di classificazione differenti.

Tra i possibili algoritmi di classificazione troviamo[84]:

- *Maximum Likelihood* (Massima Verosimiglianza): algoritmo di classificazione parametrica che opera assegnando ciascun pixel alla classe per cui è maggiore la probabilità condizionale, ossia i pixel vengono assegnati a una classe piuttosto che un'altra seguendo il criterio di massima propabilità di appartenenza. E' un

classificatore probabilistico che da informazioni circa la distribuzione dei dati in n dimensioni spettrali ma risulta rigido in quanto i pixel con valori di radianza molto diversi da quelli delle categorie inizialmente definite non vengono inseriti in nessuna classe e quindi non sono classificati. Il numero minimo di pixel campione è 10 per classe spettrale, ma in realtà 100 o più è il valore necessario se si auspica ad una classificazione efficace

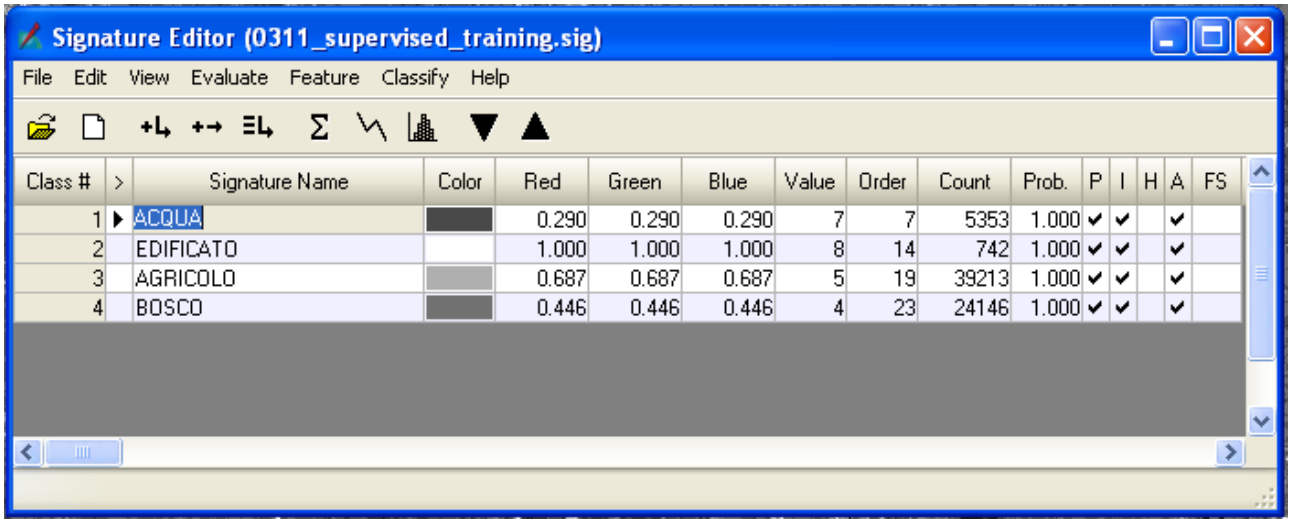
- *Minimum Distance* (Minima Distanza): metodo di classificazione parametrica in cui la direzione di distribuzione dei dati non è considerata per il fatto che sono calcolate solo le distanze tra le medie dei pixel e non le metrici di covarianza. Il numero di pixel per area campione può essere limitato dato che viene calcolato esclusivamente la loro media. Inoltre si assume che il modello sia simmetrico nello spazio spettrale, pertanto esso non dà alcuna indicazione sulla distribuzione dei dati all'interno degli n piani spettrali. Anche in questo caso si tratta quindi di un classificatore di tipo probabilistico in cui quindi ciascun pixel è assegnato alla classe con il valor medio più vicino alle coordinate del punto considerato.

- Parallelepipedo (Box): esso delimita delle regioni nello spazio multipettrale presentando alcune limitazioni per il fatto che la probabilità a priori non viene presa in considerazione dal calssificatore, i dati correlati tra loro danno origine ad una sovrapposizione spaziale tra due o più parallelepipedi ed infine i limiti di separazione tra le classi non sono lineari. Tale metodo risulta il più veloce ed iul più semplice dal punto di vista computazionale in quanto consiste nel ricoprire tutto lo spazio bi o multi-dimensionale da parallelepipedi in modo tale da evitare la possibilità di escludere eventuali pixel. Dopodichè viene effettuata una suddivisione delle classi tematiche sugli istogrammi delle n bande assegnado poi ciascun pixel al corrispondente parallelepipedo che definisce una certa classe. Tale algoritmo non da indicazioni sulla distribuzione dei dati negli n piani spettrali.

Il processo di classificazione supervisionata realizzato sull'immagine del 03/11/2010 può essere riassunto a seguire:

- registrazione dei valori numerici delle firme spettrali tipiche della categoria considerata. Tale attività viene effettuata selezionando per ciascuna area campione un

numero adeguato di pixel omogenei e ricorrendo al tool “Signature Editor” per attribuirgli ad uno specifico training set. Le diverse aree di training definite per ciascuna classe vengono conseguentemente accorpate in modo da formare un training set unico per ciascuna categoria di copertura del suolo;



Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order	Count	Prob.	P	I	H	A	FS
1	ACQUA		0.290	0.290	0.290	7	7	5353	1.000	✔	✔		✔	
2	EDIFICATO		1.000	1.000	1.000	8	14	742	1.000	✔	✔		✔	
3	AGRICOLO		0.687	0.687	0.687	5	19	39213	1.000	✔	✔		✔	
4	BOSCO		0.446	0.446	0.446	4	23	24146	1.000	✔	✔		✔	

Fig.6.29 - Collezione delle aree campione – tool “Signature Editor”, Erdas 2010 “Demostration Mode”

La definizione delle aree campione avviene nel rispetto di alcune regole:

- più l’insieme di addestramento è piccolo, più rappresentativi devono essere i campioni;
- attenzione all’autocorrelazione spaziale, con conseguente preferenza per l’acquisizione di pixel omogeni sparsi piuttosto che spazialmente localizzati. Ciò permette di fornire, a parità di numero di dati, maggiore informazione spaziale al classificatore;
- priorità di classificazione per le classi di maggior peso rispetto ad un dato scopo e, di conseguenza, considerazione per l’importanza relativa delle singole classi;
- l’area campione deve rappresentare l’intera variabilità del fenomeno.

Il passo successivo è quello di valutare la separabilità delle classi di *training* così definite e sulla base delle quali, ricordiamo, il calssificatore verrà istruito per la classificazione dell’intera immagine. Valutarne la separabilità significa calcolare la distanza statistica tra le diverse signature identificate così da identificare quanto sono distinte le classi l’una dall’altra e quindi limitare le ambiguità o eventuslmente eliminare o modificare prima della classificazione aree di training non idonee. Il tool “Evaluate separability” mette a disposizione più di una serie di

formule statistiche sulla base delle quali efefttuare la valutazione e tra le quali viene scelto il metodo della "*Divergence*", il quale è strettamente legato a valutare predfittivamente la bontà dei risultati derivanti da un algoritmo di classificazione di tipo "Maximum Likelihood" che useremo a seguire sulla nostra immagine. La divergenza consiste nel valutare la separabilità delle classi sulla base delle covarianze e della media dei vettori delle signature nelle bande prese in considerazione.

Signature Separability Listing

File: z:/condivisione_virtuale/11022012/classificazione/classificazione/supervised/0311_supervised_training.sig

Distance measure: Divergence

Using bands: 1 2

Taken 2 at a time

	Class
1	ACQUA
2	EDIFICATO
3	AGRICOLO
4	BOSCO

Best Minimum Separability

Bands	AVE	MIN	Class Pairs: 1: 2	1: 3	1: 4	2: 3	2: 4	3: 4
1 2	9991	5	51294	796	166	2556	5130	5

Best Average Separability

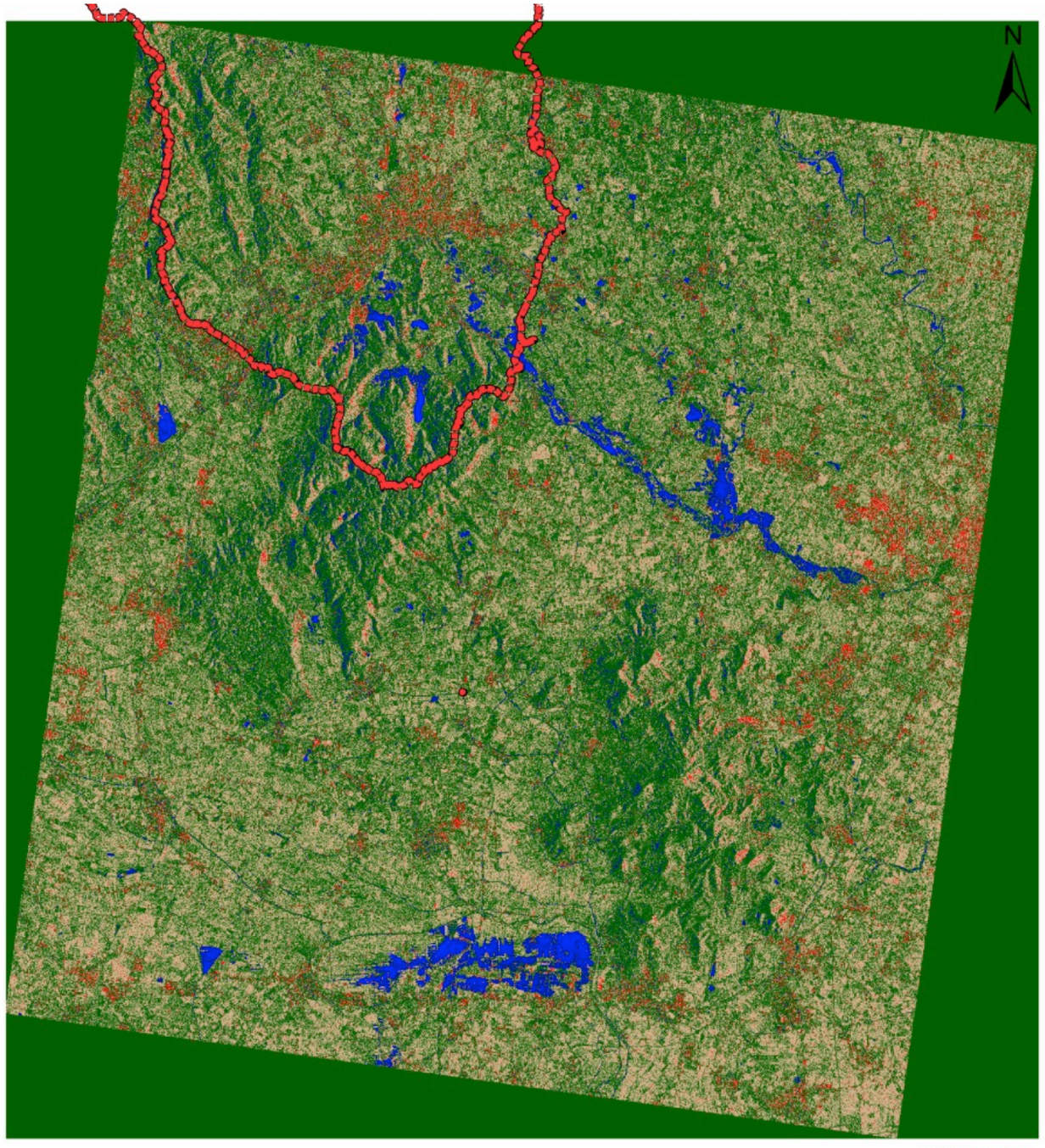
Bands	AVE	MIN	Class Pairs: 1: 2	1: 3	1: 4	2: 3	2: 4	3: 4
1 2	9991	5	51294	796	166	2556	5130	5

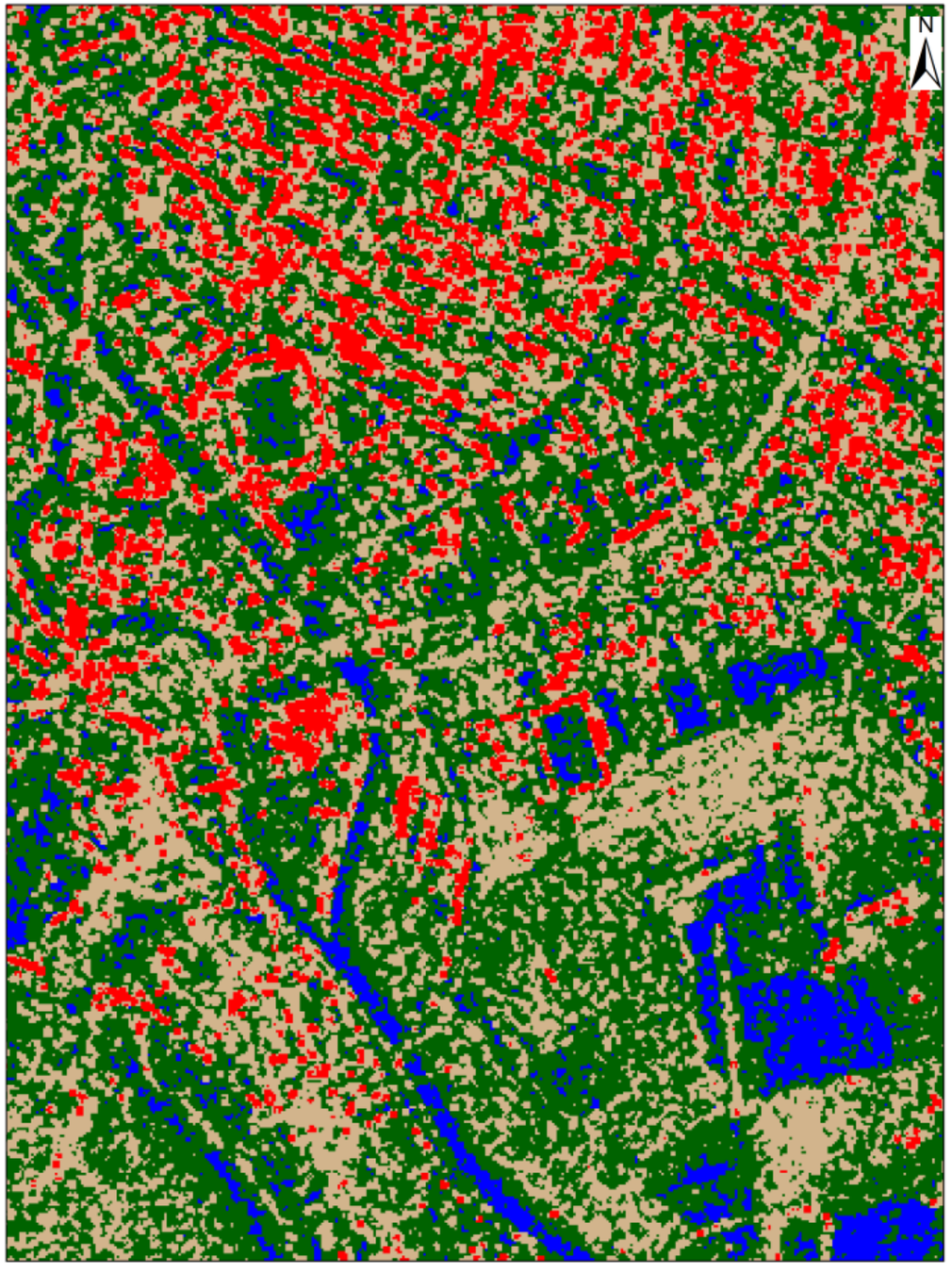
Fig.6.30 - Separabilità delle classi definite mediante l'identificazione delle aree campione – Report della "Signature Separability", Erdas 2010 "Demostration Mode"

Com'è possibile osservare, la separabilità delle signature viene valutata a coppie di due all'interno di entrambe le bande (immagine de-speckled e mappa di tessitura) che compongono l'immagine da classificare. Emerge una separabilità critica soprattutto tra la classe 3 e 4, ossia tra la classe "Agricolo" e "Bosco", leggermente migliore invece quella tra "Acqua" e "Bosco".

Tale ambiguità risulta difficilmente eliminabile proprio a causa della natura stessa dell'immagine SAR in termini di effetti geometrici e radiometrici limitatamente migliorabili, nonché da una risoluzione spaziale soprattutto in ambito urbano non al limite massimo. Ricordiamo infatti che il sensore COSMO fornisce immagini in risoluzione a terra anche di un 1 mt in modalità Spotlight 2, assolutamente auspicabile qualora si voogliano trattare dinamiche in ambito urbano.

A questo punto si è proceduto ad avviare l'algoritmo di classificazione supervisionata sulla base delle aree campione così definite e valutate. L'esito del processo "Supervised Classification" messo a disposizione dal software Erdas 2010 è riportato a seguire. La risoluzione geometrica dell'immagine classificate è pari a quella dell'immagine di input: 3mt x 3mt.





Kilometers
0 2 4 8 12

Meters
0 35 70 140 210 280 350

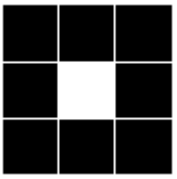
0311_supervised.img

Row	Histogram	Color	Red	Green	Blue	Opacity	Class_Names
3	0		0	0	0	0	
4	165588717		0	0.39	0	1	BOSCO
5	88363735		0.823529	0.705882	0.54902	1	AGRICOLO
6	0		0	0	0	0	
7	7505324		0	0	1	1	ACQUA
8	8205876		1	0	0	1	EDIFICATO

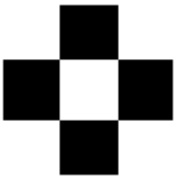
Fig.6.31 - A sinistra: classificazione supervisionata e bacino idrografico di riferimento; Fig.103 - a destra: dettaglio di classificazione supervisionata; in basso: legenda delle classi – Erdas 2010 “Demostration Mode”

Per migliorare l'output della nostra classificazione si procede facendo ricorso innanzitutto ad un filtro "CLUMP" che permette di indentificare gruppi contigui di pixel all'interno della stessa classe tematica. Per far ciò è necessario specificare quale sia il legame di vicinato (Connected Neighbors) ritenuto idoneo ai fini dell'individuazione dei gruppi omogenei di pixel:

- Corona 3x3 all'interno del quale il legame divicinato è stabilito con gli otto pixel aventi almeno un lato o un angolo in comune con il pxel centrale di riferiment



- Corona 3x3 all'interno del quale il legame di vicinato è stabilito con i 4 pixel aventi almeno un lato in comune con il pxel centrale di riferimento



L'algoritmo viene processato secondo la regola di vicinato degli 8 pixel sull'immagine classificata in modalità supervisionata.

Dopodichè si procede, mediante il tool "Eliminate" il quale permette, a partire dagli esiti dell'algoritmo di clup e mediante l'applicazione di un filtro *Focal Majority*, di eliminare un gruppo con numero di pixel minore di una certa soglia, sostituendo il valore di tali pixel con quello dei pixel di gruppo maggiore ad esso vicino. Questo al fine di eliminare pixel poco significativi e molto presumibilmente legati al rumor dell'immagine.

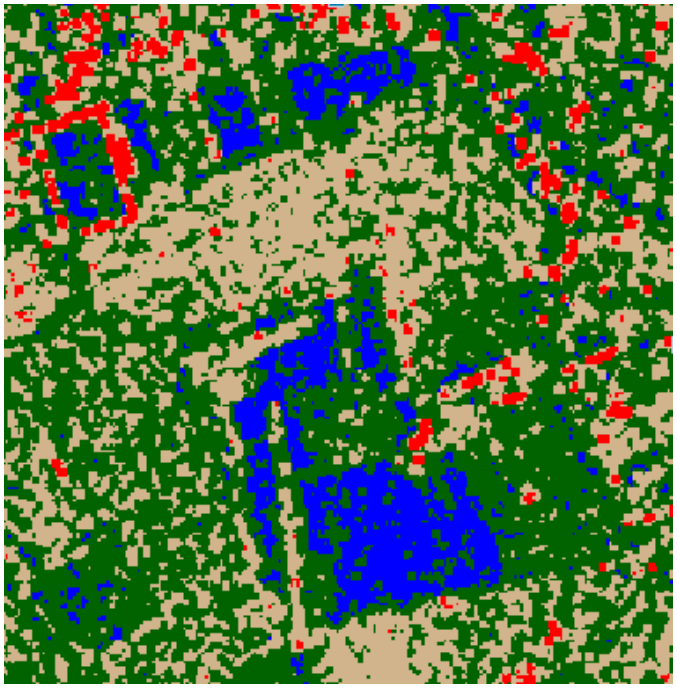


Fig.6.32 - Immagine classificata

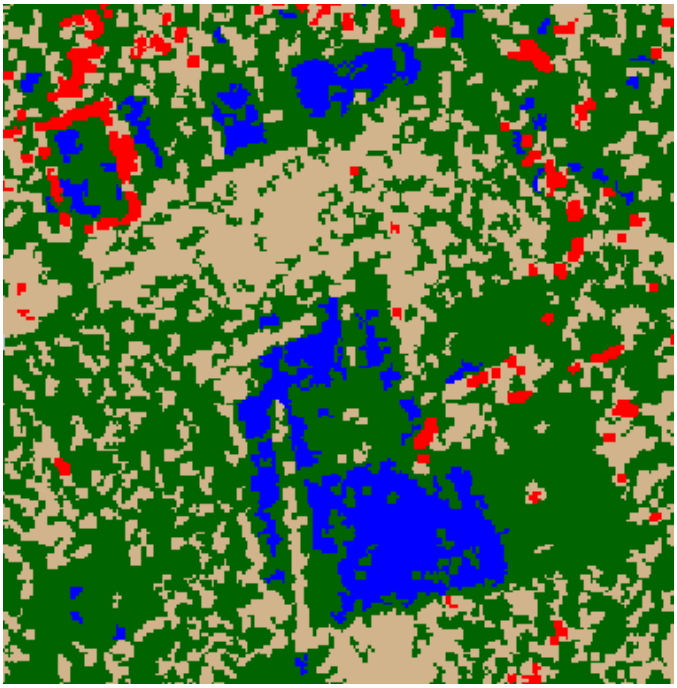


Fig.6.33 - Immagine classificata post applicazione dell'algoritmo "Eliminate" per gruppi inferiori a 9 pixel

La procedura semi-automatica di identificazione delle aree allagate si conclude qui. Già a questo punto possiamo dire che mentre i risultati sembrano essere abbastanza soddisfacenti in ambito peri-urbano, non altrettanto invece si dimostrano all'interno della coltre cittadina in senso stretto, dove la grande commistione di elementi dovuta alla complessita del sistema non permette di discriminare oggettivamente tra eventuali allagamenti e non.

