

Premessa

Per tracciare un quadro generale delle conoscenze sui dissesti idrogeologici, viene proposta in questo articolo una panoramica informativa dei fenomeni che concorrono a determinarli. Questo inquadramento, esamina i diversi fenomeni che vengono ad essere ascritti ai dissesti idrogeologici, quali frane, alluvioni, erosione costiera, salinizzazione e inquinamento delle acque superficiali e sotterranee, causate da fattori naturali e antropici. Sono fattori naturali: erosione del suolo, presenza di rocce deboli, eventi meteorologici estremi (piogge intense, prolungata siccità). Sono invece antropici: deforestazione, urbanizzazione incontrollata, gestione errata del territorio, opere infrastrutturali inadeguate.

Scienza e tecnica sono da sempre alleate nel far fronte a questi fenomeni, e hanno stabilito sulla base degli avvenimenti registrati le frequenze e i ritmi con i quali si manifestano gli episodi di vario grado di intensità, in modo che, utilizzando statistiche, modelli e formule matematiche, si possa intervenire in modo razionale, con misure adeguate e senza ritardi. Governo e Regioni hanno provveduto a organizzare un sistema di normative e a intraprendere efficaci iniziative per la prevenzione del dissesto, Enti pubblici e privati e appoggiandosi anche a Enti di ricerca e al volontariato. Queste iniziative e progetti si basano in gran parte su conoscenze tecniche e scientifiche di grande pregio e prestigio internazionale.

In questi ultimi venti anni si è venuta tuttavia consolidando una sostanziale tendenza alla deviazione dai ritmi con cui si manifestano gli episodi catastrofici, che sono aumentati di frequenza e intensità: è il cambiamento climatico ormai ben noto. Inoltre da poco sono venuti alla luce altri fenomeni meno catastrofici ma pur sempre aggravanti le condizioni note in precedenza, come i cambiamenti nell'assetto del suolo che producono deviazioni dei corsi d'acqua e alluvioni, innalzamento del livello marino per effetto della deglaciazione delle calotte polari, e incontrollata espansione dei centri urbani.

Questi elementi di novità obbligano ad affrontare la prevenzione dei dissesti su basi diverse da quelle precedentemente utilizzate, fatto che implica un approfondimento di fenomeni molto diversi tra di loro e uno sviluppo rilevante della collaborazione fra esperti di molte discipline, anche di alcune non chiamate in causa fino agli ultimi anni. Appare quindi opportuno presentare una panoramica delle conoscenze attuali su questo problema, e delle soluzioni alle quali può portare una visione integrata degli eventi.

La panoramica sulle attuali conoscenze verrà presentata nelle pagine seguenti, esaminando :

- Il sistema acqua-suolo nelle città e nelle aree urbanizzate
- I fattori del dissesto (precipitazioni e clima, dinamica terrestre, urbanizzazione, variazione del livello marino nel tempo)
- Gli interventi possibili per la prevenzione e la protezione (cartografie , statistiche , reti di controllo dei fattori del dissesto, realizzazione di progetti per la mitigazione dei danni come vasche di laminazione, stabilizzazione dei pendii, riduzione del consumo di suolo ecc.)

Verranno infine presentate le conclusioni sulle attuali conoscenze e sui più idonei sviluppi della prevenzione e previsione del dissesto.

1. IL SISTEMA ACQUA-SUOLO NELLE CITTÀ

Per entrare in argomento, esaminiamo dapprima in modo sintetico di sistema acqua-suolo in ambito cittadino. La costituzione del sistema fisico di un'area urbanizzata, limitandone l'estensione alla porzione suscettibile ai dissesti, è data dal terreno superficiale sul quale sono disposti gli edifici e sistemi di raccolta e deflusso delle acque di pioggia, dal sottosuolo che ospita sia le infrastrutture per il drenaggio delle acque reflue e i vari sottoservizi, sia i corpi idrici sotterranei che alimentano gli acquedotti, e dai recapiti delle acque superficiali (cori d'acqua, conche lacustri o marine).

Appare utile iniziare presentando uno schema che illustri in modo sintetico gli effetti delle diverse componenti del dissesto idrogeologico. La figura 1 illustra quindi il destino delle piogge che si riversano sul terreno, e gli effetti delle altre fonti di dissesto, quali: sollevamento del livello marino, dinamica terrestre (neotettonica) e urbanizzazione. Si nota che molte delle componenti sommano i loro effetti nel produrre particolari forme di dissesto.

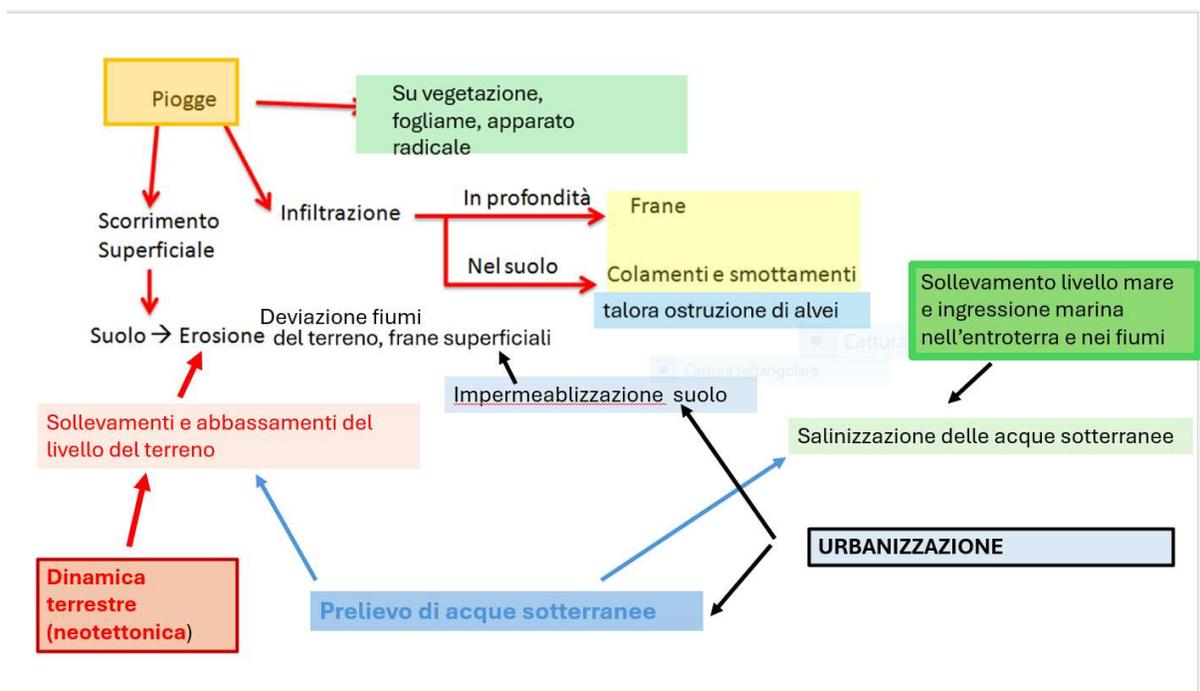


Figura 1 - Ripartizione degli effetti delle piogge, che in parte cadono sulla vegetazione, in parte sul terreno (scorrimento superficiale) asportandolo quando sono in eccesso (erosione), in parte vi si infiltrano, alimentando i corpi idrici sotterranei e, quando sono in eccesso, producendo frane o colamenti superficiali del suolo indebolito e appesantito dalla saturazione. Le acque che vengono raccolte da fiumi e torrenti, se sono in eccesso, escono dagli argini e producono esondazioni.

Le forme di dissesto idrogeologico più comuni sono, come indica la figura 1: erosione del suolo, frane, colamenti superficiali, esondazioni. Le altre fonti di dissesto sono DINAMICA

TERRESTRE, URBANIZZAZIONE, SOLLEVAMENTO DEL LIVELLO MARINO, le cui conseguenze sono indicate nella figura con e frecce.

La prevenzione di questi eventi comporta quindi l'analisi di tutti i fenomeni dinamici del suolo, che fanno evolvere le forme del rilievo, e degli eventi naturali e artificiali che inducono squilibrio nei rapporti fra afflussi idrici e capacità di smaltimento del sistema acqua terreno

2. I FATTORI CHE DETERMINANO I DISSESTI IDROGEOLOGICI

Nello Schema iniziale di figura 1, si sono messi in evidenza i fattori che producono lo squilibrio nel sistema acqua-suolo

PIOGGE

DINAMICA TERRESTRE

URBANIZZAZIONE

INNALZAMENTO DEL LIVELLO MARINO

Esaminiamo ora gli effetti che provengono dal manifestarsi di ciascuno di questi fattori, a iniziare dalle **piogge**.

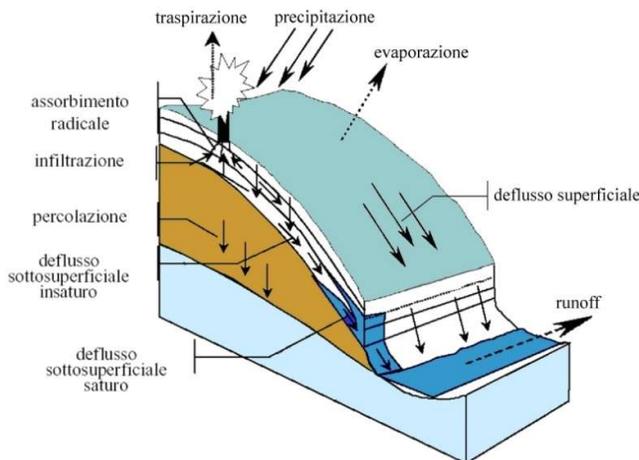


Figura 2 - Ripartizione delle precipitazioni, che evidenzia come le piogge in parte evaporino, in parte defluiscono in superficie in parte si infiltrano.

2.1 EFFETTI DELLE PIOGGE

Si nota dallo schema della figura 1 e dalla figura 2, che l'infiltrazione delle acque di pioggia satura in parte il suolo superficiale e poi talora riemerge a formare sorgenti, ma in buona parte tende ad approfondirsi per alimentare le acque sotterranee. La frazione che nella nostre regioni arriva alla falda (infiltrazione efficace) è abitualmente circa un quarto dell'acqua piovana, se i terreni non sono impermeabili. Le precipitazioni non producono danni se sono rapidamente smaltite verso un ricettore che non subisce eccessivi innalzamenti di livello per effetto della loro infiltrazione. Nell'entroterra il primo ricettore è il terreno: se questo è molto permeabile è in grado di assorbire grandi quantità di acqua, altrimenti l'acqua fluisce in superficie e produce allagamenti.

La capacità dell'acqua di attraversare il terreno varia in base alla sua tipologia: I terreni sabbiosi hanno un alto tasso di infiltrazione, da 19 a 25 mm / h; I terreni argillosi hanno un basso tasso di infiltrazione, da 3 a 8 mm / h; I terreni limosi hanno un tasso di infiltrazione da 9 a 13 mm / h. Si nota che, nel caso di Valencia le piogge sono state molto più elevate della capacità di assorbimento del terreno.

Tali capacità di assorbimento variano molto in relazione con lo stato del suolo, e di questo tengono conto i calcoli che prevedono il rapporto fra pioggia e infiltrazione. Nell'allegato1 sono esposte le regole e le formule che permettono di valutare l'infiltrazione in base al tipo di terreno e al suo grado di saturazione.

L'infiltrazione è considerata la **prima fase** della discesa dell'acqua verso il basso, all'interno del profilo del suolo. Più brevemente può essere definita anche come "afflusso idrico" in condizioni di terreno saturo (cioè quando i pori sono occupati in parte da aria in parte da acqua).

Partendo da qui ciò che maggiormente ci interessa è un parametro detto "**velocità di infiltrazione**" che è definito come la **quantità di acqua che penetra nel terreno nell'unità di tempo**, e si esprime come centimetri al secondo (cm/s), oppure più normalmente in millimetri all'ora (mm/h).

La **velocità** d'infiltrazione varia nel tempo ed è **massima all'inizio delle precipitazioni** quando il suolo è più asciutto. In seguito decresce, sia per l'aumento del livello di saturazione del terreno sia per il rigonfiamento dei colloidi che vanno a ostruire i pori di trasmissione dai quali l'acqua defluisce più in basso.

Ad esempio, se si riempie una tazza d'acqua da un litro capovolta sul terreno limoso-sabbioso, quando il suolo è mediamente umido per una recente pioggia assorbe in qualche decina di secondi il liquido; in caso di un'estate normale, l'umidità dopo una settimana dalla pioggia diminuisce alquanto e l'assorbimento dell'acqua avviene in qualche minuto. Quando passa più di un mese e il terreno è secco, l'acqua viene assorbita in un quarto d'ora o più, per la presenza di molta aria nei vuoti del terreno, che ostacola il movimento verticale dell'acqua finché non viene espulsa.

Dopo l'eliminazione dell'aria, la velocità si stabilizza su un valore più o meno costante nel tempo (velocità di infiltrazione stazionaria o di base).

Essa dipende da diversi fattori:

- dalla **composizione granulometrica** del terreno (ovvero la % di sabbia, limo e argilla): quanto minore è la percentuale di limo e argilla, tanto maggiore è la velocità di infiltrazione, perché i vuoti fra i granuli di sabbia e ghiaia sono ampi e consentono un facile passaggio dell'acqua
- dalla **struttura** ovvero dalla disposizione delle particelle del terreno in aggregati o meno
- dall'**eventuale protezione della superficie del suolo** dall'azione battente della pioggia, che può essere rappresentata dalla **vegetazione o dalla pacciamatura**.

Per esaminare i calcoli che permettono queste valutazioni, si rimanda all'ALLEGATO 1

La velocità di infiltrazione può essere misurata in campo con uno strumento detto "**infiltrometro**", costituito da un cilindro che si infigge nel terreno per circa 10 cm, dove si versa un volume di acqua noto e con un'asta graduata si nota in vari step l'assorbimento da parte del terreno. La quantità che si è infiltrata nel terreno dopo un dato tempo è detta "**capacità di infiltrazione**".

Quindi il terreno si comporta come un ricettore delle acque piovane, che accoglie facilmente se presenta una permeabilità elevata e quando ha uno spessore di molti metri; una parte della pioggia evapora se permane a lungo sul suolo o nei primi metri di esso (mediamente circa la metà o poco più di quella caduta), e una parte scorre sulla superficie del terreno verso i ricettori, cioè corsi d'acqua, laghi, mare dove viene convogliata dalle pendenze del terreno.

Quando il terreno è in pendenza, l'aumento del suo peso determinato dalle acque infiltrate può contribuire a produrne il franamento; quanto più il terreno si satura di acqua, tanto più è esposto a questo tipo di dissesto, ed è quindi normale che in corrispondenza di forti piogge si abbiano frane.

Per tale motivo l'andamento delle piogge nel tempo va sorvegliato e registrato accuratamente. Si è visto ad esempio che mediamente ogni dieci anni si hanno periodi con forti piogge nei nostri climi.

La copertura vegetale può attutire gli effetti delle precipitazioni, come indicato orientativamente dalla relazione di Wischmeier.

Questa relazione esprime A, cioè la perdita specifica e per anno di terreno agrario come prodotto di R per K per LS, per C per P.

R, è un parametro adimensionale meglio noto come indice di aggressività della pioggia rappresenta il fattore climatico che mette in conto l'azione erosiva delle precipitazioni, ed è esprimibile nella forma

$$R = E' / 2.540.$$

Dove E (una grandezza adimensionale), rappresenta l'energia specifica dell'evento di pioggia, calcolabile immediatamente con la formula

$$E = 916 + 313 \cdot \log(I' / 25,4)$$

I' in mm/ora è invece la massima intensità di pioggia relativa ad una durata di 30 minuti

C adimensionale interpreta la capacità del tipo di copertura vegetale adottata di assorbire l'energia della pioggia. Valore di C per diverse pratiche culturali sono riportate da alcuni autori. In questa sede si indica soltanto i valori assunti dal fattore nell'ipotesi progettuale assai usuale di copertura superficiale di una discarica incontrollata per semplice inerbimento. Dove c è uguale a uno a prato secco e 0,60 per un prato dopo due mesi dalla semina, $C = 0,01$ a prato pienamente sviluppato. Infine P , ancora una volta adimensionale, rappresenta il fattore di pratica antierosiva.



Figura 3 - L'erosione di un corso d'acqua avviene spesso per il franamento delle sponde; i punti sottoposti all'azione della corrente sono facilmente rilevabili perché mostrano evidenze dell'asportazione del terreno della riva e della vegetazione che lo copre. La foto mostra una sponda del F. Panaro sottoposta all'azione erosiva della corrente.

Al di là delle possibilità di applicare su scala regionale questa relazione per la variabilità delle tipologie di suolo e di vegetazione, si osserva che tanto più elevato è il valore di intensità di pioggia e tanto più secco è il terreno, tanto maggiore è la perdita di suolo, quindi tanto più grave il dissesto. Come si potrà vedere nel capitolo successivo, i cambiamenti climatici portano proprio verso una accentuazione dell'intensità di pioggia e all'inaridimento del terreno superficiale. In sostanza, il cambiamento climatico favorisce una sempre maggiore erosione del suolo aggravando i dissesti idrogeologici.

2.2 EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Il cambiamento climatico è una variazione significativa delle condizioni climatiche medie della Terra su un lungo periodo. Si tratta di un fenomeno complesso e multifattoriale, con conseguenze profonde per l'ambiente e per la società umana, che altera profondamente la periodicità alla quale si è fatto cenno in precedenza.

Cause principali:

Aumento delle emissioni di gas serra: le attività umane, come la combustione di combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) e la deforestazione, rilasciano in atmosfera grandi quantità di gas serra, come l'anidride carbonica (CO₂) e il metano (CH₄). Questi gas intrappolano il calore del Sole, provocando un aumento della temperatura media del pianeta.

Altri fattori: sebbene le attività umane siano la causa principale del riscaldamento globale, anche fattori naturali come le eruzioni vulcaniche possono influenzare il clima.

Conseguenze:

* Aumento delle temperature: si sta verificando un aumento costante delle temperature medie globali, con ondate di calore sempre più frequenti e intense.

* Innalzamento del livello del mare: lo scioglimento dei ghiacciai e delle calotte polari provoca un innalzamento del livello del mare, minacciando le zone costiere e le piccole isole.

* Eventi meteorologici estremi: si stanno intensificando eventi meteorologici estremi come uragani, siccità, alluvioni e ondate di calore.

* Perdita di biodiversità: molte specie animali e vegetali non riescono ad adattarsi rapidamente ai cambiamenti climatici, rischiando l'estinzione.

* Impatti sull'agricoltura e sulla produzione alimentare: I cambiamenti climatici alterano i modelli di precipitazione e le temperature, influenzando negativamente la produzione agricola.

Viviamo quindi un momento particolare, e sembra che stiano cambiando le leggi che governano il clima. Di conseguenza, la maggioranza degli interessati è portata a pensare come adattare al cambiamento climatico le tecniche previsionali sulle quali sono fondate le progettazioni delle opere e la prevenzione dei danni. Una parte dell'ingegneria civile e ambientale sta riflettendo su questi problemi, perché cambierebbe una serie di importanti coefficienti usati per progettare le costruzioni nelle aree urbane e le opere di difesa fluviale, che sono fondati sulle conoscenze acquisite nel tempo sulle risposte dell'ambiente al variare delle condizioni che governano l'equilibrio fra espansione urbana, acque, suolo e sottosuolo. Conviene quindi fare un punto della situazione esaminando almeno gli aspetti sui quali si è raggiunto un buon accordo.



Figura 4 - Alluvione del settembre 2024 in Emilia – Romagna : le campagne del Ravennate

Nell'Europa meridionale il clima è determinato in gran parte da un aumento di temperatura che si è venuta creando negli ultimi anni producendo un aumento dell'evaporazione e dell'umidità sul Mediterraneo. Quando il mare viene attraversato dall'aria desertica di provenienza africana, questa si carica rapidamente di vapore e per arrivare nelle nostre regioni con livelli elevati di umidità.

Dal 2000 in Scandinavia si registrano, in alcuni periodi dell'estate, massime sopra i 30 °C.

Le temperature elevate, in questi mesi sono state accompagnate da scarsissime precipitazioni. A Milano, nei primi sette mesi del 2022 ha piovuto il 60% in meno rispetto alla media storica, e le proiezioni climatiche mostrano che siamo ormai in pieno in una tendenza pluridecennale di aumento di frequenza dei periodi secchi. Solo nel 2023 e soprattutto nel 2024 si sono avute precipitazioni elevate che hanno prodotto molti danni.

A fronte di un aumento di + 3°C, l'aridità del suolo potrebbe aumentare del 40%, coinvolgendo 170 milioni di persone.

Negli ultimi quarant'anni, la durata del periodo di copertura nevosa nel mondo (Alpi comprese) si è ridotta mediamente di 15 giorni.

Il ritmo delle precipitazioni sta cambiando. Ad esempio i periodi di siccità aumentano sensibilmente e in continuazione.

Tra gli indicatori di eventi estremi maggiormente utilizzati per rilevare i periodi siccitosi vi è l'indice di giorni consecutivi senza pioggia (CDD – *Consecutive Dry Days*). Secondo il rapporto Benessere equo e sostenibile in Italia dell'ISTAT (BES 2023), nel 2023 i giorni consecutivi senza pioggia a livello nazionale hanno raggiunto il valore di 29 giorni (+5,5 gg rispetto alla mediana del periodo climatico). A livello regionale le anomalie più elevate dell'indice hanno interessato Veneto ed

Emilia-Romagna (+8), Campania (+7,5) e Toscana (+7). Rispetto all'anno precedente si nota un aumento del fenomeno in varie regioni del Sud (Campania, Puglia, Basilicata e Calabria) e un segnale opposto in altre aree, con una forte riduzione soprattutto in Sardegna (da +25 a -15).

A questi fattori si aggiungono modalità nuove e spesso catastrofiche di precipitazioni, e addirittura fenomeni strani o poco conosciuti.

a) **Ciclone mediterraneo**

Un dei fenomeni relativamente nuovi che più ci interessa è il **ciclone tropicale mediterraneo** (detto anche **medicane**, dalla fusione dei termini inglesi *MEDiterranean hurriCANE* "uragano mediterraneo") è un sistema di bassa pressione caratterizzato da un nucleo caldo, piogge torrenziali, forti venti, che tipicamente compare nell'area del bacino del Mediterraneo.

Fra i vari fenomeni convettivi che interessano il Mediterraneo a diverse scale spaziali e temporali (fronti freddi, mesocicloni, celle isolate) i cicloni Mediterranei sono i meno conosciuti. "Cicloni mediterranei", in senso lato, vengono spesso chiamate le più intense depressioni (minimo al suolo inferiore a 1000 hPa), caratterizzate dalla presenza di un centro di bassa pressione ben delimitato e da venti particolarmente intensi^[3].

Nell'ambiente meteorologico sono stati spesso chiamati "bombe meteorologiche" così definite da T. Bergeron: "un approfondimento molto rapido del ciclone extratropicale, nel quale la caduta di pressione in superficie corrisponde a 1 hPa ogni ora o più per un periodo di almeno 24 ore"¹. La durata temporale è molto variabile ma in genere è limitata a 1 o 2 giorni (molto spesso tali fenomeni durano solo poche ore).

