



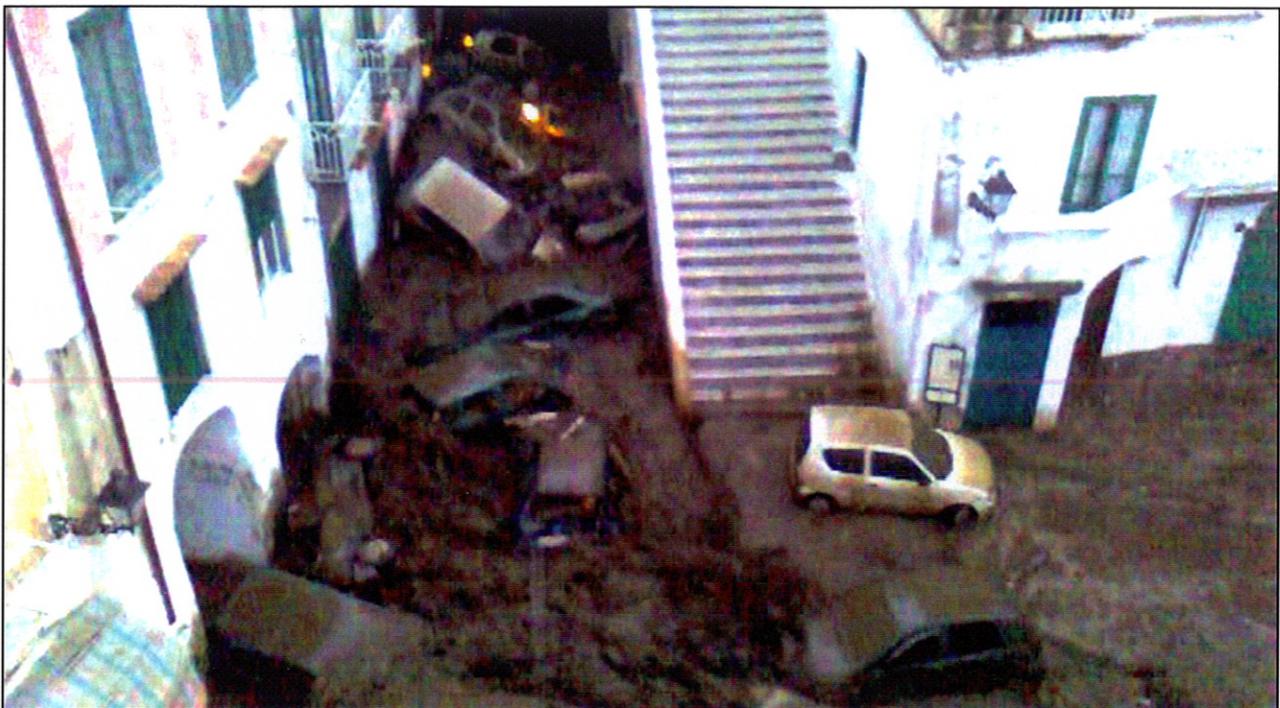
C.U.G.R.I.
Consorzio inter-Universitario
per la Previsione e Prevenzione dei Grandi Rischi
Università di Salerno - Università di Napoli "Federico II"



IMPRINTS 

Studio idraulico dell'evento alluvionale avvenuto ad Atrani (SA) il 9 settembre 2010

PARTE I: ricostruzione dell'evento



Vittorio Bovolin



*Università degli Studi di Salerno
Dipartimento di Ingegneria Civile*

Fisciano

Gennaio 2012





Studio idraulico dell'evento alluvionale avvenuto ad Atrani (SA) il 9 settembre 2010

PARTE I: ricostruzione dell'evento

Vittorio Bovolin

***Università degli Studi di Salerno
Dipartimento di Ingegneria Civile***

Fisciano

Gennaio 2012



Nel tardo pomeriggio del 9 settembre 2010 la Campania è stata interessata dal passaggio di una perturbazione caratterizzata da intense precipitazioni, che, all'incirca tra le 18:30 e le 19:30, hanno provocato l'allagamento di alcune porzioni dell'abitato di Atrani (SA).

La previsione e prevenzione degli eventi alluvionali in bacini di piccole dimensioni risultano particolarmente complicate in particolare per la ridotta durata temporale del fenomeno.

L'Unione Europea consapevole di tali problematiche ha finanziato, nell'ambito del VII Programma Quadro, un progetto di ricerca denominato IMPRINTS finalizzato all'approfondimento delle tematiche relative alla mitigazione dei fenomeni di flash floods e colate detritiche

Il Centro interUniversitario per la prevenzione dei Grandi Rischi (CUGRI), come entità tecnico scientifica, e l'Autorità di Bacino del Destra Sele, come entità territoriale, sono i componenti italiani di tale progetto. Il bacino del torrente Dragone, interessato dall'evento del 9 settembre 2010, è adiacente al bacino del torrente Sambuco che è il bacino campione del progetto IMPRINTS. E' sembrato pertanto opportuno approfondire gli aspetti idraulici relativi all'evento avvenuto nel bacino del Torrente Dragone. Lo studio si compone di due parti:

- PARTE I: Ricostruzione dell'evento
- PARTE II: Simulazioni tridimensionali

La PARTE I contiene le analisi e le attività finalizzate allo studio dell'evento con particolare attenzione alla ricostruzione dell'andamento temporale delle portate che sono defluite nel corso dell'evento stesso.

La PARTE II contiene gli approfondimenti effettuati, mediante simulazioni tridimensionali, su quattro aspetti specifici dell'evento.

L'utilità dei dati raccolti parte risiede non solo nel valore intrinseco delle informazioni raccolte, ma anche nel fatto che vengono messi a disposizione gli elementi necessari per ulteriori approfondimenti di tipo idraulico ed idrologico.

La presente pubblicazione rispecchia le posizioni dell'Autore. Né il CUGRI né la Commissione Europea è responsabile dell'uso che potrebbe essere fatto delle informazioni in esso contenute

Studio idraulico dell'evento alluvionale avvenuto ad Atrani (SA) il 9 settembre 2010

PARTE I: ricostruzione dell'evento

Vittorio Bovolin

Università degli Studi di Salerno

Dipartimento di Ingegneria Civile

1. Inquadramento territoriale

Atrani è il più piccolo comune della Regione Campania, fa parte della Costiera Amalfitana e ricade all'interno della provincia di Salerno (Figura 1).

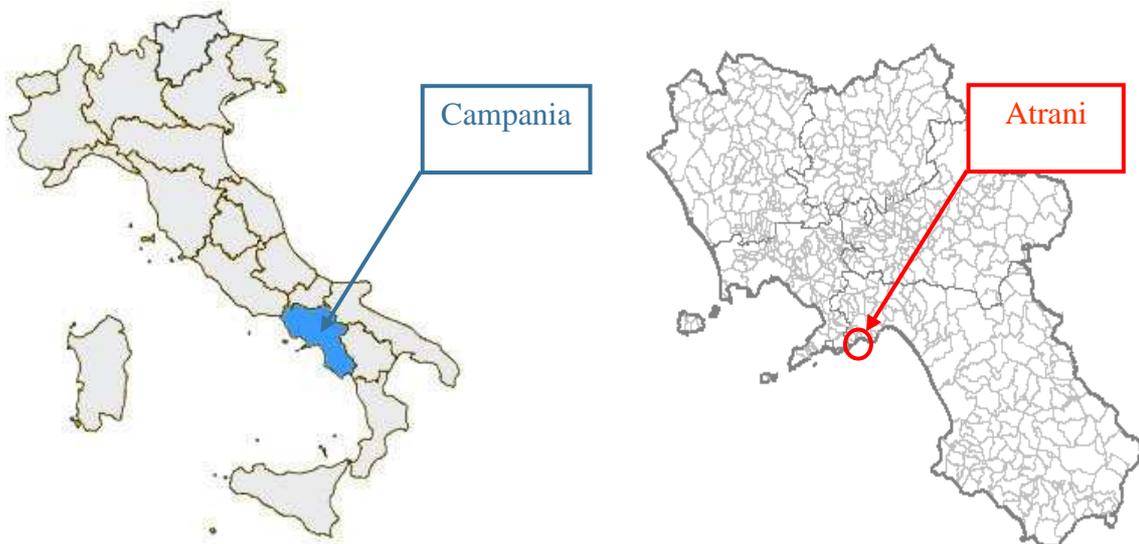


Figura 1 – Inquadramento Regione Campania e comune di Atrani (SA)

L'abitato di Atrani occupa le aree latitanti il tratto finale del torrente Dragone immediatamente a monte dello sbocco a mare (Figura 2).

All'interno dell'abitato di Atrani il torrente Dragone scorre al di sotto del piano viario di via dei Dogi con una sezione tombata la cui lunghezza complessiva è di circa 280 m (Figura 3).

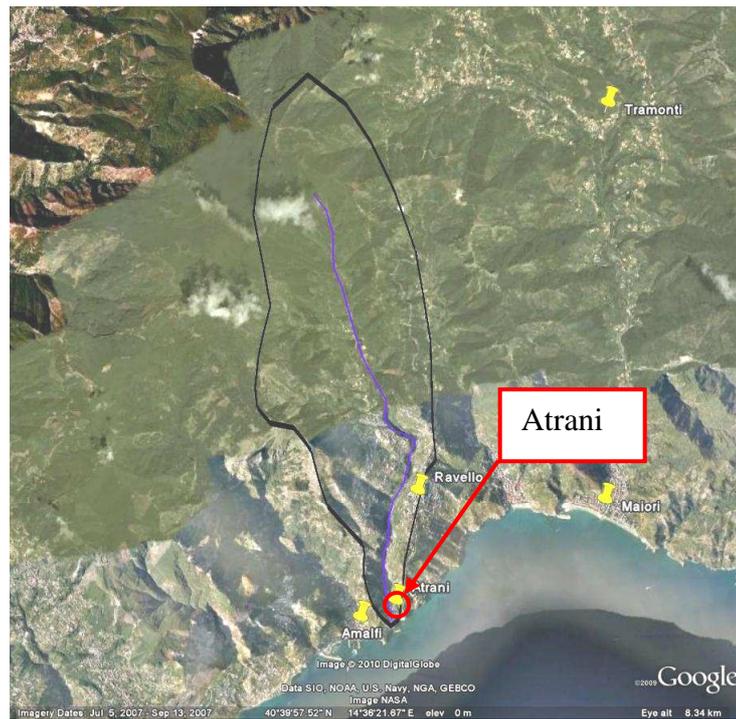


Figura 2 – Bacino del torrente Dragone

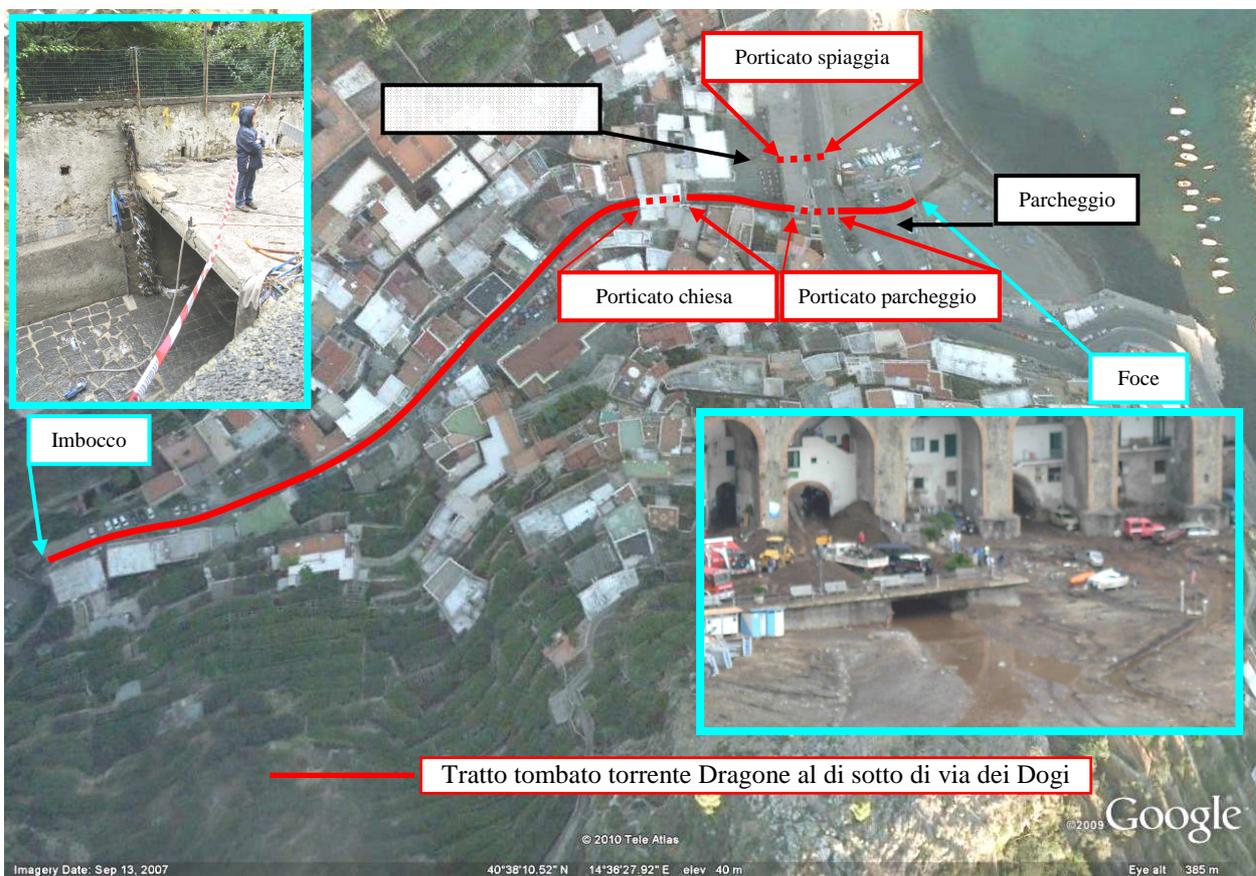


Figura 3 – Vista aerea dell'abitato di Atrani con indicazione degli elementi topografici di interesse

L'andamento altimetrico dell'alveo tombato rispecchia in buona sostanza l'andamento altimetrico della sovrastante viabilità che presenta il tratto iniziale, caratterizzato da una pendenza ridotta, cui fa seguito un tratto intermedio con pendenza elevata ed infine il tratto terminale, al di sotto di piazza Umberto I e del parcheggio, che presenta, nuovamente, una pendenza ridotta (Figura 4).

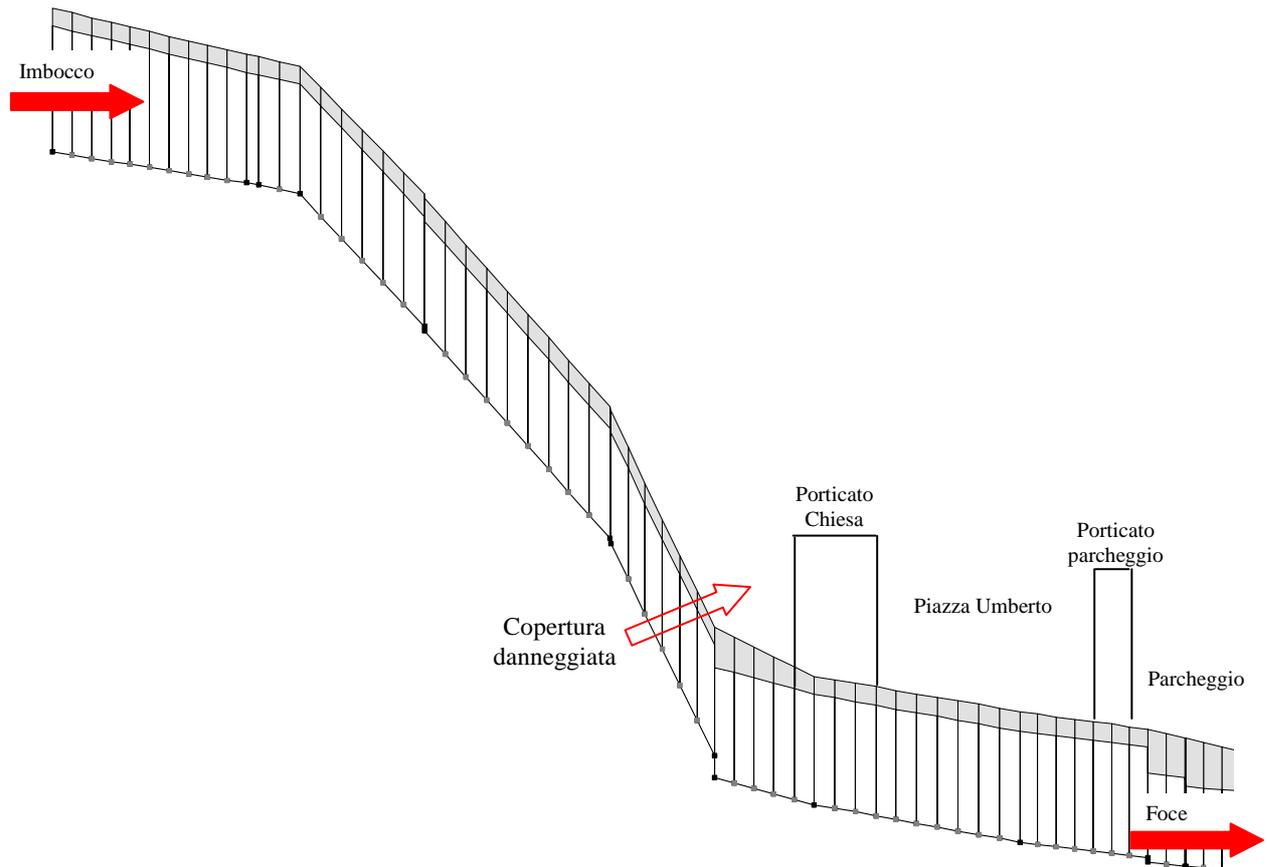


Figura 4– Profilo longitudinale alveo tombato torrente Dragone

Piazza Umberto I (figura 5) presenta 3 accessi principali di cui 1 verso monte e 2 verso valle. L'accesso verso monte consiste nel porticato su cui è stata edificata una chiesa (*porticato chiesa*) che conduce verso la parte alta di via dei Dogi, verso valle il proseguimento di via Dogi passa al di sotto di un secondo porticato che collega la piazza al parcheggio (*porticato parcheggio*) ed infine, sempre verso valle, un terzo porticato collega la piazza alla spiaggia (*porticato spiaggia*).

