

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



S.O. PROGETTAZIONE INTEGRATA NORD

PROGETTO DI FATTIBILITA'

ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALBATE CAMERLATA – LECCO

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idrologica

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA / DISCIPLINA PROGR. REV.

L C 0 0 0 1 R 2 6 R H I D 0 0 0 1 0 0 1 A

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato Data |
|----------------------------------|---------------------|------------|-------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|--------------------------|
| A | EMISSIONE ESECUTIVA | E. Pacitti | Giugno 2023 | S. Saccà <i>S. Saccà</i> | Giugno 2023 | M. Berlingieri <i>MB</i> | Giugno 2023 | A. Perego Giugno 2023 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| File: LC0001R26RHID0001001A.docx | | | | | | | | n. Elab. |



| | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

1 di 19

SOMMARIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Premessa | 5 |
| 2 | Riferimenti normativi | 7 |
| 3 | Inquadramento fisico ed idrografico | 9 |
| 3.1 | Idrografia..... | 11 |
| 3.1.1 | Descrizione del bacino del fiume Adda..... | 11 |
| 3.1.2 | Descrizione del bacino del fiume Lambro, Seveso, Olona | 12 |
| 4 | Caratterizzazione dei bacini oggetto di studio..... | 14 |
| 5 | Analisi pluviometrica | 17 |
| 5.1 | Analisi statistica regionale delle piogge – PAI | 17 |
| 5.1.1 | La relazione intensità–durata delle precipitazioni – AdB Po | 18 |
| 5.2 | Analisi statistica regionale delle piogge - ARPA..... | 23 |
| 5.2.1 | L’atlante delle piogge intense della Lombardia | 23 |
| 5.2.2 | Il modello probabilistico di GEV (o distribuzione generalizzata del valore estremo) | 26 |
| 5.3 | Confronto studi idrologici..... | 33 |
| 5.4 | La relazione intensità – durata delle precipitazioni - piogge brevi | 36 |
| 5.5 | Sintesi dei risultati..... | 41 |
| 6 | Stima delle portate di piena | 43 |
| 6.1 | Tempo di corrivazione | 44 |
| 6.2 | Coefficiente di deflusso | 46 |
| 6.3 | Metodo del CN - SCS | 46 |
| 6.4 | Portate di progetto..... | 51 |

INDICE TABELLE

| | |
|--|----|
| <i>Tabella 1 – Caratteristiche fisiografiche bacini interferenze idrauliche oggetto di risoluzione.....</i> | 16 |
| <i>Tabella 2- Parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per Tr 20, 100, 200 e 500 anni</i> | 21 |
| <i>Tabella 3- Parametri k, α, ε, a_1 e n nelle celle interessate dal progetto per eventi con durata superiore all'ora</i> | 32 |
| <i>Tabella 4- Coefficiente di crescita nelle celle interessate dal progetto al variare del Tr.....</i> | 32 |
| <i>Tabella 5 - Altezza di pioggia oraria nelle celle interessate dal progetto al variare del Tr.....</i> | 32 |
| <i>Tabella 6- Parametri CPP di progetto per piogge extraorarie</i> | 36 |
| <i>Tabella 7 – Rapporto tra altezza di pioggia sub-oraria – U.S. Water Bureau</i> | 37 |
| <i>Tabella 8 – Rapporto tra altezza di pioggia sub-oraria – curva inviluppo massime piogge mondiali</i> | 38 |
| <i>Tabella 9 – Rapporto tra altezza di pioggia sub-oraria – Roma Macao.....</i> | 38 |
| <i>Tabella 10 – Rapporto tra altezza di pioggia sub-oraria – Milano Monviso</i> | 39 |
| <i>Tabella 11 – Rapporto tra altezza di pioggia di durata inferiore ad un'ora – equazione di Bell.....</i> | 39 |
| <i>Tabella 12- Parametri CPP per piogge sub-orarie $t < 1h$</i> | 40 |
| <i>Tabella 13- Parametri CPP di progetto per piogge extraorarie</i> | 41 |
| <i>Tabella 14- Parametri CPP di progetto per piogge sub-orarie $t < 1h$.....</i> | 42 |
| <i>Tabella 15: Tempi di corrivazione.....</i> | 45 |
| <i>Tabella 16: Metodo SCS-CN; valori del "Curve Number" CN per i diversi tipi di suolo in funzione dell'uso del suolo per condizioni di umidità iniziale (antecedent moisture conditions – AMC) medie (classe II).....</i> | 49 |
| <i>Tabella 17: definizione della classe di umidità in base al parametro API_s.....</i> | 49 |
| <i>Tabella 18: Metodo SCS-CN; valori del "Curve Number" CN per i diversi bacini per condizioni di umidità iniziale (antecedent moisture conditions – AMC) medie (classe II).....</i> | 51 |
| <i>Tabella 19: Metodo SCS-CN; valori del "Curve Number" CN (classe II) dei bacini</i> | 51 |
| <i>Tabella 20: Portate di progetto dei bacini in disamina.....</i> | 52 |

INDICE FIGURE

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1 - Inquadramento territoriale</i> | 5 |
| <i>Figura 2 – Schema funzionale della linea</i> | 6 |
| <i>Figura 3 – Localizzazione intervento</i> | 9 |
| <i>Figura 4 – Principali sottobacini idrografici del fiume Po.....</i> | 10 |
| <i>Figura 5 – Suddivisione territoriale in distretti</i> | 10 |
| <i>Figura 6 - Bacino del Fiume Adda – Ambito Fisiografico.....</i> | 12 |
| <i>Figura 7 - Bacino del Fiume Lambro – Ambito Fisiografico</i> | 13 |
| <i>Figura 8 – Bacino idrografico km 16+385</i> | 14 |
| <i>Figura 9 – Bacino idrografico km 20+646</i> | 15 |
| <i>Figura 10 - Estratto Allegato 3 – Studio PAI – Individuazione celle di riferimento su OSM</i> | 20 |
| <i>Figura 11 - Estratto Allegato 3 – Studio PAI – Individuazione celle di riferimento su ortofoto</i> | 20 |
| <i>Figura 12 - CPP per piogge extraorarie $t > 1h$ - Norme di attuazione del PAI</i> | 22 |
| <i>Figura 13 - Le 105 stazioni pluviografiche considerate nello studio, per durate comprese tra 1e 24 ore.</i> | 25 |
| <i>Figura 14 - Mappa del parametro di forma k, per durate comprese tra 1 a 24 ore</i> | 28 |
| <i>Figura 15 - Mappa del parametro di scala α, per durate comprese tra 1 a 24 ore</i> | 28 |
| <i>Figura 16 - Mappa del parametro di scala α, per durate comprese tra 1 a 24 ore</i> | 29 |
| <i>Figura 17 - Mappa del coefficiente pluviometrico orario a_1, per durate comprese tra 1 a 24 ore</i> | 30 |
| <i>Figura 18 - Mappa dell'esponente di scala ε, per durate comprese tra 1 a 24 ore</i> | 30 |
| <i>Figura 19 – Studio ARPA – Individuazione celle di riferimento su OSM.....</i> | 31 |
| <i>Figura 20 – Studio ARPA – Individuazione celle di riferimento su ortofoto.....</i> | 31 |
| <i>Figura 21 - Curve di Possibilità Pluviometrica per piogge extraorarie $t > 1h$ – ARPA.....</i> | 33 |
| <i>Figura 22 - km 16+385 - Confronto CPP per piogge extraorarie $t > 1h$ Dati ARPA e dati AdBPo</i> | 34 |
| <i>Figura 23 - km 20+646 - Confronto CPP per piogge extraorarie $t > 1h$ Dati ARPA e Norme di attuazione del AdBPo</i> | 34 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 24 - km 15+431 - Confronto CPP per piogge extraorarie $t > 1h$ Dati ARPA e Norme di attuazione del AdBPo.....</i> | 35 |
| <i>Figura 25 – km 18+612 - Confronto CPP per piogge extraorarie $t > 1h$ Dati ARPA e Norme di attuazione del AdBPo.....</i> | 35 |
| <i>Figura 26 - Relazione altezza-frequenza per 2, 25, 100 anni</i> | 37 |
| <i>Figura 27 – Curve di possibilità pluviometrica per piogge sub-orarie $t < 1h$.....</i> | 40 |
| <i>Figura 28 - curve di conversione dei valori di CN per le diverse condizioni di umidità del suolo antecedenti l'evento</i> | 50 |

1 PREMESSA

Il progetto dell'elettificazione della Linea Albate – Molteno – Lecco si configura come un progetto di investimenti di RFI per migliorare le prestazioni della linea esistente in termini di miglioramento della regolarità della circolazione ferroviaria e di potenziamento tecnologico, che consentirà la circolazione dei treni con locomotori elettrici alimentati a 3kV cc, nonché in termini di sostenibilità ambientale per l'eliminazione appunto della circolazione di locomotori diesel attualmente in servizio sulla linea.

La linea esistente è a binario unico, senza elettificazione, ed è percorsa da Treni Regionali Trenord sulle relazioni Como-Molteno e Como-Lecco, dai Treni suburbani S7 tra Molteno e Lecco.

L'esercizio della linea è con Dirigente Locale e la circolazione regolata con Blocco Conta Assi.

Il tratto tra Como San Giovanni e Albate Camerlata (5 km) risulta già elettificato a 3 kV c.c. ed è a doppio binario, l'intervento di elettificazione riguarda, dunque, il tratto tra Albate C. e Lecco, di estesa pari a 37 km a semplice binario.

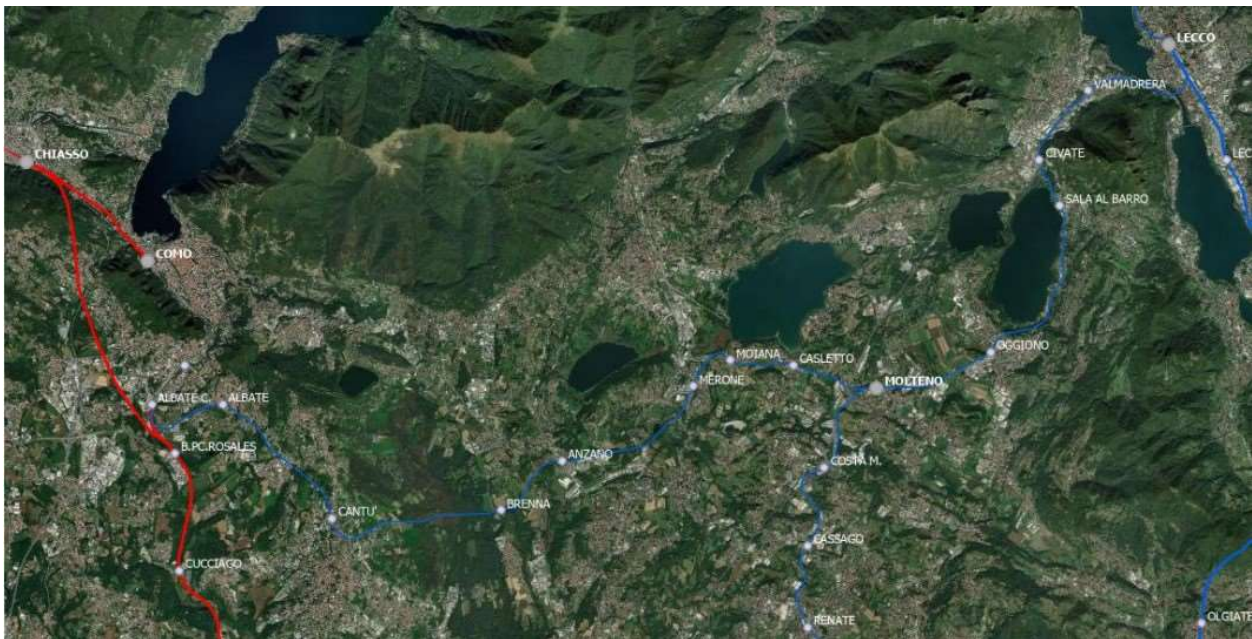


Figura 1 - Inquadramento territoriale

L'intervento è inserito nell'elenco degli interventi di cui all'Appendice 9 "Elenco opere inserite nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza - PNRR" del Contratto di Programma 2017 – 2021 parte Investimenti Aggiornamento 2020/2021. Lo sviluppo del progetto è orientato ad implementare ogni soluzione tecnica e ottimizzazione del Programma Lavori per tragaruardare l'attivazione al 2026.

Il Piano di Committenza prevede che il progetto sia caratterizzato da una prima fase comprendente l'elettificazione della linea da Albate Camerlata a Molteno – Lotto 1. Questa Fase 1 di progetto tragherà l'attivazione al 2026 (PNNR) e sarà lo stato inerziale per il progetto della Fase 2, che vedrà l'elettificazione della tratta da Molteno a Lecco – Lotto 2.

Di seguito si riporta lo schema funzionale della linea con indicate le località di servizio: Cantù, Merone, Molteno, Oggiono, Valmadrera e Lecco.

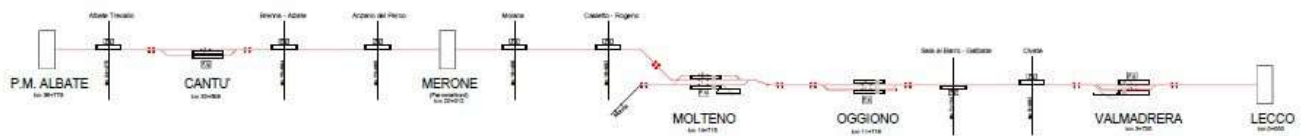


Figura 2 – Schema funzionale della linea

La sagoma di riferimento per l'elettificazione è PMO2, con inserimento dell'attrezzaggio della TE sia con la catenaria flessibile che con la catenaria rigida. Con il PMO2 l'altezza minima del Piano di Contatto sarà di 4.80m.


Oggetto del presente intervento è il **Lotto 1**, l'elettificazione della **tratta Albate Camerlata – Molteno**.

| | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

Il progetto è stato redatto nel rispetto delle seguenti norme:

- R.D. 25/07/1904, N. 523 "Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie".
- D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 e ss.mm.ii. Norme in materia ambientale.
- Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE.
- Direttiva Alluvioni 2007/60/CE.
- Norme Tecniche per le Costruzioni (2018).
- Dlgs 16 marzo 2009, n. 30. Protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento.
- Dm Ambiente 16 giugno 2008, n. 131. Criteri tecnici per la caratterizzazione dei corpi idrici.
- Dm Ambiente 12 giugno 2003, n. 185. Regolamento recante norme tecniche per il riutilizzo delle acque reflue.
- Dlgs 27 gennaio 1992, n. 132. Protezione delle acque sotterranee.
- "Manuale di Progettazione delle Opere Civili" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI) aggiornato.
- PAI - 7. Norme di Attuazione - Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica - Allegato 3 Distribuzione spaziale delle precipitazioni intense. Parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni.
- PdG Po – Piano di Gestione del fiume Po approvato il 3/03/2016 (DPCM 27 ottobre 2016).
- Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto Idrografico Padano (P.G.R.A. 03/03/2016).
- Norme tecniche di attuazione del Programma di Tutela e Uso delle Acque (PTUA) della Regione Lombardia del 2016.
- L.R. 15 marzo 2016, n. 4; “Revisione della normativa regionale in materia di difesa del suolo, di prevenzione e mitigazione del rischio idrogeologico e di gestione dei corsi d’acqua”.
- Regolamento regionale 24 marzo 2006, n.2 - Disciplina dell'uso delle acque superficiali e sotterranee, dell'utilizzo delle acque a uso domestico, del risparmio idrico e del riutilizzo dell'acqua in attuazione dell'articolo 52, comma 1, lettera c) della legge regionale 12 dicembre 2003, n. 26.
- Regolamento regionale 24 marzo 2006, n.3 - Disciplina e regime autorizzatorio degli scarichi di acque reflue domestiche e di reti fognarie, in attuazione dell'articolo 52, comma 1, lettera a) della legge regionale 12 dicembre 2003, n. 26 e relative "Norme tecniche regionali in materia di trattamento degli scarichi di acque reflue in attuazione dell'articolo 3, comma 1 del Regolamento reg. 2006, n.3".

| | | | | | | | |
|---|--|----------|-------|-------------|-----------|------|---------|
|  | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | 8 di 19 |
| | LC00 | 01 | R26 | RHID0001001 | A | | |

- Regolamento regionale 24 marzo 2006, n.4 “Disciplina dello smaltimento delle acque di prima pioggia e di lavaggio delle aree esterne, in attuazione dell'articolo 52, comma 1, lettera a) della legge regionale 12 dicembre 2003, n. 26.
- DGR 6738 del 19 giugno 2017. “Disposizioni regionali concernenti l’attuazione del piano di gestione rischi alluvioni (PGRA) nel settore urbanistico e di pianificazione dell’emergenza, ai sensi dell’art. 58 delle norme di attuazione del piano stralcio per l’assetto idrogeologico (PAI) del bacino del Fiume Po così come integrate dalla variante adottata in data 7/12/2016 con deliberazione n. 5 dal comitato istituzionale dell’autorità di bacino del Fiume Po”.
- Regolamento Regionale 23 novembre 2017, n. 7. “Regolamento recante criteri e metodi per il rispetto del principio dell’invarianza idraulica ed idrologica ai sensi dell’articolo 58 bis della legge regionale 11 marzo 2005, n. 12 (Legge per il governo del territorio)”.

3 INQUADRAMENTO FISICO ED IDROGRAFICO

Il tracciato si sviluppa prevalentemente in direzione Est - Ovest, da Lecco fino a Como.

Le opere in progetto sono realizzate in adiacenza al tracciato ferroviario storico oggetto appunto dell'intervento principale quale la ricalibratura del profilo altimetrico.

Si riporta di seguito una foto aerea con indicazione dell'area oggetto di intervento (Google Earth).

