

Centro Studi sul Territorio  
“Lelio Pagani”

# A PARTIRE DA QUEL CHE RESTA

*Il disastro del Gleno tra storia e paesaggio,  
memoria e futuro (1923-2023)*

A cura di Lorenzo Migliorati

**FrancoAngeli** 





## **OPEN ACCESS** la soluzione FrancoAngeli

Il presente volume è pubblicato in open access, ossia il file dell'intero lavoro è liberamente scaricabile dalla piattaforma **FrancoAngeli Open Access** (<http://bit.ly/francoangeli-oa>).

**FrancoAngeli Open Access** è la piattaforma per pubblicare articoli e monografie, rispettando gli standard etici e qualitativi e la messa a disposizione dei contenuti ad accesso aperto. Oltre a garantire il deposito nei maggiori archivi e repository internazionali OA, la sua integrazione con tutto il ricco catalogo di riviste e collane FrancoAngeli massimizza la visibilità, favorisce facilità di ricerca per l'utente e possibilità di impatto per l'autore.

Per saperne di più: [Pubblica con noi](#)

I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: [www.francoangeli.it](http://www.francoangeli.it) e iscriversi nella home page al servizio "[Informatemi](#)" per ricevere via e-mail le segnalazioni delle novità.

Centro Studi sul Territorio  
“Lelio Pagani”

A PARTIRE  
DA QUEL CHE RESTA

*Il disastro del Gleno tra storia e paesaggio,  
memoria e futuro (1923-2023)*

A cura di Lorenzo Migliorati

FrancoAngeli 

La pubblicazione di questo volume è stata resa possibile dal concreto sostegno dell'Università degli Studi di Bergamo e di numerose istituzioni pubbliche e private del territorio della Valle di Scalve.

Le autrici e gli autori ringraziano la Commissione per il Centenario del disastro del Gleno per il supporto e la fiducia.



Copyright © 2023 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore ed è pubblicata in versione digitale con licenza *Creative Commons Attribuzione-Non Commerciale-Non opere derivate 4.0 Internazionale* (CC-BY-NC-ND 4.0)

*L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni della licenza d'uso dell'opera previste e comunica sul sito <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>*

# Indice

<b>Prefazione</b> , di <i>Sergio Cavalieri</i>	pag.	7
<b>Presentazione</b> , di <i>Lorenzo Migliorati</i>	»	9

## I. I fatti

<b>1. «Laggiù lo spettacolo è terrificante». Echi del disastro del Gleno nella stampa italiana</b> , di <i>Federico Mazzei e Gemma Pizzoni</i>	»	15
<b>2. «Per vendicare i morti ci avete accusati». Questioni di natura politica attorno al processo del Gleno</b> , di <i>Jacopo Perazzoli</i>	»	43
<b>3. «Ad ogni modo c'era la colpa...». Note storico giuridiche a margine del disastro del Gleno</b> , di <i>Alan Sandonà</i>	»	55
<b>4. Governance e accounting nel post disastro del Gleno: soccorsi e risarcimenti</b> , di <i>Stefania Servalli e Andrea Pulcini</i>	»	95

## II. Luoghi

<b>5. La diga del Gleno: storia, rilievo, diagnostica e analisi strutturali nel centenario dal disastro</b> , di <i>Michele Bianchessi, Simone Rapelli, Ruggero Folli, Pietro Azzola, Denny Coffetti, Monica Resmini, Alessio Cardacci e Andrea Belleri</i>	»	115
---	---	-----

<b>6. Dighe e invasi: alcune considerazioni nel centenario del disastro nella valle del Gleno</b> , di <i>Maria Grazia D'Urso e Joel Aldrighettoni</i>	pag.	131
<b>7. Trame territoriali tra memorie interrotte, paesaggi ritrovati e rigenerazione comunitaria nella Valle di Scalve</b> , di <i>Federica Burini, Renato Ferlinghetti e Alessandra Ghisalberti</i>	»	151
<b>8. La complessità territoriale della Diga del Gleno tra analisi, percezione e valorizzazione</b> , di <i>Alice Bassanesi, Matteo Locatelli e Mikel Magoni</i>	»	187
<b>III. La memoria</b>		
<b>9. “After the Deluge”. Il disastro del Gleno tra memoria collettiva e trauma culturale</b> , di <i>Lorenzo Migliorati</i>	»	207
<b>10. La natura sociale del disastro e le conseguenze invisibili sulla comunità</b> , di <i>Chiara Pini</i>	»	225
<b>11. Disastri della modernità industriale. Ripensare le Alpi cent'anni dopo il Gleno</b> , di <i>Gianluca Lanfranchi</i>	»	243
<b>Postfazione</b> , a cura della <i>Commissione per il centenario del Gleno</i>	»	261
<b>Riferimenti bibliografici</b>	»	263
<b>Le autrici e gli autori</b>	»	279

## 6. Dighe e invasi: alcune considerazioni nel centenario del disastro nella valle del Gleno

di Maria Grazia D'Urso e Joel Aldrighettoni<sup>1</sup>

### Introduzione

L'Eco di Bergamo del 2 dicembre 1923 scriveva: «I giornali non riusciranno a dare ai lettori neanche una pallida idea dell'enormità del disastro che ha colpito la Valle di Scalve. Una montagna di acqua si è staccata dal Gleno... tutto schiantando e tutto travolgendo».

Quando si parla di incidenti associati alle dighe, la memoria collettiva torna al Vajont, a quei tragici accadimenti che, in pochi minuti, provocarono la morte di circa 2000 persone e notevoli danni, nonostante le conoscenze ingegneristico-idrauliche, geologiche e tecniche fossero già avanzate in quegli anni e, in particolar modo nel nostro Paese. Catastrofi simili, forse meno note, sono accadute in altri luoghi e in altri tempi, provocando perdite di vite umane e distruzione di centri abitati e attività lavorative. Solo per citarne alcune possiamo menzionare i disastri della valle del Gleno (Bergamo, 1923), Molare (Alessandria, 1935), Frejus (Costa Azzurra, 1959), Malpasset (Francia, 1959), Val di Stava (Trento, 1985), ma gli incidenti e le tragedie riguardano tutti i continenti e coinvolgono tanto i paesi ricchi quanto i paesi poveri.

Testimonianze di costruzione di invasi e bacini artificiali per raccogliere l'acqua sono presenti in tutti i continenti e presso tutte le civiltà.

Da migliaia di anni l'uomo costruisce dighe per bloccare o deviare il corso dei fiumi. Anticamente gli Egizi costruirono dighe sul fiume Nilo per irrigare terreni molto aridi. In Egitto e in altre aree del Medio Oriente, probabilmente già a partire dal 3000 a.C, furono costruite barriere per regolare il corso dei fiumi. Gli stessi Romani si dimostrarono abili costruttori di dighe. Ancora oggi si usano le dighe per creare sistemi di irrigazione che rendono coltivabili terreni dove altrimenti l'agricoltura sarebbe impossibile. Una diga

---

<sup>1</sup> Maria Grazia D'Urso è autrice del lavoro, frutto della riflessione condivisa con il co-autore; il paragrafo *La valle del Gleno - Un'analisi della sua morfologia attraverso lo studio del DTM*, è frutto della riflessione condivisa di Joel Aldrighettoni.