2. Previsioni del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico

Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (nel seguito PAI), predisposto dalla Autorità di Bacino Regionale dei Bacini in Destra del Sele, ha analizzato il bacino del torrente Dragone.

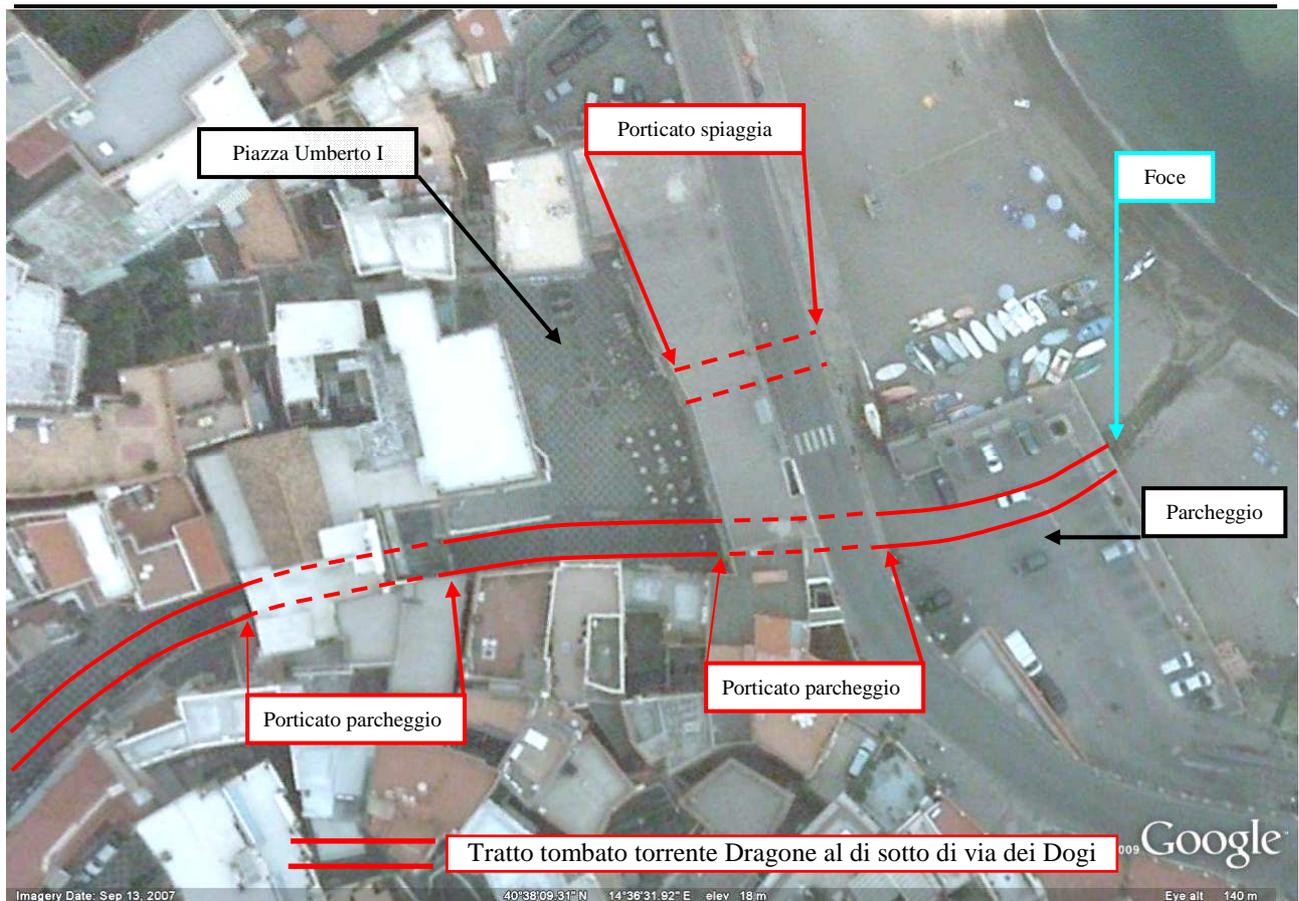


Figura 5– Dettaglio tratto terminale alveo tombato torrente Dragone

L'analisi idrologica è stata svolta utilizzando la metodologia VA.P.I. I dati caratteristici del bacino sotteso dalla sezione di imbocco del tratto tombato sono riportati nella tabella 1,

Area (km^2)	9.28	Area del bacino
H_{med} (m s.l.m)	690	Altezza media del bacino
$m(I_0)$ (mm/ora)	83.8	Parametro piovosità zona pluviometrica omogenea
t_r (ora)	0.89-1.13	Tempo di ritardo del bacino

Tabella 1 – Dati caratteristici T. Dragone sezione di imbocco tratto tombato (PAI)

le corrispondenti portate sono riportate, in funzione del tempo di ritorno T , nella tabella 2.

Tempo di ritorno T (anni)	Portata (m^3/s)
30	46.18
100	61.00
300	74.42

Tabella 2 – Portate T. Dragone sezione di imbocco tratto tombato in funzione del tempo di ritorno (PAI)



Il PAI comprende anche una analisi semplificata della capacità di trasporto del tratto tombato che attraversa l'abitato di Atrani. Il calcolo è stato effettuato, in via speditiva, utilizzando la formula di Gauckler-Strickler. I parametri utilizzati nei calcoli ed i risultati ottenuti sono riportati nella tabella 3.

Tipologia sezione	Rettangolare
Base (m)	5.5
Altezza (m)	2.6
Scabrezza K ($m^{1/3}/s$)	30
Lunghezza tratto (m)	290
Pendenza media (m/m)	0.0550
Portata (m^3/s)	92.53

Tabella 3 - Capacità di trasporto tratto tombato Torrente Dragone (PAI)

3. Le soglie pluviometriche

Dal 2005 la Regione Campania, con Decreto del Presidente della Giunta Regionale n. 299 del 30/06/2005, si è dotata di un sistema di soglie pluviometriche il cui superamento comporta l'attivazione di specifici interventi di Protezione Civile.

Il Comune di Atrani ricade nella zona di allerta 3 con classe di rischio VI. Per la zona 3 le soglie pluviometriche previste sono riportate nella tabella 4.

Criticità ordinaria			Criticità moderata			Criticità elevata		
6 ore	12 ore	24 ore	6 ore	12 ore	24 ore	6 ore	12 ore	24 ore
59	75	97	78	101	129	93	120	154

Tabella 4 - Soglie Pluviometriche Comune di Atrani (DPGR Campania n.299 del 30/06/2005)

4. Descrizione sommaria dell'evento alluvionale

L'evento alluvionale del 9 settembre 2010 è consistito nel deflusso di una porzione della portata in arrivo dal bacino idrografico del torrente Dragone lungo via dei Dogi. Le caratteristiche della corrente sono state tali da mobilitare le numerose autovetture parcheggiate lungo via dei Dogi e trasportarle verso valle. L'accumulo delle autovetture ha comportato l'occlusione del *porticato parcheggio* e il conseguente allagamento di piazza Umberto I; il deflusso, dalla piazza verso la spiaggia, è avvenuto attraverso il *porticato spiaggia*.

Gli effetti morfologici dell'evento alluvionale sono stati:

- l'allagamento dei locali che si affacciano su via dei Dogi e piazza Umberto I;
- la rottura di un tratto della soletta di copertura dell'alveo del torrente Dragone (figura 6a);
- il deposito di modeste quantità di sedimenti nella parte alta di via dei Dogi e nella piazza Umberto I (figura 6b);
- l'estensione della spiaggia per effetto dei sedimenti trasportati dalla corrente all'interno del tratto tombato (figura 6c);
- l'espulsione degli elementi di copertura dei tombini in prossimità di piazza Umberto I.



Figura 6 – Principali effetti dell'evento

Nel corso dell'evento una giovane donna ha perso la vita a seguito dell'allagamento del locale in piazza Umberto I dove lavorava.

5. *La pluviometria*

L'approfondimento degli aspetti idrologici dell'evento pluviometrico che ha causato l'alluvione ad Atrani non rientra tra le finalità del presente studio. Al solo fine di un migliore inquadramento degli aspetti idraulici nel prosieguo sono riportati i dati pluviometrici disponibili alla data di redazione del presente studio. Nella tabella 5 sono riportati i dati pluviometrici relativi alle massime precipitazioni per assegnata durata registrate nelle stazioni pluviometriche riportate nella figura 7. Il pluviogramma registrato nella stazione di Ravello è riportato nella tabella 6.

I dati riportati nella tabella 5 suggeriscono le ulteriori seguenti osservazioni:

- la maggiore parte delle precipitazioni si è concentrata in un intervallo temporale di circa 1 ora;
- le massime intensità di breve durata si sono riscontrate nel quadrilatero delimitato dalle stazioni pluviometriche di Ravello, Agerola, Moiano e Pimonte (con una possibile

estensione verso Gragnano) nelle quali è stata misurata una precipitazione media pari a 80 mm/h per 1 ora;

- l'effetto della barriera orografica rappresentata dai monti Lattari sulla distribuzione delle precipitazioni è chiaramente dimostrato dalle registrazioni dei pluviometri prossimi al mare (Amalfi, Maiori e Cetara) che hanno misurato valori largamente inferiori rispetto ai valori misurati in quota. In particolare le precipitazioni misurate nella due stazioni più vicine al bacino del torrente Dragone (Amalfi e Ravello) indicano un rapporto di amplificazione orografico superiore a 3.

Sulla base dei dati disponibili assumendo, in via semplificata, che la distribuzione della precipitazione sia stata uniforme, sia in senso spaziale sia temporale, con un valore complessivo pari a 80 mm si può stimare un afflusso pari a circa $740 \cdot 10^3 \text{ m}^3$.

Osservando inoltre che la durata della precipitazione è stata di circa 1 ora e che tale valore è analogo al tempo di ritardo del bacino (vedi tabella 1) si può stimare una portata massima potenziale (coefficiente di deflusso unitario) pari a circa $205 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 7 – Posizione stazioni pluviometriche con indicazione dei massimi di pioggia di durata 1 ora

Pluviometro	P _{10',max}	P _{20',max}	P _{30',max}	P _{1h,max}	P _{3h,max}	P _{6h,max}	P _{12h,max}
Ravello	19,4	38,2	49,4	80,8	115,4	123,6	124,4
Agerola	26,2	46,8	59,4	80,8	110,2	114,2	115,6
Moiano	21,0	41,2	53,8	78,0	103,6	104,4	107,8
Pimonte	23,2	44,8	57,8	92,2	103,6	104,2	105,4
Gragnano	14,8	28,6	40,6	70,0	84,8	85,4	86,2
Tramonti	12,4	23,4	31,0	42,6	64,0	64,6	64,6
Corbara	18,4	26,6	35,0	45,0	58,8	59,0	59,0
Salerno	16,0	24,2	32,4	47,0	99,6	134,0	136,4
Maiori	12,0	20,0	26,0	43,0	83,2	96,4	97,0
Amalfi	11,0	18,0	20,4	28,6	69,6	75,0	76,2
Cetara	9,8	16,0	20,4	27,2	58,8	65,4	66,8

Tabella 5 – Massime precipitazioni per assegnata durata

Ora	dt	Pioggia cumulata	Intensità media	Pioggia differenziale	Intensità locale
<i>ora</i>	<i>ora</i>	<i>mm</i>	<i>mm/h</i>	<i>mm</i>	<i>mm/h</i>
17:50		0		0	
18:00	00:10	19.4	116.4	19.4	116.4
18:10	00:10	38.2	114.6	18.8	112.8
18:20	00:10	49.4	98.8	11.2	67.2
18:50	00:30	80.8	80.8	31.4	62.8
20:50	02:00	115.4	38.5	34.6	17.3
21:50	01:00	123.6	30.9	8.2	8.2

Tabella 6– Dati pluviometrici relativi alla stazione di Ravello

6. Analisi degli aspetti idraulici

Gli aspetti idraulici dell'evento risultano ben documentati da numerosi filmati ripresi nel corso dell'evento stesso nonché da un gran numero di fotografie scattate nelle ore immediatamente successive. Tali informazioni, completate da sopralluoghi e rilievi, hanno consentito di effettuare:

- la stima del volume lordo di sedimenti depositatosi nel corso dell'evento;
- la ricostruzione dell'andamento temporale delle portate defluite nel tratto tombato e lungo la sovrastante via dei Dogi.

6.1. Stima del volume lordo di sedimenti depositato

Per una corretta caratterizzazione della tipologia di evento verificatosi è importante stimare il volume solido complessivamente trasportato dalla corrente. Tale tipo di stima è, in generale,

affetta da un notevole grado di incertezza. Nel caso in esame le informazioni disponibili hanno consentito di determinarne l'ordine di grandezza con sufficiente approssimazione. La stima del materiale solido trasportato nel corso dell'evento è stata effettuata valutando il volume solido depositato alla fine dell'evento, le zone di accumulo sono localizzate all'interno dell'abitato e lungo la spiaggia.

Per quanto riguarda l'interno dell'abitato la documentazione disponibile indica la presenza di sedimenti all'interno di tre aree (figura 8), che da monte verso valle risultano:

- A1 tratto alto di via dei Dogi immediatamente a valle dell'imbocco del tratto tombato (figura 9a);
- A2 slargo posto in sinistra di via dei Dogi (figura 9b);
- A3 piazza Umberto I (figura 9c).



Figura 8 – Aree di deposito all'interno dell'abitato

L'accumulo maggiore ha riguardato la spiaggia. Nella figura 10 sono riportate due fotografie che ritraggono la spiaggia nel settembre del 2007 e immediatamente dopo l'evento, l'incremento della spiaggia è valutabile in circa 3000 m^2 .

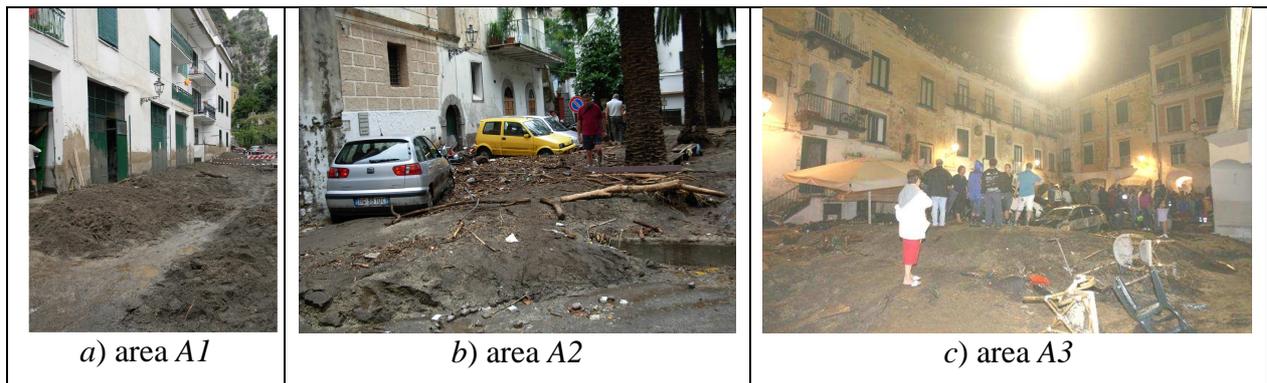


Figura 9 – Aree di deposito all'interno dell'abitato

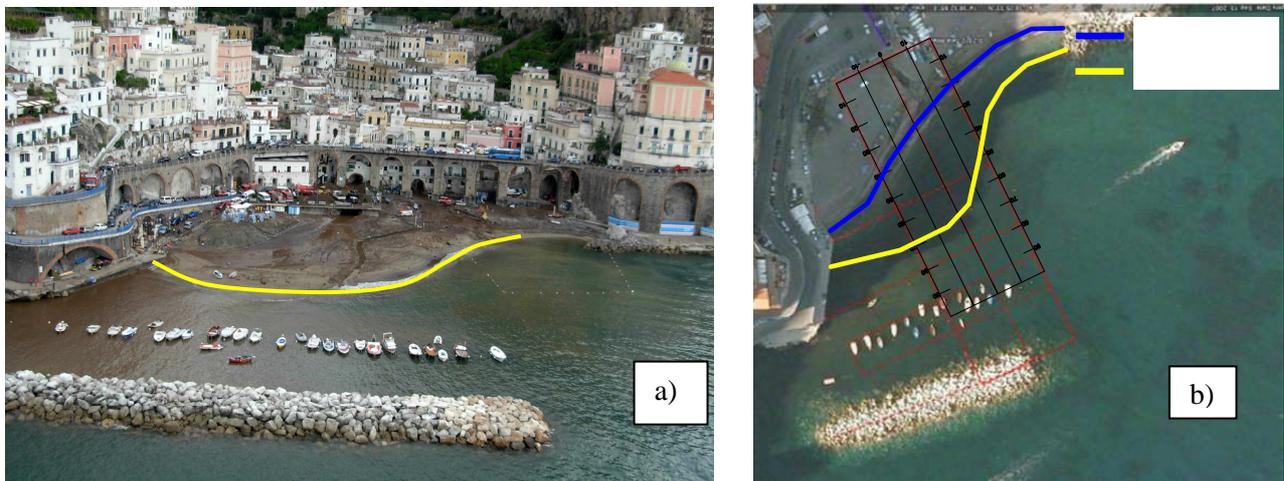


Figura 10 – Area di deposito sulla spiaggia: a) post evento b) pre evento (settembre 2007)

Gli elementi geometrici per il calcolo dei volumi lordi depositatisi sono riportati nella tabella 7.

Area	Lunghezza (m)	Larghezza (m)	Altezza (m)	Volume (m ³)
A1	38	8	0.2	50
A2	20	7.5	0.6	100
A3	16	32	1.0	500
Spaggia	3000 m ²		2.5	7500
Totale				8150

Tabella 7 – Volume lordo sedimenti presenti a fine evento

La presenza della scogliera frangiflutto garantisce che l'ulteriore volume solido eventualmente disperso in mare sia stato in ogni caso modesto.

