

REGIONE SICILIANA

Provincia di Agrigento

Comuni di FAVARA e AGRIGENTO

PROGETTO:

IMPIANTO AGRI-VOLTAICO FAVARA 1"

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO DI POTENZA PARI A
51,72 MWp IN CONTRADA S. BENEDETTO
nei comuni di FAVARA (AG) e AGRIGENTO"



PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE



10PIU' ENERGIA SRL

Via Aldo Moro, 28 - 25043 Breno (BS)

P.I. 04309260984 - PEC: 10piuenergia@pec.it

PROGETTAZIONE



PROTECNA s.r.l.

via XX Settembre, 25

00062 Bracciano (RM)

PEC: protecnasrl@pec.it

I Tecnici

Dott. Ing. Paolo Lo Biundo

Dott. Ing. Francesco Mollame

ELABORATO

Relazione idraulica e idrogeologica

| CODICE | SCALA | FORMATO | CODIFICA INTERNA |
|--------|-------|---------|-------------------------|
| R.5 | 1:-- | A4 | R.5_10PN2201PDRrid005R0 |

| REV. | DATA | DESCRIZIONE REVISIONE | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO |
|------|------------|-----------------------|---------|------------|-----------|
| 00 | 30/09/2022 | PRIMA EMISSIONE | PL | FM | AL |

INDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. PREMESSA..... | 4 |
| 2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE | 6 |
| 2.1. RIFERIMENTI CARTOGRAFICI..... | 6 |
| 3. PROGETTO DELLE OPERE DI REGIMAZIONE IDRAULICA..... | 7 |
| 3.1. DATI GENERALI IMPIANTO | 10 |
| 3.2. OPERE IDRAULICHE | 10 |
| 4. INFORMAZIONE IDROLOGICA..... | 16 |
| 4.1. MODELLO TCEV SICILIA | 16 |
| CALCOLO DELLA C.P.P..... | 20 |
| PIOGGE BREVI..... | 21 |
| SUPERFICI DI INFLUENZA | 22 |
| 5. MODELLO AFFLUSSI DEFLUSSI..... | 23 |
| INDIVIDUAZIONE DELLA PIOGGIA CRITICA..... | 23 |
| IL COEFFICIENTE DI AFFLUSSO | 24 |
| IL CALCOLO DELLE PORTATE | 25 |
| 6. VERIFICA DELLE PORTATE DI PROGETTO | 27 |

1. PREMESSA

La presente relazione descrive gli **interventi per la raccolta e l'allontanamento delle acque meteoriche** dalle superfici interne all'impianto fotovoltaico di San Benedetto e **mostra sia i criteri utilizzati che le risultanze dei dimensionamenti delle principali opere previste in questa fase di progetto definitivo**. Il sistema di fossi di guardia previsti in progetto e degli opportuni sistemi di recapito rispetta l'equilibrio idrogeologico preesistente. Le scelte progettuali sono state condotte in modo tale da avere opere ad "impatto zero" sull'esistente reticolo idrografico, recapitando le acque superficiali convogliate dai fossi di guardia presso gli impluvi ed i solchi di erosione naturali.

L'obiettivo che si vuole raggiungere è quello di intercettare e allontanare tempestivamente le acque di scorrimento superficiale all'interno del parco fotovoltaico, al fine di garantire la vita utile delle opere civili, riducendo le operazioni di manutenzione al minimo indispensabile.

La relazione in oggetto, oltre il presente capitolo, è composta da ulteriori n°6 capitoli, di cui di seguito un breve riepilogo:

- *Capitolo 2 – Inquadramento territoriale:* vengono riportate le informazioni necessarie per l'individuazione cartografica del sito.
- *Capitolo 3 – Progetto delle opere di regimazione:* illustra i criteri e le linee guida utilizzate per gli interventi in progetto e descrive le opere idrauliche previste.
- *Capitolo 4 – Informazione idrologica:* analisi dei dati esistenti per la stima della curva di probabilità pluviometrica di progetto;
- *Capitolo 5 – Modello afflussi-deflussi:* calcolo delle portate di progetto.
- *Capitolo 6 – Verifica delle opere progettate:* il capitolo fornisce la descrizione dei calcoli effettuati per il dimensionamento delle opere idrauliche (canalizzazioni).

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area per l'installazione dell'impianto fotovoltaico, denominato "FAVARA 1", si trova nel territorio comunale di Favara e Agrigento, provincia di Agrigento, ubicata in Contrada San Benedetto.

Dal punto di vista cartografico, l'area oggetto dell'indagine, si colloca sulla CTR alla scala 1:10.000, nella Sezione 636080.

Il sito è identificato al catasto terreni del comune di Favara, sul foglio di mappa n. 21 particelle 11, 421, 422, 423, 67, 71 e 73 e catasto terreni del comune di Agrigento foglio di mappa n. 194 particelle 15, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 33, 34, 45, 55; foglio di mappa 122 particelle 17, 31, 33, 44, 50; foglio di mappa 131 particelle 1, 2, 3, 4, 5, 8, 829.

L'impianto risiederà su appezzamenti di terreno posti ad un'altitudine media di 240 m.s.l.m, diviso in 6 lotti. Il sito è facilmente raggiungibile dalla SP3 e SP189, entrambe collegate alla SS640 Caltanissetta-Agrigento che collega la SS115 a sud con la A19 a nord.

L'estensione complessiva è circa 124,46 ettari per più della metà sarà utilizzata per pastorizia, rimboschimento per stabilizzazione delle zone scoscese e coltivazioni come meglio illustrato nella relazione agronomica.

Non sono presenti sul sito, fenomeni di ombreggiamento, dovuti alla presenza di alberi ad alto fusto o edifici, che possano ostacolare l'irraggiamento diretto durante tutto l'arco della giornata.

La **potenza nominale del generatore fotovoltaico**, data dalla somma delle potenze nominali dei singoli moduli fotovoltaici, è pari a **51.720,24 kWp**, e sulla base di tale potenza è stato dimensionato tutto il sistema.

