

ambiente rischio comunicazione

Quadrimestrale di analisi e monitoraggio ambientale

numero 4
ottobre 2012

DECIDERE NELL'INCERTEZZA

amra

■ analysis and monitoring of environmental risk

In questo numero:

DECIDERE NELL'INCERTEZZA

Editoriale

Ugo Leone

Probabilità e rischio

Pasquale Erto, Massimiliano Giorgio, Iunio Iervolino

Probabilmente

Guido Trombetti

Il rischio vulcanico: dall'empirismo al probabilismo

Paolo Gasparini

Previsione operativa dei terremoti e decisioni

Gordon Woo, Warner Marzocchi

Cambiamento climatico: un clima di incertezza

Alexander García-Aristizábal

Probabilità e Protezione Civile

Mauro Dolce, Daniela Di Bucci

Decidere nell'incertezza

Guido Bertolaso

Divulgazione scientifica e letteratura

Guido Trombetti

Caso, caos e decisione

Pietro Greco

I numeri precedenti:

RISCHIO SISMICO

GESTIONE DEI RIFIUTI URBANI

DISSESTO IDROGEOLOGICO

Tutti i numeri di *Ambiente Rischio Comunicazione* possono essere scaricati gratuitamente dai siti www.amrcenter.com e www.doppiavoce.it.

Prima di tutto

Paolo Gasparini, Ugo Leone

Non si può pubblicare questo numero di *Ambiente Rischio Comunicazione* senza un commento alla sentenza del 22 ottobre u.s. con la quale si è momentaneamente concluso il processo alla Commissione Grandi Rischi della Protezione Civile per il comportamento avuto prima del terremoto che il 6 aprile 2009 ha colpito L'Aquila.

La sentenza di condanna ai sette imputati che stavano solo tentando di fare il proprio lavoro cancella con un colpo di spugna tutto quanto è scritto in questo numero. L'incertezza non esiste. Il dovere di decidere in situazioni in cui la probabilità di sbagliare è alta non è compensato dal diritto di non essere perseguiti se le scelte, fatte in buona fede, non sono le migliori possibili. La scienza è stata sconfitta perché non può dare certezze, trionfano i ciarlatani che dichiarano di poterle dare.

Probabilmente un giudice non è obbligato a considerare le conseguenze di una sentenza che ritiene giusta. Ma, adesso, ci saranno ancora in Italia persone competenti e affidabili che si assumano la responsabilità di decidere in un mondo che, a dispetto di quanto pensa la giurisprudenza, continua a essere gestibile solo con leggi probabilistiche? Ci sarà ancora in Italia chi avrà il coraggio di assumersi la responsabilità di utilizzare

tecnologie innovative, già impiegate in altri paesi, che possono limitare danni e vittime, ma comportano significative probabilità di falsi allarmi o di mancati allarmi?

Avevamo pensato che il titolo di questo numero potesse essere *La percezione della probabilità* perché il suo scopo è quello di risvegliare nella gente, negli amministratori, nel mondo giuridico la coscienza che viviamo in una società nella quale non possiamo predire con certezza cosa ci accadrà, ma solo valutare le probabilità di diversi scenari. E questo vale sia per la vita di tutti i giorni che per gli eventi naturali.

Crediamo che valga la pena divulgare comunque le nostre riflessioni, anche se non sembrano adatte alla realtà che ci circonda, perché non rimangano puramente accademiche ma servano ad impedire che sentenze di questo tipo possano ripetersi.

Se il mondo giuridico avesse avuto una corretta percezione della probabilità questo processo non sarebbe mai cominciato.

Molti hanno dichiarato che questo processo, questa sentenza, è come il processo a Galilei. In realtà è peggio perché dal 1633 ad oggi quattrocento anni non sono passati invano: la Chiesa si è scusata. Quanto si dovrà aspettare perché si ravveda la Giustizia?