In definitiva si può stimare che il volume solido trasportato dalla corrente non abbia superato i 10000 m³, e che la maggior parte (> 85%) è transitata attraverso il tratto tombato.

6.2. Analisi dei filmati e della documentazione fotografica disponibile

L'evento del 9 settembre 2010 risulta documentato da numerose riprese filmate. Per le finalità del presente studio sono stati individuati 7 filmati che sono stati utilizzati per una attenta ricostruzione dell'evento. I punti di ripresa dei filmati esaminati sono riportati nella figura 11.



Figura 11 – Punti di ripresa dei filmati esaminati per lo studio dell'evento

Nel seguito si riporta una descrizione sintetica del contenuto dei filmati utilizzati per la ricostruzione dell'evento:

- i filmati 1 e 6 sono stati ripresi dalla strada statale che, su un supporto di archi, attraversa l'abitato di Atrani.

Il filmato 1 contiene una serie di riprese discontinue che riguardano sia l'area esterna di efflusso della corrente sia l'interno di piazza Umberto I.

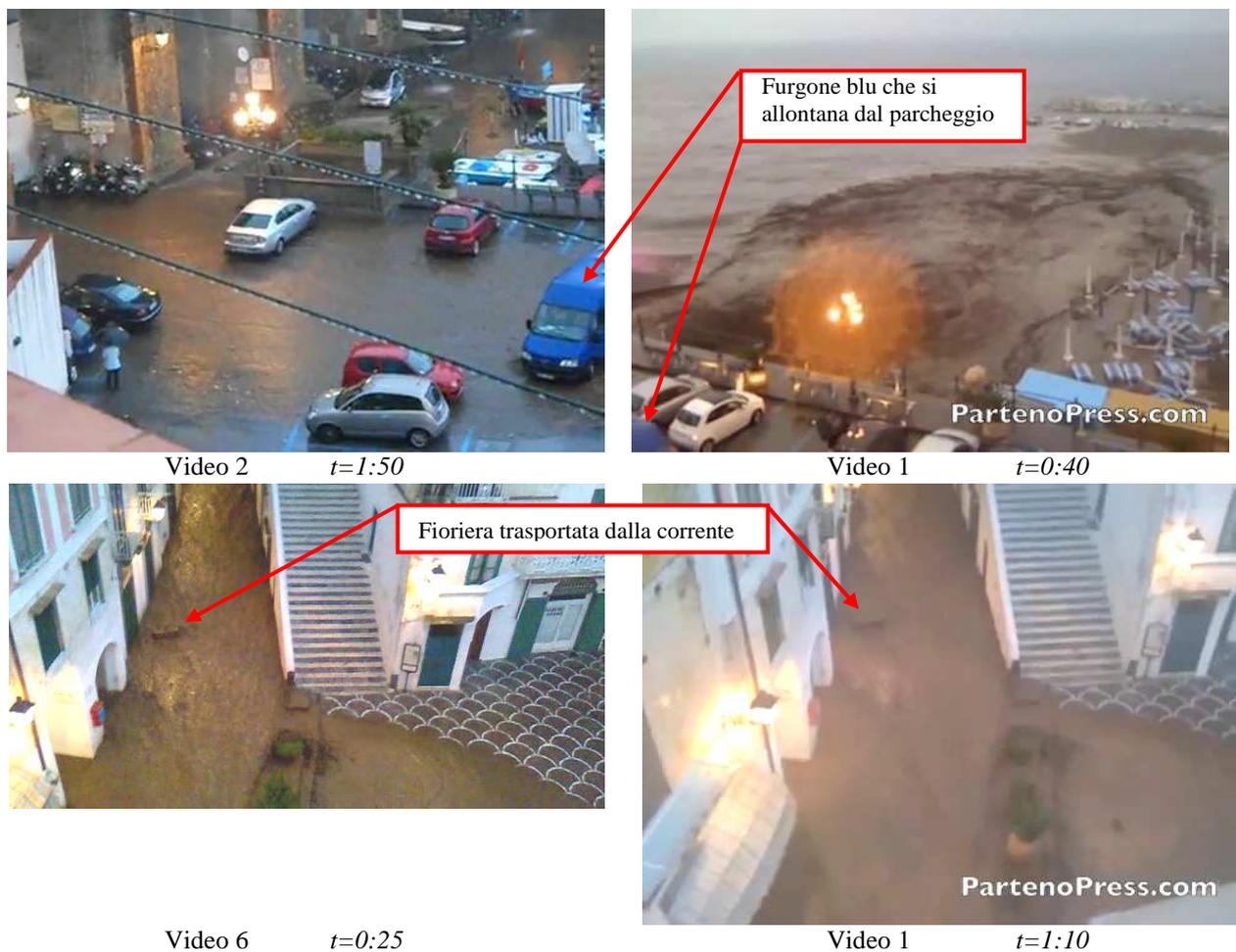
Il filmato 6 riprende con continuità, per quasi 12 minuti, quanto avviene all'interno di piazza Umberto I;

- i filmati 2, 3, 4 e 5 sono stati ripresi, con sostanziale continuità, da una posizione che si

affaccia sulla statale e che risulta approssimativamente allineata con la sezione di sbocco del tratto tombato;

- il filmato 7 è stato ripreso lungo via dei Dogi.

La prima operazione ha riguardato la sincronizzazione dei diversi filmati che è stata effettuata individuando all'interno dei filmati stessi la presenza di elementi comuni. A tal riguardo in la partenza di un furgone blu dal parcheggio (figura 12 alto) ha consentito di sincronizzare il filmato 1 con il filmato 3 mentre il trasporto di una fioriera lungo via dei Dogi ha consentito la sincronizzazione del filmato 1 con il filmato 6 (figura 12 basso).



Video 6 t=0:25
Video 1 t=1:10
Video 2 t=1:50
Video 1 t=0:40

Figura 12 – Fotogrammi relativi alla sincronizzazione dei filmati 1, 3 e 6

Non è stato possibile identificare alcun elemento comune che permettesse di sincronizzare il video 7 con i restanti 6. Gli intervalli temporali intercorsi tra i filmati da 2 a 5 sono stati stimati sulla base della testimonianza dell'autrice dei filmati stessi. Il risultato di tali operazioni è riportato nella tabella 8, mentre nella tabella 9 è riportata la cronologia complessiva dell'evento.



Filmato	Durata	Inizio	Fine	Note
1	04:21	10:16	14:37	si sovrappone a 2 e 6
2	08:53	00:00	08:53	si sovrappone a 1 e 6
3	15:53	09:03	24:56	segue 2
4	02:58	24:56	27:54	segue 3
5	01:48	27:54	29:42	segue 4
6	11:34	11:05	22:39	si sovrappone a 1 e 2
7	02:53			non sincronizzato

Tabella 8 - Durata e sincronizzazione dei filmati utilizzati per la ricostruzione dell'evento

Video						Tempo relativo	Tempo assoluto	Evento
1	2	3	4	5	6			
	00:00					00:00	18:40:00	Inizio video
	08:53					08:53	18:48:53	Fine video
		00:00				09:10	18:49:10	Inizio video
		01:34				10:44	18:50:44	Arrivo flusso da monte
00:40		01:50				11:00	18:51:00	Partenza furgone blu
00:52					00:00	11:05	18:51:05	Visualizzazione flusso da monte
01:20					00:25	11:30	18:51:30	Fioriera trasportata
					00:53	11:58	18:51:58	Arrivo primo motorino
					00:55	12:00	18:52:00	Aumento portata fioriera sommersa
					01:22	12:27	18:52:27	Arrivo Panda Bianca
		03:35				12:45	18:52:45	No efflusso dal parcheggio
					01:55	13:00	18:53:00	La Panda viene rimobilizzata
		03:57				13:07	18:53:07	Inizio efflusso da parcheggio
					02:08	13:13	18:53:13	Arrivo 7 autovetture
					02:15	13:20	18:53:20	Inizio accumulo nella piazza
					03:00	14:05	18:54:05	Arrivo 1 autovettura
					03:05	14:10	18:54:10	Arrivo 3 autovetture
					03:21	14:26	18:54:26	Arrivo 3 autovetture
					03:30	14:35	18:54:35	Arrivo 10 autovetture
					03:35	14:40	18:54:40	Inizio aumento livello nella piazza
		05:53				15:03	18:55:03	Arresto flusso dal parcheggio
		05:55				15:05	18:55:05	Inizio efflusso spiaggia
		06:32				15:42	18:55:42	Uscita prime autovetture da spiaggia
		07:00				16:10	18:56:10	Ripresa flusso dal parcheggio
					05:30	16:35	18:56:35	Arrivo 1 autovettura color verde (irrompe nel Bar Risacca ?)
		08:15				17:25	18:57:25	Panda Bianca + 2 autovetture su parcheggio
		08:35				17:45	18:57:45	Panda Bianca urta autovetture su parcheggio
					07:15	18:20	18:57:30	Raggiungimento livello costante nella piazza
					11:34	22:39	19:02:39	Fine video
		15:53				25:03	19:05:03	Fine video
			00:00			25:15	19:05:15	Inizio video
			02:58			28:13	19:08:13	Fine video
				00:00		28:30	19:08:30	Inizio video
				01:48		30:18	19:10:18	Fine video

Tabella 9 – Cronologia complessiva evento

Nel seguito viene riportata la ricostruzione dell'evento integrata, quando possibile, da valutazioni quantitative finalizzate a stimare a portata defluente.

Nella figura 13 è riportata una sequenza di immagini, estratte dal video 2, relative ai primi 11 minuti. Le immagini evidenziano un flusso dal tratto tombato che risulta rapidamente in aumento. E' importante sottolineare che l'analisi dei filmati, in particolare di quelli da 2 a 5, indica chiaramente che il tratto tombato ha funzionato con continuità e buona efficienza per tutta la durata dell'evento, anche quando si è evidenziata la presenza di un flusso defluente lungo via dei Dogi. Ne consegue che non vi sono evidenze empiriche che possano suggerire l'eventualità che il deflusso avvenuto lungo via dei Dogi sia attribuibile alla occlusione della sezione di imbocco del tratto tombato.

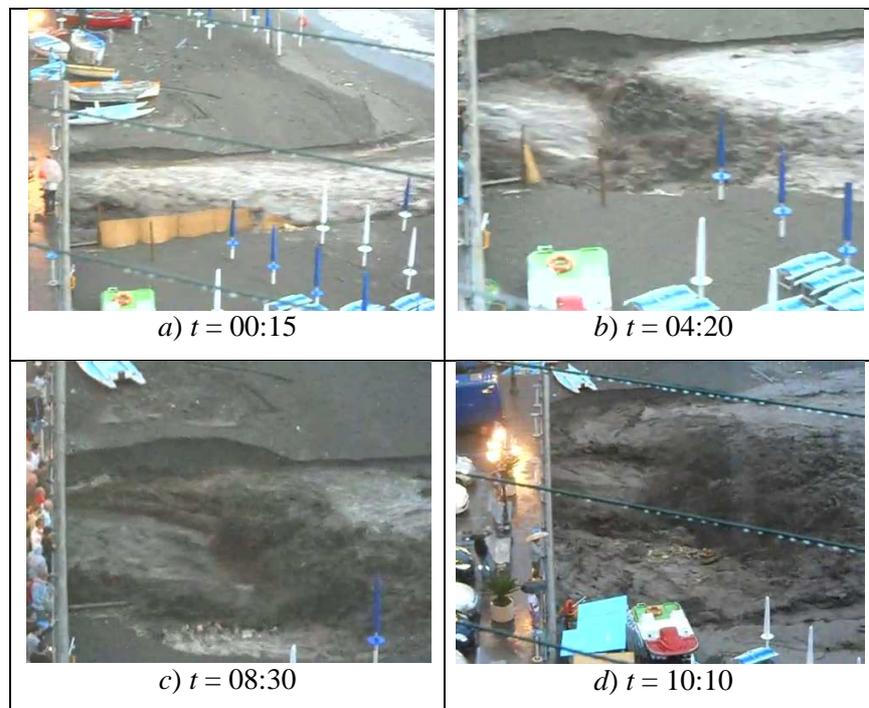


Figura 13 – Evoluzione temporale del flusso alla foce (video 2)

Nella figura 14 è riportato l'arrivo nel parcheggio del primo flusso proveniente da via Dogi.

A $t = 10:45$ (figura 14a) si evidenzia l'arrivo nel parcheggio del flusso che proviene da via dei Dogi, dopo circa 1 minuto a $t = 11:30$ il flusso è aumentato e risulta evidente il trasporto di numerosi basoli provenienti dalla pavimentazione che ricopriva via dei Dogi (figura 14b).

Nella figura 15 è riportata una sequenza di immagini, estratte dal video 6, che illustrano l'evoluzione dell'evento all'interno di piazza Umberto I, le immagini contenute nella figura 155 riportano anche la numerazione dei gradini a partire dalla porta visibile a metà scalinata.



Figura 14 – Flusso iniziale sul parcheggio :

a) flusso proveniente da via di Dogi ($t = 10:45$)

b) basoli della pavimentazione di monte ($t = 11:30$)

All'inizio del video 6 ($t = 11:10$) si può determinare una altezza idrica di circa 0.10 m ed una velocità di circa 2.00 m/s ottenendo una portata pari a circa $1.0\text{-}1.3\text{ m}^3/\text{s}$, di cui una aliquota defluisce verso la piazza.

Il flusso proveniente dal *porticato chiesa*, inizialmente modesto, si incrementa progressivamente fino ad acquisire la capacità di inglobare nella corrente oggetti di notevoli dimensioni.

A $t = 12:00$ vi è un ulteriore incremento del flusso che mobilita 2 moto ed una Fiat Panda. In tale fase i veicoli appaiono ancora "trascinati" dalla corrente nel senso che essi rimangono in contatto con il fondo stradale, l'altezza idrica può essere stimata in 0.40 m con portata di circa $5.5\text{ m}^3/\text{s}$.

A $t = 13:20$ arriva un primo blocco composto da una decina di autovetture che si accumulano in corrispondenza del portico parcheggio. Velocità ed altezza del flusso appaiono aumentati al punto tale che una Fiat 600 bianca viene sollevata e trasportata violentemente all'interno della piazza. Le autovetture sembrano galleggiare all'interno del flusso evidenziando un'altezza idrica di almeno 0.5 m . ed una portata di circa $8.0\text{ m}^3/\text{s}$

Tra $t = 14:00$ e $t = 14:30$, preceduto da un ulteriore incremento del flusso, giunge nella piazza un secondo blocco composto da 17 autovetture.

Alcune autovetture vengono trascinate dall'interno della piazza ed alcune di esse attraverseranno il *porticato spiaggia* e saranno successivamente trasportate sulla spiaggia e da questa in mare.

E'interessante osservare che le autovetture del primo blocco sono sollevate e si "compattano" tra di loro prima dell'azione prodotta dall'impatto del secondo gruppo di autovetture. L'analisi del movimento di un oggetto trascinato dalla corrente permette di stimare la velocità della corrente in circa 3 m/s con una portata di almeno $10\text{-}11\text{ m}^3/\text{s}$.





Figura 15 – Evoluzione dell'evento all'interno di piazza Umberto I (video 6)

Il livello idrico nella piazza aumenta progressivamente fino a raggiungere a $t = 18:25$ il livello massimo che rimane sostanzialmente costante fino alla fine del video 6 a $t = 22:30$.

L'effetto barriera provocato dalle autovetture (figura 16) risulta chiaramente documentato nelle riprese dove si osserva, la formazione nella piazza di un largo vortice che è alimentato dalla corrente in arrivo da via dei Dogi che risulta deviata verso la piazza. Nelle riprese è anche

evidente la presenza di un risalto idraulico che indica il passaggio della corrente veloce di monte in corrente lenta. Nella figura 17 è riportata una sequenza di immagini, estratte dai video 3, 4 e 5, che illustrano l'evoluzione dell'evento nel parcheggio.

La tracimazione dal piazzale del parcheggio avviene circa 2,30 minuti ($t = 12:45$) dopo l'inizio del flusso. La portata media in tale periodo è valutabile sulla base del volume accumulato prima di giungere allo sfioro. La superficie sommersa può essere valutata in circa 650 m^2 che moltiplicata per una altezza media pari 0.20 m , comporta un volume di circa 130 m^3 , assumendo un andamento costante della portata si determina un valore pari a $0.80 \text{ m}^3/\text{s}$, ipotizzando, invece, un incremento lineare della portata si determina, al termine dell'intervallo temporale, un valore della portata in arrivo pari a $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

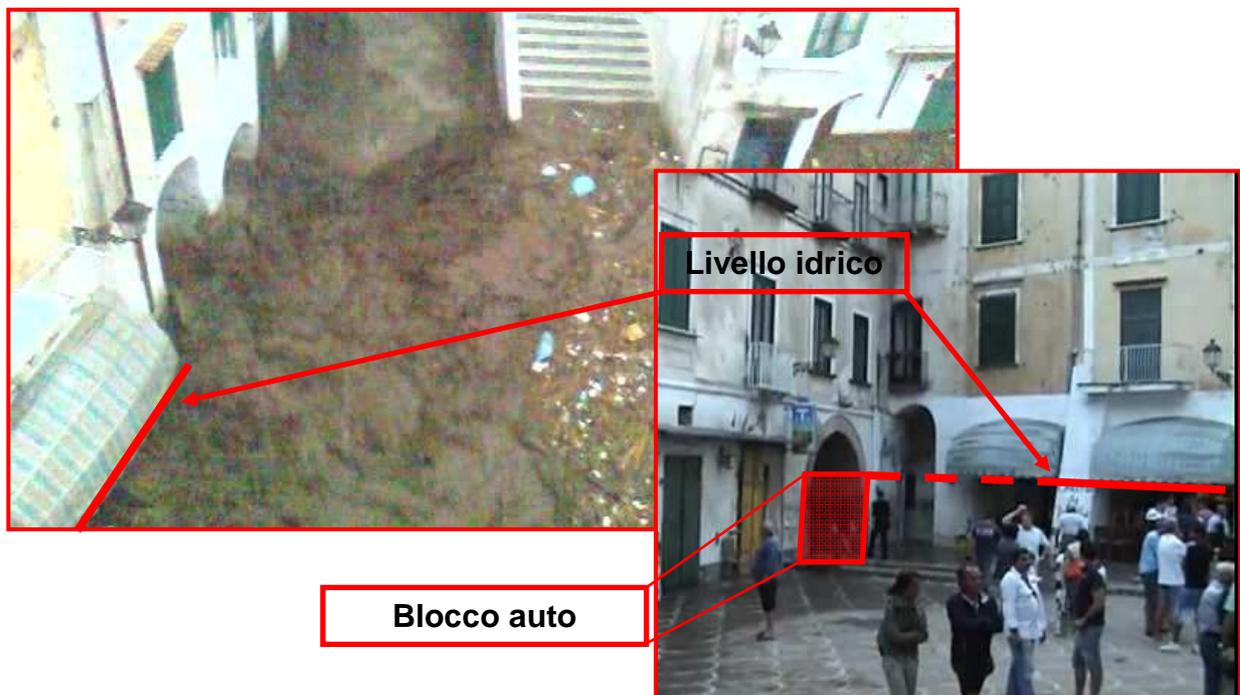


Figura 16 – Effetto indotto dall'occlusione determinata dall'accumulo di autovetture all'imbocco del porticato parcheggio

L'arresto del flusso dal parcheggio ($t = 15:00$) che si osserva dopo l'arrivo del secondo blocco di autovetture suggerisce che le autovetture abbiano completamente occluso il deflusso attraverso il *porticato parcheggio*. La presenza dell'efflusso dal *porticato spiaggia* è documentato a $t = 15:05$. La ripresa del flusso dal parcheggio che si osserva verso $t = 16:10$ suggerisce che l'incremento del livello idrico a monte del *porticato parcheggio* ha comportato il deflusso di una porzione della portata in arrivo verso il parcheggio.