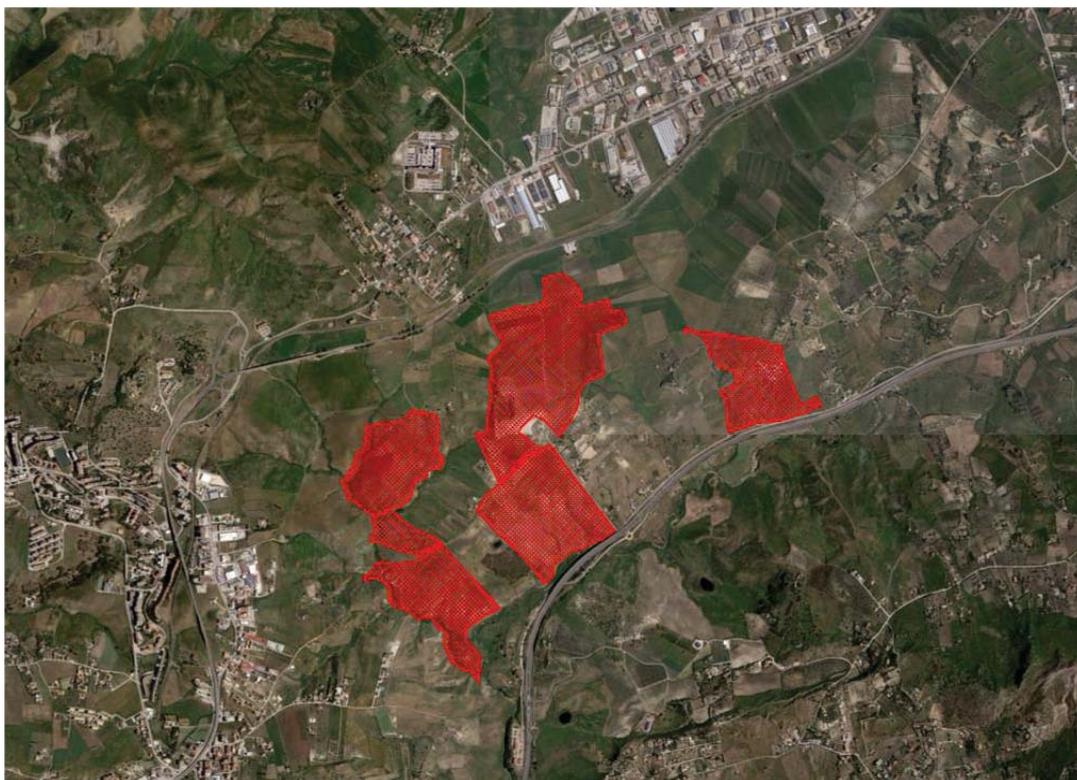


Figura 1 - Inquadramento area di progetto

3. PROGETTO DELLE OPERE DI REGIMAZIONE IDRAULICA

3.1. DATI GENERALI IMPIANTO

La durabilità dell'area di impianto e dell'impianto stesso dal punto di vista strutturale è garantita da un efficace sistema idraulico di allontanamento e drenaggio delle acque meteoriche.

Gli interventi da realizzarsi nell'area in esame sono stati sviluppati secondo due differenti linee di obiettivi:

- i. mantenimento delle condizioni di “equilibrio idrogeologico” preesistenti (*ante* realizzazione del parco fotovoltaico San Benedetto);
- ii. regimazione e controllo delle acque che defluiscono lungo la viabilità (aree tra le stringhe per operazioni di manutenzione) del parco fotovoltaico, attraverso la realizzazione di una adeguata rete drenante, volta a proteggere le opere civili presenti nell'area.

Il tracciato delle opere di regimazione è stato definito a partire dal rilievo 3D *GPS* dell'area e dalla progettazione del layout dell'impianto fotovoltaico, individuando le vie preferenziali di deflusso, gli impluvi (ed i solchi di erosione) interferenti con le opere in progetto nonché le caratteristiche plano-altimetriche delle aree di impianto.

Le acque defluenti dall'area di impianto verranno raccolte ed allontanate dalle opere idrauliche in progetto, descritte nel paragrafo successivo, che consistono principalmente in fossi di guardia ed altre opere accessorie di natura idraulica.

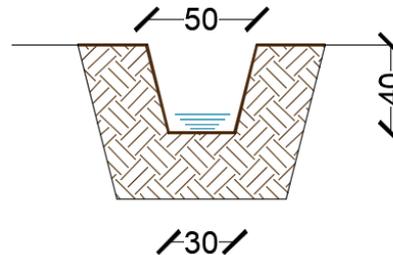
3.2. OPERE IDRAULICHE

Le opere idrauliche applicabili in progetto sono le seguenti; per i particolari costruttivi ed ulteriori dettagli si rinvia agli elaborati grafici.

Fosso di guardia in terra “Tipo 1” avente le seguenti caratteristiche geometriche:

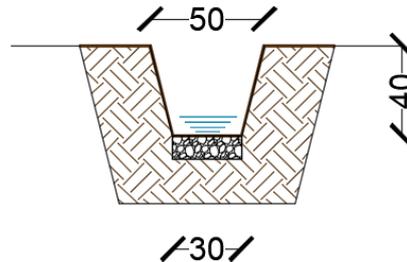
| <i>Sezione trapezia</i> | |
|-----------------------------|------|
| Larghezza base [m] | 0,30 |
| Larghezza in superficie [m] | 0,50 |
| Altezza [m] | 0,40 |

Fosso di guardia "Tipo 1"
Scala 1:50



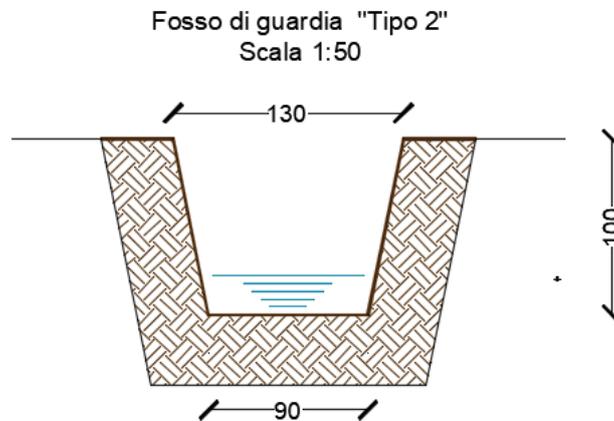
In alcuni tratti – con pendenze superiori al 10% - tali fossi di guardia possono presentare il **fondo rivestito con pietrame** di media pezzatura ($d=5-10$ cm), per uno spessore di 15 cm, al fine di ridurre l'azione erosiva della corrente idrica.

