



SULLA CORRELAZIONE TRA IMPERMEABILIZZAZIONE DEL BACINO IDROGRAFICO E INCREMENTO DEL RISCHIO A ESONDARE.

ALFONSO DE NARDO

Centro Studi sulle Bonifiche
nell'Italia Meridionale

Premessa

Recenti e meno recenti episodi di riacutizzazione dei sintomi del dissesto idrogeologico rinnovano periodicamente la mai definitivamente sopita preoccupazione per la sicurezza del territorio che ci ospita. Una preoccupazione che monta, alimentata dalla breve torrenzialità degli articoli di cronaca, ogni volta che un'onda di piena si abbatte sugli insediamenti abitati e li sconvolge e invade strade e case e tra onde impazzite travolge vite umane inermi. Salvo a ridimensionarsi, a ritornare latente al primo rasserenarsi di cielo e a cedere nuovamente il posto alla frenesia privata e pubblica di costruire fin nei luoghi interdetti dalla natura, in pernicioso prossimità di corsi d'acqua, all'interno delle golene, al piede di versanti di conclamata instabilità.

Una sensazione diffusa e prontamente ribadita e rafforzata nelle cronache del giorno dopo è che sempre più frequenti siano gli eventi disastrosi e più gravi le loro conseguenze. E a ragione di ciò ogni volta si invocano i cambiamenti climatici, l'estremizzazione dei fenomeni atmosferici, il raggiungimento di inedite altezze di pioggia in poche ore. Ogni volta esplose la deprecazione collettiva verso uno sviluppo urbano che ha trasformato gli ampi corsi d'acqua in stretti cunicoli incassati tra le strade e le case, o verso la cementificazione diffusa dei suoli, responsabile di un impressionante aumento dei deflussi che si concentrano nei punti di strozzatura dei bacini idrografici.

Il territorio, le case e le vite umane vanno difesi dagli eventi alluvionali con efficacia, cercando di prevenire le conseguenze generate dalle piogge intense. I principali provvedimenti preventivi consistono nelle diverse azioni volte a rendere adeguata ed efficiente la rete di linee d'acqua naturali e artificiali che raccolgono i deflussi meteorici.

La conoscenza delle relazioni esistenti tra l'impermeabilizzazione dei suoli e l'incremento del rischio di esondazione è fondamentale per una corretta programmazione delle azioni difensive, per la progettazione degli interventi, per l'ottimizzazione della gestione delle reti di drenaggio.

Entrano in gioco la meteorologia, l'idrologia, l'idraulica. Si tratta di conoscere o di prevedere l'intensità e i tempi di ritorno dei fenomeni pluviometrici critici, di stimare i deflussi e le portate di piena in relazione agli stessi tempi di ritorno, di dimensionare o ri-dimensionare le reti di drenaggio in funzione delle portate previste.



Effetti dell'impermeabilizzazione del suolo

L'impermeabilizzazione dei suoli è causa certa dell'aumento delle portate di piena. Su un suolo impermeabilizzato l'acqua piovana scorre più velocemente che su un terreno nudo o su un suolo agricolo o su un'area boschiva. Ciò comporta la riduzione del ritardo con cui le gocce d'acqua cadute su quel suolo raggiungono una prestabilita sezione di impluvio a valle. Muovendosi con velocità maggiore le particelle d'acqua raggiungono tutte in anticipo la sezione, generando un aumento considerevole della portata. In definitiva l'impermeabilizzazione del suolo è responsabile, almeno sulle aree da essa direttamente interessate, di una diversa caratteristica del deflusso superficiale delle acque.

Ancora più importante è l'effetto prodotto dall'impermeabilizzazione sulle caratteristiche dell'intero deflusso. L'acqua che si raccoglie su un suolo agrario viene assorbita in buona parte nel sottosuolo, ove segue le leggi proprie del moto di filtrazione; solo una frazione limitata degli afflussi meteorici va ad alimentare il deflusso superficiale. L'acqua caduta su un suolo impermeabilizzato va invece ad alimentare interamente il deflusso superficiale ed è destinata perciò a raggiungere in breve tempo la sezione di chiusura del bacino.