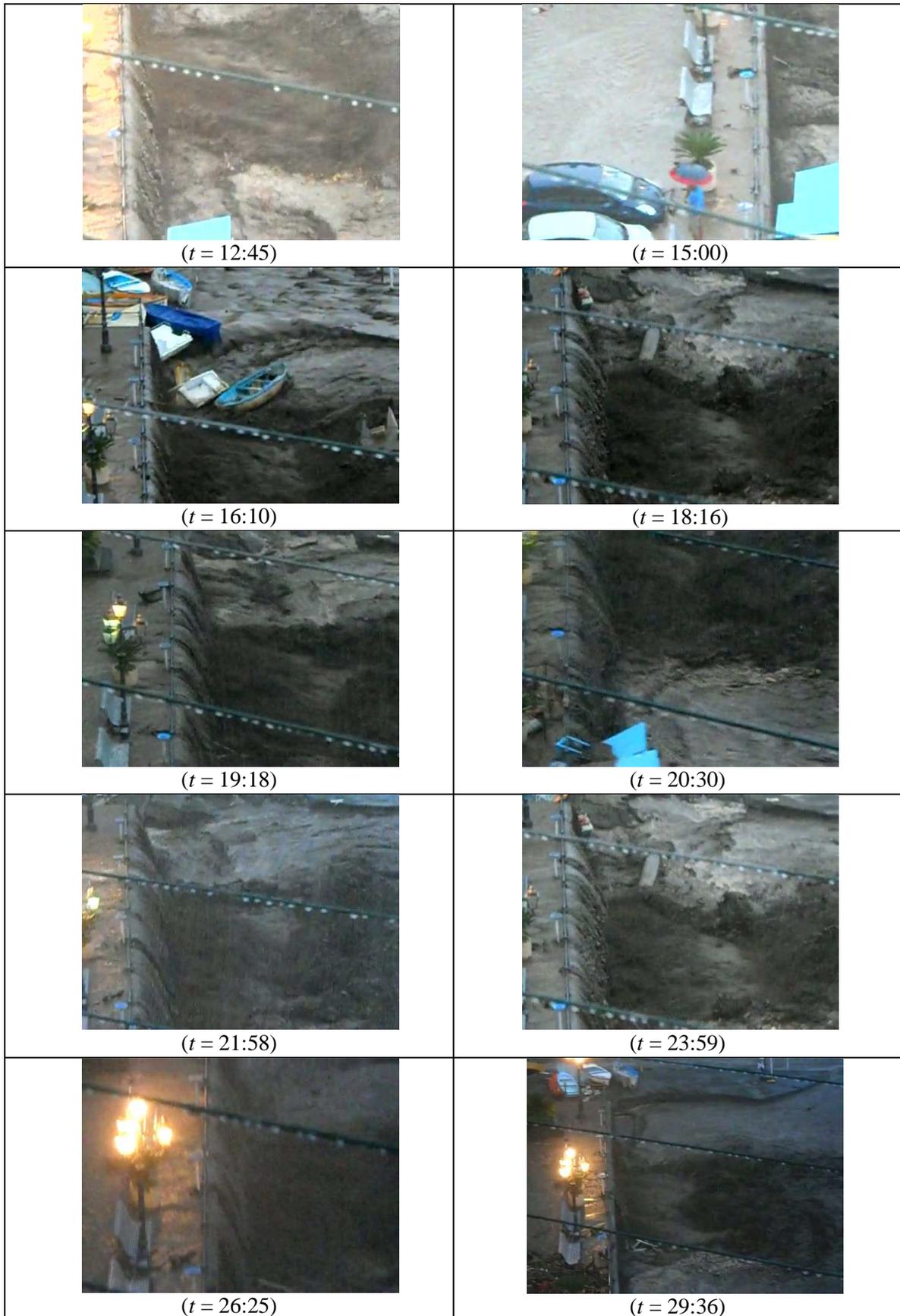


Figura 17 – Evoluzione dell'evento nel parcheggio (video 3, 4 e 5)

Le riprese effettuate sul parcheggio indicano la ripresa del flusso verso l'istante $t = 16:10$ ed il raggiungimento del massimo efflusso verso l'istante $t = 20:30$ le immagini successive mostrano una progressiva diminuzione del flusso che si annulla verso $t = 29:30$.

La massima portata defluente dal parcheggio può essere valutata rappresentando il flusso lungo il contorno del parcheggio mediante uno stramazzo a larga soglia (figura 18).

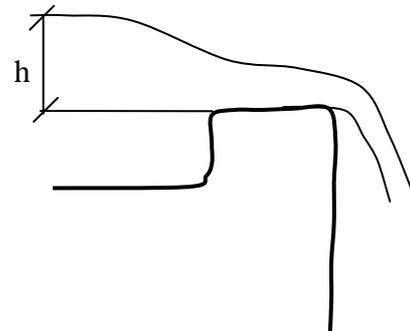


Figura 18 – Schema di calcolo portata defluente dal parcheggio: stramazzo a larga soglia

Il carico sulla soglia, compreso tra 0.10 e 0.15 m, può essere determinato osservando che nel piazzale il livello idrico (0.25-0.30 m) è tale da coprire all'incirca il 40% dei pneumatici (0.60-0.65 m) delle autovetture parcheggiate, mentre le moto trascinate dalla corrente fuoriescono al di fuori della fluido per metà, da cui va sottratta del gradino del marciapiedi stimata in circa 15 cm. Valutando, sulla base delle riprese, una lunghezza complessiva di sfioro, limitata al solo tratto trasversale alla direzione della corrente (non essendo evidente un significativo efflusso laterale), di circa 35 m si ottiene una portata compresa tra 2.5 e 3.5 m³/s.

Il filmato 7 riprende via dei Dogi successivamente agli istanti in cui sono state trasportate le autovetture parcheggiate lungo la strada e verrà discusso in seguito.

6.3. Analisi delle condizioni di moto nel tratto tombato

Le caratteristiche geometriche del tratto tombato del torrente Dragone che attraversa l'abitato di Atrani sono riportate sinteticamente nella figura 19 e nella tabella 10.

Per la posizione centrale appare ragionevole ipotizzare che il tratto con sezione di dimensioni 4.25x2.50 m rappresenti il tombamento originario e che i tratti con sezioni differenti

rappresentino successive estensioni rispettivamente verso monte ($5.15 \times 2.85 \text{ m}$) e verso valle ($4.60 \times 2.00 \text{ m}$ e $5.40 \times 1.60 \text{ m}$).



Figura 19 – Inquadramento del tratto tombato del torrente Dragone nell'abitato di Atrani

Tratto	Dimensioni (m)	Lunghezza (m)	Pendenza (m/m)	Note
1	5.15x2.85	52	~0.3%	
2-1	4.25x2.50	115	~12.8%	Travi emergenti 0.30 m
2-2	4.25x2.50	95	~2.0%	Travi emergenti 0.30 m
3	4.60x2.00	9	~1.0%	
4	5.40x1.60	13	~1.0%	
			~5.8%	

Tabella 10 – Caratteristiche geometriche nel tratto tombato del torrente Dragone che attraversa Atrani

6.3.1. Analisi della transizione da moto a superficie libera a moto in pressione

E' noto che uno dei principali problemi legati alla presenza di tratti tombati è dovuto alla possibilità che l'aumento della portata in arrivo comporti la transizione dal funzionamento a superficie libera al funzionamento in pressione. Le conseguenze di tale transizione riguardano

- dal punto di vista strutturale la possibilità che la copertura dell'alveo sia danneggiata a causa della pressione interna esercitata dal fluido;
- dal punto di vista idraulico la riduzione della capacità di trasporto del tratto.

Per quanto riguarda l'aspetto strutturale va osservato che nel caso di funzionamento in pressione la copertura dell'alveo risulta sollecitata da una distribuzione di pressione rivolta verso l'alto di cui, probabilmente, non si è tenuto conto nella fase di progettazione della struttura e che ne può provocare il cedimento.

Per quanto riguarda l'aspetto idraulico va ricordato che nel caso di sezioni chiuse la transizione dal funzionamento a superficie libera al funzionamento in pressione comporta il brusco incremento del perimetro bagnato con conseguente riduzione del raggio idraulico e della capacità di trasporto. La sezione rettangolare risulta particolarmente esposta nei confronti di tale circostanza per i seguenti motivi:

- è la sezione per la quale l'incremento del contorno bagnato risulta percentualmente più elevato;
- l'incremento di contorno bagnato non avviene in maniera progressiva, ma in maniera teoricamente istantanea.

Il rapporto tra la massima portata Q_a che può defluire a superficie libera (sezione aperta al limite del riempimento) e la portata Q_c che defluisce in pressione (sezione chiusa) dipende dalla formula di resistenza utilizzata. Nel caso della formula di Manning si ottiene:

$$\frac{Q_a}{Q_c} = \left(\frac{R_a}{R_c} \right)^{2/3} = \left(1 + \frac{b}{b+2h} \right)^{2/3} \quad (1)$$

appare evidente che quanto più la sezione è ribassata tanto maggiore è la riduzione percentuale della capacità di trasporto.

Nel caso della formula di Chezy l'espressione risulta più complessa:

$$\frac{Q_a}{Q_c} = \frac{\chi_a}{\chi_c} \sqrt{\frac{R_a}{R_c}} \quad (2)$$

Nella tabella 11 sono riportati i coefficienti di riduzione delle portate per dimensioni della sezione trasversale comparabili con quelle del torrente Dragone.

Nella tabella 11 si osserva che nella transizione dal funzionamento a superficie libera al funzionamento in pressione la capacità di trasporto subisce una riduzione dell'ordine del 25-30%.

	Manning n=0.033			Chezy $\gamma=2.00$		
H/b	4.25	4.90	5.50	4.25	4.90	5.50
2.00	0.76	0.75	0.74	0.70	0.69	0.68
2.50	0.78	0.76	0.76	0.73	0.72	0.70
3.00	0.79	0.78	0.77	0.75	0.74	0.72

Tabella 11 – Valori del rapporto Q_d/Q_c (formule 1 e 2)

Per consentire il deflusso della portata in arrivo la riduzione della capacità di trasporto deve essere compensata dall'incremento della cadente piezometrica J rispetto alla pendenza di fondo i dell'alveo.

L'incremento della cadente piezometrica è valutabile per la formula di Manning con l'espressione:

$$\frac{J}{i} = \left(\frac{R_a}{R_c} \right)^{4/3} \quad (3)$$

e per la formula di Chezy con l'espressione:

$$\frac{J}{i} = \frac{\chi_a}{\chi_c} \sqrt{\frac{R_a}{R_c}} \quad (4)$$

Nella tabella 12 sono riportati i coefficienti di incremento della cadente piezometrica per dimensioni della sezione trasversale comparabili con quelle del torrente Dragone.

	Manning n=0.033			Chezy $\gamma=2.00$		
H/b	4.25	4.60	5.50	4.25	4.60	5.50
2.00	1.52	1.53	1.56	1.42	1.43	1.45
2.50	1.46	1.48	1.51	1.37	1.39	1.41
3.00	1.41	1.43	1.46	1.33	1.35	1.37

Tabella 12– Valori del rapporto J/i (formule 3 e 4)

Nella tabella 12 si osserva che nella transizione dal funzionamento a superficie libera al funzionamento in pressione la cadente piezometrica aumenta del 35-50%.

L'incremento della cadente piezometrica comporta l'aumento del livello idrico nella sezione di imbocco, quando questo livello non risulta più contenuto all'interno della struttura di imbocco, una porzione della portata in arrivo trova recapito al di fuori del tratto tombato.

6.3.2. *Analisi della presenza di travi di sostegno delle coperture emergenti*

Un ulteriore aspetto significativo per la definizione di una corretta modellazione idraulica che è necessario approfondire riguarda la circostanza che per il tratto di alveo caratterizzato dalla sezione 4.25x2.50 la soletta di copertura poggia su travi di sostegno, disposte, trasversalmente all'asse del torrente con interesse $l=3$ m che sono emergenti verso l'interno del canale

L'emersione delle travi all'interno del canale influenza i seguenti aspetti:

- definizione della condizione di transizione da moto a superficie libera a moto in pressione;
- valutazione dell'influenza delle travi sulla definizione dei parametri di scabrezza idraulica.

Per quanto riguarda il primo aspetto è sembrato ragionevole fissare la transizione da una modalità di funzionamento all'altra quando il livello idrico raggiunge l'intradosso delle travi.

Le travi emergenti possono essere interpretate, dal punto di vista idraulico, come macro scabrezze che comportano un incremento di resistenza al moto della corrente. Nel caso in esame la schematizzazione è stata affrontata associando, in semplicità, ad ogni trave emergente una perdita di carico concentrata esprimibile come:

$$\Delta h = \xi \frac{V^2}{2g}$$

per cui le perdite di carico complessive ΔH tra due travi successive poste a distanza l , utilizzando la formula di Manning, risultano:

$$\Delta H = J l + \Delta h = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} l + \xi \frac{V^2}{2g}$$

esprimendo le perdite complessive in termini di perdite di carico continue equivalenti:

$$\Delta H = J_{eq} l = \frac{n_{eq}^2 V^2}{R^{4/3}} = \frac{V^2}{R^{4/3}} \left(n^2 + \frac{\xi R^{4/3}}{2gl} \right)$$

si ottiene il coefficiente di scabrezza equivalente:

$$n_{eq}^2 = \left(n^2 + \frac{\xi R^{4/3}}{2gl} \right)$$

che nel caso in esame fornisce il valore numerico:

$$n_{eq} = \left(0.033^2 + \frac{0.05 \cdot 0.787^{4/3}}{2 \cdot 3 \cdot 9.81} \right)^{0.5} = 0.039 \text{ s/m}^{1/3}$$

Sulla base di tale modellazione nei modelli idraulici la scabrezza del tratto 2 è stata fatta variare in funzione dell'altezza idrica raggiunta della corrente secondo il seguente criterio:

- per $h < 2.5 \text{ m}$ (moto a superficie libera) $n=0.033 \text{ s/m}^{1/3}$
- per $h = 2.5 \text{ m}$ (moto in pressione) $n=0.039 \text{ s/m}^{1/3}$

6.3.3. Modellazione idraulica monodimensionale

Il modello di calcolo implementato è stato di tipo monodimensionale in moto stazionario, come risolutore si è utilizzato il codice di calcolo HEC-RAS 4.0.

Una volta completata l'implementazione del modello sono state effettuate una serie di simulazioni iniziali finalizzate a comprendere il comportamento idraulico dei diversi tratti.

I profili di corrente relativi a portate variabili tra 35 e $52 \text{ m}^3/\text{s}$, sono riportati nella figura 20.

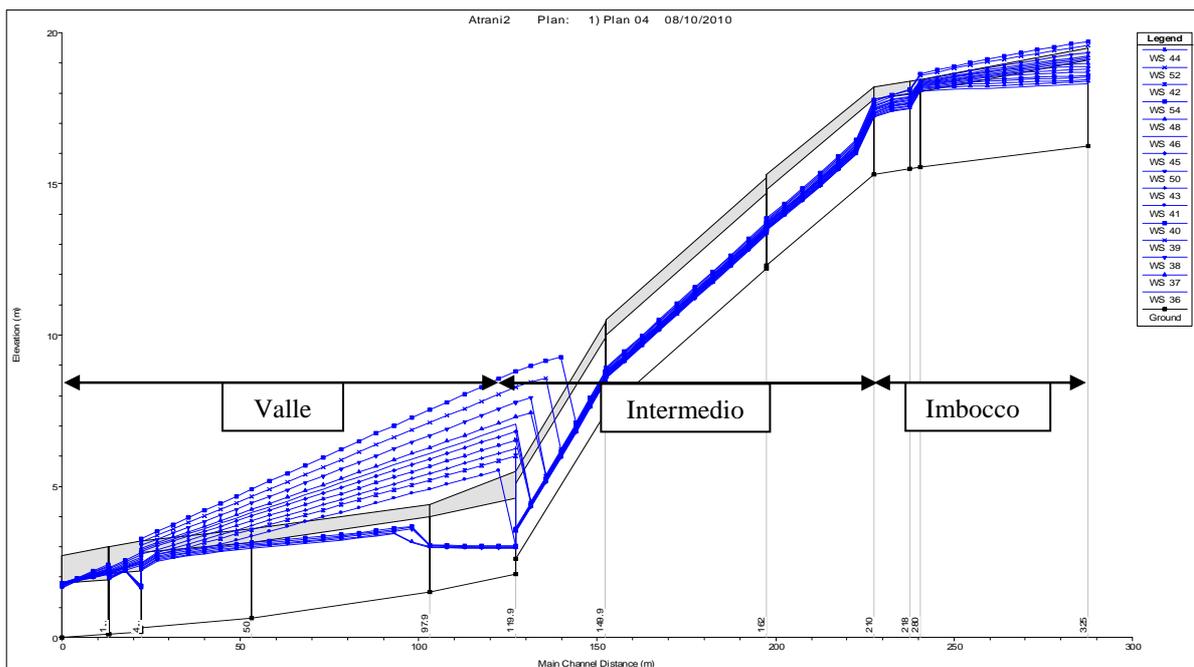


Figura 20 – Profili di corrente tratto tombato

Le simulazioni iniziali, riportate nella figura 20, hanno indicato che il tratto intermedio dell'alveo tombato del torrente Dragone presenta una capacità di trasporto, con moto a superficie libera, di gran lunga maggiore rispetto a quelle che caratterizzano i tratti di imbocco e di valle che risultano soggetti al fenomeno di “saturazione” e cioè al passaggio dal funzionamento a superficie libera a quello in pressione.