Si verificano persistenti ed abbondanti piogge a prevalente carattere temporalesco e di rovescio (intensità massima di 500 mm/h o talvolta anche più). Il diametro massimo dei cicloni mediterranei è di 200–400 km. La loro origine, come quella degli uragani tropicali, è da ricercarsi nell'eccesso di energia termica accumulata sopra il Mediterraneo. Tale energia viene trasformata rapidamente in energia cinetica, ovvero in un intenso moto vorticoso dell'aria, con minima dispersione in moti traslazionali essendo una struttura quasi isolata^[3].

Il periodo dell'anno in cui si possono verificare è quello in cui la temperatura superficiale del mar Mediterraneo è più alta (intorno ai 26 °C), condizione che si verifica normalmente tra agosto e settembre sullo Ionio, sul basso Tirreno, sul canale di Sicilia, sul mar Libico, sul mar di Sardegna e sull'Adriatico centrale, Condizione necessaria per la loro nascita è la presenza di aria molto calda e prossima alla saturazione nei bassi strati sopra la superficie del mare^[3].

Per innescare però la liberazione dell'energia in eccesso è necessaria la formazione di un'area di convergenza nei bassi strati che determini la nascita di moti ascensionali e quindi di una piccola depressione al suolo

Recentemente sono da ricordare "Grace" nel 2009, "Qendresa I" nel novembre 2014 e la tempesta di inizio novembre 2016, su Malta e nella Sicilia meridionale, il 21 gennaio .

L'evento meteorologico estremo che ha causato decine di morti in Spagna per le forti piogge e le violente inondazioni alla fine di ottobre 2024, in particolare nella regione di Valencia, viene chiamato DANA, acronimo spagnolo che si può tradurre come "depressione isolata ad alta quota". Può portare sulla terraferma temporali imponenti in grado di scaricare enormi quantità di pioggia in poche ore, con conseguenti alluvioni.

b) La Goccia Fredda (DANA)

DANA è un fenomeno meteo che si verifica generalmente nel Mediterraneo occidentale, Spagna compresa, ed è l'acronimo di Depresion Aislada en Niveles Altos. La DANA si scatena quando una grande massa di aria fredda isolata ad alta quota forma una depressione che va a scontrarsi con l'aria calda in bassa quota. Questo contrasto crea piogge intense e temporali a "V" che si fanno ancora più forti in corrispondenza dei rilievi montuosi.

Secondo AEMET, l'agenzia statale di meteorologia della Spagna, la precipitazione più intensa è stata registrata a Chiva, nell'entroterra 35 km a Ovest della costa di Valencia, con ben 491,2 mm in otto ore (pari alla media di un anno!), di cui 160 in un'ora. Si tratta di un valore tra i più elevati storicamente noti in Europa e nel bacino del Mediterraneo, all'incirca del medesimo ordine di grandezza dei 472 mm caduti in un tempo tuttavia ancora più breve (6 ore) il 25 ottobre 2011 a Brugnato (La Spezia), responsabili dell'alluvione delle Cinque Terre e della Val di Vara, e dei 496 mm piovuti sempre in 6 ore il 4 ottobre 2021 a Montenotte Inferiore (Savona), attuale record italiano su tale intervallo orario (precipitazioni tuttavia avvenute in territori mediamente abituati a ricevere e smaltire il triplo della pioggia annua di Valencia). Sono quantità che nessun territorio, anche se correttamente (e giustamente) mantenuto, può sopportare senza gravi conseguenze.

Un altro evento drammatico avvenne proprio a Valencia il 14 ottobre 1957 causando almeno 81 vittime per il violento straripamento del fiume Turia che attraversava la città, e di cui – a seguito dell'episodio – venne deciso lo spostamento dell'alveo di 3 km, a sud dell'area metropolitana, dove si trova attualmente.

2.2.1 SVILUPPO DEI DISSESTI CATASTROFICI

Quindi, volendo fare una considerazione finale su ciò che abbiamo precedentemente detto, è noto che quando l'intensità istantanea di precipitazione (che sia essa pioggia naturale o artificiale) supera la velocità d'infiltrazione di un suolo, l'acqua tende ad accumularsi in superficie, dando luogo a "ristagno" se ci troviamo in una zona pianeggiante o a "ruscellamento" se invece siamo su un terreno in pendenza.

A questo punto l'acqua che il terreno non riesce a ricevere si incomincia a muovere verso le linee di deflusso o quelle di massima pendenza, in modo più o meno veloce e turbolento a seconda della scabrezza della superficie. In questo modo raggiunge poi i corpi idrici di ricezione, che possono essere fiumi, laghi, falde ecc.

Dato che una parte consistente della pioggia evapora e una parte minore si infittra , solo una quota percentuale della precipitazione sopraggiunge al reticolo idrografico. Il rapporto fra questa quota e la pioggia caduta è detta **coefficiente di deflusso**, che è molto alto e prossimo all'unità nelle zone impermeabili naturalmente o impermeabilizzate (da tetti, asfalto). Quanto maggiore è l'estensione di terreni impermeabili, tanto più elevata è la possibilità di eventi

catastrofici, perché una sempre maggiore aliquota delle piogge scorre verso i fiumi e può provocarne l'esondazione.

Sono quindi evidenti i risvolti che tutto questo ha su molteplici aspetti. Dall'agricoltura al campo della Protezione civile lo studio e la gestione dell'infiltrazione dell'acqua nel terreno è molto importante per la vita di tutti i giorni.

2.2.2 RICONSIDERAZIONI SULLE TECNICHE PREVISIONALI DELLE ALLUVIONI

Gli studiosi di idrologia hanno posto l'attenzione sugli elementi che possono indicare le tendenze in atto e sull'effetto di possibili scenari di cambiamento del regime delle precipitazioni intense a fronte dei più accreditati scenari di emissione di CO2 proposti dalla comunità scientifica.

L'inclusione degli effetti del cambiamento climatico può avvenire sia prendendo in esame gli effetti dei più recenti eventi estremi nelle valutazioni di pericolosità e di rischio, sia includendo i dati idrologici di tali eventi nelle analisi probabilistiche, sia, infine, includendo nelle stesse analisi probabilistiche le proiezioni quantitative delle grandezze idrologiche. Ad esempio nel caso del Fiume Po, l'Ente che ne governa la gestione (ADBPO) ha già preso l'iniziativa di tener conto degli effetti delle più gravose piene verificatesi in varie parti del bacino negli anni seguenti al 2013, avendo presente che tali eventi, per intensità puntuale delle precipitazioni, hanno raggiunto valori associabili a bassa probabilità di accadimento, quindi molto intensi, con effetti al suolo in taluni casi molto significativi.

ADBPO pone in evidenza che le variabili che incidono sulle previsioni, oltre che dai cambiamenti climatici, sono l'uso del suolo, il grado di antropizzazione (in generale quindi di impermeabilizzazione), la manutenzione generale del territorio montano e collinare, quella delle aste fluviali, connessa alla funzionalità fluviale e alle opere idrauliche di protezione del territorio, e, infine, la variazione delle aree di espansione e laminazione delle piene.

L'inclusione dei dati idrologici di tali eventi nelle analisi probabilistiche è stata considerata quanto mai opportuna e pertanto sono state avviate le specifiche analisi di aggiornamento delle relative stime delle grandezze idrologiche, all'interno di un percorso che coinvolge la comunità tecnico-scientifica dell'intero territorio del distretto, puntando sulla condivisione a vasta scala dei criteri e dei metodi di stima e sulla qualità delle stime stesse.

Il problema dell'inclusione delle proiezioni climatiche nelle stime delle grandezze idrologiche, pertanto, è stato posto all'interno di tale percorso, che sarà sviluppato già in sede di primo aggiornamento del PGRA e, successivamente, nei prossimi cicli di pianificazione.

Le figure di seguito riportate forniscono una rappresentazione schematica dei problemi della sostenibilità delle misure rispetto al cambiamento climatico.

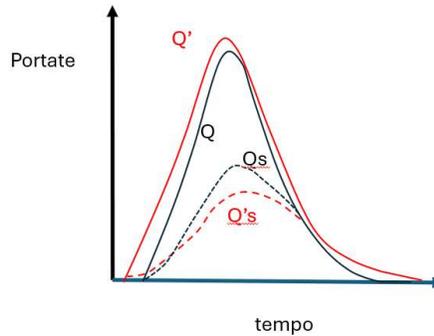


Figura 5 - Da ADBPo : ipotesi di modifiche nella forma della piena in seguito al cambiamento del clima: incremento delle portate al colmo e dei volumi di piena per le variazioni delle precipitazioni

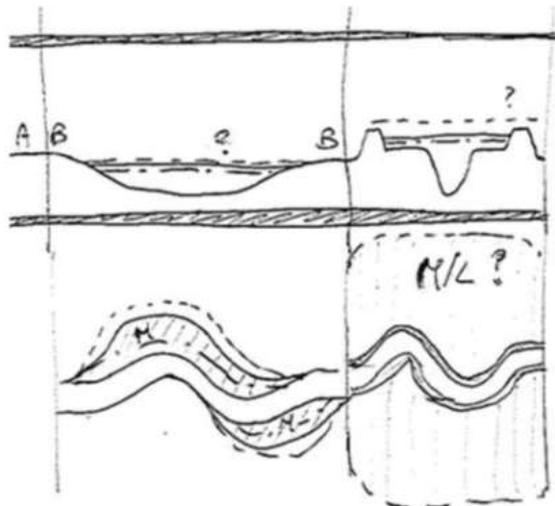


Figura 6 - Modifiche prevedibili secondo ADBPo nella forma degli alvei: nei corsi d'acqua meandriformi o semirettiinei, tendenza all'aumento dei livelli di piena e re-incisione degli alvei che tendono a rettificarsi con riduzione dell'ampiezza delle curvature.

È molto frequente che depositi detritici spessi o rocce fortemente alterate siano coinvolte in movimenti franosi.

Per esempio le frane avvenute nel 2014 e nel 2015 a Genova e dintorni sono legate a questo tipo di condizione.

In **fig.7** è rappresentata una sezione schematica di un versante franato in cui è possibile notare un notevole spessore sia di depositi detritici che di rocce molto alterate.

2.2.3 FRANE E ALLUVIONI PRODOTTE DA FRANE

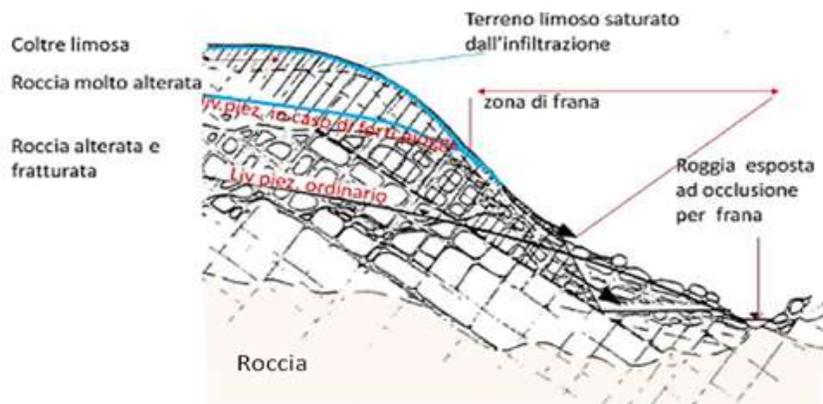


Fig. 7 - Schema di successione di rocce alterate

Nella figura 8 si può notare che sotto la spessa copertura detritica (sopra la linea blu) del versante meridionale delle Odle (Dolomiti) vi sono **due superfici di discontinuità**: una alla base del detrito (linea blu) e una a separazione della roccia fratturata da quella poco alterata (linea rossa). Lungo queste discontinuità si impostano le superfici di rottura dei movimenti franosi: rapido quello meno profondo, lento quello nella roccia.



Fig. 8 - Versante meridionale delle Odle (Dolomiti) : si nota come nel tempo si sia formata sulla roccia compatta e stratificata una duplice coltre. Quella al contatto (indicato dalla linea rossa) con la roccia calcarea stratificata, è costituita da roccia fratturata e alterata prevalentemente fatta di grossi blocchi, mentre quella sopra alla linea blu è il prodotto di alterazione della coltre sottostante, ed è formata da materiale più fine. Durante le piogge e la fusione delle nevi, le acque erodono questi terreni producendo le larghe coltri di detrito visibile ai piedi della cresta rocciosa.

Quando, per eventi meteorologici eccezionali, le condizioni di instabilità prevalgono, la coltre di roccia alterata dà luogo a piccole frane che si stabilizzano con il tempo. Tuttavia se gli eventi eccezionali si ripetono questi dissesti possono essere riattivati. Pertanto tutte queste aree, spesso considerate solo come coltri di detrito, sono in realtà frane quiescenti, cioè frane momentaneamente inattive, ma che possono essere riattivate dalle cause originarie.

Per questo motivo è molto importante delimitare queste frane, causate da rocce molto fratturate o alterate. Infatti è ben noto che possono essere rimobilizzate anche da costruzione di edifici, scavi o infrastrutture (p.e. gallerie)

Se non vengono specificamente ricercate, spesso vengono trascurate perché assimilate erroneamente a falde di detrito; ne è un esempio la frana presso il comune di Bindo di Cortenova (LC) avvenuta il 1 dicembre 2002 (Fig. 9) che distrusse completamente diverse abitazioni e fabbriche.



Fig. 9 – Frana di Bindo di Cortenova

La frana avvenuta quel giorno è in realtà solo una porzione del versante instabile, la cui condizione di instabilità permane tuttora. Nella figura 10 sono ben evidenti sia la frana già avvenuta che le nicchie di distacco che potrebbero causare, per i motivi precedentemente esposti, fenomeni di instabilità con un volume di materiale coinvolto molto grande (in rosso in figura 10 è evidenziata l'area soggetta a questa instabilità)



Fig 10 - La linea rossa delimita l'area costituita da rocce deboli, che configurano possibili movimenti futuri

La riattivazione della frana potrà essere determinata dall'afflusso d'acqua di scorrimento superficiale proveniente dalla zona di cresta (Fig.11), formata da rocce poco permeabili, e dalla

sua successiva infiltrazione nella coltre detritica sottostante. La velocità delle acque di scorrimento superficiale agevola l'innescò della frana producendo una consistente erosione del detrito che copre il versante.



Figura 11 - Riattivazione della frana per l'usuale afflusso all'area instabile di acque superficiali dall'ampia zona di cresta

Stabilità apparente di ammassi rocciosi fratturati

Un altro esempio di struttura predisposta al franamento sono le torri di roccia calcarea o dolomitica fratturate, per esempio le Cinque Torri presso Cortina, il Thurweiser in Val Zebrù e la torre Dones in Valsassina (Fig. 12). Questi ammassi sono sottoposti a un lento detensionamento per il venir meno delle resistenze al piede, per l'alterazione dei giunti anche per effetto della vegetazione (wind leverage) e per neotettonica.

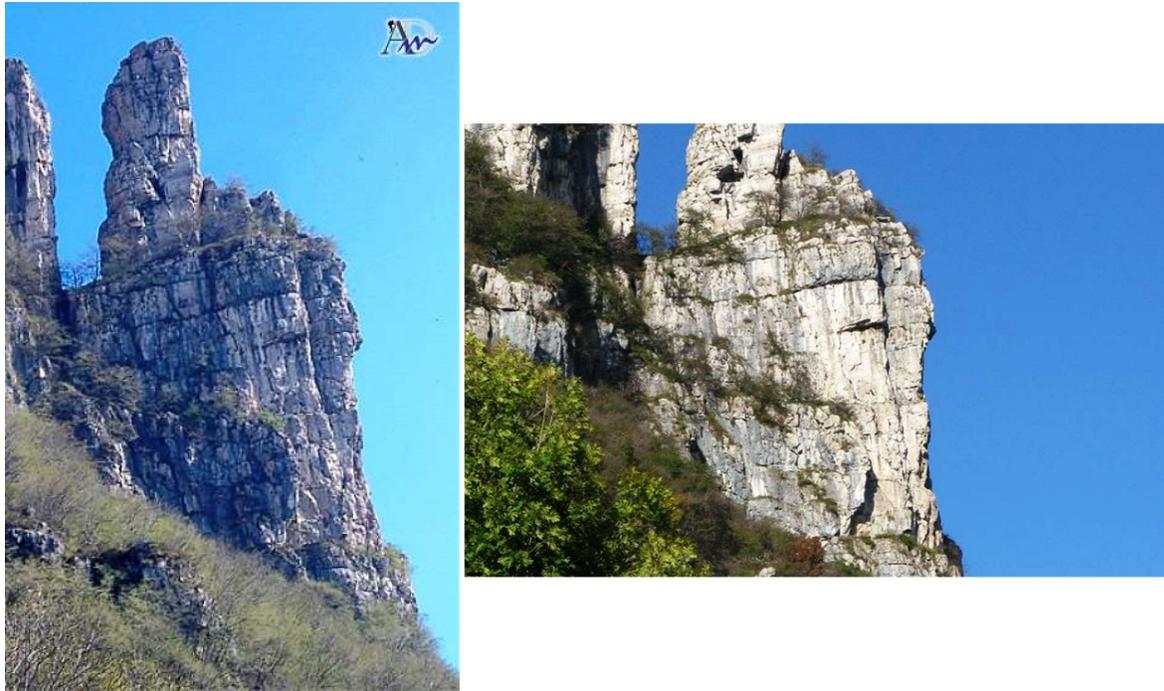


Fig. 12 - Torre Dones in Valsassina presso Lecco : erosione del terreno alla base della torre, dissoluzione carsica della rocia calcarea e ampliatio dei giunti per effetto termoclastico indeboliscono rapidamente l'ammasso roccioso.

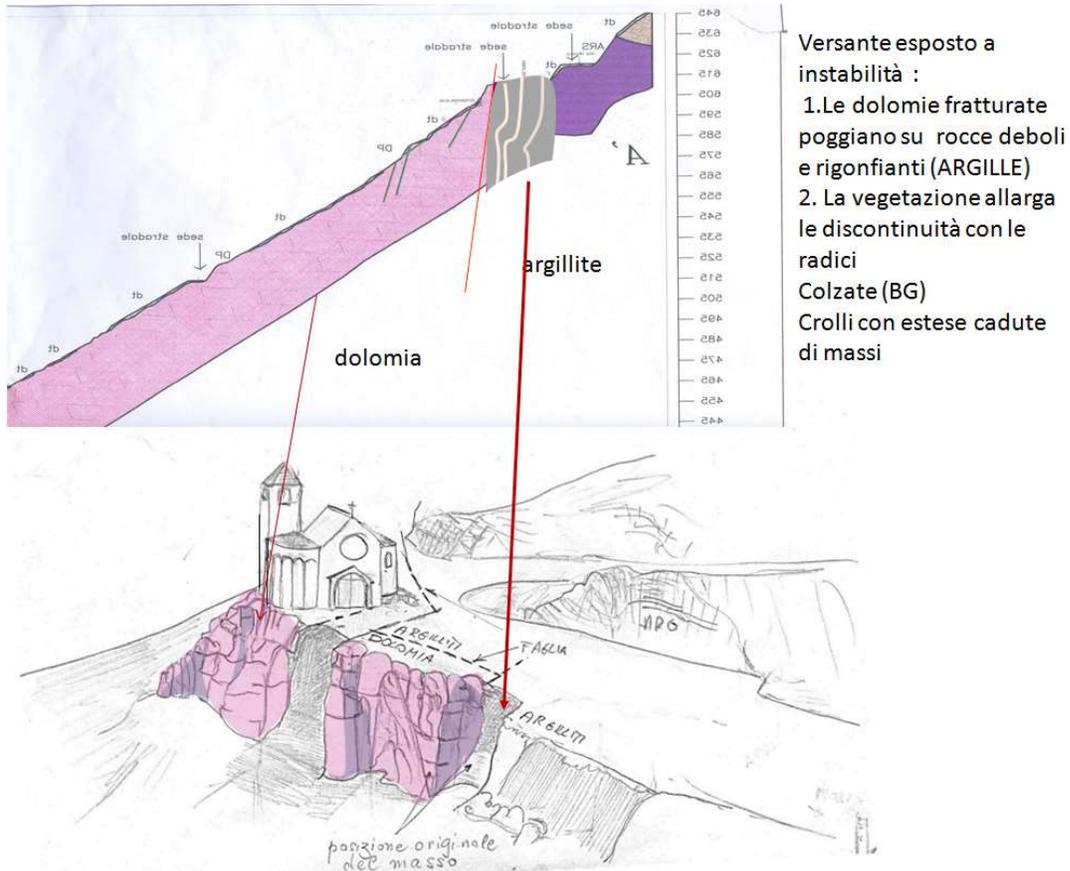


Fig. 13 - Versante esposto a instabilità perché costituito da rocce deboli e fratturate su elevate pendenze

Instabilità dovuta a frane profonde

Un altro esempio di struttura fortemente predisposta al franamento sono le frane profonde (DGPV), innescate anche dal venir meno all'inizio dell'Olocene del sostegno costituito dalle masse glaciali pleistoceniche; così molti versanti sono soggetti a fenomeni di detensionamento. Questo processo, unito alla presenza di fattori di natura idrogeologica ed elementi strutturali predisponenti (p.e faglie, sistemi di fratture) porta alla formazione delle deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV). Un territorio molto soggetto a questo tipo di instabilità è la Valtellina.

In figura 14 è possibile osservare frane quiescenti riattivabili anche da eventi meteorici presso la frazione di Santa Lucia presso il comune di Valdisotto (SO). In superficie l'esistenza delle frane quiescenti era segnalata da lunghe fenditure arcuate nel terreno e si aveva nozione di frane alla fine del secolo scorso.

La Cartografia geomorfologica di quest'area è stata in grado di evidenziare le tracce superficiali di dissesto, in particolare le fenditure nel terreno dovute agli spostamenti dei primi metri del suolo. Si sono posizionati inclinometri per valutare la profondità della superficie di rottura.