Data quindi una prestabilita sezione del corpo idrico recettore, l'effetto dell'impermeabilizzazione dei suoli nel bacino a monte della sezione si traduce, in corrispondenza di un evento meteorico di assegnate caratteristiche, in un aumento della portata passante attraverso la sezione stessa e di conseguenza in una riduzione del franco che separa il pelo libero della corrente dalla sommità dell'argine. In altri termini l'aumento dell'impermeabilizzazione dei suoli si traduce nella riduzione dell'intensità di pioggia suscettibile di provocare nella sezione assegnata l'esondazione, ovvero nella riduzione del tempo di ritorno di fenomeni piovosi critici.

In definitiva l'incremento della impermeabilizzazione del bacino contribuisce fortemente ad aggravare il rischio di esondazione. Obiettivo del lavoro è definire appunto la correlazione esistente tra percentuale di impermeabilizzazione del suolo in un dato bacino e aumento del rischio di esondazione.

La portata di piena

E' noto che il volume d'acqua che attraversa la sezione di chiusura di un bacino in corrispondenza di un evento meteorico di durata t_c (tempo di corrivazione, ovvero durata della pioggia critica) è direttamente proporzionale alla massa d'acqua caduta sul bacino stesso, che, nell'ipotesi di uniforme distribuzione della pioggia, è data dal prodotto tra altezza di pioggia e superficie del bacino. La costante di proporzionalità è il coefficiente

di deflusso, definito come la quota percentuale degli afflussi meteorici sul bacino che raggiunge la sezione di chiusura per scorrimento superficiale. Alla base di detta proporzionalità sta l'ulteriore ipotesi semplificativa della totale separazione tra deflusso superficiale e sotterraneo, giustificata, specie per piccoli bacini, dal diverso ordine di grandezza delle rispettive velocità. La circolazione sotterranea può riemergere in vene superficiali che tornano ad alimentare la portata nella sezione di chiusura, ma comunque con un ritardo tale da non consentire modificazioni nel bilancio del deflusso superficiale entro l'intervallo di tempo di durata della piena.

Il bilancio afflussi-deflussi è dunque dato, nel periodo ristretto corrispondente alla durata del fenomeno di piena, dalla seguente equazione:

$$V = C \cdot h_c \cdot A,$$

ove:

V: volume complessivo dell'acqua che raggiunge la sezione di chiusura durante l'intero evento;

C: coefficiente di deflusso;

h_c : altezza critica di pioggia caduta al suolo nel corso di un'ora;

A: superficie del bacino gravitante sulla sezione di chiusura.

In teoria la portata affluente alla sezione dovrebbe aumentare linearmente nel tempo fino a raggiungere il massimo valore, pari a $Q_p = 2V/2t_c = C \cdot h_c \cdot A / t_c$ in corrispondenza del tempo t_c ; dovrebbe da quel momento in poi diminuire sempre linearmente, fino ad annullarsi all'istante $2t_c$.

Le condizioni teoriche che rendono accettabile tale equazione sono dunque le seguenti:

- la pioggia cade con intensità costante sull'intero bacino e si distribuisce in maniera uniforme;
- il deflusso nella sezione di chiusura è alimentato esclusivamente dalla circolazione superficiale delle sole acque di pioggia, essendo la parte dell'afflusso meteorico assorbita dal suolo pari a $(1 - C) h_c \cdot A$.
- nella quota di afflusso sottratta al bilancio idrico sono comprese le perdite per intercettazione delle chiome, per evapotraspirazione e gli accumuli negli invasi formati dal suolo.
- il tempo di corrivazione è una costante del bacino, non influenzata dall'intensità di pioggia e dallo stato iniziale del suolo.

Nel quadro di ipotesi semplificative sopra delineato le variabili che concorrono a definire la portata massima prodotta dall'evento piovoso si riducono dunque alla superficie del bacino (A), all'altezza di pioggia critica (h_c) e al coefficiente di deflusso (C): imm modificabili le prime due, modificabile (e modificata significativamente) nel tempo la terza per effetto delle grandi trasformazioni derivanti dall'urbanizzazione intensa delle pianure.



Pericolosità e rischio

Il rischio di esondazione in una determinata sezione è collegato in primo luogo alla determinazione, secondo le metodologie di tipo probabilistico riconosciute dalla comunità scientifica, di h_c (e conseguentemente della portata massima), in funzione della scelta del tempo di ritorno dell'evento piovoso: una sezione calcolata per contenere al massimo la portata di deflusso derivante da un evento con periodo di ritorno T sarà inevitabilmente soggetta a esondazione per tutte le piogge di intensità superiore a quella di calcolo, ovvero per tutte le piogge caratterizzate da un tempo di ritorno $> T$.