Fig.6.34 - Ambito urbano - Allagamenti da classificazione supervisionata su base Goole Earth

In ogni caso si prosegue cercando di perfezionare i risultati mediante attività di fotointerpretazione, che ricordiamo è qualcosa di assolutamente soggettivo, legato alla

esperienza dell'operatore, alla sua conoscenza del territorio o di territori con fenomeni simili a quello in analisi, ai tempi e risolrse economiche a disposizione e fondamentale soprattutto, origina un prodotto che non è ripetibile proprio a fronte della sua soggettività.

L'attività di fotointerpretazione è stata realizzata impiegando il software ArcMap 10 in modalità DEMO di ESRI, all'interno del quale importiamo l'immagine esito della classificazione e dalla quale estraiamo esclusivamente le aree classificate come acqua (classe 7), per poi successivamente operare una trasformazione Raster to Vector in modo da ottenere i poligoni vettoriali delle aree in questione.

L'attività di fotointerpretazione è avvenuta concentrandoci esclusivamente sull'are di nostro interesse, tralasciando l'analisi delle restanti aree presenti sull'immagine. Nel dettaglio prima di tutto si è fatto ricorso ad una serie di dati di riferimento come ausilio nella caratterizzazione del nostro fenomeno. A tale fine si è prima di tutto considerato il DTM (Digital Elevation Model) fornito dalla Regione Veneto in modo da avere un riferimento topografico dell'area: sulla base di esso si è realizzata una carta delle pendenze (*Slope*) in modo da poter discriminare in modo più oggettivo acqua da "falsa-acqua", dato che l'allagamento presume la presenza di una depressione topografica che operi da invaso.

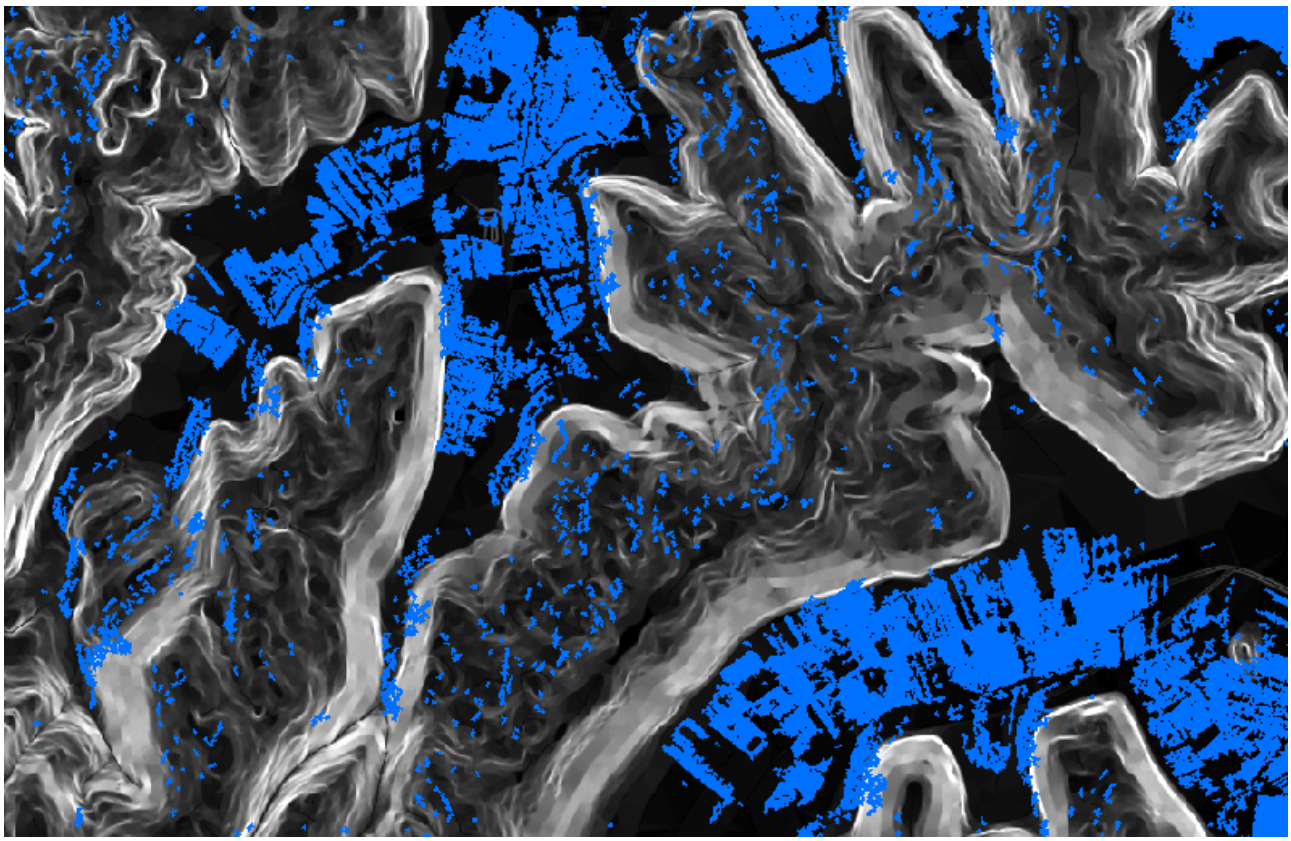


Fig.6.35 - Carta delle pendenze e aree allagate – Elaborazione su ArcGis 10 Demo

Grazie alla sovrapposizione della mappa delle pendenze e del DB della Copertura del Suolo del Veneto edizione 2009, si è verificato che molti gruppi di pixel con dimensioni minime, frammentate e di forma irregolare identificati come acqua ricadevano in realtà in aree a forte pendenza e in coincidenza di aree boscate. Mediante quindi una operazione di selezione spaziale si è proceduto ad eliminare dalla classificazione tutti i pixel della classe "acqua" che fossero contenuti all'interno della categoria aree boscate dell'uso dell'uso del suolo. La distribuzione di tali pixel è talmente frammentata da non risultare potenzialmente associabile al fenomemo di allagamento e come tale viene eliminata. E' ragionevole considerare che tali pixel, erroneamente classificati come "acqua", in realtà rappresentino chiome alberate sature di acqua in virtù delle condizioni meteo avverse ancora in corso al momento della ripresa.

Un ulteriore raffinamento della classificazione è avvenuto poi ricorrendo alla sovrapposizione dei corpi idrici presenti nell'area, quali reticolo idrografico e laghi in modo così da depurare la classificazione tutte quelle aree in cui la presenza di acqua è una invariante in quanto indipendente dall'evento di emergenza considerato. Allo stesso modo la sovrapposizione del reticolo stradale è stata informazione utile per eliminare tutte quei gruppi minimi di pixel classificati erroneamente come acqua in quanto rappresentanti invece la risposta di riflessione speculare delle superifici asfaltate e degli autoveicoli su di esse presenti, accentuata ancor di più a causa dell'evento piovoso in corso.

La maggiore difficoltà e allo stesso tempo la minore efficienza della procedura di classificazione si è riscontrata in ambito urbano, dove la complessità intrinseca del sistema genera una compresenza di riflessioni speculari, doppi rimbalzi ed un accentuato fenomeno di *speckle* difficilmente eliminabile nonostante l'applicazione di appositi filtri in fase di pre-processing dell'immagine. Ricordiamo inoltre che la difficoltà di discriminazione deriva anche da una risoluzione spaziale a terra dell'immagine evidentemente non ottimale (3 m x 3 m) rispetto agli scopi che ci siamo prefissati di perseguire in ambito urbano. A fronte di tale premessa, si tende a sottolineare il fatto che, l'affinamento della classificazione in ambito urbano è stata effettuata semplicemente mediante apprezzamento e verifica visiva delle aree identificate come acqua, secondo una valutazione effettuata caso per caso sovrapponendo i relativi perimetri ad una ortofoto fornita dalla Regione Veneto. L'esito della procedura di fotointerpretazione in ambito urbano ha prodotto una drastica riduzione delle aree allagate identificate in sede di classificazione, in quanto nella maggior parte coincidenti con tetti degli edifici. L'errore del classificatore deriva pricipalmente dagli effetti di shadowing e dal forte rumore presente in ambito urbano dovuto alle caratteristiche di ripresa del sensore stesso.

Ricordiamo infatti che l'immagine in questione è stata ripresa con un angolo di incidenza locale compreso tra i 37° e i 40°, troppo elevato rispetto ai nostri scopi. Al crescere dell'angolo di incidenza, diminuisce la riflessione speculare delle superfici lisce, quali possono essere le aree invasate dall'acqua, ed aumentano gli effetti di distorsione geometrica propri del sensore SAR: il tutto aumenta la difficoltà nella discriminazione degli allagamenti e quindi di fatto invalida l'utilità del sensore in ambito strettamente urbano.

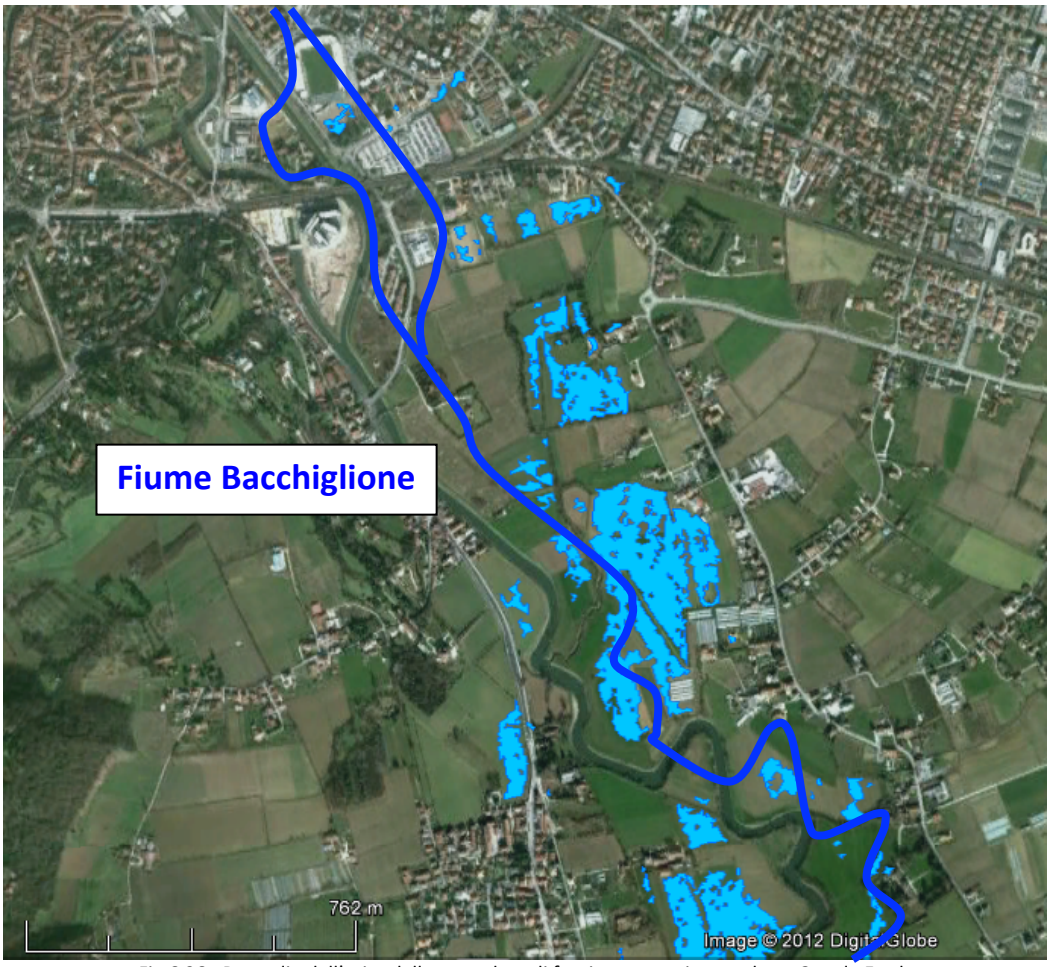


Fig.6.36 - Dettaglio dell'esito della procedura di fotointerpretazione su base Google Earth

6.1.5 Analisi del fenomeno di allagamento su immagini SAR: risultati complessivi

A seguire si riporta la mappa di allagamento massimo riscontrabile nelle date del 01/11/2010 e 03/11/2010 a seguito delle diverse analisi poste in atto e delle relative attività di fotointerpretazione di raffinamento.

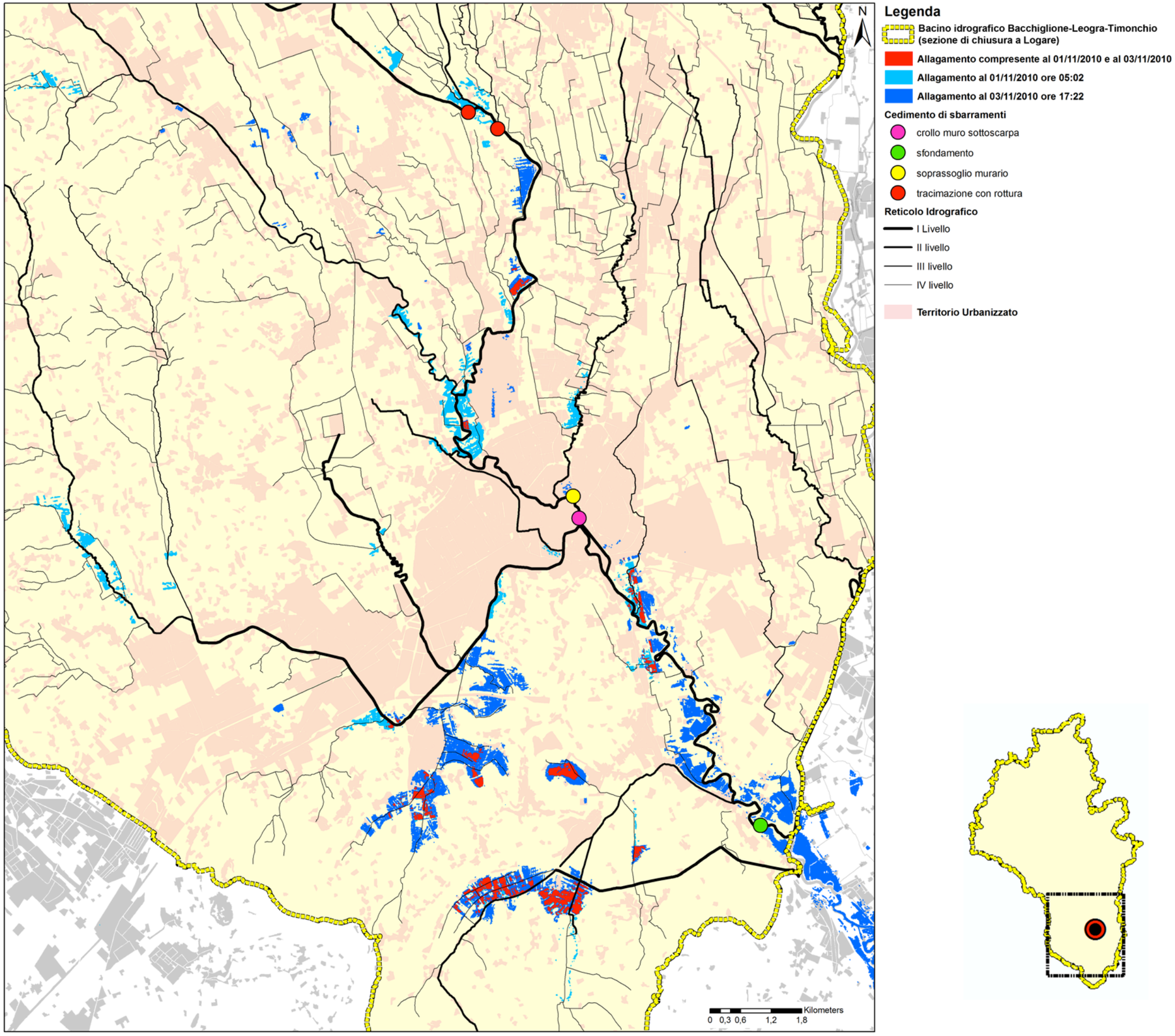


Fig.6.37 - Allagamenti da immagini SAR al 01/11/2010 ore 05:02 e 03/11/2010 ore 17:00 – Arcgis 9.3

Ciò che emerge è una buona definizione degli areali di allagamento in ambito peri-urbano e agricolo, con evidenti limiti invece nel contesto strettamento urbano. Ciò è dovuto al fatto che superfici molto lisce e riflettenti rispondono allo stesso modo, per cui, soprattutto all'interno di una immagine con risoluzione spaziale a terra di 3 x 3 mt, eventuali aree invasate d'acqua tra gli isolati urbani possono essere in realtà strade o comunque superfici asfaltate, tetti, balconi, macchine in movimento o tralicci elettrici, che complessivamente creano una ambiguità nella valutazione del fenomeno di *surface scattering* quale risorsa principale nella identificazione degli allagamenti. La difficoltà di evidenziare eventuali allagamenti all'interno della coltre cittadina è inoltre dovuto ai fenomeni di distorsione geometrica e radiometrica già discussi che aumentano all'aumentare dell'angolo di incidenza a terra della ripresa. In particolar modo fenomeni geometrici di *layover* e *shadowing* associati a quelli radiometrici di *corner scattering* o "doppio rimbalzo", pregiudicano significativamente la possibilità di una agevole ed efficace lettura dell'immagine ai fini della discriminazione di potenziali situazioni di allagamento superficiale.

6.2 Calcolo dei volumi di allagamento con tecnologia LiDAR

6.2.1 Il rilievo LiDAR a diposizione

Il rilievo a disposizione per la stima dei tirandi idrici registrati durante l'evento avviene ricorrendo al dato LiDAR fornitoci dall'Autorità di Bacino dei Fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Isonzo e Brenta-Bacchiglione. Il rilievo, datato 2004, è stato commissionato dall'Ente al Dipartimento di Geofisica della Litosfera dell'OGS (Istituto nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale) all'interno del progetto più ampio inerente l' "Esecuzione di attività di inquadramento geodetico e prospezione microgravimetrica, di telerilevamento laseraltimetrico, aereofotogrammetrico, batimetrico multi beam e di rilievo dei profili di sezione trasversale nelle tratte delle aste fluviale"[124].

L'attività di rilievo ha interessato l'asta dei corsi d'acqua Bacchiglione, Tesina, e Retrone per una estensione variabile in riva destra e sinistra di rispettivamente circa 500-800 mt. Le caratteristiche geometriche sono quelle di 1 punto a spaziatura variabile con una massimo di 1 punto ogni mq e con accuratezza altimetrica di 15 cm.

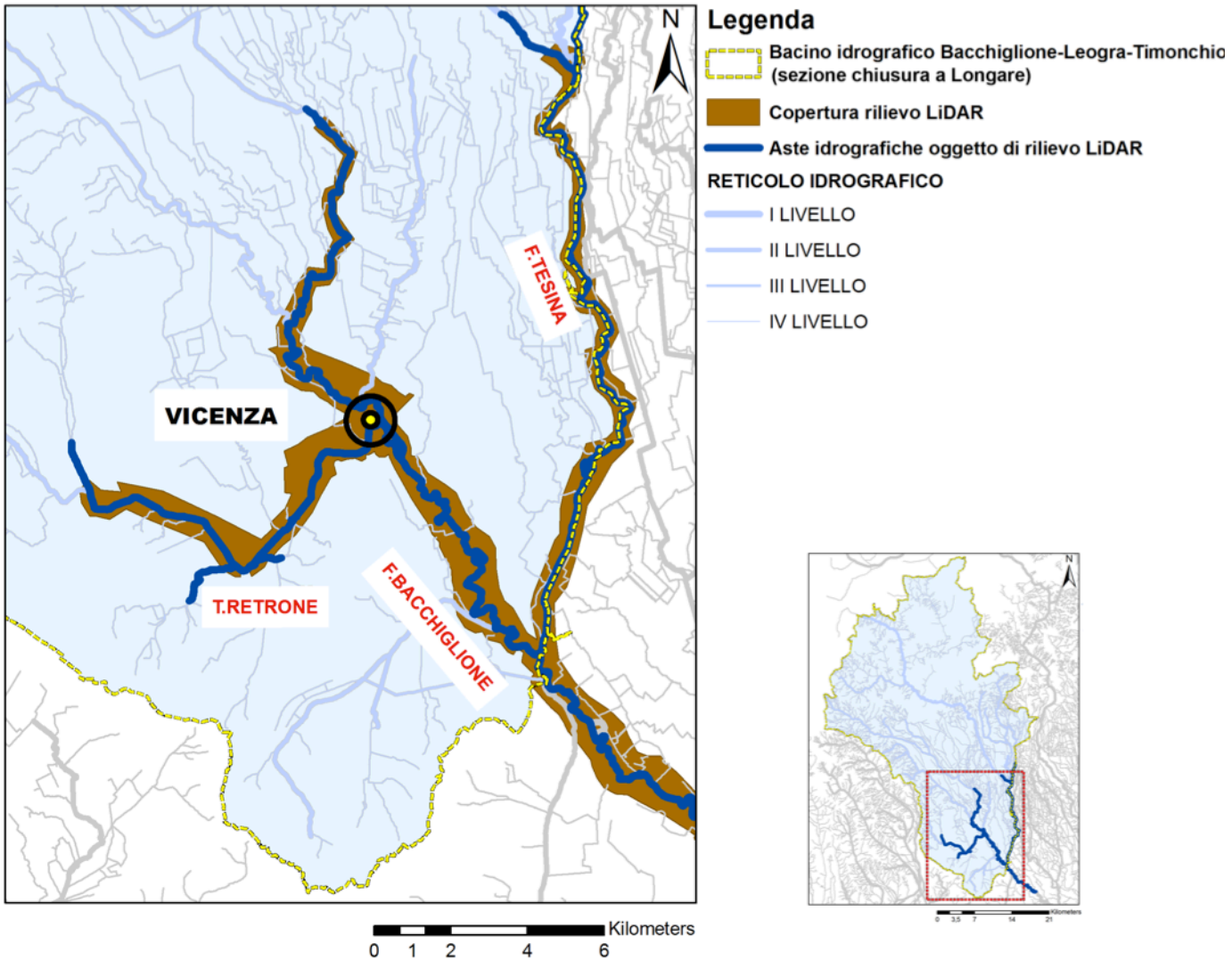


Fig.6.38 - Estensione del rilievo LiDAR all'interno del bacino irdografico di riferimento – Elaborazione ArcGis 10 Demo

Il progetto prevedeva la fornitura dei seguenti dati:

- XYZ e XYZI : punti di rilievo altimetrico laser identificati con con coordinate X (easting) e Y (northing), coordinate piane, sistema di riferimento Roma40 e campo con intensità I di retrodiffusione per la caratterizzazione spettrale dei bersagli;

- DSM (Digitali Surface Model): prima eco laser con cella di risoluzione di 2 mt

- DTM (Digital Terrain Model): dati ground con cella di risoluzione di 2 mt

- DTM (Digital Terrain Model): dati ground con cella di risoluzione di 10 mt

La matrice dei dati, così elaborata, è stata poi divisa secondo una maglia di 4x4 km, in cui ciascun foglio-matrice è identificato univocamente mediante le prime quattro cifre northing_easting del corner sud-ovest della maglia (ad es. 5005_1750.xyz). Il formato della fornitura è di tipo ARCINFO (ASCII RASTER FILE, filename.asc).