Sommario

**numero 4
ottobre 2012**

DECIDERE NELL'INCERTEZZA

Editoriale <i>Ugo Leone</i>	2
Probabilità e rischio <i>Pasquale Erto, Massimiliano Giorgio, Iunio Iervolino</i>	5
Probabilmente <i>Guido Trombetti</i>	12
Il rischio vulcanico: dall'empirismo al probabilismo <i>Paolo Gasparini</i>	16
Previsione operativa dei terremoti e decisioni <i>Gordon Woo, Warner Marzocchi</i>	21
Cambiamento climatico: un clima di incertezza <i>Alexander García-Aristizábal</i>	26
Probabilità e Protezione Civile <i>Mauro Dolce, Daniela Di Bucci</i>	34
Decidere nell'incertezza <i>Guido Bertolaso</i>	40
Divulgazione scientifica e letteratura <i>Guido Trombetti</i>	46
Caso, caos e decisione <i>Pietro Greco</i>	51
Notiziario AMRA	60
Gli autori	64

Editoriale

Ugo Leone

Se la mela fosse caduta un po' più distante dalla testa di Newton, e se, a proposito di mele, Eva e Adamo non avessero ceduto alla tentazione? Può il batter d'ali di una farfalla in Brasile provocare un tornado in Texas (Edward Lorenz)? Può bastare il movimento brusco di una mano per innescare il meccanismo che porta il mondo ad un'altra era glaciale (Hubert Lamb)? Perché lanciando tre dadi, la probabilità di uscita delle somme 10 e 11 è più probabile dell'uscita del 9 e del 12, nonostante entrambi i risultati si ottengano da un uguale numero di combinazioni (Galileo)? Che cosa sarebbe successo se la Helen di *Sliding doors* avesse perso il metrò? Quante probabilità aveva di perderlo? Probabilmente, forse, del doman non v'è certezza...

Questi "se" dei quali ho fatto solo una superficiale scelta potrebbero moltiplicarsi enormemente. E molti sarebbero indotti a dire che con i "se" non si fa la storia. È certamente così, ma non è solo per far lavorare la fantasia che si è tentati di ipotizzare gli scenari possibili e, soprattutto, non è per puri esercizi di fantasia che si ragiona sulla "probabilità che...".

Viviamo in una società probabilistica? Viviamo in una società nella quale poco è programmato, molto è affidato al caso. E caso è l'anagramma di caos. Quante sono le probabilità che...?

Come molti interessati a questi argomenti sanno, il calcolo della proba-

bilità del verificarsi e del ripetersi di un evento, da Pascal in poi è stato affrontato con maggiore frequenza (è il caso di dire) con riferimento al gioco, specialmente d'azzardo (Trombetti). Ed è stato affrontato con un approccio prevalentemente matematico. Era anche un modo di sancire una sorta di ineluttabilità del verificarsi di un evento in qualche modo "attutito" nel secolo scorso da Bruno de Finetti e Leonard Jimmie Savage che hanno caricato la probabilità anche di una dose di soggettività dando peso anche alla fiducia personale nel verificarsi di un evento (per esempio: ho studiato abbastanza per superare l'esame indipendentemente dagli umori del professore e da qualche vuoto di memoria).

Questo numero di *Ambiente, rischio, comunicazione* – familiarmente ARC –, come è nel compito che sin dal titolo della rivista ci siamo dati, si propone di affrontare il problema con specifico riguardo ai rischi e di dare la più efficace comunicazione dei risultati.

Chiedevo poco prima "quante sono le probabilità che...?": questa probabilità pochi la gestiscono e il suo calcolo, il calcolo che un evento, un'occasione, una situazione si verifichi o si verifichi il suo opposto sfugge ai più. E, peggio, sfugge l'importanza, talora vitale, di questa gestione. In questo numero questa valutazione viene fatta in modo approfondito nella valutazione dei rischi (Iunio Iervolino, Massimiliano Giorgio,

Pasquale Erto), nella gestione delle catastrofi naturali (Paolo Gasparini), i terremoti innanzitutto (Gordon Woo, Warner Marzocchi), e nella gestione stessa delle emergenze (Guido Bertolaso) e della protezione civile (Mauro Dolce, Daniela Di Bucci).

Certo non vi sono certezze, ma nel caso della previsione e gestione dei rischi qualunque elemento, qualunque notizia in più a disposizione può avere ricadute formidabili sulla qualità della vita in termini di sicurezza.

Non vi sono certezze. Ce lo ricorda anche Guido Trombetti, a proposito dell'articolo *Soccer matches as experiments: how often does the 'best' team win?* che G.K. Skinner e G.H. Freeman, ricercatori dell'Università del Maryland, hanno pubblicato su *Journal of applied statistics* nel quale con un'accurata analisi statistica gli autori concludono che in un torneo la probabilità che non vinca la squadra più forte è del 78%. Se è così è lecito anche chiedersi qual è la probabilità che il Napoli vinca lo scudetto.

Non vi sono certezze, ma probabilità dal cui calcolo si fanno scaturire azioni e comportamenti importanti.