è un'opera artificiale di sbarramento di un corso d'acqua che serve a regolare il deflusso di un corso d'acqua naturale, a proteggere un tratto di costa o un porto, oppure a formare un bacino o un serbatoio al servizio di una centrale idroelettrica. Per comprendere l'importanza di queste costruzioni è sufficiente pensare che la metà delle dighe esistenti nel mondo è stata realizzata con lo scopo di supportare l'agricoltura. Il rapporto della Commissione mondiale sulle dighe (*The report of the World commission on dams*) stima che quasi quattro campi irrigati su dieci ricevano acqua direttamente da questi impianti, con il risultato che fra il 12 e il 16% della produzione del cibo nel mondo dipende direttamente dalle dighe. In altre parole, se nel mondo non vi fossero le dighe, il cibo a disposizione diminuirebbe quasi di un sesto. La gran parte dei laghi artificiali sono realizzati allo scopo di produrre energia elettrica attraverso degli impianti di produzione idroelettrici. In tale situazione il corso di un fiume viene interrotto per mezzo di una diga, allo scopo di alzare il livello dell'acqua e sfruttare l'energia della caduta. L'acqua è da sempre fonte di vita e di energia per l'uomo e per tutte le specie viventi animali e vegetali. Un esempio curioso è rappresentato nel mondo animale dai castori (*Castor Linnaeus, 1758*) un genere di roditori semiacquatici, unici rappresentanti viventi della famiglia dei castoridi, un tempo molto più diffusa, e tale specie è nota per l'abilità con cui questi roditori costruiscono dighe. Il castoro, come l'uomo, è una delle specie animali capaci di plasmare l'ambiente a proprio favore attraverso la creazione di sbarramenti fluviali. Le dighe costruite dai castori sono composte in buona parte da alberi abbattuti, rocce, fango, erba e altri materiali reperibili nei pressi del corso d'acqua; inoltre esse vengono riparate e ingrandite nel tempo. Grazie alle dighe costruite dai castori, il deflusso dell'acqua rallenta e gran parte di essa viene immagazzinata nel terreno, dove le radici delle piante possono accedervi anche nei periodi di siccità. Questo aiuta a mantenere la vegetazione rigogliosa, creando una tana a prova di incendi. L'edificazione di sbarramenti e dighe è, dunque, un uso antico che risponde a esigenze comuni di controllo delle acque superficiali, irrigazione, potabilizzazione e produzione energetica; esse rappresentano una parte normale del paesaggio antropizzato in ogni continente. Probabilmente tale ordinatorietà ne ha fatto sottovalutare la diffusione e i rischi ad esse connessi. Soltanto negli ultimi cento anni i disastri originati da incidenti legati a dighe e sbarramenti hanno causato 300 mila morti, oltre a danni e cose, con oltre molti milioni di persone che hanno perduto ogni bene. Eppure, quando si parla di catastrofi e disastri, si pensa prevalentemente a terremoti, eruzioni, maremoti, incendi, esplosioni o altri eventi; raramente alle alluvioni e inondazioni collegate a dighe, traverse e sbarramenti. Eppure gli incidenti si verificano in ogni parte del mondo e in alcune di esse la diffusione di tali rischi è maggiore, come in Italia, ove su tutto il territorio insistono dighe e sbarramenti di ogni tipo, dalle grandi dighe che deviano i



corsi di acqua per alimentare le centrali idroelettriche, alle piccole dighe che creano invasi per uso potabile o irriguo.

### **1. Stato dell'arte. Le maggiori dighe nel mondo**

Le dighe, presenti nel mondo in circa ottocentomila esemplari di varie tipologie, rappresentano una parte importante delle infrastrutture umane e svolgono una funzione importante nella vita di miliardi di persone ogni giorno. In relazione al volume dell'invaso, alle dimensioni della struttura e a varie altre metriche si può tentare di fare una classificazione delle dighe più grandi esistenti al mondo (fig. 18). La diga di Assuan, in Egitto, è considerata la più grande per volume di vaso. Il suo serbatoio, il lago Nasser (dal nome dell'ex presidente Gamal Nasser) ha una capacità di stoccaggio dell'acqua di 132 miliardi di metri cubi. Genera 2.100 MW e fornisce anche acqua per l'agricoltura in Egitto e Sudan. La diga, eretta dopo la costruzione della diga bassa di Assuan, completata nel 1902, è ritenuta fondamentale per l'industrializzazione dell'Egitto, con la sua capacità di controllare le inondazioni e generare elettricità. La diga di Guri è la seconda per volume del bacino idrico; si trova in Venezuela, a 100 chilometri a monte del fiume Caroni nel Canyon Neucima nella regione dell'Orinoco ed ha un serbatoio di 135 miliardi di metri cubi. Alta 162 metri (531 piedi) e lunga 7,5 chilometri, per molti anni è stata la più potente al mondo con una capacità di 10.200 MW. La costruzione è stata realizzata in due fasi; iniziata nel 1963 e proseguita nel 1986, attualmente è in corso un progetto di ammodernamento. La diga di Samara è al terzo posto, situata sul fiume Tigri in Iraq. Il suo scopo principale era deviare le acque alluvionali del Tigri verso il lago Tharthar, ma produce anche energia idroelettrica. È stata completata nel 1956. La diga di Tarbela è la più grande per volume di struttura. Si trova sul fiume Indo in Pakistan ed è stata completata nel 1976. La diga è alta 143 metri (469 piedi) sopra il letto del fiume, mentre il bacino ha una superficie di 250 chilometri quadrati. Il suo obiettivo principale era quello di fornire acqua per l'irrigazione immagazzinando i flussi durante il periodo dei monsoni. La costruzione della diga è stata realizzata in tre fasi per soddisfare le esigenze di deviazione del fiume. È una delle due strutture principali sul fiume Indo; l'altra è la diga di Mangla. Ha una capacità installata di 4.888 MW, che sarà aumentata a 6.298 MW dopo il completamento del previsto quinto prolungamento della diga. La diga di Fort Peck è la seconda più grande per volume della struttura. È anche la più alta di sei enormi dighe lungo il fiume Missouri negli Stati Uniti. Ha 6.409 metri di lunghezza e 76 metri di altezza, il che la rende la più grande diga riempita idraulicamente negli Stati Uniti. La diga crea Fort Peck Lake, il quinto lago artificiale più grande degli Stati Uniti. La diga ha una capacità di 185 MW e il suo scopo principale è quello di migliorare la navigazione

sul fiume sotto Sioux City, Iowa, fino alla sua giunzione con il Mississippi. La diga di Ataturk e la diga delle Tre Gole completano la classifica delle dighe più grandi per volume del serbatoio. La diga di Ataturk, originariamente diga di Karababa, alta 169 metri e lunga 1820 metri, situata sul fiume Eufrate in Turchia, fu costruita per generare elettricità e irrigare le pianure della regione e fu completata nel 1992. L'imponente diga delle Tre Gole è la più grande centrale elettrica del mondo in termini di capacità installata, con la produzione di 22.500 MW. Si trova nel fiume Yangtze nella Cina centrale ed è stata completata nel 2006. Contiene 32 turbine principali con una capacità di 700 MW ciascuna e due piccoli generatori, raggiungendo una produzione media annua di 112 terawatt. Oltre a produrre elettricità, la diga mira ad aumentare la capacità di trasporto del fiume Yangtze. Fornendo spazio per lo stoccaggio delle inondazioni, la diga riduce il potenziale di inondazioni a valle che potrebbero colpire milioni di persone. La Cina ha descritto il progetto come un grande successo sociale ed economico, sebbene non esente da polemiche soprattutto per le ingenti risorse che sono state necessarie per trasferire oltre un milione di persone che vivevano intorno alla valle interessata dalla gigantesca costruzione. Per di più nel 2007 i geologi notarono che il peso dell'acqua dietro la diga aveva iniziato a erodere le sponde del fiume. Fino al completamento della diga delle Tre Gole in Cina nel 2006, la diga di Guri in Venezuela deteneva il titolo di più grande al mondo in termini di capacità installata. La classifica delle dighe più grandi del mondo è completata da altre enormi dighe tra cui la diga di Tarbela in Pakistan, la diga di Nurek in Tagikistan e la diga WAC Bennett in Canada. La più grande diga per altezza delle strutture è la diga di Nurek che, con un'altezza di ben 300 metri, situata nel fiume Vakhsh in Tagikistan, genera energia idroelettrica, con una capacità installata di 3.015 MW, per una produzione del 90% dell'energia elettrica nazionale. Infine la diga più grande per capacità idrica è la diga di Kariba, al confine tra Zambia e Zimbabwe; ha una capacità di stoccaggio di 185 miliardi di metri cubi d'acqua, una superficie di 5.580 chilometri quadrati e fornisce circa 6.700 miliardi di chilowattora di elettricità all'anno. Ha avuto un costo enorme, richiedendo il reinsediamento di oltre 30.000 membri della tribù Batonka dello Zambia e l'evacuazione di migliaia di animali selvatici.

## **2. Le dighe in Italia**

Dal rapporto ISPRA 323/2020 si evince che, alla data di dicembre 2020, il numero totale di grandi dighe presenti in Italia era pari a 532 di cui 367 in esercizio normale, 37 caratterizzate da invaso limitato, 93 da invaso sperimentale, 24 fuori esercizio e 11 in costruzione. Alla stessa data il numero totale di dighe presenti in Lombardia, la regione italiana con il maggior