6.2.2 Tiranti idrici e volumi di allagamento

La valutazione del tirante idrico massimo e dei relativi volumi di allagamento registrati all'interno delle aree identificate da dati SAR ha seguito due metodolologie in modo da poter avere un doppio riscontro degli esiti. Innanzitutto sottolineiamo che la stima è stata effettuata a titolo di esempio esclusivamente per una delle aree allagate precedentemente identificate in modo da poter ragionare sulla validità della procedura in un ottica di ripetibilità agli N casi che si dovessero presentare.Comune ad entrambe le metodologie utilizzate è la preliminare identificazione della isoipsa di riferimento in cui ricade l'aree allagata: il fenomeno di invasamento dell'acqua è strettamente legato alla corrispondenza biunivoca tra perimetro dell'allagamento e corrispondente quota altimetrica. La presenza straordinaria di acqua è portata a concentrarsi in depressioni del terreno in cui l'accumulo genera un nuovo piano orizzontale superiore il cui volume è funzione sia del piano inferiore di riferimento (dato ground) sia soprattutto del limite esterno di assegnata quota sul livello del mare.

In questo senso prima di tutto si è proceduto a verificare in generale la coerenza della quota LiDAR rispetto alle isopse a 5 mt fornite dalla CTR (Carta Tecnica Regionale) della Regione Veneto relativa alla nostra area di allagamento.

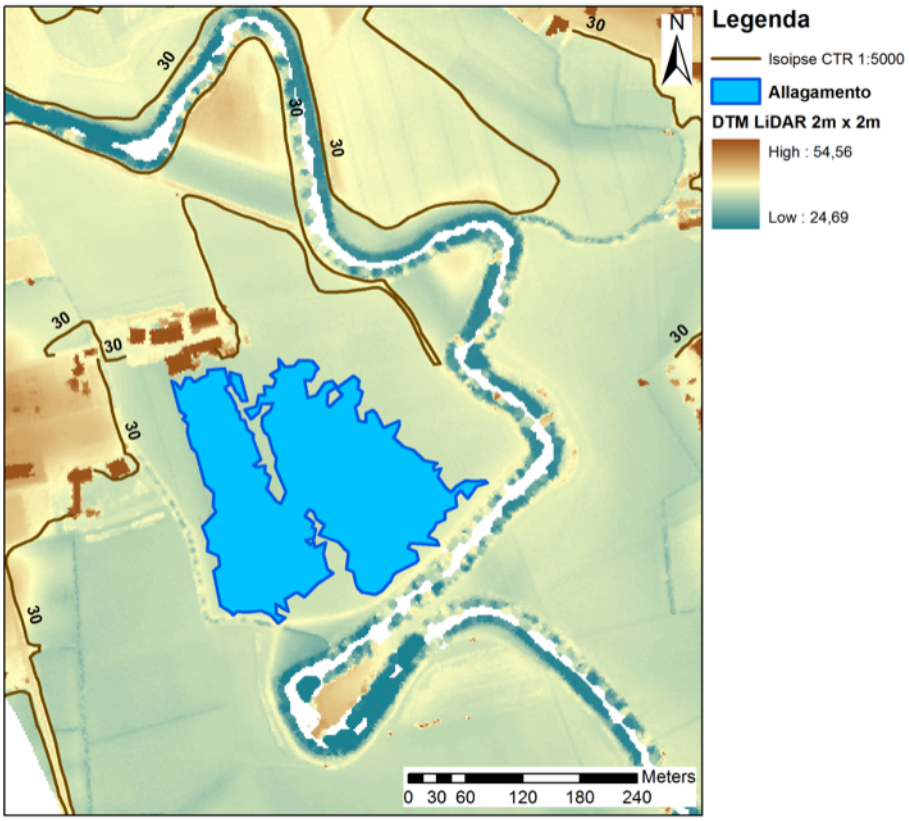


Fig.6.39 - Isoipse CTR 1:5000 su DTM LiDAR e aree allagata– Elaborazione ArcGis 10 Demo

Come si può osservare in Fig.112, l'areale di allagamento ricade in un'area compresa tra una curva di livello 30 ed una di 25.

Ricordando che per isoipsa o curva di livello si intende il luogo dei punti posti tutti ad una stessa quota sul livello del mare, trattandosi di curve di livello con scala 1:5000, tutti i punti ricadenti tra le due curve di livello considerate saranno caratterizzati da una quota compresa tra i 26 mt ed i 30 mt e, come tale, anche l'area di allagamento ivi contenuto.

Tale riflessione può però subire un raffinamento diminuendo la scala di osservazione e ricorrendo alla estrazione delle curve di livello direttamente dal rilievo LiDAR a nostra disposizione. Mediante il tool "Contour" di 3D Analyst si procede quindi alla estrazione di isopse per l'area di interesse ogni 0,5 m.

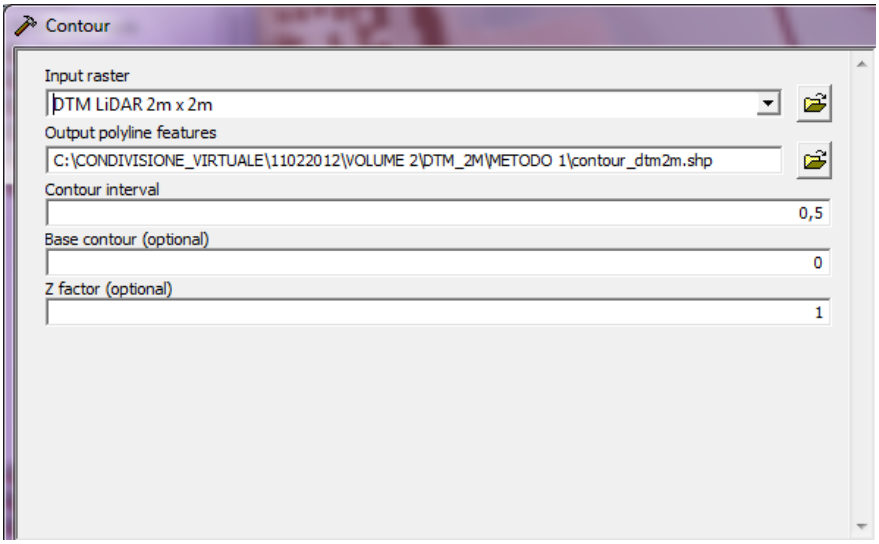


Fig.6.40- Algoritmo "Contour" per l'estrazione di curve di livello da LiDAR – ArcGis 10 Demo

Si procede poi alla sovrapposizione dell risultato all'area di nostro interesse.

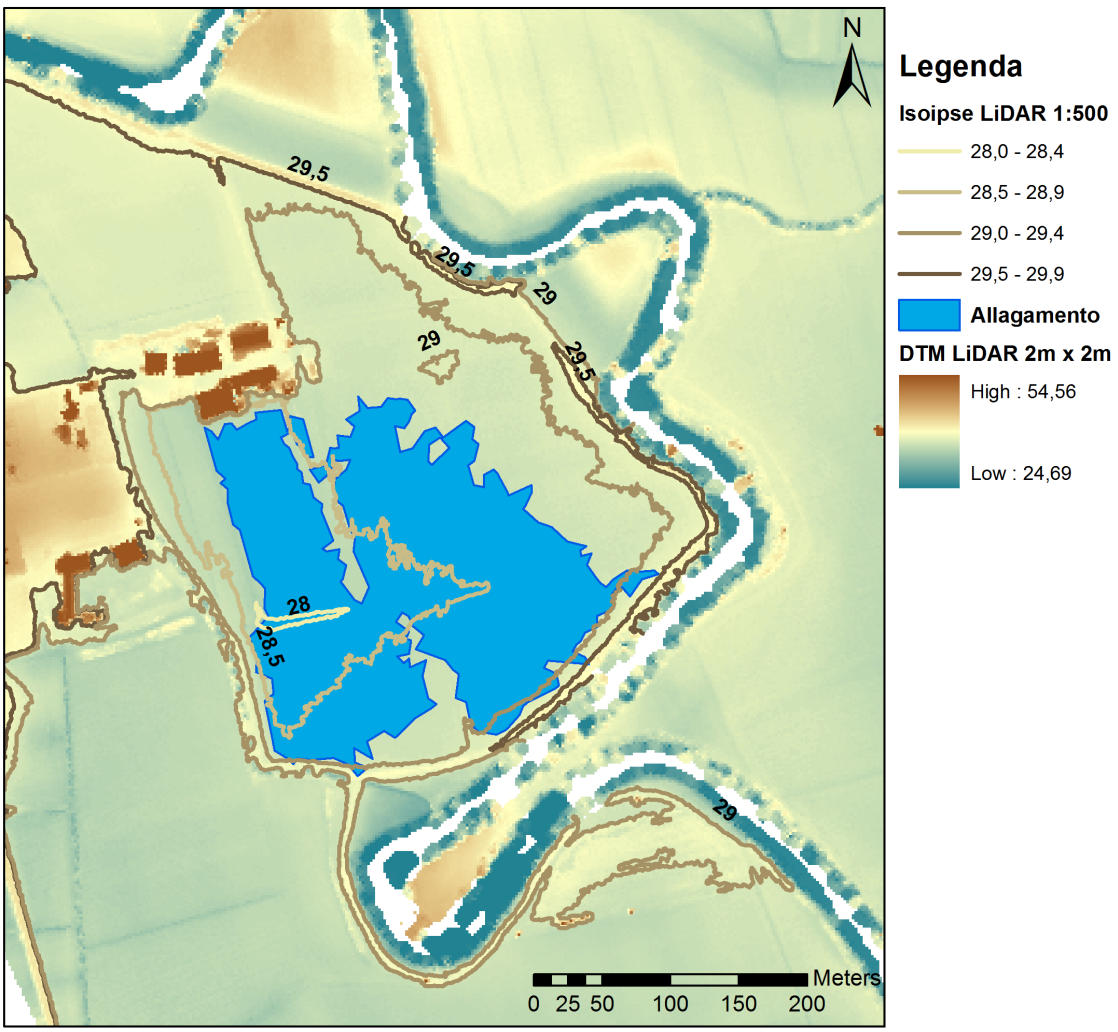


Fig.6.41 - Isoipse LiDAR 1:500 su DTM LiDAR e aree allagata – Elaborazione ArcGis 10 Demo

Dalla sovrapposizione emerge come l'isoipsa massima di riferimento della nostra area allagata sia quella corrispondente ai 29,0 mt e da ciò si può effettuare già una prima stima di come il massimo tirante idrico ipoteticamente ragistrabile sia di 1,49 mt se consideriamo la quota minima dell'area sia di 28 mt. A questo punto il calcolo del tirante idrico registrato può avvenire, come anticipato, secondo due modalità. Nella prima abbiamo proceduto ad aggiungere un nuovo campo attributo allo shape file dell'area di allagamento (campo "Quota") che riproterà il valore massimo (29,49) della quota della curva di livello di riferimento (29,0).
Dopodichè si procede con una operazione "Vector to Raster" ossia di rasterizzazione del vettore poligononale di allagamento in una rispettiva matrice di celle formanti una griglia: tale immagine avrà però la particolarità di assumere come valore di cella il campo "Quota" prima creato, in modo da assegnare all'immagine un valore Z di riferimento sul piano corrispondente proprio alla quota massima che l'acqua può aver raggiunto.

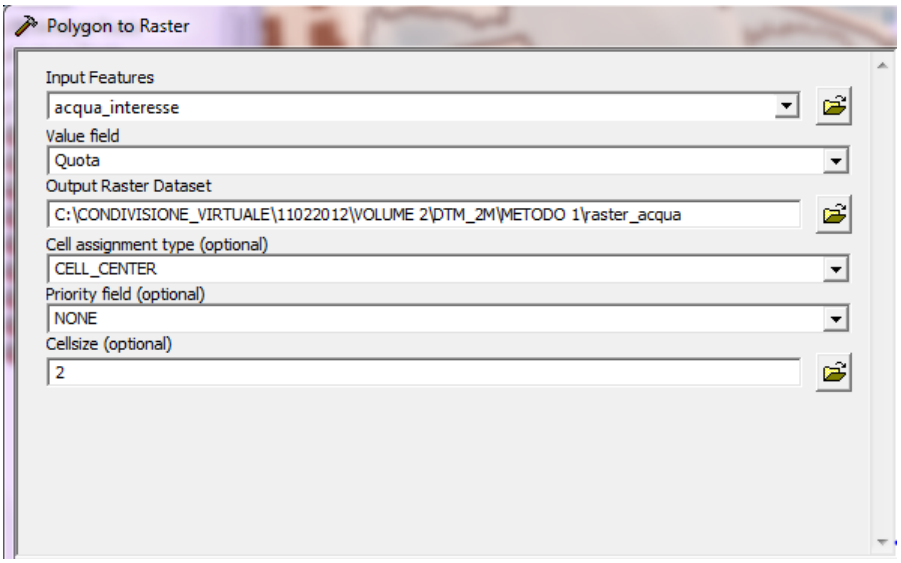


Fig.6.42 - Algoritmo "Polygon to Raster"– ArcGis 10 Demo

A questo punto, mediante il tool "cut/fill surface" è possibile identificare i volumi invasati operando una vera e propria operazione di differenza tra superfice pre e post allagamento.
L'algoritmo richiede infatti l'immissione in input di due superficie raster: la prima (Input before raster surface) data dalla matrice di quote di allagamento rappresentativa di una situazione pre-modifica, la seconda invece dalla matrice di dati LiDAR rappresentativa della superficie in situazione post-modifica. Si noterà come l'algoritmo opera di fatto secondo un ragionamento "per sottrazione" e non per "adddizione" legato al fatto che il suo campo applicativo per accellenza è quello del calcolo dei volumi di scavo.

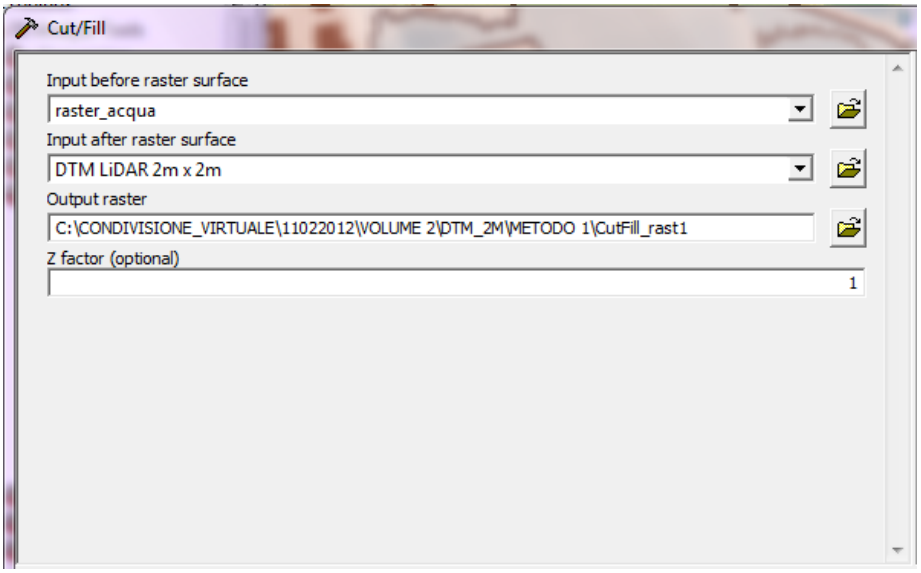


Fig.6.43 - Algoritmo “Cut/fill Surface”– ArcGis 10 Demo

Per un’area di 47088 mq, la procedura restituisce un risultato di volume pari a 42878,91 m^3 di acqua.

Il secondo metodo invece agisce operando prima di tutto un ritaglio del DTM LiDAR a nostra disposizione sulla base del vettore poligonale di allagamento.

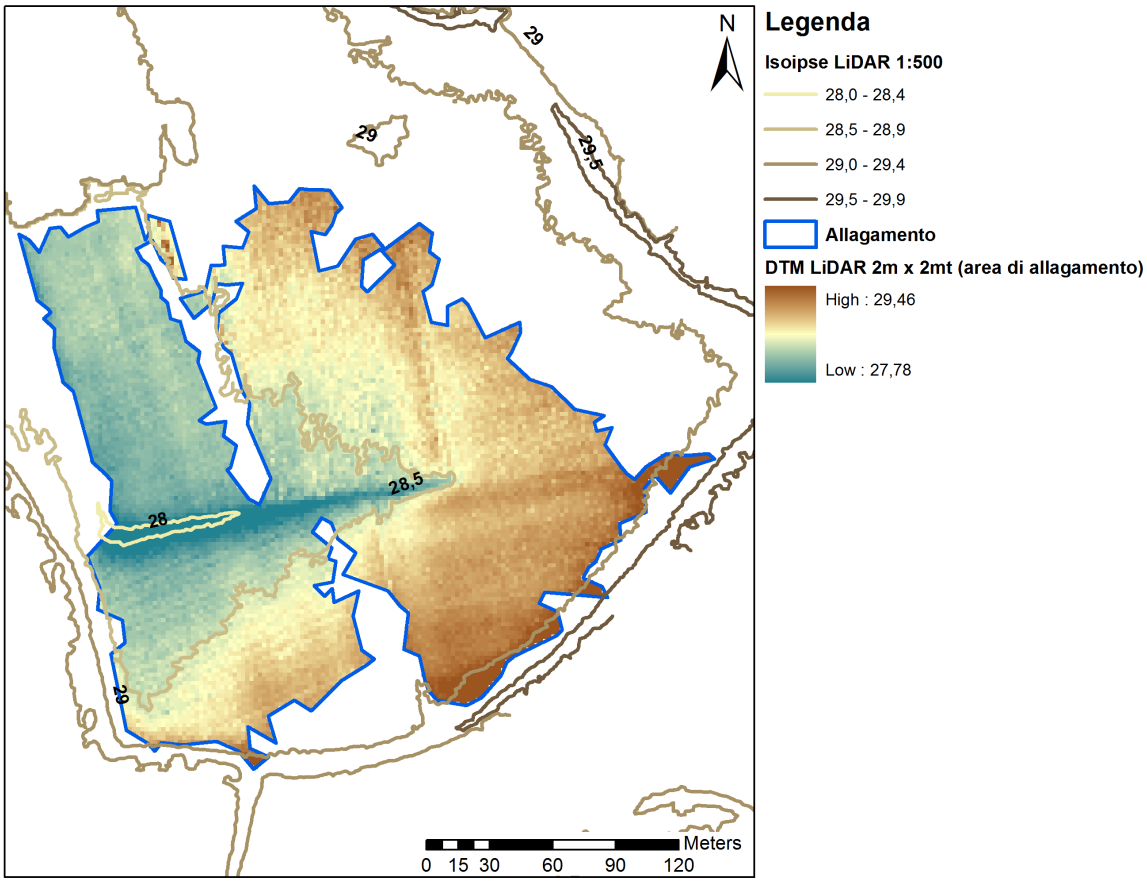


Fig.6.44 - DTM LiDAR ritagliato sull'area di allagamento – ArcGis 10 Demo

Come si può osservare dalla figura sopra riportata, la nostra area interessata da allagamento presenta una quota minima di 27,78 mt e una quota massima 29,46 mt: una variazione altimetrica di 1.68 mt associabile al massimo tirante idrico registrabile nei punti di massima depressione.

Dopodichè si procede al cacolo dei volumi d'acqua invasati dall'area mediante il tool "Surface Volume" che opera essenzialmente operando una differenza tra una superficie di riferimento reale ed un piano teorico di altezza stabilita dall'operatore. Nel dettaglio si è proceduto offrendo all'algoritmo come superficie reale di riferimento il DTM LiDAR ritagliato sul nostro areale di allagamento in modo da aver una superficie quotata ma di estensione finita; dopodichè si è assegnata una quota di piano teorica, nella fattispecie 29,49 mt, rispetto al quale il volume viene ottenuto sottraendo la superficie di riferimento a quella di quota teorica.