In conclusione mi piace ricordare il "paradosso" di Lamb. Secondo il climatologo inglese Hubert Lamb la complessità di cause e interazioni che contribuiscono a determinare il clima è particolarmente delicato: «Potrebbe bastare il movimento brusco di una mano per innescare il meccanismo che porta il mondo ad un'altra era glaciale». Il perché è presto spiegato: «Il piccolo vortice creato dalla mano potrebbe andare a ingrossarne un altro, che crescendo su se stesso potrebbe produrre un forte temporale. L'abbassamento brusco della temperatura forse anticiperebbe di molto una nevicata e la neve, riflettendo i raggi solari, comporterebbe un raffreddamento generale. L'estate successiva forse non sarebbe

più in grado di sciogliere completamente le nevi invernali, le nuove nevicata sarebbero ancora più abbondanti e in poche stagioni via via sempre più sfavorevoli, si potrebbe arrivare ad una vera e propria glaciazione». Certo, si tratta di un evidente quanto significativo paradosso; e lo riconosce lo stesso Lamb. Il quale, però, avverte che «nel dubbio conviene tenere le mani in tasca». Tutto ciò spiega perché le previsioni meteorologiche, sebbene descritte con le equazioni deterministiche della fisica ed elaborate con raffinate tecniche di calcolo eseguite da super computer, producano risultati ancora approssimativi. E si comprende anche perché, con un efficace gioco di parole, l'articolo nel quale Alexander Garcia affronta questo argomento si intitola *Cambiamento climatico: un clima di incertezze*.

Un esempio significativo, proprio mentre scrivo queste considerazioni, è dato dall'allarme provocato dal cosiddetto uragano Cleopatra che si attendeva, si prevedeva, si temeva, con discreta probabilità, facesse danni un po' dovunque sull'intero territorio: in modo particolare in due grandi città come Roma e Napoli. La Protezione Civile ha allertato amministratori e cittadini. L'uragano è passato. Le ferite sono state lievi; le città ne hanno risentito poco o niente. E, come spesso accade in queste circostanze, il giorno dopo lo scampato pericolo si è da più parti ironizzato sull'esagerato allarme trasformatosi in allarmismo. Dimenticando in tal modo le vittime e i danni di situazioni, anche del recente passato, nelle quali non c'era stato allarme o, peggio, non se ne era tenuto conto. Dunque, bene ha fatto la Protezione Civile ad allertare amministratori e cittadini sulla probabilità di un rischio meteorologico. In questi casi, come scrive Gasparini nel suo articolo in questo numero, «si tratta sempre e solo di probabilità ed è possibile che si verifichi l'evento di probabilità minore

o che le misure prese si rivelino eccessive». Poco male. L'importante è che si sia pronti con le difese idonee. Questa si chiama cultura del rischio.

Il problema resta sempre il modo in cui comunicare e informare con l'obiettivo se non di dare certezze di limitare il più possibile equivoci e incertezze. Cioè dare conoscenze e consapevolezza.

«Scordatevi gli oroscopi, che sono un intollerabile avanzo di Medioevo infiltrato in mezzi che dovrebbero occuparsi di informazione». Ha scritto Marco Cattaneo nell'editoriale (*Scienza e prevenzione*) al numero di ottobre 2012 di *Le Scienze*. «E, per il momento, scordatevi la possibilità di prevedere i terremoti, l'evoluzione precisa del meteo o l'eventualità che una persona si ammali

di una specifica malattia. Sono problemi complessi, nel senso scientifico del termine, e non disponiamo ancora né di modelli sufficientemente precisi né della potenza di calcolo idonea per risolvere equazioni che comporterebbero un numero spaventoso di variabili. Ammesso che potremo mai riuscirci».

Forse si riuscirà a disporre di tutto questo. È probabile. Ma è incerto e non prevedibile il quando. Ma si ha fiducia che accada perché, come conclude Cattaneo, «la scienza è la più spettacolare avventura che abbiamo mai intrapreso. E lo strumento più credibile a cui affidarci per progettare il nostro futuro».



Probabilità e rischio

Pasquale Erto, Massimiliano Giorgio, Iunio Iervolino

Nella gestione del rischio oltre alla sua valutazione è necessario sviluppare strategie decisionali per governarlo. Esiste uno stretto legame tra lo stato di conoscenza del valutatore e le sue possibili valutazioni che saranno tanto più corrette quanto più correttamente incorporeranno tutte le informazioni disponibili. Conoscenza, probabilità, perdite, sono le parole chiave per un approccio allo stato dell'arte alla valutazione e gestione dei rischi.