numero di sbarramenti, era 77. Nello stesso rapporto ISPRA in relazione alle piccole dighe sono state raccolte informazioni su 26288 invasi. All'epoca della costruzione la diga del Vajont, in provincia di Pordenone, lungo il corso del fiume Vajont (1959) era lo sbarramento artificiale più grande del mondo; oggi figura al settimo posto. La seconda diga più grande d'Italia, quanto ad altezza, è la diga di Alpe Gera, in Lombardia, alta 160,5 metri seguita dalla diga di Santa Giustina, in Trentino, alta 147,5 metri. Le grandi dighe sono quelle con sbarramenti alti più di 15 metri e/o con un invaso di oltre 1 milione di metri cubi (i criteri di classificazione sono cambiati nel corso degli anni, nel 2008 si contavano 903 grandi dighe). Purtroppo, secondo i dati attualmente disponibili, delle 600 grandi dighe di interesse nazionale e con vigilanza statale, il 60% ha più di 50 anni, alcune hanno ormai compiuto il secolo di vita e un centinaio fra esse non sono ancora operative al 100% perché non collaudate in modo definitivo, con tutto ciò che ne deriva. Inoltre, il 90% è stato costruito prima dell'entrata in vigore delle attuali norme tecniche e il 70% è stato progettato senza prendere in considerazione l'attività sismica, perché al momento della costruzione non esistevano norme in tal senso. Se a questi dati si aggiunge la forte concentrazione demografica del territorio italiano, ma anche i segnali di cambiamento climatico in corso, con l'aumentato rischio di piogge improvvise ed estremamente abbondanti, il disboscamento, la scarsa cura di spazi rurali, una volta agricoli e, non ultimo e altrettanto grave, il passaggio alle Regioni del controllo di una parte di tali infrastrutture che ha prodotto norme di controllo e sicurezza diverse da un luogo all'altro, è facile intuire la complessità di queste grandi infrastrutture, non di rado trascurata. Le dighe si collocano tra le opere di ingegneria che hanno un alto potenziale di pericolosità; pertanto, la necessità di un continuo controllo del loro comportamento, durante l'esercizio, è universalmente riconosciuta e accettata in tutti i Paesi. Per quanto accennato la diga è un'opera di sbarramento a una valle o a un corso di acqua, costruita per creare una riserva di acqua da poter utilizzare per molteplici fini (produzione di energia, irrigazione, uso potabile o industriale) oppure per regolare le portate fluviali (dighe di laminazione, atte a moderare le piene e integrare le portate naturali dei periodi di magra) o anche per intercettare il corso di un fiume e facilitare la captazione dell'acqua fino alla portata che si intende derivare o, infine, per trattenere i materiali solidi trasportati dal corso di acqua. Se l'opera di sbarramento non comporta un dislivello notevole tra monte e valle si parla di dighe per derivazione o, più correntemente, di traverse fluviali. Le traverse, in generale, non causano un sensibile innalzamento del livello idrico a monte, rispetto al livello originario del corso di acqua, per cui non determinano la formazione di un lago artificiale. Pertanto sia per la loro limitata altezza sia per l'assenza di problemi connessi all'invaso di monte, presentano difficoltà costruttive molto meno impegnative delle dighe di sbarramento in senso stretto. In questo contesto ci si riferisce, in particolare, alle dighe di

sbarramento per la creazione di un invaso o lago artificiale che, nella loro problematica, assorbono e comprendono anche i problemi relativi alle traverse fluviali. La costruzione di una diga comporta problemi geologici molto complessi. La scelta della ubicazione di una diga parte da un accurato studio idrologico esteso a un periodo di più anni, che, accertate le portate idriche disponibili nonché il loro andamento e la loro durata in rapporto al bacino imbrifero sotteso, indica una o più sezioni di sbarramento che, in ragione della morfologia, potrebbero consentire la realizzazione di un invaso capace di raccogliere e trattenere le portate disponibili. L'indicazione che scaturisce da un'indagine idrologica va, quindi, verificata e controllata da un punto di vista geologico-tecnico ed è da questa verifica che deriverà il giudizio definitivo sulla fattibilità dell'opera. Questo giudizio investe diversi aspetti che possono considerarsi come problemi indipendenti l'uno dall'altro, anche se tutti insieme convergono verso un'unica finalità. I diversi problemi di carattere tecnico-progettuale da esaminare e risolvere nella progettazione di una diga per la creazione di un invaso artificiale possono così sintetizzarsi: studio accurato del bacino imbrifero delle sue caratteristiche idrauliche e idrogeologiche; impermeabilità dell'invaso; stabilità delle sponde e dei fianchi dell'invaso; interrimento dell'invaso; studio della sezione di sbarramento ai fini della scelta della struttura e per il controllo della tenuta idraulica; reperimento dei materiali per il corpo diga e per le opere connesse; condizioni geologiche per le opere di adduzione, scarico e derivazione nonché per un'eventuale centrale idroelettrica.

Tra questi aspetti, solo per citare un esempio, la tragedia del Vajont ha reso evidente, anche ai profani, l'enorme importanza che può assumere il problema della stabilità delle sponde di un lago artificiale. Il 9 ottobre 1963 una massa rocciosa di 300 milioni di metri cubi si staccava dai fianchi del monte Toc e scivolando, a velocità vertiginosa, nel lago del Vajont dislocava in pochi secondi un volume di acqua di 48 milioni di metri cubi che, tracimando sul coronamento delle diga (con i suoi 265 metri di altezza, la più alta diga dell'epoca) con un fronte alto fino a 230 metri, si abbatteva nella gola sottostante e raggiungeva la confluenza del Vajont nel Piave, sotto forma di una gigantesca onda di piena, alta circa 120 metri, che spazzava via l'abitato di Longarone, espandendosi a ventaglio lungo il corso del Piave, seminando morte e distruzione con circa 2000 vittime. Pur senza arrivare alla gravità del disastro del Vajont, il cedimento delle sponde di un lago artificiale può provocare gravissimi danni sia all'impianto stesso, fino a renderlo del tutto inutilizzabile, sia a strade, ferrovie, centri abitati, industrie, attività e colture insediate ai margini del lago. I nomi di Gleno, Vajont, Molare, Val di Stava, solo per citare i più noti, si associano a gravi disastri, a danni molto ingenti, a migliaia di morti che si sono verificati nel nostro Paese, ma anche, talvolta, a errori, a controlli tecnici inadeguati, e norme di gestione del territorio carenti e superficiali. Il rischio connesso con la presenza sul territorio delle

dighe minori è spesso trascurato, ipotizzando che esso sia direttamente proporzionale alla dimensione dell'opera; viceversa in territori ad alta intensità urbana e antropizzati sarebbe quanto mai opportuno prestare attenzione anche alle piccole dighe, alla manutenzione e al loro controllo in fase di esercizio nonché ad una adeguata cura dell'ambiente circostante. In base alla casistica internazionale si può affermare che le principali cause di crisi di una imponente opera idraulica, quale è una diga, sono da ricercare nell'utilizzo di materiali e tecniche costruttive non adeguate; errori di progettazione; problemi di instabilità geologica; scarsa manutenzione; afflusso eccessivo dell'acqua non sufficientemente regolato; scivolamento di grandi masse da pendii circostanti; azioni sismiche; erosioni interne ed errori umani.

### **3. Le tipologie costruttive**

Il criterio di adozione delle diverse tipologie delle dighe dipende essenzialmente dalle caratteristiche morfologiche, geologiche e geotecniche dell'area prescelta per la realizzazione dell'invaso, ma anche dalla disponibilità dei materiali con cui realizzarla, oltre che da fattori economici e sociali che, in molti casi, portano ad orientare la progettazione in una direzione piuttosto che in un'altra. Su queste basi, la tecnica costruttiva delle dighe di ritenuta ha selezionato nel tempo due fondamentali categorie: quella delle dighe in materiali sciolti (terra, pietrame o materiale misto) e quella delle dighe murarie (in muratura di pietrame e, più recentemente, in calcestruzzo). Tra le dighe murarie in calcestruzzo possono, poi, distinguersi le dighe a gravità e quelle ad arco. Le tipologie esistenti sono variabili tra le categorie sopra indicate; infatti è assai frequente che una diga muraria sia concepita per resistere alla spinta dell'acqua in parte per gravità e in parte per effetto arco. Altre volte una diga muraria in calcestruzzo, pur essendo abbastanza massiccia per funzionare soltanto a gravità, presenta ugualmente una planimetria arcuata, o perché ciò consente di fondarla su una roccia di migliori caratteristiche o perché, in sede di progetto, è stata adottata una maggiore riserva di resistenza in previsione di eventuali problematiche dovute a difetti costruttivi o all'obsolescenza dell'opera. Esistono esempi antichi e moderni di dighe miste, con parti in materiali sciolti e parti murarie e, non sempre, l'associazione di parti sciolte e parti murarie ha dato buoni risultati. In realtà la diga di tipo misto può presentare diverse problematiche: ad esempio non ha il pregio di potersi adattare ad una fondazione deformabile, come le dighe in materiali sciolti, e nemmeno presenta la robustezza ed impermeabilità di una diga in muratura massiccia. I disomogenei assestamenti cui sono soggetti i materiali sciolti sotto carico possono risultare fatali in uno sbarramento di tipo misto, soprattutto quando la parte rigida deve appoggiarsi sulla parte sciolta. Anche il contatto tra i due materiali può essere problematico, in