La fase successiva dello studio si è pertanto concentrata sulla individuazione di dettaglio delle portate critiche che caratterizzano i tratti di imbocco e di valle, in particolare si sono ricercate le portate relative alle seguenti condizioni:

- inizio funzionamento in pressione (imbocco e valle);
- totalità del tratto in pressione (imbocco e valle);
- funzionamento in pressione del tratto dove si è verificata la rottura (imbocco - intermedio);
- inizio efflusso su va dei Dogi (imbocco).

Nella Figura 21 sono riportati, per il tratto di valle, i profili di corrente relativi alle portate corrispondenti all'inizio del funzionamento in pressione e all'estensione del moto in pressione all'intero tratto.

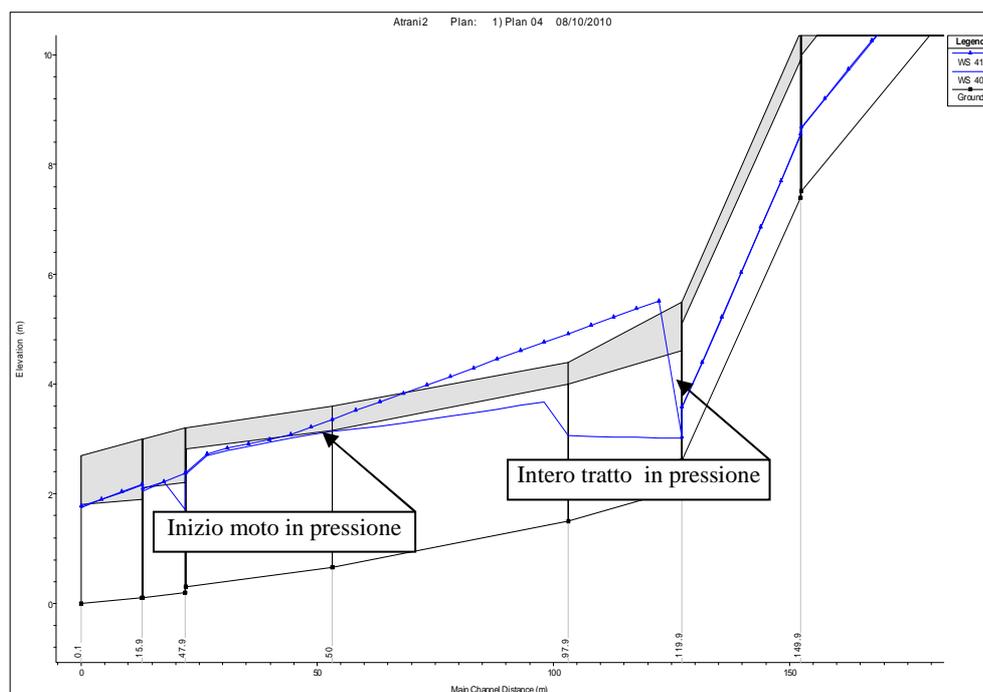


Figura 21 – Profilo di corrente tratto tombato: particolare transizione dal funzionamento a superficie libera al funzionamento in pressione nella zona di variazione della pendenza

Nella Figura 22 sono riportati i profili di corrente relativi alle portate, comprese tra 44 e 50 m^3/s , che comportano la transizione in prossimità del tratto danneggiato.

E' interessante osservare nelle figure 21 e 22 che la posizione della sezione di transizione risulta molto sensibile al valore della portata: piccole variazioni della portata comportano significative variazioni nella posizione della sezione di transizione. Tale comportamento è spiegato dal fatto

che la transizione da moto a superficie libera a moto in pressione è accompagnata dalla contemporanea trasformazione della corrente veloce di monte in corrente lenta di valle.

Dal punto di vista pratico tale circostanza comporta che piccole variazioni di portata, indotte ad esempio da rotture della copertura, possono evitare che il danno si propaghi verso monte.

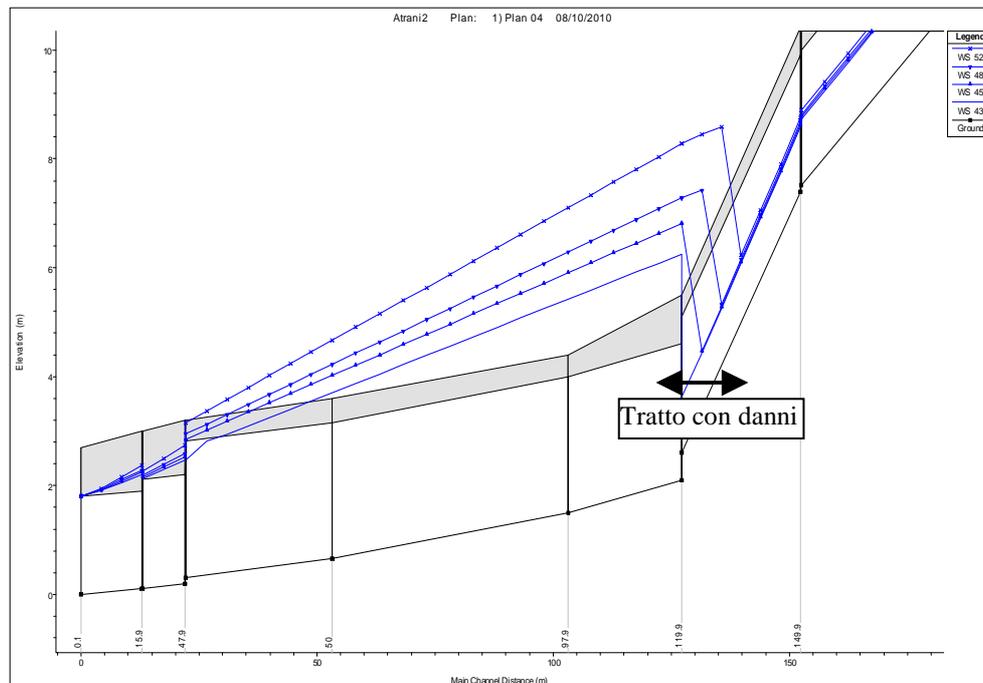


Figura 22 – Profilo di corrente tratto tombato: Sezione di transizione tra moto a superficie libera e moto in pressione in corrispondenza del tratto danneggiato

In definitiva per il tratto di valle le portate critiche identificate nel corso dello studio sono riportate nella tabella 13.

Portata (m^3/s)	Note
39-40	Inizio funzionamento in pressione
41-42	Intero tratto in pressione
44-46	In pressione il tratto danneggiato

Tabella 13 – Portate critiche per il tratto di valle

Nella figura 23 è riportato il dettaglio dell'andamento dei profili di corrente nella zona di imbocco. Per quanto riguarda il tratto di imbocco l'osservazione dei profili di corrente riportati nella figura 23 indica che si tratta di una corrente lenta il cui comportamento idraulico è governato dalle condizioni di moto che si determinano nella porzione iniziale del tratto di

dimensioni 4.25x2.5 m. I livelli idrici nella sezione di imbocco, valutati al variare della portata, sono riportati tabella 14.

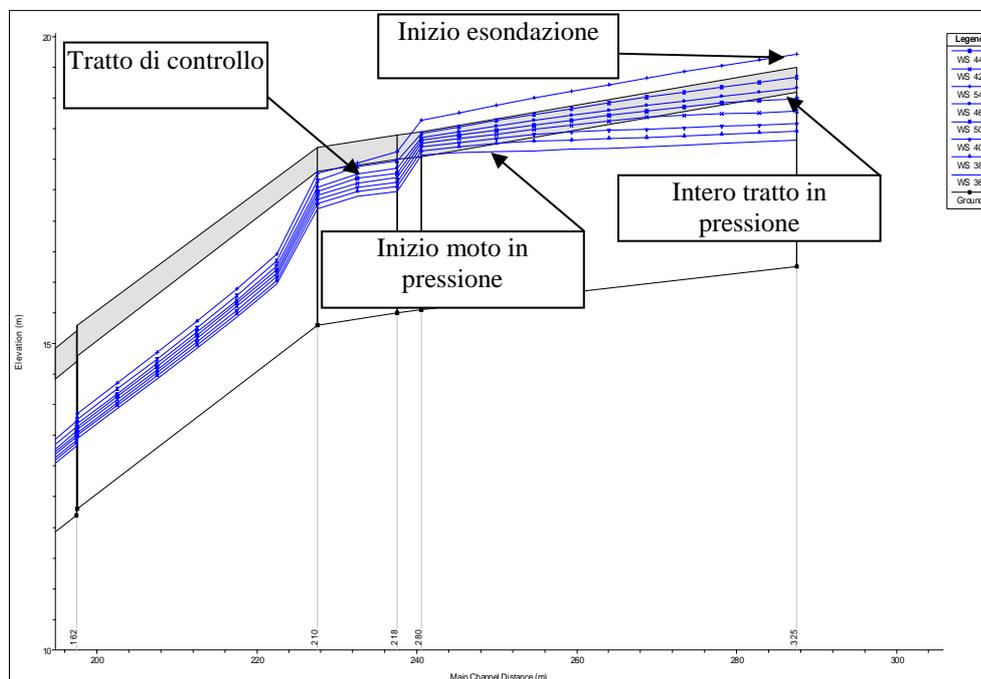


Figura 23 – Profili di corrente tratto tombato: particolare tratto imbocco

Portata (m^3/s)	Livello idrico (m s.m.)	Altezza critica (m s.m.)	Note
35.00	18.32	17.93	Inizio moto in pressione
36.00	18.39	17.96	
37.00	18.46	17.99	
38.00	18.53	18.02	
39.00	18.59	18.05	
40.00	18.70	18.08	
41.00	18.79	18.11	
42.00	18.88	18.14	
43.00	18.98	18.17	
44.00	19.11	18.20	Intero tratto in pressione
45.00	19.17	18.23	
46.00	19.23	18.26	
48.00	19.34	18.32	
50.00	19.58	18.38	Inizio esondazione
52.00	19.71	18.43	

Tabella 14 – Tratto imbocco livelli idrici all'imbocco in funzione della portata

La presenza di un primo tratto in pressione si verifica per una portata pari a 35 m^3/s , mentre per una portata pari 44 m^3/s l'intero tratto funziona in pressione. I successivi incrementi di portata comportano un aumento del livello idrico a monte dell'imbocco che raggiunge l'estradosso della



soletta di copertura (19.50 m s.m.) per una portata pari a circa $50 \text{ m}^3/\text{s}$, oltre tale valore si può ritenere che abbia inizio il deflusso su via dei Dogi.

Nel complesso lo studio dell'alveo tombato del torrente Dragone ha consentito di individuare le portate critiche riportate nella tabella 15.

Tratto	Condizione	Portata (m^3/s)
Valle	Sbocco in pressione	24-26
	Inizio moto in pressione	39-40
	Intero tratto in pressione	41-42
Valle-intermedio	Rottura	44-46
Imbocco	Inizio moto in pressione	34-35
	Intero tratto in pressione	44-45
	Inizio deflusso su via dei Dogi	48-50

Tabella 15 – Portate critiche per il tratto tombato del torrente Dragone

I dati riportati in tabella 15 indicano che la capacità di trasporto del tratto di valle risulta inferiore rispetto a quella del tratto di imbocco. Tale circostanza sembra confermare la ricostruzione proposta in precedenza secondo la quale il cedimento della soletta di copertura sia avvenuta prima della tracimazione nella sezione di imbocco.

La sostanziale continuità tra il campo di portate che comportano il funzionamento in pressione del tratto di valle e di quello di monte spiega il ridotto intervallo temporale intercorso tra il primo flusso, dovuto al cedimento della soletta di copertura, e i successivi incrementi di portata dovuti alla tracimazione dell'imbocco su via dei Dogi.

L'analisi dei filmati ed i risultati dei calcoli idraulici relativi al tratto tombato autorizzano la seguente ricostruzione dell'evento:

- il tratto di imbocco e di valle sono soggetti a saturazione per valori della portata confrontabili con quelli che ci si può attendere in un bacino avente le caratteristiche del torrente Dragone per tempi di ritorno $T = 30$ anni (tabella 2);
- il tratto di valle dell'alveo tombato è stato caratterizzato, durante la parte critica dell'evento, da un funzionamento in pressione;
- la rottura della copertura dell'alveo, al di là di eventuali deficienze strutturali, è avvenuta nella zona di cambio della pendenza dell'alveo che corrisponde approssimativamente al punto di transizione tra la porzione di alveo, intermedia, funzionante a superficie libera, e quella di valle funzionante in pressione;

- il tratto di imbocco è stato caratterizzato, durante la parte critica dell'evento, da un funzionamento in pressione come dimostrato dal deflusso avvenuto sulla strada sovrastante;
- nel tratto tombato è defluita una portata massima compresa tra 45 e 55 m^3/s .

6.4. Analisi delle condizioni di moto lungo via dei Dogi

La portata in eccesso non contenuta nell'alveo tombato è defluita lungo via dei Dogi, piazza Umberto I ed il parcheggio adiacente la spiaggia.

Per la valutazione della portata defluente lungo via dei Dogi si è fatto riferimento ai seguenti elementi:

- altezza idrica minima necessaria per "sollevare" una autovettura;
- tracce lasciate dalla corrente sugli edifici;
- modello idraulico monodimensionale;
- risultanze del video 7 ripreso durante il corso dell'evento.

6.4.1. Altezza idrica minima necessaria per "sollevare" una autovettura

Uno degli aspetti più caratteristici della documentazione filmata disponibile è rappresentato dal fatto che le autovetture parcheggiate lungo via dei Dogi, sono state trasportate dalla corrente ed hanno contribuito a occludere il deflusso attraverso il portico parcheggio.

Il modello di verifica utilizzato è stato di tipo statico ed è stato mirato a definire l'altezza idrica minima necessaria per il sollevamento di una autovettura. Nei calcoli si è considerata la sola spinta di Archimede agente sui pneumatici e sul pianale dell'autovettura trascurando eventuali contributi di tipo dinamico e dovuti alla pendenza della strada dove le autovetture erano parcheggiate.

I dati tecnici di un pneumatico pertinenti al presente studio sono rappresentati da: raggio del cerchione, altezza delle spalle e larghezza del battistrada.

Tali elementi possono essere facilmente desunti dai dati di identificazione di un pneumatico (ad esempio 195/65 R 14) che, in sequenza riportano la larghezza w del battistrada espressa in mm (nell'esempio 195), l'altezza delle spalle espressa come percentuale α della larghezza (nell'esempio 65%) ed infine il raggio R del cerchione espressa in pollici (nell'esempio 14).

Il volume V_p del pneumatico risulta espresso dalla relazione:

$$V_p = \pi \left[(R + \alpha w)^2 - (R)^2 \right] w$$

Nella tabella 16, a titolo di esempio, sono riportati i valori della spinta di galleggiamento esercitata da un singolo pneumatico.

Per la valutazione della spinta idrostatica agente sul pianale di una autovettura si è fatto riferimento ad una superficie convenzionale definita dal prodotto della larghezza della autovettura moltiplicata per il valore medio tra il passo e la lunghezza.

<i>R</i> (inch)	<i>W</i> (cm)	α %	<i>R_e</i> (cm)	<i>R_i</i> (cm)	<i>G</i> (kg)
13	165	70	0.330	0.561	27
14	175	70	0.356	0.601	32
15	185	70	0.381	0.640	38

Tabella 16– Spinta di galleggiamento esercitata dai pneumatici di una autovettura

L'altezza idrica *h* complessiva che comporta il sollevamento della vettura è rappresentata dalla somma dell'altezza da terra del pianale più l'altezza idrica che annulla il peso della autovettura.

A titolo di esempio nella tabella 17 sono riportati i valori calcolati per alcune autovetture.

Modello	Peso (kg)	Altezza da terra (cm)	Lunghezza (cm)	Passo (cm)	Larghezza (cm)	<i>h</i> (cm)
159	1430	14.0	466.0	259.5	174.3	36.62
Corolla	1225	14.7	452.0	260.1	176.0	34.28
Fiesta	1137	16.8	439.4	248.9	172.2	35.98
Focus	1179	15.7	415.0	261.6	169.4	36.33
Giulietta	1310	14.5	435.0	263.4	155.4	38.64
Golf	1234	15.0	422.0	257.8	178.6	35.33
Matiz	800	17.0	349.5	234.0	149.5	35.34
Mondeo	1468	13.0	473.1	264.0	184.2	34.62
Panda	800	15.0	340.8	215.9	149.4	34.24
Punto	840	16.0	376.0	247.0	167.0	32.15
Grande Punto	1025	16.0	403.0	251.0	168.7	34.58
Yaris	1031	14.0	388.0	268.2	169.4	32.51

Tabella 17 – Altezza idrica minima per sollevare una autovettura

I dati contenuti nella tabella 17 indicano che la maggior parte delle autovetture risulta sollevata per un valore dell'altezza idrica variabile tra 35 e 40 cm.

Sulla base di tale risultato è possibile effettuare una prima valutazione delle portate defluite lungo via dei Dogi. Nel tratto di maggior pendenza (0.12 m/m) di via dei Dogi, assumendo una altezza idrica di 0.50 m ed una larghezza media di 6 m, si ottiene, per un valore del coefficiente

di scabrezza di Chezy ($\gamma = 1.5 m^{0.5}$), una portata di circa $18 m^3/s$ cui corrisponde una velocità di $6.0 m/s$.

6.4.2. *Tracce lasciate dalla corrente*

Le riprese del filmato 7 possono aiutare ad interpretare correttamente dal punto di vista idraulico le tracce lasciate dal flusso lungo via dei Dogi.