Fenomeni naturali, probabilità e perdita

Per esperimento casuale s'intende, nel gergo scientifico, ogni operazione, attività, o *fenomeno* il cui esito non può essere previsto con certezza. Esempio classico è il lancio di una moneta, il cui esito (i.e., testa o croce) è incerto per antonomasia. Lo stesso concetto di esperimento casuale (in senso lato) si applica anche nel caso ci si riferisca all'osservazione di un fenomeno naturale, il cui esito rimarrà incerto fintanto che il fenomeno non si sarà manifestato. Si pensi ad esempio alle condizioni meteo che interesseranno il luogo in cui ci troveremo alle ore diciassette in punto del prossimo lunedì. Nella quasi totalità dei casi in cui è incerto l'esito, incerta è anche la perdita (i.e., le conseguenze, potenzialmente avverse) che l'esperimento può produrre, sia perché la perdita di norma dipende dall'esito, sia perché sovente non è possibile associare un valore certo della perdita a ognuno dei possibili esiti. La mancanza di conoscenza *completa* sui meccanismi che regolano l'esperimento e sulle esatte condizioni in cui si svolge, nonché la mancanza di conoscenza del valore *esatto* delle perdite che gli esiti dello stesso possono produrre, non permettono di conoscere a priori nessun possibile esito e nessun possibile livello di perdita. Infatti, sia l'uno sia l'altro (eventualmente entrambi) posso-

no cambiare se si ripete l'esperimento in condizioni *nominalmente* identiche (i.e., non distinguibili agli occhi dello sperimentatore).

È evidente come sia importante riuscire a trattare questo tipo d'incertezza. Il calcolo delle probabilità fornisce gli strumenti che permettono di utilizzare tutte le conoscenze (anche se incomplete) di cui si dispone per esprimere in maniera coerente la probabilità che lo stesso dia luogo a un dato esito (o più in generale che accada un dato evento¹) piuttosto che a un altro. Ancor meglio, dal punto di vista della valutazione del rischio, gli strumenti matematici del calcolo delle probabilità possono essere utilizzati per esprimere direttamente la probabilità che l'esperimento/fenomeno considerato produca un dato valore della perdita.

Valutazione del rischio: la perdita attesa

In condizioni d'*incertezza*, identificati tutti i possibili (diciamo n) valori, L_i , che può assumere la perdita (prodotta dall'esperimento) e definita la probabilità $P[L_i]$ di osservare ciascuno di essi, è possibile effettuare una valutazione

¹ Un evento è per definizione un'asserzione logica che in tutta coscienza non possiamo definire né *vera* né *falsa*, bensì solo *possibile*. In generale solo i fatti successivi possono affermare o smentire un evento formulato in precedenza. Per non confondere fatti con eventi notiamo che un evento ammette la sua negazione mentre un fatto no.

quantitativa del rischio tramite la (1), che restituisce la cosiddetta *perdita attesa*, $E[L]$ (dall'inglese *Expected Loss*), cioè la media pesata di tutti i possibili valori della perdita che un esperimento d'interesse può produrre. Come evidenziato nella (1), il peso da attribuire a ciascun valore della perdita è la *probabilità* della stessa.

$$\text{Rischio} = E[L] = \sum_{i=1}^n L_i \cdot P[L_i] \quad (1)$$

Valutare il rischio in termini di perdita attesa è estremamente utile per due motivi: il primo è che consente di armonizzare e trattare in modo coerente il complesso delle informazioni possedute da chi esegue la valutazione; il secondo è che consente di confrontare rischi di natura del tutto diversa, esprimendoli in termini dell'unità di misura (ad esempio euro) utilizzata per misurare il valore della perdita. Quest'ultima caratteristica è essenziale per stabilire strategie di gestione dei rischi. Ad esempio: supponiamo ci si trovi nel caso in cui si sia appena verificato uno sciame sismico² di moderata intensità in una zona vicina a un sito d'interesse, e supponiamo ancora che chi è preposto alla valutazione del rischio ritenga che tale sciame possa determinare l'occorrenza di un terremoto forte di qui a sei mesi³ con probabilità 0,01. Assegnata tale probabilità, e assunto che la perdita prodotta dall'eventuale terremoto corrisponda a un miliardo di euro, mentre la perdita stessa sia nulla nel caso esso non si manifesti, utilizzando la relazione (1) si ottiene per il rischio il valore nell'equazione (2).

$$\text{Rischio} = E[L] = (0 \text{ €}) \cdot 0,99 + (1 \cdot 10^9 \text{ €}) \cdot 0,01 = 1 \cdot 10^7 \text{ €} \quad (2)$$

Si noti che il rischio così ottenuto, pur essendo espresso in euro, non coincide con il valore che la perdita assumerà. Infatti, il rischio definito dalla (1) non deve interpretarsi come il valore effettivo della perdita che ci si deve aspettare di osservare; piuttosto è da intendersi come il valore cui tenderà la media aritmetica delle perdite realmente osservate in un numero grandissimo di situazioni nominalmente identiche.