quanto sede preferenziale di infiltrazioni che possono innescare fenomeni di dilavamento della terra. Inoltre, non va dimenticato il problema delle diverse caratteristiche fisiche e meccaniche fra terra e muratura, che assume un particolare rilievo quando i due materiali siano chiamati a collaborare. Le dighe in materiale sciolto, hanno un'origine antichissima: risalgono ad alcuni millenni a.C. le prime dighe in terra costruite in Egitto. Si tratta della tipologia costruttiva più semplice dal punto di vista progettuale ed anche realizzabile ad un costo relativamente modesto, purché siano rispettate alcune condizioni e, precisamente, l'impermeabilità del corpo diga; il non attraversamento del corpo diga da parte delle condotte di derivazione e di scarico, o altre; il non superamento della sommità della diga assicurato dalle opere di scarico superficiali, condizione essenziale per evitare crolli e compromissione dell'invaso. A seconda della tipologia di struttura, le dighe in materiale sciolto possono classificarsi in: dighe di terra omogenee, di altezza non superiore a 45 metri, costruite in terra caratterizzata da uniforme permeabilità sì da permettere la tenuta; dighe di sola terra o di pietrame e terra costituite da una zona di terra di bassa permeabilità che costituisce il nucleo e da materiali naturali di diverse specie, disposti in diverse parti della sezione, ampiamente permeabili; dighe di terra o pietrame con rivestimenti protettivi (ciottoli o pietrame minuto o lastre di calcestruzzo del paramento a monte) per contrastare il suo danneggiamento da parte delle onde di piena e ciottoli o pietrame minuto o rivestimento erboso a valle per la protezione dall'erosione delle acque di pioggia. Le cause di danneggiamento o di crollo di tali strutture, rispetto alle quali occorre largamente garantirsi sono: la tracimazione; l'insufficiente stabilità del paramento a monte, particolarmente a seguito di un abbassamento rapido del livello del serbatoio; l'insufficiente stabilità del paramento a valle, particolarmente in presenza di filtrazione diffusa; le deformazioni notevoli o il refluitamento del terreno di fondazione; l'asportazione di materiale per filtrazione diffusa o concentrata del terreno di fondazione o nel rilevato, in particolare lungo il contatto con strutture rigide. Le dighe in materiali sciolti vengono generalmente impiegate per sbarrare valli molto ampie anche se non molto profonde; tuttavia non mancano nel mondo esempi di dighe in materiali sciolti di notevole altezza come la diga di Nurek, in Tagikistan, un enorme sbarramento di 58 milioni di terra e roccia, che ha dato luogo ad un invaso di 4500 metri cubi di capacità. Dal punto di vista morfologico-funzionale le dighe in calcestruzzo si distinguono in alcune ben caratterizzate tipologie costruttive:

- a gravità, ulteriormente suddivise in massicce o alleggerite (a contraforti o a speroni, ad elementi cavi, etc.), in calcestruzzo, a sezione triangolare o trapezia e sezione orizzontale ad asse rettilineo o curvo il cui peso stesso resiste alla spinta idrostatica;
- ad arco gravità o a volta spessa, con caratteristiche strutturali sia delle dighe ad arco che delle dighe a volta, le quali contrappongono alla spinta

esercitata dall'acqua dell'invaso la reazione esercitata dai fianchi della valle su cui poggia la diga;

- a contrafforti e volte multiple, costituite da una successione di volte che poggiano su contrafforti pieni o cavi, in genere di profilo triangolare che resistono alla spinta idrostatica che va a scaricarsi sulle fondazioni per effetto della struttura ad arco;
- a contrafforti e lastre; a struttura mista, con una parte a gravità e una parte a volte multiple;
- ad arco o a volta sottile (talvolta distinte a semplice curvatura o a doppia curvatura o a cupola) in cui la spinta idrostatica viene scaricata anche sulle fondazioni essendo la struttura ad arco.

Tab 1. – Elenco delle principali grandi dighe in Lombardia

Diga	h[m]	V [mc]	Tipologia	Anno	Località
Cancano	126	124	Arco gravità	1955	Val Fraele (SO)
Livigno-Gallo	130	165	Arco gravità	1968	Livigno (SO)
Lei	143	197	Arco	1961	Valle di Lei (SO)
San Giacomo Fraele	84	64	Gravità a speroni	1945	Val Fraele (SO)
Fusino	59	0.2	Arco gravità	1922	Val Grosina (SO)
Val Grosina	52	1.3	Gravità a speroni	1959	Val Grosina (SO)
Ganda	26	0.1	Arco	1947	Valle Belviso (SO)
Frera (Belviso)	138	50	Arco gravità	1958	Valle Belviso (SO)
Isolato	35	1.7	Cupola	1952	Val San Giacomo (SO)
Madesimo	18	0.1	Gravità	1962	Madesimo (SO)
Campo Moro	82	10.5	Gravità	1958	Madesimo (SO)
Alpe Gera	160	68	Gravità	1962	Valmalenco (SO)
Cardanello (Monte-spluga)	73	32.5	Gravità	1930	Val San Giacomo (SO)
Stuetta (Montespluga)	29	32.5	Gravità	1930	Val San Giacomo (SO)
Villa Chiavenna	33	1	Gravità	1948	Val Bregaglia (SO)
Vasca di Edolo	24	1.3	Terra con manto	1982	Edolo (BS)
Gleno	51	--	Gravità/archi mult.	1923	Valle di Scalve (BG)
Ponte Cola	122	52	Cupola	1961	Lago Valvestino (BS)
Barbellino	64	19	Gravità arcuata	1930	Valbondione (BG)
Campo Tartano	60	1.2	Gravità	1928	Val Tartano (SO)
Lago Fregaborgia	60	4.5	Gravità	1952	Val Brembana (BG)
Scais	60	9	Gravità a speroni	1938	Val Vedella (SO)
Pantano d'Avio	59	12.5	Gravità a speroni	1955	Edolo (BS)
Trona	53	5	Gravità a speroni	1942	Val della Pietra (SO)
Dazarè	20	0.1	Arco	1959	Val Caffaro (BS)
Poglia	50	0.5	Gravità a speroni	1950	Val Savio (BS)
Lago Venina	45	11	Volte e contrafforti	1942	Val Venina (SO)
Publino	41	5	Arco gravità	1950	val di Livrio (SO)
Alto Mora	40	0.8	Gravità	1953	val Mora (BG)
Pian Casere	40	2.5	Gravità	1945	val Brembana (BG)
Lago di Avio	40	12.3	Gravità	1928	Edolo (BS)

Dal punto di vista dello scarico di piena le dighe si distinguono in tracicimabili (con sfioratore in cresta) o non tracicimabili. Molte di queste tipologie di dighe sbarramenti si trovano in Lombardia, la regione italiana più ricca di invasi; nella tabella che segue, sono elencati gli invasi maggiori con le relative tipologie. Le dighe e gli sbarramenti presenti nella provincia di Bergamo tra cui, tra tutte una particolare menzione meritano i ruderi della diga del Gleno, sono evidenziati nella cartografia riportata in fig. 19.

#### **4. La valle del Gleno. Un'analisi della sua morfologia attraverso uno studio del DTM**

Nei primi anni del Ventesimo secolo tutti i Paesi europei iniziarono ad ammodernarsi in previsione dello scoppio di un conflitto mondiale che sembrava essere sempre più imminente. In questa prospettiva, la necessità di incrementare a dismisura la produzione industriale amplificava, di conseguenza, una richiesta sempre maggiore di energia elettrica da utilizzare nei settori produttivi e nell'industria bellica. I territori montani alpini iniziarono, quindi, a sfruttare sempre più le risorse del proprio territorio mettendole a sistema con le più recenti conoscenze scientifiche e tecnologiche; per questo motivo, iniziarono ad essere costruiti i primi sbarramenti vallivi con formazione dei numerosi bacini imbriferi a servizio di nuove centrali idroelettriche. Questi processi di trasformazione delle economie locali portarono, proprio in quegli anni, alla costruzione di molteplici bacini idroelettrici anche nelle valli montane attorno alla città di Bergamo, tra cui la Valle di Scalve, dove venne edificata la diga del Gleno.

Attualmente tale valle è situata nella zona nord-est della provincia di Bergamo e si estende su una superficie di circa 140 kmq, sviluppandosi per una lunghezza totale di 14 km e un'ampiezza massima di 16 km. Oggi gli accessi alla valle sono garantiti attraverso alcuni valichi che si aprono lungo le catene montuose che la delimitano, come la SP 59 in direzione di Borno (Val Camonica), la SP ex S.S.294 (cosiddetta Via Mala, costruita nel 1923) in direzione Darfo Boario Terme e in direzione Forno d'Allione attraverso il Passo del Vivione (1.828 m.s.l.m.), la SP ex S.S.671 in direzione di Clusone (Valle Seriana) attraverso il Giogo della Presolana (1.297 m.s.l.m.). Rappresentando il 5,16% dell'intero territorio provinciale e l'8,12% della fascia montana bergamasca, il territorio della Valle di Scalve corrisponde alla parte superiore del bacino idrografico del fiume Dezzo e, più precisamente, confina ad ovest con la Val Seriana e a nord con la Valtellina, mentre nelle restanti parti si affianca alla Val Camonica. Gli spartiacque orografici che delimitano l'estensione della valle comprendono gruppi montuosi imponenti come il Massiccio della Presolana (m 2521), il Monte Ferrante (2427 m), il Monte Gleno, la vetta più alta, a quota 2883 m s.l.m., il Pizzo Tornello (m. 2687),



il Monte Demignone (2582 m), il Monte Venerocolino, il Monte Venerocolo, il Monte Campione, la Cima Mengol, il Cimon della Bagozza (m 2409), il Monte di Val Piane, il Monte Sossino ed il Pizzo Camino (m 2492).