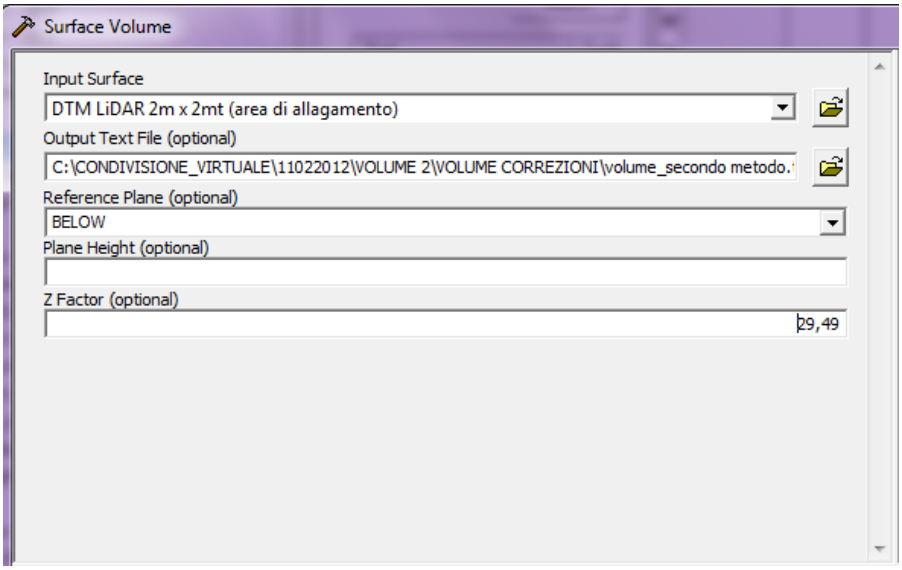


Fig.6.45 - Algoritmo "Surface Volume" – ArcGis 10 Demo

Per un'area di 44560 mq la procedura restituisce un risultato di volume pari a 40790,03 m^3 di acqua.

Considerando i punti di maggior depressione, la registrazione di un tirante idrico massimo di 1,68 mt appare a nostro avviso un risultato apprezzabile. Di seguito inoltre si riporta un confronto tra gli esiti delle procedure di calcolo dei volumi d'acqua:

	METODO 1	METODO 2	DIVERGENZA
Mquadri	**47088**	**44560**	**2528**
Tirante idrico (h in mt)	**1,49**	**1,68**	**0.19**
Mcubi	**42878,91**	**40790,03**	**2038,88**

Tab.6.5 – Quadro riassuntivo degli esisti di calcolo di tiranti idrici massimi e volumi di allagamento associati

7 VALIDAZIONE DEL PROTOTIPO

7.1 Validazione degli areali di allagamento

Affinchè le analisi effettuate possano essere prese in considerazione, è necessario valutarle sotto diversi punti di vista in modo da poter stimare quantitativamente l'attinenza con il fenomeno indagato nella realtà. Tale fase risulta essere particolarmente importante proprio in vista del fatto che per quanto il risultato possa essere soggettivamente o comunemente apprezzabile, se non è possbile valutare la sua affidabiità esso perde però di qualsiasi significato ed utilità, rendendo quindi inutile l'intero processo.

Premettiamo che tale valutazione viene effettuata contemporaneamente sugli esisti di entrambi i processi di elaborazione realizzati sulle immagini: allagamenti al 01/11/2010 provenienti dall'analisi di change detection coherence e allagamenti al 03/11/2010 estratti mediante classificazione supervisionata, in entrambi i casi affinati mediante processo di fotointerpretazione.

L'oggetto quindi della valutazione sarà il numero massimo di areali di allagamento estraibili sulla base delle immagini a disposizione in modo da poter ragionevolmente avvicinarsi ad una stima coerente con la variabilità del fenomeno di allagamento. Ricordiamo infatti che la dinamica indagata ha una caratterizzazione spaziale estremamente legata alla componente temporale: un'area allagata al mattino può non esserlo più o modificare le sue caratteristiche geometriche già qualche ora dopo. In questo senso, tenedo a riferimento il fatto che l'emergenza alluvione si è manifetsta in tutta la sua concretezza esclusivamente tra le ore 7:00 del 01/11/2010 e la prima parte della giornata del 03/11/2010, risulta necessario integrare le nostre rilevazioni, temporalmente limitate rispetto al picco di emergenza, qualora l'obiettivo sia valutarne quantitativamente l'oggettivo riscontro con la realtà. E' auspicabile pensare che in tal modo si possano minimizzare, se pur in modo minimo, l'eventuale sottostima dell'allagamento per cause non dipendenti da fattori tecnici-operativi.

Nel dettaglio la valutazione degli esiti di una classificazione, parametrica o non parametrica che sia[74], consiste essenzialmente nel confrontare la realtà derivante dal processo di stima con un sottoinsieme della realtà meglio comosciuto come "verità a terra" (*ground truth*). Tale set di dati è costituito da acquisizioni e verifiche effettuate su foto aree, rilievi sul campo e mappe tematiche, che nell'insieme offrono una elevata fonte di verità a terra già condivisibilmente apprezzata e certificata.

Nel nostro caso la ground truth è rappresentata dalle mappe di restituzione dei rilievi diretti e indiretti effettuati in data 02/11/2010 dai tecnici dell'Autorità di Bacino del Bacchiglione e dell'ufficio tecnico del Comune di Vicenza.

[74] ricordiamo che la classificazione supervisionata fa parte dei metodi di classificazione di tipo parametrico, mentre l'analisi di change detection afferisce ai metodi non-parametrici.

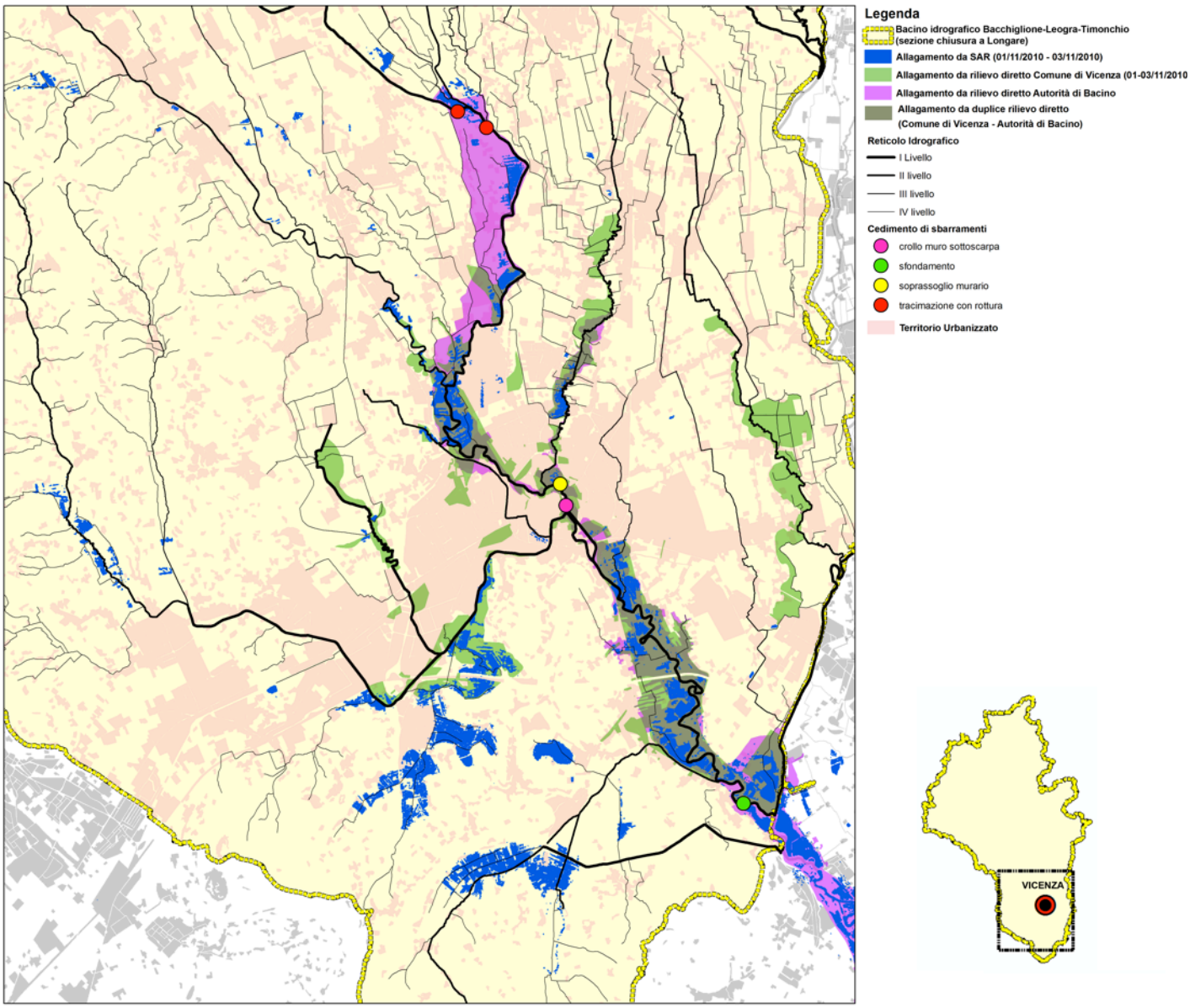


Fig.7.1 - Totale degli allagamenti da immagini SAR al 01/11/2010 e al 03/11/2010, areali di allagamento da rilievo diretto da fonte Autorità di Bacino e Comune di Vicenza

Prima di tutto si procede realizzando la cosiddetta matrice di confusione o di errore (*confusion matrix*), ossia una matrice di contingenza all'interno del quale vengono riportati i valori che si originano dal confronto tra la mappa di classificazione e il set di dati di ground truth sulla base di un set di dati campione.

Il dato campione viene realizzato mediante una semina random di punti stratificata ed equalizzata, ossia ditribuiti causalmente ma tenendo in considerazione rispettivamente la distribuzione spaziale delle classi – classe 1 (allagamento), classe 2 (non allagamento) – e avente pari numerosità per entrambe le classi. Questi due criteri risultano importanti in quanto l'area di riferimento complessiva per l'analisi è quella, seppur solo in parte, del bacino

idrografico di riferimento, rispetto al quale il fenomeno di allagamento ricopre esclusivamente una parte molto limitata e spazialmente circostanziata lungo alcune direttrici.

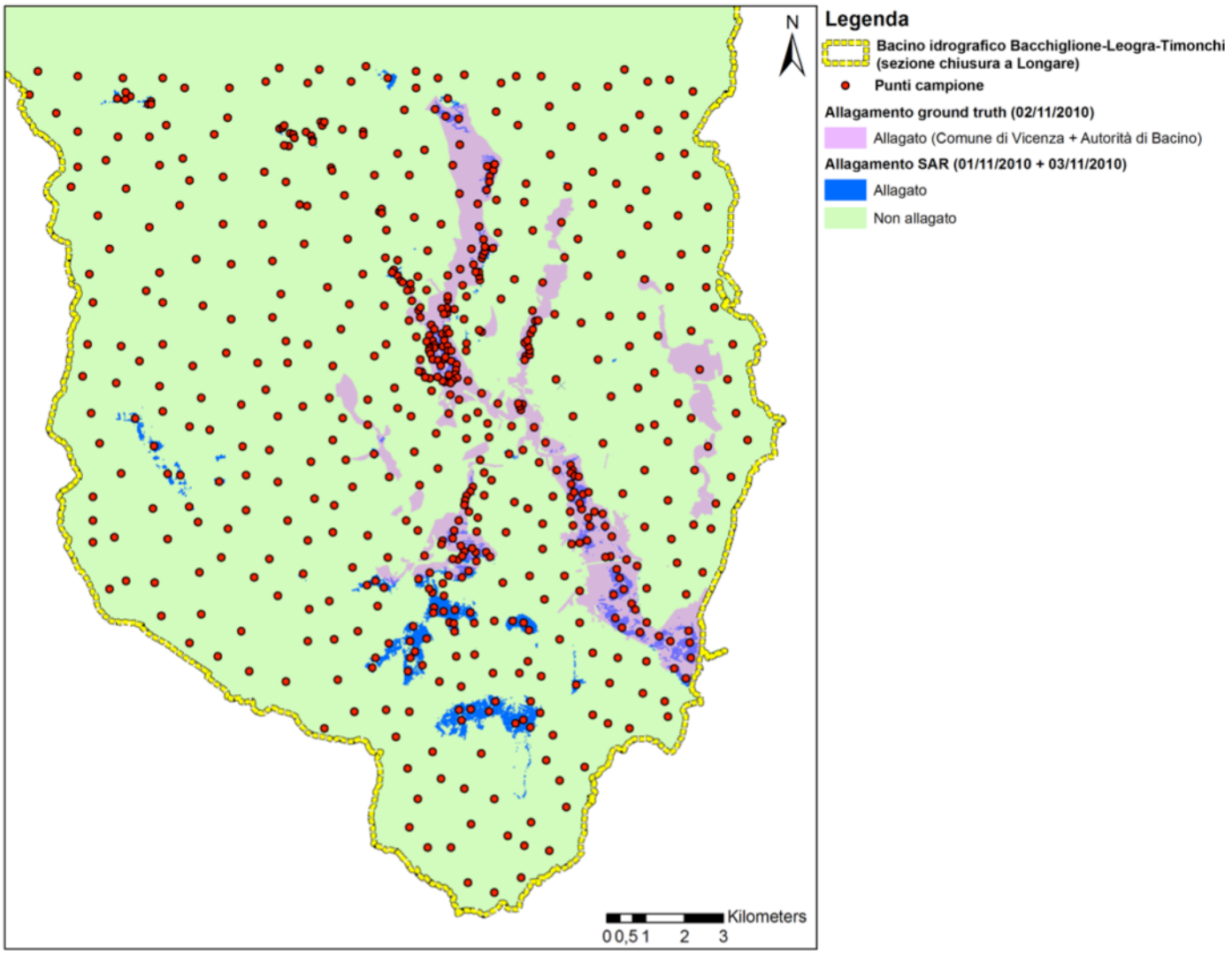


Fig.7.2 - Localizzazione dei punti di verifica rispetto alle analisi effettuate e alla ground truth a disposizione – ArcGis 10 Demo

FID	Shape	X	Y	Classificazione	Verità
1	Point	702738	5049941	1	2
2	Point	703068	5047127	1	2
3	Point	690900	5050370	1	2
4	Point	700242	5038364	1	2
…	…	…	…	…	…

Tab.7.1 - Tabella degli attributi dello shape file a seguito di join spaziale con set di classificazione e set di verifica

I punti, così localizzati e di numero complessivamente pari a 508, ossia 254 per ciascuna classe, sono stati sottoposti ad operazioni di analisi spaziale in modo da verificare la rispettiva classe di appartenenza nei due insiemi di confronto: classificazione e *ground truth*. Sulla base di tale

confronto è stato possibile costruire la seguente matrice di confusione: ogni riga della matrice di confusione è associata ad una classe della mappa di classificazione, mentre ogni colonna, nello stesso ordine delle righe, è associato ad una classe di verità a terra: ciascuna cella della matrice così costruita viene riempita da numero totale di punti aventi l'assegnazione corrispondente alla relativa classe di classificazione ovvero di verità.

	GROUND TRUTH		
CLASSIFICAZIONE	**Allagamento**	**Non Allagamento**	**Totale**
Allagamento	134	95	**229**
Non Allagamento	31	340	**371**
Totale	**165**	**435**	**600**

Tab. 7.2 – Matrice di confusione

Mentre sulla diagonale principale si trovano gli elementi correttamente classificati, quelli al di fuori di essa rappresentano errori di classificazione. Sulla base di tale matrice è possibile effettuare a questo punto una valutazione quantitativa dell'accuratezza della classificazione, ossia il livello di corrispondenza tra il dato teorico a cui giungiamo mediante la procedure di analisi effettuate rispetto al dato reale o comunque di riferimento.

Prima di tutto si procede a stimare l'accuratezza totale (*overall accuracy*), ossia il rapporto fra il numero totale di pixel correttamente classificati e desumibili dalla sommatoria degli elementi presenti sulla diagonale principale della matrice e ed il numero totale dei punti considerati nell'insieme di verifica.

L'accuratezza totale dà una misura complessiva di quanto la classificazione corrisponda complessivamente alla realtà, ma non distingue tra gli errori commessi nelle diverse classi, che sono trattate tutte allo stesso modo senza distinzione di peso. In questo senso risulta di ausilio stimare anche l'accuratezza per il produttore (*producer's accuracy*), la quale misura quanto dell'insieme di verifica pertinente ad una determinata classe sia stato effettivamente assegnato a quella classe.

A seguire si riporta una tabella che sintetizza i risultati ottenuti per ciascun indicatore e per ciascuna classe:

OVERALL ACCURACY	PRODUCER'S ACCURACY	
	Allagamento	Non allagamento
79%	81,21%	78,16%

Tab.7.3 – Accuratezza totale e accuratezza di classe per il produttore

Valutata in questi termini, l'attività di estrazione di aree allagate da immagini SAR appare fornire risultati soddisfacenti. Tale risultato è però fuorviante in quanto non da informazioni circa il livello di accuratezza della classificazione in ambito strettamente urbano: la procedura di valutazione infatti non effettua nessuna distinzione riguardo il contesto localizzativo degli allagamenti. Consapevoli dei limiti riscontrati in ambito urbano al momento dell'estrazione degli allagamenti, tale limite deve essere di fatto contemplato anche all'interno dell'attività di validazione, soprattutto tenedo conto degli obiettivi intrinseci del presente lavoro, ossia quello di verificare le potenzialità delle immagini SAR in contesti ad alto rischio idrologico-idraulico, ossia le aree ad elevata componente antropica.

Sulla base di tali considerazione si è ritenuto utile valutare l'accuratezza della classificazione basandoci anche sulla classe di uso del suolo in cui ricade ciascun punto utilizzato per effettuare la verifica, in modo da poter raffinare ulteriormente l'accuratezza di classe. Le classi di uso del suolo considerate significative, avendo come riferimento l'uso del suolo della Regione Veneto, sono la classe 1 "superfici artificiali" quali zone residenziali, industriali, artigianali e commerciali, ovvero la classe 2 "superfici agricole utilizzate" quali seminativi, colture permanenti, prati stabili e zone agricole eterogenee. Tali classi, in coerenza con quanto definito utile per valutare il rischio, sono state scelte sulla base considerazioni orientate a focalizzare l'attenzione sulle aree a maggiore contenuto di vulnerabilità e valore.

A seguire si riportano i nuovi esiti della valutazione dell'accuratezza sulla base di quanto descritto:

SUPERFICI ARTIFICIALI			SUPERFICI AGRICOLE UTILIZZATE		
OVERALL ACCURACY	PRODUCER'S ACCURACY		OVERALL ACCURACY	PRODUCER'S ACCURACY	
	Allagamento	Non allagamento		Allagamento	Non allagamento
79%	37,1%	88,4%	75%	87,8%	68,9%

Tab.7.4– Confronto tra accuratezza totale e accuratezza per il produttore per allagamenti ricadenti in aree artificiali ovvero aree agricole

Come si può notare dai valori riportati in tabella, mentre l'accuratezza in aree agricole risulta più che accettabile, nelle aree artificiali (zone residenziali, industriali, artigianali e commerciali) i risultati confermano le difficoltà riscontrate in sede di classificazione, limitando quindi la possibilità di valutare positivamente l'attività di estrazione da immagini SAR di eventuali allagamenti in ambito strettamente urbano o comunque ad alta densità antropica. E questo per i limiti derivanti dalla tecnologia di ripresa propria del sensore SAR già illustrati, il cui peso varia a seconda del set di dati a disposizione, incidendo quindi drasticamente sul livello di efficacia dell'attività di identificazione di allagamenti negli ambiti maggior rischio.

Per contro però, risulta importante sottolineare che la validazione produce una certa sottostima dell'accuratezza per motivi legati, non soltanto alla componente temporale già discussa (differimento della data di acquisizione delle immagini rispetto al picco dell'evento e alla data del rilievo diretto), ma anche alla soggettività di acquisizione dei dati utilizzati come verità a terra. Il rilievo in questione è frutto dell'attività, ricordiamo, dei tecnici dell'Autorità di Bacino da una parte e di quelli del Comune di Vicenza dall'altra. In quanto "diretti", e quindi effettuati da "soggetti", restituiscono risultati che sono altamente legati alla scelta individuale dell'operatore che ha effettuato il rilievo o di chi lo ha commissionato: come già evidenziato infatti, gli allagamenti rilevati dall'Autorità di Bacino sono pressochè concentrati lungo un'area di rispetto variabile delle aste principali, mentre quelli del Comune di Vicenza, seppur meno legati all'articolazione del reticolo idrografico, sono invece limitati al confine comunale, tralasciando tutto ciò che possa essere avvenuto al di là di esso. Questo per dire che, eventuali allagamenti individuati dalle immagini SAR e non riscontrate dal rilievo diretto usato come verità, sulla base della procedura di validazione vengono di fatto considerati privi di riferimento a terra, comportando quindi una diminuzione della percentuale di accuratezza. Esempio concreto sono gli ampi allagamenti riscontrati nel comune di Arcugnano,

direttamente confinante con il comune di Vicenza e prossimi sia ad una vasta area industriale sia a nuclei abitati, in cui il fenomeno però non è stato rilevato ne dai tecnici comunali ne da quelli dell'Autorità di Bacino. Tale fatto pone in essere dei limiti nella validazione stessa dei risultati, già ben noti e legati tanto alle modalità di acquisizione dei dati di *grond truth* tanto alla natura intrinsecamente temporanea del fenomeno osservato: ciò però costituisce di fatto anche il motore che ci porta a poter valutare il SAR e le tecniche di trattamento dati ad esso associate, seppur con i dovuti limiti ed affinamenti, come una risorsa capace di offrire risultati ad ampio spettro, ripetibili ed oggettivi in quanto indipendenti dalle scelte operate ad hoc sulla base delle singole esigenze individuali. Sotto questo aspetto si può affermare che anche l'acquisizione di immagini SAR utili a poter effettuare l'analisi dei fenomi di allagamento è legata ai limiti del tempo di rivisitazione del sensore di una data porzione del globo, nonché alle priorità e scelte istituzionali di attivarne l'azione su un territorio piuttosto che su un altro. Ma ciò dipende da dinamiche che esulano dalle potenzialità intrinseche della tecnologia e che dipendono invece tanto dalla pericolosità naturale intrinseca dei luoghi quanto dalla politica di mitigazione del rischio posta in atto e dal ruolo che all'interno di essa viene riconosciuto agli strumenti di osservazione della terra.