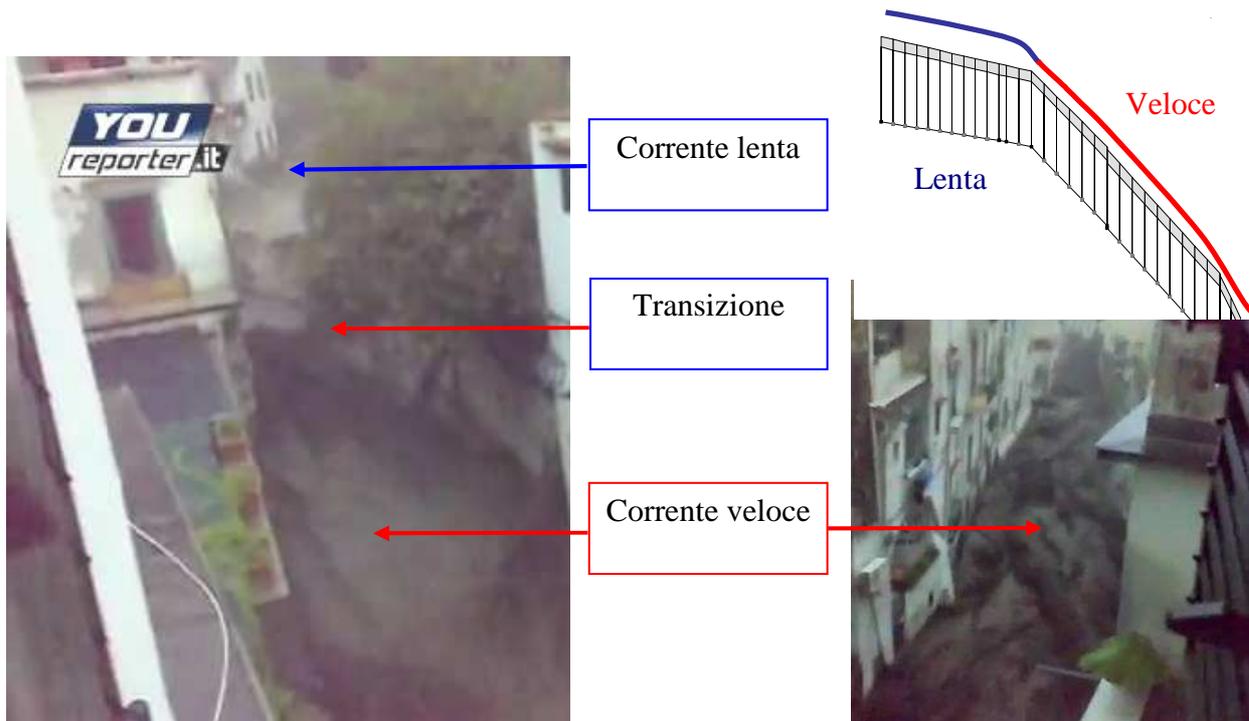


Figura 24 – Andamento della corrente nel tratto di monte di via dei Dogi (Filmato 7)

I fotogrammi del video 7 riportati nella figura 24 evidenziano i seguenti aspetti:

- la presenza, nel tratto di strada a pendenza sub orizzontale, posto immediatamente a valle della sezione di imbocco del tratto tombato, di una corrente lenta;
- la transizione, in corrispondenza dello slargo posto sul lato sinistro di via dei Dogi, della corrente lenta in corrente veloce;
- la presenza, a valle dello slargo e lungo via dei Dogi, di una corrente veloce.

Dal punto di vista idraulico lo schema è quindi quello di una corrente lenta seguita da una corrente veloce con transizione attraverso lo stato critico

6.4.2.1. *Via dei Dogi: imbocco tratto tombato*

Le tracce presenti sulla rete adiacente all'imbocco del tratto tombato evidenziate nella figura 25 forniscono una buona indicazione della quota massima raggiunta dal flusso in prossimità dell'imbocco del tratto tombato.

Assimilando il flusso al di sopra l'imbocco del tratto tombato ad uno stramazzo a larga soglia, si ottiene, per una altezza pari a 1.70, una valore della portata Q pari a:

$$Q = 0.385 \cdot 5.5 \cdot \sqrt{19.62} \cdot 1.7^{1.5} = 22.6 \text{ m}^3/\text{s}$$



Figura 25 – Livello raggiunto dal flusso sull'estradosso dell'imbocco del tratto tombato del torrente Dragone

6.4.2.2. Via dei Dogi: tratto di monte

Nella figura 26 è evidenziato il livello raggiunto dal flusso nel tratto iniziale di monte di via dei Dogi

Con buona approssimazione la portata defluente può essere valutata assumendo che la corrente defluisca nella zona di passaggio in condizioni di stato critico e che il carico totale coincida con quello della corrente di monte: la figura 26 suggerisce che il livello idrico risulta pari a circa 1.6 m.

Valutando il valore del carico totale con il livello idrico letto sugli edifici posti a monte si ottiene:

$$Q = 0.385 \cdot 6.5 \cdot \sqrt{19.62} \cdot 1.6^{1.5} = 22.4 \text{ m}^3/\text{s}$$



Figura 26 – Livello raggiunto dal flusso lungo il tratto iniziale di via dei Dogi

6.4.2.3. *Via dei Dogi: tratto intermedio*

Nel tratto intermedio di via dei Dogi le tracce presenti sulle pareti non appaiono sempre rappresentative dei valori massimi raggiunti dalla corrente in quanto esse sono fortemente influenzate dai disturbi localizzati dovuti alla presenza delle autovetture parcheggiate sui lati della strada.



Figura 27– Livello raggiunto lungo il tratto intermedio di via dei Dogi a) Filmato 7 b) foto posto evento

Più significative sono le evidenze del filmato 7 che mostrano un livello idrico dell'ordine di 0.6 m (figura 27) che concordano con le altezze idriche necessarie a mobilizzare una autovettura.

Nel tratto di maggior pendenza (0.12 m/m) di via dei Dogi, assumendo una altezza idrica di 0.60 m ed una larghezza media di 6 m, si ottiene, per un valore del coefficiente di scabrezza di Chezy ($\gamma = 1.5 m^{0.5}$), una portata di circa 24.6 m³/s.

6.4.2.4. Piazza Umberto I

6.4.2.4.1. Efflusso porticato spiaggia

L'occlusione del portico parcheggio, conseguente all'accumulo di autovetture provenienti da via dei Dogi, ha comportato la deviazione del flusso verso l'interno della piazza e il conseguente deflusso attraverso il *porticato spiaggia*.

All'interno della piazza Umberto I la corrente ha raggiunto un livello massimo stimabile in circa 1.4 m (9 gradini da 0.16 m) sul lato nord e circa 1.9 m sul lato sud (figura 28).

Assumendo, in via speditiva, che la corrente sia defluita attraverso il *porticato spiaggia* in condizioni di stato critico e che il carico totale sia coinciso con il livello massimo raggiunto, si può valutare una portata massima pari a:

$$Q = 0.385 \cdot 5.0 \cdot \sqrt{19.62} \cdot 1.9^{1.5} = 22.3 \text{ m}^3/\text{s}$$



Figura 28 – Livello raggiunto dal flusso nel porticato che collega piazza Umberto I alla spiaggia

6.4.2.4.2. Analisi del processo di riempimento di piazza Umberto I

L'analisi della documentazione filmata (tabella 10) ha evidenziato che il riempimento di piazza Umberto I avviene all'incirca in 300 s (da $t = 13:20$ a $t = 18:20$).

Il processo di riempimento è stato simulato come un processo di laminazione nel quale l'idrogramma in ingresso è rappresentato dalla portata defluente lungo via dei Dogi, la capacità di accumulo è rappresentata dal volume accumulabile nella piazza e la portata in uscita è rappresentata dalla somma della portata che defluisce attraverso il *porticato spiaggia* e di quella che filtra attraverso l'occlusione formata dalle autovetture.

Gli elementi caratteristici utilizzati per i calcoli sono riportati nella tabella 18.

A (m^3/s)	550	Area piazza Umberto I
B (m)	5.0	Larghezza porticato spiaggia
b (m)	0.75	Larghezza equivalente porticato parcheggio
$Q_{B,max}$ (m^3/s)	24.0	Portata massima in ingresso
T (s)	~300	Durata riempimento
		Idrogramma lineare

Tabella 18 – Elementi caratteristici utilizzati per simulare il riempimento di piazza Umberto I

I risultati dei calcoli sono rappresentati nella figura 29 e nella tabella 19.

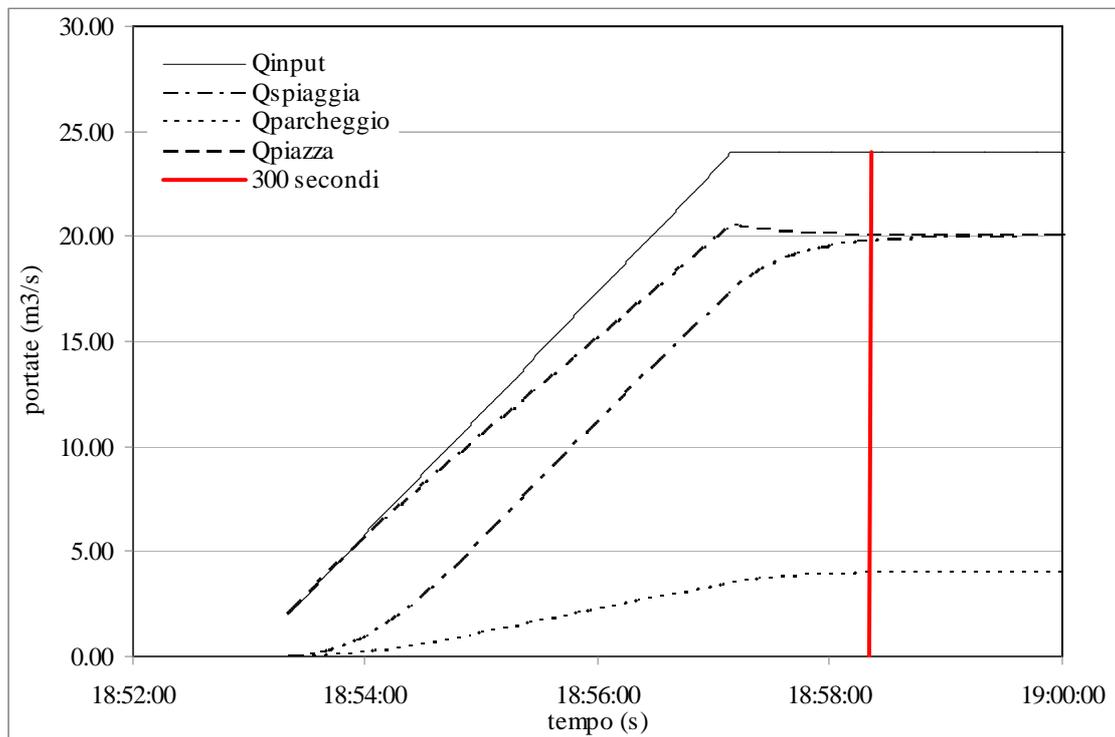


Figura 29 – Riempimento piazza Umberto I



Q_{\max} (m^3/s)	24.00	Portata massima complessiva
$Q_{B,\max}$ (m^3/s)	20.00	Portata massima porticato spiaggia
$Q_{b,\max}$ (m^3/s)	4.00	Portata massima porticato parcheggio
t (s)	300	Tempo di crescita idrogramma
t_r (s)	60	Tempo di ritardo tra gli idrogrammi

Tabella 19 – Risultati simulazione riempimento piazza Umberto I

Il tempo di risalita è risultato pari a 300 s ed il tempo di ritardo tra i due idrogrammi risulta di circa 60 s.

6.4.3. Modellazione idraulica

In analogia a quanto effettuato per il tratto tombato anche per via Dogi è stato implementato un modello idraulico monodimensionale per il quale si è adottato un valore della scabrezza pari $n = 0.025 \text{ s/m}^{1/3}$.

Gli elementi geometrici per la modellazione sono stati ricavati dalla cartografia in scala 1:500 dell'abitato di Atrani. Il modello è stato esteso dalla sezione sovrastante l'imbocco del tratto tombato, dove è stata assegnata la distribuzione di portate in ingresso, fino agli sbocchi rappresentati dai porticati parcheggio e spiaggia, dove sono state applicate le condizioni al contorno di uscita.

La modellazione è stata sviluppata utilizzando inizialmente una modellazione di tipo stazionario e successivamente, sulla base dei risultati della modellazione stazionaria, si è implementato anche un modello non stazionario.

In entrambe le modellazioni si è tenuto conto di quanto è effettivamente accaduto nel corso dell'evento introducendo un elemento che consentisse il deflusso di una porzione della portata in arrivo da via dei Dogi verso il *porticato spiaggia*.

Per modellare la deviazione di una parte della portata in arrivo verso l'interno della piazza Umberto I ed il successivo deflusso attraverso il *porticato spiaggia*, nel tratto di via dei Dogi che attraversa la piazza stessa si è introdotta, sulla sponda sinistra, una soglia laterale cui è stato affidato il ruolo di simulare l'efflusso verso la piazza. La portata defluente sulla soglia laterale è convogliata successivamente verso un alveo rappresentativo del deflusso attraverso il *porticato spiaggia*.

Per entrambe le modellazioni si sono considerati due scenari identificati in seguito come *Chiuso* ed *Aperto* (figura 30).

Lo scenario *Chiuso* ha inteso riprodurre quanto effettivamente avvenuto la sera del 9 settembre

2010 introducendo nella modellazione la chiusura parziale del *porticato parcheggio* verificatasi a causa dell'accumulo di autovetture a monte del porticato stesso. La condizione al contorno per il *porticato parcheggio* nello scenario *Chiuso* è stata ottimizzata ricercando quella che consentisse il deflusso di una portata analoga a quella che si è stimata sia defluita dal parcheggio ($3-4 \text{ m}^3/\text{s}$). Lo scenario *Aperto* ha inteso simulare cosa sarebbe avvenuto se la parziale occlusione del *porticato parcheggio* non si fosse verificata.



Figura 30 – Condizioni al contorno scenari esaminati:

- a) Scenario *Chiuso* (efflusso ridotto attraverso il porticato parcheggio)
- b) Scenario *Aperto* (efflusso libero attraverso entrambi i porticati)

6.4.3.1. Modellazione idraulica stazionaria

Le simulazione in moto stazionario sono state effettuate fissando il valore della portata ed assegnando come condizione al contorno, sia a monte che a valle, la condizione di stato critico.

Nel complesso si sono considerate 4 portate comprese tra 18 e $24 \text{ m}^3/\text{s}$. Per ciascuna portata si sono determinati i profili di corrente la cui analisi ha permesso di ricavare i valori caratteristici delle altezze idriche per ciascun tratto del sistema riportati nella tabella 20.

Le altezze idriche relative al tratto intermedio ed al tratto di valle, per lo scenario *Chiuso*, risultano in buon accordo con i valori valutati in precedenza indicando il deflusso di una portata compresa tra 20 e 24 m^3/s , che, a propria volta, risulta in buon accordo con le valutazioni effettuate in precedenza.

Come era lecito attendersi la differenza tra i due scenari considerati riguarda il solo tratto di valle.

Tratto Portate	Monte (m)	Intermedio (m)	Valle	
			Scenario chiuso (m)	Scenario aperto (m)
18	1.35	0.38	2.12	0.58
20	1.45	0.41	2.24	0.62
22	1.55	0.43	2.36	0.64
24	1.65	0.46	2.48	0.70

Tabella 20 – Altezze idriche medie valutate lungo via dei Dogi in funzione della portata defluente

Per quanto riguarda il confronto tra i due scenari nella tabella 21 è riportata la ripartizione delle portate tra i due porticati.

Tratto Portata ingresso	Scenario <i>Chiuso</i>		Scenario <i>Aperto</i>	
	Porticato parcheggio (m^3/s)	Porticato spiaggia (m^3/s)	Porticato parcheggio (m^3/s)	Porticato spiaggia (m^3/s)
18	2.77	15.33	12.24	5.86
20	3.05	17.05	13.75	6.35
22	3.35	18.75	15.20	6.90
24	3.66	20.44	16.83	7.27

Tabella 21 – Ripartizione delle portate tra i porticati di uscita di piazza Umberto I in funzione della portata defluente

6.4.3.2. Modellazione idraulica non stazionaria

La documentazione filmata dell'evento analizzata in precedenza, mostra chiaramente la variazione temporale delle portate e delle altezze idriche durante il corso dell'evento. E' sembrato quindi opportuno verificare l'evoluzione del processo impiegando anche una modellazione di tipo non stazionario.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno di monte, sulla base dello studio dei filmati e del tratto tombato, si è stimato l'idrogramma, identificato come *input*, riportato in figura 29.

L'idrogramma utilizzato prevede un incremento iniziale della portata da 1 a $24 \text{ m}^3/\text{s}$ in 3 minuti, cui segue un andamento costante per 10 minuti ed infine la riduzione della portata.

Nella figura 31 sono anche riportati, per entrambi gli scenari esaminati, gli idrogrammi determinati in alcune sezioni significative quali:

- ingresso piazza Umberto I;
- uscita porticato parcheggio;
- uscita porticato.