Fosso di guardia "Tipo 1"
Fondo in pietrame - Scala 1:50



Fosso di guardia in terra "Tipo 2" avente le seguenti caratteristiche geometriche:

| <i>Sezione trapezia</i> | |
|-----------------------------|------|
| Larghezza base [m] | 0,90 |
| Larghezza in superficie [m] | 1.30 |
| Altezza [m] | 1.00 |



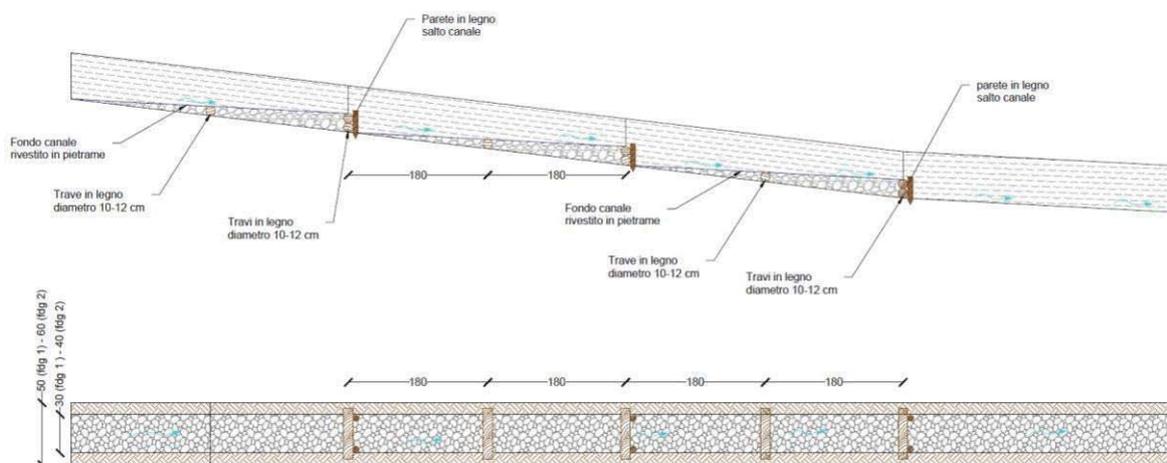
Anche il fosso di guardia “tipo 2”, nei tratti con pendenze superiori al 10%, presenta il **fondo rivestito con pietrame** di media pezzatura ($d=5-10$ cm), per uno spessore di 15 cm.



Ciascuna delle 2 tipologie di fossi di guardia elencate in precedenza, potrà essere realizzata per brevi tratti in contropendenza: in questi casi, verranno realizzati fossi di guardia ad altezza variabile (l'altezza sarà crescente a partire da un valore inferiore ad H_{fdg} - fino al termine del tratto in contropendenza).

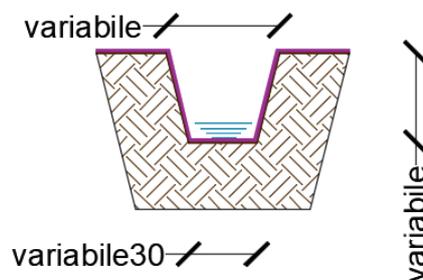
Inoltre, in alcuni tratti – denominati “di scarico” (con pendenze naturali superiori al 20%) - i fossi di guardia (tipo 1 e tipo 2) potranno essere:

- “integrati” con **briglie filtranti in legname**; le briglie, poste in opera con una data interdistanza, sono realizzate con paletti in castagno infissi nel terreno, aventi un diametro di 10-12 cm ed una lunghezza variabile tra 0,5 e 0,8 m.



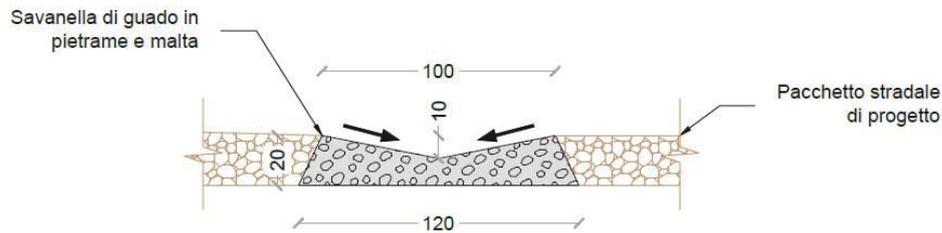
- rivestiti mediante geotessuto antierosione per incrementare considerevolmente la durabilità.

"Sezione Tipo" Fossi di guardia in terra rivestiti con Geocomposito antierosione Scala 1:50



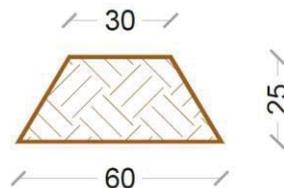
Opere di dissipazione: tali opere sono poste al termine degli scarichi, in modo tale da ridurre l'energia della corrente idrica reimpressa negli impluvi naturali e limitare quindi l'erosione dei versanti. Sono previste opere di dissipazione con pietrame di grandi dimensioni ($D > 40$ cm), con differente geometria in funzione delle caratteristiche della corrente in uscita e del corpo idrico ricettore.

Savanelle di guado in pietrame e malta per un attraversamento "a raso" della viabilità di progetto.



Arginelli in terra aventi le seguenti caratteristiche geometriche:

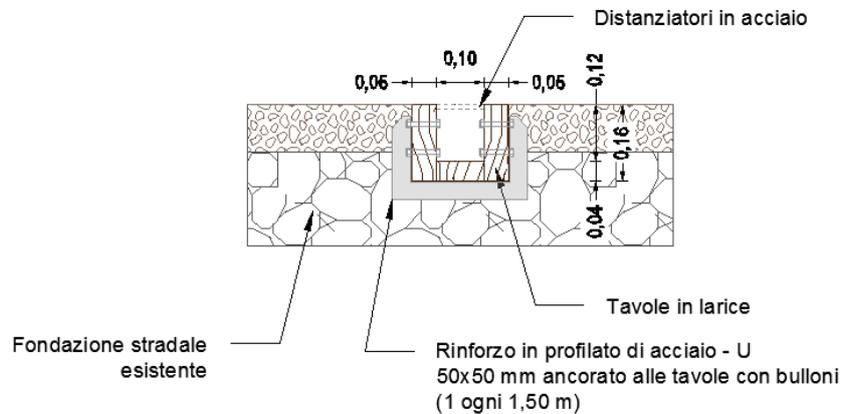
| | |
|------------------------------------|-------------|
| Larghezza base [m] | 0,60 |
| Larghezza in superficie [m] | 0,30 |
| Altezza [m] | 0,25 |



Canalette in legname per tagli trasversali alla viabilità, aventi le seguenti caratteristiche geometriche:

| Sezione rettangolare | |
|-----------------------------|------|
| Larghezza base [m] | 0,10 |
| Spessore [m] | 0,05 |
| Altezza [m] | 0,12 |

Tali opere trasversali a cielo aperto – utilizzate, in linea di principio, per pendenze superiori al 10% - assolvono essenzialmente la funzione di limitare la lunghezza del percorso dell'acqua sul piano stradale convogliandola presso i fossi di guardia in progetto.