7.2 Validazione volumi di allagamento

Come precedentemente effettuato per gli areali di allagamento estratti dalle immagini SAR, anche l'analisi dei volumi di allagamento e dei relativi tiranti idrici massimi viene sottoposta ad una procedura di validazione utile a poter valutarne oggettivamente gli esiti ed il grado di rispondenza con la realtà. Tanto più il modello si avvicina alla realtà, tanto più potrà esser preso in considerazione quale sistema di analisi efficace e di conseguenza auspicabilmente ripetibile ad altri *N* casi.

La valutazione in questo caso avviene analizzando l'archivio fotografico frutto del volo aereo effettuato dai tecnici del Genio Civile in data 02/11/2010[75]. La ricognizione sulle provincie di Padova, Vicenza e Verona effettuata tra le ore 11:40 e le ore 15:26 del 2 Novembre ha portato l'Ente a collezionare un set di 692 immagini fotografiche riguardanti il fenomeno di allagamento in atto e con condizioni meteo parzialmente avverse.

[75] si ringrazia il Dott. Arch. Giovanni Borga dell'Università IUAV di Venezia per aver messo a disposizione tale archivio

Questa preziosissima fonte di dati è stata analizzata rispetto agli allagamenti avvenuti nella provincia di Vicenza così come individuati ed estratti dalle immagini SAR complessivamente al 01/11/2010 e 03/11/2010. Nel dettaglio l'archivio fotografico è stato scandagliato e localizzato sul territorio di riferimento, in modo da identificare la ripresa fotografica relativa a ciascun areale di allagamento individuato mediante le nostre analisi. Del subset fotografico di nostro interesse si è realizzato un file puntuale formato shape file avente tra i vari attributi il campo "Immagine" nel quale viene riportato il percorso assoluto dell'immagini fotografica di riferimento (*Hyperlink*). Mediante poi uno operazione di join spaziale "uno a molti" tra la tabella attributi del file puntuale e quella del file poligonale degli allagamenti, è stato possibile associare quindi a ciascun poligono una o più immagini di riferimento.

Tale procedura risulta utile sia limitatamente alle nostre finalità sia in un quadro più generale di costruzione di quadri conoscitivi strutturati dove la finalità è quella di organizzare e strutturare il sistema di conoscenza in modo organico ed in continuo feed-back reciproco.

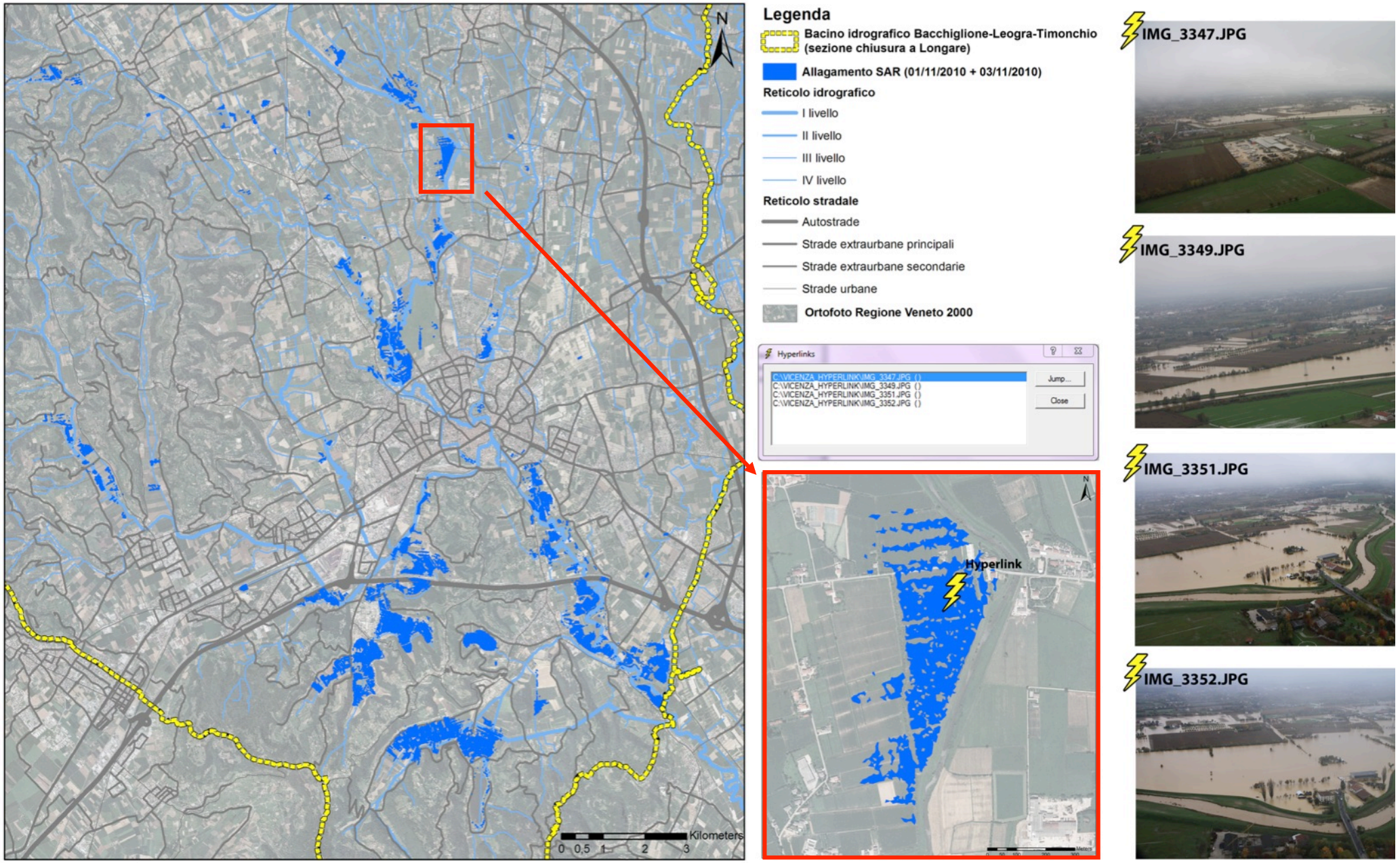


Fig.7.3 - Allagamenti da immagini SAR al 01/11/2010 e al 03/11/2010 su base ortofoto 2000 Regione Veneto ed esempio di Hyperlink all'archivio fotografico Genio Civile 02/11/2010

Sulla base del collegamento effettuato tra ciascun areale di allagamento individuato e l'archivio fotografico di fonte Genio Civile, si è potuto qualitativamente valutare la corrispondenza con l'area analizzata in sede di calcolo dei volumi e relativi tiranti idrici di allagamento.

Fig.7.4 - A destra: immagine 3319 ore 12:37con sovrapposizione qualitativa delle aree allagate estratte da dato SAR;
Fig.7.5 – A sinistra cono ottico degli allagamenti da dato SAR su base Google Maps rispetto alla ripresa aerea di riferimen

Fig.7.6 - A destra: immagine 3548 ore 14:36 con sovrapposizione qualitativa delle aree allagate estratte da dato SAR;
Fig.7.7 – A sinistra cono ottico degli allagamenti da dato SAR su base Google Maps rispetto alla ripresa aerea di riferimento

Osservando attentamente i livelli raggiunti dall'acqua al 02/11/2010 ai margini dell'area considerata e confrontandoli con le curve di livello in scala 1:500 precedentemente estratte dal DTM LiDAR con cella 2mt x 2mt è possibile sfruttare le aree rimaste al di sopra del tirante idrico massimo raggiunto per identificare l'isoipsa di riferimento dell'allagamento al momento della ripresa effettuata dal Genio Civile. Le uniche aree rimaste al di fuori risultano essere localizzate all'interno di curve di livello di 30 mt.

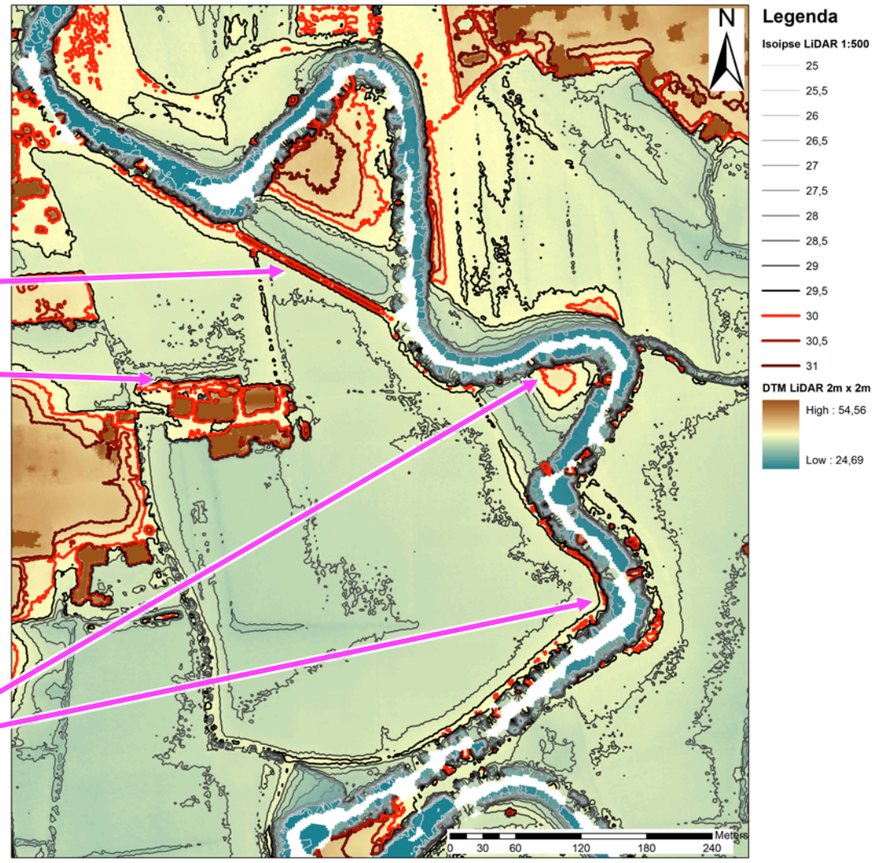


Fig.7.8 - A sinistra in alto: immagine ripresa aerea n.3548 ore 14:36; Fig.7.9 - a sinistra in basso: immagine ripresa aerea n.3319 ore 12:37;
Fig.7.10 - A destra: DTM LiDAR 2m x 2mt dell'area di allagamento; in tonalità del rosso le isoipse non allagate al 02/11/2010 come da immagine fotografica 3319 e 3548 del Genio Civile

Ciò implica che l'allagamento ha colpito tutte le aree aventi quota compresa tra i 28 mt fino ai 29,99 mt, con un tirante idrico massimo al 02/11/2010 ore 12:37 di 1,99 mt.

Di conseguenza viene qualitativamente validata l'ipotesi di tirante idrico variabile tra 1,49 e 1,68 mt registrati al 03/11/2010 ore 17:22, ossia il giorno successivo alla ripresa aerea. Assumendo come riferimento il valore di 1,58 mt, ossia la media dei due tiranti idrici ottenuti dai due metodi posti in atto, si può dedure che il livello dell'acqua sia sceso di 0.41 mt in 28 ore e 45 minuti (1725 minuti complessivi). Per semplice calcolo quindi si può giungere ad identificare un deflusso superficiale di 0.0234782 cm/minuto quale informazione potenzialmente utile sia sulle caratteristiche dei suoli su cui insiste l'allagamento ed in generale sulle caratteristiche spazio-temporali che la dinamica del fenomeno ha assunto.

8. CONSIDERAZIONI FINALI

8.1 Confronto con le previsione di P.A.I

In questa fase gli esiti dell'attività di classificazione su immagini SAR in termini di areale di allagamento complessivo al 01/11/2010 e al 03/11/2010, come effettuato precedentemente con il rilievi diretti, vengono confrontati con quanto previsto dal Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico attualmente in vigore sul territorio di riferimento. Lo scopo è verificare se e quali aree allagate ricadono all'interno di perimetrazione di pericolosità idraulica già previste dal Piano e quali invece risultano non contemplate nel Piano. Abbiamo già detto infatti che i rilievi diretti effettuati da soggetti istituzionali sono caratterizzati da una forte componente di soggettività dell'operatore che esegue il rilievo o degli interessi del soggetto che lo commmissiona. Allo stesso tempo, sappiamo che il PAI utilizza per la stima delle aree potenzialmente allagabili a partire dalle quali definire precise classi di pericolosità idraulica, modelli idraulici calibrati fra le altre cose soprattutto sull'estensione di allagamenti pregressi e sempre su di essi procede a validare gli output dei modelli come termine di riferimento utile alle potenzialità reali dei fenomeni. In questo senso quindi l'assenza di eventuali allagamenti riportati nelle mappe storiche di eventi pregressi, incide significativamente sugli esiti delle previsioni idrauliche future.

Sulla base di tali considerazioni, è possibile valutare l'uso dei sensori SAR in modo positivo proprio in virtù di ciò che emerge dalla mappa di confronto riportata a seguire 7.11. Per

apprezzare meglio il legame diretto con quanto previsto dal Piano, le aree allagate derivanti da immagini SAR, qualora ricadenti in perimetrazione di PAI, sono state rappresentate sulla base della relativa classe di pericolosità idraulica. Come si noterà, nonostante in molti casi le aree allagate ricadano in aree già definite idraulicamente critiche dal Piano, una percentuale di esse non risulta invece prevista.

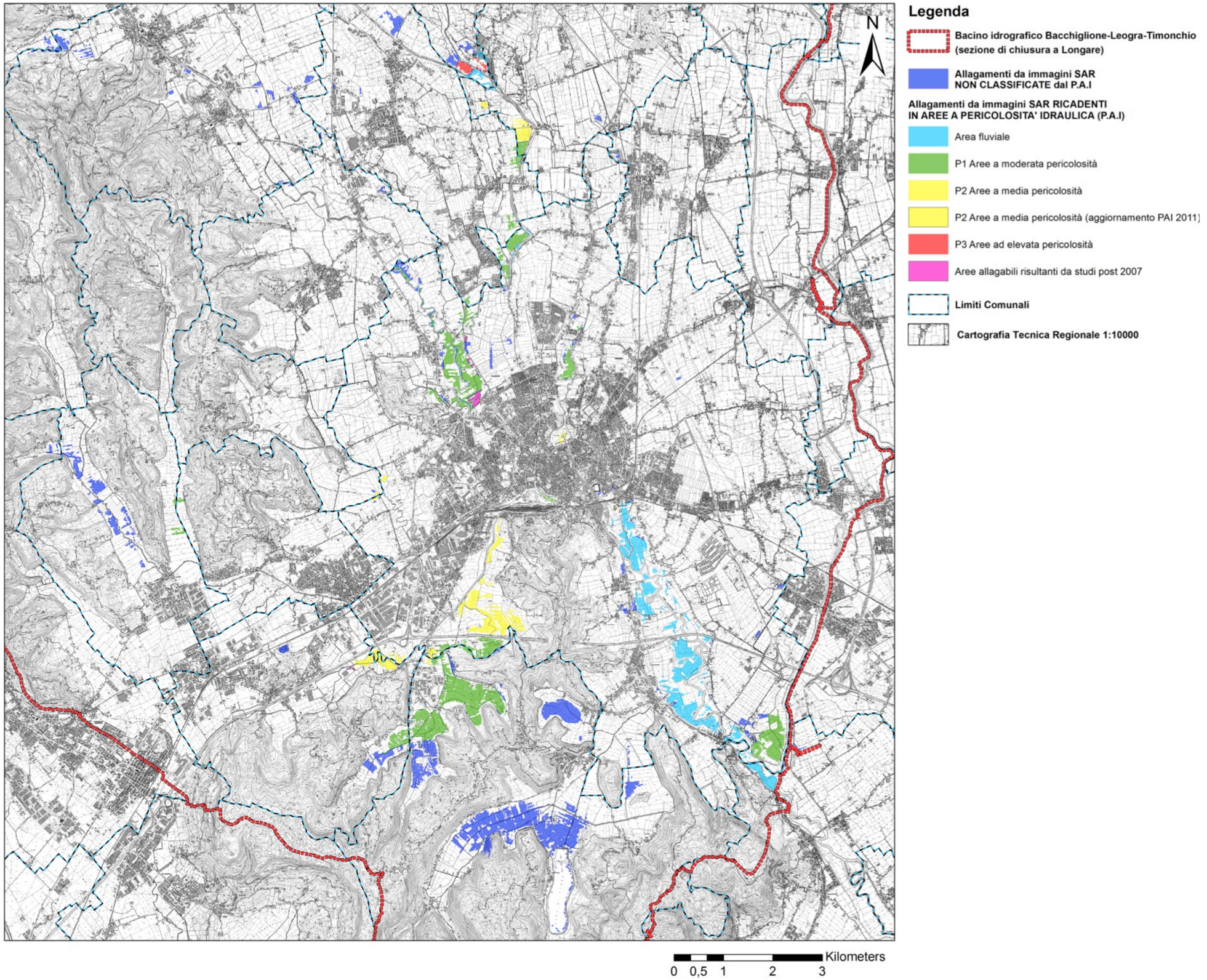


Fig.8.1 - Mappa di confronto degli allagamenti estratti da immagini SAR (evento Novembre 2010) con le previsione del PAI (aggiornamento 2011): allagamenti non presenti nel PAI ed allagamenti previsti, classificati secondo la relativa classe di pericolosità idraulica

Tale discrepanza è particolarmente accentuata per le aree identificate come allagate all'interno del Comune di Arcugnano e interessanti vaste aree agricole prossimità di centri abitati e nuclei industriali e artigianali. Come già antipato nel paragrafo precedente, tali allagamenti non sono stati censiti neanche in occasione dei rilievi diretti effettuati dai due Enti e come tali, risultano quindi essere stati ignorati in sede di aggiornamento P.A.I. all'agosto del 2011. Ricordiamo che tale revisione è stata effettuata esplicitamente a seguito delle scadenze di aggiornamento imposte dalla Direttiva 2007/60/CE e non invece per nuove esigenze conoscitive portate alla luce dall'evento del Novembre 2010: questo perchè il Piano è stato pensato dall'Autorità competente esclusivamente per eventi con tempo di ritorno centenari. Ciò non toglie che, indipendentemente dalle cause che hanno dato luogo all'aggiornamento, ciò che accadde sul bacino del Bacchiglione nel 2010, sia stato comunque tenuto in considerazione, tralasciando però a questo punto una parte significativa di ciò che avvenne.

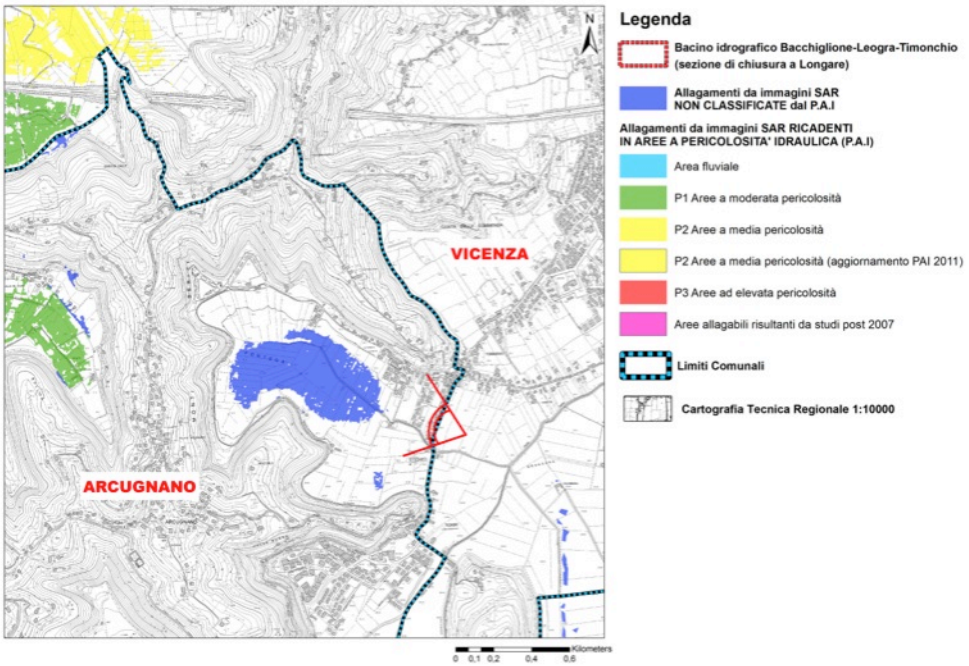


Fig.8.2 - In alto: dettaglio della Fig. 129 su uno degli allagamenti estratti da immagini SAR e non previsti dal P.A.I. e ricadenti nel Comune di Arcugnano (VI); Fig.9.3 - in basso a sinistra: areale di allagamento su base Google Maps;
Fig.8.4 - a destra: foto da aereo dell'allagamento al 02/11/2010 del Genio Civile.