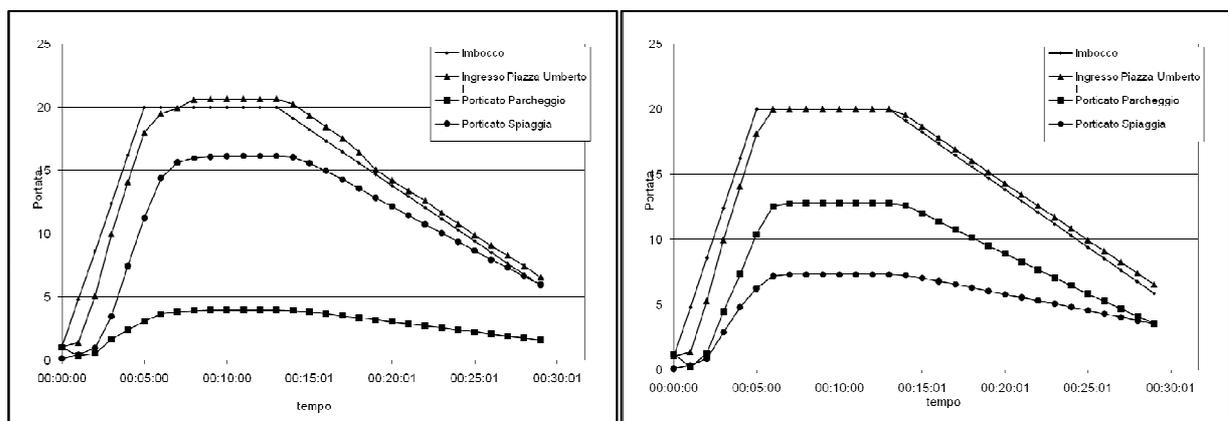


Figura 31 – Idrogrammi di piena:

a) Scenario *Chiuso* b) Scenario *Aperto*

I risultati della modellazione indicano:

- che il carattere dell'onda piena è di tipo cinematico (non vi è riduzione del picco);
- che la distribuzione delle portate in uscita dipende dallo scenario ipotizzato;
- che il tempo di propagazione dell'onda è all'incirca di 90 s;
- che si raggiunge una condizione di sostanziale stazionarietà del moto.

Il raggiungimento di una condizione di sostanziale stazionarietà della soluzione è comprensibile quando si faccia attenzione che il volume complessivamente accumulato nel sistema, calcolato nella tabella 22, corrisponde al volume che, per la portata di picco affluisce nel sistema in soli 90 s, in altri termini il volume complessivo della piena risulta di gran lunga maggiore rispetto al volume accumulabile nel sistema, eliminando in tal modo ogni significativo effetto di laminazione.



Elemento	Lunghezza (m)	Larghezza (m)	Altezza (m)	Volume (m ³)
Via dei Dogi	230	7	0.5	800
Piazza Umberto I	16	32	2.0	1000
Totale				1800

Tabella 22– Volume idrico complessivo accumulato nel sistema

Ad ulteriore conferma del raggiungimento di una condizione di sostanziale stazionarietà nella tabella 23 è riportata la ripartizione delle portate uscita tra la modellazione in moto vario ed in moto permanente.

Tratto Modello	Scenario <i>Chiuso</i>		Scenario <i>Aperto</i>	
	Porticato parcheggio (m ³ /s)	Porticato spiaggia (m ³ /s)	Porticato parcheggio (m ³ /s)	Porticato spiaggia (m ³ /s)
Moto vario (Q _{max} = 20 m ³ /s)	3.95	16.05	12.24	5.86
Moto permanente (Q = 20 m ³ /s)	3.05	17.05	13.75	6.35

Tabella 23– Confronto tra la ripartizione delle portate tra i porticati di uscita tra la modellazione in moto vario ed in moto permanente

I dati riportati nella tabella 23 giustificano, a posteriori, l'impiego di una modellazione di tipo stazionario che risulta meno gravosa dal punto di vista computazionale e di più facile implementazione.

In sintesi le portate defluite lungo via dei Dogi, valutate secondo i diversi approcci, sono riportate nella tabella 24.

Tratto	Criterio	Portata (m ³ /s)
Parcheggio	Stato critico marciapiede	3.0
Imbocco	Stato critico imbocco	22.6
via dei Dogi (monte)	Transizione lenta veloce	22.4
via dei Dogi (intermedio)	Moto uniforme	24.1
Piazza Umberto I	Stato critico porticato spiaggia	22.0
Intero percorso	Modello monodimensionale	22.0-24.0

Tabella 24 – Sintesi dei valori della portata defluente lungo via dei Dogi

Sulla base di quanto riportato in tabella 24 si può concludere, con sufficiente approssimazione, che la portata defluente lungo via dei Dogi è stata presumibilmente compresa tra 22.0 e 24.0 m^3/s .

A titolo indicativo nella figura 32 è riportata la posizione qualitativa dei livelli idrici relativi ai due scenari esaminati.



Figura 32 – Indicazione qualitativa dei livelli idrici relativi agli scenari esaminati

7. Sintesi e discussione delle analisi svolte

7.1. Evoluzione complessiva dell'evento

L'analisi della documentazione filmata e i risultati delle elaborazioni svolte consentono di concludere con sufficiente affidabilità che, dal punto di vista idraulico, l'evento si è sviluppato secondo le seguenti fasi:

- la portata inizialmente in arrivo è riuscita a defluire attraverso il solo tratto tombato;
- l'aumento della portata in arrivo ha comportato il funzionamento in pressione della porzione di valle del tratto tombato con il conseguente cedimento della copertura dell'alveo;
- un ulteriore incremento della portata ha comportato il funzionamento in pressione anche della porzione di imbocco del tratto tombato e l'instaurarsi di un deflusso lungo via dei Dogi;
- la portata defluente lungo la strada è aumentata fino al punto da trasportare le autovetture parcheggiate lungo via dei Dogi;
- le prime autovetture trasportate si sono arrestate in prossimità del *porticato parcheggio* lungo via dei Dogi e hanno formato un primo nucleo che ha ostacolato il deflusso della corrente attraverso il porticato stesso;



- l'arrivo di un secondo gruppo di autovetture, addossandosi alle prime, ha completato l'ostruzione al deflusso della corrente attraverso il *porticato parcheggio* e la corrente è stata deviata verso l'interno della piazza;
- la corrente che è defluita nella piazza ha trovato recapito nel *porticato spiaggia* che collega la piazza alla spiaggia;
- per poter consentire il deflusso della corrente attraverso il *porticato spiaggia* il livello idrico nella piazza si è incrementato per consentire alla corrente di riguadagnare il carico perso a causa del risalto idraulico conseguente alla transizione da corrente veloce a corrente lenta indotta dalla presenza dell'ostruzione;
- l'altezza idrica all'interno della piazza è aumentata fino a raggiungere un livello tale da consentire il deflusso di una portata pari a quella in arrivo;
- i flussi che sono defluiti nello scatolare ed attraverso i porticati spiaggia e parcheggio si sono mantenuti costanti per parecchi minuti per poi decrescere successivamente.

Nella tabella 25 sono riportate le stime delle portate massime defluite nel tratto tombato e lungo via dei Dogi.

Elemento	Portata (m^3/s)
Tratto tombato	47-53
Via dei Dogi	20-24
Totale	67-77

Tabella 25– Stima delle portate massime defluite nel tratto tombato e lungo via dei Dogi

Sulla base di quanto riportato nella tabella 25, considerando le incertezze connesse ai calcoli effettuati si può concludere che la massima portata defluita nel corso dell'evento risulta compresa tra 65 e 75 m^3/s . In ogni caso tale valore risulta superiore al valore della portata avente un tempo di ritorno centennale.

7.2. *Idrogramma di piena*

L'analisi dei filmati ed i calcoli idraulici effettuati hanno consentito anche di tentare la ricostruzione dell'idrogramma di piena. Nella tabella 26 e nella figura 33 sono riportati i valori complessivi della portata nonché la ripartizione tra il tratto tombato e la portata defluente lungo via dei Dogi.

Il fenomeno evolve molto rapidamente: la saturazione del tratto tombato si verifica in un arco temporale di circa 12 minuti dall'inizio della documentazione filmata, mentre il massimo della portata defluente su via dei Dogi si raggiunge nei successivi 5 minuti. Una volta raggiunto il valore di picco l'idrogramma mantiene un andamento sostanzialmente costante fino alla parte decrescente.

Tempo relativo (<i>minuti</i>)	Tempo assoluto (<i>ore</i>)	Q_{tombato} (m^3/s)	Q_{strada} (m^3/s)	Q_{totale} (m^3/s)
00:00	18:40:00	20.0	0.0	20.0
10:20	18:50:20	43.0	0.0	43.0
11:05	18:51:05	45.0	1.3	46.3
12:00	18:52:00	48.0	1.6	49.6
12:30	18:52:30	51.0	5.5	56.5
13:10	18:53:10	51.0	8.0	59.0
14:15	18:54:15	51.0	10.5	61.5
17:30	18:57:30	51.0	18.0	69.0
20:00	19:00:00	51.0	22.0	73.0
22:40	19:02:40	51.0	22.0	73.0
25:40	19:05:40	51.0	20.0	71.0
29:35	19:09:35	51.0	10.0	61.0

Tabella 26 – Ricostruzione idrogramma di piena

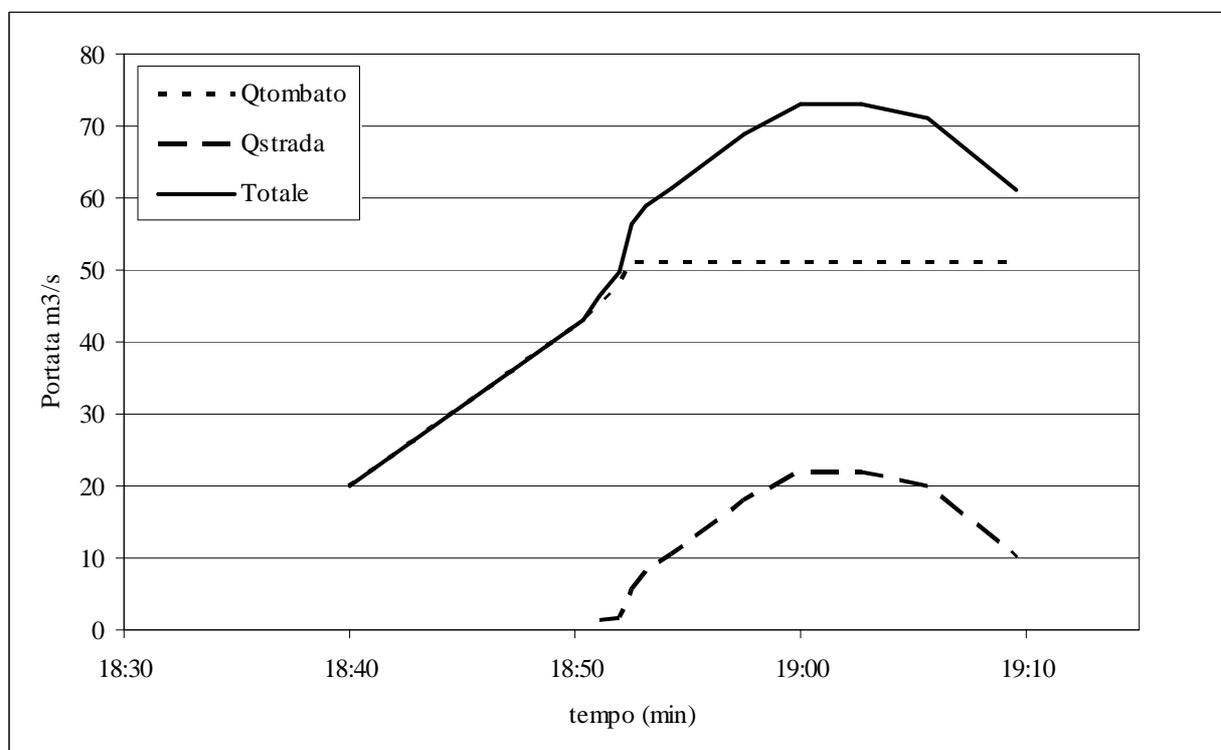


Figura 33 – Ricostruzione idrogramma di piena torrente Dragone



7.3. *Caratterizzazione morfologica dell'evento*

Per quanto riguarda la caratterizzazione morfologica dell'evento si possono sviluppare le seguenti considerazioni.

Nel corso dell'evento l'afflusso meteorico complessivo è stato stimato in circa $740 \cdot 10^3 m^3$, in assenza di infiltrazione la massima portata sarebbe risultata dell'ordine di circa $205 m^3/s$. L'analisi relativa all'andamento temporale delle portate effettivamente defluite consente di stimare un coefficiente di piena per la portata di picco pari a circa 0.35, assumendo che tale valore si sia mantenuto costante nel corso dell'evento si può stimare che il deflusso sia stato pari a circa $259 \cdot 10^3 m^3$.

Considerato che la stima del volume del volume solido lordo effettuata in precedenza ha fornito un valore di circa $10 \cdot 10^3 m^3$, assumendo un indice dei vuoti pari al 50 %, si può stimare una percentuale di volume solido netto pari a circa il 2 % del deflusso totale. E' apparso opportuno verificare la congruità di tale percentuale sulla base di una valutazione della capacità di trasporto solido q_s del Torrente Dragone.

Considerata la elevata pendenza media del corso dell'intero torrente Dragone, che risulta compresa tra il 10% ed il 12%, tra le numerose formule proposte nella letteratura scientifica per la valutazione della capacità di trasporto solido si sono selezionate le formule di Smart & Jaeggi (1984) e di Rickemann (1991) in quanto entrambe sono state sviluppate per alvei ad elevata pendenza di fondo S .

Per entrambe le formule si è utilizzata una espressione semplificata che non richiede la determinazione dell'altezza idrica.

Nella formula semplificata di Smart & Jaeggi:

$$q_s = 2.5qS^{0.6}(S - S_c)$$

e nella formula la formula semplificata di Rickemann :

$$q_s = 5.8S^{2.0}(q - q_c)$$

q rappresenta la portata liquida;

Δ rappresenta la densità relativa definita come $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s}$;

S rappresenta la pendenza di fondo dell'alveo ;

S_c rappresenta la pendenza critica per l'inizio del trasporto;

q_c rappresenta la portata critica $q_c = 0.065\Delta^{1.67} g^{0.5} d_{50}^{1.5} S^{-1.12}$ per l'inizio del trasporto.

Nel caso in esame è certamente lecito assumere $S \gg S_c$ e $q \gg q_c$ per cui si può derivare l'espressione semplificata generale:

$$\frac{q_b}{q} = AS^\alpha.$$

Il rapporto tra la portata solida e quella liquida q_b/q risulta pertanto funzione del prodotto di una costante per una funzione di potenza della pendenza di fondo S .

I valori del rapporto q_s/q relativi all'alveo del torrente Dragone, in funzione delle pendenza di fondo, sono riportati nella tabella 27:

Formula	A	α	q_s/q		
			$S=0.08$	$S=0.10$	$S=0.12$
Smart e Jaeggi semplificata	2.5	1.6	4.4	6.3	8.4
Rickemann semplificata	5.8	2.0	3.7	5.8	8.3

Tabella 27 – Coefficienti di proporzionalità tra portata solida e portata liquida valutati con le formule semplificate di Smart & Jaeggi e Rickenmann

Dalla tabella 27 si ricava, sulla base delle formule di Smart & Jaeggi e Rickemann, che la capacità di trasporto del torrente Dragone per le portate più elevate risulta pari al 5-6% della portata liquida. Tale valore risulta in buon accordo con la valutazione precedente basata sul volume solido accumulato.

Nel complesso si è trattato di un flusso idraulico con concentrazione elevata di materiale solido che è possibile classificare ancora all'interno del trasporto solido ordinario.

Il rapido incremento della portata e la tipologia di trasporto solido descritto in precedenza consentono di classificare l'evento in esame all'interno del processo morfologico definito come *flash flood*.

Con tale termine si indicano quei fenomeni di piena, tipici dei bacini di piccole dimensione, che si verificano quando i bacini stessi sono interessati da eventi meteorici caratterizzati da elevata intensità pluviometrica. L'elevata intensità pluviometrica comporta il superamento della capacità di infiltrazione del terreno e la formazione di deflussi che possono presentare valori del coefficiente udometrico molto elevati, nel caso in esame tale valore risulta prossimo a $7 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$.



In tali fenomeni un ruolo determinante è rappresentato dal rapporto tra la durata della pioggia ed il tempo di risposta caratteristico del bacino: l'evento critico è rappresentato dall'evento pluviometrico che ha durata pari al tempo di risposta del bacino. Infatti:

- eventi pluviometrici di durata inferiore al tempo di risposta del bacino non coinvolgono l'intero bacino, mentre
- eventi pluviometrici di durata maggiore al tempo di risposta del bacino sono caratterizzati da intensità di pioggia via via decrescenti all'aumentare della durata.

Tale condizione critica sembra, in effetti, essersi verificata in occasione dell'evento del 9 settembre 2010 in quanto il tempo caratteristico del bacino del Dragone, che è stato stimato in circa 1 ora (tabella 1), risulta pari alla durata della pioggia di massima intensità (tabella 5).

Una possibile eccezione a questa indicazione di carattere generale è rappresentata dai bacini in cui sono presenti formazioni geologiche costituite da terreni con limitata capacità di infiltrazione, per tali bacini il coefficiente di deflusso di piena dipende dallo stato del terreno: la saturazione della capacità di infiltrazione comporta un brusco aumento del coefficiente di deflusso. Tale circostanza non sembra però riguardare il bacino del torrente Dragone in quanto nel bacino sono presenti rocce carbonatiche coperte da coltri piroclastiche che, per eventi pluviometrici concentrati su aree ristrette, offrono una capacità di accumulo molto elevata.

7.4. Considerazioni sulle soglie pluviometriche

Le considerazioni precedenti hanno una notevole rilevanza pratica per quanto riguarda la gestione di tale tipologia di eventi da parte delle strutture di protezione civile in particolare per quanto riguarda le soglie pluviometriche indicate nel Decreto del Presidente della Giunta Regionale n. 299 del 30/06/2005.

Gli eventi meteorici che risultano critici per i piccoli bacini, come è confermato dai dati pluviometrici riportati nella figura 7, sono il risultato di fenomeni atmosferici che presentano una estensione areale ridotta. Tali tipologie di fenomeni pongono notevoli difficoltà di gestione alle strutture di protezione civile. Infatti eventi meteorici concentrati in aree molto ristrette possono non essere registrati dalla rete pluviometrica tradizionale e quindi non essere riconosciuti a distanza, ma ove anche fossero registrati correttamente, a causa della ridotta durata del fenomeno, non vi sarebbe un preavviso sufficiente per mettere in atto efficienti interventi di protezione civile.



Ne consegue che per i bacini di piccole dimensioni non sembra corretto fare riferimento a soglie pluviometriche basate su un sistema di monitoraggio pluviometrico tradizionale in quanto l'evento si svolge, nella pratica, contemporaneamente all'esecuzione della misura stessa.

Appare inoltre utile precisare che le soglie pluviometriche utilizzate nella Regione Campania estendono alla intera superficie Regionale le analisi idrologiche originariamente svolte dal prof. Fabio Rossi, all'interno delle attività che l'U.O. 2.38 del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI), a supporto della Protezione Civile all'indomani della evento di Sarno del 5 maggio 1998.