Esse, interrompendo lo scorrimento dell'acqua, ne riducono il potere erosivo, limitando la formazione di solchi e l'approfondimento delle tracce lasciate dalle ruote dei veicoli.

La distanza tra le canalette è sicuramente l'elemento di maggior interesse progettuale.

In generale, essa deve garantire lo smaltimento del deflusso superficiale prodotto sulla sede stradale e di quello sottosuperficiale intercettato, limitare l'erosione del fondo stesso ed evitare la formazioni di solchi, ma al contempo garantire una qualità di transito ragionevole. La pendenza trasversale delle canalette deve infatti garantire lo smaltimento del deflusso prodotto dal tratto di strada sotteso ed evitare la deposizione almeno del materiale più fine. A tale scopo la pendenza non dovrà essere inferiore al 3-4%.

4. INFORMAZIONE IDROLOGICA

La pioggia è all'origine del processo di formazione delle portate di piena nei bacini idrografici relativi all'area in esame. I fenomeni meteorologici che generano le precipitazioni sono talmente complessi da non potere essere trattati come un processo deterministico a partire da condizioni iniziali e al contorno note. Pertanto, sotto il profilo pratico, lo studio delle piogge si limita ad utilizzare metodologie statistiche basate sulle osservazioni pluviometriche.

Nel caso in esame, la risposta idrologica dei bacini è condizionata da brevi tempi di corrivazione e, pertanto, le precipitazioni rilevanti sono quelle d'intensità elevata e breve durata.

La maggior parte dei metodi che l'idrologia propone per ricostruire eventi di piena sono metodi indiretti, ossia metodi che stimano l'idrogramma di piena utilizzando un modello di trasformazione piogge-portate che prevede, come input, la definizione di un particolare evento di pioggia.

Nel caso in esame, infatti, non sono disponibili dati di registrazione delle portate; né, tantomeno, potrebbero essere utilizzati, dal momento che l'obiettivo dell'analisi non è studiare il comportamento idrologico/idraulico dei corsi d'acqua presenti nel territorio, ma approfondire le tematiche idrologiche per il dimensionamento di tutte le opere idrauliche del parco fotovoltaico "Mandranuova".

In particolare, volendo stimare eventi di piena di dato tempo di ritorno, bisogna prima ricostruire l'evento di pioggia di pari tempo di ritorno (assumendo come vera l'ipotesi che un evento di pioggia di tempo di ritorno T genera un evento di piena con la stessa probabilità di non superamento).

4.1. MODELLO TCEV SICILIA

Il modello TCEV (*Two Component Extreme Value Distribution*) permette di determinare le altezze di pioggia h e le relative intensità i , seguendo una tecnica di regionalizzazione dei dati pluviometrici messa a punto dal progetto VAPI¹.

La regionalizzazione delle piogge mira a superare i limiti relativi alla scarsa informazione pluviometrica (spesso costituita da singole serie di durata limitata e poco attendibili per le

¹ Il Progetto VAPI (VALutazione PIene) sulla Valutazione delle Piene in Italia, portato avanti dalla Linea 1 del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, ha come obiettivo quello di predisporre una procedura uniforme sull'intero territorio nazionale per la valutazione delle portate di piena naturali e delle piogge intense secondo criteri omogenei.

elaborazioni statistiche), utilizzando in modo coerente tutta l'informazione pluviometrica disponibile sul territorio, per individuare la distribuzione regionale delle caratteristiche delle precipitazioni.

La peculiarità del modello TCEV è quella di tradurre in termini statistici la differente provenienza degli estremi idrologici, riconducendosi formalmente al prodotto di due funzioni di probabilità del tipo Gumbel. La prima, denominata *componente base*, assume valori non elevati ma frequenti, mentre la seconda (*componente straordinaria*) genera eventi più rari ma mediamente più rilevanti (appartenenti ad una differente fenomenologia meteorologica). La TCEV rappresenta pertanto la distribuzione del massimo valore di una combinazione di due popolazioni ed ha, quindi, la caratteristica di prestarsi all'interpretazione di variabili fortemente asimmetriche, con presenza di alcuni valori molto elevati, di cui difficilmente le distribuzioni usuali (Gumbel, Log-Normale, etc.) riescono a rendere conto.

Per il calcolo delle curve di probabilità pluviometrica si farà pertanto riferimento alla procedura descritta nel progetto VAPI Sicilia (*Ferro e Cannarozzo*, 1993) utilizzando la modellazione introdotta da Conti et al., 2007.

La procedura gerarchica di regionalizzazione si articola su tre livelli successivi in ognuno dei quali è possibile ritenere costanti alcuni statistici.

Nel *primo livello di regionalizzazione* si ipotizza che il coefficiente di asimmetria teorico G_t delle serie dei massimi annuali delle piogge di assegnata durata t sia costante per la regione Sicilia. La Sicilia si può pertanto ritenere una zona pluviometrica omogenea ed i valori dei parametri $\Theta^* = 2.24$ e $\Lambda^* = 0.71$ sono costanti ed indipendenti dalla durata t .

Il *secondo livello di regionalizzazione* riguarda l'individuazione di sottozone omogenee, interne a quella individuata al primo livello, nelle quali risulti costante, oltre al coefficiente di asimmetria, anche il coefficiente di variazione della legge teorica. Al secondo livello di regionalizzazione la Sicilia è suddivisa in cinque sottozone pluviometriche omogenee: Z_0 – Z_5 , Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 (fig. 4.1). A ciascuna di esse è stato attribuito un valore costante del parametro λ_1 (parametro della TCEV che rappresenta il numero medio di eventi della componente base) indicato con il simbolo Λ_1 (tabella 4.1), che risulta indipendente dalla durata. Le sottozone Z_0 e Z_5 , possono anche essere “unite” e considerate come una sottozona unica, visti i valori pressoché identici del parametro Λ_1 .

In ogni sottozona la variabile adimensionale $h'_{t,T} = h_t/\mu$ (valore dell'altezza di pioggia di fissata durata t e tempo di ritorno T rapportata alla media μ della legge TCEV) assume la seguente espressione:

$$h'_{t,T} = K_T = a \cdot \ln(T) + b$$

In tale relazione i coefficienti a e b sono stati tarati in funzione della particolare sottozona (tabella 4.1).