Fig. 14 – Frane quiescenti

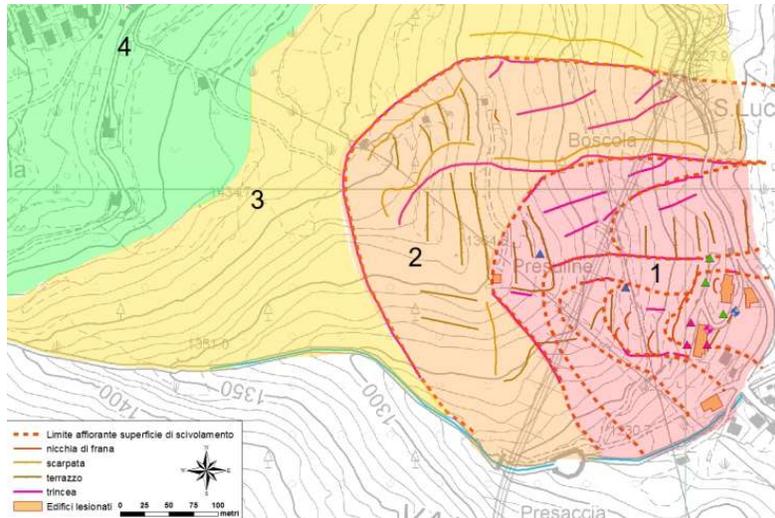


Fig. 15 - Frana profonda presso Bormio (Sondrio)

Interazione fra instabilità dei versanti e rete idrica superficiale

L'interazione fra mancata regolazione dei deflussi nella rete idrica di superficie e instabilità dei versanti produce dissesti di grande impatto ambientale, dei quali è opportuna una breve descrizione:

- rottura degli argini per la presenza di depressioni naturali e artificiali (es.cave)
- dam break: frane invadono gli alvei e producono la formazione di laghi temporanei che finiscono per erodere la diga naturale producendo onde di piena disastrose
- alluvionamento per sottofiltrazione: la falda alimentata dai fiumi emerge nelle aree circostanti il fiume

Durante le piene il corso d'acqua erode la sponda fino al livello di falda. Il terreno saturo frana verso l'esterno riempiendo le depressioni. Particolarmente pericolose sono le cave di inerti scavate di molti metri a poca distanza dal fiume. Analogo modello vale per il dam – break, che consiste nell'improvviso abbattimento di dighe naturali in seguito allo sbarramento di corsi d'acqua operato da frane (fig. 16).

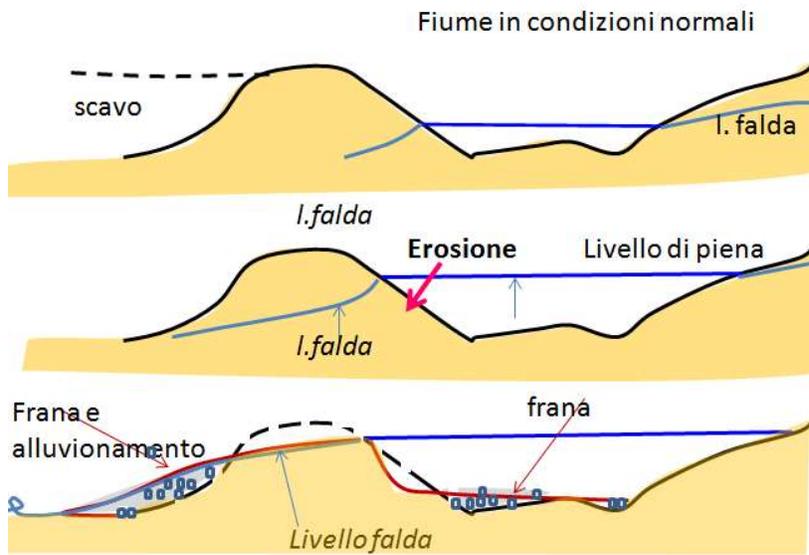


Fig. 16 - Interazione squilibrio idrogeologico- instabilità dei versanti-dam break

Il disastro di Fusine avvenuto nel luglio 1987 (Fig. 17a), è un esempio tipico di dam break che ha prodotto ingenti danni all'abitato. Esempi minori, ma frequenti, tuttavia si registrano annualmente in Lombardia.

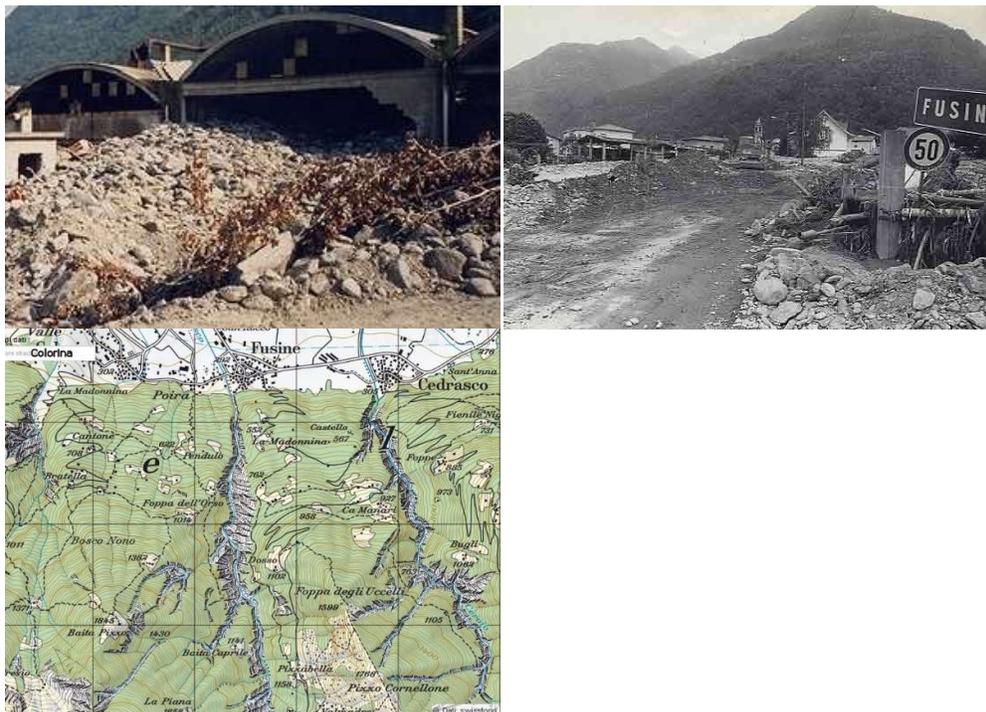


Fig. 17a – Effetti del dam-break di Fusine (Sondrio)

Un esempio di manchevole interpretazione delle conseguenze degli eventi naturali è costituito dal fatto che le carte delle dinamica del versanti (carte geomorfologiche) rilevano i dissesti, ma vengono ignorate le loro conseguenze. Ad esempio nella vasta area pedemontana rappresentata in figura 17b, sono state indicate (in viola) molte aree in erosione lungo i corsi d'acqua. Di

conseguenza vengono fatte periodiche ispezioni per valutare variazioni nell'entità del dissesto. L'accorgimento che si dovrebbe adottare è invece l'analisi previsionale delle conseguenze del dissesto rilevato.

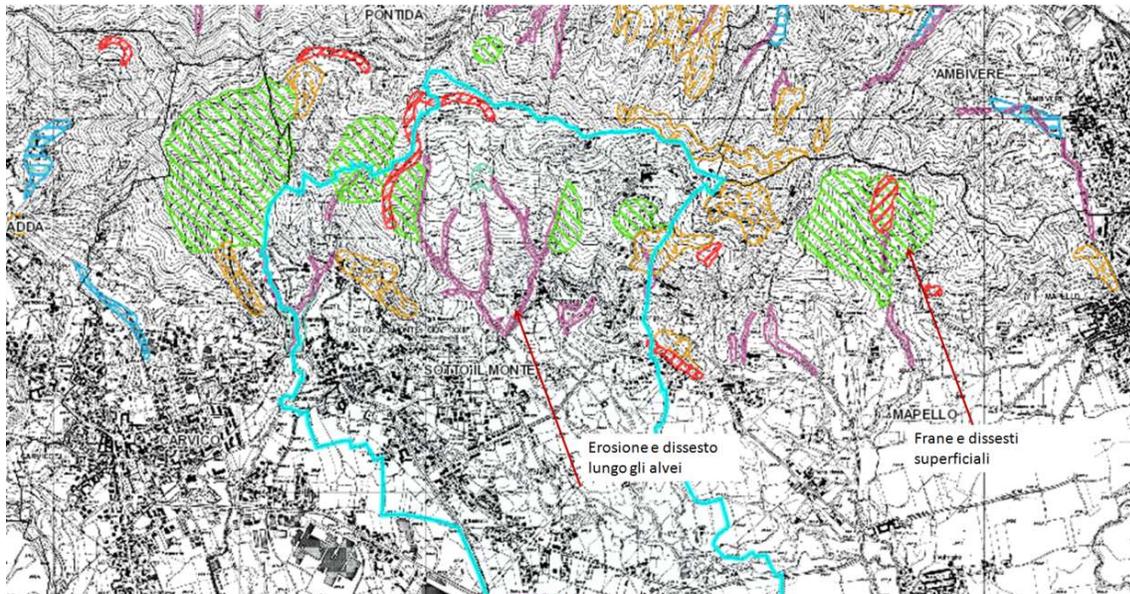


Figura 17b - L'instabilità delle rocce della parte alta del bacino, facilita l'accumulo di grandi quantità di sedimenti negli alvei dei corsi d'acqua che, durante le piene, li possono riversare all'interno degli abitati. Fiumi e torrenti devono pertanto essere oggetti di continua attenzione per l'eliminazione degli accumuli eccessivi di ghiaie, sabbia, massi e alberi.



Fig. 18 – Alluvione che ha colpito alcuni quartieri di Bergamo nel giugno 2016

Le conseguenze di una rete idrica esigua o mal regolata sono importanti. Infatti non solo l'acqua può creare ingenti danni, ma anche i detriti e la vegetazione che ostruisce le luci dei ponti e, negli abitati, le reti di scolo creando situazioni di pericolo e gravi danni. Una delle città più esposte a questo tipo di necessità è Genova, dove molti importanti torrenti convergono sull'abitato e, per la debolezza dei terreni altamente instabili, trasportano verso la rete dei canali e condotti di smaltimento delle acque un grande volume di detriti e vegetazione che devono essere asportati regolarmente per non produrre sbarramenti al deflusso delle acque dai versanti e dai corsi d'acqua.

Normalmente la presenza di alberi, tenuti ben controllati, riduce il pericolo di erosione e di franamenti, in quanto le radici stabilizzano le sponde e i versanti. Tuttavia se l'erosione delle sponde li asporta dalla riva, si accumulano in modo incontrollato negli alvei creando vere e proprie dighe naturali che impediscono il libero flusso delle acque di piena e producono facilmente esondazioni.

Inoltre una scarsa regolamentazione della copertura vegetale, in particolare in concomitanza di intense precipitazioni, aumenta considerevolmente la probabilità di scorrimento superficiale e l'infiltrazione e i conseguenti dissesti.

Nelle immagini seguenti sono riportati degli esempi di esondazioni prodotte dall'ostruzione degli alvei :

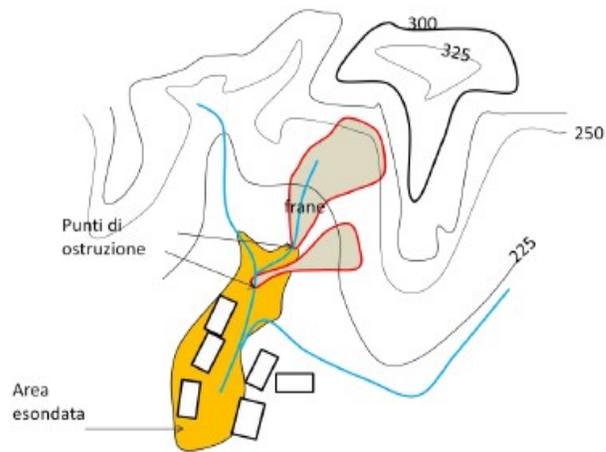


Figura 19 - Frane dei colli di Bergamo che hanno ostruito i corsi d'acqua provocando le esondazioni e i gravi danni conseguenti all'abitato .

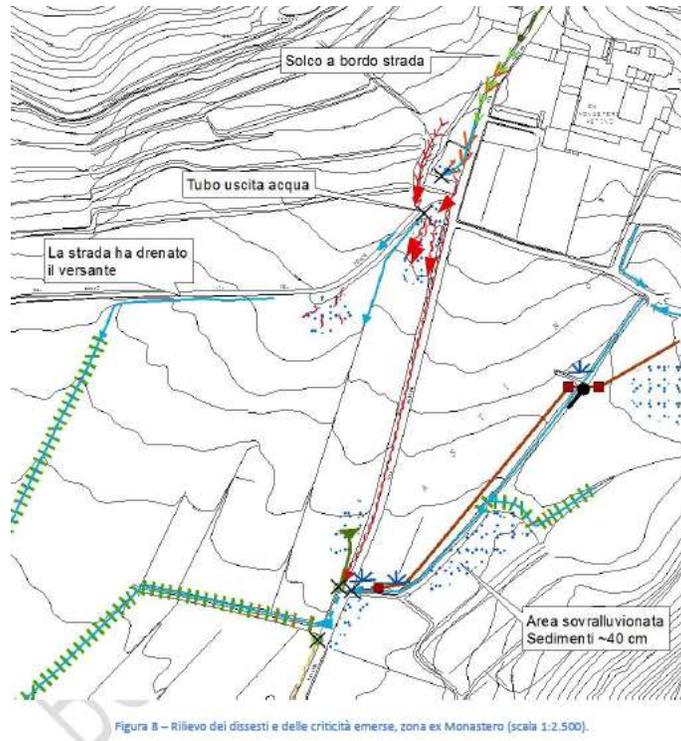


Figura 20 - Le acque di scorrimento disordinato sul versante hanno scavato solchi nel suolo trascinando i detriti a valle nelle rogge e lungo le strade e concentrando il loro effetti sulla zona pedemontana.

Le foto seguenti mostrano come i canali fossero colmi di terriccio e come i ponti abbiano facilitato l'ostruzione dell'alveo durante la piena .



Figura 21 - Le fotografie indicano come ponti e tombature colme di materiale producono l'esonazione delle acque che normalmente dovrebbero lasciare defluire verso il recapito.

In conclusione dove le cartografie geologiche indicano la presenza di dissesti e' necessario prima di tutto provvedere a rimedi che facilitino il drenaggio delle acque superficiali e sotterranee; essi possono essere anche poco costosi e limitati alla manutenzione ordinaria, diretta a conservare un'adeguata sezione di flusso nei corsi d'acqua e l'eliminazione della vegetazione quando ostacola la circolazione idrica.

L'urbanizzazione richiede un continuo adeguamento delle sezioni di flusso, a causa dell'anomalo aumento degli scarichi idrici a cui dà luogo la mancata infiltrazione nel terreno delle acque di superficie, ostacolate dall'impermeabilizzazione di tetti e strade. Notoriamente, opportune arginature impediscono, salvo eventi eccezionali, che queste esondazioni presentino eccessivi pericoli. Tuttavia la presenza delle falde di subalveo direttamente alimentate dai corsi d'acqua, può rendere inutile tale precauzione, perché le acque del fiume, filtrando sotto gli argini, possono asportare il terreno che li sostiene, distruggendoli.

La ricostruzione della geologia e delle caratteristiche idrogeologiche delle aree alluvionali permette di capire se può avvenire la sottofiltrazione degli argini.

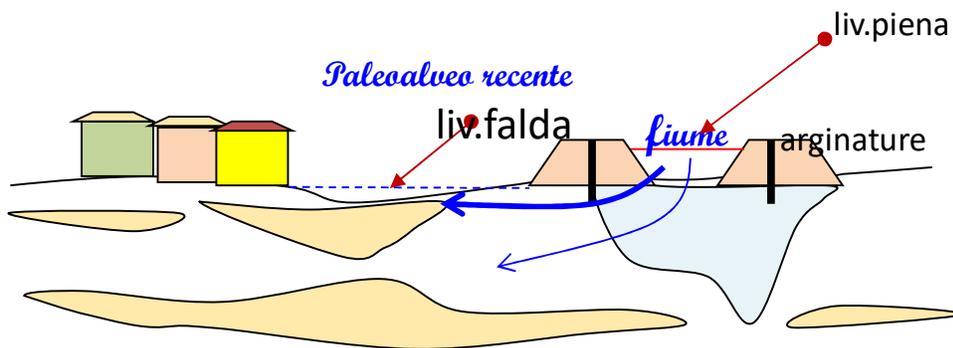


Figura 22 - Effetti della sottofiltrazione degli argini

In tal caso si dispongono diaframmi impermeabili o strutture equivalenti che si attestano sul substrato impermeabile dell'acquifero, evitando l'inconveniente descritto. La figura 22 mostra anche come la presenza di alvei abbandonati dei corsi d'acqua, molto frequente nelle loro adiacenze, costituisca una fonte di pericolo in quanto le esondazioni o le sottofiltrazioni possono riempirle d'acqua con grave pericolo per gli abitanti.

2.3 I CAMBIAMENTI NELLA FORMA DEL TERRENO DOVUTI ALLA DINAMICA TERRESTRE (NEOTETTONICA)

Al cambiamento climatico si aggiungono fattori meno noti, quali la continua variabilità dell'assetto del suolo, che tende a deformarsi sensibilmente nel tempo.

Per meglio chiarire quest'ultimo aspetto, che ha una incidenza molto rilevante, ricordiamo che negli anni '80 un convegno che si è svolto alla facoltà di ingegneria ha dimostrato che la forma del terreno della pianura padana è in continuo cambiamento, spostandosi verso l'alto o abbassandosi secondo i luoghi con una velocità di anche 4-5 m ogni secolo. Si mise in evidenza con una completa

cartografia, di cui vedremo degli esempi, anche il fatto che questi spostamenti verso l'alto o verso il basso non erano casuali ma erano tettonici, cioè collegati con strutture profonde dei terreni. Il substrato della pianura, che si trova in media a 200-300 m di profondità. La topografia del terreno si deforma in continuazione sotto la spinta a tenaglia della deriva del continente africano verso l'Europa (in media da 3 a 5 cm/anno) e della catena appenninica che tende a spostarsi verso Est. Vennero redatte per tutta la seconda metà del secolo scorso (ma già erano stati fatti dettagliati lavori di questo tipo a Venezia e Miano negli anni '70) cartografie topografiche di grande dettaglio di tutti gli ambiti cittadini della pianura padana dove si erano viste tali deformazioni (Venezia, Milano, delta padano, Modena, Reggio Emilia, Ferrara e Bologna soprattutto), che accertarono l'esistenza di un fenomeno capace di aggravare gli effetti di questa spinta a tenaglia di origine prettamente naturale; si trattava di un fattore tipicamente antropico, cioè la subsidenza del suolo con abbassamenti anche di diversi mm/anno e cedimenti negli edifici. Si mise in evidenza subito (per la Laguna a partire dagli anni 70) che, oltre alla deformazione naturale di natura tettonica del terreno, concorrevano in ambito cittadino anche l'estrazione di acqua dal sottosuolo (per Venezia particolarmente letale), tanto che si poté stabilire dati alla mano una proporzionalità fra i volumi di acqua estratti dal terreno e l'entità del cedimento del suolo. Si pose fine con interventi di riequilibrio dei prelievi di acque sotterranee al grave fenomeno, ad esempio captando le acque per Venezia da un acquedotto alimentato nel Trevigiano.

Non ha destato quindi sorpresa l'interesse per questi movimenti degli studiosi, che hanno redatto negli anni 90 una carta degli spostamenti recenti della pianura padana, per spiegare alcune forme del terreno; ad esempio, hanno chiarito il motivo della presenza dei cosiddetti "montorfani", colline nel cuore della pianura o ai suoi margini.

Ovviamente questi spostamenti deviano i corsi d'acqua, come l'Adda, l'Oglio, l'Olona e il Lambro che hanno andamento caratterizzato da brusche angolazioni altrimenti non spiegabile. Controllando l'età dei terreni, si vede che dove fra sedimenti recenti emergono terreni più antichi, che sono più alti di quelli circostanti creando un altipiano o terrazzo, significa che questi depositi hanno subito un sollevamento. Da queste deformazioni possono derivare effetti catastrofici in quanto i corsi d'acqua vengono deviati e producono ampie esondazioni prima di acquisire un nuovo equilibrio. Nelle aree montuose, come in Valtellina, i sollevamenti del terreno producono deformazioni che generano frane estese e profonde, come dimostrato anche di recente da studi accurati compiuto dall'Università di Milano Bicocca e da altre istituzioni. Quindi frane e alluvioni, che sono i più caratteristici dissesti idrogeologici, hanno anche una causa del tutto indipendente dall'urbanizzazione,

Gli eventi che si possono ricondurre a fattori puramente naturali sono endemici, in quanto connessi con i processi di evoluzione del rilievo. Nel mondo ci sono territori sottoposti a cambiamenti velocissimi, come il Perù e il Centro America, dove i casi di città scomparse per eventi catastrofici sono parecchi. L'Italia non è sicuramente fra questi, ma bisogna dire che è difficile governare il territorio di una città senza cadere in errori anche da noi, per la complessità del sistema fisico in cui l'abitato deve crescere. Man mano che si approfondiscono le conoscenze, si scopre che le città crescono bene solo se si interviene per mantenere un equilibrio fra lo sviluppo

abitativo e il sistema acqua- suolo, di cui vorremo delineare gli aspetti salienti, perchè in caso di mancato equilibrio fra queste componenti ambientali, si producono i dissesti che colpiscono anche in modo decisivo lo sviluppo urbano, soprattutto quando le piogge eccedono le capacità di ricezione del suolo e del sistema idrico superficiale e sotterraneo. Un esempio chiaro delle notevoli deformazioni del suolo nel tempo è data dal confronto della ben diversa distanza che i manufatti antichi avevano dai corpi idrici superficiali rispetto a quella attualmente occupata (fig. 23).

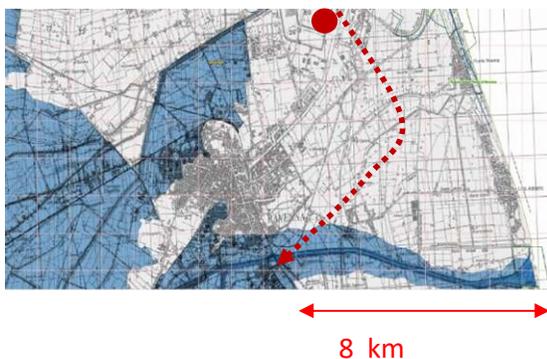


Figura 23 - Evoluzione del rilievo nel tempo : si nota la considerevole distanza del litorale ravennate da quello dell'epoca romana (tratteggiato). La posizione della Basilica di S.Apollinare in Classe è indicata dal cerchio rosso.

Si apre quindi un nuovo capitolo: per prevenire il dissesto idrogeologico non basta identificare i fenomeni naturali deformanti il rilievo, ma occorre anche saper garantire l'equilibrio del sistema afflussi idrici naturali o artificiali- capacità ricettive del suolo e della rete idrica di superficie. Ogni dissesto idrogeologico dipende dall'entità dell'afflusso di acqua dalle piogge o dalla fusione delle nevi, Tutti questi elementi hanno costituito per decenni oggetto di discussione, e sono stati analizzati stabilendo i tempi di ritorno degli eventi climatici più catastrofici e confrontati con la loro entità, in modo da stabilire le regole per fronteggiarli, studiarne mediante un coscienzioso monitoraggio l'evoluzione e programmare di conseguenza i tempi e le modalità di intervento.