Perdita attesa e decisioni ottime

Per completare il processo di gestione del rischio, oltre alla valutazione dello stesso è necessario sviluppare delle strategie decisionali per governarlo, ovvero strategie che permettono di individuare qual è l'azione (A^*), tra quelle disponibili ($A_i, i = 1, 2, \dots, l$), che è *conveniente* intraprendere per minimizzare la perdita che potrebbe essere prodotta dall'esperimento casuale di interesse. A tal fine, torna utile la definizione di rischio (1). Infatti, appare naturale definire quale *decisione*, D , *ottima*, quella che tra tutte le possibili azioni, ci porta a scegliere l'azione A^* cui corrisponde la perdita attesa, $E[L | A^*]$, più piccola: equazione (3).

$$D(A^*) \text{ è ottima} \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} E[L | A^*] \leq E[L | A_i] \quad \forall i = 0, 1, \dots, l \quad (3)$$

2 Una serie di piccoli terremoti concentrati nel tempo e nello spazio, in modo possibilmente atipico rispetto alla sismicità normale.

3 Tempo oltre il quale, si assume, non ci può più essere relazione causale tra sciame e un terremoto forte.

Si noti che tra le azioni disponibili si deve sempre ritenere compresa anche l'azione, A_0 , che prevede di non intraprendere alcuna iniziativa. Per fissare le idee, si supponga, in riferimento all'esempio precedente, che coloro i quali siano preposti alla gestione del rischio debbano decidere quale sia l'azione migliore tra le seguenti azioni alternative possibili: (A_0) non intraprendere alcuna azione mitigatrice; (A_1) non evacuare il sito, ma predisporre un piano di protezione civile rafforzato per il periodo in cui si teme che il terremoto possa seguire lo sciame, al fine di fronteggiare meglio la possibile emergenza; (A_2) evacuare il sito per sei mesi. Si assuma che delocalizzare l'intero sito per sei mesi (A_2) costi cinquecento milioni di euro e che tale azione azzeri la perdita in caso di terremoto. Si assuma invece che l'azione A_1 costi dodici milioni di euro, ma che consenta solo di dimezzare la perdita in caso di terremoto. Le perdite attese sono calcolate nella (4), in cui il costo dell'azione intrapresa è ovviamente una perdita certa.

Nel caso dell'esempio, se non fosse intrapresa alcuna azione mitigatrice la perdita attesa, $E[L | A_0]$, ammonterebbe a dieci milioni di euro (2). La perdita attesa nel caso si evacui, $E[L | A_2]$, è pari a quasi mezzo miliardo di euro, mentre il piano rafforzato la riduce a circa diciassette milioni, $E[L | A_1]$. È evidente che in questo caso (del tutto accademico e senza riferimenti reali) la decisione ottima sia quella di non intraprendere alcuna azione mitigatrice.

$$\begin{cases} E[L | A_0] = (0 \text{ €}) \cdot 0,99 + (1 \cdot 10^9 \text{ €}) \cdot 0,01 \text{ €} = 1 \cdot 10^7 \text{ €} \\ E[L | A_1] = 12 \cdot 10^6 \text{ €} + (0 \text{ €}) \cdot 0,99 + (5 \cdot 10^8 \text{ €}) \cdot 0,01 = 1,7 \cdot 10^7 \text{ €} \\ E[L | A_2] = 5 \cdot 10^8 \text{ €} + (0 \text{ €}) \cdot 0,99 + (0 \text{ €}) \cdot 0,01 = 50 \cdot 10^7 \text{ €} \end{cases} \quad (4)$$

Naturalmente, per utilizzare l'approccio discusso è essenziale definire i *pesi* che sono utilizzati nel calcolare la perdita attesa, cioè le probabilità $P[L_i]$. Nel paragrafo successivo sono discussi gli approcci e gli strumenti matematici che i valutatori possono utilizzare per produrre misure coerenti di dette probabilità, utilizzando tutti i dati e le conoscenze in proprio possesso che, insieme al dimensionamento delle perdite potenziali, costituisce la responsabilità che ricade su chi si cimenta in tali analisi probabilistiche.