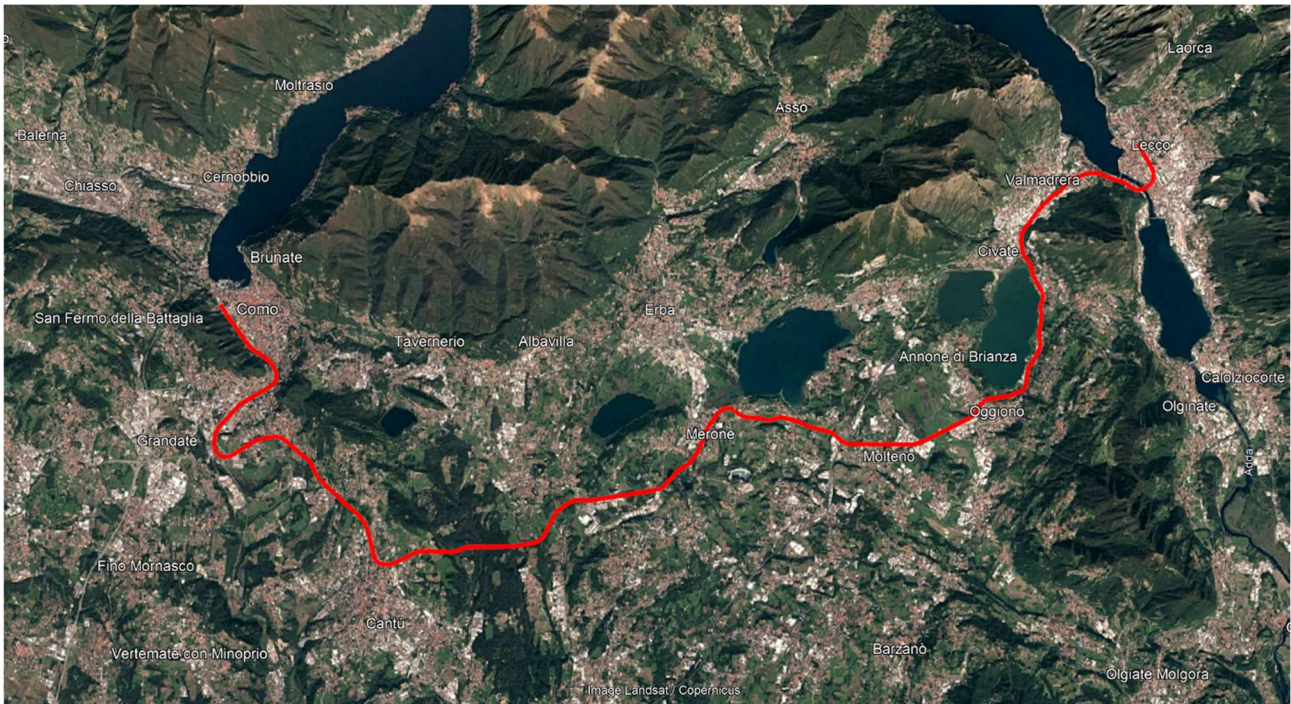


Figura 3 – Localizzazione intervento

Le opere in progetto ricadono all'interno dei bacini idrografici dell'Adda, del Lambro e del Seveso appartenenti al gruppo dei sottobacini lombardi del bacino idrografico del fiume Po, pertanto le competenze in materia di pianificazione idraulica sono demandate all'Autorità di Bacino del fiume Po, PGRA e PAI in vigore.

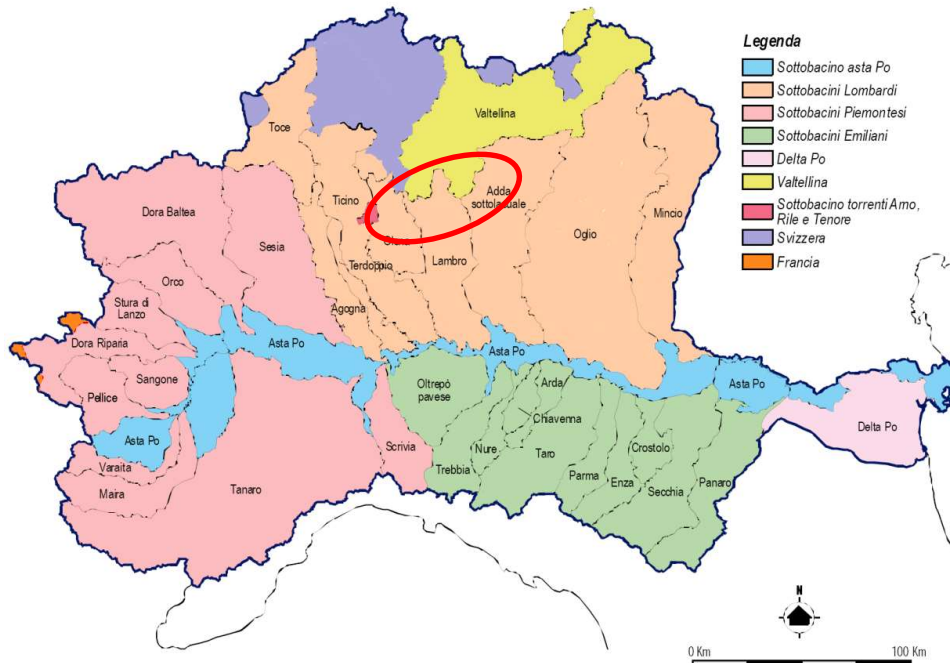


Figura 4 – Principali sottobacini idrografici del fiume Po

Il 22 dicembre 2000 è stata adottata la Direttiva 2000/60/CE per la tutela delle acque, recepita in Italia attraverso il d.lgs. n.152 del 3 aprile 2006. L'articolo n. 64 prevede la ripartizione del territorio nazionale in 8 distretti idrografici e non più in Bacini Idrografici. Ciascun distretto deve dotarsi di piano di gestione, la cui competenza spetta alla corrispondente Autorità di distretto idrografico.



Figura 5 – Suddivisione territoriale in distretti

| | | | | | | |
|---|--|----------|-------|-------------|-----------|------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. |
| | LC00 | 01 | R26 | RHID0001001 | A | |

L'intervento, secondo la nuova Direttiva 2000/60/CE, ricade nel Distretto idrografico Padano le cui competenze in materia di pianificazione idraulica sono demandate all'Autorità di Bacino distrettuale del fiume Po con il PGRA in vigore.

L'analisi idraulica deve considerare gli strumenti di pianificazione territoriale in vigore, in particolare i piani di settore di riferimento della zona in esame. Gli strumenti legislativi da analizzare sono:

- Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI);
- Piano di Gestione Rischio Alluvione (PGRA).

3.1 Idrografia

Il tracciato in progetto si sviluppa all'interno dei bacini idrografici dell'Adda sublacuale, del Lambro, Seveso e Olona.

3.1.1 Descrizione del bacino del fiume Adda

Il fiume Adda si trova in Lombardia, nasce dalle Alpi Retiche presso il passo dell'Alpisella, nel Parco Nazionale dello Stelvio, percorre tutta la Valtellina e si getta nel lago di Como presso Colico; esce dal lago dal ramo di Lecco e scorre fino a raggiungere la pianura all'altezza di Trezzo sull'Adda da dove inizia un andamento lento e sinuoso con larghe anse ricevendo da sinistra i fiumi Brembo e Serio finché sfocia nel Po presso Castelnuovo Bocca d'Adda a circa 10 km ad Ovest di Cremona.

Per il 94% circa il bacino è in territorio italiano e per il rimanente 6% in territorio svizzero.

Nel tratto sopralacuale scorre in direzione prevalente Est-Ovest in ambito montano fino al lago di Como dal quale esce regolato dalla diga di Olginate; prosegue scorrendo incassato fra alte sponde di terreni morenici e alluvionali con direzione Nord-Sud fino alla zona pianeggiante ove procede serpeggiando in ampi meandri e minor pendenza, fino a gettarsi nel Po del quale è uno dei principali affluenti in sinistra idrografica. L'intero corso d'acqua in oggetto è caratterizzato da un bacino idrografico avente un'estensione di circa 7775 Km² ed appartiene al II ordine della classificazione di Horton; la quota d'origine del fiume è a 2102m s.l.m., l'altezza massima del bacino è pari a 3787m s.l.m. mentre la minima è di 40m s.l.m. L'asta dell'Adda, a valle della confluenza del Brembo, è suddivisibile in tre tronchi omogenei per caratteristiche geometriche, morfologiche e idrauliche. Il tronco di monte ha un alveo meandriforme, con curvature poco accentuate e presenza di formazioni alluvionali alimentate dall'apporto del Brembo, costituite in massima parte da ciottoli e ghiaia grossolana. La sezione dell'alveo inciso ha larghezza media di circa 200 m e altezza media di circa 6 m. Gli accumuli di materiale d'alveo comportano condizioni di deflusso irregolari, con conseguenti possibili fenomeni di instabilità morfologica. Il tronco intermedio ha un alveo meandriforme, con curvatura più accentuata a monte e meno accentuata fino alla

confluenza con il Serio, in cui permangono fenomeni di instabilità morfologica. La geometria dell'alveo è contraddistinta da una larghezza media di 80-100 m e da un'altezza di sponda media di 5,5 m. La pendenza, relativamente modesta rispetto ai tratti a monte, favorisce il deposito di materiale a granulometria medio-fine (nel campo delle ghiaie e delle sabbie). Le formazioni alluvionali presenti sono alimentate ancora dall'apporto del Brembo e dalle erosioni di sponda riscontrabili in numerosi tratti. Il tronco finale, prossimo alla confluenza con il Po, ha un andamento a meandriforme con curvatura accentuata su cui sono inserite opere spondali e presenta fenomeni di instabilità evidenziati dalle locali tendenze all'erosione di sponda. Le caratteristiche geometriche dell'alveo sono contraddistinte da una larghezza media pari a 100-120 m, con tendenza a presentare valori più ridotti all'uscita delle curve, e da una altezza media di sponda di 6-7 m. Il materiale d'alveo è di tipo ghiaioso, con presenza di lenti di sabbia molto consistenti. L'Adda sottolacuale, oltre a ricevere il Brembo e il Serio, è alimentato da un bacino di pianura di incerta definizione, in relazione alla fitta rete di canali e corsi d'acqua minori fittamente sviluppati che determinano interscambi con i bacini limitrofi.

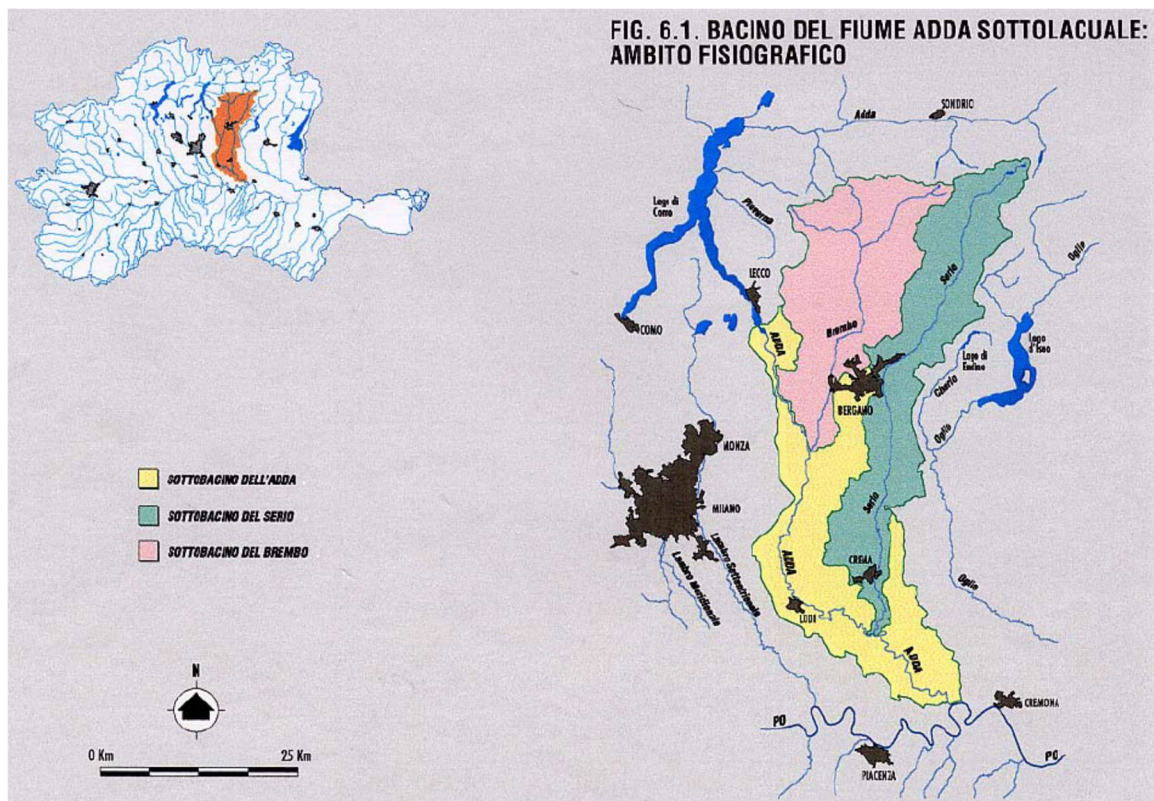


Figura 6 - Bacino del Fiume Adda – Ambito Fisiografico

3.1.2 Descrizione del bacino del fiume Lambro, Seveso, Olona

Dal punto di vista generale il bacino del Lambro ha una superficie complessiva di circa 1.980 km² (3% della superficie complessiva del bacino del Po) di cui solo il 5% in ambito montano. Il bacino è

caratterizzato da un reticolo idrografico complesso e articolato. I numerosi corsi d'acqua naturali che gravitano a nord di Milano scorrono con direzione nord-sud e risultano interconnessi tramite una fitta rete di canali artificiali, realizzati sia a fini irrigui sia per la protezione dalle piene dei centri abitati.

Il principale corso d'acqua è il Lambro settentrionale, che scorre a est di Milano. Le portate provenienti dal bacino di monte sono laminate dai laghi di Alserio e Pusiano che, a causa della loro non trascurabile superficie (circa 8 km²) rispetto a quella del bacino sotteso, esercitano una forte azione moderatrice sui fenomeni di piena. Le piene del Lambro a Lambrugo sono pertanto originate dai deflussi provenienti dal bacino della Bevera, pari a 43,2 km².

Proseguendo verso valle, si riconoscono tre tratti caratterizzati dalla prevalenza di rilevanti apporti idrici rispetto ai fenomeni di trasporto. Nel primo tratto, compreso tra Peregallo e Sesto S. Giovanni, gli apporti provengono essenzialmente dai centri abitati di Monza e Sesto S. Giovanni.

Nel secondo tratto, compreso tra S. Donato Milanese e Melegnano, confluiscono in Lambro gli apporti del settore orientale di Milano e i contributi di due corsi d'acqua minori che provengono dall'interno di Milano, il cavo Redefossi e la roggia Vettabbia. A Melegnano confluisce in sinistra anche il canale Muzza.

Il terzo tratto, a valle di S. Angelo Lodigiano, in cui il Lambro meridionale (nome preso dall'Olonza dopo l'attraversamento di Milano) confluisce nel Lambro settentrionale. Procedendo verso ovest si incontrano nell'ordine il Seveso, il Lura, il Bozzente. Per ultimo si incontra il torrente Olona.

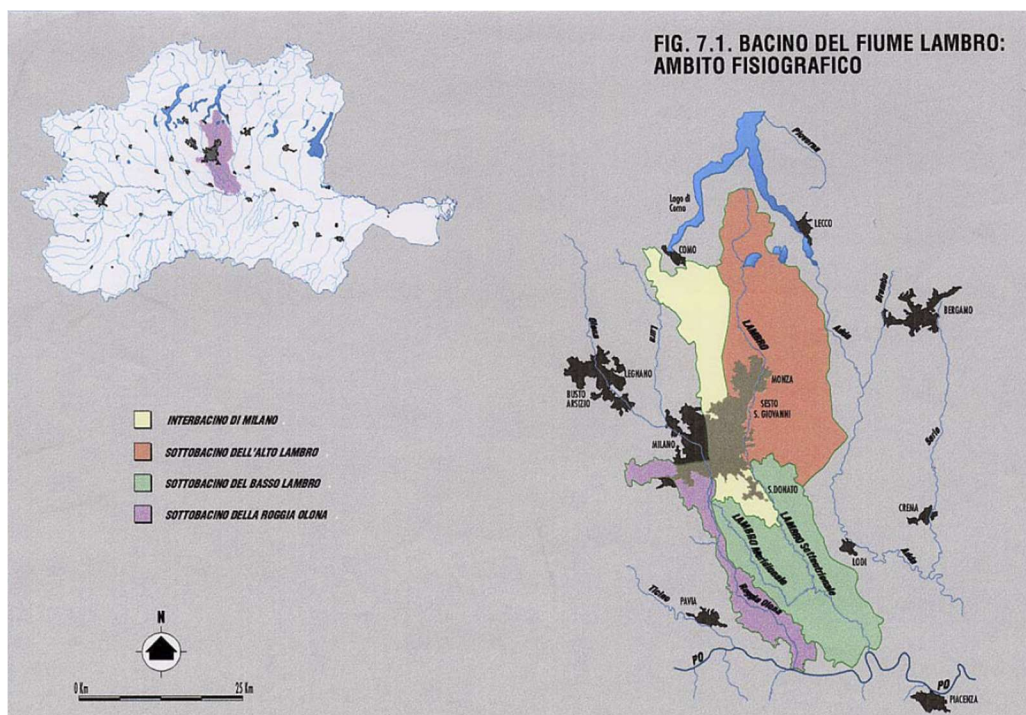


Figura 7 - Bacino del Fiume Lambro – Ambito Fisiografico

I principali canali artificiali sono rappresentati dal canale irriguo Villoresi e dai navigli della Martesana, Grande e di Pavia, tutt'oggi utilizzati come vie di trasporto.

Il primo attraversa trasversalmente tutto il bacino e adduce le acque del Ticino, prelevate all'altezza di Somma Lombardo, in Adda all'altezza di Fara Gera d'Adda. Preleva le acque dell'Adda poco più a monte, presso Canonica, il canale della Martesana che scorre verso Milano parallelo al Villoresi. A Crescenzago viene sottopassato dal Lambro e prosegue all'interno dell'urbanizzato dove, analogamente agli altri corsi d'acqua provenienti da monte (Seveso, Olona, Garbogera, Merlata, Pudiga) attraversa intubato il territorio cittadino.

4 CARATTERIZZAZIONE DEI BACINI OGGETTO DI STUDIO

Il progetto di elettrificazione dell'infrastruttura oggetto di studio che interessa la linea ferroviaria COMO – LECCO, nello specifico nella tratta ALBATE CAMERLATA – LECCO, presenta numerose interferenze idrauliche che non richiedono interventi di adeguamento poiché le opere di attraversamento esistenti non sono soggette a modifica. Tuttavia, alla pk 16+385 nel comune di Rogeno (LC) e alla pk 20+646 nel comune di Monguzzo (CO) si rende necessario adeguare le opere idrauliche presenti.

In corrispondenza dei cavalcavia al km 15+481 e al km 18+612 l'adeguamento della livelletta di progetto ha comportato l'inserimento di un sistema di drenaggio ad infiltrazione in adiacenza alla piattaforma ferroviaria lungo la linea ferroviaria. Si riportano di seguito gli stralci planimetrici per ogni bacino interferente.