2.4 CONSEGUENZE DELL'URBANIZZAZIONE

Insieme alle precipitazioni, alle esondazioni, alle frane, anche l'urbanizzazione rappresenta un elemento di grande importanza nel determinare il dissesto idrogeologico

NORMATIVA NAZIONALE

A fronte di una situazione piuttosto critica dal punto di vista idrogeologico in Italia è presente un'eccellente normativa che tende a tutelare e a prevenire le diverse forme di calamità. Di seguito vengono brevemente le principali norme a tutela del territorio italiano:

- Vincolo Idrogeologico nelle zone montane (R.D. 3267/1923), la cui gestione è oggi trasferita alle Regioni.
- Risanamento e finanziamenti per le zone colpite dall'alluvione del Polesine del 1951 (L. 185/1952).
- Legge sulla difesa del suolo L. 183/89 - Commissione De Marchi (istituita nel 1966 in seguito all'alluvione di Firenze): introduce le Autorità di Bacino e la pianificazione a scala di bacino idrografico con valore di Piano Territoriale di Settore ⇒ Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico del bacino del fiume Po (PAI): indirizzi, norme e vincoli per le fasce fluviali e per la prevenzione del rischio idrogeologico.
- Ricostruzione e sviluppo delle zone colpite dall'alluvione della Valtellina del 1987 (L. 102/90).
- Programmi di previsione e prevenzione e Piani di Protezione Civile (L. 225/92): previsione, prevenzione, gestione dell'emergenza.
- Obbligo per Autorità di Bacino e Regioni di individuare e perimetrare le zone a rischio idrogeologico molto elevato (L. 267/98 Sarno).

Nonostante questa diversificata e ampia normativa, le leggi vigenti non sono evidentemente in grado di porre rimedio a tutti importanti casi di dissesto, in particolare a quelli che sono determinati dalla combinazione di fenomeni di natura diversa (es. antropici e naturali o che riguardano ambiti tecnici molto diversi tra loro).

Pertanto, in questo articolo si cercherà di esporre l'analisi di alcuni fenomeni che richiedono particolare attenzione **quando l'espansione delle aree urbane finisce per includerli:**

1. Versanti instabili per cause geologiche non conosciute.

Ne sono un esempio versanti coperti da terreni che risultano solo apparentemente stabili, classificati come «falde o con di detrito» o «detriti misti a depositi glaciali» che sono in realtà derivanti dalla stabilizzazione di frane

2. Rete idrica superficiale inidonea per le caratteristiche geologiche del territorio.

Ricadono in questi casi le sistemazioni idrauliche e le canalizzazioni di città antiche che si trovano alla base di versanti franosi un tempo coltivati e oggi abbandonati.

2.4.1 Il caso di Milano: i dissesti collegati con squilibri nel sistema acqua-suolo in ambito cittadino

L'area milanese sta soffrendo in modo particolare l'evoluzione del cambiamento climatico in quanto nel corso del tempo è stata alterata l'originaria rete di canali che consentiva fino agli anni '90 di ottenere un buon equilibrio idrologico.

Come noto i livelli idrici nell'acquifero superficiale dell'area milanese hanno subito notevoli variazioni a partire dal primo dopoguerra fino ai giorni nostri.

In particolare, riprendendo tra le pubblicazioni più recenti la comunicazione presentata da F. Marelli e L. Scesi in occasione del workshop "L'acqua e l'ingegneria: oggi e domani" del 22 marzo 2016¹², sono riconoscibili le seguenti fasi evolutive.

- Fino agli anni '50 la falda milanese si trovava in condizioni simili a quelle naturali, con soggiacenza a pochi metri dal piano campagna.
- Dal 1955 al 1970, in occasione del boom economico, l'aumento dei consumi legato alla realizzazione dei grandi poli industriali e all'aumento della popolazione porta ad un abbassamento della falda di circa 15 m.
- Dal 1970 al 1990 il livello rimane sostanzialmente costante.
- A partire dagli anni '90 con la chiusura dei poli industriali e lo spostamento di parte dei residenti in provincia, il consumo dell'acqua in città diminuisce con conseguente innalzamento del livello di falda.

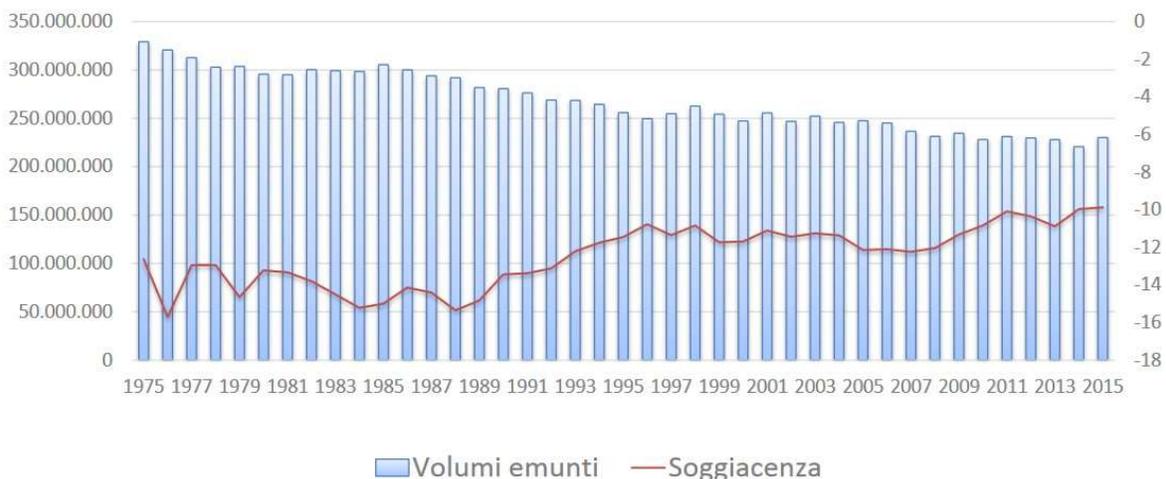


Figura 24 – Andamento della soggiacenza media della falda a Milano in relazione con la riduzione dei consumi idrici (da F. MARELLI & S. SCESI - 2016)

La figura 24, tratta dallo studio sopra citato, riporta l'andamento della soggiacenza media in relazione alla riduzione dei consumi idrici.

Pertanto, allo scopo di verificare l'andamento e l'evoluzione della soggiacenza della falda nel periodo odierno, sono stati acquisiti da MM SpA i risultati del monitoraggio presso i piezometri da tale società gestiti all'interno del territorio milanese. In tutto si tratta di una rete di circa 400 punti, dai quali tuttavia è stata fatta una cernita in modo da acquisire un campione rappresentativo della condizione attuale. Tenendo conto che, a seconda dei punti di monitoraggio, le misurazioni vengono effettuate a cadenza mensile o trimestrale, è stato preso in considerazione l'ultimo decennio, ovvero il periodo 2009-2018, e all'interno di tale intervallo temporale i soli punti su cui sono state effettuate almeno 20 misure (quindi mediamente almeno due all'anno), in modo da avere un campione statistico sufficientemente significativo.

In tal modo il numero di piezometri disponibili si è ridotto a 106 punti di osservazione, un numero comunque più che sufficiente per la caratterizzazione dell'andamento del livello piezometrico dell'acquifero superficiale. Non sono note con esattezza le caratteristiche dei singoli piezometri, tuttavia, come visto sopra (cfr. paragrafo precedente) il complesso multifalda milanese è strettamente collegato, per cui il livello piezometrico, almeno nei due complessi superficiali, è generalmente in equilibrio. Non sono viceversa stati utilizzati i livelli registrati presso i pozzi, sia in relazione alla difficoltà di interpretazione degli stessi in presenza di pompaggio nel sito di misura o in captazioni limitrofe, sia in quanto tale scelta avrebbe comportato il rischio di sottostimare i livelli idrici al di fuori dei campi pozzi.

Come valore di riferimento per le elaborazioni è stato considerato quello massimo, scelto tra il massimo assoluto tra i valori misurati negli utili dieci anni e la media dei valori massimi annui registrati nello stesso periodo incrementato della variazione presumibile del livello piezometrico in un arco di 10 anni. In pratica, quest'ultimo valore corrisponde ad una proiezione dei valori massimi misurati fra 5 anni, ovvero pari al periodo di validità del PGT. Al fine del calcolo della suddetta variazione è stato definito il gradiente medio annuo sui singoli punti di misura.

La metodologia proposta può apparire eccessivamente cautelativa, occorre tuttavia ricordare che i valori utilizzati non corrispondono al massimo assoluto, in quanto non vi sono punti di monitoraggio in cui si ha la registrazione in continuo del livello piezometrico, ma si tratta di massimi relativi a un numero di misure limitato (da 12 a 4 per anno a seconda dei casi, a meno delle letture non effettuate per problemi logistici e strumentali).

Nella Carta Idrogeologica sono rappresentati le isofreatiche della falda superficiale, le classi di soggiacenza, i fontanili attivi, in secca permanente e storici, nonché l'ubicazione dei piezometri utilizzati per le elaborazioni.

Nel complesso viene confermato l'andamento storico del deflusso, da Nord-Ovest verso Sud-Est, così come risulta molto evidente il cono di depressione determinato dai pompaggi effettuati nell'area del centro storico. In particolare il centro di tale struttura cade nell'area compresa tra via S. Sofia, corso Porta Romana e corso Italia, quindi leggermente a Sud del Duomo. Il cono di depressione è per altro apparentemente deformato dalla presenza della Darsena e del cavo Redefossi che con ogni probabilità alimentano l'acquifero superficiale. Nel complesso si è preferito

conservare le irregolarità della superficie descritte dai dati di misura, in quanto è evidente che, soprattutto nell'area centrale, si hanno forti deformazioni della suddetta superficie determinate sia dalla presenza dei pompaggi sia dagli apporti del reticolo idrografico superficiale. Il gradiente idraulico si riduce notevolmente passando da poco meno dell'1% dei confini meridionali allo 0,2% delle aree meridionali a valle del centro storico. Si intende che questa condizione è uno dei fattori che ha favorito la formazione di risorgive nell'area Milanese.

In relazione alla soggiacenza si osserva un'ampia fascia a ferro di cavallo che segue i confini occidentali, meridionali e orientali del comune ove la fascia di oscillazione del livello piezometrico è a una profondità inferiore a 5 m. In particolare il livello idrico appare particolarmente superficiale nel settore di Muggiano, ove i livelli sono prossimi a quelli ottocenteschi e dove quindi si concentrano quasi tutti i fontanili attualmente attivi. Altre modeste aree di risorgenza sono presenti lungo il Lambro e nell'area di Pero. Nell'area del centro storico e in tutto il settore settentrionale verso Bresso e Sesto San Giovanni la soggiacenza è sempre superiore a 10 m, con valori che spesso salgono a 15 m e in particolare nella zona del Duomo arrivano a 16-17 m. La Figura 25 riporta l'andamento del gradiente medio annuo di evoluzione della falda. Si intende che valori positivi indicano una riduzione della soggiacenza ovvero una risalita del livello piezometrico. Si nota che la massima velocità di risalita si ha nell'area Nord, dove viceversa la soggiacenza è generalmente maggiore. Ove invece la falda è più superficiale per lo più i livelli sono stabilizzati.

Fanno eccezione l'area Expo, in cui si ha un gradiente relativamente elevato pur in presenza di un livello idrico abbastanza superficiale, ma probabilmente il processo di risalita ha raggiunto ora i suoi limiti fisiologici, e il centro storico ove il livello è stabile pur con soggiacenza elevata, ma in questo caso è probabile che la risalita sia contrastata dalla presenza di numerosi sistemi di pompaggio.

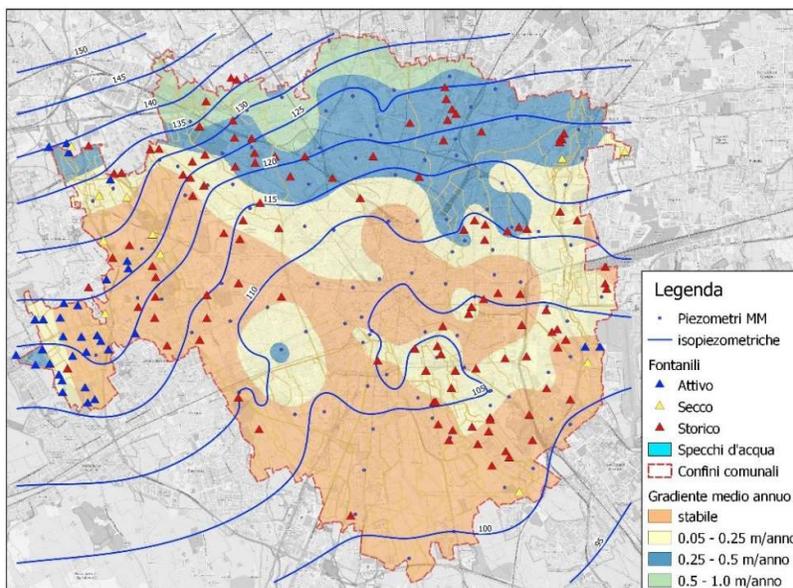


Figura 25 – Gradiente medio annuo di risalita della falda nel comune di Milano

Milano : i dissesti collegati con squilibri nel sistema acqua-suolo in ambito provinciale

Si osserva, analizzando le aree intorno a Milano, che la distribuzione dei fontanili “storici”, ovvero quelli che non solo non sono più attivi ma per i quali è stata interrata la testa, dimostra che almeno fino alla fine dell’800 la falda freatica doveva essere superficiale un po’ in tutto il territorio Milanese. Allora la rete di canali e fontanili svolgeva probabilmente anche una funzione di bonifica, ovvero impediva la risalita della falda fino alla superficie.

Allo stato attuale, se da un lato l’assenza quasi totale di un reticolo idrografico superficiale nell’area Nord, di fatto obliterato dall’urbanizzazione del ‘900, ha ridotto di molto l’alimentazione locale della falda e quindi la sua velocità di recupero, dall’altro l’assenza odierna di canali e fontanili fa sì che in teoria non vi siano più vincoli fisici alla risalita delle acque sotterranee fino alla superficie. In pratica il reticolo idrografico con le annesse teste di fontanili costituiva una sorta di struttura di regolarizzazione del livello di falda, che risultava così sufficientemente superficiale da poter essere sfruttato senza necessità di sistemi di pompaggio, ma che nel contempo non poteva salire oltre un certo livello a causa del drenaggio del reticolo idrografico stesso. Si intende che, soprattutto se vi sarà una ulteriore riduzione dei prelievi, è probabile che anche nel settore settentrionale il livello piezometrico si avvicini alla superficie; tuttavia nella condizione attuali non esiste più un reticolo idrografico diffuso in grado da un lato di contenere la risalita, dall’altro di fungere da recettore degli scarichi di eventuali impianti di pompaggio.

Va comunque osservato ribadito che alla velocità attuale il processo è ancora in una fase relativamente iniziale e quindi si dovrebbe avere a disposizione un lasso di tempo relativamente lungo per monitorare il fenomeno e quindi pianificare eventuali interventi.

Sempre nella Carta Idrogeologica sono stati inseriti altresì i seguenti tematismi.

- Specchi d’acqua connessi con la falda ovvero non connessi e quindi sospesi rispetto all’acquifero. I primi hanno un rapporto diretto con l’acquifero superficiale in termini di drenaggio e alimentazione, si tratta per lo più di laghi di cava, mentre i secondi sono alimentati dal reticolo idrografico superficiale e spesso impermeabilizzati per ridurre le perdite (per lo più bacini artificiali nelle aree a verde).
- Aree umide ovvero aree di interesse naturalistico di tipo palustre, quindi con possibilità di secche temporanee ma, nel caso di Milano, di origine artificiale ovvero senza una connessione diretta con la falda.
- Aree paludose ove si ha la risalita temporanea in superficie della falda. Nel caso specifico si tratta per lo più di aree di scavo abbandonate, spinte fino alla fascia di oscillazione del livello piezometrico, senza quindi la formazione di bacini stabili come nei numerosi laghi di cava, ma con formazione di pozze

stagionali.

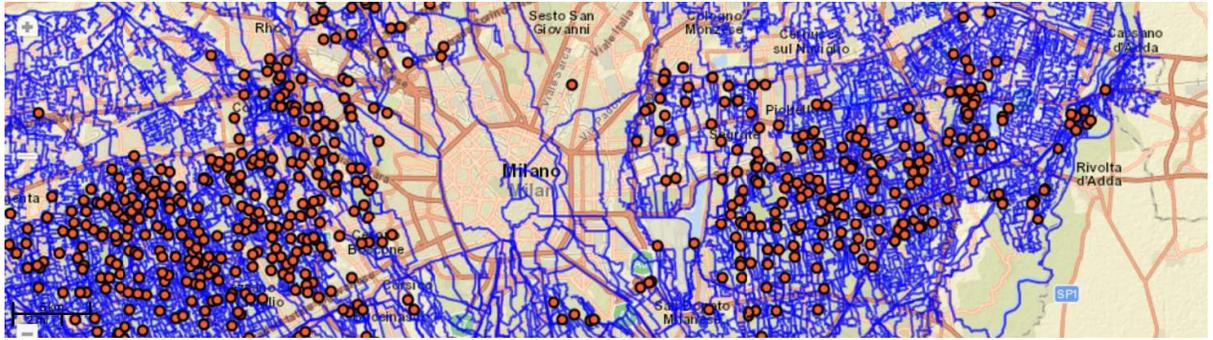


Figura 26 - Fittezza delle rete irrigua a Milano e dintorni , da F. MARELLI & S. SCESI (2016). "L'acqua di Milano: falde e interferenza con le infrastrutture". Workshop "L'acqua e l'ingegneria: oggi e domani" del 22 marzo 2016. Politecnico di Milano.

Per chiarire almeno uno dei meccanismi principali che possono portare frequentemente alla genesi di allagamenti significativi, si è presa in esame un'area che è ben nota nelle sue caratteristiche idrologiche e idrogeologiche, compresa fra i fiumi Lambro e Adda in provincia di Milano, e comprendente i comuni di Peschiera Borromeo, Pantigliate, Mediglia, Tribiano, Settala, Paullo, Comazzo, Segrate, Pioltello e Rodano, estesa su una superficie di circa 150 kmq. L'area in esame è costituita da sabbie e ghiaie a cui sono associati, in aree relativamente ristrette e localizzate, sedimenti fini (bacini palustri, alvei abbandonati ecc...). L'intero territorio è caratterizzato da un reticolo idrografico complesso e articolato, di canali naturali e artificiali creati per uso agricolo e industriale . L'area è inoltre caratterizzata dalla presenza di numerosi fontanili (Fig. 2), sorgenti dovute all'affioramento della falda in una fascia allungata in direzione Est-Ovest, la cui acqua è drenata lungo rogge artificiali, per un utilizzo essenzialmente agricolo.

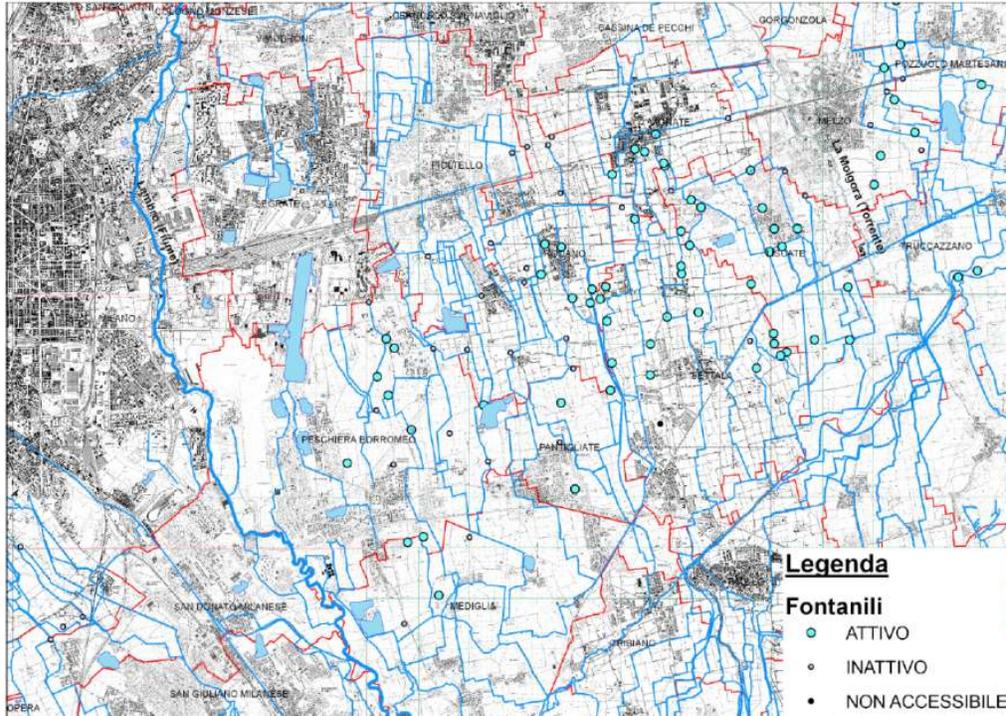


Fig. 27 - Fontanili attivi e passivi dell'area esaminata

Il territorio occupato dai comuni citati è caratterizzato, come indica la figura 28, da modesti avvallamenti in cui scorrono i diversi corsi d'acqua, alimentati anche da fontanili e dal drenaggio della falda superficiale. Questi avvallamenti hanno l'aspetto di paleovali dei corsi d'acqua maggiori quali il Lambro e la Molgora, in quanto le valli sono piuttosto estese (anche qualche centinaio di metri come nel caso del torrente Sillaro) e presentano meandri con ampio raggio di curvatura, del tutto paragonabili a quelli del fiume Lambro attuale. In figura 28 è rappresentato questo schema dell'area di studio.

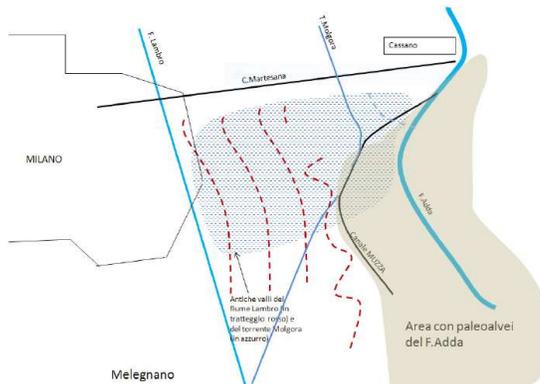


Fig. 28 - Schema dell'area di studio. Le linee tratteggiate corrispondono a leggeri avvallamenti del terreno che rappresentano gli antichi alvei dei corsi d'acqua che percorrevano la pianura.

Una spiegazione accettabile di questa morfologia è data dalla constatazione che dopo il Pleistocene si è verificato il sollevamento marcato del substrato terziario e di parte dei depositi marini quaternari nell'area compresa fra Lodi e Pavia (fig. 4).

Tale sollevamento che continua anche attualmente con una velocità media di 2 mm/anno (Arca e Beretta, 1985), ha prodotto un avvallamento fra quest'area e il bordo prealpino, che ha influito sulla disposizione della rete idrica di superficie, deviando verso SW il corso del fiume Adda che all'altezza di Melegnano viene ora a trovarsi a pochi km di distanza dal Lambro (figura 1).