Definizione di probabilità e criteri di calcolo tradizionali

Secondo l'approccio ormai consolidato e universalmente condiviso, il calcolo delle probabilità è una scienza matematica che deve essere sviluppata a partire dai postulati (i.e., regole di coerenza) che la governano (Andrei Nikolaevich Kolmogorov, 1903-1987). I postulati sono dettati senza discuterne il significato pratico; quindi da essi si ricavano tutte le ulteriori regole di calcolo (i.e., teoremi). Secondo tale moderno approccio, il concetto stesso di probabilità è un concetto primitivo e tutti i criteri che il valutatore deciderà di utilizzare per misurare la probabilità saranno da considerare matematicamente legittimi a patto che le valutazioni prodotte rispettino le regole di coerenza dettate.

Vale la pena rilevare che una valutazione matematicamente legittima potrebbe comunque non avere validità pratica qualora il valutatore non si facesse carico, nell'esprimerla, della responsabilità di utilizzare tutte le informazioni di cui effet-

tivamente dispone. In effetti, dal punto di vista operativo, giova riconoscere l'esistenza di una conseguente responsabilità⁴ che grava su chi valuta una probabilità, in maniera del tutto simile a quanto capita in qualsiasi altro ambito professionale o scientifico. Una costruzione civile [una probabilità] calcolata seguendo correttamente i dettami della tecnica delle costruzioni [del calcolo delle probabilità] può essere non correttamente progettata, per gli scopi cui è destinata, se nel calcolarla si è ommesso di considerare l'esistenza di una causa sollecitante possibile come quella sismica [un elemento di conoscenza essenziale in relazione all'esperimento casuale]. La responsabilità, connessa con ogni valutazione di probabilità, deve indurre a rifiutare ogni arbitrio nell'analisi e nell'uso delle conoscenze disponibili al momento del calcolo.

Solo motivi di opportunità, valutazioni professionali, conoscenze soggettive, ecc., fanno decidere quale debba essere il criterio da adottare per formulare una probabilità. Nello stesso tempo, come già accennato sopra, le regole matematiche che è necessario seguire nulla dicono circa il criterio di formulazione da scegliere, ma semplicemente guidano al fine di sviluppare coerentemente il calcolo deduttivo necessario per arrivare a valutare i rischi. Ciò crea le premesse sia per realizzare un'effettiva pratica utilità delle valutazioni probabilistiche prodotte sia per ottenere il consenso di altre persone interessate agli stessi quesiti cui si riferiscono dette valutazioni.

Nemmeno le situazioni in cui tutti operano le stesse scelte di calcolo (diventate pertanto consuete) ci sottraggono all'ob-

bligo di *rendere comunque esplicite le ipotesi adottate*. Infatti, ciò è necessario affinché non sia preclusa, inconsapevolmente, la strada per ulteriori affinamenti di calcolo, qualora essi fossero utili, o addirittura indispensabili, a seguito di una non più confermabile adeguatezza delle nostre ipotesi originarie a fronte di *eventuali ulteriori informazioni venute in nostro possesso*.

È tuttavia utile individuare alcune situazioni tipiche che danno origine a calcoli consueti e che in passato hanno suggerito altrettante definizioni di probabilità.

Definizione classica

Tale definizione (formalizzata da Pierre Simon Laplace, 1749-1827) fa riferimento al caso di un esperimento che può avere N possibili esiti diversi, incompatibili tra loro (l'accadimento di uno implica che non possano essersi verificati gli altri) e tutti egualmente possibili. In tale contesto, assunto che N_A di tali esiti fanno verificare l'evento A , allora la probabilità di A , $P[A]$, viene definita mediante l'equazione (5).

$$P[A] = N_A / N \quad (5)$$

Si noti che, pur essendo fondata su di un criterio di calcolo valido nella specifica situazione suddetta, è evidente che la (5) non può essere accettata come definizione perché come tale sarebbe *circolare*. Infatti, nella dizione *egualmente possibili* essa utilizza implicitamente il concetto di probabilità prima ancora di definirlo. Inoltre, il criterio classico non è applicabile se gli esiti dell'esperimento sono virtualmente infiniti e/o non equiprobabili (ad esempio, i millimetri d'acqua che cadranno in un certo luogo al prossimo temporale).