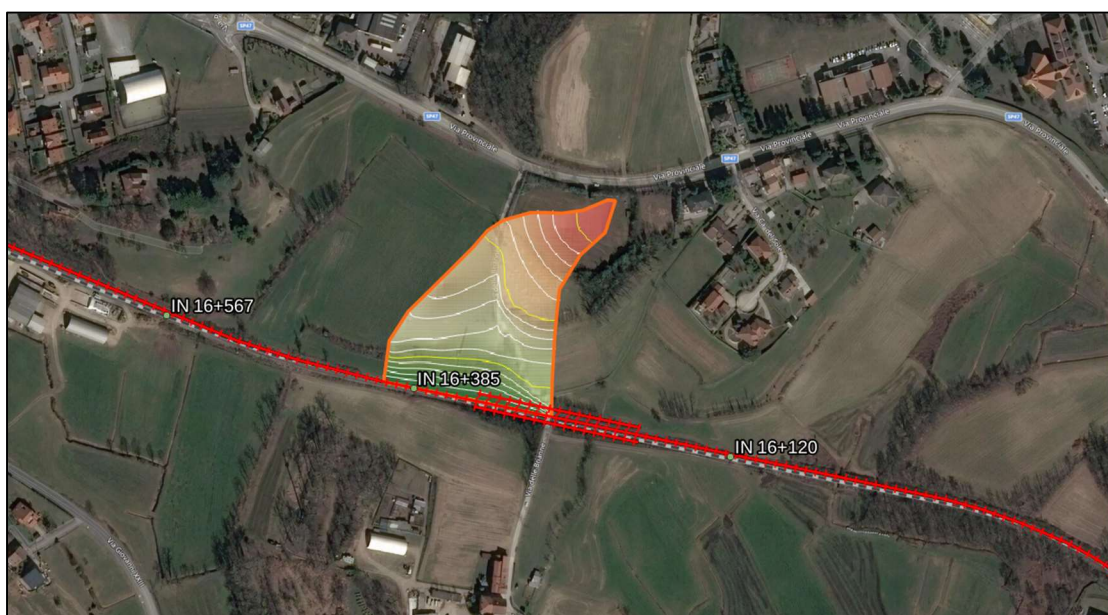


Figura 8 – Bacino idrografico km 16+385

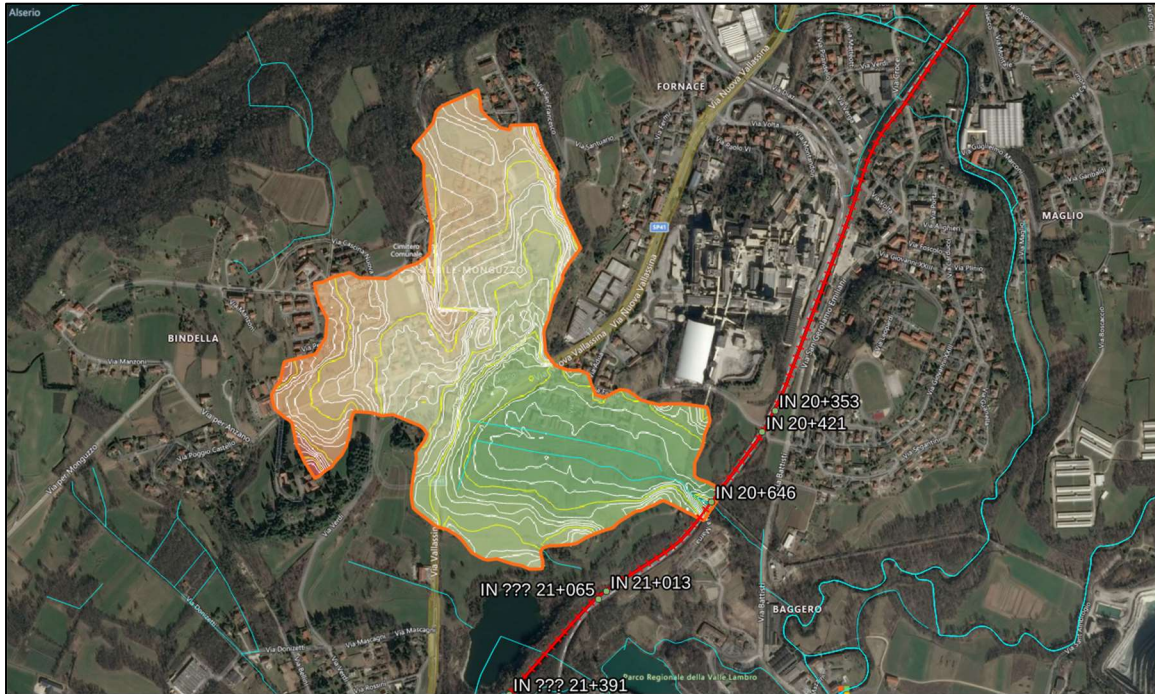


Figura 9 – Bacino idrografico km 20+646

Per la determinazione e la caratterizzazione dei bacini idrografici bacini sottesi dall'infrastruttura di progetto sono stati utilizzati i seguenti dati:

- Modello digitale del terreno con risoluzione 5m x 5m tratto dal Geoportale della Regione Lombardia;
- Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000 tratte dal Geoportale della Regione Lombardia;

Attraverso l'uso di un software Gis Open Source (QGIS), in grado di processare dati territoriali ed eseguirne analisi di tipo spaziale, sono stati estratte le principali caratteristiche morfologiche, fisiche ed idrologiche utili o necessarie allo studio idrologico oggetto del presente studio.

In particolare, sono state determinate:

- A = area del bacino idrografico (Km^2);
- L = lunghezza dell'asta idrografica principale (Km);
- H_{max} = quota massima del bacino (m);
- H_{min} = quota sezione di chiusura del bacino (m);
- H_{med} = quota altezza media del bacino (m);
- P_a = pendenza media dell'asta idrografica principale;
- P_v = pendenza media dei versanti di bacino;

di seguito riportate in forma tabellare:

| Prog. | A | L | H _{max} | H _{min} | H _{med} | p _a | p _v |
|--------|--------------------|-------|------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|
| km | [km ²] | [km] | [m] | [m] | [m] | [-] | [-] |
| 16+385 | 0.018 | 0.245 | 572 | 540 | 556 | 0.131 | 0.190 |
| 20+646 | 0.674 | 1.490 | 366 | 284 | 318 | 0.055 | 0.110 |

Tabella 1 – Caratteristiche fisiografiche bacini interferenze idrauliche oggetto di risoluzione

| | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

17 di 19

5 ANALISI PLUVIOMETRICA

L'analisi idrologica è finalizzata alla definizione dei parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica di assegnata probabilità di accadimento (sintetizzata nel parametro tempo di ritorno), indispensabili per il dimensionamento dei diversi manufatti idraulici in particolare per la valutazione dei tiranti idrici.

Lo studio idrologico deve fornire l'inquadramento generale dell'area di studio sulla base dei dati idroclimatici ufficiali (Servizio Idrografico), delle caratteristiche morfologiche e di copertura del suolo e di eventuali altri studi disponibili.

In generale è preferibile utilizzare analisi già esistenti purché siano valide e stabiliscano in modo autorevole i valori delle LSPP dell'area in esame. In caso contrario:

- Per bacini privi di strumentazione, potrebbe essere utilizzata una qualsiasi delle analisi di frequenza sulle portate di piena già esistenti purché siano valide e stabiliscano in modo autorevole i valori delle portate di piena nel corso d'acqua in esame;
- In assenza di un'analisi regionale ufficiale o qualora la stessa non risulti applicabile a causa di consistenti regolazioni dei deflussi o altre caratteristiche peculiari del bacino in esame, dovrà essere selezionata la metodologia più appropriata per la stima dei dati di portata necessari. Allo scopo potranno essere impiegati i metodi sviluppati da vari Autori o enti o modelli afflussi-deflussi, quali quelli basati sull'idrogramma unitario istantaneo (IUH).

Nel progetto in essere esistono differenti analisi validate e autorevoli:

- l'Autorità di bacino del Fiume Po definisce i *Parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni* all'interno della "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica";
- ARPA Lombardia ha sviluppato due nuovi servizi relativi alle precipitazioni: la consultazione delle mappe di stima della pioggia integrata con rilievi a terra e radar per il periodo 1997-2011 e l'"Atlante delle piogge intense" nell'ambito del progetto INTERREG IV/A STRADA.

Si riportano di seguito lo sviluppo e il confronto tra le differenti analisi esistenti.

5.1 Analisi statistica regionale delle piogge – PAI

Il Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), all'art.10 delle Norme di attuazione, dispone:

| | | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 | REV. A |

“L’Autorità di bacino definisce, con propria direttiva:

- i valori delle portate di piena e delle precipitazioni intense da assumere come base di progetto e relativi metodi e procedure di valutazione per le diverse aree del bacino;

- i criteri e i metodi di calcolo dei profili di piena nei corsi d’acqua;

[...]”

La “Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica”, in attuazione dell’art. 10 delle Norme di attuazione del PAI dell’Autorità di bacino del Fiume Po, fornisce i valori delle precipitazioni intense nelle diverse aree del bacino e quelli delle portate di piena sui corsi d’acqua principali, interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali (nell’ambito del Piano Stralcio delle Fasce Fluviali - PSFF e del PAI) e, per gli stessi corsi d’acqua, il profilo della piena di progetto.

Ai fini di quanto richiesto dall’art. 10 delle Norme di attuazione del PAI, la direttiva è costituita dai seguenti punti:

- delimitazione dei sottobacini idrografici nella porzione collinare e montana del bacino del Po e degli ambiti idrografici di pianura;

- stima delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica puntuali nelle stazioni di misura delle precipitazioni;

- analisi della distribuzione spaziale delle precipitazioni intense;

- indicazioni per il calcolo delle portate di piena sui bacini idrografici di piccole dimensioni;

- stima delle portate di piena in sezioni significative dei corsi d’acqua interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali;

- definizione del profilo di piena di progetto per i corsi d’acqua interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali.

5.1.1 La relazione intensità–durata delle precipitazioni – AdB Po

La legge di dipendenza della media dei massimi di precipitazione con la durata può esprimersi, nel caso più semplice, come:

$$h = a \cdot t^n$$

in cui i parametri a e n dipendono dallo specifico tempo di ritorno considerato.

La stima delle curve di probabilità pluviometrica nelle stazioni di misura è stata effettuata dall’Autorità di Bacino sulla base delle serie storiche dei massimi annuali delle altezze di precipitazione per le durate considerate, definendo i parametri a ed n per i tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni. Nel procedere al calcolo dei parametri a ed n, sono state utilizzate le serie storiche delle precipitazioni intense riportate negli Annali Idrologici del Servizio Idrografico e Mareografico Italiano (Parte I, tabella III) relative ai massimi annuali delle precipitazioni della durata di 1, 3, 6, 12, 24 ore consecutive. L’intervallo di durata tra 1 e 24 ore rappresenta il campo entro cui sono da ricercare le durate critiche per la maggior parte dei corsi d'acqua per i quali la stima della portata di piena può essere effettuata tramite l’utilizzo delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica.

Al fine di fornire uno strumento per l’analisi di frequenza delle piogge intense nei punti privi di misure dirette è stata inoltre condotta dall’Autorità di bacino, all’interno della “Direttiva”, un’interpolazione spaziale con il metodo di Kriging dei parametri “a” ed “n” delle linee segnalatrici, discretizzate in base ad un reticolo di 2 km di lato.

I risultati sono rappresentati nell’Allegato 3; gli elaborati consentono il calcolo delle linee segnalatrici in ciascun punto del bacino, a meno dell’approssimazione derivante dalla risoluzione spaziale della griglia di discretizzazione, per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni. Si riportano di seguito il reticolo delle LSPP su ortofoto e OSM; in rosso si indica il tracciato ferroviario, in celeste i bacini interferiti e in arancione un tratto di ferrovia oggetto di consistente rimodulazione del sistema di drenaggio delle acque meteoriche.

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | 20 di 19 |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| LC00 | 01 | R26 | RHID0001001 | A | |

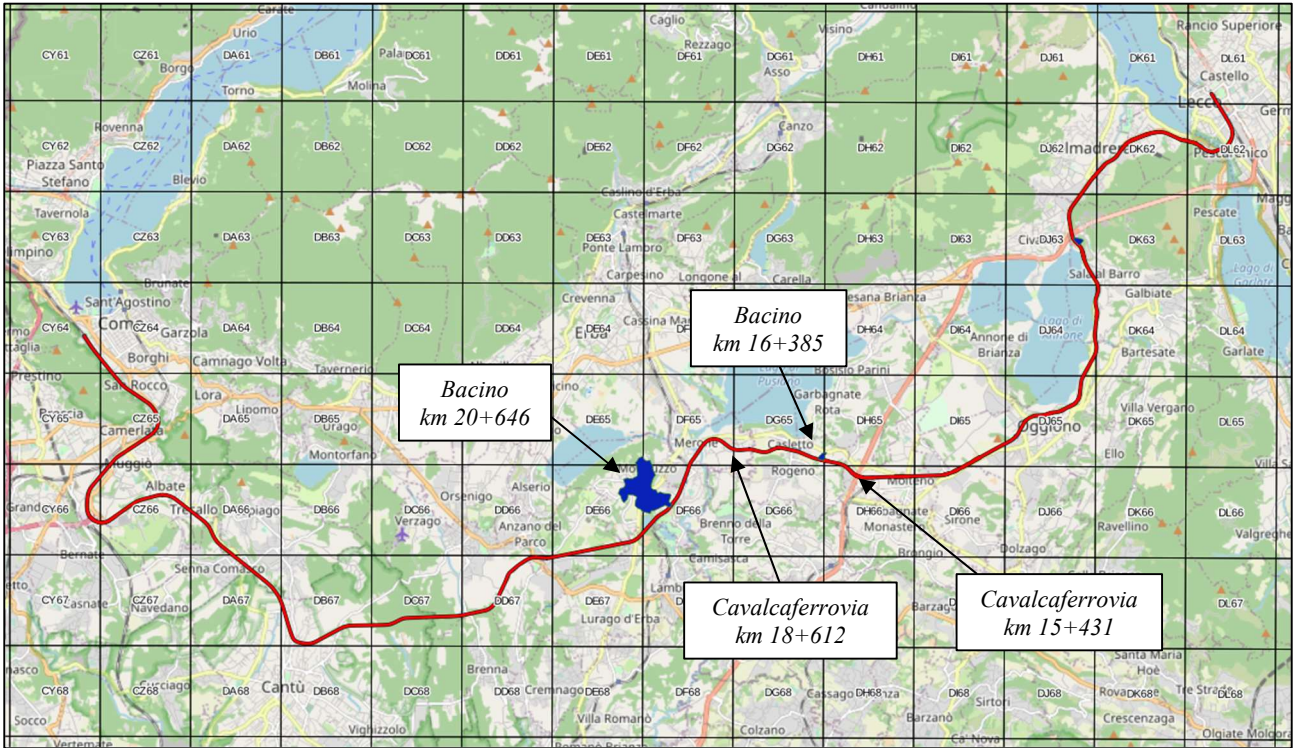


Figura 10 - Estratto Allegato 3 – Studio PAI – Individuazione celle di riferimento su OSM

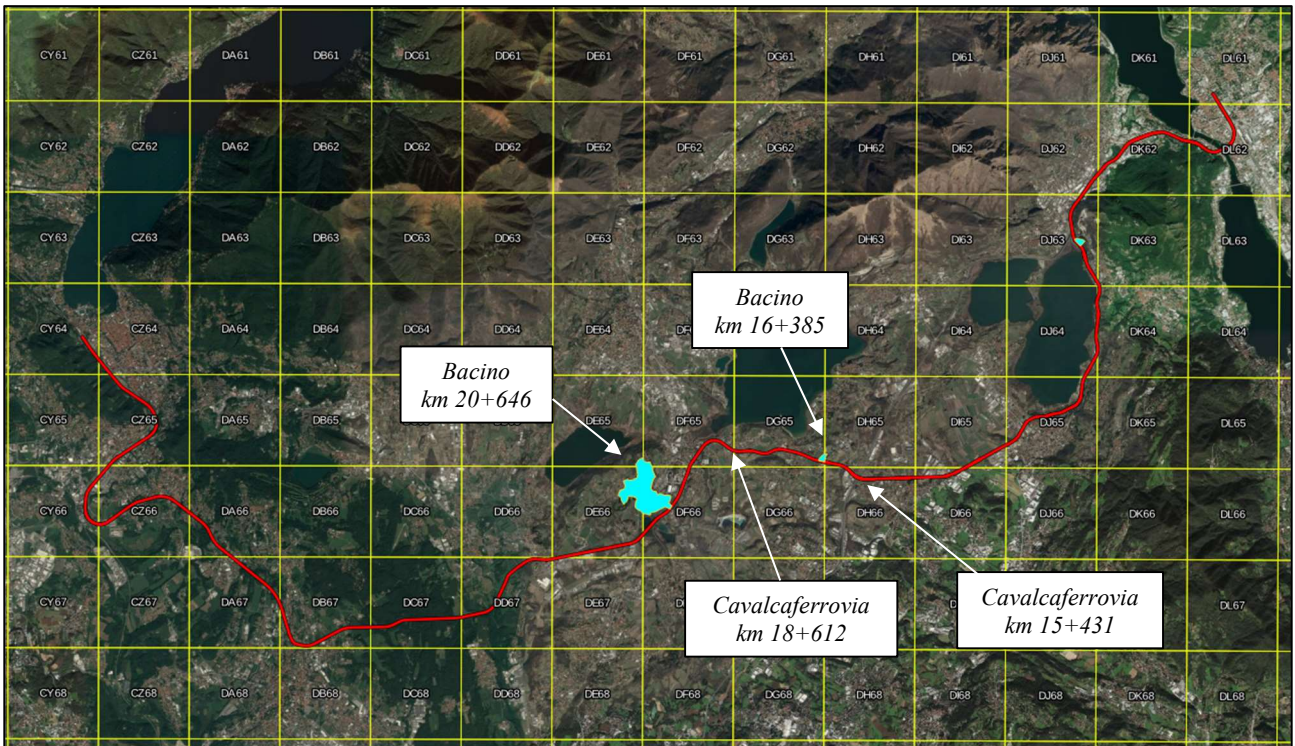


Figura 11 - Estratto Allegato 3 – Studio PAI – Individuazione celle di riferimento su ortofoto

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 | REV. A |

Dall'Allegato 3 *Distribuzione spaziale delle precipitazioni intense del PAI 7. Norme di attuazione* si estrapolano i parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni in funzione delle celle di interesse.