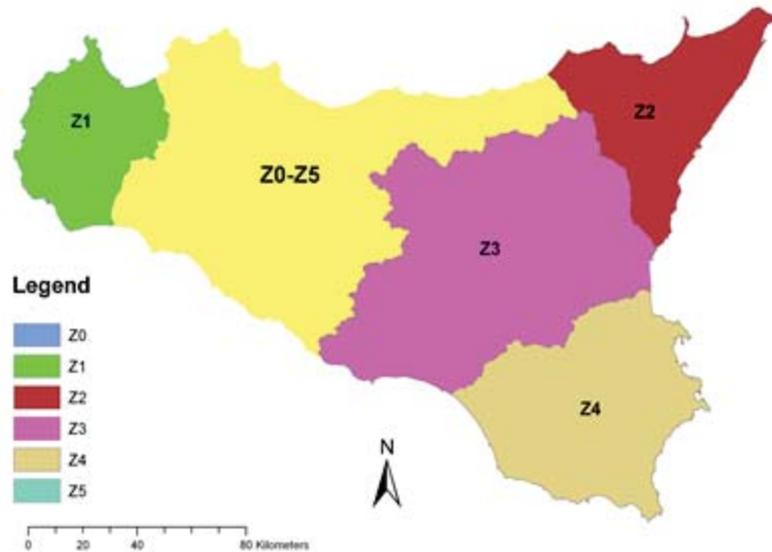


Figura 4.1: Sottozone pluviometriche omogenee per la regione Sicilia (Lo Conti et al, 2007).

K_T è definito *fattore di crescita* e misura la variabilità relativa degli eventi estremi alle diverse frequenze. Esso è dunque indipendente dalla durata della precipitazione e funzione della collocazione geografica del sito per il quale si vogliono calcolare le altezze di pioggia (a mezzo dei coefficienti a e b) e del tempo di ritorno T dell'evento meteorico.

| Sottozona Parametro | Z_0 | Z_1 | Z_2 | Z_3 | Z_4 | Z_5 |
|------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Λ_1 | 24,429 | 19,58 | 17,669 | 14,517 | 15,397 | 24,402 |

Tabella 4.1: Valore del parametro Λ_1 per ogni sottozona in cui è stata suddivisa la regione Sicilia (Lo Conti et al, 2007).

| Sottozona Parametro | Z_0-Z_5 | Z_1 | Z_2 | Z_3 | Z_4 |
|------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| a | 0.4485 | 0.4695 | 0.4799 | 0.5011 | 0.4946 |
| b | 0.5117 | 0.4889 | 0.4776 | 0.4545 | 0.4616 |

Tabella 4.2: Valori, per la regione Sicilia, dei coefficienti a e b per la definizione del fattore di crescita (Lo Conti et al., 2007).

Il terzo livello di regionalizzazione prevede, infine, la ricerca di relazioni regionali tra il parametro centrale della distribuzione di probabilità μ e le grandezze - prevalentemente geografiche (altitudine, distanza dal mare, superficie del bacino idrografico) - relative al sito di misura. Pertanto, l'espressione della curva di probabilità pluviometrica sarà:

$$h_{t,T} = K_T \cdot \mu(t)$$

in cui $h_{t,T}$ è l'altezza di pioggia di assegnata durata t e fissato tempo di ritorno T .

Per le stazioni pluviografiche siciliane la media teorica μ risulta coincidente con quella campionaria; per ciascuna delle 172 stazioni siciliane che vantano almeno 10 anni di funzionamento è stato riconosciuto il seguente legame di tipo potenza tra la media campionaria e la durata t :

$$\mu(t) = a \cdot t^n$$

Per ogni stazione pluviografica i valori dei coefficienti a ed n sono tabellati. Per i siti sprovvisti di stazioni di misura i coefficienti a ed n possono essere stimati sulla base della carta delle iso- a e delle iso- n (Cannarozzo et al, 1995). Nelle figg. (4.2) e (4.3) è possibile vedere la variazione dei coefficienti a ed n per la regione Sicilia (Lo Conti et al, 2007).

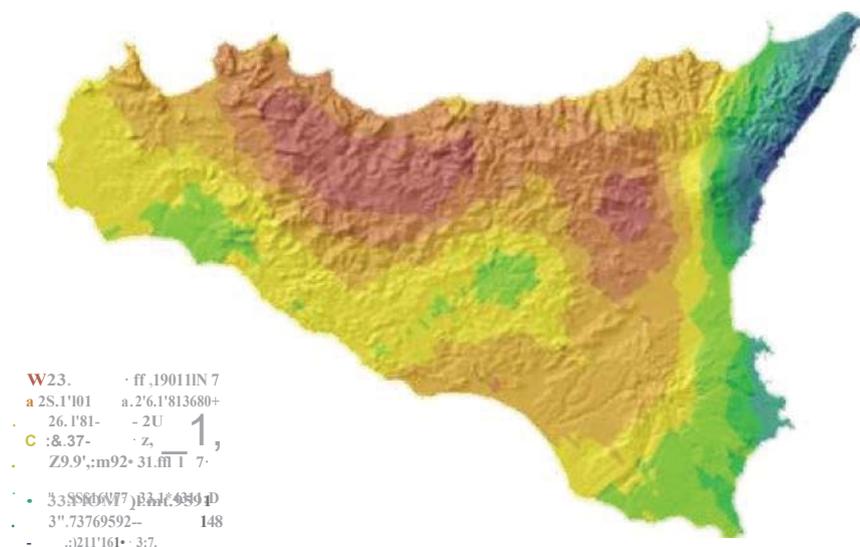


Figura 4.2: Valori dei coefficienti a per il territorio siciliano (Lo Conti et al, 2007)

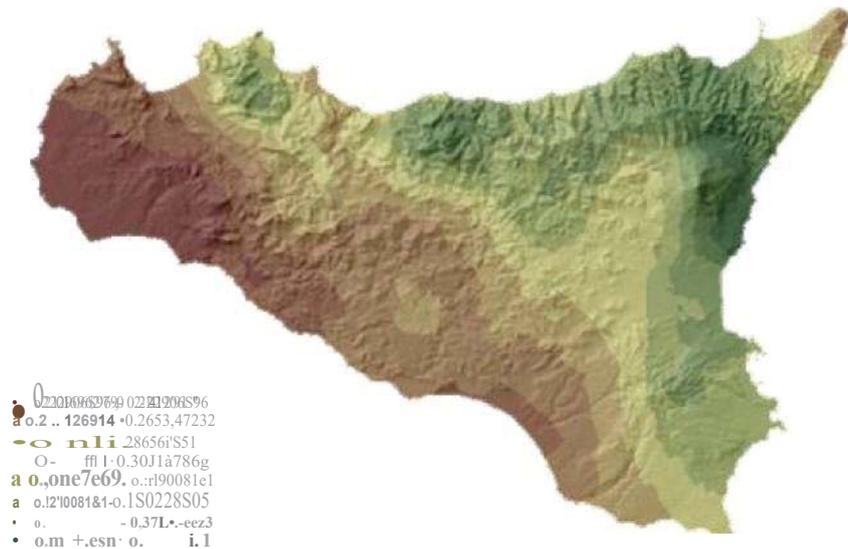


Figura 4.3: Valori dei coefficienti n per il territorio siciliano (Lo Conti et al, 2007).