Definizione frequentista

Una seconda definizione di probabilità, che supera alcuni dei limiti che caratterizzano quella classica, è quella frequentista

⁴ Non ci dobbiamo illudere: il calcolo deduttivo di una probabilità secondo regole matematiche costituisce un risultato scientifico inconfutabile; tuttavia, accettare l'adeguatezza del risultato a una ben determinata realtà fisica costituisce comunque una nostra scelta, di cui non possiamo disconoscere la paternità e la conseguente responsabilità.

(Richard Von Mises, 1883-1953). Questa, assunto che un esperimento possa essere replicato un numero n illimitato di volte, in condizioni, di replica in replica, nominalmente (i.e., macroscopicamente) identiche, definisce la probabilità attraverso il limite di cui alla (6),

$$P[B] = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n_B}{n} \quad (6)$$

dove n_B è il numero di repliche in cui si è verificato l'evento B . Anche la (6), pur suggerendo un criterio di calcolo valido nella situazione considerata, è ben lungi dal potere essere considerata una vera e propria definizione: infatti nessuno è in grado di assicurarci che il limite considerato esista e ancora, qualora esista, nessuno può assicurarci che esso coincida con quello che in effetti s'intende misurare, ovvero la probabilità di B , la cui esistenza rappresenta essa stessa un atto di fede. Inoltre, anche questa definizione non ha valenza generale, perché presuppone la ripetibilità dell'esperimento che non è sempre possibile (si pensi a eventi naturali molto rari come eruzioni o terremoti d'intensità possibile ma mai ancora osservata) e, in certi casi, non è nemmeno concepibile (come, ad esempio, quando si tratta del successo di una missione spaziale "unica" oppure delle complicanze conseguenti a un intervento chirurgico innovativo). Infine, anche assunto che l'esperimento si possa replicare, andrebbe comunque chiarito cosa s'intende quando si dice che le condizioni di prova sono nominalmente identiche, concetto da giudicare almeno vago, considerato che le differenti repliche producono di norma esiti differenti proprio perché lo sperimentatore non è in grado di controllare il valore o l'effetto di tutti i fattori che influenzano il risultato.

Definizione soggettivista

Essendo ormai per molti chiaro che le due precedenti definizioni di probabilità sono permeate da una forte componen-

te di soggettività (*l'egualmente possibili* nelle definizioni classica, e l'esistenza del limite e il suo coincidere con la probabilità nel caso frequentista), una terza corrente di pensiero ha sviluppato una definizione di probabilità incentrata totalmente sul concetto di probabilità come *grado di fiducia*, senza presupporre particolari precisazioni ulteriori rispetto a questa definizione.

Per comprendere la definizione soggettivista, può essere utile pensare a un'ipotesica scommessa in cui si è pronti a puntare la somma a che un esperimento dimostrerà che l'evento E è vero (i.e., si verificherà) contro la somma b che dimostrerà che E è falso (i.e., non si verificherà). In tale situazione è coerente formulare, quale *valutazione soggettiva* della probabilità di E , il seguente rapporto (7).

$$P[E] = a / (a + b) \quad (7)$$

Sulla base di questo schema delle scommesse (e fissando $a + b = 1$, cioè la probabilità dell'evento formato da tutti i possibili esiti alternativi dell'esperimento), Bruno de Finetti (1906-1985) introdusse sin dagli anni trenta la più generale e operativa definizione di Probabilità. Il ricorso a uno schema logico ideale evita di definire la probabilità mediante uno dei suoi metodi di valutazione. Inoltre, induce le parti interessate a compiere ogni sforzo affinché siano minimizzati i rischi connessi con la valutazione proposta (cioè a utilizzare tutte le conoscenze sul fenomeno), ivi inclusi i rischi di chi veste i panni del banco il quale deve essere d'accordo a scommettere $1 - P[E]$ per ricevere l'unità del capitale nel caso E non si verifichi⁵. In effetti, come notato dal punto di vista concettuale è molto utile approfondire

5 Gli aspetti operativi e di coerenza di questa definizione sono evidenti e richiamano i contenuti di quella saggia regola contadina la quale, essendo necessario dividere un fondo tra due persone, prescriveva che una procedesse alla divisione e l'altra alla scelta.

il significato dell'ultimo esempio. Supponiamo che il valore (o prezzo) che consideriamo giusto per un certo bene sia $a + b$ euro. Se ci offrissero di trasferirci la proprietà del bene a condizione che si verifichi l'evento E , è ovvio che non saremmo più disposti a pagare $a + b$ euro, ma un prezzo inferiore, diciamo a , tanto più vicino a $a + b$ quanto più fossimo fiduciosi nel verificarsi di E , e tanto più vicino a zero quanto più fossimo convinti del contrario. Il rapporto definito tramite la (7) può essere assunto come misura della probabilità $P[E]$.