In merito ai bacini oggetto di analisi che sono interessati da più celle caratterizzate da diverse LSPP sono stati assunti, quali valori di “a” ed “n” di riferimento per la progettazione, quelli più cautelativi in funzione del parametro *a* descrittivo della pioggia oraria (vedi tabella seguente).

| Tratto | Cella | 20 | | 100 | | 200 | | 500 | |
|------------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | a | n | a | n | a | n | a | n |
| Km 16+385 | DG65 | 65.6924 | 0.31009 | 85.0222 | 0.31193 | 93.2604 | 0.3129 | 104.143 | 0.31329 |
| Km 20+646 | DE65 | 62.8379 | 0.30627 | 80.7472 | 0.30686 | 88.3843 | 0.3069 | 98.4651 | 0.30684 |
| | DF65 | 64.3758 | 0.30889 | 83.0170 | 0.31019 | 90.9661 | 0.3107 | 101.463 | 0.31096 |
| | DE66 | 63.1116 | 0.30102 | 81.3395 | 0.30159 | 89.1205 | 0.3018 | 99.381 | 0.30171 |
| | DF66 | 64.8634 | 0.30327 | 83.9526 | 0.30472 | 92.1003 | 0.3056 | 102.848 | 0.30591 |
| Cavalcaferrovia km 15+431 | DH66 | 67.4676 | 0.30363 | 79.1699 | 0.30617 | 96.7102 | 0.3077 | 108.254 | 0.30847 |
| Cavalcaferrovia km 18+612 | DF65 | 64.3758 | 0.30889 | 83.0170 | 0.31016 | 90.9661 | 0.31074 | 101.463 | 0.31096 |

Tabella 2- Parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per Tr 20, 100, 200 e 500 anni

Nel grafico seguente sono state riportate le curve di possibilità pluviometriche calcolate per una cella di riferimento rappresentativa dell'intervento previsto in corrispondenza del tracciato ferroviario per il tempo di ritorno T=200 anni.

Per il bacino al km 20+646, interessante più celle, si fa riferimento alla legge più cautelativa, ovvero quella con pioggia oraria maggiore, secondo quanto indicato secondo le more di attuazione del PAI

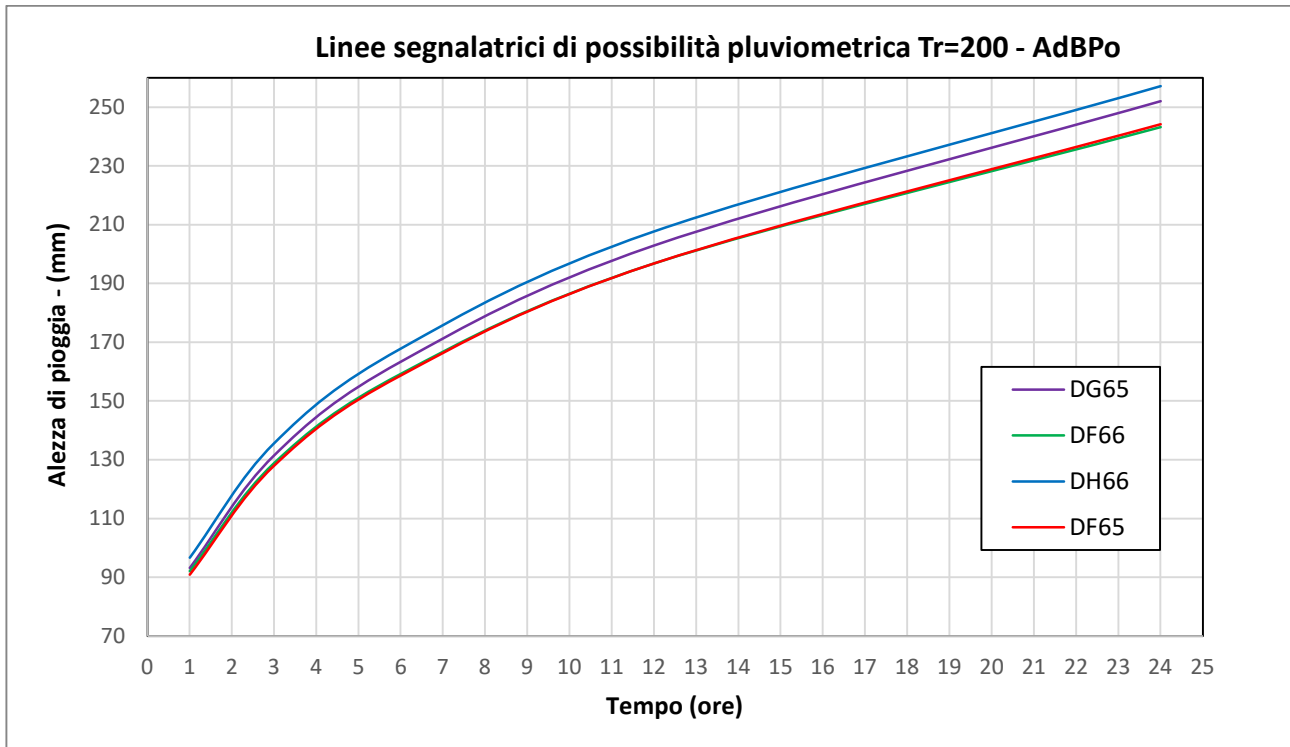


Figura 12 - CPP per piogge extraorarie $t > 1h$ - Norme di attuazione del PAI

La “Direttiva” riporta inoltre:

I valori indicati costituiscono riferimento per le esigenze connesse a studi e progettazioni che, per dimensioni e importanza, non possano svolgere direttamente valutazioni idrologiche più approfondite a scala locale. Nelle parti del bacino ove sono disponibili, possono essere utilizzati, in alternativa, i risultati derivanti da studi di regionalizzazione, che siano stati predisposti a cura della Regione interessata.

| | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

23 di 19

5.2 Analisi statistica regionale delle piogge - ARPA

ARPA Lombardia nell'ambito del progetto INTERREG IV/A STRADA (Strategie di Adattamento ai cambiamenti climatici per la gestione dei rischi naturali nel territorio transfrontaliero) nato da una collaborazione transfrontaliera tra Italia e Svizzera, in collaborazione con il Centro Nivo-Meteo di Bormio e del Servizio Idrografico, ha partecipato alla definizione delle “precipitazioni estreme”.

Relativamente alle precipitazioni ARPA ha sviluppato due nuovi servizi: la consultazione delle mappe di stima della pioggia integrata con rilievi a terra e radar per il periodo 1997-2011 e l’“Atlante delle piogge intense”, di fondamentale utilità per le analisi idrologiche e il monitoraggio degli eventi meteorologici estremi.


5.2.1 L’atlante delle piogge intense della Lombardia

Le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica, note anche come curve di possibilità pluviometrica o climatica, sono uno strumento applicativo consolidato in idrologia, sulle quali esiste ampia letteratura e che trovano applicazione nella progettazione degli interventi di difesa dalle piene fluviali, nella zonazione del rischio idraulico-idrogeologico in funzione del luogo e del tempo di ritorno dell'evento di precipitazione, nonché nella valutazione a posteriori dell'intensità di un evento occorso.

Il contesto in cui ARPA Lombardia ha svolto le attività progettuali di aggiornamento della descrizione statistica delle precipitazioni intense è quello della presenza di una base di dati strumentali già consolidata, costituita dalle osservazioni delle piogge massime annue di fissata durata di 1, 2, 3, 6, 12 e 24 ore per 105 stazioni meccaniche del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, già utilizzate per lo sviluppo di un'attività di caratterizzazione statistica del territorio regionale mediante un modello scala-invariante secondo la distribuzione probabilistica GEV (Generalized Extreme Value), che ha prodotto la parametrizzazione delle LSPP su 69 punti strumentati e da questi su tutto il territorio regionale tramite tecniche di estrapolazione geostatistica; questo servizio è attualmente operativo e accessibile su piattaforma web-gis sul sito web istituzionale di ARPA (<http://idro.arpalombardia.it>).

Le tipologie di dati che, con il progetto STRADA sono stati integrati, hanno una struttura differente ma complementare; si riassumono di seguito le rispettive caratteristiche principali:

- **osservazioni storiche:** ampia copertura temporale (1929-2001); ridotta copertura territoriale (69 siti del dataset esistente + 31 siti aggiunti); distribuzione spaziale non uniforme, più concentrata in aree montane; dati raccolti su supporto cartaceo e trasposti in formato digitale;

| | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

24 di 19

- **osservazioni recenti:** ridotta copertura temporale (1987-2011); ampia copertura territoriale (251 siti); dati raccolti direttamente in formato digitale da stazioni automatiche, senza necessità di interventi manuali per la loro trasposizione in formato informatico.

La parametrizzazione delle linee segnalatrici sviluppata per Arpa Lombardia da De Michele et al. è stata migliorata, mantenendo valide alcune scelte metodologiche già consolidate nel prodotto operativo esistente, in particolare si sono conservati:

- il principio di invarianza di scala, illustrato in Burlando e Rosso, 1996 ;
- la distribuzione di probabilità del valore estremo a tre parametri, la Generalized Extreme Value (GEV), come tra l'altro suggerito anche da Braca et al., 2013, in buon accordo con i dati campionari utilizzati per il territorio in esame, valutata analiticamente più adatta della distribuzione di Gumbel per la descrizione statistica dei punti più vicini ai confini regionali, in particolare quelli ad orografia complessa;
- la stima dei parametri della distribuzione mediante la tecnica operativa degli L-moments. Da un'analisi di sensitività sulle diverse tecniche di stima non si sono comunque rilevate differenze significative in termini operativi sul risultato finale per l'area in esame.

L'analisi idrologica svolta formula i criteri e i metodi per la caratterizzazione idrologica del regime pluviale in Lombardia sviluppando, in particolare, la parametrizzazione della LSPP per ogni sito stazione e per ogni punto griglia del territorio della Lombardia secondo il modello probabilistico GEV (Generalized Extreme Value) scala invariante.

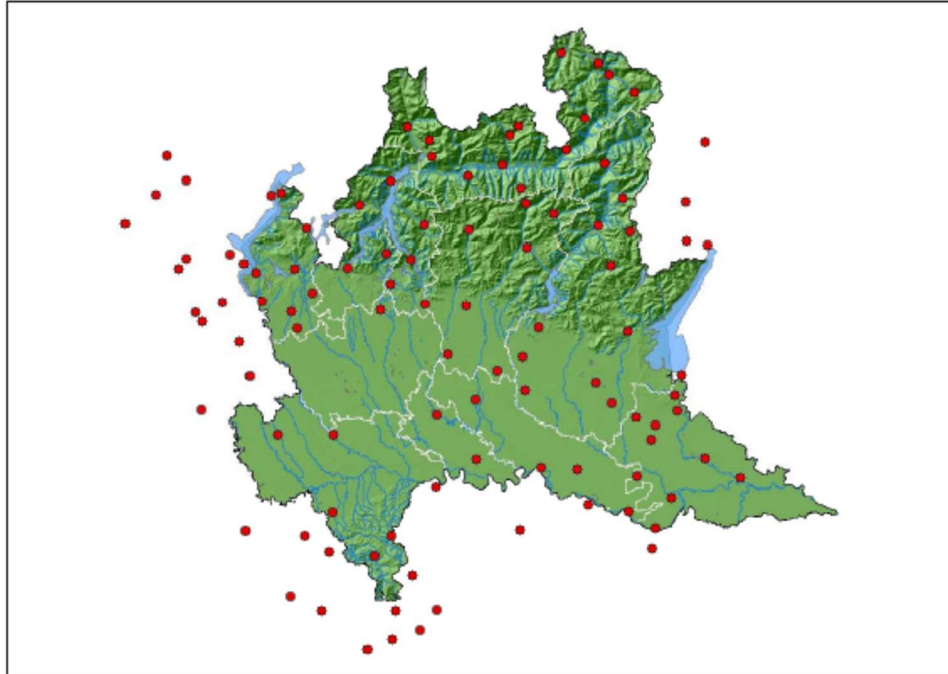



Figura 13 - Le 105 stazioni pluviografiche considerate nello studio, per durate comprese tra 1e 24 ore.

I risultati sono individuati nel modello sviluppato, che consente la valutazione dell'altezza (o del tasso medio) di precipitazione temibile al variare della durata temporale (compresa tra 1 e 24 ore e tra 1 e 5 giorni) con qualsivoglia periodo di ritorno (compreso indicativamente tra 2 e 200 anni).

Il modello proposto, di tipo scala invariante, è stato identificato, controllato, tarato e validato in base ai dati della rete pluviometrica della Lombardia; ed è stato quindi spazializzato all'intera regione tramite tecniche di estrapolazione geostatistica.

Il nuovo atlante delle piogge intense è stato calcolato puntualmente su una maglia di 1.5 km x 1.5 km in forma esplicita per durate da 1 a 24 ore e per tempi di ritorno dai 10 ai 200 anni. Si rendono disponibili all'utente esperto anche i valori dei parametri e dei quantili della distribuzione GEV per ogni punto-griglia, che permettono da una parte la determinazione della massima altezza di pioggia temibile per un qualsivoglia tempo di ritorno e dall'altra la valutazione del tempo di ritorno di un evento estremo occorso.

| | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

26 di 19

5.2.2 Il modello probabilistico di GEV (o distribuzione generalizzata del valore estremo)

L'espressione della probabilità cumulata GEV è

$$F(x) = \exp \left\{ \left[1 - k(K - \varepsilon) / \alpha \right]^{1/k} \right\}$$

Eq. 1

Dove:

ε è un parametro di posizione;

α è un parametro di scala;

κ un parametro di forma.

Il modello GEV riassume le tre leggi asintotiche del massimo valore del 1° tipo (EV1, Gumbel), del 2° tipo (EV2) e del 3° (EV3) tipo. In particolare, per $k = 0$ si ricade nell'espressione di Gumbel che quindi rappresenta un caso particolare del modello GEV.

La stima dei tre parametri ε , α e κ può essere effettuata tramite la tecnica basata sui momenti lineari raccomandata da Hosking (1990).

Stimati i parametri di forma κ , di scala (α) e di posizione (ε) della GEV per la stazione in esame la

relazione $T = \frac{1}{1 - F_k(K_t)}$ che individua la relazione fra periodo di ritorno T e valore del coefficiente può essere esplicitata nella:

$$T = \frac{1}{1 - F_k(K_t)} = \frac{1}{1 - \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k}{\alpha} (K_t - \varepsilon) \right]^{1/k} \right\}} \quad \text{Eq. 2}$$

Più utile da un punto di vista pratico è la forma inversa della precedente espressione, per cui, fissato un valore T del periodo di ritorno in anni si può ottenere il tempo di ritorno corrispondente a un dato valore X tramite la relazione:

$$K_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} (1 - \exp(-ky_T)) \quad \text{Eq. 3}$$

dove y_T indica la variabile ridotta di Gumbel, pari a:

| | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

27 di 19

$$y_T = -\ln\left(\ln\frac{T}{T-1}\right) \quad \text{Eq. 4}$$

Le leggi di probabilità pluviometrica sono state determinate sulla base dei dati disponibili sul sito web del servizio idrografico dell'ARPA Lombardia, il quale fornisce i seguenti parametri:

- a_1 : coefficiente di scala della linea segnalatrice, pari al valore atteso dell'altezza di pioggia massima annuale per la durata di riferimento;
- n : esponente di scala con cui la variabilità del fenomeno si trasmette dalla scala temporale di riferimento alle altre scale temporali;
- parametri di forma k , di scala α , e di posizione ε , della distribuzione generalizzata del valore estremo (GEV) per il calcolo del fattore di crescita in funzione del tempo di ritorno (w_t)

Per una precipitazione di durata D maggiore o uguale all'ora, l'altezza di pioggia è data dalla seguente relazione:

$$h_T(D) = a_1 w_T D^n \quad \text{Eq. 5}$$

in cui w_t è il fattore di crescita in funzione del tempo di ritorno calcolato con la seguente espressione:

$$w_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[\ln\left(\frac{T}{T-1}\right) \right]^k \right\} \quad \text{Eq. 6}$$

Stimati i parametri di forma, k , di scala, α , e di posizione, ε , della distribuzione di probabilità cumulata generalizzata del valore estremo GEV per la zona in esame resta univocamente determinata la relazione fra periodo di ritorno T e valore del coefficiente di crescita K_T (Eq. 3) valida per piogge massime annuali di durata da 1 a 24 ore consecutive.

I valori dei parametri k , α e ε per i siti dove sono localizzate le stazioni pluviometriche sono stati ricavati ed elencati su una tabella mentre per le zone non servite sono riportati sulle mappe dell'intero territorio, ricavandoli per interpolazione con metodi di Kriging secondo la procedura illustrata da Rosso et al. [1997].

Si riportano di seguito le mappe dei parametri k , α e ε .