Dal punto di vista amministrativo, la Comunità Montana (ente locale territoriale istituito nel 1973) comprende i Comuni di Vilminore di Scalve con la frazione di Bueggio, Azzone, Colere con la frazione Dezzo di Scalve, e Schilpario: tutti centri abitati che la mattina del 1 dicembre 1923 vennero improvvisamente travolti e parzialmente distrutti dagli oltre sei milioni di metri cubi di acqua, fango e detriti che si riversarono dall'enorme breccia della diga del Gleno lungo l'intera Valle di Scalve, sino ad arrivare ad Angolo Terme e al fiume Oglio presso Darfo.

Pur essendo trascorsi più di cento anni, la conformazione morfologica della Valle di Scalve è rimasta sostanzialmente inalterata; quindi, lo studio dell'attuale orografia, oltre a fornire dati utili per comprendere le motivazioni che hanno portato alla costruzione di un bacino idroelettrico proprio in quel luogo, acquisisce ancora maggior importanza nella consapevolezza che proprio tale conformazione morfologica di valle stretta e con variazioni altimetriche importanti ha, in un certo qual modo, favorito il rapido incremento di velocità dell'onda di piena e la sua veloce propagazione quasi fino al lago di Iseo.

A questo riguardo, le moderne tecniche di telerilevamento a distanza (remote sensing) forniscono un contributo fondamentale nello studio approfondito del territorio alle diverse scale di osservazione e in maniera totalmente non invasiva. In particolare, il *Light Detection and Ranging* (LIDAR) è risultato essere la tecnica di remote sensing più utile per comprendere in maniera speditiva e globale la conformazione della valle, in quanto consente la rapida creazione di modelli digitali di elevazione (DEM) del territorio, derivati dalla segmentazione di nuvole di punti ottenute attraverso la misurazione della distanza del terreno dalla sorgente laser.

Nello specifico, il LIDAR è una tecnica di acquisizione di dati territoriali che utilizza un sensore laser, ovvero un fascio coerente di luce a una precisa lunghezza d'onda posizionato su una piattaforma IMU (*Inertial Measurement Unit*), dotata di GPS (*Global Position System*) e INU (*Inertial Navigation System*), combinazione che permette l'immediata georeferenziazione 3D della nuvola di punti rilevati. In altre parole si tratta di un rilievo effettuato tramite mezzo aereo sul quale è installato un laser-scanner composto da una sorgente luminosa (essenzialmente un laser), da un ricevitore (costituito da un telescopio) e da un sistema di acquisizione dati. La peculiarità del sistema è l'altissima velocità di acquisizione dei dati abbinata ad un'elevata risoluzione. Ciò che si ottiene con un rilievo LiDAR è un insieme di punti ad ognuno dei quali è associato un dato relativo alle coordinate geografiche alla quota (Z), calcolata sulla base della differenza di tempo intercorsa tra il segnale emesso e quello riflesso ed il valore dell'intensità di segnale riflessa.

Il potenziale informativo contenuto nella nuvola dei punti laser ottenuta è ricco di informazioni geografiche su tutti gli elementi riflettenti presenti e, per riuscire ad attribuire ad ogni singolo punto un significato fisico specifico, si deve procedere ad una classificazione dell'intero volume di dati della nuvola acquisita. In questo modo si riescono, ad esempio, a discriminare gli impulsi che risultano appartenenti al suolo rispetto a quelli riferiti alle superfici arboree ed arbustive, o anche agli elementi antropici e agli edifici. A questo riguardo, per gli studi strettamente legati alle analisi morfologiche del territorio risulta particolarmente utile il Digital Terrain Model (DTM), ovvero il modello tridimensionale costruito esclusivamente con i soli punti geografici che appartengono al suolo, escludendo automaticamente tutti gli elementi vegetativi. Ciò si declina nella possibilità di analizzare la topografia attuale del territorio in tutte le sue parti attraverso un metodo in grado di superare i limiti di visibilità insiti nello studio, ad esempio, delle singole ortofotografie. Oltre a ciò, il potenziale informativo dei dati LIDAR viene notevolmente amplificato anche attraverso specifiche modalità di visualizzazione ottenute utilizzando programmi di analisi territoriale (come ArcGis o QuantumGis), che consentono di far emergere, ulteriori caratteristiche topografiche e morfologiche del territorio altrimenti non facilmente rilevabili. Tra queste visualizzazioni, solo per citarne alcune, le più diffuse sono l'ombreggiatura semplice, l'ombreggiatura da direzioni multiple, la pendenza del terreno, il fattore di visibilità del cielo, l'apertura topografica positiva e negativa.

L'ombreggiatura semplice (*Hillshading*), basata sull'ipotesi che la superficie in analisi sia illuminata dalla luce diretta di una sorgente luminosa fittizia posta a una distanza infinita, rappresenta sicuramente il modo più comune di visualizzazione dei dati LIDAR, in quanto restituisce una rappresentazione plastica e illustrativa della topografia del terreno che può essere facilmente compresa a livello visivo. L'esito del processo di elaborazione dell'algoritmo, infatti, restituisce i valori di riflettanza calcolati tramite la formula di Lambert per ogni pixel del terreno e restituiti in scala di grigio, in quanto questo tipo di visualizzazione migliora la percezione della morfologia territoriale, anche se, al tempo stesso, riduce il riconoscimento degli ambiti completamente illuminati o totalmente in ombra. Oltre a ciò, ogni direzione degli angoli di illuminazione può essere parallela rispetto a specifiche conformazioni topografiche del terreno che quindi, nel momento in cui vengono colpite da un fascio di luce nella stessa direzione, non producono ombre e, di conseguenza, non risultano chiaramente individuabili. Per ovviare a questo limite, la visualizzazione ombreggiata da molteplici direzioni combina contemporaneamente tra 8 e 16 direzioni di illuminazione in un'unica restituzione, come se la superficie in analisi fosse simultaneamente illuminata da più sorgenti a diverse angolazioni, mettendo, quindi, in evidenza ogni caratteristica topografica presente.

Un'interessante alternativa all'*hillshading* è la visualizzazione del fattore di visibilità del cielo (*Sky View Factor*, SVF), ricavata tramite un algoritmo che ipotizza un'illuminazione diffusa della superficie in esame, proveniente in maniera omogenea da tutte le direzioni sovrastanti, come se una semisfera uniformemente illuminata si trovasse al di sopra di ciascun punto analizzato e centrata in esso. Dal punto di vista operativo ciò che viene misurato è la porzione di cielo visibile da ogni specifico punto della superficie: in altre parole, in presenza di ambiti pianeggianti o in cima alla vetta di un rilevato la porzione di cielo visibile sarà molto ampia, e quindi restituita con il colore bianco, mentre nel fondo di una gola o di una cavità l'angolo solido corrispondente alla visibilità del cielo sarà molto minore, e quindi restituito proporzionalmente verso il nero. Risulta evidente come questo tipo di analisi sia particolarmente efficace per meglio identificare concavità e convessità localizzate presenti nel terreno.

Mettendo in evidenza le variazioni altimetriche, lo SVF è direttamente collegato anche con le analisi legate allo studio del grado di pendenza del terreno. Tale visualizzazione è importante per comprendere la stabilità dei versanti montani in quanto ad una variazione maggiore di pendenza è associata una crescente instabilità dei terreni in termini sia di erosività dell'acqua che di condizioni fisico-climatiche di una determinata zona, visto che l'energia solare che incide su quest'ultima è funzione della sua inclinazione. Dal momento che nel DTM la superficie terrestre è descritta in forma numerica grazie ad una funzione matematica che associa l'elevazione di ogni punto al variare della coppia di coordinate  $x$ ,  $y$  che lo localizzano, l'analisi delle variazioni locali dell'elevazione del terreno si basa sul semplice calcolo matematico pari al rapporto tra la differenza di quota tra la cella in analisi e quella immediatamente vicina e la distanza tra le due celle. La restituzione che si ottiene è solitamente in scala di grigi ma, per renderla maggiormente comprensibile, è possibile processarla utilizzando una visualizzazione in falso colore, ovvero associando ai diversi valori di pendenza una scala cromatica più chiara (ad esempio dal blu al rosso, dove il blu indica maggiore pendenza e il rosso ambiti piani).