8.2 Potenzialità e limiti del sistema integrato SAR-LiDAR

In questa fase si procede alla valutazione dei vantaggi e svantaggi derivanti dall'uso intergrato dei sensori SAR e LiDAR nell'analisi dei fenomeni di allagamento, secondo quanto ipotizzato in sede di costruzione del nuovo sistema di conoscenza previsto dalla visione strategica orientata alla resilienza. In questo caso sottolineaiamo che non verranno valutate le potenzialità ed i limiti a livello generale delle due tecnolgie, già ampiamente trattati e descritti nei capitoli precedenti, ma esclusivamente queli significativi in termini di etrazione di areali di allagamento e tiranti idrici massimi associati ai fini di una migore valutazione del rischio e del potenziale danno atteso. La valutazione muove dai risultati ottenuti in sede di applicazione delle due

tecnologie al caso applicativo dell'emergenza Vicenza 2010. Tali considerazioni vengono distinte da un suffisso "S" ovvero "L" a seconda che si faccia riferimento rispettivamente all'uso di sensore SAR oppure al sensore LiDAR.

VANTAGGI	SVANTAGGI
S - *TEMPESTIVITA' H24*: analisi tempestiva e con evento in corso che permette l'identificazione di allagamenti superficiali anche in presenza di condizioni meteo avverse ed in qualsiasi condizione di illuminazione solare. Condizione assolutamente necessaria per l'analisi dei fenomeni di allagamento.	**S** - *EFFICACIA VARIABILE*: la possibilità di realizzare una efficace valutazione degli areali di allagamento effettivamente prodotti sul territorio a causa dell'evento dipende da fattori locali, ossia che esulano dalle potenzialità della tecnologia in sé, e che invece dipendono dalle caratteristiche specifiche del set di dati a disposizione per effettuare l'analisi.
S - *CONTESTO*: valutazione ad ampio raggio dei fenomeni di allagamento, indipendentemente da scelte e limiti di natura soggettiva che guidano invece le tecniche di rilievo diretto.	**S** - *EVENTUALE ASSENZA DI UN IMMAGINE PRE-EVENTO DI RIFERIMENTO*: in questo caso il problema è risolto operando una classificazione dell'immagine, nella fattispecie supervisionata pixel-based ma con estensione al contesto mediante analisi tessiturale. Tale modalità di classificazione però presenta comunque dei limiti nella capacità di discriminazione di aree allagate ed in generale nell'attività di classificazione dell'immagine SAR in termine di classi di usi del suolo persenti nella scena.
S - *LUNGIMIRANZA*: possibilità di apprezzare condizioni di pericolosità e rischio idrologico-idraulico prima ignorate dagli strumenti di pianficazione in vigore.	**S** - *COMPLEMENTARIETA'*: l'estrazione efficace degli eventuali allagamenti ha bisogno, oltre che del dato SAR, anche di una serie di informazioni geografiche ancillari (immagini ottiche di riferimento, reticolo stradale, reticolo idrografico, verità a terra per la validazione ecc…) necessarie per una interpretazione del fenomeno sul territorio di riferimento.
S – *FATTORE TEMPO*: analisi dell'evoluzione temporale del fenomeno di allagamento in near real-time, in modo avere una valutazioni oggettiva (e non stimata), spazio-tempo delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del bacino in termini di risposta all'evento.	**S** - *DISPONIBILITA' DI SOFTWARE SPECIFICI PER IL TRATTAMENTO DEI DATI*: la possibilità di trattare dati SAR, in particolare COSMO-SkyMed, è legata alla disponibilità di software molto di nicchia in prevalenza non gratuiti. Le alternative sul mercato sono Erdas
S – *ATTENZIONE AL RISCHIO FUTURO*: analisi efficace degli allagamenti in ambito peri-urbano e agricolo anche con immagini SAR a risoluzione 3 x 3 mt; ciò permette di porre maggiore attenzione il rischio e danno atteso in aree potenzialmente interessati da nuovi interventi urbanistici ed edilizi, legali o illegali (abusivismo edilizio).	

L - *INCREMENTO DELL'ACCURATEZZA DEI MODELLI IDRAULICI*: possibilità di inserimento di un nuovo parametero all'interno dei modelli idraulici mediante l'identificazione di tutti i massimi tiranti idrici effettivamemnte registrati sul territorio interessato dall'ìevento. Ciò contribuisce a formare una serie storica valida a costituituire riferimento oggettivo, tanto in fase di input che in fase di validazione, della simulazione stessa.

RISORSE TEMPORALI MINIME: qualora in possesso di dati e competenze adeguate, l'estrazione degli allagamenti e la stima dei tiranti idrici massimi associati avviene con un impiego di tempo minimo (8-16 ore).

S - *COSTO ESIGUO*: il costo di nuova acquisizione di una scena SAR è esiguo sia per Utenti Commerciali ed ancora di più per Utenti Istituzionali; possibilità inoltre di accedere ad immagini di archivio concesse in "Demo" per progetti di ricerca e utilizzabili come trainging per il personale istituzionale da formare.

L - *ELEVATA ACCURATEZZA MORFOLOGICA*: il rilievo lidar permette di valutare variazioni altimetriche, anche e soprattutto in termini di stima dei tiranti idrici massimi registrati, con una accuratezza verticale di 15 cm e orizzontale di 1-2 mt, riuscendo cosi a fronire performances, in sede di modellazione idraulica, molto superiori rispetto all'utilizzo di modelli digitali del terreno realizzati con tecniche traduizionali.

2010 mediante la Radar Mapping Suite[76] (Demostration Mode per 30 giorni) oppure il software ENVI attraverso il modulo SARScape (prova gratuita prevista solo per i cittadini statunitensi): in entrambi i casi il prezzo del software viene ripagato dalle innumerevoli potenzialità che mette a disposizione anche negli altri settori del telerilevamento, da una ottima interfaccia grafica e da manuali utente capaci di guidare anche l'operatore meno esperto, tanto a livello operativo che teorico. L'unico software gratuito attualmente presente sul mercato è invece NEST (attualmente alla versione 4B) sviluppato dall'ESA proprio per l'analisi di dati SAR, ma caratterizzato da precisi limiti operativi e avente una interfaccia poco *user-friendly* mirata a soddisfare prevalentemente le esigenze di addetti al settore già con elevata competenza in materia.

S - *CONOSCENZE TEORICHE SOLIDE E ESPERIENZA NELLA LETTURA DI IMMAGINI RADAR*: la lettura e trattamento di dati a microonde SAR, proprio per la compessità di funzionamento del sistema, richiede il possesso di una struttura conoscitiva di base solida, tanto in termini di background scientifico che esperienza diretta sulle immagini, in cui nulla può essere lasciato alla improvvisazione, pena l'inefficacia e inattendibilità dei risultati ottenuti.

L - *CARATTERISTICHE DEL RILIEVO*: l'accuratezza dei tiranti idrici ottenibili dipende dal metodo di interpolazione utilizzato per il la costruzione del modello digitale del terreno, dalla densità di punti registrata e dalla sua precisione.

L - *ALGORITMI DI CALCOLO DEI VOLUMI*: il volume d'acqua invasato in sede di allagamento è suscettibile di variazioni che sono funzione dell'algoritmo specifico ed del software utilizzato per il calcolo.

L - *COSTO DI ACQUISIZIONE*: il costo elevato del rilievo LiDAR non ne permette ancora l'acquisizione sistematica e ad ampio spettro su tutto il territorio nazionale; qualora presente è spesso limitato ad alcune porzioni del reticolo idrografico principale e comunque vincolato alle specifiche scelte operative e diposnibilità finanziarie delle amministrazioni di riferimento.

[76] Rivenditore ufficiale in Italia è la società Planatek Italia

	L - *PROPRIETA' ESCLUSIVA DELLA RISORSA*: i rilievi LiDAR, qualora disponibili, tendono ad essere, al di fuori di alcuni casi isolati[77], trattenuti ad uso esclusivo dell'autorità che ha commissionato il rilievo senza prevedere una effettiva ed immediata condivisione della risorsa tanto a livello intra-istituzionale che sociale.

Tab.8.1 - Quadro dei vantaggi e svantaggi derivanti dall'utilizzo intergrato di sensori SAR e LIDAR nell'analisi dei fenomi di allagamento e dalla loro implementazione all'interno del processo di conoscenza orientato alla resilienza così come previsto dal Disegno Strategico

Lo svantaggio "S – EFFICACIA VARIABILE" del sensore SAR nell'analisi dei fenomeni di allagamento, necessità di ulteriori dettagli che permettono di comprendere meglio i meccanismi specifici che intervegono nel definire la variabilità del set di dati a disposizione e della realtiva efficacia in termini di analisi di allagamento:

- FATTORE TEMPO: analisi del fenomeno di allagamento legata al tempo di risposta del sensore SAR e quindi l'acquisizione dell'immagine deve avvenire in tempo utile a poter riprendere la scena con fenomeno di allagamento ancora in corso; (risolviamo con cosmo II generazione, maggior quantita di osservazioni)

- GEOMETRIA DI ACQUISIZIONE: qualora l'immagine venga acquisita secondo un angolo di incidenza troppo elevato del sensore SAR, si generano distorsioni geometriche, soprattutto di layover e shadowing, che pregiudicano irreparabilmente la possibilità di discriminare eventuali fenomeni di allagamento;

- COMPLESSITA' DEL CONTESTO: l'ambito urbano in senso stretto, per la molteplicità e complessità delle sue forme, da luogo a fenomi diffusi di distorsione radiometrica soprattutto in termini di *corner scattering* o "doppo rimbalzo" il che amplifica il rumore della scena urbana rendendone difficoltosa la lettura e l'interpretazione;

- AMBIGUITA' NELLA VALUTAZIONE DEL "*SURFACE SCATTERING*": in ambito urbano, la compresenza di un angolo di incidenza locale del sensore troppo elevato e di numerose superfici lisce complesse (balconate, tralicci, pali della luce, tetti con coperture metalliche, automobili, ecc…), determinano una forte ambiguità nel

[77] La Provincia Autonoma di Trento permette a tutti gli utenti interessati, civili ed istituzionali, l'accesso gratuito al rilievo LiDAR con risoluzione 1x1 (dati ground, DTM e DSM e metadati) dell'intera Provincia sul proprio sito web istutuzionale [125].

momento in cui si stenta di sfruttare il fenomeno radiometrico di *surface scattering* (ossia di diffusione speculare del raggio radar nel momento in cui incontra superfici lisce quali tipicamente le aree allagate) come criterio per l'estrazione di eventuali allagamenti superficiali. L'angolo di incidenza elevato comporta una minore riflessione speculare che invece cresce man mano che ci si avvicina a condizioni di perpendicolarità tra il raggio emesso e la superficie colpita, mentre il fenomeno di surface scattering caratterizza un numero talmente ampio di elementi che rende difficile disciminare quale indicativo di allagamento e quale no.

- VINCOLI DELL'ANALISI DI CHANGE DETECTION DI COERENZA INTERFEROMETRICA: restituisce una mappa dei cambiamenti in cui è possibile apprezzare eventuali aree allagate ma con una significativa perdita di risoluzione spaziale (da 3mt in input a 8 mt in output), con effetti altamente negativi in termini di potenzialità di analisi in ambiuto urbano. La possibilità di ottenere risultati efficaci è inoltre legata alla disponbilità di una coppia interferometrica di immagini rispettivamente (acquisite in momenti pre-evento ed evento in corso ma con stessa geometria e *base line* nulla o prossima allo zero) e con un ritardo temporale tra le due immagini minimo: la necessità del verificarsi di entrambi le condizioni vincola la possibilità di poter circostanziare meglio eventuali decorrelazioni ed attribuirne la causa all'eventuale fenomeno di allagamento oppure no.

Tale quadro permette di avere una maggiore consapevolezza di quali risultano essere, sulla base delle considerazioni teoriche ed applicative complessivamente poste in essere nel presente lavoro, il potenziale apporto conoscitivo che potrebbe essere offerto alla fase di costruzione di conoscenza del rischio dall'utilizzo integrato delle tecnologie SAR e LiDAR. Il bilancio che ne deriva, evitando falsi entusiasmi e allo stesso tempo posizioni troppo conservatrici, è quello di un sistema mediamente efficace nel caso applicativo trattato, ma che è passibile di ulteriori affinamenti ed evoluzioni positive qualora i limiti delle tecnolgie utilizzate vengano osservate e valutate secondo un approccio organico proprio del processo di resilienza. Questo per dire che, nonostante i risultati presentino vari elementi negativi, molti di essi potrebbero essere ragionevolmente ricalibrati nel momento in cui venissero conserati in un quadro più ampio che prenda in considerazione l'intero ammontare delle potenzialità messe a disposizone dal sistema. La valutazione dei vantaggi e svantaggi è calata infatti su una

realtà che porta con sé tutti gli eventuali limiti della politica tradizionale di approccio al rischio, in cui ciascuna fase del processo di mitigazione viene esplicato senza nessun collegamento con gli altri ed in mancanza delle novità significative che invece vengono prevista nel disegno strategico in coerenza con la nuova politica di resilienza.

Infatti non va dimenticato che, la presenza degli tecnolgie proposte all'interno del sistema, trova giustificazione e forza proprio e soprattutto dall'interazione con tutte le altre fasi del processo. Qualora le tecnologie vengano valutate in modo isolato e la fase di conoscenza come semplice punto di partenza iniziale che non trova apporti se non da se stessa, non si può che essere condotti verso una valutazione negativa di quanto proposto, difficlmente realizzabile e di efficacia limitata.

8.3 Possibili evoluzioni

Secondo un approccio sistematico che abbia fatto proprio il concetto di processo di resilienza è ragionevole pensare che molti degli elementi negativi riscontrati nella valutazione delle tecnologie possano trovare invece una evoluzione positiva. Ricordiamo che secondo la vision strategica, la fase di conoscenza è una fase propedeutica fondamentale che non si esaurisce in se stessa ma anzi pone le basi per tutte le altre fasi: viene verificata e messa alla prova nella fase di preparazione e viene sfruttata in modo pro-attivo all'interno della fase di convivenza come base della capacità di sapersi adattare al cambiamento.

Sulla base di ciò, si possono condurre alcune considerazioni riguardo gli svantaggi identificati nel paragrafo precdente.

- il complesso svantaggio "**S** – *EFFICACIA VARIABILE*" è suscettibile di probabile neutralizzazione qualora gli attori istituzionali, ai vari livelli, riconoscano il ruolo del SAR come risorsa fondamentale nella valutazione degli allagamenti, non soltanto in situazioni di emergenza e non soltanto quindi da parte di alcuni specifici attori (Protezione Civile). Il riconoscimento del ruolo di conoscenza che la tecnologia potrebbe rivestire nelle varie fasi permetterebbe di porre rimedio e stabilizzare del tutto la variabilità, in positivo, dei risultati. In tal modo si assisterebbe infatti ad un effettivo incremento della domanda di immagini ed un affinamento dei prodotti offerti sulla base delle esigienze specifiche di estrazione di allagamenti: ciò implica la possibilità di poter vincolare maggiormente l'attività di acquisizione alle caratteristiche geometriche necessarie (angolo di incidenza massimo di 25°), intensificare le acquisizioni in modalità Spotlight-2 (risoluzione ad 1m) o eventualmente giungere ad

una sistema di osservazione della terra con tecnologia a microonde ancora più efficace in termini di risoluzione e più effiente in termini di variazioni di assetto nominale.

In questo senso è importante sottolineare come la progressiva legittimazione del ruolo del telerilevamento nella tematica del rischio vada di pari passo innanzitutto con l'abbondono del ruolo di "commodity" attualmente assunto dai dati derivanti da sistemi di Osservazione della Terra. Un simile ruolo fa riferimento al fatto che tali i prodotti costituiscono un bene il cui prezzo è stabilito nel mercato esclusivamente sulla base della loro disponibilità, senza nessuna differenziazione qualitativa dell'offerta in termini di esigenze specifiche dell'utente finale.

Inoltre, la scarsa conoscenza delle potenzialità del SAR da parte di una vasta gamma di attori ed il suo consenguente scarso utilizzo risiede in una convinzione di fondo riguardo il mercato dell'OT che spinge la maggior parte degli interessati ad associare l'alta risoluzione ad un elevato prezzo da pagare per la disponibilità dell'immagine. Tale pregiudizio è di fatto parzialmente fondato e questo perché attualmente lo stato dell'arte del mercato di prodotti di OT vede contrapporsi due realtà ben distinte[126] il mercato classico, cosiddetto della *Spatial Industry*, che opera una commercializzazione ad alto costo unitario per dati utilizzati una sola volta con fondi pagati di fatto dal contribuente, secondo un atteggiamento di chiusura e settorializzazione dell'informazione spaziale.

L'altra faccia della medaglia è il mercato dei portali di massa, la cosidetta *Media Industry*, che distribuisce gratuitamente o comunque a costi molto contenuti, la stessa informazione a più utenti, aggiungendo eventualmente messaggi promozionali quale forma di auto-sostentamento. In questo senso esso si configura come un mercato aperto e orientato alla diffusione dell'informazione spaziale, privilegiando più la frequenza tenporale di acquisizione a scapito della risoluzione.

In questo quadro, la nuova politica di resilienza al rischio richiede al mercato dell'Osservazione della Terra uno sforzo, secondo un *feed-back* reciproco che si sostanzia da un lato, in maggiori capacità di sostentamento del mercato di riferimento dovuto ad un'incremento e differenziazione nella domanda di prodotti e servizi e dall'altro in termini di evidenti ritorni conoscitivi per il tema del rischio. Questo rapporto di dare-avere reciproco sarà possibile esclusivamente nel momento in cui il mercato dei dati da OT venga rivisto mettendo al primo posto le esigenze degli utenti finali e questo non tanto a posteriori, quando le tecnologie sono già state sviluppate e

l'utente deve adeguarsi a quanto disponibile, ma anche in fase preliminare, integrando gli eventuali contributi progettuali degli utenti in sede di definizione delle politiche di finanziamento per la progettazione e ammodernamento dei futuri sistemi satellitari e di difesa.

Nonostante l'obiettivo futuro sia quello di svincolarsi da una tecnolgia specifica, sarebbe inopportuno trascurare gli sviluppi già previsti per le risorse specifiche utilizzate nel presente lavoro. Tali evoluzioni rappresentano quanto di più vicino per il superamento di alcuni limiti evidenziati in termini di "EFFICACIA VARIABILE" del sensore SAR e si sostanziano nell'evoluzione già in corso della costellazione COSMO-SkyMed. L'attuale missione è composta, come abbiamo detto, da ben 4 satelliti SAR operanti in banda X, ognuno con vita utile stimata di cinque/sei anni a partire dalla data di messa in orbita (giugno 2007, dicembre 2007, ottobre 2008 e novembre 2010) e del sistema complessivo di circa quindici. In vista del suo futuro esaurimento, Agenzia Spaziale Italiana e Ministero della Difesa hanno ritenuto utile programmare la progettazione e futura messa in orbita[78] di un sistema COSMO-SkyMed Seconda Generazione (CSG) al fine di assicurare la continuità con l'attuale sistema e in accordo con gli impegni nazionali presi a livello europeo circa la partecipazione italiana al programma di sviluppo del sistema europeo di osservazione radar della terra MUSIS (*Multinational Space-based Imaging System*)[79]. La nuova missione, la cui entrata in servizio è prevista per l'inizio del 2016 [127], prevede la messa in orbita di due nuovi satelliti radar ad apertura sintetica SAR in banda X (Protoflight-PFM e Flight Model-FM1), nonché un complessivo ampliamento e rinnovamento del Sistema di Terra, in modo tale da risultare in grado di soddisfare tanto i futuri requisiti operativi, tanto le esigenze del MUSIS [128].

L'avvio del progetto, avvenuto nel Dicembre 2010, prevede orientativamente circa 53 mesi per il lancio del primo satellite (PFM) e 65 mesi per il lancio del secondo satellite, a cui seguirà una fase di messa in opera dell'ordine di 6 mesi; la vita media stimata dei satelliti CSG è pari a 7 anni, mentre le infrastrutture di terra potranno essere mantenute in condizioni operative per 15 anni.

---

[78] Accordo esecutivo stilato tra ASI e Ministero della Difesa Italiana nel Febbraio 2009

[79] Programma pluriennale di A/R n. SMD 10/2009, relativo alla realizzazione del programma multinazionale denominato MUSIS (Multinational Space-based Imaging System) - CSG (COSMO-SkyMed Seconda Generazione) correlato al futuro sistema satellitare europeo di osservazione della Terra, Atto del Governo sottoposto a parere parlamentare n.90, XVI Legislatura (Governo Berlusconi –IV), Iniziativa presentata da Ministro della Difesa, seduta n. del 26 maggio 2009

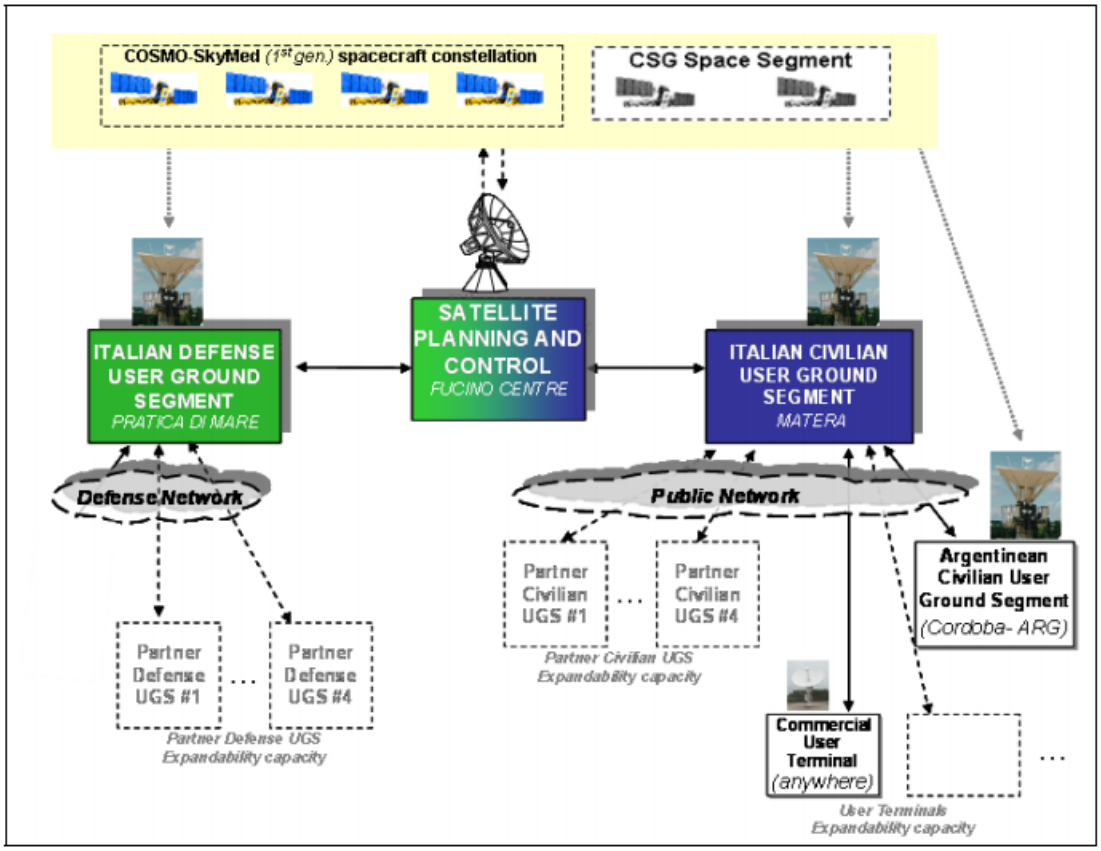


Fig.8.5 - Schema concettuale dell'architettura del sistema COSMO integrato (prima e seconda generazione) [129].