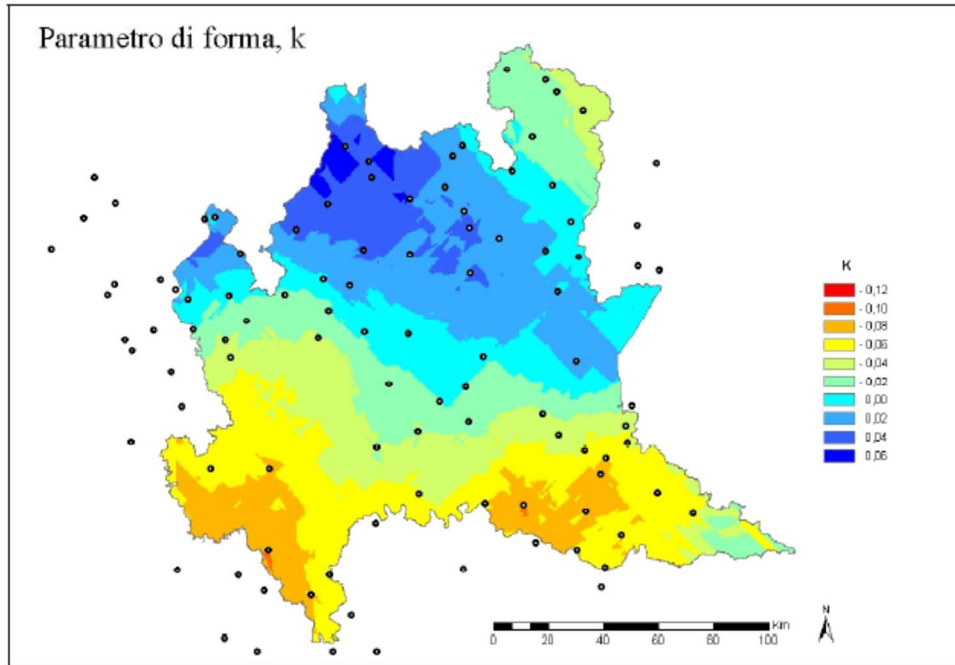


Figura 14 - Mappa del parametro di forma k , per durate comprese tra 1 a 24 ore

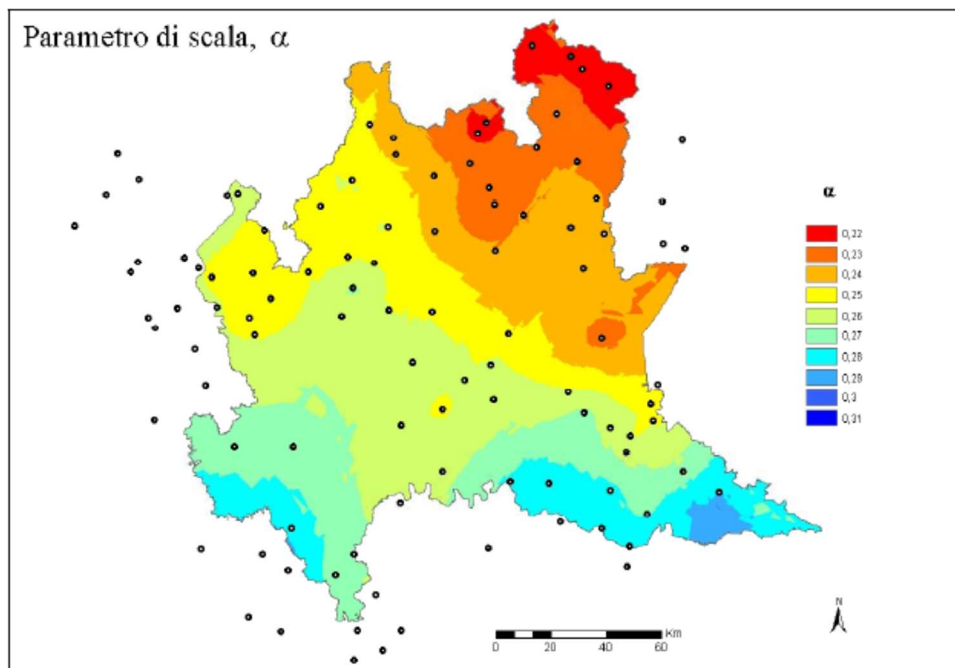


Figura 15 - Mappa del parametro di scala α , per durate comprese tra 1 a 24 ore

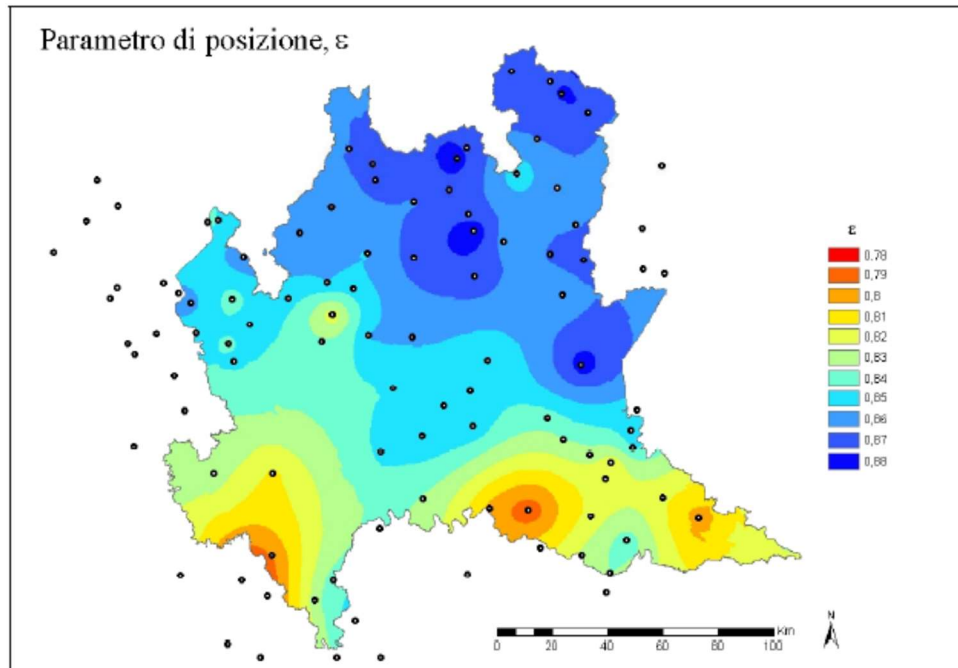


Figura 16 - Mappa del parametro di scala α , per durate comprese tra 1 a 24 ore

Le leggi di probabilità pluviometriche definiscono come varia la media del massimo annuale dell'altezza di pioggia su una fissata durata $h_T(d) = m(d)K_T$ con la durata stessa. Per la zona in esame è stata adottata una espressione del tipo:

$$m[h(d)] = a_1 d^n \quad \text{Eq. 7}$$

I parametri a_1 e n sono stati valutati con regressione ai minimi quadrati nelle 105 stazioni di misura pluviografiche presenti sul territorio esaminato. Per una pratica applicazione si può far uso delle mappe isoparametriche di a_1 e di n per l'intero territorio.

L'intera Lombardia è stata suddivisa in celle quadrate con lato $L=1.5$ km per ognuna della quale sono stati definiti i parametri k , α , ε , a_1 e n .

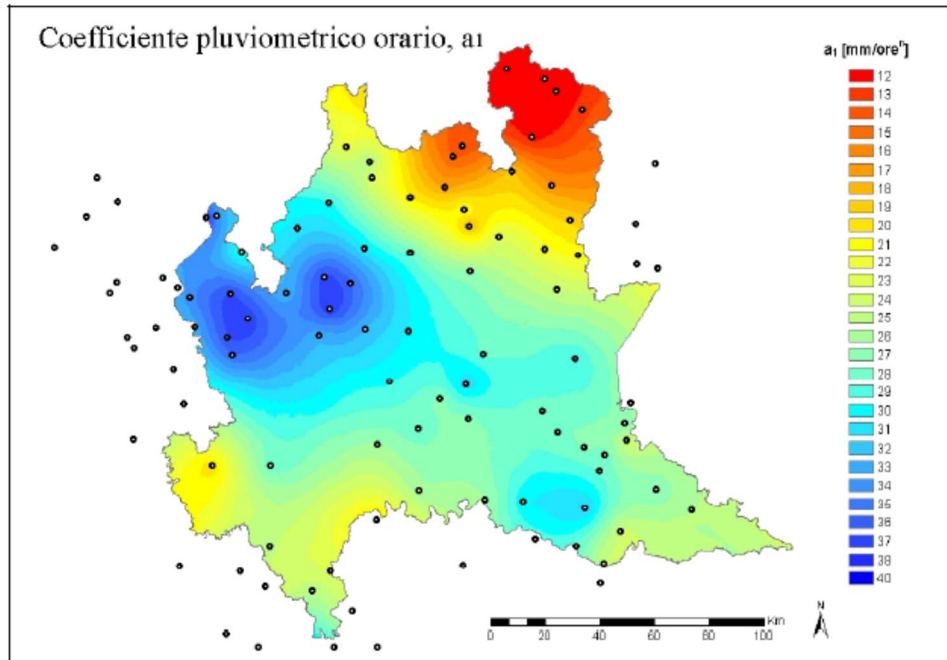


Figura 17 - Mappa del coefficiente pluviometrico orario a_1 , per durate comprese tra 1 a 24 ore

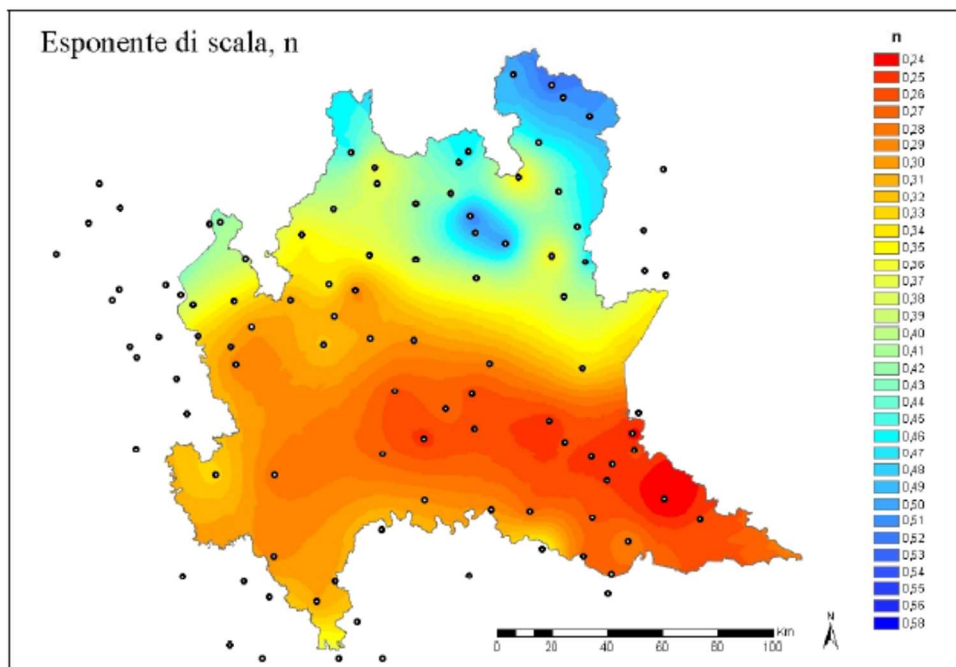


Figura 18 - Mappa dell'esponente di scala n , per durate comprese tra 1 a 24 ore

Nelle figure seguenti si riportano le celle interessate dal tracciato ferroviario oggetto dell'intervento; sono state numerate dal progettista per indentificare le zone.

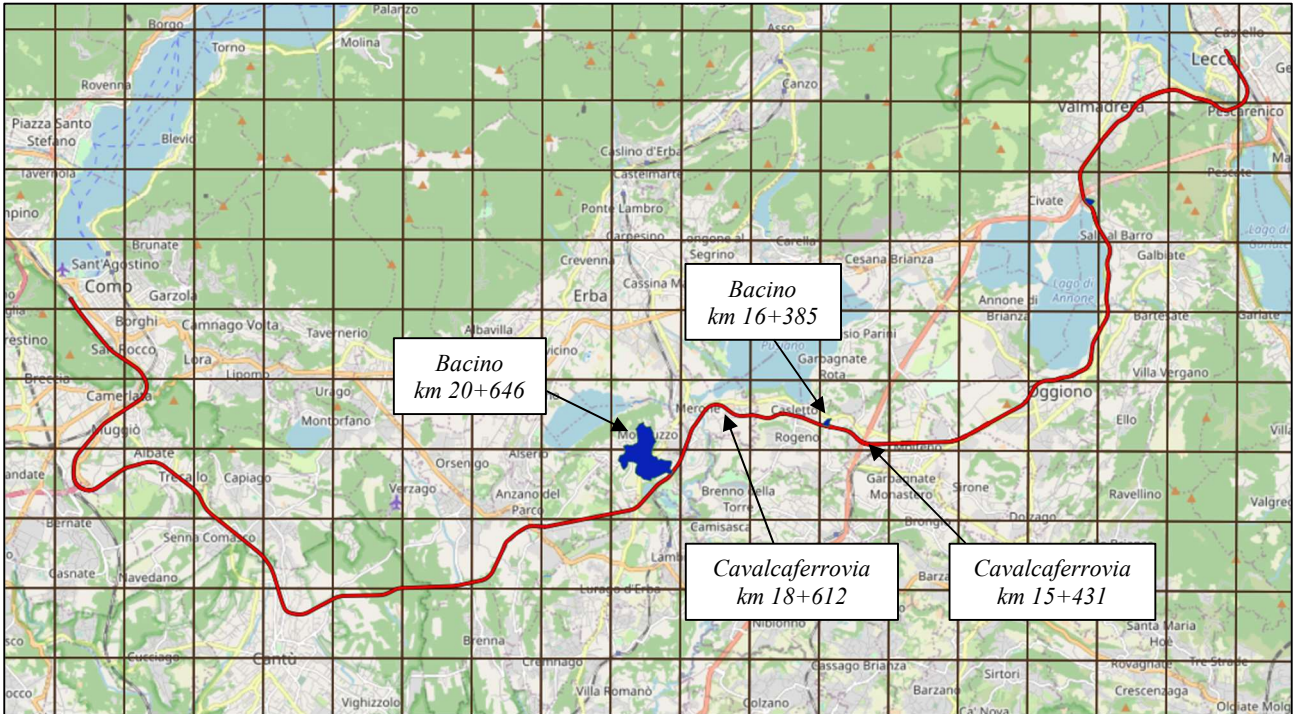


Figura 19 – Studio ARPA – Individuazione celle di riferimento su OSM

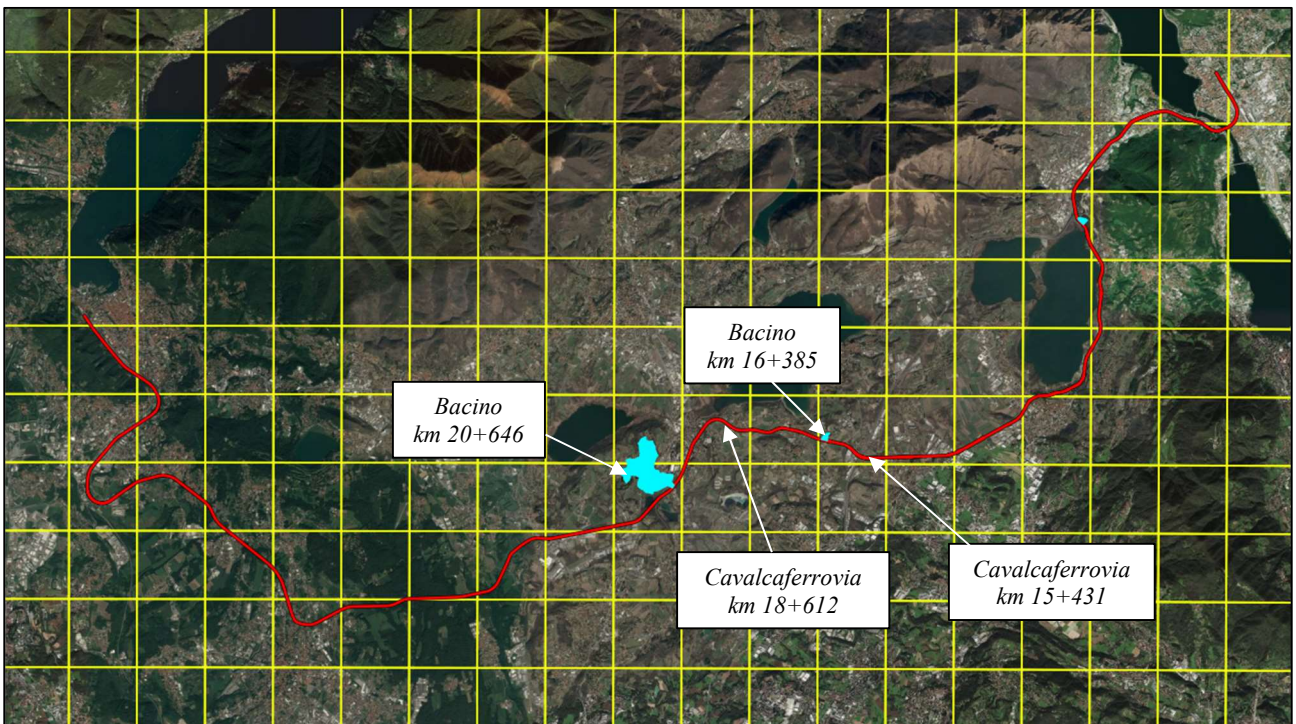


Figura 20 – Studio ARPA – Individuazione celle di riferimento su ortofoto

| | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

32 di 19

Per l'area oggetto di intervento, con riferimento ai tempi di ritorno di 25, 50, 100, 200 e 500 anni, secondo lo studio di Arpa Lombardia si ottengono i valori per a ed n e le leggi di probabilità pluviometrica, per precipitazioni di durata superiore all'ora, di seguito riportati.

I parametri di ogni cella sono riportati nelle tabelle seguenti.

| Parametri | Km 16+385 | Km 20+646 | | Cavalcaferrovia km 15+431 | Cavalcaferrovia km 18+612 |
|---------------|-----------|-----------|---------|------------------------------|------------------------------|
| a_1 | 31.85 | 32.03 | 31.50 | 31.95 | 31.85 |
| n | 0.3176 | 0.3224 | 0.3198 | 0.3210 | 0.3176 |
| α | 0.2955 | 0.2946 | 0.2931 | 0.2939 | 0.2955 |
| K | -0.0046 | -0.0041 | -0.0042 | -0.0035 | -0.0046 |
| ε | 0.828 | 0.8287 | 0.8296 | 0.8292 | 0.828 |

Tabella 3- Parametri k , α , ε , a_1 e n nelle celle interessate dal progetto per eventi con durata superiore all'ora

Applicando la metodologia precedentemente esposta si calcolano i coefficienti di crescita al variare del tempo di ritorno.

| Tr [anni] | Km 16+385 | Km 20+646 | | Cavalcaferrovia km 15+431 | Cavalcaferrovia km 18+612 |
|-----------|-----------|-----------|-------|------------------------------|------------------------------|
| 25 | 1.780 | 1.777 | 1.773 | 1.775 | 1.780 |
| 50 | 1.991 | 1.987 | 1.983 | 1.984 | 1.991 |
| 100 | 2.202 | 2.197 | 2.191 | 2.192 | 2.202 |
| 200 | 2.412 | 2.406 | 2.399 | 2.400 | 2.412 |
| 500 | 2.691 | 2.683 | 2.675 | 2.675 | 2.691 |

Tabella 4- Coefficiente di crescita nelle celle interessate dal progetto al variare del Tr

Noti i coefficienti di crescita è possibile calcolare le altezze di pioggia orarie per ogni cella.

| $a_{Tr}/h(mm)$ | Km 16+385 | Km 20+646 | | Cavalcaferrovia km 15+431 | Cavalcaferrovia km 18+612 |
|----------------|-----------|-----------|--------|------------------------------|------------------------------|
| a_{25} | 56.698 | 56.924 | 56.927 | 56.696 | 56.698 |
| a_{50} | 63.427 | 63.658 | 63.644 | 63.384 | 63.427 |
| a_{100} | 70.128 | 70.362 | 70.332 | 70.038 | 70.128 |
| a_{200} | 76.826 | 77.061 | 77.014 | 76.685 | 76.826 |
| a_{500} | 85.696 | 85.928 | 85.860 | 85.478 | 85.696 |

Tabella 5 - Altezza di pioggia oraria nelle celle interessate dal progetto al variare del Tr

Analizzando i parametri a risultanti per il bacino a km 20+646 a scopo cautelativo si prenderanno in considerazione i valori più gravosi ovvero i dati della cella con pioggia oraria maggiore. Si riporta di seguito il diagramma delle CPP relativa ad un $Tr=200$ per le celle sopraindicate e associate ad ogni sito oggetto di studio.