In fig. 20<sup>2</sup> si possono apprezzare i risultati di queste tre modalità di visualizzazione a confronto, che si sono rivelate essere molto utili per comprendere in dettaglio la morfologia territoriale della valle. L'elaborazione del grado di pendenza dei versanti montani restituita con una visualizzazione in falso colore mette in evidenza come a ripidi pendii e profonde gole vallive

---

<sup>2</sup> Con la costruzione dello sbarramento del Gleno, lungo circa 260 metri e costituito da due tratti laterali rettilinei e una parte centrale più arcuata, si venne a creare un vero e proprio lago artificiale esteso per una superficie di 440.000 mq, con un invaso massimo corrispondente a circa 6 milioni di mc d'acqua: tale massa idrica alimentava la centrale idroelettrica di Bueggio, con un primo salto di circa 400 metri, e successivamente la sottostante centrale di Valbona, ad una quota inferiore.

(colore blu) che si sviluppano principalmente nella parte centrale della valle tra gli abitati di Dezzo di Scalve fino all'imbocco della Val d'Angolo si contrappongono ampie aree pianeggianti caratterizzate da un grado di pendenza molto inferiore (colore rosso). Confrontando tali ambiti con i dati ottenuti, per le medesime aree, dalla visualizzazione ombreggiata (elaborazione a destra) si evince come questi contesti pianeggianti si collochino non solo nel fondovalle (ad esempio le aree dove si trovano i paesi di Bueggio e Vilminore di Scalve), ma anche ad altitudini più elevate: una di queste aree è proprio l'ambito in cui è stato costruito il bacino imbrifero della diga del Gleno. La visualizzazione dello SVF conferma quanto emerso dalle altre analisi: le aree in cui il grado di pendenza restituisce il colore rosso, ovvero minimo grado di pendenza, corrispondono infatti alle aree più chiare nell'elaborazione dello SVF, ovvero agli ambiti in cui la porzione di cielo visibile è più ampia (ad esempio l'area corrispondente al bacino della diga o gli ambiti di fondovalle), mentre dove i pendii sono più accentuati il fattore di visibilità del cielo è inferiore, e quindi la rappresentazione restituisce colori più scuri.

Oltre a queste considerazioni, l'analisi dei dati territoriali LIDAR tramite programmi GIS consente anche di estrarre molte altre utili informazioni riguardanti altri fattori territoriali e ambientali, come ad esempio un'analisi idrologica dell'intera vallata. Con l'uso di specifici strumenti operativi è possibile infatti processare i dati informativi territoriali e ricavare in maniera semi-automatica molteplici informazioni legate ai bacini e alle reti di canali presenti. Sempre in fig. 20, l'esito di quest'ultima analisi è stato sovrapposto alla visualizzazione ombreggiata della valle, per facilitare la collocazione geografica dei canali idrici presenti. Ciò che si evince è che il fondovalle semi-pianeggiante è attraversato interamente da un canale principale, il fiume Dezzo, sul quale confluiscono una serie di canali secondari, ovvero i suoi affluenti quali i torrenti Vo', Povo, Nembo e Rino. In generale, però, l'idrografia della valle è molto diversificata e complessa: ad est si sviluppa il ramo principale del fiume Dezzo, detto di Schilpario, sede di una faglia che divide nettamente i due versanti, mentre a nord si trova il Vallone del ramo di Gleno-Povo che nasce nel Monte Gleno. Più a valle, sulla destra idrografica si trova un altro immissario del Dezzo, il torrente Rino, mentre sulla sinistra idrografica si aprono la Val di Azzone e la Val Giogna con altri canali idrici secondari.

In ultimo, dal DTM è anche possibile ottenere dei profili altimetrici territoriali semplicemente individuando le linee di sezione sul modello generale. In fig. 21 è riportata la planimetria del bacino imbrifero della diga del Gleno, individuata mediante le curve di livello ricavate dal DTM ad un passo di 5 m, e, sulla sinistra, tre sezioni territoriali trasversali dell'invaso (Sezioni AA, BB, CC) e una sezione longitudinale, da monte fino a valle, dei ruderi dello sbarramento crollato (sezione DD). Tali dati sono utili tanto per comprendere

quale era l'effettivo volume d'acqua contenuto dallo sbarramento, quanto per i futuri piani di monitoraggio ambientale.

Alla luce delle precedenti considerazioni risulta evidente come le condizioni morfologiche e idrologiche abbiano svolto un ruolo determinante nella scelta della precisa localizzazione dello sbarramento del Gleno, ovvero nel punto in cui i versanti montani convergevano creando un restringimento della valle e delimitando, a monte, un'area pianeggiante posta a circa 1500 m di altitudine e denominata "Pian di Gleno" nella quale convergevano naturalmente tutti i canali idrici secondari immissari dei torrenti Povo e Nembo.

## **5. Il disastro del Gleno: una tragedia da non dimenticare**

L'intero bacino della valle del Gleno era, ed è tuttora, situato in una formazione molto antica di conglomerati e arenarie con dischi di porfiriti, in condizioni favorevoli alla creazione di un lago artificiale mediante una diga di sbarramento, ritenute dai periti salde sia per natura che per struttura delle rocce, tenaci e impermeabili. Se la morfologia del bacino era, dunque, favorevole alla costruzione di uno sbarramento, altrettanto non si può dire sulla buona realizzazione dello stesso per vari motivi imputabili alla messa in opera di superfici di fondazione modeste e all'utilizzo di materiali di bassa qualità; alla preparazione e messa in opera del calcestruzzo insufficientemente manipolato e miscelato; all'impiego di sabbia di impasto sporca e mescolata a terriccio; all'impiego di armature di collegamento tra le pile del paramento di monte realizzate con materiale di recupero di origine bellica. A queste considerazioni accertate da prove e testimonianze si aggiungono le conclusioni dei periti che, dopo il disastro del crollo della diga, accertarono che la causa fondamentale originaria del collasso rapido ed esteso furono l'insufficienza statica della muratura di appoggio della parte centrale della diga sia nelle dimensioni che nella consistenza dei materiali della muratura risultate insufficienti per gli sforzi e le sottopressioni applicate, le superfici di fondazione fortemente acclivi e la soluzione di continuità dello scarico di fondo che annullò la capacità di resistenza del tampone di appoggio della parte centrale dello sbarramento. Inoltre, i periti accertarono che la diga del Gleno fu iniziata con la tipologia a gravità senza l'approvazione del progetto esecutivo e proseguì variando la tipologia costruttiva, passando alla tipologia a volte su sperone senza autorizzazione. Inoltre la diga fu costruita con materiali di scarsa qualità, insufficientemente dosati, difformi dalle previsioni progettuali, posti in opera senza controlli specifici e, infine, la stessa fu invasata e posta in esercizio, raggiungendo il massimo invaso, senza alcun collaudo o autorizzazione e con minimi controlli sul comportamento statico. Dopo il crollo, la diga si presentò come è rilevabile ancora oggi (fig. 22) con la parte curva demolita per uno sviluppo di circa 80 metri ad eccezione della

pila della spalla destra e della pila immediatamente adiacente, viste da valle. Il basamento dei contrafforti (cfr. l'immagine in basso a destra in fig. 22) appare, ancora oggi, profondamente eroso e intaccato, con andamento rapidamente degradante da monte a valle e con esposizione in molti punti della roccia di fondazione; infine, del paramento del tampone a valle rimane in piedi solo un breve tratto in sponda sinistra. È noto che le dighe si collocano tra le opere di ingegneria che hanno un alto potenziale di pericolosità, pertanto la necessità di un continuo controllo del loro comportamento, durante l'esercizio, è universalmente riconosciuta in tutti i Paesi. Il grande progresso compiuto negli anni recenti dagli strumenti di misura e dai sistemi di trasmissione ed elaborazione dati, anche in remoto, in relazione alla affidabilità delle misure, alla velocità di acquisizione, registrazione, valutazione e trasferimento delle osservazioni rende necessario il riesame dei metodi attuali di controllo delle dighe sia per la riduzione del rischio delle dighe già in esercizio che di quelle di futura costruzione.