Dalla figura 28 si può notare anche una deviazione del corso del Lambro, e come sia meno pronunciata di quella dell'Adda, limitandosi al solo settore a Nord di Milano. Gli avvallamenti riscontrabili fra Adda e Lambro secondo questa ipotesi sarebbero quindi i paleo-alvei dei maggiori corsi d'acqua, che solo da poco hanno acquisito la posizione attuale. Di essi il più evidente è quello che si individua a Nord tra Settala e Paullo, e a Casalmaiocco dove è percorso dalla roggia Sillaro e confluisce più a valle nel fiume Lambro. La sua vicinanza con la Roggia Molgora nella parte più settentrionale del suo percorso rende ragionevole l'ipotesi che Molgora e Lambro confluissero nell'area di Settala-Paullo prima dello spostamento del Lambro e dell'Adda verso Ovest.

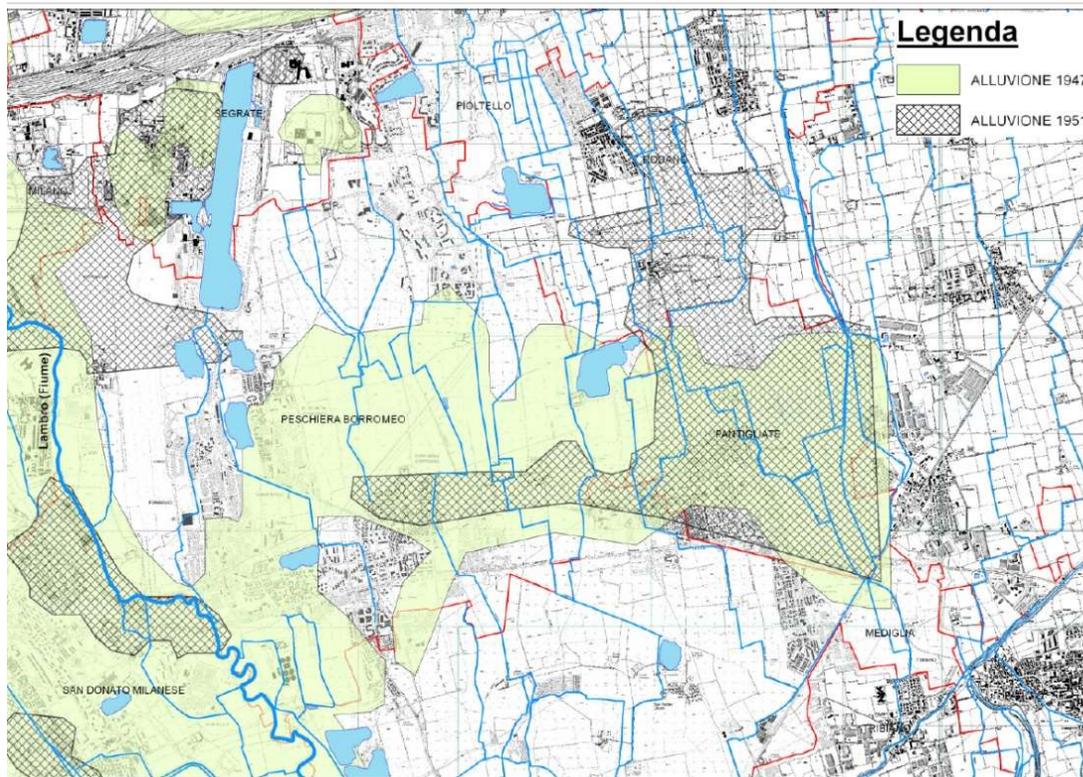


Fig. 29 - Carta delle aree allagate negli eventi alluvionali del 1947 e del 1951 (fonte: Regione Lombardia modificata)

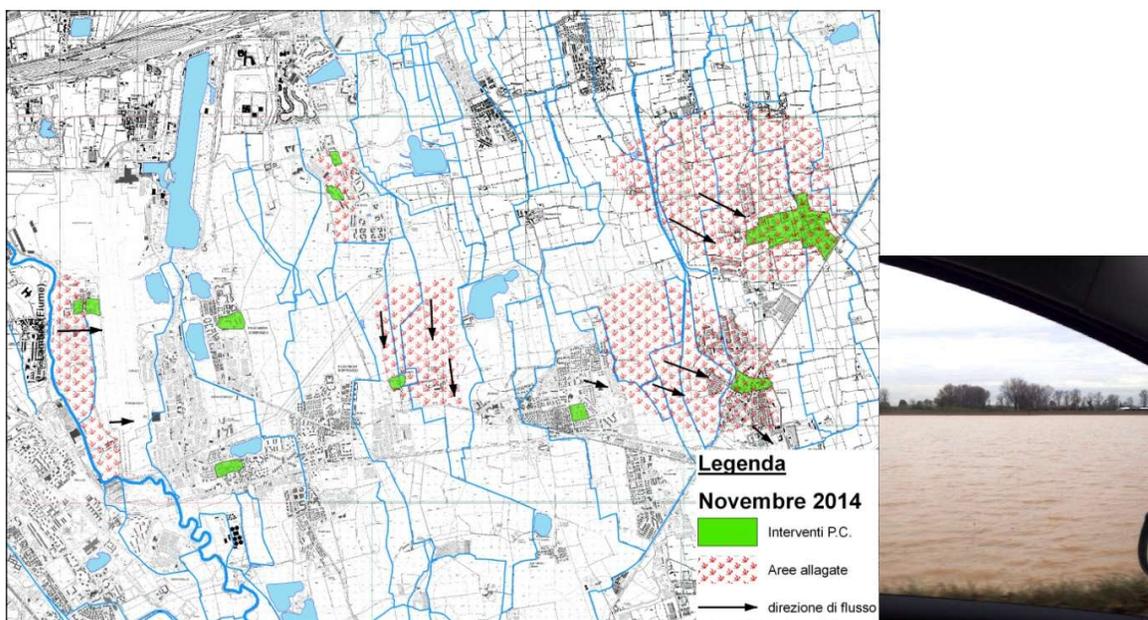


Fig. 6 – a) carta delle aree allagate nell’evento alluvionale del novembre 2014 e interventi puntuali della protezione civile. b) Foto di una campo agricolo a Calepio di Settala completamente allagato.

Figura 30

La presenza della falda a pochi metri di profondità riduce il volume delle acque che si possono immagazzinare nel sottosuolo: quando l’afflusso d’acqua eccede il volume disponibile nel suolo, la falda esce dal terreno allagando i campi.

La possibilità che tale fenomeno si verifichi aumenta nel tempo, in quanto l’area milanese è soggetta ad un continuo innalzamento del livello della falda che, iniziato nella metà degli anni Settanta, continua ancora oggi. La causa principale di questo sollevamento è stata la riduzione dei prelievi industriali, che costituivano una porzione importante fino alla metà degli Anni ’70.

Dal 2007, in particolare, si è registrato un notevole incremento del livello piezometrico nell’intera area di studio. Dalla Figura 9 si può osservare come tutta l’area tra il Fiume Lambro e il limite orientale della Provincia di Milano sia interessata, considerando l’arco di tempo tra il 2007 e il 2011, da un innalzamento della falda che diventa significativo nei comuni di Peschiera Borromeo, Pioltello e Rodano e decisamente importante in Comune di Segrate, dove la differenza tra la soggiacenza del 2011 e quella del 2007, ha superato i 5 m. Un modesto abbassamento del livello freatico si riscontra nel settore nord ovest del Comune di Pantigliate.

Fenomeni analoghi si sono verificati diverse volte in altre parti d’Italia, ad esempio a Bologna il 19 ottobre del 2023, quando insieme all’esonazione del torrente Ravone, tombato in ambito cittadino, si sono avute evidenze dello stato di saturazione de terreno in buon parte dell’area pedecollinare. Va segnalato che Bologna è particolarmente esposta a fenomeni di questo tipo, per la rapida diminuzione di permeabilità dei terreni superficiali allontanandosi dal bordo appenninico. Alla periferia della città si notano infatti spessi livelli argillosi. Questa struttura impedisce alla falda di attenuare rapidamente i sollevamenti piezometrici determinati dall’infiltrazione nel corso delle piogge, accentuandone così gli effetti sulla saturazione del suolo. Sono diversi i centri abitati dell’Emilia–Romagna dove i torrenti sono stati ricoperti nel corso degli anni per agevolare il traffico

cittadino, come Salsomaggiore dove da molti decenni è stato coperto il torrente Citronia, avendo comunque cura di conservare cautelativamente una larga sezione di flusso.



Figura 31 - Scavo aperto in vista della copertura del t. Citronia a Salsomaggiore (Parma)

Infatti la copertura degli alvei in città, oltre a richiedere di mantenere negli scavi sezioni di flusso considerevoli, necessita di manutenzione continua e, nel progettare il tracciato, di evitare variazioni di pendenza e brusche deviazioni dello scavo che favoriscono l'accumulo di materiale sedimentario nel corso delle piene, in specie vegetazione, e quindi l'ostruzione dei condotti. Quest'ultimo evento, purtroppo è frequente in alcuni ambiti cittadini dove la manutenzione avviene raramente.



Figura 32 - Manutenzione nel 2024 del t. Citronia a Salsomaggiore (PR), da una foto di G.Dell'Asta

Si conclude che soltanto con una vigorosa politica di interventi coordinati, che mirino a facilitare la distribuzione dell'acqua superficiale e sotterranea in modo omogeneo e regolare si potrà provvedere a evitare ricadute catastrofiche del cambiamento climatico.

L'occupazione del sottosuolo cittadino con edifici profondi pone notevoli problemi per la costruzione di infrastrutture per il drenaggio delle acque, e rilevanti studi (si veda ad esempio Sartirana e sono stati effettuati per censire e valutare i volumi di sottosuolo utilizzati per magazzini, silos, parcheggi auto, gallerie (esempio quelle delle metropolitane)

2.5 CONSEGUENZE DELL'INNALZAMENTO DEL LIVELLO MARINO

La figura 33 mostra una parte della carta dei sollevamenti ed abbassamenti del suolo della Pianura Padana di Arca e Beretta ; al centro la zona depressa presso Milano, indicata in azzurro, dove si manifestano impaludamenti e emersione d'acqua nel corso degli eventi pluviometrici maggiori, in conseguenza dei lenti ma costanti abbassamenti del suolo in quella zona.

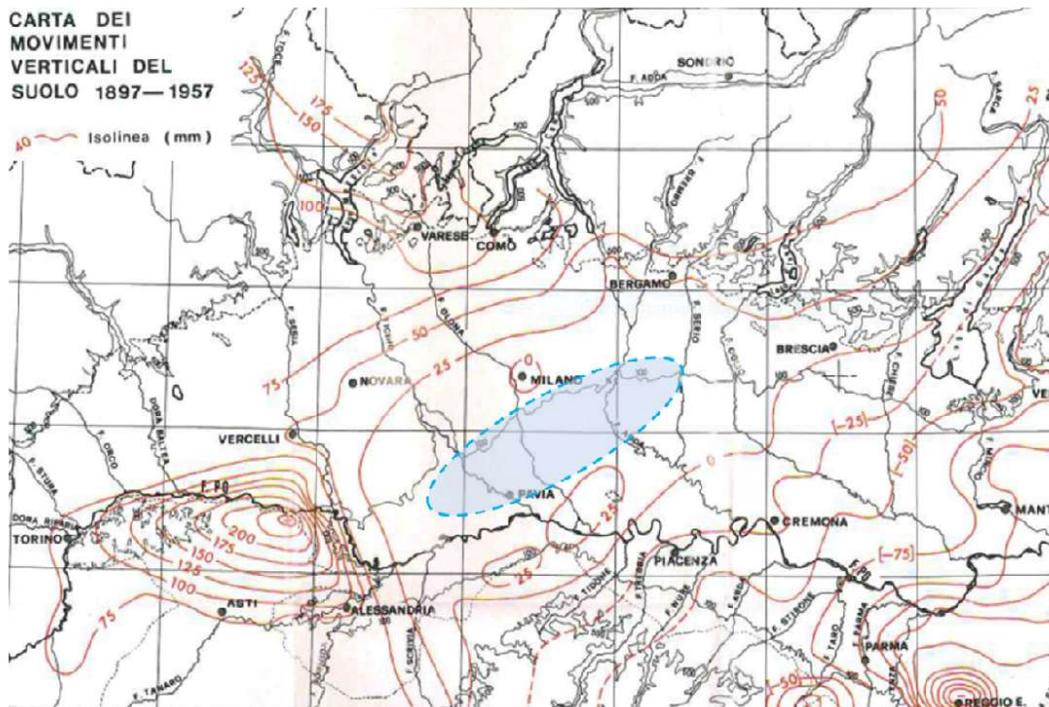


Fig. 33 - Carta dei movimenti verticali del suolo, 1897 - 1957 (da Arca e Beretta 1985). L'area all'interno dell'ellisse blu tratteggiata costituisce la porzione di territorio ribassata rispetto alle zone circostanti.

Figura 33

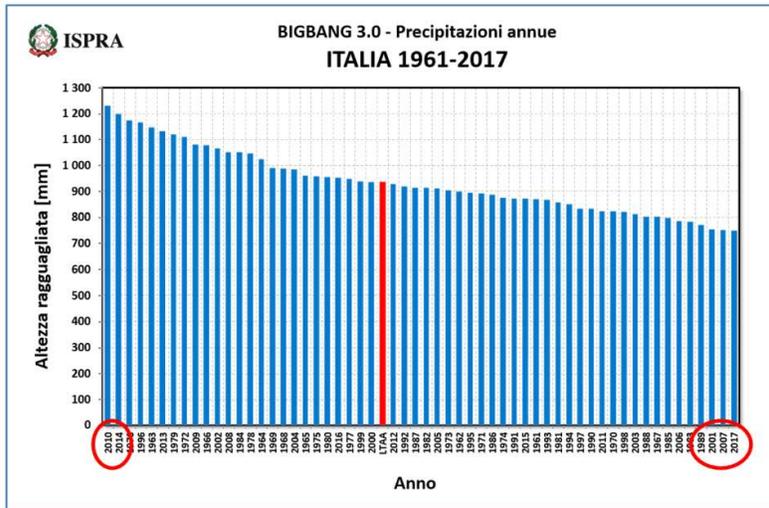


Figura 34 - Decremento delle precipitazioni medie annue (ISPRA) in Italia

A causa del progressivo sollevamento le livello marino conseguente alla fusione dei ghiacci polari, e alla depressione prodotta dalla subsidenza dei sedimenti deltizi, che si vanno compattando per il loro stesso peso, il mare avanza sulle coste italiane del Veneto e dell’Emilia Romagna. La parte terminale de Po è quindi oggetto dell’intrusione marina che porta a una progressiva salinizzazione delle sue acque per un tratto di lunghezza non indifferente (in rosso nella figura). L’effetto inquinante , dovuto anche alla riduzione delle portate del fiume per la diminuzione degli afflussi meteorici rappresentata in figura 34, si accompagna anche a uno di sbarramento del flusso delle piene, che costringe le acque del Po a rallentare favorendo esondazioni ed allagamenti nel coro degli episodi piovosi di rilievo.



Figura 35 - In rosso il tratto del Po invaso dalle acque marine

Questo fenomeno ha anche un dannoso effetto sulle acque sotterranee, il cui sbocco a mare viene ostacolato dalla progressiva estensione del cono di intrusione marino, che rende obbligatoria la potabilizzazione delle acque su una larga estensione di territorio, impoverendo le risorse idriche disponibili fino quasi a Ferrara.

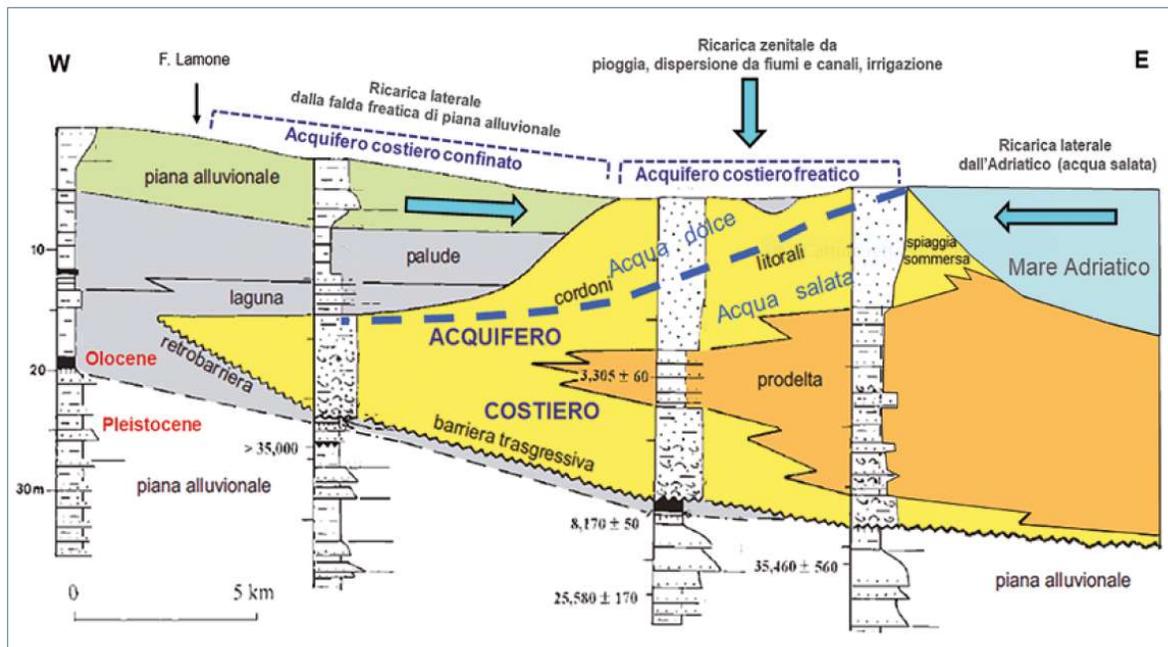


Figura 36 -Sezione della forma del cuneo salino nel Delta del Po

3. INTERVENTI PER L'ATTENUAZIONE DEGLI EFFETTI DELLE PIENE CATASTROFICHE

Piene recenti dei corsi d'acqua lombardi

I corsi d'acqua lombardi producono seri danni anche in Provincia di Milano . Ad esempio, l'Olona non ha provocato negli ultimi 50 anni alluvioni così estese come in passato, quando si verificavano anche 15 gravi alluvioni ogni secolo, che hanno colpito soprattutto Milano e la sua periferia settentrionale e meridionale; locali disagi si sono tuttavia ancora manifestati di recente, rendendo necessari interventi di controllo delle piene.

Il Seveso esonda invece on grande frequenza, producendo danni relativamente limitati, ma indubbiamente di costo rilevante, come nel 2014, perché viene a coprire vaste aree all'interno della città di Milano. Anche il Lambro ha prodotto significative alluvioni, che hanno colpito soprattutto il territorio monzese, sempre nel 2014.

Fra i grandi fiumi, si nota che il Ticino nell'ottobre del 2000 ha superato di 35 cm allo sbocco del Lago Maggiore il massimo livello di piena registrato nel secolo scorso, e si è ripetuto nel 2014; nel 2024 raggiunge una portata di 1200 mc/s , sei volte superiore alle medie.

Il Fiume Adda nel 1987 produsse gravissimi danni soprattutto in Valtellina, e nel 2002 diede luogo ad allagamenti estesi all'uscita del lago di Lecco; successivamente, gravi danni si verificarono nel 2013 e 2014.

Il problema della sicurezza delle alluvioni si pone quindi all'attenzione degli Enti preposti con grande evidenza anche in Lombardia.

L'Unione Europea ha emanato direttive per prevenire gli effetti del dissesto idrogeologico, alle quali le diverse Nazioni si attengono, e in campo urbanistico sono state predisposte strategie molto utili per attuare le migliori difese possibili in aderenza con la possibilità di un complessivo miglioramento dello stato ambientale con l'ampliamento delle superfici a verde e quelle lacustri nelle grandi città.

Le Regioni hanno promosso studi e ricerche ben coordinate per tenere sotto controllo i corsi d'acqua e per individuare i provvedimenti più idonei per fronteggiare i problemi che manifestano.

In Lombardia il dissesto da alluvioni è oggetto dei Contratti di Fiume , mentre l'ARPA controlla i non indifferenti aspetti qualitativi e dell'inquinamento.

Il Contratto di Fiume è un accordo tra soggetti che hanno competenze e responsabilità nella gestione e nell'uso delle acque, nella pianificazione del territorio e nella tutela dell'ambiente. Si tratta di uno strumento volontario di programmazione strategica e negoziata che persegue la tutela e la gestione integrata delle risorse idriche, la valorizzazione dei territori fluviali unitamente alla salvaguardia dal rischio idraulico, contribuendo allo sviluppo locale.

Il Contratto di Fiume è uno strumento che mira a raggiungere gli obiettivi delle Direttive Europee in materia di acque (Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE) e rischio idraulico (Direttiva Alluvioni 2007/60/CE) supportando e promuovendo politiche e iniziative volte a consolidare comunità fluviali resilienti, riparando e mitigando, almeno in parte, le pressioni dovute a decenni di urbanizzazione sregolata.

Nel 2016 è stato approvato il Collegato Ambientale che riconosce i Contratti di Fiume a livello legislativo (art. 68-bis "Contratti di Fiume" del D. Lgs 152/2006): un traguardo importante per questo strumento volontario di **programmazione negoziata** che sempre di più viene promosso a livello nazionale come supporto all'attuazione di politiche per la riqualificazione fluviale.

L'area d'intervento prioritaria individuata da Regione Lombardia per l'implementazione di tali strumenti coincide con il bacino idrografico Lambro-Seveso-Olona.

Ad oggi sono stati sottoscritti (promossi da Regione Lombardia con la forma dell'Accordo Quadro di Sviluppo Territoriale) il **Contratto di Fiume Olona-Bozzente-Lura-Lambro Meridionale (2004)**, il **Contratto di Fiume Seveso (2006)**, il **Contratto di Fiume Lambro Settentrionale (2012)**.

Sono giunti alla sottoscrizione, grazie ad iniziative condotte direttamente da attori sul territorio:

- il Contratto di Fiume Mincio (2016), promosso dal Parco del Mincio
- il Contratto di Fiume Adda Sopralacuale (2019) promosso dalla Comunità Montana Valtellina di Sondrio
- il Contratto di Fiume Bardello Vive (2019) promosso dal Comune di Besozzo

Nel 2019 è stato sottoscritto l'Accordo Quadro per il "Risanamento del Lago di Varese". Altri contratti avviati (mediante accordi, protocolli e manifesti di intenti, o ricognizioni finalizzate alla costruzione del quadro conoscitivo) sono: Toscolano, Media Valle del Po, Olona Meridionale, Oglio sud, Mella.

A) PREVISIONI MEDIANTE ANALISI TECNICHE DI IDROGEOLOGIA URBANA

Gli effetti dello squilibrio idrogeologico nel Milanese non sono che un aspetto dei diversi problemi legati a squilibri nel sistema acque-suolo nelle aree cittadine. L'intensa urbanizzazione porta a rilevanti squilibri idrogeologici in molteplici aree geografiche.