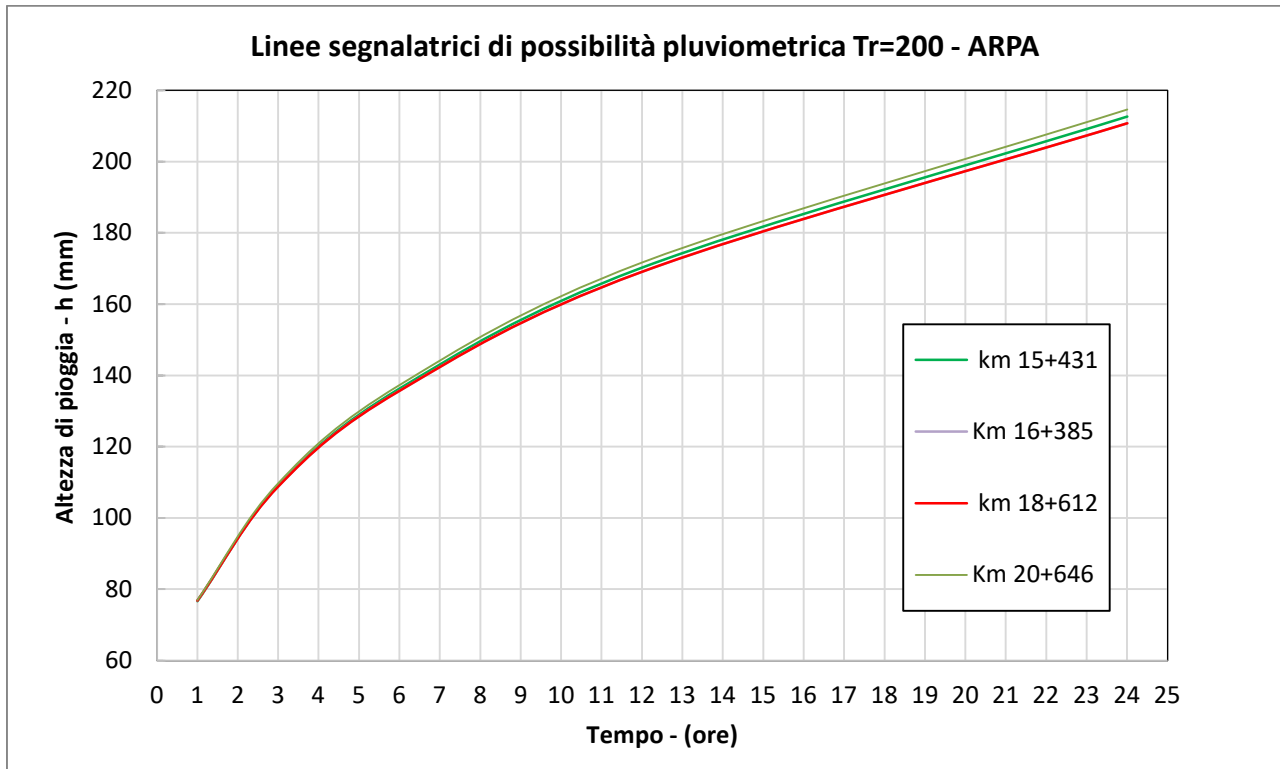


Figura 21 - Curve di Possibilità Pluviometrica per piogge extraorarie $t > 1h$ – ARPA

5.3 Confronto studi idrologici

Lo studio idrologico delle piogge della area interessata dal tracciato di progetto è stato sviluppato sia secondo quanto suggerito dalle norme di Attuazione dell’Autorità di Bacino del Fiume Po, sia applicando la parametrizzazione della LSPP derivanti dallo studio delle piogge definito dal metodo indicato nel documento prodotto dall’Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente (ARPA) della Lombardia “*Il regime delle precipitazioni intense sul territorio della Lombardia – Modello di previsione statistica delle precipitazioni di forte intensità e breve durata*” (2005).

Nelle figure a seguire si confrontano graficamente le Curve di Possibilità Pluviometrica relative ad un $T_r=200$ anni per la pluviometria associata agli studi di bacino.

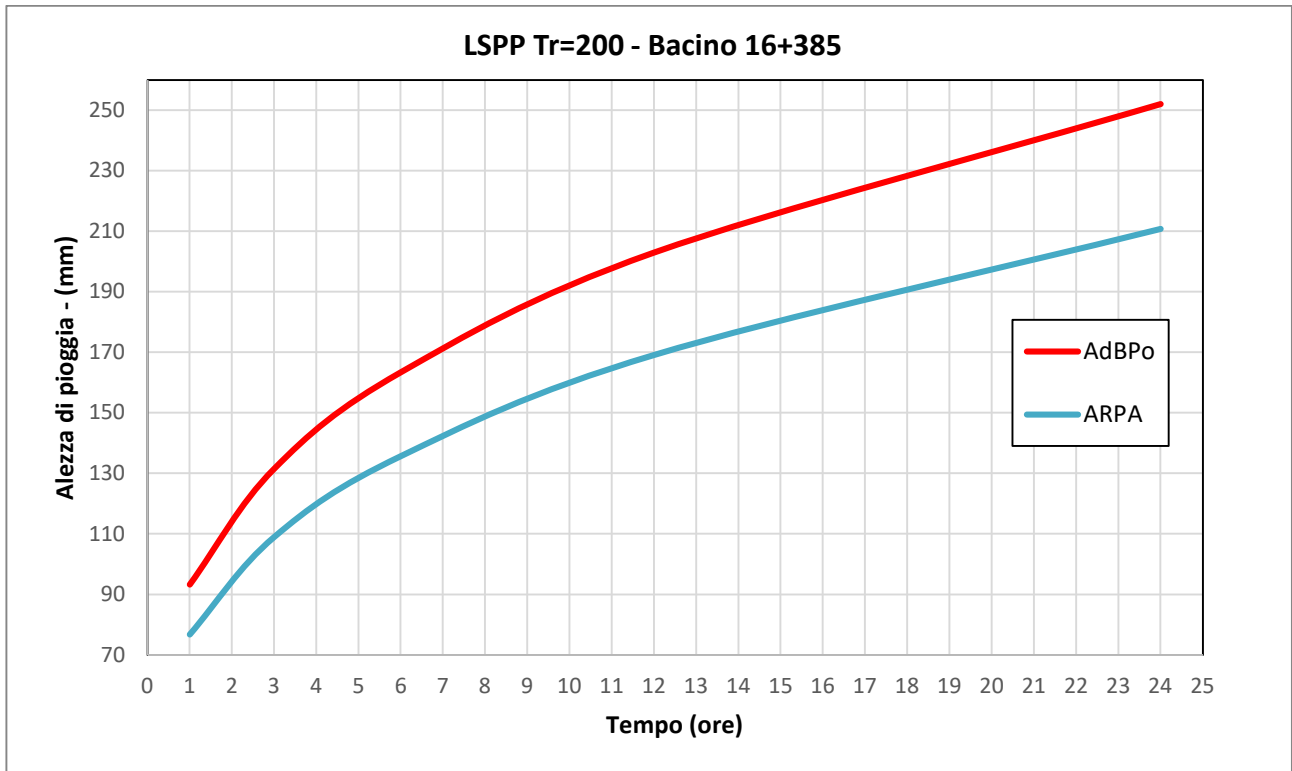


Figura 22 - km 16+385 - Confronto CPP per piogge extraorarie t>1h Dati ARPA e dati AdBPo

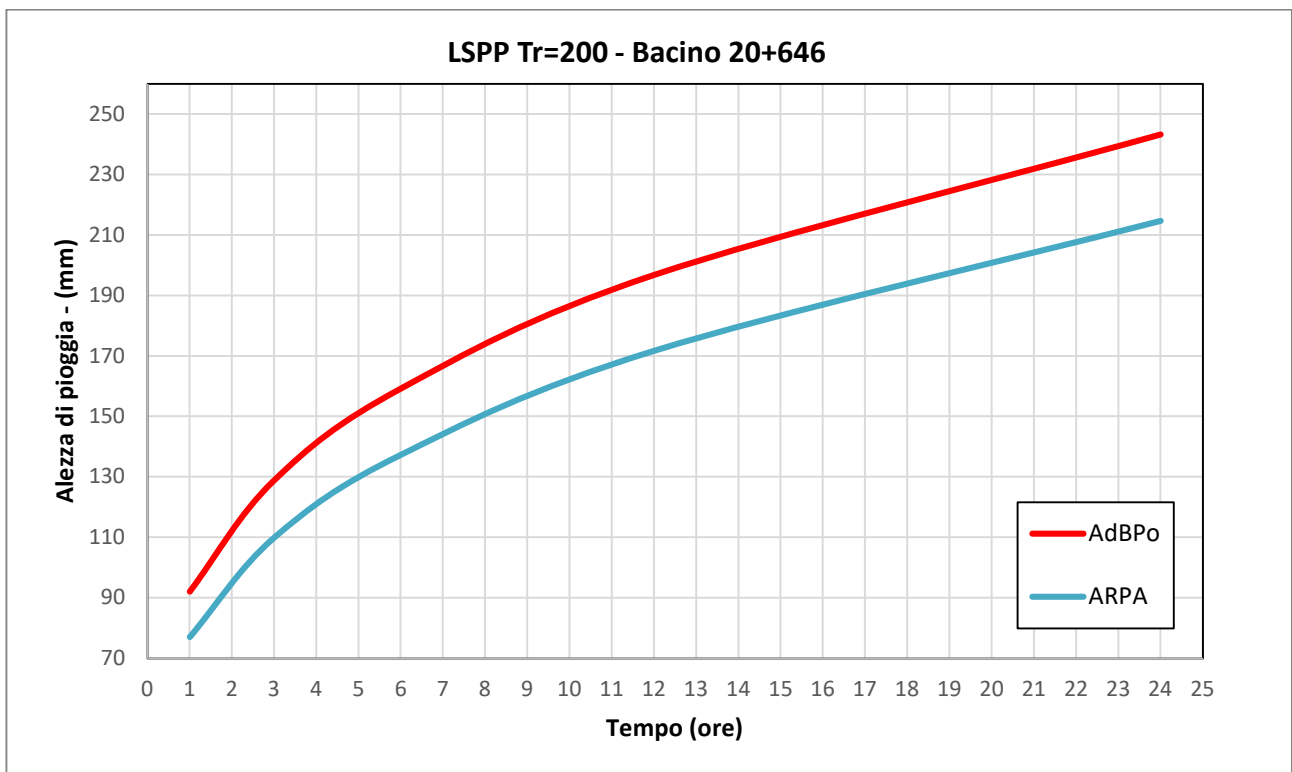


Figura 23 - km 20+646 - Confronto CPP per piogge extraorarie t>1h Dati ARPA e Norme di attuazione del AdBPo

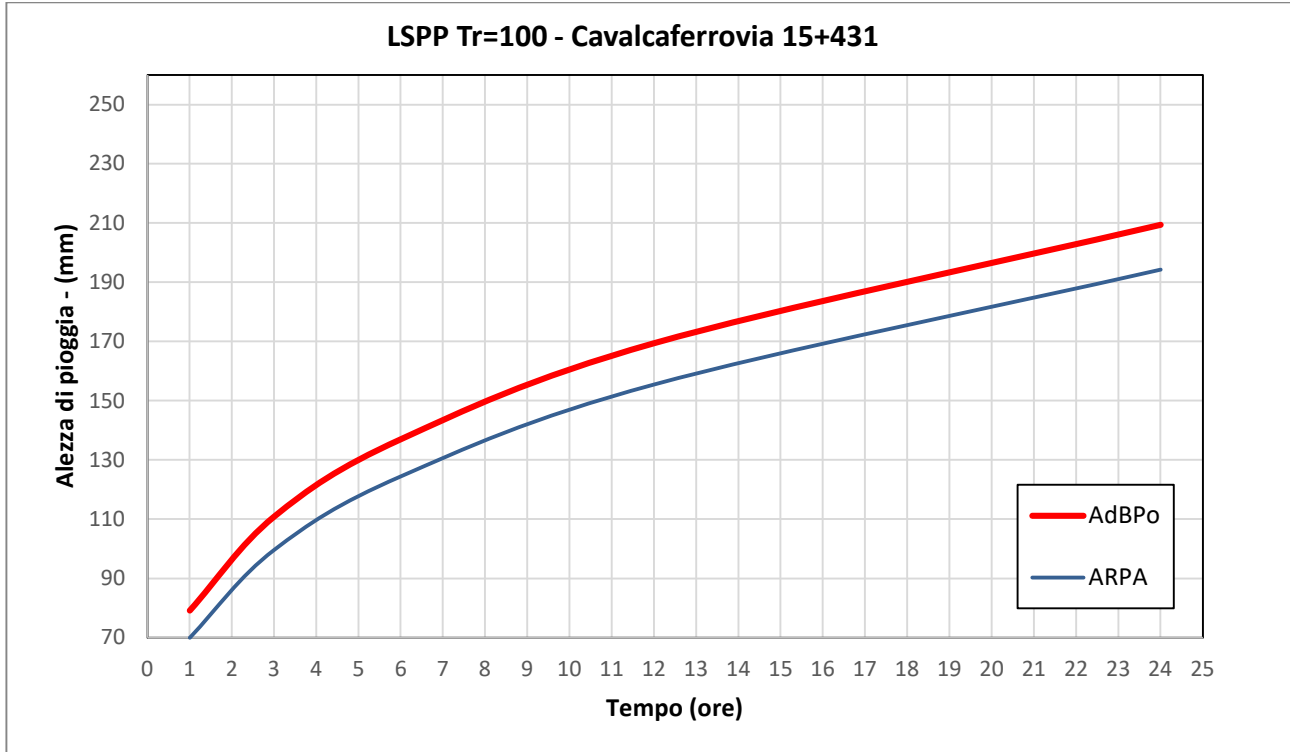


Figura 24 - km 15+431 - Confronto CPP per piogge extraorarie $t > 1h$ Dati ARPA e Norme di attuazione del AdBPo

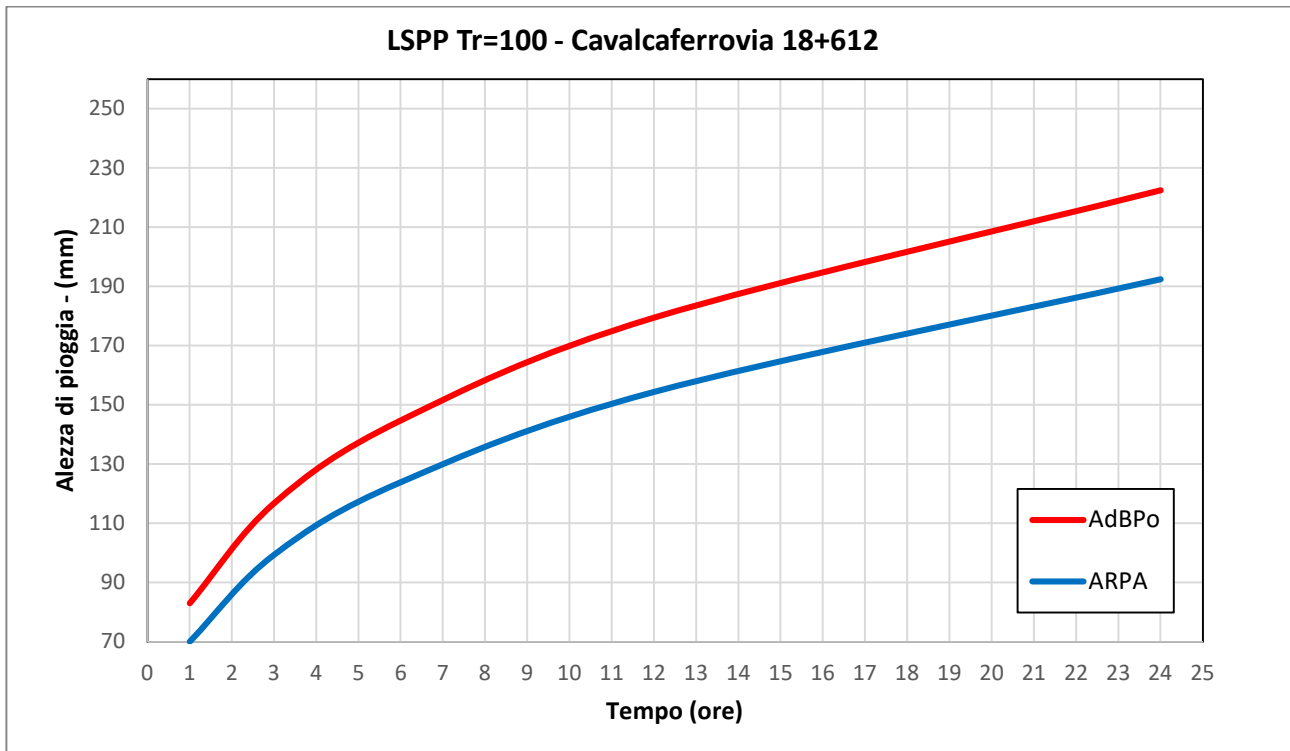


Figura 25 - km 18+612 - Confronto CPP per piogge extraorarie $t > 1h$ Dati ARPA e Norme di attuazione del AdBPo

| | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

36 di 19

Dall'analisi dei diagrammi si ritiene cautelativo utilizzare per il dimensionamento e verifica delle opere idrauliche e reti idrauliche inerenti il progetto in esame le CPP desunte dallo studio prodotto dalla AdBPo.

| Tratto | Cella | a | n |
|---------------------------|----------------------|---------|---------|
| Bacino Km 16+385 | DG65 - $Tr=200$ anni | 93.2604 | 031286 |
| Bacino Km 20+646 | DF66 - $Tr=200$ anni | 92.1003 | 0.30556 |
| Cavalcaferrovia km 15+431 | DH66 - $Tr=100$ anni | 79.1699 | 0.30617 |
| Cavalcaferrovia km 18+612 | DF65 - $Tr=100$ anni | 83.0170 | 0.31016 |

Tabella 6- Parametri CPP di progetto per piogge extraorarie

5.4 La relazione intensità – durata delle precipitazioni - piogge brevi

In bacini imbriferi di limitata estensione e di relativa rapidità dei deflussi, i tempi di concentrazione sono brevi e di conseguenza le precipitazioni che interessano sono le piogge intense di durata breve con tempi inferiori all'ora.

Generalmente le osservazioni relative alle piogge intense sono rilevate per intervalli di 1, 3, 6, 12, 24 ore mentre sono raramente disponibili i dati relativi alle piogge intense per intervalli inferiori a 1 ora, anche per la connessa difficoltà della registrazione accurata che si effettua con i pluviometri con registrazione su carta (pluviografi), che utilizzano per la registrazione una striscia settimanale.

Adottando i pluviografi che utilizzano per la registrazione una striscia giornaliera ed i pluviometri digitali, il bilanciere consente l'accuratezza della lettura per piogge di massima intensità che si estende a intervalli dell'ordine del minuto: più è breve l'intervallo di discretizzazione, più dettagliata è la descrizione dell'evento pluviometrico, ma più onerosa risulta la gestione dell'informazione.