Il sistema di controllo di una diga/sbarramento, tanto in fase di costruzione che di esercizio, deve accertare che l'opera si comporti secondo le previsioni progettuali e, qualora si manifesti uno scostamento significativo dal comportamento previsto all'atto della progettazione, è compito del sistema di controllo evidenziare il fenomeno. Quindi, affidando alla progettazione dell'opera il compito di stabilire il grado di sicurezza e rischio della diga, è necessario che in fase progettuale sia definito "il modello di riferimento" di tutte le grandezze fisiche da tenere sotto osservazione e la loro variabilità, sia di quelle legate alla struttura che di quelle ambientali e operative di esercizio. Per le opere realizzate nel passato, come la maggior parte delle dighe attualmente esistenti e in esercizio in Italia, per le quali non sia stato definito, in fase progettuale, un modello di riferimento, si può applicare un modello "a posteriori" fondato sull'analisi delle osservazioni sul comportamento dell'opera e sulla loro valutazione globale in termini statistici. Ciò significa confrontare sul piano statistico un insieme ampio e temporalmente esteso di grandezze significative con i valori corrispondenti rilevati in tutta la vita dell'opera. Quindi le variabili che individuano il comportamento dell'opera (eventi sismici, portate di piena, sforzi interni, deformazioni locali, spostamenti orizzontali e verticali, rotazioni, movimenti di giunti e fessure), le condizioni ambientali (precipitazioni, neve, spessore del ghiaccio, temperatura, pressione, vento, umidità, batimetria del bacino) e di esercizio (perdite, sottopressioni interstiziali, modifica delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali), devono rientrare nell'intervallo di valori rilevati in precedenza ed essere congruenti tra loro. Il crollo della diga del Gleno segna, pertanto, un momento fondamentale in Italia per lo sviluppo del controllo governativo sulle grandi opere di sbarramento, determinando di fatto la nascita del Servizio Dighe e del Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe, che è

l'organo istituzionale che stabilisce le moderne forme di controllo sulle opere di sbarramento.

## **6. Il controllo delle dighe**

L'attuale regolamentazione italiana, sulla base dell'evoluzione dei sistemi di controllo degli sbarramenti, propone un sistema di sorveglianza guidata del funzionamento degli invasi, che permette di ottenere tutte le informazioni in maniera più veloce e affidabile, filtrando le informazioni utili per concentrare rapidamente tutta l'attenzione sulle situazioni anomale. Tutto ciò in aggiunta al tradizionale controllo visivo di uno o più guardiani, che devono rilevare e riportare manualmente sull'apposito bollettino le misure previste dal foglio di condizioni. In quest'ottica un protocollo di sorveglianza articolata delle dighe dovrebbe prevedere: l'installazione di un sistema automatico di controllo visivo di tutti i punti normalmente interessati dalla visita di ispezione quotidiana dei guardiani, con possibilità di estendere il numero delle zone comprese nei campi visuali e di trasmettere le immagini a distanza; l'installazione di un sistema automatico di tutte le grandezze attualmente rilevate anche con una frequenza eventualmente modificata in funzione di comportamenti anomali sotto il profilo della sicurezza. Tali valori delle sessioni di misurazioni dovrebbero essere registrati su supporti a disposizione degli ispettori inviati dal Ministero delle Infrastrutture. Inoltre il protocollo di sorveglianza dovrebbe prevedere: un'installazione presso la diga di un processore che possa effettuare un confronto tra i dati rilevati e il comportamento ordinario dell'opera, sì da poter individuare, tempestivamente, eventuali situazioni anomale; una teletrasmissione di tutte le grandezze scelte opportunamente, ad un centro di controllo, ove personale tecnico adeguato possa analizzare i dati pervenuti, decidere i tempi e le modalità di intervento in caso di verifica di stati anomali della struttura; esecuzione di visite periodiche, ogni 3-6 mesi, di una squadra di tecnici specializzati, con il compito di effettuare una manutenzione preventiva di tutta la strumentazione; esecuzione di visite periodiche, ogni 2-4 settimane, di una squadra di tecnici addetti ad una globale ispezione dell'opera per rilevare l'insorgere di eventuali variazioni significative nella struttura e nelle fondazioni; esecuzione di visite periodiche, ogni 6-8 mesi, di una squadra di ingegneri strutturalisti che dall'esame visivo della struttura e delle fondazioni, nonché dall'elaborazione delle misure siano in grado di giudicare il comportamento e la tenuta dell'opera. Naturalmente il sistema di sorveglianza può essere integrato, caso per caso, da misure specifiche, come, ad esempio, misure geodetiche per il controllo di insieme della struttura, organizzate in un vero e proprio sistema di monitoraggio con letture on-site e letture on-line centralizzate con confronto dei dati previsionali, per valutare il livello di invaso, gli

spostamenti verticali e orizzontali, le deformazioni, le rotazioni, le perdite e le sottopressioni, prevedendo, altresì, anche il controllo dell'opera, in tempo reale, mediante modelli matematici.

L'acquisizione e il monitoraggio continuo di tutte le grandezze misurate, corredate da altre informazioni di natura metereologica, geologica e idrogeologica del bacino, rappresentano lo strumento indispensabile per l'individuazione delle procedure tecnico-amministrative da attuare e per la definizione degli interventi di prevenzione e delle strategie più idonee per la corretta gestione di un'emergenza e la salvaguardia della popolazione e/o dei beni materiali presenti nell'area esposta ad uno specifico rischio di esondazione di una diga/sbarramento. Oltretutto gli interventi di prevenzione e gli scenari possono fornire un utile supporto alla educazione al rischio di comunità e singoli individui e, quindi, all'adozione consapevole, a livello individuale o comunitario, dei comportamenti più idonei e delle azioni di autoprotezione più efficaci per fronteggiare una eventuale emergenza. Ciò che è mancato il giorno del disastro del Gleno, 1° dicembre 1923, ma, allora i tempi non erano maturi, è stato proprio il controllo dell'infrastruttura fin dalle fasi della sua realizzazione e, di conseguenza del suo esercizio. Al momento attuale, alla luce della cospicua normativa prodotta dal Comitato Nazionale Italiano per le Grandi dighe, ed anche alla luce delle recentissime disposizioni del PNRR nella programmazione delle misure per l'individuazione di investimenti in infrastrutture idriche primarie per la sicurezza dell'approvvigionamento idrico, è prevista la messa in sicurezza delle traverse e degli invasi esistenti nei confronti della loro vulnerabilità in relazione alle variazioni climatiche, vulnerabilità sismica etc. Ciò comporta nel caso delle dighe e degli sbarramenti l'individuazione di un scenario di riferimento nel caso si presentasse, come è accaduto nel caso della diga del Gleno, una situazione anomala nel funzionamento dell'opera e, in particolare, una simulazione idraulica di *dam-break*. Nel caso di previsione di un evento anomalo è fondamentale la conoscenza di alcune condizioni: l'estensione delle aree soggette ad allagamento a valle del manufatto, la simulazione del deflusso della corrente di piena conseguente ad un ipotetico collasso della diga; la distanza progressiva; il massimo tirante idrico; la quota assoluta associata al massimo tirante idrico; la velocità media della corrente; la larghezza superficiale del fronte di onda e il suo tempo di arrivo. Come, purtroppo, è ben noto, l'onda generata dal collasso di una diga è un evento catastrofico in grado di causare la potenziale perdita di vite umane e gravi danni o la parziale/totale distruzione di insediamenti abitativi, centri strategici rilevanti, attività produttive, viabilità, patrimonio storico, industrie, strutture sportive e ricreative. Per tale motivo è opportuno tener ben presente nella gestione di una infrastruttura così importante, quanto prescrive anche il PGRA che identifica tre fasce di pericolosità idraulica in funzione della probabilità di allagamento:



- pericolosità frequente (alta probabilità) con Tempo di ritorno  $Tr= 10-20$  anni;
- pericolosità poco frequente (media probabilità) con  $Tr= 100-200$  anni;
- pericolosità rara (bassa probabilità) con  $Tr=500$  anni.

In uno scenario di rischio diga, oltre alla descrizione dettagliata di tutte le strutture coinvolte, è opportuno attivare punti di presidio o di monitoraggio visivo, durante il susseguirsi delle fasi di emergenza (definite come fasi di pre-allerta, vigilanza rinforzata, pericolo, collasso) garantendo agli operatori addetti le opportune condizioni di sicurezza e tenere, costantemente, sotto controllo il livello di invaso e la natura dei fenomeni in atto. Inoltre durante la fase di “vigilanza rinforzata” occorre assicurare la sorveglianza delle opere con presenza continua e permanente in loco di personale tecnico qualificato; informare tutte le amministrazioni competenti – Provincia, Regione, Prefettura, Comunità Montane, Protezione Civile – sull’evoluzione della situazione, comunicando il livello d’invaso, le manovre sugli organi di scarico già effettuate e/o previste, l’andamento temporale delle portate scaricate dall’inizio della fase e, ove possibile, la massima portata che si prevede di dover scaricare. Nella fase che viene definita di “pericolo”, in cui la quota massima del livello di invaso raggiungibile in caso di piena viene superata, è necessario evacuare la zona ricadente all’interno del perimetro del *dam-break* e trasferire la popolazione nelle aree di accoglienza. Tale condizione di “pericolo” si deve ritenere anche in caso si verificano infiltrazioni e lesioni della struttura, come si manifestarono nel caso del crollo della diga del Gleno al piede delle fondazioni, o nel manifestarsi di movimenti franosi interessanti lo sbarramento, gli organi di scarico o altre parti dell’impianto di ritenuta che facciano temere o presumere la compromissione della tenuta idraulica o della stabilità delle opere stesse o, comunque, la compromissione delle funzioni di regolazione dei livelli di invaso; in caso di danni severi e non riparabili che facciano temere la compromissione delle funzioni di regolazione dei livelli di invaso, pur senza rilascio incontrollato di acqua; nel caso di movimenti franosi interessanti le sponde dell’invaso, ivi compresi i versanti sovrastanti che possano preludere la formazione di onde con repentini innalzamenti del livello di invaso. Tutte le prescrizioni come da protocollo devono essere necessariamente messe in atto, in quanto, uno scenario di rischio idraulico a valle che faccia riferimento alla attivazione degli scarichi della diga con portate per l’alveo di valle che possono comportare fenomeni di onda di piena e rischio di esondazione”, è un evento frequente, in termini probabilistici.