Quando le aree abitate si espandono lo scorrimento delle acque superficiali, dovute all'impermeabilizzazione del suolo, e l'infiltrazione causata da scarichi e da perdite nelle infrastrutture idrauliche aumentano in modo anomalo e incontrollato. Aumentano così i fenomeni erosivi e l'esposizione dei versanti alle frane.

Non è un caso che i rischi maggiori siano in corrispondenza delle regioni più urbanizzate. In figura 37 è possibile osservare la percentuale di città europee che potrebbero essere esposte ad alluvioni. È ben evidente che le città italiane sono quelle maggiormente esposte.

Nel dopoguerra in Italia le vittime per frana sono state 2447 (in media 59 per anno) e il danno annuo da frane è pari a 2.500 milioni di Euro (stima per difetto) (Fig 1b).

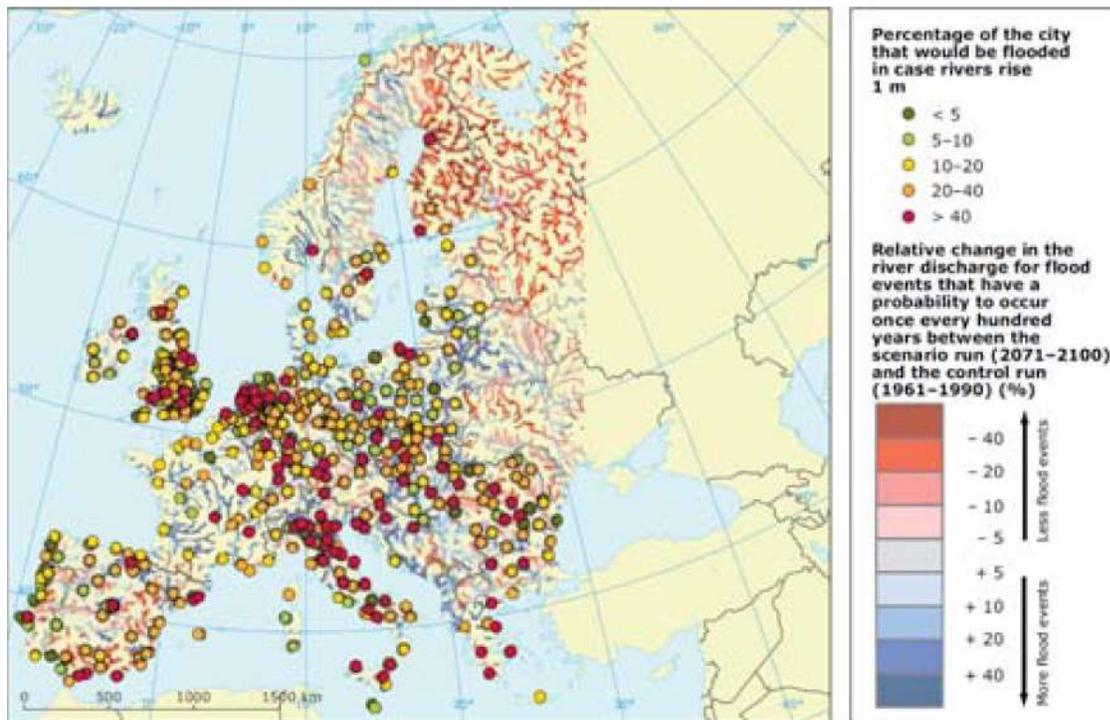
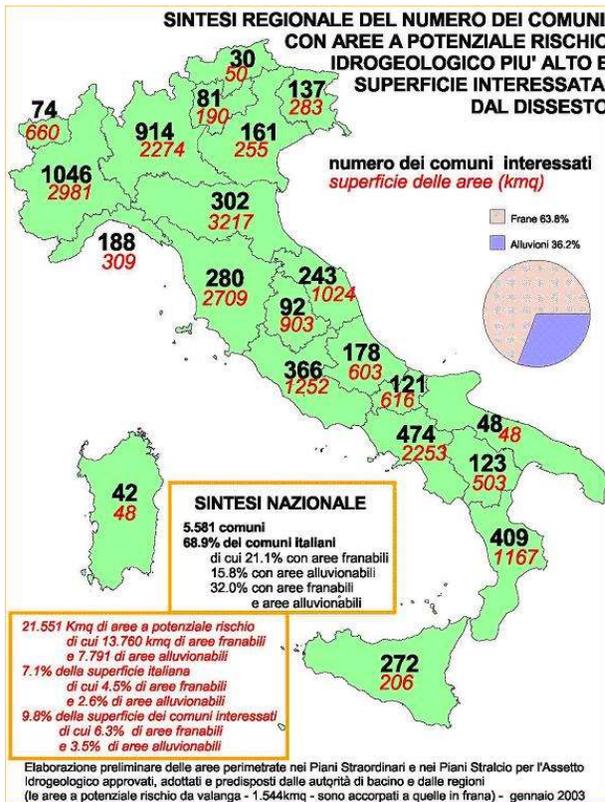




Fig. 1 a) Percentuali dell'area urbana delle città europee esposte ad alluvioni.

b) Mortalità in Italia nel periodo 1950-2002 per frane, inondazioni, terremoti ed eruzioni vulcaniche

Figura 24



prolungati di siccità. Si nota infatti che in questi casi i terreni secchi sono difficilmente penetrabili dalle acque di superficie, fatto che dà luogo immediatamente allo scorrimento superficiale delle acque di pioggia, mentre nelle altre condizioni climatiche queste vengono assorbite dal terreno e solo dopo un tempo considerevole, da qualche ora a più di un giorno, le acque cominciano a

Fig. 37 – Comuni interessati da frane in Italia

B) PREVISIONE MEDIANTE ANALISI DELL'EVOLUZIONE DEI DISSESTI IDROGEOLOGICI

In generale i dissesti che comportano le maggiori calamità sono quelli che avvengono dopo periodi correre in superficie. Come già sottolineato, il vero problema non è tanto il fatto che il terreno sia bagnato da qualche cm di acqua, quanto il fatto che, se la precipitazione supera i 20-30 mm /giorno, la lama d'acqua assume fin dall'inizio una notevole consistenza, in quanto si incanala lungo percorsi preferenziali dove raggiunge rapidamente diverse decine di cm di spessore e converge verso i corsi d'acqua attivando una rapida crescita del livello idrometrico.

La combinazione di questi fattori, e la velocità con cui si muovono questi flussi idrici, che possono superare i 2 m al secondo, producono erosione e frane del terreno superficiale in tempi molto ristretti, spesso senza dare luogo alla possibilità di compiere studi e indagini previsionali.

Per evitare che tali fenomeni colpiscano all'improvviso vengono redatte carte di previsione delle alluvioni.

Cartografie di previsione degli eventi catastrofici

La redazione di mappe che mostrano quali sono i tratti dei corsi d'acqua soggetti a esondazioni, prevede che vengano tenuti sotto controllo questi fattori:

Una tecnica di controllo in uso in altri campi è la **manutenzione predittiva**, che permette di prevenire danni ad esempio ai macchinari e agli impianti industriali valutando attentamente i danni che si producono nel tempo, applicando algoritmi che possono rivelare tempi e modi di accadimento di inconvenienti.

Questa analisi prevede una prima fase, durante la quale i dati disponibili sulle piene vengono esaminati al fine di escludere con metodo statistici (es.test Q o di Dixon) i valori anomali.

Lo schema base della manutenzione predittiva è il seguente:

- misura delle **portate del corso d'acqua e trasporto solido**, entità della sedimentazione, profilo di fondo
- stima di parametri misurabili (o non misurabili) al tempo $t+dt$
- identificazione dello stato del sistema considerato anomalia o di guasto, esempio sintomi di erosione delle sponde ed eccessi di accumulo di sedimenti, subsidenza di porzioni dell'alveo o delle sponde per erosione sotterranea
- pianificazione delle attività preventive e correttive PRIMA che il sistema giunga alla condizione critica.
- Raccolta di dati sulle aree in cui la falda tende a emergere o effettivamente affiora nel corso delle piene
- Stesura di carte di previsione delle alluvioni

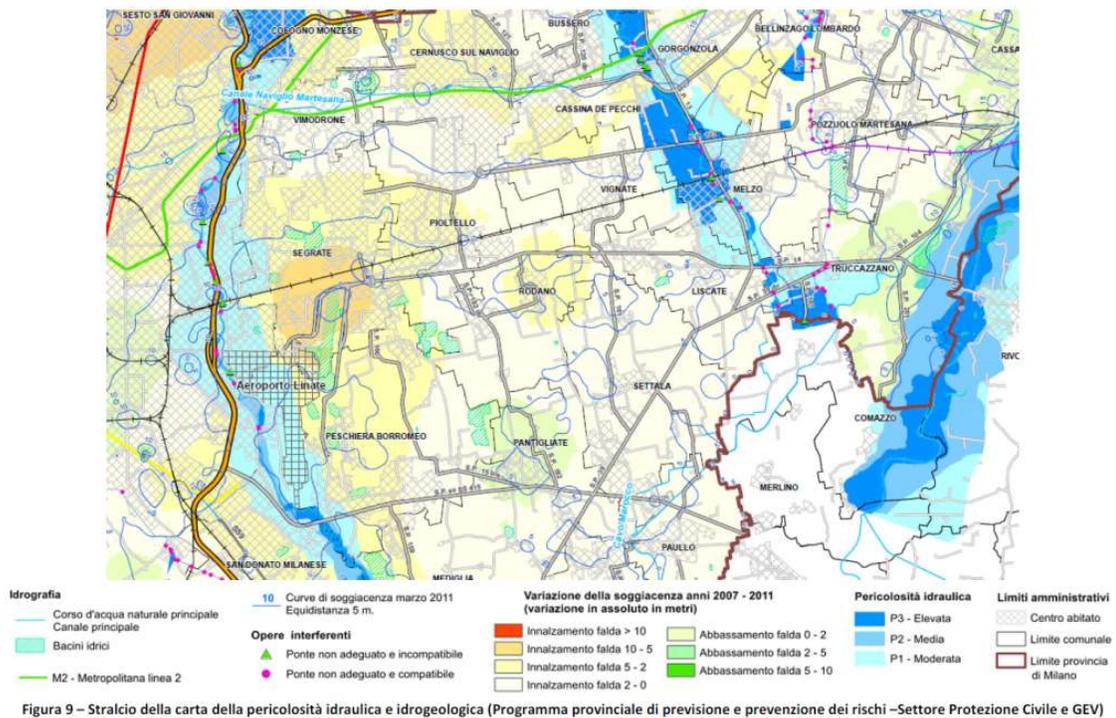


Figura 38 - Cartografia della pericolosità idraulica di un settore della Provincia di Milano

La figura mostra come dai dati così raccolti, si possa evidenziare la possibilità di alluvionamento dei corsi d'acqua nella regione sotto controllo.

Una metodologia scientifica accurata, che può essere d'aiuto in queste previsioni, è stata predisposta da M.Rinaldi e altri (2011), e ad essa si rimanda per i necessari approfondimenti. Lo studio, ha individuato indici che consentono di valutare il grado di pericolosità geomorfologica in cui si trovano gli alvei considerati. Questo studio è di particolare interesse perché prende in esame fra gli altri punti di interesse le cause e le modalità con cui si sono attuate le variazioni sia di pendenza sia di forma degli alvei, prodotte nel tempo dal cambiamento del livello dei recapiti dei corsi d'acqua. Queste variazioni si traducono spesso in esondazioni e allagamenti delle aree circostanti il fiume, prima che questo si stabilizzi nel nuovo alveo.

In effetti il cambiamento climatico, provocando il progressivo innalzamento del livello marino, non può non incidere decisamente sul profilo di fondo dei fiumi che recapitano in mare, e non produrre alterazioni nel profilo di fondo, nei processi di trasporto e sedimentazione e sulla forma degli alvei. La disponibilità di indici che consentano di valutare la vulnerabilità dei tratti di alveo in cui questi fenomeni si verificano, permette di redigere carte di previsione delle alluvioni oggettive e complete.

C) PREVISIONI MEDIANTE MANUTENZIONE PREDITTIVA BASATA SULLE SERIE TEMPORALI (TIME SERIES FORECASTING)

Una integrazione delle carte di previsione delle alluvioni è fornito dall'analisi delle serie temporali delle portate.

Nelle serie temporali si è soliti identificare:

- i trend, ovvero un incremento (o decremento) a lungo termine dei valori.
- I fenomeni stagionali, ovvero i fenomeni che determinano cambiamenti dei valori in un periodo di tempo che si ripete sempre della stessa durata.
- I fenomeni ciclici che determinano aumenti e diminuzioni dei valori con fluttuazioni che non hanno sempre la stessa durata, ovvero non sono periodici.

Una delle cose più importanti che bisogna capire quando si analizzano i dati è la tipologia di relazione fra le grandezze misurate. Per fare questo, la visualizzazione grafica con i diagrammi di dispersione (scattered plots) è veramente importante perché aiuta ad identificare come i dati sono tra loro dipendenti (se lo sono).

Le tecniche di manutenzione predittiva sono ben note nell'analisi statistica, quindi diffusamente studiate e apprezzate per la loro versatilità. Si osserva che il numero di dati e la loro frequenza è fondamentale per la loro applicazione, e che tale aspetto deve essere tenuto in primaria evidenza nella progettazione della difesa dalle catastrofi alluvionali. Per poterle applicare, è però indispensabile ricostruire l'evoluzione dei dissesti idrogeologici, in modo da valutare quali parametri utilizzare per la costruzione delle serie temporali.

4. GLI INTERVENTI POSSIBILI: sistemi di contenimento extraurbani o periferici alle grandi città

1. Laghi artificiali (vasche di laminazione)

Gli invasi di laminazione sono detti anche: – casse di espansione in ambito fluviale; – vasche volano in ambito urbano. Sono costituiti da volumi ricavati da un'opportuna delimitazione di aree soggette a inondazione controllata in occasione delle piene.

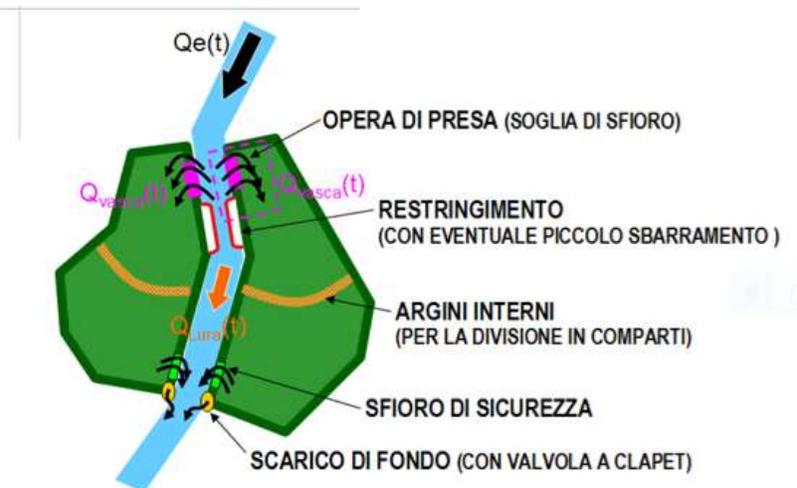
Undici vasche di laminazione sono in progetto su vari corsi d'acqua lombardi. Si tratta di ampi scavi, alimentati in assenza di pericoli di esondazione con acqua estratta dalla falda.

Il loro scopo è la tutela dagli allagamenti del territorio posto a valle dell'invaso, attraverso la riduzione delle portate al colmo di piena: una parte del volume dell'onda in arrivo da monte viene invasato temporaneamente durante la fase di colmo, per essere rilasciato in tempi successivi,

compatibilmente con la capacità di valle.



Figura 39 - Invaso fuori linea . Schema planimetrico di una vasca bilaterale (il rettangolo tratteggiato indica l'area cui si riferiscono le immagini a sinistra). di progetto vasca involucro fuori linea - Fasi di funzionamento idraulico dell'opera di presa: (A) Livello in alveo minore o uguale alla soglia (ribassamento arginale); vasca vuota. (B) Livello in alveo sopra soglia e involucro (con innalzamento del livello in vasca) fino a completo riempimento. (C) Livello in alveo sopra soglia, ulteriore involucro sopra la vasca piena e portate uscenti dallo sfioro di sicurezza (localizzato generalmente più a valle vicino agli scarichi di svuotamento).



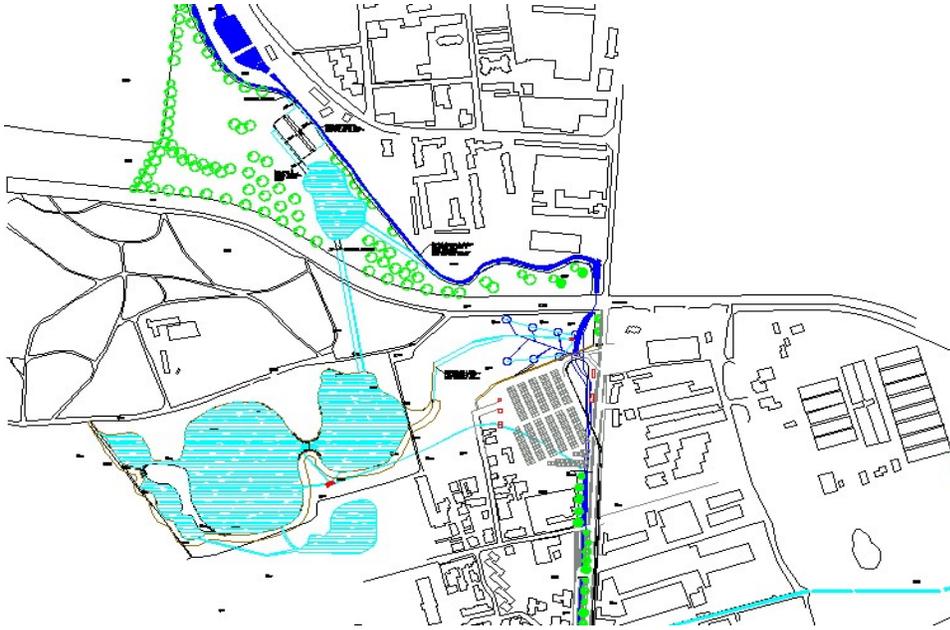


Figura 40 - Invaso fuori linea nel progetto preliminare delle vasche del F. Seveso

Esempio di vasca di laminazione fuori linea : nella figura lo schema preliminare di uno dei progetti per le vasche di laminazione del F. Seveso preparati negli anni '90. I laghetti sono ricavati con uno scavo di pochi metri, riempito con acqua di falda ricavata da due pozzi profondi, con lo scopo di ottenere acqua di buona qualità e contemporaneamente contrastare l'eccessivo sollevamento della falda tuttora in atto nella zona abitata. Occasionalmente, all'annuncio della piena del F. Seveso (in blu), i laghi vengono lasciati vuotare aprendo le paratie di valle verso il fiume; si aprono poi le paratie di monte e le acque di piena sorpassano uno sfioro, entrano in una vasca di decantazione dei fanghi e poi riempiono temporaneamente i laghetti. Al termine della piena, i laghi vengono vuotati e ripuliti. I progetti realizzati nel 2024 hanno previsto una diversa configurazione e prevedono anche interventi cautelativi sugli effetti secondari (fanghiglie residue, odori)



Figura 41 - Schema di invaso in linea

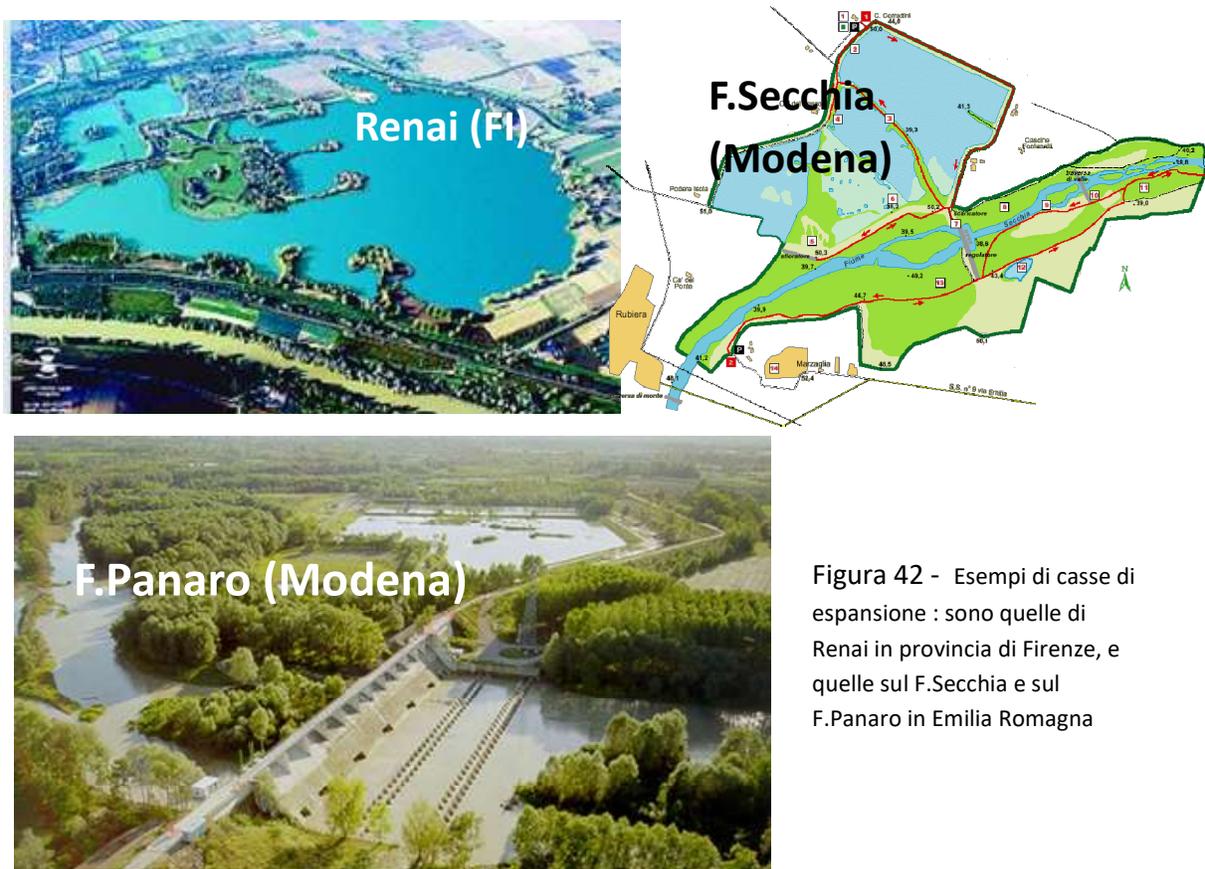


Figura 42 - Esempi di casse di espansione : sono quelle di Renai in provincia di Firenze, e quelle sul F. Secchia e sul F. Panaro in Emilia Romagna

In Provincia di Milano è di recente realizzazione la vasca di laminazione di Senago sul Seveso e sono aperti i cantieri per quella di Carnate sul torrente Molgora di 9 ettari con un volume d'invaso pari a 350.000 metri cubi.