Sono quindi stati calcolati, per il tempo di ritorno di interesse $T = 25$ anni i valori delle altezze di pioggia massima di assegnata durata. $ht.T$ e la legge di probabilità pluviometrica.

Calcolo della c.p.p.

I bacini oggetto del presente studio *si* trovano nella sottozona pluviometrica omogenea Z1 il fattore di crescita. È calcolato attraverso la seguente espressione, utilizzando gli appropriati valori dei coefficienti a e b (in base ai valori della tabella 4.2):

$$KT = 0.4695 \cdot \ln(I) + 0.4889$$

Fissato il tempo di ritorno della sollecitazione meteorica di progetto - pari a 25 anni - e individuata la stazione pluviometrica più vicina al sito in esame, è quindi possibile calcolare le altezze di pioggia di data frequenza di accadimento e di fissata durata.

La stazione pluviometrica di riferimento è la seguente:

o Partanna

Anni di funzionamento: 41

Sensori presenti: Pluviometro

Altitudine: 190 m.s.l.m.

Per essa, come per le restanti stazioni pluviometriche siciliane, i valori di a ed n risultano tabellati. Per tale stazione sono individuati i seguenti valori: $a = 27.41$ ed $n = 0.258$.

E' quindi possibile individuare la curva di probabilità pluviometrica per il sito m esame, corrispondente ad un tempo di ritorno T=25 anni.

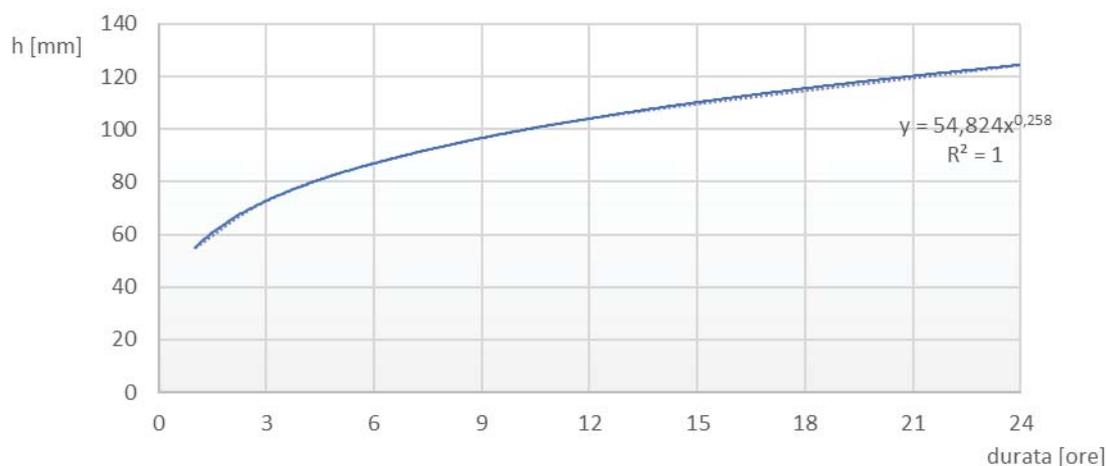
| t [ore] | $h_{d,T}$ |
|-----------|-----------|
| 1 | 54,82 |
| 3 | 72,79 |
| 6 | 87,04 |
| 12 | 104,09 |
| 24 | 124,47 |

L'espressione analitica della legge di probabilità pluviometrica è la seguente:

T = 25 anni

$$h(t) = 54.824 * t^{0.258}$$

Curva di probabilità pluviometrica (ADF)



Piogge brevi

È necessario inoltre osservare che poiché gli eventi di pioggia brevi e quelli lunghi seguono differenti dinamiche meteorologiche, dai campioni di altezze h_t aventi durate $1 \div 2 \text{ ore} \leq t \leq 24$ non può essere tratta alcuna informazione inerente agli eventi brevi.

La curva di probabilità pluviometrica, costruita con riferimento alle piogge aventi durata compresa tra 1 e 24 ore, non può essere pertanto estrapolata per valori della durata t inferiore ad un'ora. È stato però dimostrato che il rapporto tra l'altezza di pioggia $h_{t,T}$ con t minore di 60 minuti, e l'altezza di pioggia $h_{60,T}$ di durata pari a 60 minuti e pari tempo di ritorno T è

relativamente poco dipendente dalla località e dipendente solo dalla durata t espressa in minuti.

Il legame funzionale, per la regione Sicilia, può essere pertanto espresso nella forma seguente, utilizzando la formula di Ferreri-Ferro, in cui il coefficiente s è stato opportunamente calibrato

da Ferro e Bagarello (*“Rainfall depth-duration relationship for South Italy”, 1996*).

$$\frac{h_{t,T}}{h_{60,T}} = \left(\frac{t}{60}\right)^{0.386}$$

Superfici di influenza

La principale caratteristica delle misure di precipitazione è di essere *puntuali*, cioè di riferirsi al punto in cui è posizionato lo strumento. La quantità di precipitazione che affluisce in un fissato intervallo di tempo in una data *area* deve essere valutata, in linea di principio, a partire dalle misure puntuali effettuate dalle stazioni di misura ricadenti nell'area o in essa limitrofe.

Tuttavia, data la vicinanza della stazione considerata ai bacini scolanti e le ridotte dimensioni di tali bacini, non si individuano le superfici di influenza nell'ipotesi che le caratteristiche di precipitazione all'interno del bacino siano legate esclusivamente a quelle della stazione pluviometrica *“Partanna”*.

Inoltre, date le ridotte dimensioni dei bacini ($S < 10 \text{ km}^2$), non verrà effettuato il ragguglio spaziale delle precipitazioni (ARF=1).