Il nuovo sistema confermerà le sue finalità duali di monitoraggio ambientale e difesa, andando ad integrare il sistema attuale e allo stesso tempo offrendo ulteriori funzionalità e più avanzate prestazioni. Nel dettaglio è previsto il miglioramento della risoluzione spaziale delle immagini prodotte, capacità di ricezione ed elaborazione dati radar in doppia polarizzazione simultanea, gestione da parte del nuovo *ground segment* di un volume dati circa doppio rispetto alle attuali capacità, sia in termini di memorizzazione dei dati a bordo che della loro trasmissione alle stazioni di terra. Significativi saranno inoltre i miglioramenti anche per quel che riguarda la programmazione delle richieste, la pianificazione dell'acquisizione delle immagini, il controllo missione e il processamento dei dati[128].

- il problema "**S** - *EVENTUALE ASSENZA DI UN IMMAGINE PRE-EVENTO DI RIFERIMENTO*" e della scarsa efficacia della classificazione supervionata pixel-based anche se associata al contesto, può essere risolto prevedendo il potenziale ricorso a metodi di classificazione basati sulle reti neurali, attualmente considerati particolarmente efficaci nel trattamento di dati SAR e in generale nell'ottica di un progressivo abbandono della

componente di soggettività di cui una classificazione supervizionata è portatrice. In questo ultimo caso infatti, il risultato è decisamente dipendente dalle scelte dell'operatore ed, in quanto tale, non ripetibile, nonché frutto di una valutazione assolutamente soggettiva tanto nella scelta delle aree di training che in sede di foto-interpretazione per l'affinamento dei risultati. Per contro, il ricorso ad una classificatore di tipo reti neurali porta con sé le necessità di addestramento dell'algoritmo (*Learning rule definition*), che deve avvenire sulla base di un set di dati, già classificate in termini di allagamento, quantitativamente idono alla comprensione e assimilazione delle leggi fisiche che regolano il fenomeno: una volta addestrato, l'algoritmo risulterà potenzialmente in grado di riprodurre i comportamenti assimilati sfruttandoli da chiave di lettura per la classificazione delle nuove immagini da trattare.

- per quanto riguarda l'elemento "**L** - *CARATTERISTICHE DEL RILIEVO*" si è detto che l'accuratezza dei tiranti idrici ottenibili (incrocio di eventuali areali di allagamento con la morfologia del territorio da fonte LidAR) dipende molto dal metodo di interpolazione utilizzato per il la costruzione del modello digitale del terreno, dalla densità di punti registrata e dalla sua precisione. Tale variabilità può essere limitata riconoscendo però la necessità di precise linee guida istituzionali, in termini piani di volo, accuratezza e tecniche di processamento, tali da creare un riferimento oggettivo ed una omogeneità di fatto nei rilievi, sulla base anche delle buone pratiche realizzate a livello internazionale già accennate. Questa necessità verrebbe di fatto palesata nel momento venisse riconosciuta, tanto a livello sitituzionale che sociale, l'importanza del riscorso al dato LiDAR nel processo di valutazione del rischio e dei danni associati; la questione troverebbe inoltre ulteriore supporto nel momento in cui il regime assicurativo obbligatorio o semi-obbilgatorio contro le catatrofi naturali venisse posto ufficialmente in essere.

- il problema "**L** - *ALGORITMI DI CALCOLO DEI VOLUMI"* trova soluzione analoga al caso precedente. Una volta riconosciuto ufficialmente il ruolo dell'uso integrato dei sensori SAR e LiDAR in tema di rischio idrologico-idraulico e stilate, a livello istituzionale, linee guida di riferimento per il rilievo LiDAR, è ragionevole pensare anche a potenziali algoritmi di calcolo e software univocamente stabiliti in sede di calcolo dei volumi di allagamento, qualunque sia lo scopo finale (redazione del PAI, stima del danno per

assicurazioni, ec…). Ciò assicurerebbe una coerenza globale del sistema ed una garanzia di integrità della stima rispetto all'autorità che la pone in essere.

- l'elevato costo di acqusizione del rilievo LiDAR che emerge dall'elemento "**L** - *COSTO DI ACQUISIZIONE"* e che attualmente costirtuisce un limite nella disponibilità del rilievo da parte degli organi interessati, è qualcosa che dipende molto dal ruolo ufficialmente attribuito alla tecnologia. Qualora tale ruolo sia ufficializzato e la cui applicazione venga specificatamente motivata e dettagliata (esempio nei regimi assicurativi obbligatori), immediatamente si creerà nel mercato un'aumento dell'offerta e, di conseguenza, un regime maggiormente concorrenziale, con relativo decremento del costo di acqusizione e aumento delle porzioni di territorio potenzialmente rilevabili.

In generale, la componente sociale assume una ruolo importantissimo anche nel riconoscimento delle potenzialità derivanti da SAR-LiDAR. La sua comprensione è necessaria per costituire le basi di fiducia e condivisione delle conoscenze poste in essere, in vista di un'atteggiamento consapevolmente pro-attivo, anche indivudale, verso il rischio. Affinchè la complessità di tali tecnologie venga semplificata e resa alla portata anche dei non addetti al settore occorre che la comunicazione istituzionale si avvalga di canali comunicativi alternativi e specificatamemte locali, tagliati sulle caratteristiche del contesto in cui opera. Solo in questo modo il sistema potrà risultare complessivamente resiliente.

8.4 CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi si era posto l'obiettivo di portare all'attenzione l'emergente necessità di una profonda trasformazione dell'attuale politica di mitigazione del rischio, coerentemente con l'inversione di tendenza che si sta progressivamente consolidando a livello internazionale. Essa mira all'affermazione del concetto di resilienza, ossia allo sviluppo di una capacità di conoscenza, preparazione e convivenza con il rischio tale da permettere, tanto ai territori quanto alle comunità, di anticipare e di convivere con il cambiamento di cui il rischio è portatore e di viverlo come occasione di rinnovamento in un ottica di pro-azione agli eventi. Tale necessità nasce dagli evidenti limiti della politica tradizionale attualmente in vigore nel nostro paese che, con cadenza sempre più regolare e ravvicinata, sono sottoposti alla nostra attenzione in virtù della crescente frequenza con la quale fenomeni a pericolosità naturale si manifestano nei luoghi del nostro abitare. L'esponenziale crescita nel tempo di tali

conseguenze, sia in termini di vittime che di danni, obbliga quindi a ragionare sulla necessità di reinterpretare tanto gli approcci quanto gli strumenti e le tecnologie a supporto dell'attività di mitigazione del rischio, coerentemente con i nuovi obiettivi previsti dalla politica di resilienza.
Per contribuire attivamente allo scopo, l'attività di tesi ha ritenuto opportuno valutare il potenziale apporto conoscitivo derivante dall'utilizzo integrato di sensori SAR e LiDAR nel processo di costruzione della conoscenza del rischio idrologico-idraulico. Le caratteristiche intrinseche di queste due tecnologie stanno progressivamente conducendo la comunità scientifica a valutarle tra le più idonee al perseguimento dell'obiettivo: contribuire a limitare e circoscrivere i vasti termini di incertezza che caratterizzano il campo del rischio, soprattutto in ambito urbano, in stretta combinazione con un ammodernamento delle tecnologie di monitoraggio pluviometrico ed idrometrico in tempo reale. Tale esigenza si sostanzia nella necessità di una conoscenza approfondita della sempre più complessa e articolata morfologia del territorio, nonché delle forme e dei tempi con i quali i fenomeni naturali si manifestano su di esso assumendo i caratteri propri del rischio e del danno.

In questo quadro, i maggiori limiti dell'approccio tradizionale che spingono a riflettere sull'esigenza di cambiamento risultano essere prima di tutto un atteggiamento verso il rischio di esclusiva "protezione" mediante il ricorso ad opere strutturali di difesa di dubbia realizzabilità, nonchè una risposta a posteriori agli eventi mediante azioni emergenziali e finanziamenti riparatori, nell'ottica anche di esclusiva responsabilità istituzionale del danno. La nuova politica riconosce invece la dimensione ordinaria del rischio, soprattutto per quanto riguarda l'ambiente urbano, e a partire da essa elabora il nuovo approccio centrato sulla capacità di resilienza, realizzabile esclusivamente mediante la conoscenza, preparazione e convivenza con il rischio stesso in un quadro omnicomprensivo e condiviso.
In quest'ottica, il riconoscimento di una co-responsabilità, tanto sociale-individuale quanto istituzionale nei confronti del rischio, assume un ruolo centrale e questo sia in termini di cause scatenanti che, soprattutto, di danni attesi. Condizione necessaria affinchè tale responsabilità venga compresa e presa in carico da tutti i soggetti, è la creazione di un sistema di conoscenza strutturato, aggiornato, multidimensionale e condiviso, quale motore di un valido e coerente percorso di preparazione e convivenza con il rischio stesso: soltanto in questo modo la conoscenza del rischio risulterà in grado di stimolare l'azione pro-attiva di tutti i suoi responsabili, anche e soprattutto, oltre il limite dell'esperienza diretta. Un ruolo fondamentale assume dunque la capacità di assimilazione della "dimensione tecnica" della conoscenza del

rischio da parte del substrato sociale, possibile esclusivamente grazie ad una comunicazione istituzionale maggiormente "locale"; stessa importanza viene attribuita alla rimodulazione dei contenuti della conoscenza stessa sulla base degli apporti derivanti dalla condivisione, tanto siciale quanto intra-istituzionale. Entrambi i fattori diventano in questo modo il motore per il funzionamento totale e coerente del sistema stesso e senza i quali l'intero processo non troverebbe, di fatto, attuazione. Nel momento in cui la conoscenza del rischio sia stata recepita ed assimilata da parte di tutti gli aventi ruolo nella materia, le attività di preparazione e convivenza saranno nelle condizioni di operare, diversamente dal passato, secondo un progressivo abbandono dell'approccio conservatore proprio della politica tradizionale. Quest'ultimo, avvalendosi esclusivamente di misure strutturali di protezione, risulta tanto portatore di un rischio residuale comunque esistente e non sufficientemente considerato, quanto fautore di interventi di dubbia realizzazione in virtù degli evidenti ed innegabili limiti del *modus operan*di istituzionale. Anche sulla base di tali considerazioni, l'approccio attuale non risulta più in linea con i nuovi obiettivi che il processo di resilienza si prefigge. La nuova politica afferma invece il decisivo ricorso, anche e preferibilmente, ad azioni non strutturali di mitigazione del rischio, di competenza tanto istituzionale quanto sociale, fin'ora trascurate o sottovalutate. L'analisi della situazione italiana ha infatti posto in evidenza la totale assenza di un regime assicurativo obbligatorio o semi-obbligatorio, a seconda dei territori, contro le catastrofi naturali: uno strumento assolutamente necessario proprio in virtù dell'attuale frequenza ed intensità con la quale fenomeni di allagamento disastrosi interessano anche il nostro paese. Una situazione che ha evidenziato, oltre alla necessità di ricorrere a tecniche di *flood- proofing*, raramente previste dai piani di settore nazionali, anche la mancanza di una pianificazione urbanistica orientata al "*Water Sensitive Urban Design",* ossia una pianificazione dello sviluppo urbano che ponga particolare attenzione alla gestione integrata del ciclo delle acque.

Tutti questi limiti sottintendono prima di tutta la mancanza di una valida struttura conoscitiva del rischio in campo a tutti i responsabili (individui, comunità, istituzioni e tecnici), nei termini propri stabiliti dal processo di resilienza: strutturazione, multidimensionalità, aggiornamento e condivisione.

L'analisi delle mancanze dell'attuale stato del sistema di conoscenza e la valutazione del potenziale apporto conoscitivo derivante dall'utilizzo integrato di sensori SAR-LiDAR ha attraversato prima di tutto un'analisi del vasto quadro di attori, progetti e fasi operative in cui

le cue tecnologie trovano, più o meno ufficialmente, già attuazione, per poi assumere forma e sostanza all'interno del caso studio, riguardante l'emergenza alluvione che ha interessato la Regione Veneto ed in particolar modo la città di Vicenza nel Novembre 2010.

L'analisi dello stato dell'arte in Italia ha evidenziato come di fatto il SAR sia già attualmente utilizzato in occasione di progetti definiti all'avanguardia in tema di rischio, quali il progetto OPERA – "Protezione Civile dalle Alluvioni" e SAFER in quanto *Emergency Responce Service* del progetto GMES, rispettivamente incaricati di agire in fase di previsione e gestione dell'emergenza. Allo stesso modo, se pur in forme e luoghi diversi, anche il LiDAR risulta utilizzato in fase di valutazione del rischio, nonostante ciò avvenga in modo non sistematico e ufficiale. Allora cos'è che non ha funzionato per l'emergenza in Veneto e che continua a non funzionare? Ciò che non funziona, il punto debole del processo è la carenza o assoluta mancanza di condivisione tanto della conoscenza, quanto delle tecnologie e dei risultati. Per quanto riguarda il SAR, sia per il progetto OPERA che per SAFER, il referente istituzionale è esclusivamente il Dipartimento di Protezione Civile, senza alcun collegamento invece con gli organi preposti alla pianificazione di settore in tema di rischio idrologico-idraulico e con scarsissimo riguardo alla condivisione delle informazioni con le comunità. Ciò che emerge è quindi l'assenza di un sistema strutturato di domanda di immagini SAR (COSMO-SkyMed o di altra costellazione) e dei risultati da esso ottenibili, da parte di attori preposti al controllo e alla sicurezza del territorio che siano diversi dal Dipartimento di Protezione Civile: tali preziose informazioni risultano dunque relegate in una sede specifica ed isolata dal resto del sistema, secondo un atteggiamento di risposta esclusivamemente emergenziale ai fenomeni.

Relativamente al sensore LiDAR, la disponibilità di un rilievo acquisito mediante tale tecnologia risulta attualmente ancora limitata ad alcune amministrazioni particolarmente all'avanguardia, sia in termini di risorse economiche a disposizione che di capacità di condivisione con il substrato sociale.

Ciò che è emerso quindi è come, nel complesso, il ruolo conoscitivo di entrambe le tecnologie non risulti ancora ufficializzato ne reso cogente all'interno degli strumenti di settore preposti alla pianificazione del rischio o per opera di opportune prescrizioni di legge: ciò contribuisce a renderle, seppur potenzialmente portatrici di un vasto beneficio alla materia, evidentemente sottoutilizzate anche e soprattutto in virtù di una scarsa e condivisa conoscenza delle loro potenzialità.

L'analisi del caso studio ha prima di tutto confermato i limiti dell'approccio tradizionale alla mitigazione del rischio attualmente in vigore. Innanzitutto si è riscontrata una totale ed esclusiva egemonia delle misure di mitigazione strutturali previste dal Progetto di Piano Stralcio (P.A.I.) in vigore, di fatto mai realizzate e finanziate esclusivamente dopo l'evento mediante stanziamenti di risorse istituzionali riparatorie ed emergenziali. In secondo luogo, è emersa una totale inefficacia dei sistemi di previsione e preannuncio, dovuta ad una eccessiva commistione e sovrapposizione di competenze quanto ad una mancanza di reale comunicazione tra tutti gli attori preposti alla sicurezza del territorio: tra quest'ultime inefficienze è stata riscontrata anche quella reativa ai progetti definiti all'avanguardia soprattutto in termini di utilizzo della risorsa SAR e prima citati, incaricati della fase di previsione e risposta all'emergenza di rischio alluvione, ma che di fatto si sono dimostrati autoreferenziali. Quest'ultimo aspetto ha avuto come ulteriore conseguenza il fatto che le Autorità preposte alla valutazione del rischio e alla programmazione delle opere di mitigazione continuino ad avvalersi di analisi storiche degli eventi di allagamento escluivamente derivati dal rilievo diretto, senza usufruire invece delle ulteriori potenzialità conoscitive sviluppate in sedi alternative. Per ultimo, l'intero evento è stato complessivamente accompagnato da una sottovalutazione generale del rischio da parte dei tecnici, delle autorità e delle istituzione, nonchè da un atteggiamento di decisa attenuazione, a livello nazionale, della drammaticità dell'evento, che nell'insieme hanno spinto le popolazioni coinvolte a preferire canali di comunicazione alternativi (web, social network, media locali), in quanto percepiti come più efficaci rispetto a quelli ufficiali.

Nello specifico poi, in sede di valutazione di potenziale costruzione di conoscenza, il caso studio presentato nell'elaborato di tesi ha permesso di testare, nei limiti delle competenze dell'autrice, le potenzialità singole e combinate di entrambi i sensori presi in cosiderazione. Ciò che si è giunti a dimostrare è che tanto il SAR quanto il LiDAR risultano produrre un effettivo contributo positivo nella conoscenza del rischio. I risultati hanno infatti confermato come il SAR possa essere effiacemente impiegato nell'identificazione degli areali di allagamento, mentre il LiDAR consenta di stimarne tiranti idrici massimi e volumi d'acqua invasati in sede di evento. Tali informazioni costituiscono un ulteriore parametro integrabile nella modellazione idraulica, con conseguente maggiore efficacia ed accuratezza ottenibile in sede di simulazione della propagazione dell'onda di piena.

Allo stesso tempo, si è reso evidente come le potenzialità del sensore SAR risultino incontrare degli evidenti limiti in ambito strettamente urbano, dove l'intrinseca complessità del sistema "città" mal si presta ad essere indagato ai fini di un'analisi di potenziale allagamento: l'elavata presenza di elementi complessi è portatrice di una ambiguità tale da generare una risposta del sensore difficilmente interpretabile ai fini dell'estrazione delle aree di potenziale allagamento. Alcuni di questi limiti sono intrinseci alla tecnolgia (sensore attivo con problemi di trasmissione del segnale), ma in parte superabili qualora le potenzialità del SAR vengano riconosciute e ufficializzate da tutte le istituzioni competenti in tema di rischio: una domanda maggiormente legittimata e circostanziata permetterebbe di operare una ricalibrazione delle caratteristiche e delle frequenze di acquisizione delle immagini sulla base delle specifiche esigenze del rischio idrologico-idraulico in ambito urbano. Considerato in questi termini specifici, il processo di resilienza va infatti di pari passo con l'affermazione di un mercato aperto di prodotti e servizi derivanti dai sistemi di Osservazione della Terra, in cui l'utente è chiamato a ricoprire un ruolo centrale. In questo senso l'obiettivo è dunque quello di orientare il settore alla distribuzione e diffusione dei datasets di immagini SAR, a prezzo contenuto e con risoluzioni spaziali soddisfacenti, forniti ad una vasta gamma di attori e soprattutto sulla base degli effettivi bisogni degli utenti finali.

Allo stesso modo si è dimostrato come l'impiego di sensori LIDAR permetta effettivamente una conoscenza approfondita della morfologia territoriale in termini molto più accurati rispetto ai sistemi tradizionali di rilievo topografico. La conoscenza dettagliata delle variazioni altimetriche permette, combinando gli areali di allagamento estratti dalle immagini SAR, di identificare con un'accuratezza verticale di circa 15 cm gli eventuali tiranti idrici massimi di allagamento per poi stimare i volumi d'acqua indotti dall'evento. Anche in questo caso la procedura quanto la tecnologia in sé non si sono dimostrati esenti da limiti: il costo di acquisizione dei rilievi è ancora elevato, il che non permette la disponibilità di una copertura totale di tutto il territorio bensì limitata ad areali ridotti oppure ad una fascia di rispetto variabile lungo le aste idriche principali come nel caso studio presentato. Inoltre, qualora disponibile, tale risorsa non risulta sufficientemente promossa e condivisa tanto a livello intra-istituzionale quanto sociale, con conseguente scarso coinvolgimento degli enti di ricerca e delle comunità nella costruzione di conoscenza e di fiducia negli organi competenti. A ciò si aggiunge la totale mancanza di precise linee guida in termini di programmazione dei rilievi e trattamento dati derivanti da tecnologia LiDAR: tale fattore crea una forte variabilità, sia in

termini di caratteristiche dei rilievi disponibili che di algoritmi utilizzabili per la stima dei volumi di allagamento, che ha conseguenze negative sui risultati ottenuti. Anche in questo caso alcuni dei limiti riscontrati risultano ragionevolmente superabili nel momento in cui avvenga una riorganizzazione della politica di mitigazione secondo il percorso omnicomprensivo orientato alla resilienza qui sviluppato. Nel momento in cui a livello istituzionale venga legittimato e reso cogente il ricorso a tecnologie LiDAR in sede di valutazione del rischio idrologico- idraulico e, allo stesso tempo, qualora l'istituzione di un regime assicurativo obbligatorio o semi-obbligatorio trovi effettivamente attuazione, è ragionevole pensare che il costo di un rilievo LiDAR subisca un effettivo ridimensionamento in virtù di un regime maggiormente concorrenziale del mercato di settore; inoltre è necessario ridurre la variabilità del dato e del suo trattamento mediante l'emanazione di opportune linee guida finalizzate a rendere coerente ed omogena l'attività degli attori coinvolti, standardizzandone i risultati.