Peraltro, le informazioni relative alle piogge intense di breve durata non sono disponibili nella maggior parte delle stazioni pluviometriche, e per valutarle è opportuno adoperare particolari formule per la stima dell'intensità di pioggia, in quanto l'estrapolazione delle curve di probabilità pluviometrica a tempi inferiori ad un'ora conduce ad una sovrastima delle intensità.

Tale aspetto assume una notevole importanza nel dimensionamento del drenaggio di piattaforma considerando che l'utilizzo della legge valida per durate maggiori dell'ora risulta spesso troppo cautelativa.

Nel caso oggetto della presente relazione il calcolo delle curve di probabilità pluviometrica a tempi inferiori ad un'ora è stata utilizzata la formula di Bell.

Bell (“Generalized Rainfall Duration Frequency Relationship” – Journal of the Hydraulics Division – Proceedings of American Society of Civil Engineers – volume 95, issue 1 – gennaio 1969) ha osservato che i rapporti r_t tra le altezze di durata t molto breve ed inferiori alle due ore e l’altezza oraria sono relativamente poco dipendenti dalla località in cui si verificano.

Lo U.S. Water Bureau raccomanda per tempi di pioggia inferiore a mezz’ora l’adozione di una relazione empirica, derivata interamente da dati di breve durata; tale relazione mostra che il tempo in minuti in pioggia ha un rapporto costante con la pioggia della durata di 1 ora per lo stesso tempo di ritorno così come segue:

| | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|
| t [min] | 5 | 10 | 15 | 30 |
| $r_t = h_t/h_{60}$ | 0.29 | 0.45 | 0.57 | 0.79 |

Tabella 7 – Rapporto tra altezza di pioggia sub-oraria – U.S. Water Bureau

Questi rapporti variano di molto poco negli Stati Uniti ed i loro valori sono indipendenti dal periodo di ritorno.

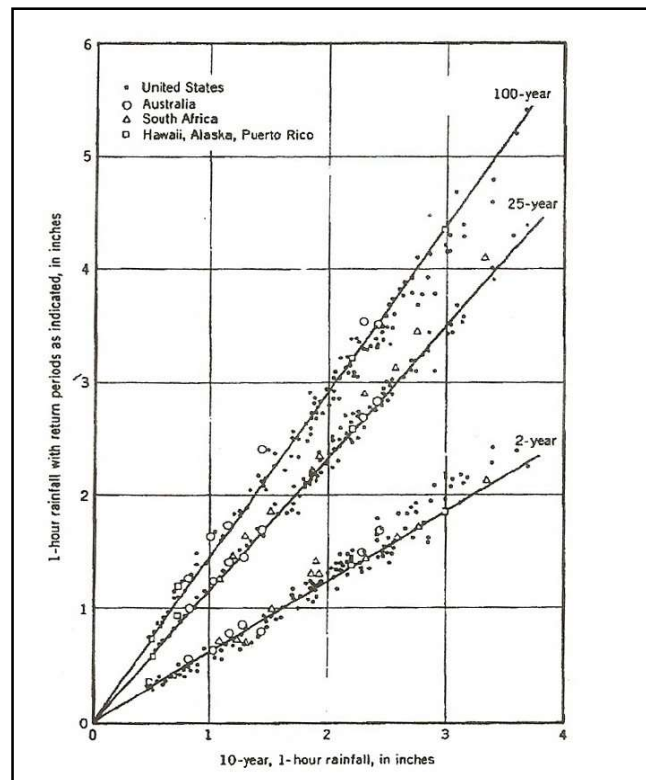


Figura 26 - Relazione altezza-frequenza per 2, 25, 100 anni

Bell, come sopra accennato, sulla scorta di osservazioni provenienti da oltre 150 stazioni con oltre 40 anni di osservazione, ha dimostrato che tale correlazione si può estendere fino a valori di durata sino alle due

| | | | | | | |
|---|---|-------|----------|-------------|------|----------|
|  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA | | | | | |
| | ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | | |
| RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | 38 di 19 |
| | LC00 | 01 | R26 | RHID0001001 | A | |

ore e, come risulta dalla figura 2, ha riscontrato la costanza dei rapporti tra tempi di pioggia breve e tempo di pioggia della durata pari ad un'ora, anche in Australia, Africa, Hawaii, Alaska e Porto Rico.

In relazione alla modesta variazione dei rapporti di intensità durata correlata al tempo di ritorno, ha proposto la seguente relazione che ben si adatta ai dati osservati:

$$\frac{P_T^t}{h_T^{60}} = (0.54t^{0.25} - 0.50) \quad \text{Eq. 8}$$

applicabile per $5 \leq t \leq 120$ dove:

- P_T^t indica l'altezza di pioggia relativa ad un evento pari al tempo t riferita al periodo di ritorno T ;
- h_T^{60} è l'altezza di pioggia relativa ad un evento di durata pari ad un'ora riferita al periodo di ritorno T ;
- t è il tempo di pioggia espresso in minuti.

Tali osservazioni sono state successivamente riprese da Calenda ("Piogge intense" – Deflussi Urbani – Giornate di Studio 23/24 novembre 1995, Roma, Associazione Idrotecnica Italiana), che ha osservato che dagli stessi rapporti ottenuti dalla curva di involuppo delle massime piogge osservate nel mondo, di equazione $h_\delta = 309\delta^{0.50}$, con δ in ore, derivano i seguenti risultati (Jennings, 1950, Hershfield e Engman 1981):

| | | | | | | | | |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| t (minuti) | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 120 | 240 |
| $r_\delta = h_\delta / h_j$ | 0.29 | 0.45 | 0.50 | 0.58 | 0.71 | 0.87 | 1.41 | 2.00 |

Tabella 8 – Rapporto tra altezza di pioggia sub-oraria – curva involuppo massime piogge mondiali

Sempre come riportato da Calenda, si è potuto osservare che al pluviometro registratore di Roma Macao su un campione di 8 anni sono stati calcolati i seguenti rapporti dei valori medi delle massime altezze di pioggia annue di diversa durata rispetto al valor medio della massima altezza oraria dell'anno (Romanico, 1986; Calenda et al., 1988):

| | | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t (minuti) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| $r_\delta = h_\delta / h_j$ | 0.278 | 0.435 | 0.537 | 0.632 | 0.709 | 0.758 |

Tabella 9 – Rapporto tra altezza di pioggia sub-oraria – Roma Macao

| | | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 | REV. A |

Ai pluviografi di Milano Monviso, su un campione di 117 anni (Piga et al.,1990) sono stati calcolati i seguenti rapporti dei valori medi delle massime altezze di pioggia annue di diversa durata h_{δ} rispetto al valor medio della massima altezza annua oraria h_j e i corrispondenti rapporti dei valori massimi:

| | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t (minuti) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 10 | 15 | 30 | 45 |
| $r_{\delta}=h_{\delta}/h_j$ | 0.130 | 0.180 | 0.229 | 0.272 | 0.322 | 0.489 | 0.601 | 0.801 | 0.913 |
| $r_{\delta m}=h_{\delta m}/h_{jm}$ | 0.155 | 0.178 | 0.215 | 0.241 | 0.304 | 0.449 | 0.568 | 0.700 | 0.799 |

Tabella 10 – Rapporto tra altezza di pioggia sub-oraria – Milano Monviso

Applicando la formula di Bell indicata, si ottengono i seguenti risultati:

$$r_s=(0.54t^{0.25}-0.50)$$

| | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t (minuti) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 45 | 50 |
| r_s | 0.307 | 0.460 | 0.563 | 0.642 | 0.707 | 0.764 | 0.858 | 0.899 | 0.936 |

Tabella 11 – Rapporto tra altezza di pioggia di durata inferiore ad un'ora – equazione di Bell

I valori ottenuti utilizzando l'equazione di Bell si discostano quindi di poco dai valori riscontrati sperimentalmente anche in Italia sopra riportati e si possono considerare affidabili per il calcolo delle precipitazioni per periodi inferiori a 1 ora.

Quindi ai fini della valutazione delle altezze di pioggia nei bacini con tempo di corrivazione inferiore a 1 ora si adotta la relazione:

$$\frac{P_T^t}{h_T^{60}} = (0.54t^{0.25} - 0.50)$$

Nota l'altezza di pioggia h_t relativa all'evento di durata t , passando ai logaritmi, le coppie altezza di pioggia-durata vengono regolarizzate con l'equazione di una retta dove il termine noto indica il parametro a e il coefficiente angolare rappresenta il parametro n' .

Nella seguente tabella i parametri a e n' delle leggi di probabilità pluviometrica per eventi di durata inferiore all'ora misurati in minuti per i vari tempi di ritorno:

| Tratto | Cella | a' (mm/min) | n' |
|----------------------------|----------------------|-------------|--------|
| Bacino Km 16+385 | DG65 - $Tr=200$ anni | 14.063 | 0.4708 |
| Bacino Km 20+646 | DF66 - $Tr=200$ anni | 13.888 | |
| Cavalcaferrovia km 15+431 | DH66 - $Tr=100$ anni | 11.938 | |
| Cavalcaferrovia km 18+6121 | DF65 - $Tr=100$ anni | 12.518 | |

Tabella 12- Parametri CPP per piogge sub-orarie $t < 1h$

Le curve di possibilità pluviometrica dipendenti dai parametri precedentemente riportati per durata inferiore ad un'ora (stimate con il metodo di Bell), riferite al progetto in essere, sono riportate di seguito con tempo t espresso in minuti.

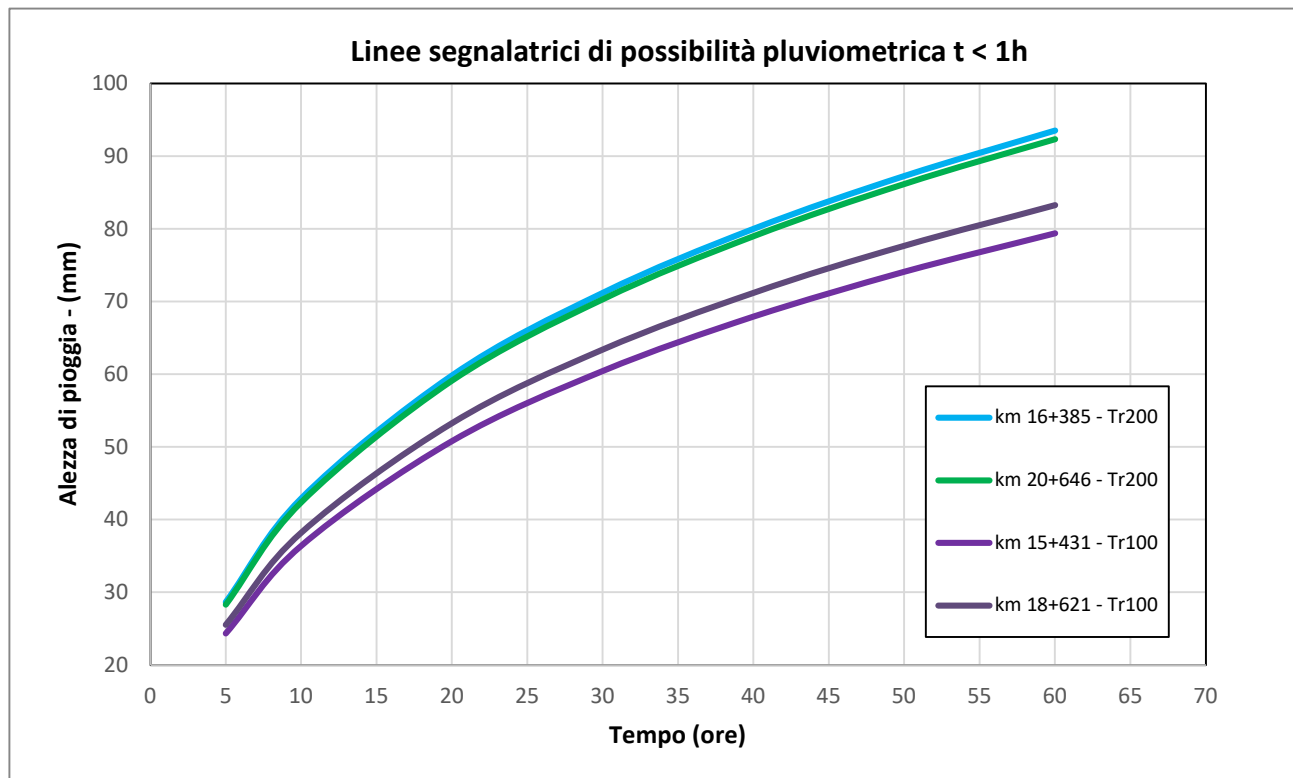



Figura 27 – Curve di possibilità pluviometrica per piogge sub-orarie $t < 1h$

| | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

41 di 19

5.5 Sintesi dei risultati

Nell'ambito dello studio idrologico sono stati stimati i parametri della legge di possibilità pluviometrica per i differenti tempi di ritorno al fine di calcolare, mediante un modello di trasformazione afflussi-deflussi, le portate di progetto che interessano i manufatti idraulici. I tempi di ritorno (Tr) prescritti dal Manuale di Progettazione ferroviaria variano infatti a seconda del tipo di manufatto idraulico:

- Drenaggio della piattaforma (cunetta, tubazioni..):

| | Tr (anni) |
|---------------------|-----------|
| Linea ferroviaria | 100 |
| Deviazioni stradali | 25 |

- Fossi di guardia:

| | Tr (anni) |
|---------------------|-----------|
| Linea ferroviaria | 100 |
| Deviazioni stradali | 25 |

- Manufatti di attraversamento (ponti e tombini):

| | Tr (anni) |
|---------------------|-----------|
| Linea ferroviaria | 200 |
| Deviazioni stradali | 200 |

Nel progetto in essere si è scelto di utilizzare la parametrizzazione della LSPP derivanti dallo studio delle piogge definito dal metodo indicato dall'analisi statistica regionale delle piogge – PAI *nel Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)*, all'art.10 delle *Norme di attuazione* che rimanda all'*allegato 3_Distribuzione spaziale delle precipitazioni intense del PAI 7*.

Si riassumono nella seguente tabella i parametri a e n delle leggi di probabilità pluviometrica per eventi di durata superiore all'ora misurati in ore per i vari tempi di ritorno:

$$h_{Tr}(t) = a \cdot (t)^n$$

| Tratto | Cella | a | n |
|------------------|----------------------|---------|---------|
| Bacino Km 16+385 | DG65 - $Tr=200$ anni | 93.2604 | 031286 |
| Bacino Km 20+646 | DF66 - $Tr=200$ anni | 92.1003 | 0.30556 |

Tabella 13- Parametri CPP di progetto per piogge extraorarie

Si riassumono nella seguente tabella i parametri a e n' delle leggi di probabilità pluviometrica per eventi di durata inferiore all'ora misurati in minuti per i vari tempi di ritorno:

$$h_{Tr}(t) = a' \cdot (t)^{n'}$$

| Tratto | Cella | a' (mm/min) | n' |
|----------------------------|----------------------|---------------|--------|
| Bacino Km 16+385 | DG65 - $Tr=200$ anni | 14.063 | 0.4708 |
| Bacino Km 20+646 | DF66 - $Tr=200$ anni | 13.888 | |
| Cavalcaferrovia km 15+431 | DH66 - $Tr=100$ anni | 11.938 | |
| Cavalcaferrovia km 18+6121 | DF65 - $Tr=100$ anni | 12.518 | |

Tabella 14- Parametri CPP di progetto per piogge sub-orarie $t < 1h$

| | | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 | REV. A |

6 STIMA DELLE PORTATE DI PIENA

Per la determinazione della portata massima di piena, con riferimento alle indicazioni dell'Autorità di Bacino descritte nel capitolo 6 del *Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) "Direttiva Sulla Piena Di Progetto Da Assumere Per Le Progettazione Le Verifiche Di Compatibilità Idraulica* (Adottato con deliberazione del Comitato Istituzionale n. 18 in data 26 aprile 2001)", vengono utilizzati metodi indiretti nei casi in cui non sono disponibili valori di portata misurati. Uno dei metodi che può essere utilizzato è il metodo cinematico che poggia la sua validità sulla conoscenza delle caratteristiche fisiche e pedolitologiche del bacino ed in parte sull'assunzione di trascurare la capacità d'invaso della rete minore in quanto non significativamente drenante.

La determinazione del tempo di corrivazione (t_c) nonché del coefficiente di deflusso (ϕ) richiedono la conoscenza del reticolo idrografico afferente alla sezione di chiusura e delle caratteristiche fisiche e morfometriche del bacino ad esso sotteso, le quali possono essere ricavate dall'analisi delle carte a curve di livello.

Una volta, infatti, delimitata sulle carte a curve di livello la porzione di bacino sottesa dalla sezione di chiusura, ossia la posizione dello spartiacque superficiale del bacino, è possibile stabilire, mediante la sua planimetrazione, la superficie che contribuisce alla formazione del deflusso di piena.

Sempre dall'esame cartografico, possono essere desunte la lunghezza dell'asta fluviale compresa all'interno del bacino e vari valori dell'altitudine: l'altitudine della sezione di chiusura, l'altitudine massima e media del bacino e l'altitudine massima dell'asta fluviale.

La massima altitudine dell'asta fluviale e quella della sezione di chiusura consentono di ricavare la pendenza media del tratto di fiume posto all'interno del bacino. Per ricavare, invece, l'altitudine media del bacino occorre costruire la curva ipsografica: l'altitudine media è, quindi, data dall'altezza del rettangolo avente per base la superficie totale del bacino (nell'opportuna scala grafica di rappresentazione) ed area pari a quella sottesa dalla curva ipsografica, essa corrisponde quindi al valor medio dell'integrale della curva ipsografica.

Una volta stimati i valori al contorno (t_c e ϕ) è possibile procedere alla determinazione della portata al colmo, in m^3/s , attraverso la formula "razionale":

$$Q = \frac{A \cdot \phi \cdot i(t_c; T_R)}{3,6} \quad (\text{Eq. 9})$$

con i seguenti significati per i simboli utilizzati:

- Q = portata al colmo [m^3/s];
- A = superficie del bacino [Km^2];
- $i(t_c; T_R)$ = intensità di pioggia nel tempo di corrivazione t_c per dato tempo di ritorno T_R [mm/h];
- φ = coefficiente di deflusso.

Il metodo razionale considera, quindi, il bacino idrografico come una singola unità e stima il valore al colmo della portata con le seguenti assunzioni:

- la precipitazione è uniformemente distribuita sul bacino;
- la portata stimata ha lo stesso tempo di ritorno T_R di quello dell'intensità di pioggia;
- il tempo di formazione del colmo di piena è pari a quello della fase di riduzione;
- l'intensità di pioggia ha una durata pari a quella del tempo di corrivazione t_c .