Il tempo di ritorno dell'evento adottato a base del calcolo della sezione idrica può essere quindi utilizzato anche come misura del rischio all'esondazione proprio di quella sezione. Se essa ad esempio è appena in grado di contenere la portata massima prodotta da un evento critico con un tempo di ritorno decennale, è evidente che andrà in crisi tutte le volte che l'altezza di quell'evento sarà superata.

Facendo riferimento a un periodo molto ampio da considerare come base di riferimento (es. 1000 anni) possiamo dire che una sezione proporzionata all'evento decennale sarà interessata da esondazione in media 100 volte, mentre la sezione calcolata sulla base dell'evento critico cinquantennale sarà interessata 20 volte. La pericolosità, intesa come probabilità che si verifichino esondazioni, è data da $100/1000 = 0,10$ nel primo caso, da $20/1000 = 0,020$ nel secondo. Il rapporto può essere definito come indice di pericolosità ($i_p = 1/T$).

E' dunque evidente che nessun intervento strutturale potrà mai consentire l'annullamento della pericolosità. Anche una sezione calcolata per un tempo di ritorno millenario sarebbe ancora esposta a una probabilità, remota ma non nulla, di esondazione, poiché prima o poi capiterà anche l'evento piovoso con tempo di ritorno ultramillenario. Sulla base di tali considerazioni non è dunque possibile attribuire alla scala di pericolosità un massimo e un minimo. In maniera del tutto convenzionale potremmo considerare minima la pericolosità corrispondente all'evento millenario (indice di pericolosità = $1/1000 = 0,001$), massima quella corrispondente all'evento annuale ($i_p = 1000/1000 = 1$). Il rischio è certamente proporzionale alla pericolosità, ovvero alla probabilità del ripetersi di straripamenti, ma dipende anche dal valore esposto e dalla vulnerabilità. E' ovvio che l'inondazione di aree incolte o di boschi provoca danni sensibilmente inferiori all'inondazione di campi coltivati e ancora di più all'inondazione di aree abitate. A parità di tempo di ritorno dell'evento e di coefficiente di vulnerabilità, il danno (e quindi il rischio) è massimo nel terzo caso, minimo nel primo.

L'indice di rischio (i_r) può essere allora espresso dalla formula $i_r = C_v * i_p$, ove C_v è un coefficiente che tiene conto dell'entità dei valori esposti all'esondazione, ovvero del danno alle cose e alle persone che può essere provocato da un'inondazione. In prima approssimazione si può conside-



rare C_v variabile da 1, nel caso che l'inondazione riguardi esclusivamente boschi, incolti e pascoli, a 100 nel caso che essa riguardi insediamenti edificati a elevata densità.

E poiché l'adeguamento di una sezione idraulica ha un costo tanto maggiore quanto più elevato è il tempo di ritorno dell'evento al quale essa viene adeguata, è evidente che un costo elevato potrà essere ragionevolmente sostenuto solo se è la contropartita di danni gravi a persone e a cose che così potranno essere evitati o meglio essere resi meno probabili. La programmazione degli interventi in difesa dalle alluvioni non va dunque effettuata solo in base alla determinazione quantitativa del rischio, ma anche all'individuazione di un livello di rischio caratteristico dei valori esposti che potremmo definire "rischio accettabile". Nel caso che siano esposti a inondazione solo boschi, pascoli e incolti, il rischio accettabile può essere per esempio quello connesso a un coefficiente C_v pari a 1 e a un tempo di ritorno quinquennale:

$$i_{ra} = 1 * 0,20 = 0,20$$

Nel caso che siano esposti a inondazione solo terreni coltivati, il rischio accettabile può essere riferito a tempi di ritorno più lunghi, per esempio di un ventennio. Considerando C_v in tal caso pari a 10, si avrebbe:

$$i_{ra} = 10 * 0,05 = 0,50$$

Nel caso di insediamenti urbanizzati, considerando un tempo di ritorno di 100 anni e $C_v = 50$:

$$i_{ra} = 50 * 0,01 = 0,50$$

Nel caso di insediamenti di elevata densità, con $T = 500$ e $C_v = 100$:

$$i_{ra} = 100 * 0,002 = 0,20$$

E' interessante notare che con i parametri sopra indicati il valore del rischio accettabile resta sempre compreso in un intervallo ristretto, tra 0,20 e 0,50. Ritenendo perciò plausibili gli ordini di grandezza assegnati a C_v , si può considerare accettabile e nello stesso tempo economicamente sostenibile un intervento di adeguamento delle linee di drenaggio superficiale che riporti il coefficiente di rischio accettabile a valori non maggiori di 0,50. Naturalmente sulla base dell'osservazione continua dei fenomeni di esondazione, delle loro conseguenze e dei danni provocati, i coefficienti adottati potranno convergere verso valori sempre più accettabili.



Relazione tra impermeabilizzazione e coefficiente di deflusso

Ritorniamo all'espressione della portata massima connessa all'evento meteorico di altezza critica riferita a un tempo di ritorno prestabilito:

$$Q_p = 2V/2t_c = C \cdot h_c \cdot A$$

Dei tre fattori da cui dipende la portata solo uno è variabile nel tempo ed è il coefficiente di deflusso C , che cambia in funzione delle modificazioni dell'uso del suolo. Il valore di C che appare nella formula è in realtà una media, riferita all'intero bacino scolante nella sezione data, risultante dalla media dei valori assunti in ciascuna areola unitaria del bacino.

Se consideriamo una singola areola A_i di superficie unitaria appartenente al bacino, il coefficiente di deflusso da attribuire alla stessa sarà c_i , tale che:

$$C = \sum(c_i \cdot A_i) / A$$

Il coefficiente c_i dipende da diversi parametri:

- pendenza del suolo: a una pendenza maggiore corrisponde una maggiore velocità di scorrimento dell'acqua e quindi una minore infiltrazione nel sottosuolo; sui suoli pianeggianti la permanenza dell'acqua è maggiore e ciò va a favore dell'infiltrazione;
- litologia: il deflusso superficiale è maggiore sui suoli più impermeabili, quindi sui suoli argillosi e sulle rocce compatte; minore sui suoli sabbiosi e ghiaiosi e sulle rocce fessurate;
- uso del suolo: la sottrazione dei suoli agli usi agricoli e forestali comporta in genere la sua impermeabilizzazione pressoché totale con asfalto, cemento e coperture di fabbricati; la stessa agricoltura intensiva può provocare gli stessi effetti con capannoni e serre; la conseguenza è sempre in un significativo aumento di c_i .

L'incremento diffuso dei coefficienti c_i si traduce nell'aumento complessivo di C e quindi nell'aumento proporzionale di Q_p . In altri termini per effetto di un incremento di C pari a ΔC ci si può attendere un valore più elevato della portata massima ($Q_p + \Delta Q_p$) corrispondente a un determinato tempo di ritorno T . Che succede in questo caso se la sezione idraulica di chiusura del bacino è stata dimensionata sulla base della portata di piena Q_p corrispondente al tempo di ritorno T e quindi sconta un grado di pericolosità pari a $1/T$? Accade che per lo stesso tempo di ritorno T la portata massima nella sezione sarà:

$$Q_p + \Delta Q_p = (C + \Delta C) \cdot h_c \cdot A$$

A sua volta la portata originaria di calcolo Q_p corrisponderà ora a un tempo di ritorno $T - \Delta T$, ovvero a un grado di pericolosità:

$$i_p + \Delta i_p = 1/(T - \Delta T)$$

L'incremento di classe di pericolosità attribuibile alla sezione prescelta per effetto della variazione di C è dunque pari a:

$$\Delta i_p = 1/(T - \Delta T) - 1/T$$

Dalla formula della portata massima si ricava pure che:

$$\Delta Q_p / Q_p = \Delta C / C,$$

ovvero che l'incremento percentuale della portata massima è uguale all'incremento percentuale del coefficiente di deflusso.