L'impianto, come riferiscono i progettisti, è costituito dall' invaso di laminazione, comprensivo di arginature perimetrali e interne, dalle opere di regolazione e di presa, dai manufatti di scarico per la restituzione delle portate laminate nel torrente Molgora, dallo sfioratore di emergenza, dall'argine del torrente Molgora in destra idraulica a monte dell'opera di presa, dall'area umida permanente e dalle opere di valorizzazione paesaggistico ambientale e sistema della fruizione. Per ottenere l'invaso occorre effettuare scavi per un volume complessivo di circa 292.000 m³ (volume di scavo complessivo che comprende anche le altre opere connesse al funzionamento dell'invaso, come ad esempio il canale di scarico). L'opera di presa posta sul torrente Molgora è costituita da uno sfioratore laterale del tipo a larga soglia. In base ai risultati della modellazione idraulica l'apertura delle paratoie è prevista a 1 m dal fondo, il quale è posto a quota 226 m s.m. Lo svuotamento dell'invaso di laminazione avviene attraverso due manufatti Il primo è costituito da un canale di dimensioni 4 x 2.5 m, lungo circa 27 m, che passa all'interno dell'argine dell'area di laminazione ed è munito di una paratoia di regolazione; il secondo è posto nel punto più depresso del settore n. 2. ed è anch'esso munito di una paratoia movimentabile sia elettricamente che manualmente. In corrispondenza dei manufatti di scarico dell'area di laminazione è prevista anche la realizzazione di una soglia di sfioro di emergenza.

La vasca di Gessate, posta sul torrente Trobbia, prevede una superficie di 4 ettari e un volume di invaso di mc.130.000. Le attività sono state avviate a fine 2023 e si concluderanno entro inverno-primavera 2025.

2. Sistemi di contenimento urbani

Le vasche hanno una rilevante funzionalità nel mitigare le piene lungo fiumi e torrenti in aperta campagna.

Per le aree urbane il principio delle vasche di laminazione viene adottato adeguandolo alle più modeste estensioni sulle quali è possibile la realizzazione di sistemi di contenimento con l'impiego di trincee drenanti e di serbatoi di accumulo temporaneo, metodo ormai largamente in uso. Si nota infatti che nel caso dell'alluvione che ha interessato Bergamo trincee drenanti adattate a in modo da convogliare e immagazzinare una buona parte l'acqua piovana e di scorrimento superficiale proveniente dalle colline in una coltre permeabile superficiale estesa ma di modesto spessore, capace di fornire alimentazione idrica a giardini fioriti e alberati (rain garden) lungo il piede del versante, avrebbero permesso di mitigare l'effetto della piena allungando notevolmente i suoi tempi di propagazione. Il rallentamento della piena e l'abbattimento della portata ottenuto con il rain garden, avrebbe permesso di incanalare le acque verso vasche di recapito munite di paratie che avrebbero poi rilasciato le acque immagazzinate al termine della piena.

I rain garden e le trincee (swales) hanno il pregio di funzionare anche da depuratori naturali, filtrando le acque di pioggia e scorrimento superficiale, e si adattano quindi bene all'utilizzo nelle aree cittadine.

La progettazione e realizzazione di questi tipi di intervento è in via di attuazione in molte città italiane, e anche a Milano è stata da tempo avviata con in conforto di studi avanzati, come ad esempio quello di CAP con la collaborazione con l'Università di Milano (Gruppo CAP, C. Gandolfi e al. 2021), che si consiglia per gli approfondimenti.



Figura 43 - Esempio di rain garden cittadino, collocato al centro di una via a doppia corsia. La porzione occupata dal rain garden ha una sezione di larghezza fra 5 e 10 m e profondità di circa 5 m. Si nota che una parte del sistema drenante fa affluire le acque alla condotta centrale interrata, e che questa è collocata all'interno di una trincea drenante. Il rain garden accoglie le acque fluenti sull'asfalto tramite prese laterali, ed è dotato di sistemi di ispezione e di smaltimento delle acque in eccesso (outflow).

1. Sistemi di filtrazione estensivi, i sistemi di fitodepurazione a flusso libero superficiale, a flusso libero orizzontale, a flusso sommerso verticale e i sistemi ibridi.

I rain garden fanno parte dei SDUS «sistemi di drenaggio urbano sostenibile», che hanno lo scopo di gestire le acque di pioggia per rallentare l'immissione in sistemi di smaltimento delle acque reflue e di scorrimento superficiale. Tali sistemi sono anche in grado di trattare le sostanze inquinanti presenti nell'acqua anche se limitatamente a modeste concentrazioni; in alcuni casi possono anche prevedere l'accumulo e il riuso delle acque di pioggia. Sotto la voce «sistemi di drenaggio urbano sostenibile», sono ricompresi alcuni sottosistemi: le aree di ritenzione vegetate, i canali filtranti, i filtri a sabbia sotterranei, le trincee filtranti e i laghetti (pond).



Figura 44 - Drenaggio urbano disposto in via Pacini a Milano per consentire un maggiore afflusso di acqua di pioggia alle radici e per evitare la sua dispersione e contaminazione sull'asfalto

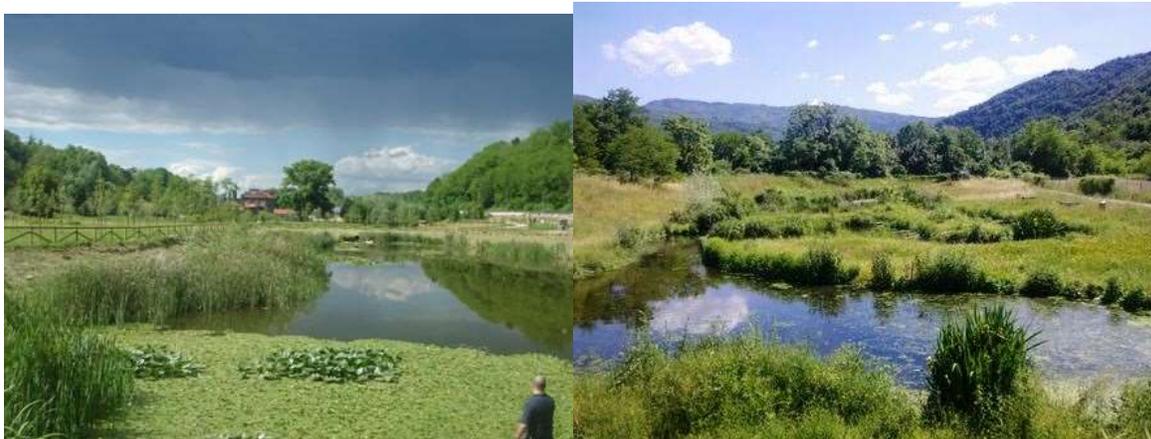


Fig. 45 - Sistema di fitodepurazione a flusso libero superficiale a Dicomano in provincia di Firenze (foto Iridra, Firenze).

Un caso particolare di questa seconda famiglia è rappresentato dai sistemi multistadio per Cso (Combined sewer overflow), ovvero gli sfioratori di pioggia delle reti miste. innovativa (in Italia ne esiste uno solo, in Lombardia, oggetto di un monitoraggio attraverso un progetto europeo).

Questi sistemi hanno il vantaggio di produrre una laminazione degli afflussi idrici superficiali, decapitando la piena che altrimenti si riverserebbe nei recapiti tradizionali. Lo studio citato permette di visionare per la regione lombarda quali siano le aree più idonee per ciascuno dei sistemi di drenaggio esaminati.

2. Interventi per la regolazione del livello piezometrico locale

Nelle città i livelli di falda interessano frequentemente le fondamenta degli edifici, e risulta necessario abbassare il livello piezometrico con sistemi poco costosi ed efficienti, come i well-point, che consistono in sistemi di tubi finestrati di piccolo diametro di pochi metri di lunghezza che assorbono l'acqua tramite pompe a vuoto.

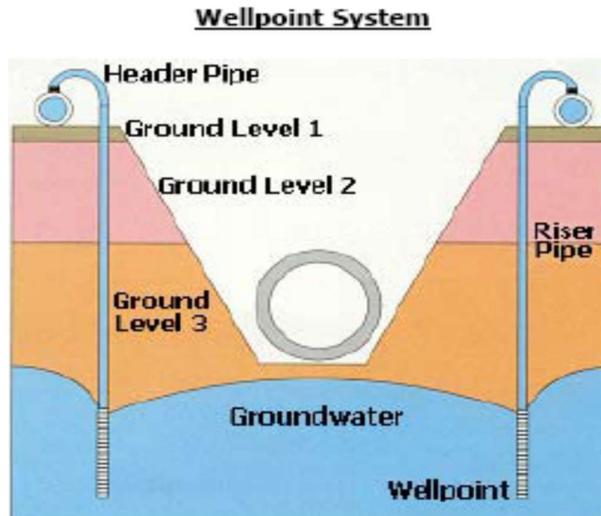


Figura 46 - Schema di gradonatura delle linee di well-point per la posa di una tubazione nell'ase delle trincee, profonda oltre 10 m

Queste tecniche sono state impiegate anche a Milano su un tratto della Metropolitana, dove la galleria interferiva con la falda, lungo la tangenziale di Segrate e nel caso di fondazioni di alcuni edifici. Si fa presente che, poiché come detto l'abbassamento del livello di falda in questi tubi drenanti avviene con pompe a vuoto, la depressione piezometrica è di pochi metri (5-7 al massimo). In caso di necessità si può approfondire maggiormente la falda prima prosciugando con una fila di well point il terreno fino a piccola profondità, poi scavando il terreno così drenato, e inserendo poi una nuova fila di well-point (sistema a gradoni rappresentato schematicamente nella figura). Queste applicazioni sono utilissime in caso di sollevamenti occasionali della falda che invadano le fondamenta o le cantine di edifici, e sono utilizzate frequentemente per la posa di tubazioni entro scavi poco profondi. Non sono rari gli utilizzi per bonifiche di falde superficiali.

3. Drenaggio urbano profondo

Quando la zona sulla quale intervenire è ampia, si può abbinare un sistema di pozzetti o well-point con trincee drenanti.

Si sottolinea che spesso una trincea rettilinea a monte non è sufficiente: la falda difatti fluisce dai lati rendendo pressoché minimo l'effetto drenante di tale opera.

Quando le fondamenta sono invase dalle acque di falda; il progettista pone un dreni di ghiaia e sabbia intorno alle fondamenta e circonda l'area con una trincea molto profonda, nella quale pone un sistema di tubazioni filtranti che tramite pompe intercettano ed estraggono l'acqua di falda.

La trincea può essere rinforzata con pozzi che drenano la falda profonda se questa si può sollevare eccessivamente

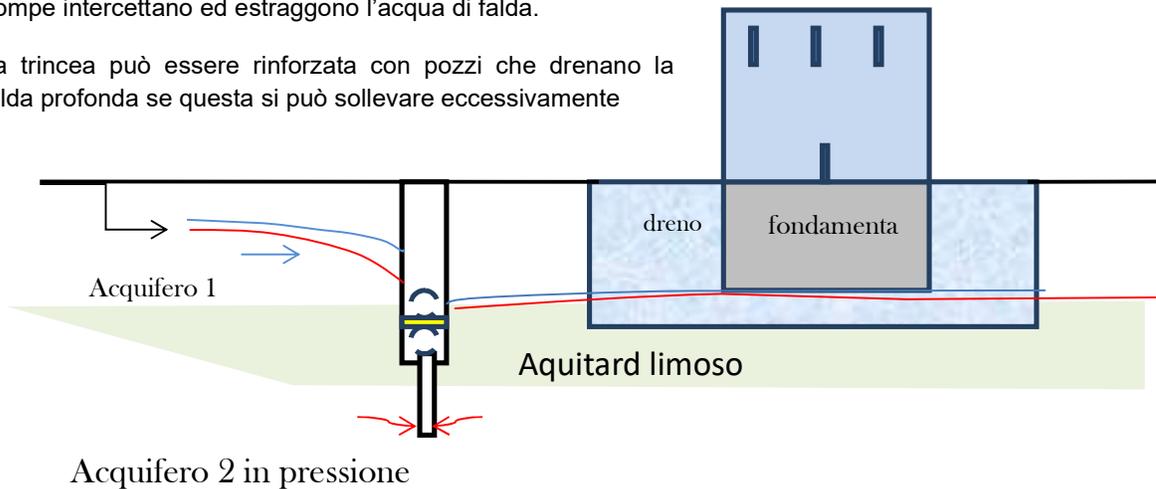


Figura 47



Figura 48 - La rappresentazione delle linee isopiezometriche (in blu), mostra che l'edificio posto al centro della cartina non è sufficientemente protetto dalla trincea (segmento nero) rettilineo, e che è necessario circondare completamente l'edificio con il dreni.

4. Riduzione del consumo di suolo

Attualmente nei grandi centro urbani il consumo di suolo è tale che le aree edificabili costituiscono più del 70% del territorio comunale; è opinione condivisa fra gli urbanisti che i piani di governo del

territorio debbano portare a una forte riduzione della percentuale delle aree impermeabilizzate, che hanno portato a un forte aumento del deflusso superficiale delle aree urbane, ormai difficilmente smaltito dagli impianti fognari.

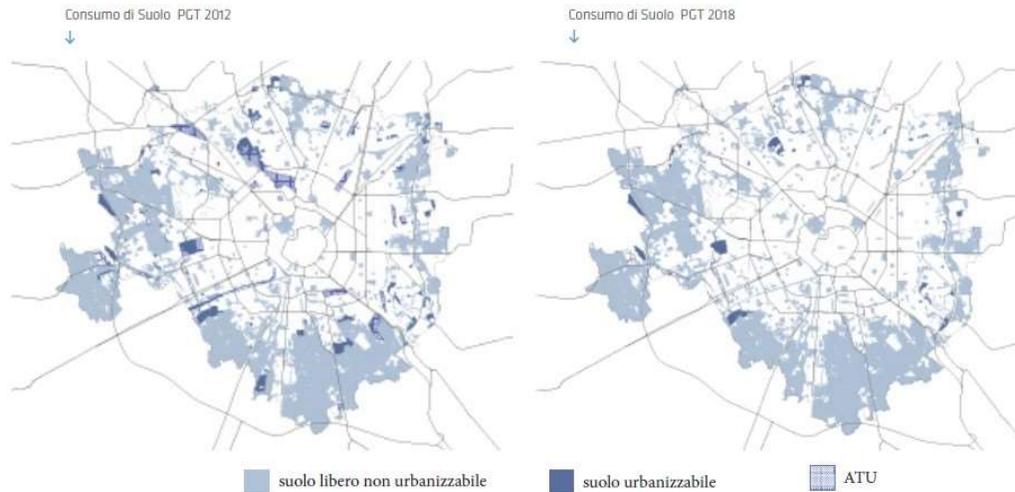


Figura 49 e 50 - Consumo del suolo previsto a Milano: confronto fra i PGT del 2012 e del 2018, che mostra la marcata tendenza delle amministrazioni a ridurre l'indice di consumo del suolo

5. Rivisitazione del complesso normativo sulle acque irrigue e di falda

Fino a pochi anni fa il Piano di Tutela delle acque della Regione Lombardia prevedeva un controllo del livello di falda da parte dei Comuni e suggeriva di adeguare nei limiti del possibile tale livello a quello che poteva essere definita l'altezza piezometrica ideale (L.Alberti e al.,2005)

Ad esempio nella prima versione era stato assunto come livello piezometrico ottimale quello del periodo 1980/90 ; infatti in quel periodo :

- non si registravano problemi per le infrastrutture sotterranee delle grandi città;
- la soggiacenza, anche nei Settori più sfruttati, era tale da consentire la realizzazione di nuovi pozzi senza maggiorazione dei costi per la maggiore profondità da raggiungere;
- la soggiacenza non comportava problemi di disponibilità idrica nei pozzi minori più superficiali;
- la falda, presso i settori industriali maggiori, non interagiva con le porzioni più superficiali del sottosuolo potenzialmente contaminate;

La conoscenza della piezometria ideale, in rapporto all'occupazione del suolo e del sottosuolo da parte delle strutture edilizie e delle infrastrutture, presentava notevoli vantaggi:

a)permetteva la pianificazione del sottosuolo in modo adeguato ed a gestire il problema dell'infiltrazione evidenziando in quali punti dell'ambito comunale era più corretto aumentare o

ridurre l'ingresso di acque nel sottosuolo offre margini di garanzia di ulteriore disponibilità idrica per periodi limitati in caso di periodi particolarmente siccitosi.

b) consentiva di evitare i pericoli di estinzione delle risorse idriche nei periodi maggiore sfruttamento della falda riducendo adeguatamente i prelievi nelle zone più esposte

c) Permetteva di visualizzare i punti nei quali si manifestavano eccessivi sollevamenti del livello di falda, e di progettare adeguatamente le impermeabilizzazioni degli edifici e delle infrastrutture profonde (metropolitana e svincoli viari sotterranei, sottopassi).

Esempi pratici dell'applicazione di tale cautela suggerita dai Piani di Tutela sono presenti in letteratura (es. L.Alberti e al.,2005 per il comune di Milano)

6. Interventi sovracomunali sulla rete idrica superficiale

Alcune regioni italiane sono più vulnerabili delle altre alle alluvioni. Tale evidenza è sintetizzata nel grafico di figura 51, da cui emerge che l'esposizione a questo tipo di dissesto è maggiore per le regioni caratterizzate da una rilevante ampiezza dei bacini idrografici dei corsi d'acqua che le attraversano, da una morfologia pianeggiante con progressiva riduzione di pendenza verso il recapito delle acque superficiali, e da una riduzione a partire dal settore mediano del bacino, della trasmissività degli acquiferi man mano che ci si avvicina al recapito delle acque, come Fiume Po o mare Adriatico. Vulnerabilità alle esondazioni delle regioni italiane

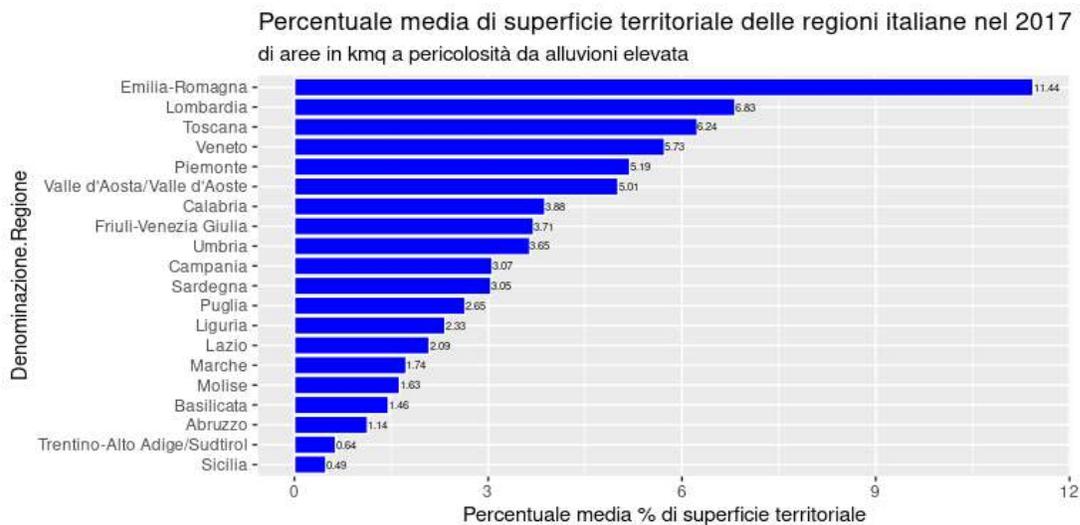


Figura 51 - Ripetizione dei dissesti idrogeologici per esondazione nelle regioni italiane. Si nota che quelle più colpite corrispondono ad aree di pianura con pendenza molto ridotta

Un adeguamento della rete irrigua, anche con la creazione di nuovi canali che convogliano le acque superficiali e di falda verso il Po, rappresenterebbe un ottimo veicolo verso la soluzione dei problemi di drenaggio delle aree alluvionabili e di alimentazione del Fiume Po. Questa soluzione non è nuova, ed è anzi stato inaugurato un primo tratto di canale Cremona-Milano al momento inattivo anche perché sono peggiorate le condizioni perché il F. Po sia navigabile fino a Cremona.

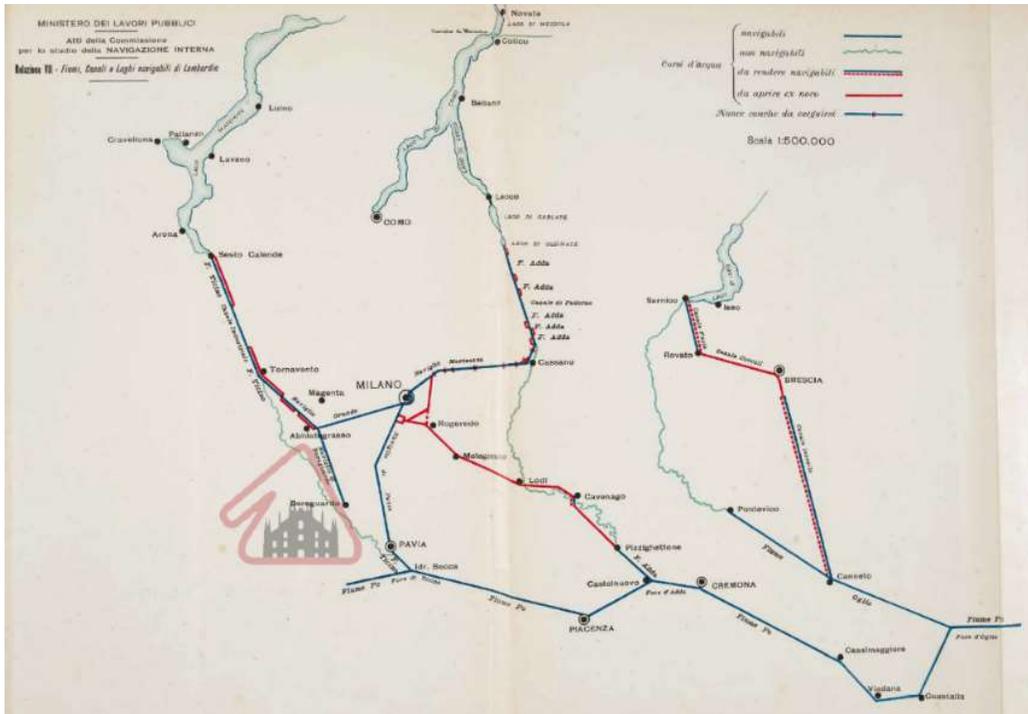


Figura 52 - Tracciato di progetto del Canale Milano Cremona Po e distribuzione geografica dei principali canali lombardi

Si fra inoltre presente che sono stati avanzati e pubblicati progetti di drenaggio delle acque di superficie mediante canali, ad esempio per il Seveso, che dimostrano come tali opere possono avere un concreto effetto sull'abbassamento della falda (oltre 5 m su tutta l'area cittadina milanese)

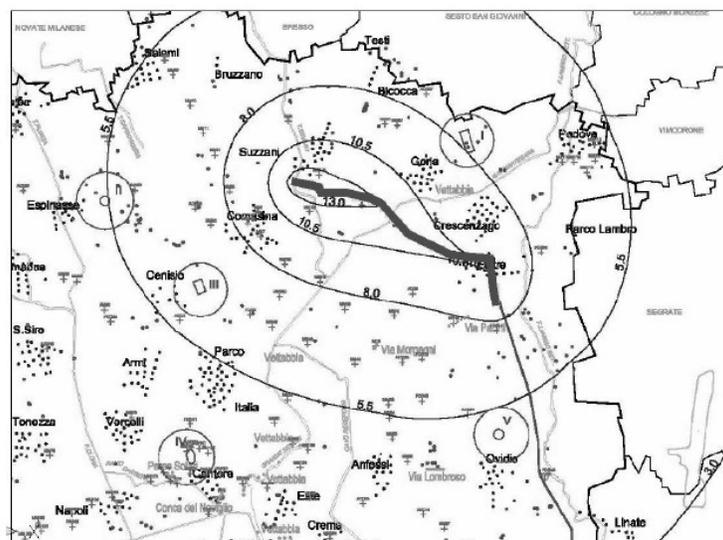


Figura 53 - Depressione piezometrica prodotta dal canale drenante per lo smaltimento delle acque del Seveso (Avanzini, Beretta e al. 2004) fra V.le F. Testi e Lambrate

Con le attuali conoscenze appare oggi possibile predisporre un sistema di canali che possa avere anche una funzione di controllo dell'eccessivo innalzamento del livello piezometrico.