6.1 Tempo di corrivazione

Il tempo di corrivazione è definito in via teorica come il tempo che impiega la precipitazione che cade nella parte più distante del bacino a raggiungere la sezione terminale; una definizione forse migliore è che esso rappresenta l'intervallo di tempo dall'inizio della precipitazione oltre al quale tutto il bacino contribuisce al deflusso nella sezione terminale.

Anche in questo caso si possono utilizzare più metodi a confronto:

- GIANDOTTI (bacini medio – grandi con superfici maggiori di $170 km^2$)

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5 \cdot L}{0.8\sqrt{H_{med} - H_0}} \quad [\text{ore}]$$

dove S (km^2) superficie del bacino sotteso, H_{med} (m s.m.m.) quota media del bacino, H_0 (m s.m.m.) quota di chiusura del bacino e L (km) lunghezza dell'asse della valle del fiume.

- VIPARELLI

$$t_c = \frac{L}{v} \quad [\text{ore}]$$

essendo L (m) la lunghezza dell'asta principale e v (m/s) la velocità di scorrimento dell'acqua nel percorso relativo sia ai versanti che alla rete idrografica, ritenuta dall'Autore pari a $1 - 1,5$ m/s.

- PUGLISI – ZANFRAMUNDO: ($43 km^2 < S < 94 km^2$)

$$t_c = 6 \cdot \frac{L^{2/3}}{d^{1/3}} \quad [\text{ore}]$$

essendo L [km] e d [m] rispettivamente la lunghezza e il dislivello dell'asta principale.

- KIRPICH: ($0.005 \text{ km}^2 < S < 0.45 \text{ km}^2$)

$$t_c = 0.95 \cdot L^{0.77} \cdot d^{-0.385}$$

essendo d il dislivello dell'asta principale del corso d'acqua ed L la lunghezza dell'asta in km

- TURAZZA – VENTURA: per reti di bonifica

$$t_c = 7.56\sqrt{S}$$

con S superficie del bacino [km^2].

- VENTURA: ($5 \text{ km}^2 < S < 10 \text{ km}^2$)

$$t_c = 0.1272\sqrt{(S/i_m)}$$

con S superficie del bacino [km^2] ed i_m pendenza media del bacino.;

Due dei bacini in questione hanno superfici inferiori a 0.45 ha e il terzo misura 0.67 ha; si ritiene corretto applicare il metodo di Kirpich per tutti senza tenere in considerazione le altre metodologie non adatte ai casi in disamina.

Nel caso in cui la formulazione indicata restituisca tempi di ritorno inferiore ai 10 minuti si impone comunque un valore pari a $t_c=10$ minuti ritenendo non verosimili durate inferiori.

Per completezza di studio si riportano di seguito i valori dei tempi di corrivazione per i vari bacini stimati tramite le formule precedentemente citate; si evidenzia come in ogni caso i risultati restituiti dalla metodologia di Kirpich siano i più cautelativi.

| Prog. | Giandotti | Viparelli | Puglisi Zanframundo | Kirpich | Turazza Ventura | Ventura | t_c progetto | t_c progetto |
|--------|-----------|-----------|------------------------|----------------|--------------------|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| km | [h] | [h] | [h] | [h] | [h] | [h] | [h] | [min] |
| 16+385 | 0.17 | 0.16 | 0.74 | 0.05 | 1.01 | 0.05 | 0.17 | 10.00 |
| 20+646 | 0.70 | 0.99 | 1.80 | 0.28 | 6.20 | 0.45 | 0.28 | 16.56 |

Tabella 15: Tempi di corrivazione

| | | | | | | |
|---|--|----------|-------|-------------|-----------|------|
|  | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. |
| | LC00 | 01 | R26 | RHID0001001 | A | |

6.2 Coefficiente di deflusso

La stima del coefficiente di deflusso è estremamente difficile e costituisce il maggiore elemento di incertezza nella valutazione della portata.

Il coefficiente di deflusso tiene conto di tre fattori:

- il fattore di ragguaglio φ_r della precipitazione alla superficie del bacino idrografico considerato,
- il fattore di trattenuta del terreno φ_d , funzione della capacità di assorbimento del terreno (rapporto tra l'altezza di pioggia netta h_e e l'altezza di pioggia totale h),
- il fattore di laminazione φ_l che dipende dalla capacità di invaso sulla superficie del bacino e nel reticolo idrografico dello stesso.


In via teorica l'utilizzo della formula razionale per convertire una precipitazione di assegnato tempo di ritorno T in una portata al colmo con pari valore di T richiede di caratterizzare anche il coefficiente di deflusso φ con un valore medio di ricorrenza. Ciò è possibile solamente quando si disponga di serie storiche sufficientemente estese di dati pioggia e di portate al colmo.

Il parametro tiene conto in forma implicita di tutti i fattori che intervengono a determinare la relazione tra la portata al colmo e l'intensità media di pioggia; si utilizzano normalmente valori di riferimento, tratti dalla letteratura scientifica, che spesso sono adattabili con difficoltà alle effettive condizioni del bacino in studio.

Per il calcolo del coefficiente di deflusso che caratterizza la quota parte di precipitazione che effettivamente produce ruscellamento e scorrimento superficiale si fa riferimento al metodo del Curve Number sviluppato dal SCS (Soil Conservation Service - 1972)

6.3 Metodo del CN - SCS

La determinazione della pioggia efficace, ovvero della frazione di pioggia che defluisce direttamente alla rete idrografica, viene condotta con il metodo del Curve Number (CN) proposto dal Soil Conservation Service (1972), che determina tale volume di deflusso tenendo conto della variazione del grado di saturazione del terreno durante l'evento meteorico. Questo metodo è stato scelto tra quelli disponibili, per la maggiore consistenza fisica dei suoi parametri che lo rende applicabile anche nel caso di assenza di osservazioni di fenomeni reali.

| | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO TRATTA ALABATE CAMERLATA - LECCO | | | | |
| | RELAZIONE IDROLOGICA | COMMESSA LC00 | LOTTO 01 | CODIFICA R26 | DOCUMENTO RHID0001001 |

47 di 19

Il metodo si basa sull'assunzione che il volume specifico (altezza) di pioggia netta (efficace) P_{net} risulta legato al volume specifico (altezza) di pioggia lorda P (pioggia effettiva) caduta nel medesimo intervallo temporale dalla relazione:

$$P_{net} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \text{ [mm]}$$

nella quale S è il massimo volume specifico di acqua che il terreno può trattenere in condizione di saturazione ed I_a è la cosiddetta perdita iniziale, vale a dire quel valore limite di altezza di pioggia che il terreno può trattenere nella fase iniziale del fenomeno senza che si abbia creazione di deflusso; il parametro S corrisponde al volume idrico trattenuto dal terreno e dalla vegetazione, e quindi sottratto al deflusso superficiale dopo l'istante in cui si ha $P > I_a$; fino all'istante in cui non si ha $P < I_a$ il deflusso superficiale è da ritenersi praticamente assente.

In realtà con l'introduzione della perdita iniziale I_a si vuole tenere conto anche di quel complesso di fenomeni, quali l'intercettazione da parte della vegetazione e l'accumulo nelle depressioni superficiali del terreno, che ritardano il verificarsi del deflusso superficiale. In mancanza di adeguate osservazioni utili, per la stima di I_a si può fare ricorso alla seguente relazione:

$$I_a = 0.2 \cdot S \text{ [mm]}$$

che risulta verificata in buona approssimazione.

La valutazione del valore di S può invece essere ricondotta a quella dell'indice CN (Curve Number), cui esso risulta legato dalla relazione:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \text{ [mm]}$$

L'indice CN è un numero adimensionale, compreso fra 0 e 100, funzione della permeabilità della litologia superficiale, dell'uso del suolo e del grado di saturazione del terreno prima dell'evento meteorico. Il Soil Conservation Service (SCS) sulla base della capacità di assorbimento del terreno nudo a seguito di prolungato adacquamento, ha classificato i vari tipi di suolo in quattro gruppi (A, B, C, D):

- Gruppo A - Scarsa potenzialità di deflusso: comprende forti spessori di sabbia con scarsissimo limo e argilla; anche forti spessori di ghiaie profonde, molto permeabili.
- Gruppo B – Potenzialità di deflusso moderatamente bassa: comprende la maggior parte degli strati sabbiosi meno spessi che nel gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione.
- Gruppo C – Potenzialità di deflusso moderatamente alta: comprende suoli sottili e suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se meno che nel gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.
- Gruppo D - Potenzialità di deflusso molto elevata: comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie.

Per tali gruppi si riportano i valori del parametro CN corrispondenti a diverse tipologie di utilizzo del suolo.

| Tipologia di uso del territorio | A | B | C | D |
|--|----------|----------|----------|----------|
| Tessuto urbano continuo | 89 | 92 | 94 | 95 |
| Tessuto urbano discontinuo | 77 | 85 | 90 | 92 |
| Unità industriali o commerciali | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Reti di strade e binari e territori associati | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Aree portuali | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Aeroporti | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Luoghi di estrazioni di minerali | 76 | 85 | 89 | 91 |
| Discariche | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Luoghi di costruzione | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Aree di verde urbano | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Strutture di sport e tempo libero | 68 | 79 | 86 | 89 |
| Seminativi non irrigati | 61 | 73 | 81 | 84 |
| Suolo permanentemente irrigato | 67 | 78 | 85 | 89 |
| Risaie | 62 | 71 | 78 | 81 |
| Vigneti | 76 | 85 | 90 | 93 |
| Frutteti e frutti minori | 43 | 65 | 76 | 82 |
| Oliveti | 43 | 65 | 76 | 82 |
| Pascoli | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Colture annuali associate a colture permanenti | 61 | 73 | 81 | 84 |
| Coltivazione complessa | 61 | 73 | 81 | 84 |
| Suoli principalmente occupati dall'agricoltura | 61 | 73 | 81 | 84 |
| Aree di agro | 43 | 65 | 76 | 82 |
| Foreste a latifoglie | 36 | 60 | 73 | 79 |
| Foreste a conifere | 36 | 60 | 73 | 79 |
| Foreste miste | 36 | 60 | 73 | 79 |
| Prateria naturale | 49 | 69 | 79 | 84 |

| Tipologia di uso del territorio | A | B | C | D |
|-----------------------------------|----|----|----|----|
| Lande e brugheria | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Vegetazione sclerofila | 35 | 56 | 70 | 77 |
| Transizione suolo boscoso/arbusti | 35 | 56 | 70 | 77 |
| Spiagge, dune e piani di sabbia | 46 | 65 | 77 | 82 |
| Roccia nuda | 96 | 96 | 96 | 96 |
| Aree scarsamente vegetate | 63 | 77 | 85 | 88 |
| Aree bruciate | 63 | 77 | 85 | 88 |
| Ghiacciai e nevi perenni | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Paludi interne | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Torbiere | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Paludi di sale | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Saline | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Piani intertidali | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Corsi d'acqua | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Corpi d'acqua | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Lagune costiere | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Estuari | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Mare | 98 | 98 | 98 | 98 |

Tabella 16: Metodo SCS-CN; valori del "Curve Number" CN per i diversi tipi di suolo in funzione dell'uso del suolo per condizioni di umidità iniziale (antecedent moisture conditions – AMC) medie (classe II)

I valori del CN riportati nella Tabella precedente si riferiscono ad una condizione di umidità del suolo all'inizio dell'evento meteorico di tipo standard, precisamente quella intermedia indicata come AMC II (Antecedent Moisture Condition II).

Poiché il rifiuto del terreno è un fenomeno dinamico, che dipende dallo stato del sistema, ovvero dallo stato di imbibimento del bacino, si assume che il valore di CN possa variare in relazione alle condizioni iniziali di imbibimento all'atto della piena. Lo stato di imbibimento viene espresso, in modo qualitativo, in base ad un indice di pioggia dato dall'altezza totale di pioggia caduta nei cinque giorni che precedono l'evento di piena, API₅. A seconda del valore di API₅, vengono identificate le tre classi AMC I, II e III, che rappresentano rispettivamente terreno inizialmente asciutto, mediamente imbibito e fortemente imbibito.

| CLASSE AMC | Altezza di pioggia nei 5 giorni precedenti (mm) | |
|--------------|---|----------------------|
| | Stagione di riposo | Stagione di crescita |
| I - asciutta | < 12.7 | < 35.5 |
| II - media | 12.7 - 28.0 | 35.5 - 53.3 |
| III - umida | > 28.0 | > 53.3 |

Tabella 17: definizione della classe di umidità in base al parametro API₅

Noto il valore di CN per le condizioni medie di imbibimento, per passare a condizioni di umidità iniziale asciutte (classe AMC I) o umide (classe AMC III), si utilizzano le curve riportate di seguito.

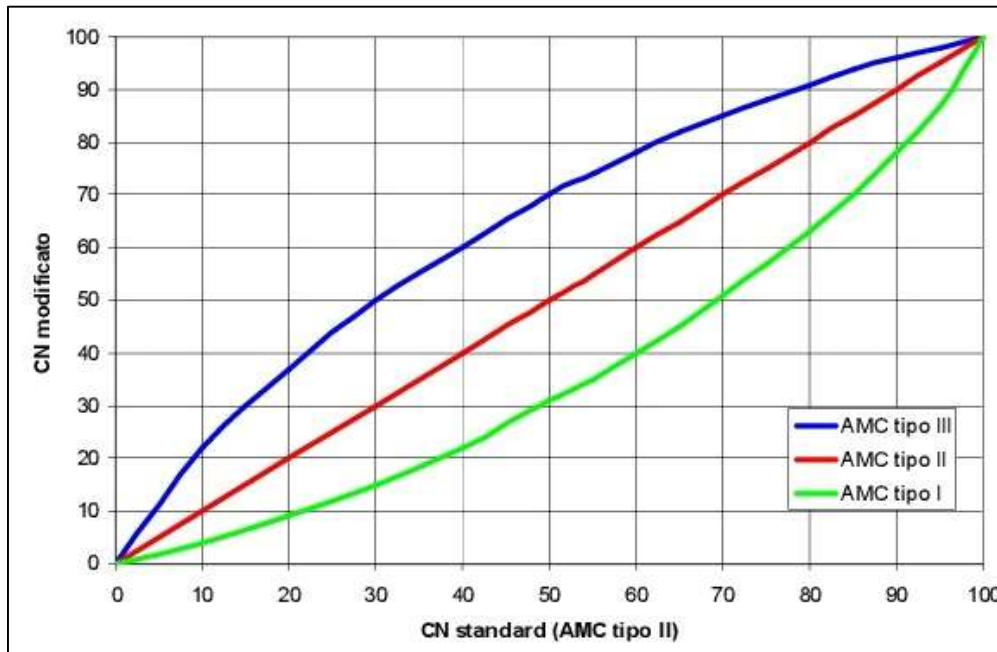


Figura 28 - curve di conversione dei valori di CN per le diverse condizioni di umidità del suolo antecedenti l'evento

Tali curve possono essere interpolate mediante le seguenti relazioni:

$$CN(I) = \frac{4.2 \cdot CN(II)}{10 - 0.058 \cdot CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0.13 \cdot CN(II)}$$

Nel caso di terreni variegati possono essere identificate alcune categorie fondamentali per definire un valore globale del CN, pesato in ragione dell'estensione delle sottozone con le quali si è suddiviso il bacino.

Una volta calcolata la pioggia netta (efficace) P_{net} , il coefficiente di deflusso è pari a:

$$\varphi = \frac{P_{net}}{P}$$

Nel caso in esame, al fine di definire il CN per le varie porzioni dei bacini in studio, sono stati analizzati i seguenti documenti:

- “Corinne Land Cover” anno 2018 shapefile desunto dal Geoportale della Regione Lombardia, stima dell’uso e copertura del suolo realizzata in diverse edizioni nell'ambito del progetto DUSAF (Destinazione d'Uso del Suolo Agricolo e Forestale).;
- Foto satellitari, al fine di valutare eventuali variazioni significative rispetto a quanto riportato nelle suddette carte;

Si riportano nelle tabelle seguenti i risultati delle elaborazioni dei valori del CN II per i bacini oggetto di studio al variare della potenzialità di deflusso.

| Bacino km | A | B | C | D |
|-----------|------|------|------|------|
| 16+385 | 56.4 | 71.4 | 80.2 | 84.0 |
| 20+646 | 62.3 | 76.2 | 83.9 | 87.4 |

Tabella 18: Metodo SCS-CN; valori del “Curve Number” CN per i diversi bacini per condizioni di umidità iniziale (antecedent moisture conditions – AMC) medie (classe II)

Tramite analisi della copertura del suolo del territorio e delle informazioni desunte dalle carte geologiche dell’ISPRA si stimano le classi di potenzialità di deflusso dei bacini e so definiscono i CN II da applicare per il calcolo della pioggia efficace e dunque la portata massima defluente.

Nella tabella successiva si indicano i valori di riferimento utilizzati nella stima della portata di progetto.

| Bacino km | Classe potenzialità di deflusso | CN II |
|-----------|---------------------------------|-------|
| 16+385 | B | 71.4 |
| 20+646 | C | 83.9 |

Tabella 19: Metodo SCS-CN; valori del “Curve Number” CN (classe II) dei bacini

6.4 Portate di progetto

Definito il CN è possibile stimare la portata di progetto; essa è esprimibile come prodotto tra l’intensità dell’evento meteorico per il coefficiente di deflusso e la superficie drenata. La prima è definita dalle curve di possibilità pluviometrica e l’ultima è geometricamente definita.

Il coefficiente di deflusso si ricava tramite il rapporto tra la pioggia lorda e la pioggia efficace ottenuta tramite l’applicazione del metodo del CN.

In via del tutto cautelativa si procede al calcolo applicando il CN III e si impone un coefficiente di deflusso ϕ minimo pari a $\phi = 0.30$.

Nella tabella seguente si riportano tutti i parametri in gioco per la stima delle portate di progetto associate ad un tempo di ritorno $Tr=200$ anni.

| Bacino | Parametri della CPP per durate inferiori all'ora | | $h_{200}(t_c)$ Pioggia lorda (mm) | $i_{200}(t_c)$ Intensità pioggia lorda (mm/h) | CN II | CN III | $P(t_c)$ pioggia efficace mm | Coeff. di deflusso φ | $Q(t_c)_{200}$ portata di progetto m^3/s |
|--------|--|---------|--|---|----------|-----------|---------------------------------------|---------------------------------|---|
| | km | a' (mm) | | | | | | | |
| 16+385 | 13.318 | 0.4708 | 39.377 | 236.260 | 71.44 | 85.3 | 12.63 | 0.32 | 0.38 |
| 20+646 | 13.888 | 0.4708 | 52.070 | 188.647 | 83.85 | 92.4 | 33.25 | 0.64 | 22.54 |

Tabella 20: Portate di progetto dei bacini in disamina