Le frane che innescarono le colate di fango del maggio del 1998 furono il risultato di piogge di lunga durata (> 24 ore) caratterizzate da intensità relativamente basse e pertanto fanno riferimento a fenomeni completamente differenti rispetto a quanto avvenuto ad Atrani il 9 settembre 2010.

7.5. Considerazioni sugli effetti provocati dall'evento

Le elaborazioni svolte suggeriscono che gli effetti negativi dell'evento alluvionale sono stati amplificati dalla occlusione del *porticato parcheggio* provocato dall'accumulo delle autovetture trascinate dalla corrente. In effetti i dati riportati nella tabella 20 indicano chiaramente che lo scenario *Chiuso*, rappresentativo di quanto realmente avvenuto, comporta la presenza altezze idriche all'interno di piazza Umberto I che risultano quasi 2 m più elevate rispetto a quelle valutabili nello scenario *Aperto*, rappresentativo di quanto sarebbe avvenuto se non si fosse verificata l'occlusione.

8. Proposte di intervento

L'analisi dell'evento alluvionale avvenuto ad Atrani il 9 settembre 2010, svolta nel presente studio, consente di proporre alcuni interventi che è possibile intraprendere per mitigare il rischio idraulico nella Costiera Amalfitana e nella aree caratterizzate da morfologie analoghe.

Gli interventi proposti perseguono sia la riduzione della pericolosità, cercando di migliorare la capacità di trasporto dei tratti tombati, sia la riduzione della vulnerabilità, cercando di intervenire sulle possibili cause di amplificazione degli effetti negativi indotti dagli eventi pluviometrici estremi.

Nel seguito tali interventi sono suddivisi come:

- interventi di protezione civile;



- interventi di tipo non strutturale;
- interventi di tipo strutturale.

8.1. Interventi di protezione civile:

Per quanto riguarda gli interventi di protezione civile è opportuno:

- che la Regione Campania si doti al più presto di un sistema di radar meteorologici per il monitoraggio areale della pioggia e la previsione meteorologica in tempo reale (*now casting*). Per i territori della costiera Amalfitana questo appare come l'unico approccio in grado di poter fornire al sistema di protezione civile il preavviso minimo necessario per attivare i piani di emergenza. Il sistema di soglie pluviometriche attualmente in vigore risulta utile per la protezione contro le colate di fango innescate nei terreni piroclastici da piogge di lunga durata, ma non può essere soddisfacente nel caso di flash floods;
- vietare la presenza, lungo le strade che insistono sulle coperture di alvei tombati, di qualsiasi elemento, in particolare autovetture, che possa essere movimentato dal flusso e che, creando ostacolo al deflusso della corrente, possa incrementare gli effetti negativi dovuti ad un eventuale deflusso sulla strada;
- installare all'interno degli alvei tombati, in particolare nelle sezioni o porzioni individuate come critiche, una idonea strumentazione di allarme che possa avvertire la popolazione che il tratto tombato è in procinto di raggiungere la massima capacità di trasporto e che è possibile l'esondazione sul piano stradale.

8.2. Interventi di tipo non strutturale:

Per quanto riguarda gli interventi di tipo non strutturale sembra opportuno:

- verificare la effettiva capacità di trasporto dei tratti tombati sulla base di un dettagliato rilievo topografico della sezione trasversale e dell'effettivo andamento altimetrico del tratto;
- individuare, sulla base delle verifiche precedenti, le eventuali sezioni singolari di crisi il cui adeguamento possa migliorare in maniera significativa la capacità di trasporto del tratto. In tal senso appare evidente che, dal punto di vista idraulico, sarebbe opportuno evitare la presenza di travi di sostegno delle solette di coperture di tipo emergente;



- definire, come portata di verifica per valutare il livello di criticità dei tratti tombati, la portata minima che comporta il passaggio in pressione di una prima porzione del tratto tombato;
- avviare una verifica dei modelli idrologici utilizzati per il calcolo delle massime portate di piena in bacini di piccole dimensioni che, in occasione degli eventi pluviometrici estremi, possono presentare coefficienti di deflusso maggiori rispetto a quelli valutati in occasione di eventi pluviometrici di minore intensità e in bacini di dimensioni maggiori;
- valutare il livello di esposizione del tratto tombato confrontando la capacità di trasporto, determinata in precedenza, con le portate idrologiche che, in assenza ed in attesa di ulteriori studi, andrebbero amplificate per un coefficiente compreso tra 1.05 e 1.10 al fine di tenere conto del contributo volumetrico dovuto all'elevato trasporto solido;
- effettuare la manutenzione dei tratti tombati al fine di garantire che la capacità di trasporto potenziale coincida con quella effettiva.

8.3. *Interventi di tipo strutturale*

La tipologia degli interventi di tipo strutturale che si possono realizzare dipende dall'approccio che si intende seguire per quanto riguarda la gestione complessiva dei tratti tombati.

Nel caso si decida di lasciare sostanzialmente inalterata la capacità di trasporto attuale non sono richiesti interventi di tipo strutturale significativi. Ovviamente tale approccio lascia inalterato il tempo di ritorno della portata critica e non riduce la pericolosità.

In tal caso si potrebbero realizzare piccoli interventi, quali la sostituzione di parte delle coperture chiuse con coperture aperte (grigliati), che rendendo "visibile" la presenza del flusso al di sotto del piano viario aumentino la consapevolezza della cittadinanza della presenza, e quindi dell'eventuale pericolo, rappresentato dal tratto tombato.

8.3.1. *Interventi per incrementare la capacità di trasporto dei tratti tombati*

Nel caso si voglia ridurre la pericolosità con interventi di tipo strutturale è necessario adeguare la resistenza e/o la capacità di trasporto del sistema ad una portata di progetto maggiore rispetto a quella massima che può transitare attualmente a superficie libera.

I vincoli urbanistici e topografici esistenti rendono estremamente improbabile che tale obiettivo possa essere raggiunto mantenendo il deflusso a superficie libera.

Una possibilità è quindi quella di accettare che il deflusso delle massime portate avvenga con un funzionamento in pressione e che gli interi tratti tombati, o parte di essi, possano funzionare come tubazioni. Affinché il sistema risulti adeguato è necessario che gli elementi per i quali è previsto il funzionamento in pressione siano in grado, dal punto di vista strutturale, di resistere all'azione esercitata dalla pressione interna. I valori della pressione di progetto per i diversi tratti possono essere ottenuti con un attento calcolo idraulico .

Gli interventi strutturali possono riguardare:

- l'adeguamento dei soli tratti tombati esistenti;

e/o

- la realizzazione di nuove opere.

8.3.1.1. Adeguamento tratti tombati esistenti

Nel caso di interventi su tratti tombati esistenti, possono essere perseguiti due scopi:

- evitare che la copertura degli alvei sia danneggiata quando il sistema funziona in pressione;
- incrementare la capacità di trasporto.

La possibilità di perseguire solo il primo o entrambi gli scopi dipende dall'andamento planimetrico dell'alveo e dalle capacità di trasporto specifiche dei vari tratti.

Per illustrare con maggiore chiarezza il ragionamento si prendano in esame i due andamenti schematici riportati in figura 34, che possono considerarsi tipici dei tratti tombati presenti in costiera Amalfitana.

Nella figura 34 $Q_{c,v}$ e $Q_{c,m}$ indicano le portate critiche, relative rispettivamente ai tratti di valle e di monte, che comportano la transizione dalla condizione di moto a superficie libera a quella di moto in pressione.

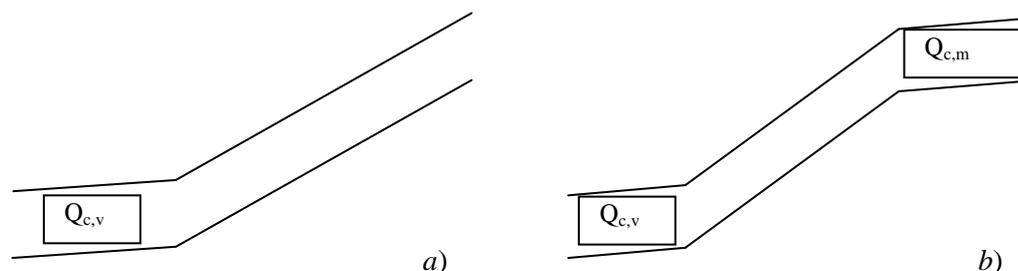


Figura 34 – Andamenti altimetrici schematici tratti tombati

Nel caso di figura 34a la capacità di trasporto del sistema è limitata da $Q_{c,v}$, mentre nel caso di figura 34b la capacità di trasporto del sistema è limitata dal valore minore tra $Q_{c,v}$ e $Q_{c,m}$.

Nella figura 35 è riportato il funzionamento idraulico semplificato dello schema riportato in figura 34a.

La figura 35 mostra che ad un aumento della lunghezza del tratto funzionante in pressione si verifica una corrispondente aumento della capacità di trasporto dell'intero sistema. Il limite massimo è rappresentato dalla condizione per la quale l'estremo di monte della linea piezometrica raggiunge l'imbocco del tratto tombato.

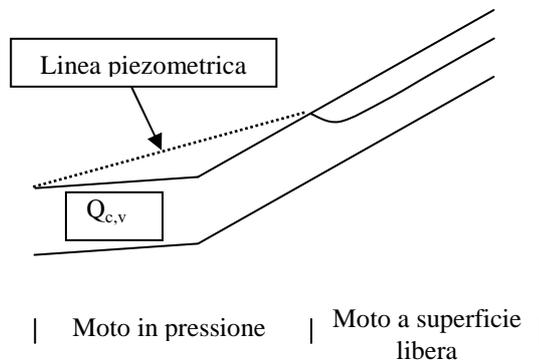


Figura 35 – Descrizione semplificata funzionamento idraulico (schema figura 34a)

Nel caso dell'andamento altimetrico riportato in figura 34b le possibilità di incremento della capacità di trasporto dipendono dal rapporto reciproco tra $Q_{c,v}$ e $Q_{c,m}$.

Gli schemi idraulici semplificati sono riportati nella figura 36.

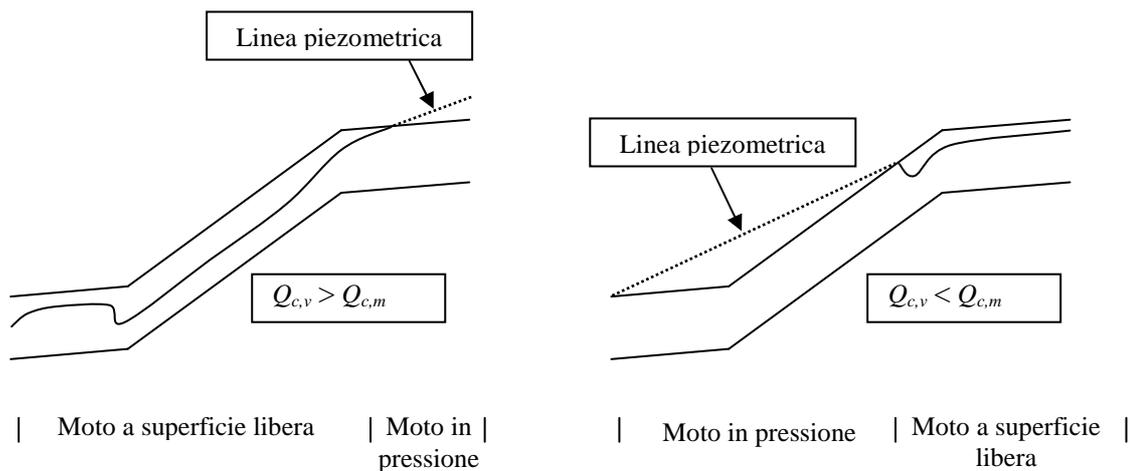


Figura 36 – Descrizione semplificata funzionamento idraulico (schema figura 34b)



Nel caso in cui $Q_{c,v} > Q_{c,m}$ non risulta possibile incrementare la capacità di trasporto in quanto non appena la portata in arrivo raggiunge il valore critico $Q_{c,m}$ si determina il deflusso sulla strada sovrastante.

Nel caso in cui $Q_{c,v} < Q_{c,m}$ è possibile incrementare la capacità di trasporto del sistema, incrementando il tratto di valle con funzionamento in pressione, il limite superiore è rappresentato, ovviamente, dal valore della portata $Q_{c,m}$.

8.3.1.2. Realizzazione di nuove opere

Nel caso di opere di nuova realizzazione si potrebbero scavare gallerie di *by-pass* che possano collegare i tratti degli alvei posti immediatamente a monte degli imbocchi dei tratti tombati con lo sbocco posto in corrispondenza del mare (figura 37).

La portata di dimensionamento della galleria di *by-pass* è rappresentata dalla differenza tra la portata di progetto, definita in funzione del tempo di ritorno, e la effettiva capacità di trasporto del tratto tombato esistente.

A seconda delle situazioni locali le opere potrebbero essere realizzate con una galleria a pendenza sostanzialmente costante o con un pozzo o scivolo posizionato a monte dell'imbocco del tratto tombato seguito da una galleria ad andamento sub orizzontale.

Bibliografia

Smart G. M. *Predicting the sediment capacity of a channel* Proc. Challenges in Africa hydrology and water resources Harare IAHS Publ. no 144 (1984)

Rickenmann D. *Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes* Journ of Hyd Eng. ASCE Vol. 117 No. 11 (1991)

Ringraziamenti

L'Autore intende ringraziare:

- il dott. Gerardo Lombardi (Autorità di Bacino Regionale Destra Sele) e l'ing. Fabio Ciervo (Borsista CUGRI nell'ambito del progetto IMPRINTS) per aver messo a disposizione ed avere autorizzato l'uso del materiale fotografico ripreso la mattina del 10 settembre 2010;
- l'ing. Pierluigi Altomare (ARCADIS) per le informazioni relative alle caratteristiche dal tratto tombato del torrente Dragone;
- l'ing. Giuseppe Benevento (CUGRI) per avere condiviso i sopralluoghi ed aver discusso le proposte di intervento;
- l'ing. Nicola Immediata (Tecnico UNISA) per la preziosa collaborazione fornita nella analisi della documentazione filmata;

- la signora Annamaria Santoro (autrice dei filmati 2, 3, 4 e 5) per avere fornito utili informazioni sui tempi di ripresa dei filmati;
- il signor Enzo Dell'Isola autore del filmato 6;
- gli autori anonimi dei filmati 1 e 7.

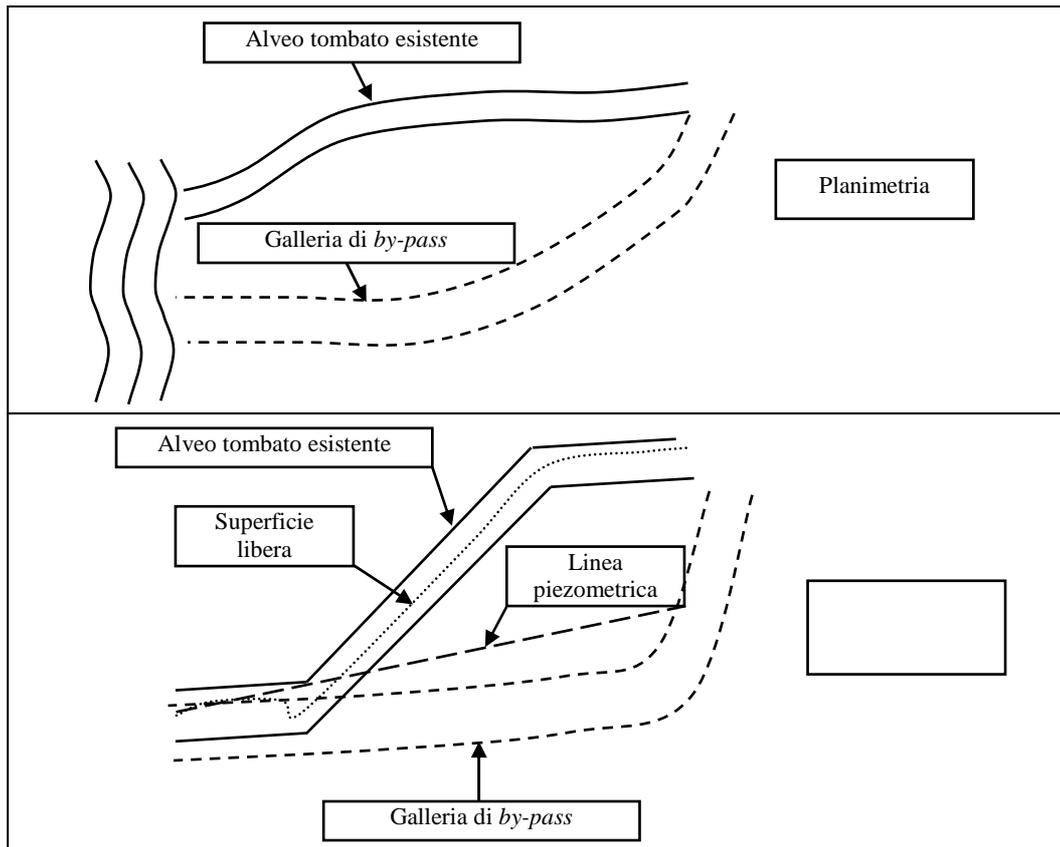


Figura 37– Planimetria e sezione longitudinale galleria di *by-pass*



ERRATA CORRIGE

I dati pluviometri citati nello studio sono stati raccolti e messi disposizione dal Centro Funzionale della Regione Campania.

AVVERTENZA

Si avverte il lettore che il sistema delle soglie pluviometriche in uso nella Regione Campania è più articolato rispetto a quanto descritto nel presente studio. Il quadro completo di tale sistema è delineato DPGRC n. 299/2005.

Al fine di garantire la massima chiarezza circa l'attuale sistema di allertamento pluviometrico nella Regione Campania si rimanda al testo integrale del DPGRC n. 299/2005 che, alla data di redazione della presente avvertenza (12-10-2012) risulta disponibile presso il sito della Regione Campania all'indirizzo:

http://www.sito.regione.campania.it/burc/pdf05/burcsp01_08_05/burcsp01_08_05index.asp