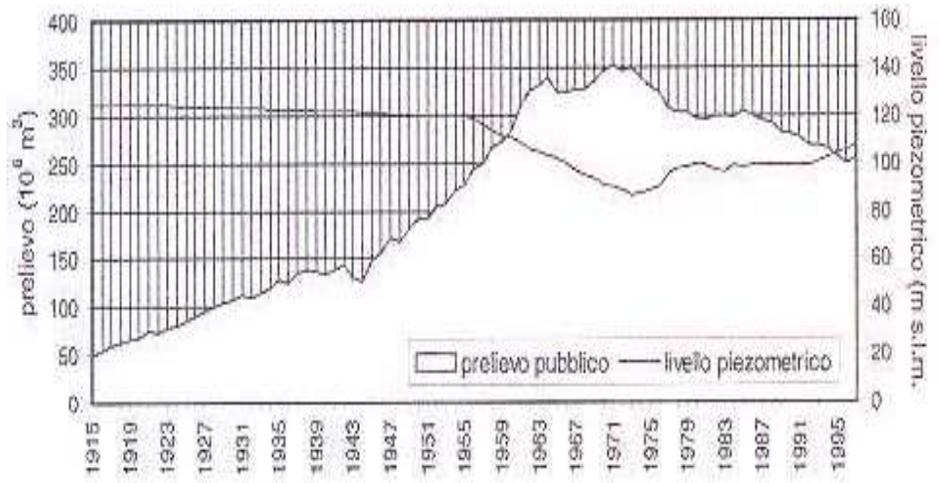


Figura 54 - Il grafico mostra la stretta reazione fra entità dei prelievi e abbassamento del livello piezometrico nella città di Milano

Ci si potrebbe avvalere delle conoscenze raggiunte in queste tecniche idrogeologiche nell'ambito delle università milanesi; la simulazione del comportamento dei corsi d'acqua e della falda permette oggi, grazie a queste tecniche, di progettare e di stabilire un adeguato livello di controllo delle oscillazioni dei livelli di falda, evitando danni alle reti irrigue.

CONCLUSIONI

Questa rassegna ha preso spunto dai risultati degli studi compiuti nel corso degli anni dalle Regioni (anzitutto Emilia-Romagna, fino dagli anni '80, poi della Lombardia) e dagli Enti universitari, che sono stati in grado di proporre sempre aggiornate modellazioni matematiche degli acquiferi sia di pianura sia di montagna, idonee per la gestione dei bilanci idrici superficiali e sotterranei. Notevole impegno e ottimi risultati hanno avuto anche le indagini promosse dall'Autorità di Bacino del Po e da ISPRA, spesso in collaborazione con ARPA. La bibliografia riportata in allegato cita in effetti solo una modesta parte delle indagini eseguite.

Dalla sintesi degli studi riportata in queste pagine, risulta che il sistema acqua – suolo sta modificandosi per raggiungere un nuovo equilibrio.

I fattori che meglio rappresentano i cambiamenti in atto sono:

Variazioni degli apporti meteorici alle falde e ai corsi d'acqua, con riduzione sostanziale degli afflussi nel tempo

Deformazioni del rilievo, subsidente nelle aree costiere e deltizie della Pianura Padana e in

sollevamento nei settori occidentali

Regressione e trasgressione marina

Migrazione degli alvei fluviali

Erosione (incisione valli, spianamento dei rilievi)

Neotettonica (sollevamenti e abbassamenti del suolo per isostasia)

Subsidenza del terreno causata da estrazione d'acqua

che si concretano sostanzialmente nella progressiva riduzione della capacità dei ricettori di smaltire ed accumulare le acque provenienti dalle precipitazioni nei periodi sempre più frequenti di elevato apporto meteorico.

Il monitoraggio di questi elementi può consentire di seguire adeguatamente l'evoluzione dei fattori che condizionano il dissesto idrogeologico rappresentando la primaria fonte di informazioni per i provvedimenti di prevenzione. Si sottolinea che il monitoraggio può essere raffittito e reso più efficiente dalla collaborazione fra Protezione Civile, che si appoggia anche a volontari, e Comuni, che contano su validi professionisti che sono al corrente delle problematiche ambientali del sito.

Elenchiamo le indicazioni per interventi migliorativi che questa rassegna ha portato in evidenza:

- **Adeguamento dei metodi previsionali**
Il prolungarsi dei periodi siccitosi riduce le capacità di assorbimento dei suoli, e induce a rilevanti esondazioni anche con precipitazioni non particolarmente accentuate, con erosione dei suoli superficiali e notevole apporto liquido e solido agli alvei dei corsi d'acqua. Questo richiede la raccolta di dati per stabilire con elementi statistici più probanti l'entità delle piene prevedibili e i tempi di ritorno adeguando i parametri idrologici oggi utilizzati
- **Arresto dell'intrusione salina**
Può evitarsi l'avanzamento del cuneo salino mediante regolazione dei prelievi idrici dal sottosuolo
- **Riduzione del consumo di suolo**
Intorno alle grandi città l'avanzamento delle aree impermeabilizzate (consumo del suolo), riduce progressivamente l'afflusso in profondità delle acque e facilita il loro collettamento verso le aree periferiche dei centri urbani, aumentando il livello di falda e di conseguenza riducendo la capacità di assorbimento delle precipitazioni tramite infiltrazione. Come dimostrato per Milano, le aree adiacenti alla città sono esposte all'emersione della falda e a inondazioni molto dannose su grandi superfici in occasione delle piogge più rimarchevoli.
- **Rivalutazione delle normative per il controllo del livello piezometrico**
Si ritiene possibile il ripristino del suggerimento contenuto nei Piani di Tutela delle acque della Regione Lombardia, di tenere sotto controllo il livello di falda favorendo il suo avvicinamento al cosiddetto "livello ideale", corrispondente a quello che meno impatta sulle infrastrutture (gallerie, metropolitane, scavi, fondazioni, ecc.) senza ostacolare un efficace prelievo dalla falda
- **Revisione dell'assetto della rete dei canali, migliorandone l'efficienza e aggiungendo nuovi tratti con funzione drenante nelle aree in cui si verifichi l'eccesso di acque di falda.**
- **Classificazione delle aree a rischio e indicazione delle opere con priorità urgente.**

Le conoscenze attualmente disponibili rendono possibile la riduzione degli impatti più dannosi anche a breve termine, pur risultando difficile la loro applicazione di fronte agli impegni finanziari da assumere. Da questa panoramica l'applicazione degli interventi elencati risulta fattibile, una volta esperita una fase di approfondimenti e verifiche da parte degli Enti e dei ricercatori.

BIBLIOGRAFIA

L. Alberti, M. Cantone, L. Colombo, I. La Licata (2018) - Model calibration using the automatic parameter estimation procedure (PEST) of the North-eastern zone of the Milan Functional Urban Area (Italy) ,Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater DOI 10.7343/as-2018-336

L.Alberti, V.Francani,I.Innocenti (2008) - La gestione integrata delle risorse idriche lombarde: valutazione del contributo alla ricarica da parte della rete irrigua “The integrated management of groundwater resources in Lombardy region: evaluation of the irrigation network contribution to the recharge”, in: Edizioni Universitarie di Lettere Economia e Diritto (Ed.), Una Nuova Geologia per La Lombardia. pp. 379–400

L. Alberti, P. Trefiletti (2005) - The Sustainable Groundwater Level in the Milan Area, *Giornale di Geologia Applicata* 1 (2005) 255 – 259

Arca S., Beretta G. P. (1985) Prima sintesi geodetico-geologica sui movimenti verticali del suolo nell'Italia Settentrionale (1897-1957) – *Boll. di Geodesia e Scienze Affini* XLIV (2)

E. Akylas , A. D. Koussis & A. N. Yannacopoulos (2006) Analytical solution of transient flow in a sloping soil layer with recharge, *Hydrological Sciences Journal*, 51:4, 626-641, DOI: 10.1623/hysj.51.4.626

Antonellini, M., Aydin, A., (1995). Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: geometry and spatial distribution. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 79, 642–671.

A. Armanini(2005)- *Principi di idraulica fluviale*, ed. Bios, Castrolibero, Cosenza

AA.VV.(2020) – *Les inondations par remontée de nappe*, @Géorisques, BRGM pagina web

A. Barozzi, C. Rampolla, V. Francani (2015) -Cause dei periodici allagamenti nella provincia di Milano fra Lambro e Adda , [www. Engeology.eu](http://www.Engeology.eu)

G.Becciu (2010) *Fondamenti di costruzioni idrauliche*, UTET Scienze Tecniche, ISBN 978-88-598-0522-9, OCLC 875255671

G.P. Beretta, M. Avanzini, G.Burchi, F.Marelli, M.Nespoli,A.Pagotto (2006)- *Regimazione delle acque sotterranee e protezione da eventi estremi per le acque superficiali: approccio integrato mediante canale drenante in sotterraneo a Milano*. *Giornale di Geologia Applicata*,Bari.

Beretta, G.P.; Avanzini, M. (1998): *La gestione sostenibile del sollevamento della falda a Milano ed hinterland*.In *L'Acqua*; Rivista bimestrale dell'Associazione Idrotecnica Italiana: Roma, Italy,.

Bignami D.F.(2010) – *Protezione civile e riduzione del rischio disastri*, Maggioni ed., Milano

T.Bonomi (2009) - Database development and 3D modeling of textural variations in heterogeneous, unconsolidated aquifer media: Application to the Milan plain. Comput. Geosci. doi:10.1016/j.cageo.2007.09.006 23/07/2021 www.engeology.eu

Luigi Borrelli *, Loredana Antronico, Giovanni Gullà, Giovanni Marino Sorriso-Valvo: "Geology, geomorphology and dynamics of the 15 February 2010 Maierato landslide - Calabria, Italy" - - CNR-IRPI, Via Cavour 4/6, 87036 Rende, CS, Italy

Beretta G.P. (1986) – *Contributo per la stesura di una carta idrogeologica della Lombardia*, Acque sotterranee n. 4 (1986).

Box, G. E. P., Jenkins, G. M., and Reinsel, G. C. (1994). Time Series Analysis, Forecasting and Control, 3rd ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Brunetti M., G. Lentini, M. Maugeri, T. Nanni, C. Simolo, J. Spinoni; 2009a. Estimating local records for Northern and Central Italy from a sparse secular temperature network and from 1961-1990 climatologies. *Advances in Science and Research*, 3, 63-71.

Brunetti M., G. Lentini, M. Maugeri, T. Nanni, C. Simolo, J. Spinoni; 2009b. 1961-1990 high-resolution Northern and Central Italy monthly precipitation climatologies. *Advances in Science and Research*, 3, 73-78.

Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* 24, 1025–1028.

De Caro, M.; Crosta, G.B.; Previati, A. Modelling the interference of underground structures with groundwater flow and remedial solutions in Milan. *Eng. Geol.* **2020**, 272, 105652.

Enrico Conte , Antonio Donato , Luigi Pugliese , Antonello Troncone: "Analysis of the Maierato landslide (Calabria, Southern Italy)" - Department of Civil Engineering, University of Calabria, Rende, 87036, Cosenza, Italy

Chapman, T. G. (2005) Recharge-induced groundwater flow over a plane sloping bed: solutions for steady and transient flow using physical and numerical models. *Water Resour. Res.* 41, W07027, doi:10.1029/2004WR003606.

Cherubini C., Romanazzi E. (2005). Il problema del sovralzamento della falda freatica in Corato. *Giornale di Geologia Applicata* 2. 383–386, doi: 10.1474/GGA.2005–02.0–56.0082

D. Citrini, G. Nosedà (1987) *Idraulica*, Milano, Casa Editrice Ambrosiana.

Città metropolitana di Milano (2004). Piano di Emergenza Intercomunale, Linee operative generali – Rischio idraulico 23/07/2021 www.engeology.eu

Città metropolitana di Milano, area tutela e valorizzazione ambientale (2013). Carta delle isopieze e della soggiacenza della provincia di Milano nel settembre 2013.

Civita M. (2004): "Idrogeologia applicata e ambientale", Casa Editrice Ambrosiana, Milano, pp. 794.

Civita M., (1987). La previsione e la prevenzione del rischio d'inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le Carte di vulnerabilità, Atti del Convegno "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione", Mantova: 9-18.

L. Colombo, D. Cremonesi, V. Francani(2011) Strutture idrogeologiche critiche per la stabilità delle sponde del torrente Pioverna (Valsassina, Lecco , Italia) . IJEGE , n.2, pag.65-84, Roma

Comune di Peschiera Borromeo (2012). Studio geologico, idrogeologico e sismico di supporto al piano regolatore del territorio – relazione geologica

Custodio E., Llamas M. R., 1996 – Autori Vari – “Idrologia sotterranea” I e II volume. Ed. Omega (Barcellona)

De Caro, M.; Crosta, G.B.; Previati, A.(2020): Modelling the interference of underground structures with groundwater flow and remedial solutions in Milan. Eng. Geol., 272, 105652.

De Luca, D.A.; Destefanis, E.; Forno, M.G.; Lasagna, M.; Masciocco, L.(2014): The genesis and the hydrogeological features of the Turin Po Plain fontanili, typical lowland springs in Northern Italy. Bull. Eng. Geol. Environ. 73, 409–427

Dragoni W., Sukhija B. S. (2008). *Climatic Change and Groundwater*. London, The Geological Society Publishing House, Geological Society Special Publication, n. 288.

Fiorillo F., Doglioni A. (2010). *The relation between karst spring discharge and rainfall by cross correlation analysis(Campania, southern Italy)*. Hydrogeology Journal, 18: 1881–1895.

Faulkner D.R., Jackson C.A.L., Lunn R.J., Schlische R.W., Shipton Z.K., Wibberley C.A.J (2010). A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones, *Journal of Structural Geology*, 32: 1557-1575.

F.Fiorillo (2011) _ Tank – reservoir drainage as a simulation of recession limb in Karst Hydrograph. Hydrogeology Journal.

Gattinoni P, Scesi L., Arieni L., Canavesi M. (2011): “The February 2010 large landslide at Maierato, Vibo Valentia, Southern Italy”, *Landslides* (2012) 9:255:261.

Gattinoni P., Scesi L (2013): “Lanslide hydrogeological susceptibility of Maierato (Vibo Valentia, Southern Italy)”, *Natural HazardsJournal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, Nat Hazards (2013) 66:629-648 DOI 10.1007/s11069-012-0506-9

Gattinoni P. (2009). Parametrical landslide modeling for the hydrogeological susceptibility assessment: from the Crati Valley to the Cavallerizzo landslide (Southern Italy). *Natural Hazard*, 50: 161-178.

K.J.Gregory&D.E.Walling (1973)- Drainage basins form and processes, Edward Arnold ed, London

Gruppo Cap ,C.Gandolfi, D.Masseroni, F.Massara, G.B. Bischetti (2021) -Manuale sulle buone pratiche di utilizzo dei sistemi di drenaggio urbano sostenibile

Gudmundsson A. (2000). Active fault zones and groundwater flow. *Geophysical research letters*, vol. 27, no. 18, pages 2993-2996.

Hencher S.R. (2010) - Preferential flow paths through soil and rock and their association with landslides. *Hydrol process* 24, 1610-1630.

IreR (1998). Risanamento dell'area ad alto rischio di crisi ambientale Lambro Seveso Olona. Verifica di fattibilità del progetto strategico sull'area e individuazione di criteri, indirizzi e metodi per l'attuazione di progetti prioritari, Vol. II, , Milano, p.9-113,.

T.Julínek, D. Duchan, J. Říha (2020) - Mapping of uplift hazard due to rising groundwater level during floods. Wiley Online Library <https://doi.org/10.1111/jfr3.12601>

Lopez D. L., Smith L. (1995). Fluid flow in fault zones: analysis of the interplay of convective circulation and topographically driven groundwater flow. *Water Resources Research*, Volume 31, Issue 6, pages 1489–150.

Parker, G.G., et al., 1955. Water resources of southeastern Florida, USGS Water Supply Paper 1255 Piano di Tutela delle Acque (PTA) della Regione Calabria

Piccioli S.(2023) - Influenza dei cambiamenti climatici e della ricarica irrigua sui futuri livelli di falda nel bacino Adda - Ticino , Tesi di laurea Polimi, rel. Luca ALBERTI,corr. P. Mazzon .

F.G. Pinder ,J.D.Braedhoeft, H.H.Cooper (1969)- Determination of aquifer diffusivity by the aquifer response to fluctuations in river stage. *Water Resource Research* , Princeton.

Portoghese I., Masciale R. Vutto M., 2010 “Aggiornamento del Bilancio Idrogeologico dei Corpi Idrici Sotterranei della Regione Puglia” nell’ambito di - Rapporto Fase 6: caratterizzazione qualitativa dei pozzi– CNR – IRSA

Rawling G.C, Goodwin L.B, Wilson J.L. (2001). Internal architecture, permeability structure, and hydrologic significance of contrasting fault-zone types. *Geology*, 29, 43-46.

Scheingross J.S., Minchew B.M., Mackey B. H., Simons M., Lamb M. P. , and Hensley S. (2013). Fault-zone controls on the spatial distribution of slow-moving landslides. *GSA Bulletin*; March/April 2013; v. 125; no. 3/4; p. 473–489. Sanders L.L. 1998 A manual of Field Hydrogeology – Prentice-Hall, p. 381

K.J.Gregory&D.E.Walling (1973)- Drainage basins form and processes, Edward Arnold ed, London

L.B. Leopold, M.G., Wolman,J.P. Miller (1964). Fluvial processes in geomorphology. Freeman, S.Francisco

L. Marchi (2006) Il rilievo geomorfologico dei corsi d’acqua. La loro evoluzione e stima solido, Udine

Polemio, M., Casarano, D., (2008) Climate change, drought and groundwater availability in southern Italy. *Climate Change and Groundwater* (Dragoni W., Sukhija B.S. eds), Geological Society, London, Special Publications, 288, 39-51.

L.Pollicino , M.Masetti, S.Stevenazzi , A.Cristaldi, C. Righetti, M. Gorla (2021)- Multiaquifer susceptibility analyses for supporting groundwater management in urban areas.*J .Contam Hydrol.* ;238:103774. doi: 10.1016/j.jconhyd.2021.103774. Epub 2021 Jan 22

Provincia di Milano (2009). Lo stato quantitativo delle acque sotterranee nella provincia di Milano dal 1997 al 2007.

Provincia di Milano (1989). Progetto Lambro, piano di bacino : proposte per la sistemazione idraulica del Lambro e per il riassetto paesaggistico della sua valle. 201 p.: ill. + 4 tav. sciolte in cartella Provincia di Milano.

M. Rinaldi, B. Belletti, M. Bussettini, F. Comiti, B. Golfieri, B. Lastoria, E. Marchese, L. Nardi, N.Surian(2017)-New tools for the hydromorphological assessment and monitoring of European

streams, *Journal of Environmental Management*, Volume 202, Part 2, , Pages 363-378, ISSN 0301-4797

M.Rinaldi, N.Surian,F.Comiti,M.Bussettini (2011) - IDRAIM – sistema di valutazione IDRomorfologica, Analisi e Monitoraggio dei corsi d'acqua.Manuale tecnico operativo per il monitoraggio dei corsi d'acqua, Versione 1,Roma

Sartirana D. , Rotiroti M. , Bonomi T.,a De Amicis M., Nava V. , Fumagalli L. , Zanotti C. (2022) : Data-driven decision management of urban underground infrastructure .*Hydrogeology Journal* 30:1157–1177 <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02494-5> PAPER through groundwater-level time-series cluster analysis: the case of Milan (Italy)

Sartirana D, Rotiroti M, Zanotti C, Bonomi T, Fumagalli L, De Amicis M (2020) : A 3D geodatabase for urban underground infrastructures: implementation and application to groundwater management in Milan metropolitan area. *ISPRS Int J Geo-Inf* 9(10).

<https://doi.org/10.3390/ijgi9100609> Scesi L., Gattinoni P. (2009). *Water circulation in rocks. Springer 2009*, p. 172, ISBN: 9048124166.

Settore Protezione Civile e GEV (2013). *Revisione e aggiornamento del programma provinciale di previsione e prevenzione dei rischi e del piano provinciale d'emergenza di Protezione Civile. Programma provinciale di previsione e prevenzione rischio idraulico e idrogeologico.*

Siligardi Maurizio – coordinatore –(2007) : I F F 2007 *Indice Di Funzionalità Fluviale Nuova versione del metodo revisionata e aggiornata*, Roma

Spreafico, F., Basirico, S., Previati, A., Frattini, P., Crosta, G. (2023). Characterization of the Grigna karst aquifer (Northern Italy) by springs monitoring and tracer tests. *Italian Journal Of Geosciences*, 142(2), 183-199 [10.3301/IJG.2023.11

T. Staiano , M. Rinaldi ,E. Paris (2011) – Seepage and stability analysis of embankments during floods. *Dep.of Civil Engin. University Firenze.*

Stevenazzi S, Masetti M, Beretta GP (2017) *Groundwater vulnerability assessment: from overlay methods to statistical methods in the Lombardy Plain area. Acque Sotter - Ital J Groundw* 6(2). <https://doi.org/10.7343/as-2017-276>

Università Degli Studi Di Milano Facoltà Di Agraria, U.R.B.I.M Lombardia (2012). *Tutela e valorizzazione dei fontanili del territorio lombardo - FonTe. Quaderni della Ricerca n. 144 - marzo 2012*

USDA (1986). *Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55 (TR-55) (Second Edition ed.)*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division

Wang, X., Clague, J., Frattini, P., Qi, S., Lan, H., Zhang, W., et al. (2024). Effect of short-term, climate-driven sediment deposition on tectonically controlled alluvial channel incision. *GEOLOGY*, 52(1), 17-21 [10.1130/G51671.1