Nel caso teorico di un bacino naturale che venisse interamente impermeabilizzato il coefficiente medio di deflusso passerebbe da un valore medio (desunto dalla letteratura scientifica) di 0,4 a un valore medio di 1. L'incremento percentuale del coefficiente sarebbe $\Delta C * 100 / C = 150\%$. L'incremento di portata massima entro la sezione considerata sarebbe pure del 150%. Nel caso di un bacino del tutto omogeneo (per pendenze, litologia e uso del suolo) la variazione del coefficiente di deflusso medio dovuta all'impermeabilizzazione può essere facilmente calcolata in funzione della percentuale di suolo impermeabilizzata. Immaginiamo che la sommatoria delle aree coperte da strade, parcheggi ed edifici sia pari al 10% dell'intero bacino. Sull'intero bacino il valore originario di $C = 0,4$ diventa

$$C_1 = C + \Delta C = (0,4 * 0,9 * A + 1 * 0,1 * A) / A = 0,36 + 0,10 = 0,46,$$

con $\Delta C / C = 0,06 / 0,4 = 0,15$

Nell'ipotesi di un bacino omogeneo caratterizzato dappertutto da un coefficiente di deflusso specifico c costante e pari a 0,40, l'impermeabilizzazione del 10% della superficie del bacino si traduce dunque in un incremento percentuale del coefficiente di deflusso del 15%.

Uguali incrementi percentuali delle aree impermeabilizzate si traducono in uguali incrementi percentuali del coefficiente di deflusso rispetto al valore che esso assumerebbe in assenza totale di impermeabilizzazioni.

Nelle ipotesi assegnate il coefficiente aumenta del 15% rispetto al valore di base (assenza di impermeabilizzazione) per ogni 10% di aumento delle superfici impermeabilizzate. Delle stesse percentuali aumenta ovviamente anche la portata massima nella sezione di chiusura.

Un'ipotesi più vicina alla realtà è quella di un bacino diviso in due parti di uguale superficie: la prima corrispondente al sottobacino montano o collinare, caratterizzato generalmente da pendenze elevate e da forme di uso del suolo silvo-pastorali estensive; la seconda costituita dalla parte



pianeggiante, caratterizzata da basse pendenze e interessata in maniera di gran lunga più elevata dai fenomeni di urbanizzazione e di impermeabilizzazione. In questo caso supponiamo che l'impermeabilizzazione del 10% della superficie del bacino sia tutta concentrata (verosimilmente) nella metà pianeggiante, ove la mancanza di pendenze è cagione di un maggiore assorbimento dell'acqua nel suolo. Immaginiamo dunque che il coefficiente di deflusso medio assuma in detta area il valore 0,3 e nell'area montano-collinare il valore 0,5.

Si avrà:

$$C = (0,3 \cdot 0,5 \cdot A + 0,5 \cdot 0,5 \cdot A) / A = 0,4$$

$$C_1 = C + \Delta C = (0,3 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot A + 1 \cdot 0,2 \cdot 0,5 \cdot A + 0,5 \cdot 0,5 \cdot A) / A = 0,47$$

$$\Delta C / C = 0,47 / 0,4 = 0,175$$

Nel modello di bacino suddiviso nelle due sub-aree equivalenti l'impermeabilizzazione del 10% della superficie di pianura determina dunque un incremento del coefficiente di deflusso e della portata massima pari al 17,5%. Il ricorso a modelli così fortemente semplificati consente comunque di comprendere quanto sia significativa l'influenza dell'impermeabilizzazione del suolo sull'aumento del coefficiente di deflusso medio e quindi sull'aumento della portata Q_p .

Relazione tra impermeabilizzazione e indice di pericolosità

Se per effetto di un certo grado di impermeabilizzazione del bacino la portata massima corrispondente alla durata della precipitazione critica t_c e al tempo di ritorno T aumenta, ciò vuol dire che nella sezione di chiusura del bacino, già dimensionata sulla base di T , vi sarà una portata massima $Q_p + \Delta Q_p$. La portata massima ammissibile nella sezione (ovvero la portata Q_p per la quale il canale è dimensionato) corrisponderà ora a un tempo di ritorno $T - \Delta T$. Ciò significa che in corrispondenza della suddetta sezione il grado di pericolosità iniziale, che era pari a $1/T$ diventa ora pari a $1/(T - \Delta T)$. Conoscendo per il bacino in esame la famiglia di curve di possibilità pluviometrica è possibile calcolare il valore di ΔT per interpolazione grafica tra due curve successive, sulla base del Δh_c , ovvero sulla base del ΔQ_p . Da qui giungere all'incremento dell'indice di pericolosità che è pari a $[1/(T - \Delta T) - 1/T]T$.