L’acqua è stata nel tempo la protagonista di molte tragedie, tra cui Gleno, Molare, Vajont, Val di Stava, solo per citarne alcune in Italia, ma la responsabilità di questi disastri è sempre dell’uomo che, ormai, in maniera imprescindibile, deve fare sempre più uso corretto e rispettoso delle risorse della

natura, con una chiara percezione del limite e agire con profondo senso di conoscenza e consapevolezza per evitare che sia egli stesso il principale artefice di futuri eventi catastrofici.

Fig. 18 – Alcune delle dighe più grandi del mondo



Diga di Assuan - Egitto



Diga delle Tre Gole - Cina



Diga di Ataturk - Turchia



Diga di Guri - Venezuela



Diga di Kariba - Zambia/Zimbabwe



Diga di Tarbela - Pakistan

Fig. 19 – Cartografia e immagini delle grandi dighe nella provincia di Bergamo



Fig. 20 – La valle di Scalve: DTM e analisi morfologico-territoriale

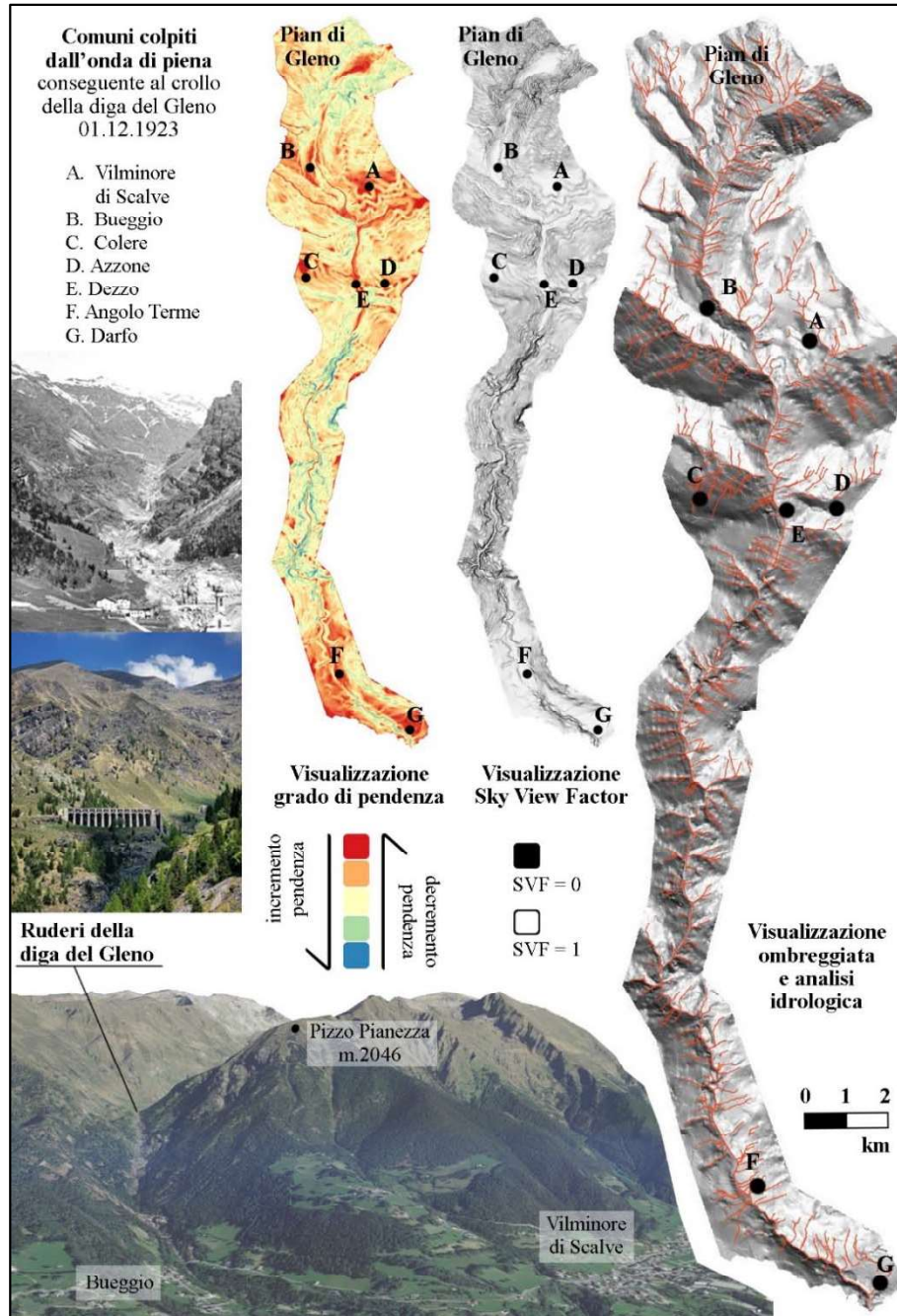
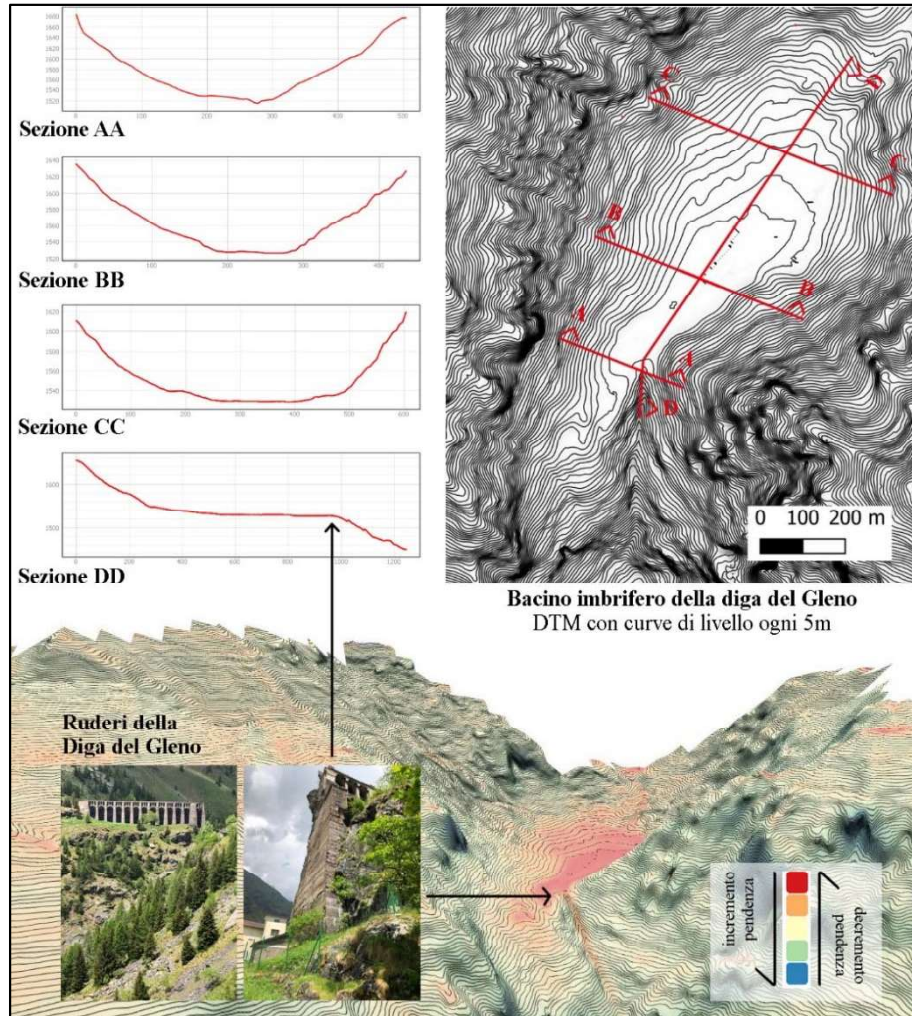


Fig. 21 – Il bacino imbrifero del Gleno: DTM e sezioni territoriali



*Fig. 22 – La diga prima del crollo (1923) e dopo il crollo (2023)*