5. MODELLO AFFLUSSI DEFLUSSI

Le portate di progetto sono state calcolate attraverso *metodi indiretti*, che consentono la determinazione delle portate di piena a partire dalle precipitazioni che si abbattano sui diversi bacini. Nello specifico, si è valutata la portata di piena con la *formula razionale*.

La *formula razionale* consente la valutazione della portata di piena di assegnato tempo di ritorno T mediante la seguente relazione:

$$Q_T = \frac{\varphi \cdot i_T \cdot S}{3,6}$$

ove:

- Q_T è la portata di piena di assegnato tempo di ritorno T ed è espressa in m^3/s ;
- φ è il coefficiente di afflusso, adimensionale;
- i_T è l'intensità critica della precipitazione di assegnato tempo di ritorno (corrispondente al tempo di corrivazione) in mm/h;
- S è la superficie del bacino espressa in km^2 ;
- 3,6 è un fattore di conversione delle unità di misura.

La modellazione matematica dei fenomeni idrologico-idraulici, innescati dalle precipitazioni sull'area di progetto, segue il processo descritto nei paragrafi seguenti.

Individuazione della pioggia critica

Dopo avere ricostruito le relazioni intensità-durata-frequenza (IDF, espresse dalla c.p.p.) è necessario individuare la *l'intensità critica* della precipitazione, cioè l'intensità costante di quella pioggia, supposta anche uniformemente distribuita sul bacino, che determina la portata massima nell'idrogramma di piena di tempo di ritorno T.

La pioggia critica è quella di intensità pari al tempo di corrivazione o di concentrazione t_c , definito come segue:

- il tempo di corrivazione di un bacino è quello necessario alla goccia di pioggia che cade nel punto idraulicamente più lontano per raggiungere la sezione di chiusura del bacino;
- il tempo di corrivazione è quel tempo che, una volta eguagliato dalla durata della precipitazione (precipitazione *critica*, ovvero che mette in crisi la rete idrografica), determina il raggiungimento del valore più elevato di portata nella sezione di chiusura del

bacino.

Esso può essere calcolato tramite diverse formule; nel caso in esame, e cioè per piccoli bacini

(aventi estensione inferiore a 10 km²), il tempo di corrivazione è calcolato attraverso la formula di Kirpich:

$$t_c = 0.01947 \frac{L^{0.77}}{i^{0.385}}$$

dove t_c è espresso in minuti, L (lunghezza dell'asta principale, a partire dallo spartiacque) è espressa in metri ed i è la pendenza media del percorso (m/m).

Il coefficiente di afflusso

L'infiltrazione costituisce il fenomeno di maggiore rilevanza per la determinazione del bilancio tra pioggia sul bacino e pioggia efficace ai fini del deflusso nei bacini scolanti. Nell'applicare un modello afflussi-deflussi risulta pertanto necessario quantificare le perdite per infiltrazione allo scopo di potere valutare la pioggia netta, ovvero quella che dà effettivamente luogo al deflusso.

Nel presente studio, all'interno della formula razionale, è stato utilizzato il *metodo del coefficiente di afflusso* Φ . Tale coefficiente rappresenta il rapporto tra il volume totale di deflusso e il volume totale di pioggia caduto sull'area sottesa ad una data sezione, e il suo uso comporta considerare le perdite proporzionali all'intensità media di pioggia.

La stima del valore di φ , relativamente a ciascuna superficie omogena (tipo di suolo, tessitura, caratteristiche locali di permeabilità) è stata condotta facendo riferimento ai valori tabellati da Benini (*Sistemazioni idraulico-forestali*, 1990) in fig.5.1. Nello specifico, si sono utilizzati i seguenti valori del coefficiente di afflusso φ :

- $\varphi=0.35$ per l'intera area drenante appartenente allo strato superficiale TS definito nella relazione geologica allegata al progetto;
- $\varphi=0.25$;

Ai fini del calcolo della portata di progetto, il coefficiente di afflusso è stato calcolato secondo la formula seguente:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot A_i}{A_{tot}}$$

ove φ_i è il coefficiente di afflusso dell'area elementare A_i ed A_{tot} è la superficie complessiva

del bacino. In questa maniera, il valore del coefficiente di afflusso per i bacini analizzati è dato dalla media pesata dei coefficienti di ciascuna area elementare in cui il bacino è divisibile.

| Copertura del bacino | Tipo di suolo | | | |
|----------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------|------------------|
| | Pendenza dei versanti | Terreni Leggeri | Terreni di medio impasto | Terreni compatti |
| Boschi | > 10% | 0.13 | 0.18 | 0.25 |
| | < 10% | 0.16 | 0.21 | 0.36 |
| Pascoli | > 10% | 0.16 | 0.36 | 0.56 |
| | < 10% | 0.22 | 0.42 | 0.62 |
| Colture agrarie | > 10% | 0.40 | 0.60 | 0.70 |
| | < 10% | 0.52 | 0.72 | 0.82 |

Figura 5.1: Valori del coefficiente ϕ del metodo razionale per diversi tipi di superficie, in funzione della tipologia di suolo e della copertura del bacino (Benini, 1990 e Ferro, 2006).

Il calcolo delle portate

Per ciascun bacino (sono stati analizzati i due bacini più estesi per un predimensionamento dei fdg tipo 1 e tipo 2), i valori delle portate Q per il tempo di ritorno di interesse ($T=25$ anni), insieme agli altri parametri posti alla base del calcolo, sono riassunti nelle tabelle sottostanti. Nello specifico, le grandezze caratteristiche poste a base dei calcoli, insieme alle rispettive U.M. sono:

- ID Bacino delle varie aree dell'impianto PV Mandranuova;
- Superficie del bacino drenante S (sia in m^2 che in km^2);
- Lunghezza dell'asta principale L (in m);
- Quota massima dell'asta principale, H_{max} (m);
- Quota minima dell'asta principale, H_{min} (m);
- Dislivello geodetico tra gli estremi dell'asta, Δh (m);
- Pendenza media del percorso i (%);
- Durata dell'evento pluviometrico critico, pari al tempo di corrivazione t_c (in minuti);
- Coefficiente di afflusso ϕ ;
- Valore dell'intensità critica i_T (mm/h);
- Portata al colmo della piena, Q , (in m^3/s);

Le tabelle che seguono sono pertanto relative al calcolo della portata di progetto (relativa a ciascun bacino) causata da un evento pluviometrico critico di fissato tempo di ritorno T .