Tutte le considerazioni fin'ora effettuate sono frutto delle elaborazioni condotte nel presente lavoro ed in quanto tali, sono limitate al tempo e alle risorse a disposizione ed affinabili soprattutto sulla base di ulteriori apporti conoscitivi integrati.

Il lavoro realizzato presenta degli sviluppi futuri legati innanzitutto alla possibilità di rielaborare il caso di studio in un'ottica di collaborazione e *feed-back* con tutti quegli attori, enti di ricerca e tecnici di riferimento istituzionale, a vario titolo coinvolti nelle attività di valutazione e previsione del rischio. In questo senso un ragionevole interesse viene posto nella verifica delle potenzialità di quanto prodotto nel caso studio con la modellazione idraulica in fase di definizione. Il confronto tra i possibili risultati ottenibili dalla simulazione della propagazione dell'onda di piena, sia con che senza i parametri conoscitivi introdotti dall'utilizzo integrato SAR-LiDAR, rappresenterrebbe un valido aiuto per una valutazione delle due tecnologie secondo forme più coerenti con il quadro d'azione previsto nel disegno strategico proposto nel presente lavoro. Nello specifico, l'attività si renderebbe utile nel definire meglio il potenziale ruolo che le tecnologie proposte potrebbero avere nell'identificare meglio le vie preferenziali di propagazione delle piena soprattutto in ambito urbano, sia in termini di areale di allagamento che di tirante idrico atteso, collaborando così ad una migliore definizione tanto del rischio quanto del danno potenziale.

In secondo luogo, sarebbe auspicabile poter rielaborare l'immagine SAR del 03/11/2010 facendo ricorso a classificatori basati su reti neurali, in modo da rendere i risultati potenzialmente più efficaci ed il più possibile privi della componente di soggettività di cui

invece è portatrice una classificazione di tipo supervisionato. Tale potenzialità, essendo vincolata alla necessità di istruire l'algoritmo di classificazione in modo tale da renderlo in grado di assimilare e riprodurre autonomanente la legge fisica che regola il fenomeno, è concretizzabile proprio ed esclsuivamente qualora venga messo appunto in via preliminare un set quantitativamente idoneo di classificazioni di allagamenti utilizzabili per lo scopo.

Per ultimo, ma non meno importante, risulterebbe utile valutare meglio il caso locale, mediante il ricorso ad un sistema strutturato di interviste individuali, mirate a definire meglio le eventuali carenze che la comunità sociale riconosce in capo alla "dimensione tecnica", causa principale della fiducia/sfiducia nella comunicazione ufficiale. Inoltre, una migliore conoscenza delle dinamiche locali risulterebbe utile ad evidenziare i meccanismi sociali e psicologici che limitano l'azione individuale verso il rischio, soprattutto in assenza di esperienza diretta, nonché il livello di apprezzamento e risposta alle eventuali misure non strutturali proposte, ricordando che in questo caso, diversamente dal passato, l'efficacia del sistema resiliente è strettamente subordinata a scelte individuali e di comunità all'azione.

Bibliografia

[1] Abbott M.B., Vojinovic Z., *Flood Risk and Social Justice*, IWA, 2011

[2] Istituto Superiore per la Ricerca e Protezione Ambientale (ISPRA), "Cap.14 Rischio Naturale", in *Annuario dei dati ambientali*, 2010, (LINK)

[3] Corriere della Sera, "Frana nel Messinese: tre i morti. Salvata la ragazza data per dispersa", 2011, (LINK)

[4] Città di Genova, "Alluvione a Genova. Le vittime sono sei. Piu' di cento gli sfollati", 2011, (LINK)

[5] STAMP Toscana, "Salgono a 10 le vittime dell'alluvione, nuovo allerta meteo", 2011, (LINK)

[6] Correrie della Sera, "Marche, ritrovato il cadavere della 20enne dispersa. Un morto a Teramo", 2011, (LINK)

[7] CLIMATEMONITOR, "Alluvione in Veneto: dinamica degli eventi", 2010, (LINK)

[8] il Giornale.it, "Prato: tre vittime. E' polemica sul lutto cittadino Nel Genovese un 44enne disperso sotto i detriti", 2010, (LINK)

[9] Metereologica.it, "Alluvione a Genova e Savona. Analisi dell'evento che ha colpito la Liguria il 4 ottobre 2010", 2010, (LINK)

[10] Società Metereologica Mediterranea Srl, *"9 settembre 2010 - Alluvione ad Atrani",* 2010, (LINK)

[11] Sky.it, "Alluvione Messina 2009. Saponara e Barcellona Pozzo di Gotto il giorno dopo", 2009, (LINK)

[12] Quotidiano.net, "Trovata la quarta vittima. Bertolaso oggi in Sardegna", 2008, (LINK)

[13] ARPA Piemonte, *RAPPORTO PRELIMINARE SULL'EVENTO ALLUVIONALE DEL 28-30 MAGGIO 2008*, 2008, (LINK)

[14] intoscana.it, 2002, (LINK)

[15] Meteolive.it, "Alluvione TARVISIANO agosto 2003: che disastro! Oltre 400 mm di pioggia caduti a Pontebba", 2009, (LINK)

[16] ARPA Piemonte*,* Rapporto sull'evento alluvionale del 13 - 16 ottobre 2000*,* 2003, (LINK)

[17] Corriere della Sera, *"Camping travolto dal fango, strage in Calabria Straripa fiume: 11 morti e 5 dispersi, c' era un gruppo di disabili. Ritardo nei soccorsi. La regione in ginocchio"*, 2000, (LINK)

[18] Cutano G., "I fenomeni Atmosferici Violenti" in, *Convegno di Meteorologia, Ostuni* (BR), 2007, (LINK)

[19] Ispro Online, “1996: alluvione di Crotone”, (LINK)

[20] NET & SERVICE, “L'alluvione in Versilia nel 1996”, (LINK)

[21] WIKIPEDIA, “Alluvione della Lombardia del 1995”, 2011, (LINK)

[22] Corriere della Sera, “Catania il giorno dopo: lacrime e polemiche”, 1995, (LINK)

[23] Museo del Fiume, “L’alluvione del 1994”, (LINK)

[24] MeteoWeb, “Alluvione Genova: non c’entrano i cambiamenti climatici, fenomeni così ci sono sempre stati”, 2011, (LINK)

[25] Corriere della Sera, “Poggio a Caiano, deserto d' acqua”, 1992, (LINK)

[26] Corriere della Sera, “alluvione e morte a Genova”, 1992, (LINK)

[27] IL SECOLO XIX, “A 16 anni dall’alluvione: «Stessi rischi», 2008, (LINK)

[28] WIKIPEDIA, “Alluvione di Campi Bisenzio del 15 novembre 1991”, 2011, (LINK)

[29] Scotti R., “La grande alluvione del Luglio 1987”, (LINK)

[30] Fondazione Stava 1985 Onlus, “IL CROLLO”, (LINK)

[31] Autorità di Bacino del Fiume Po, *LINEE GENERALI DI ASSETTO IDROGEOLOGICO E QUADRO DEGLI INTERVENTI. BACINO DEL TARO*., (LINK)

[32] La Repubblica, “Genova come nell'ottobre 1970. Il disastro, poi il riscatto dei giovani”, 2011, (LINK)

[33] Meteogiornale, “Biellese: la catastrofica alluvione del novembre 1968”, 2006, (LINK)

[34] Provincia di Trento, Servizio Sistemazione Montana, “L’ALLUVIONE DEL 1966”, (LINK)

[35] Il giornale della Toscana, “1966. L’alluvione”, 2006, (LINK)

[36] “Disastro del Vajon – 9 ottobre 1963” (LINK)

[37] La Gazzetta del Mezzogiorno, “Nell’alluvione del 1959 furono undici i morti annegati”, 2009, (LINK)

[38] Meteogiornale, “La grande alluvione del 1959 ad Ancona!”, 2005, (LINK)

[39] Meteogiornale, “L'alluvione di Salerno e della Costa Amalfitana dell'ottobre 1954: 500 mm di pioggia, 318 morti, 10 mila sfollati”, 2010, (LINK)

[40] Progetto AVI - Archivio Piene, SCHEDA DI CENSIMENTO N. 300182, 1991, (LINK)

[41] “Altri disastri - L'alluvione del Polesine nel 1951”, (LINK)

[42] La Provincia di Como, “Tavernerio come Genova. 60 anni fa la frana e l'alluvione”, 2011, (LINK)

[43] Ispro onLine, “1951: alluvione in Calabria”, (LINK)

[44] Gianola G.A., *L’ALLUVIONE DEL 4 SETTEMBRE 1948*, Istituto per la Storia della Resistenza e della società contemporanea in provincia di AsTi (ISRAT), (LINK)

[45] “13 Agosto 1985: il disastro di Molare”, (LINK)

[46] Meteogiornale, “Febbraio 1931: la grande alluvione di Palermo”, 2010, (LINK)

[47] WIKIPEDIA, “Alluvione di Campi Bisenzio del 22 novembre 1926”, 2011, (LINK)

[48] La diga del Gleno, (LINK)

[49] Autorità di Bacino Regionale REGIONE FRIULI VENEZIA GIULIA, “2 EVENTI ALLUVIONALI IN EPOCA STORICA”, in *Piano stralcio per la difesa idraulica del torrente Cormor*, 2002, (LINK)

[50] Campaniameteo.it, “24 OTTOBRE 1910 - L'alluvione di Cetara”, (LINK)

[51] Polesine…e dintorni, “IL FILO BLU. Momenti di vita sull'alluvione del 1951”, (LINK)

[52] Ircani Menchini P., “Descrizione dell'inondamento avvenuto in Firenze il 3 novembre 1844 ...”, (LINK)

[53] Legambiente e Protezione Civile Nazionale, *Frane e alluvioni: disastri innaturali*, 2011, (LINK)

[54] Legambiente e Protezione Civile Nazionale, *Ecosistema Rischio 2011*, 2011, (LINK)

[55] Munich RE, Letture 7 – Alluvione: un modello di valutazione del rischio, 2001, (LINK)

[56] Notaro V., “Rischio idrologico-idraulico in ambito urbano”, Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale, 2011

[57] La Loggia G., “La mitigazione del rischio idraulico nelle aree urbane”, Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale, 2011

[58] La Loggia G., “Rischio idrologico-idraulico. La mitigazione”, Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale, 2011

[59] Dispense del corso di idrologia, Facoltà di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Calabria

[60] Aronica G., Corso di idrologia Tecnica, Università degli Studi di Palermo, 2010, (LINK)

[61] “Definizioni di bacino idrografico”, in *Dispense della Facoltà di Agraria*, Università degli Studi di Firenze, (LINK)

[62] Andjelkovic I., “Guidelines on non-Structural measures in urban flood management”, in *INTERNATIONAL HYDROLOGICAL PROGRAMME*, *Technical Documents in Hydology*, N.50, UNESCO, Parigi, 2001

[63] Federal Interagency Stream Restoration Working Group, (LINK)

[64] “La modellazione della trasformazione afflussi-deflussi”, in *Dispense della Facoltà di Agraria*, Università degli Studi di Firenze, (LINK)

[65] Autorità di Bacino Regionale REGIONE FRIULI VENEZIA GIULIA, “Modelli idraulici”, 2011, (LINK)

[66] Devoto G., Oli, G.C., *Il Devoto-Oli. Vocabolario della lingua italiana*, Le Monnier, 1971

[67] Zevenbergen, C., 2008

[68] Manetti M., Zunino A., Frattini L., Zini E., "Processi di resilienza culturale: confronto tra modelli euristici"

[69] Manyena, O'Brien, O'Keefe, Rose, "Disaster resilience: a bounce back or bounce forward ability?", in Local Environment, Vol. 16, No. 5, 2011

[70] Spekkers M., "Flood resilience technology and pluvial flood risk", in *6th Risk and Design PhD Symposium 'Society at Risk'*, 2010

[71] Metereological Organization, "Urban flood risk management. A tool for Integrated Risk Management", in APFM Technical Document N. 11, Flood Management Tools Series, 2008

[72] Sylos Labini G., "Lezione 1 – Introduzione", in Lezioni di Telerilevamento, Corso di Laurea Magistrale in Sistemi Informativi Territoriali e Telerilevamento, Università IUAV di Venezia, 2010

[73] GMES Emergency Responce Service, *GMES EMERGENCY MANAGEMENT SERVICE AS DEVELOPED BY SAFER. PRODUCT / SERVICE PORTFOLIO*, 2010, (LINK)

[74] Services and Applications for Emergency Response (SAFER), Service Organization, (LINK)

[75] Operational Eo-based Rainfall-runoff forecast (OPERA), I prodotti, (LINK)

[76] Wong T., "Urban water management in cities of the future", 2010, (LINK)

[77] Healthy Waterways, "What is Water Sensitive Urban Design?" 2011, (LINK)

[78] Healthy Waterways, "Concept Design Guidelines for Water Sensitive Urban Design", 2009, (LINK)

[79] Vernon B, Tiwari R., "Place-Making through Water Sensitive Urban Design", in *Sustainability*, Curtin University of Technology, Australia, 2009, (LINK)

[80] Giffinger R., "Conferenza Stampa", in *Centre of Regional Science*, Vienna University of Technology, Expo Real, Monaco di Baviera, 2007

[81] ANIA, Gut Carpenter, CONSAP, "Danni da eventi sismici e alluvionali al patrimonio abitativo italiano: studio quantitativo e possibili schemi assicurativi", 2011 (LINK)

[83] Ginocchietti S., "La proposta degli assicuratori per la gestione del rischio calamità naturali", in *Gestione del rischio indotto da Disastri Naturali*, UNIPOL Gruppo Finanziario SpA, 2008, (LINK)

[84] Gomarasca M.A., *Elementi di Geomatica*, Associazione Italiana di Telerilevamento, 2004

[85] La Mantia C., "Introduzione al Telerilevamento. Fondamenti Fisici e Sensori", Planetek Italia, 2010

[86] Canadian Centre for Remote Sensing, “Fundamental of Remote Sensing”, 2007, (LINK)

[87] Le Toan T., “Introduction to SAR Remote Sensing”, ESA, 2007, (LINK)

[88] Massironi M., “Il Telerilevamento Satellitare”, Università degli Syudi di Padova, 2004, (LINK)

[89] e-GEOS SpA, “Price List”, 2011, (LINK)

[90] Astrium GEO-Information Services. TerraSAR-X Services, “TerraSAR-X. International Price List”, 2011, (LINK)

[91] Dell’Acqua F., “Il Radar”, Gruppo di Telerilevamento, Università di Pavia, 2010, (LINK)

[92] Brivio P.A., Zani G., *Glossario Trilingue di Telerilevamento*, CNR Milano, 1995

[93] Sarmap, “Synthetic Aperture Radar and SARscape”, EXELIS, 2007, (LINK)

[94] Canadian Centre for Remote Sensing,”Tutorial. Radar remote sensing”, (LINK)

[95] Del Frate F., “SAR e sue applicazioni marine”, in ESA-ESRIN 10-2-2011, (LINK)

[96] ERDAS, Inc, “Radar Inteferometry. User’s Guide”, USA, 2009

[97] Lombrado P., “Elaborazioni delle immagini Radar”, Dip. INFOCOM, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, (LINK)

[98] RADARSAT International, “RADARSAT Geology Handbook”, 1997, (LINK)

[99] Cavalli M, Tarolli P., “Applicazione della tecnolgia LIDAR per lo studio dei corsi d’acqua”, in *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2010, (LINK)

[100] Della Costa S., “I sensori a bordo di piattaforme satellitari”, Dipartimento di Pianificazione, Università IUAV di Venezia, 2006, (LINK)

[101] Godone D., “Laser Scanner”, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Torino, (LINK)

[102] Gasperi M., “Analisi qualitativa del dato LiDAR nell’informazione territoriale ad alta risoluzione”, in Tesi di Laurea, Venezia, Scuola di Dottorato in Nuove Tecnologie e Informazione Territorio & Ambiente, Facoltà di Pianificazione del Territorio, Università IUAV, (LINK)

[103] Planetek Italia, “Telerilevamento”, 2010

[104] Harvatt J, Petts J, Chilvers J., “Understanding householder responses to natural hazards: flooding and sea-level rise comparisons”, in *Journal of Risk Research*, Vol.14, N.1, 2011

[105] Ufficio Stampa della Regione del Veneto, “Veneto Ferito”: alluvione del 31 ottobre 2010”, 2010, (LINK)

[106] Commissario delegato per il superamento dell’emergenza derivante dagli eventi alluvionali che hanno colpito il territorio della Regione Veneto nei giorni dal 31 ottobre al

2 novembre – Regione del Veneto, “Veneto: la grande alluvione”, Grafiche Antiga SpA, 2011, (LINK)

[107]Il Giornale di Vicenza, “I novembre 2010 – 2011, L’ALLUVIONE UN ANNO DOPO”, 2011

[108]Ordine degli Ingegneri della Provincia di Vicenza, “La Grande alluvione nel Vicentino”, in *Professione Ingegnere. Notiziario dell’Ordine degli Ingegneri della Provincia di Vicenza*, N.40 Nov/Dic. 2010, (LINK)

[109]Centro funzionale Decentrato Regione Veneto, “Scheda evento “IDRO”: 31 ottobre – 5 novembre 2010”, 2010, (LINK)

[110]Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, “Relazione Tecnica, Progetto di Piano Stralcio per l’Assetto del bacino idrografico del fiume Brenta-Bacchiglione. Legge n. 267/98 e Legge n. 365/00, Prima Variante.”, 2007, (LINK)

[111]Prati L., Galotto G., Testo Unico Ambientale 2. Scarichi, inquinamento idrico e difesa del suolo, 2008

[112]Arendt H., *Archivio Arendt*, Feltrinelli Editore, Milano, 2001

[113]Magistrato delle Acque di Venezia – Ufficio Idrografico, “TAV II Cartografia Storica”, in “progetto di Piano Stralcio per l’assetto idrogeologico del bacino idrografico del fiume Brenta-Bacchiglione”, (LINK)

[114]Commissario delegato per il superamento dell’emergenza derivante dagli eventi alluvionali che hanno colpito il territorio della Regione Veneto nei giorni dal 31 ottobre al 2 novembre – Regione del Veneto, “Relazione di Sintesi”, in *PIANO DELLE AZIONI E DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO E GEOLOGICO*, 2011, (LINK)

[115]Pizza G., “La capacità di osservazione della costellazione COSMO-Skymed”, in Senato – Commissione Territorio, Ambiente, Beni Ambientali, Audizione del Sottosegretario di Stato Giuseppe Pizza, 2011, (LINK)

[116]Agenzia Spaziale Italiana, “Oggetti italiani nello Spazio”, (LINK)

[117]Valentini G., “COSMO-SkyMed Mission Status”, Agenzia Spaziale Italiana, 2008, (LINK)

[118]Agenzia Spaziale Italiana (ASI), “COSMO-SkyMed System Description & User Guide”, (LINK)

[119]THALES ALENIA SPACE Italia SpA, “COSMO-SkyMed: Il sistema Satellitare Italiano di Osservazione della Terra per la Gestione dei Rischi Ambientali, la Difesa e la Sicurezza”, in *Repertorio AIAD*, 2011, (LINK)

[120]Coletta A., "COSMO-SkyMed Mission:Application and Data Access", Agenzia Spaziale Italiana, 2009, (LINK)

[121]Agenzia Spaziale Italiana, "COSMO-SkyMed SAR Products Handbook", 2009, (LINK)

[122]Bonino E., "Resampling", (LINK)

[123]Dell'Acqua F., "Il radar ad apertura sintetica: l'interferometria", Gruppo di Telerilevamento, Università di Pavia, (LINK)

[124]Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, "INFO SUL PROGETTO LiDAR", (LINK)

[125]Portale Cartografico Trentino, "LiDAR" (LINK)

[126]Sylos Labini G., "Scontri Globali su Mappe Locali", *in Dispense del Corso di "Telerilevamento e trattamento di immagini"*, Corso di laura magistrale in Sistemi Informativi Territoriali e Telerilevamento, Università IUAV di Venezia, 2010

[127]DIFESANEWS, "Contratto di studio per il programma MUSIS", 2011, (LINK)

[128]Agenzia Spaziale Italiana, "Piano triennale delle attività. 2011-2013 con elementi relativi all'esercizio 2014", 2011, (LINK)

[129]Agenzia Spaziale Italiana, "NOTA INFORMATIVA. Programma COSMO di Seconda Generazione (CSG). Coinvolgimento delle Piccole Medie Imprese (PMI) Italiane", 2011, (LINK)

Sitografia

www.adbve.it

www.ania.it

www.arpa.veneto.it

www.asi.it

www.astrium-geo.com

avi.gndci.cnr.it

www.comune.vicenza.it

www.cosmo-skymed.it

www.difesa.it

www.emergencyresponse.eu

www.erdas.com

www.esa.int

www.eurimage.com/

www.exelisvis.com

www.fema.gov

www.gmes.info

www.isprambiente.gov.it

www.munichre.com

www.nrcan.gc.ca

www.operaproject.it

www.ordine.ingegneri.vi.it

www.planetek.it

www.protezionecivile.it

www.regione.veneto.it

www.venetoalluvionato.it

www.watersensitivecities.org.au

waterbydesign.com.au