Si ribadisce che i DUE bacini presi in analisi in tale fase di predimensionamento sono quelli che determinano la progettazione più gravosa dei fossi di guardia TIPO 1 e TIPO 2.

| ID Bacino | Superficie S | | Lunghezza asta principale L (m) | H max [m] | H min [m] | Δh [m] | Pendenza media del percorso i [%] | Tempo di corrvivazione tc | | Coefficiente di afflusso φ [-] | Intensità critica (h<1 ora) [mm/h] | Portata critica Q _T [m ³ /s] |
|-----------|-------------------|--------------------|---------------------------------|-----------|-----------|--------|-----------------------------------|---------------------------|-------|--------------------------------|------------------------------------|--|
| | [m ²] | [km ²] | | | | | | Formula [min] | | | | |
| B01 | 95849 | 0,095849 | 327,00 | 115,00 | 95,00 | 20,00 | 6,12% | Kirpich | 4,93 | 0,30 | 254,33 | 2,031 |
| B08 | 134000 | 0,134 | 448,00 | 189,00 | 145,00 | 44,00 | 9,82% | Kirpich | 5,23 | 0,30 | 245,12 | 2,737 |
| B15 | 143544 | 0,143544 | 468,00 | 168,00 | 127,00 | 41,00 | 8,76% | Kirpich | 5,66 | 0,30 | 233,71 | 2,796 |
| B16 | 582000 | 0,582 | 1650,00 | 250,00 | 210,00 | 40,00 | 2,42% | Kirpich | 24,48 | 0,25 | 95,07 | 3,843 |

6. VERIFICA DELLE PORTATE DI PROGETTO

Il dimensionamento delle opere idrauliche è stato condotto in due differenti fasi:

- una prima fase di pre-dimensionamento nella quale è stata assegnata, a ciascuna tipologia di opera idraulica una sezione “tipo”, in funzione dell’orografia, della pendenza, delle necessità tecniche e della estensione delle superfici scolanti sottese alla sezione di scarico;
- una seconda fase di verifica della capacità idraulica dei canali, prevedendo un franco minimo di 5 cm per ragioni di sicurezza.

La verifica della capacità idraulica delle opere è stata effettuata in condizioni di moto uniforme, utilizzando la formula di Chezy:

$$Q = \chi \cdot A \sqrt{R \cdot i}$$

dove:

- Q è la portata che defluisce nel fosso di guardia (m^3/s);
- χ è il coefficiente di scabrezza;
- A è l’area della sezione bagnata (in m^2);
- R è il raggio idraulico (in m), dato dal rapporto tra la sezione idrica ed perimetro bagnato P ;
- i è la pendenza del canale.

Per il valore del coefficiente χ , si è scelto di usare la formula di Gauckler-Strickler:

$$\chi = k_s \cdot R^{\frac{1}{6}}$$

in cui k_s è l’indice di scabrezza di *Gauckler-Strickler*, (in $\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$); in questo caso l’espressione della scala delle portate di moto uniforme si semplifica, risultando particolarmente adeguata ai problemi di progetto:

$$Q = k_s \cdot A \cdot i^{\frac{1}{2}} \cdot R^{\frac{2}{3}}$$

La scelta della formula per il calcolo del coefficiente χ ha un’importanza marginale rispetto alla

possibilità di scegliere un valore adeguato dell'indice di scabrezza che vi figura; i valori sono stati desunti da Chow W.T. (*Applied hydrology*, 1988).

Per i fossi di guardia in terra è stato scelto un indice di scabrezza k_s pari a $37 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (corrispondente a canali in terra poco inerbiti). Di seguito, per ciascun bacino, si riporta una tabella di riepilogo con i seguenti elementi:

- Tipologia del fosso di guardia adottato;
- Bacino scolante;
- Tirante idrico h (m), sezione idrica A (m^2), contorno bagnato P (m), raggio idraulico R (m) con riferimento alla portata di progetto;
- Pendenza i dell'opera idraulica (%)
- Portata di progetto per ciascuna opera $Q_{max,T}$ in m^3/s ;
- Velocità con cui defluisce la portata di progetto (m/s);
- Grado di riempimento del fosso di guardia, dato dal rapporto tra il tirante idrico di progetto e l'altezza della sezione;
- Franco (espresso in m) dato dalla differenza tra l'altezza della sezione ed il tirante corrispondente alla portata di progetto.

La scelta delle tipologie di opere, sia in termini di geometria che di materiali, non è legata ad un mero dimensionamento di tipo idraulico. Sono state tenute in considerazione infatti, anche se non direttamente esplicitate nei calcoli, caratteristiche come (i) l'interrimento fisiologico delle opere idrauliche (benché mantenute con regolarità), (ii) il carattere delle precipitazioni in accordo al *climate changing* (precipitazioni di notevole intensità e breve durata con tempi di ritorno elevati) e (iii) le dimensioni “minime” legate alle effettive funzioni alle quali le opere devono assolvere (indipendentemente, quindi, dal tirante idrico di moto uniforme derivante dal calcolo).

Pertanto, le tipologie di opere idrauliche individuate in fase di pre-dimensionamento sono risultate aderenti alle necessità di controllo e di smaltimento delle acque meteoriche verso gli impluvi naturali del sito in esame.

Le verifiche sono risultate positive, rispettando gli opportuni franchi di sicurezza.

| Caratteristiche del canale | | B01 | B08 | B15 | B16 |
|--|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Tipologia sezione | | F3 | F2 | F2 | F2 |
| Bacino scolante | | B01 | B08 | B15 | B16 |
| Pendenza del canale, <i>i</i> | [%] | 1,20% | 7,10% | 2,00% | 4,00% |
| Portata di progetto, Q_p | [m ³ /s] | 2,031 | 2,737 | 2,796 | 3,843 |
| Verifica/Progetto | | | | | |
| Tirante idrico h | [m] | 0,92 | 0,64 | 0,96 | 0,93 |
| Area A | [m ²] | 0,99 | 0,66 | 1,05 | 1,01 |
| Perimetro bagnato P | [m] | 2,77 | 2,21 | 2,85 | 2,80 |
| Raggio idraulico R | [m] | 0,36 | 0,30 | 0,37 | 0,36 |
| Portata in condizioni di moto uniforme Q_{max} | [m ³ /s] | 2,030 | 2,900 | 2,800 | 3,800 |
| Parametri di verifica | | | | | |
| Velocità | [m/s] | 2,05 | 4,40 | 2,68 | 3,75 |
| Grado di riempimento h/H | [-] | 0,92 | 0,64 | 0,96 | 0,93 |
| Franco f | [m] | 0,08 | 0,36 | 0,04 | 0,07 |