Probabilità, stato di conoscenza e teorema di Bayes

Come evidenziato, ogni valutazione di probabilità è da considerarsi condizionata da tutte le conoscenze che il valutatore possiede nel momento in cui la formula. Ne deriva che se cambiano le sue conoscenze devono essere ripetute, di conseguenza, anche le sue valutazioni. Ovviamente il problema per il valutatore è quello di rivedere i propri calcoli in maniera coerente, e in particolare in maniera che i risultati non confliggano con le valutazioni che aveva prodotto sulla base delle informazioni pregresse. Allo scopo torna utile l'uso del teorema di Bayes, che codifica in termini matematici la strategia da utilizzare per operare correttamente tale aggiornamento/revisione.

Qui di seguito, introdurremo, attraverso un esempio, l'espressione di tale teorema, al fine di mostrarne le potenzialità e dare evidenza delle sue implicazioni. In particolare, riprendendo l'esempio del primo paragrafo, vedremo come il teorema di Bayes permetta di valutare la probabilità (in detto esempio posta pari a 0,01) che un terremoto (T) forte segua entro sei mesi lo sciame sismico (S) effettivamente osservato. A tal fine si supponga che, su base storica, la probabilità di osservare, nell'arco di sei mesi, un terremoto nella regione d'interesse sia l'uno per mille (questa probabilità è valutata a prescindere dal fatto che sia stato o meno stato osservato uno sciame prima del terremoto). Ancora, si assuma che analisi storiche ci dicano anche che il 40% delle volte in cui si è verificato un terremoto forte nella regione esso è stato preceduto da uno sciame. Inoltre, che nel 4% dei casi in cui non è avvenuto alcun terremoto è stato comunque registrato uno sciame sismico. Sulla base di tali informazioni sono state formulate le probabilità in (8), dove la barra verticale (quando presente) indica che nel valutarle si è assunto che è avvenuto l'evento a destra della stessa (*evento condizionante*).

$$P[T] = 0,001; P[S | T] = 0,4; P[S | \bar{T}] = 0,04 \quad (8)$$

Assegnate tali probabilità, assunto che si sia verificato uno sciame sismico, possiamo calcolare la probabilità, $P[T | S]$, che lo sciame osservato prelude a un terremoto forte, attraverso il teorema di Bayes, come da equazione (9).

$$\begin{aligned} P[T|S] &= \frac{P[T \cap S]}{P[S]} = \frac{P[\text{Si verifichi sia lo sciame sia il terremoto forte}]}{P[\text{Si osservi lo sciame}]} = \\ &= \frac{P[S|T] \cdot P[T]}{P[S|T] \cdot P[T] + P[S|\bar{T}] \cdot (1 - P[T])} = \frac{0,4 \cdot 0,001}{0,4 \cdot 0,001 + 0,04 \cdot 0,999} = 0,01 \end{aligned} \quad (9)$$

Come si vede, sulla base della sola aggiunta d'informazione che ci sia stato uno sciame, la probabilità che ci sia un terremoto in atto, $P[T | S]$, è aumentata di

dieci volte⁶ rispetto a quella attribuita sulla base dei soli dati storici (i.e., $P[T]$). In realtà, si può immaginare che se fossero disponibili informazioni relative ad altri precursori affidabili la valutazione della probabilità di un terremoto potrebbe essere ulteriormente affinata, utilizzando ancora una volta il teorema di Bayes. Sulla scorta di questa riflessione è possibile anche dedurre che il calcolo delle probabilità non è per nulla in contraddizione col determinismo. Infatti, esso è compatibile con un punto di vista secondo cui, con l'aumentare della conoscenza sul fenomeno (i.e., sui suoi meccanismi e sui fattori che lo determinano), il risultato dell'esperimento tende a divenire certo.

Generalizzando, si potrebbe dire che è logico ritenere che le migliori valutazioni possono essere prodotte solo da chi conosce meglio il fenomeno (e il calcolo delle probabilità). Questo è il motivo, in effetti, per cui le valutazioni di pericolosità (i.e., probabilità di occorrenza di eventi pericolosi) e dei rischi associati si chiedono di norma agli *esperti*, intendendo con questo termine, proprio quelli che sono in grado di ridurre al minimo l'incertezza sul fenomeno in esame, avendolo studiato *più di tutti*.

Conclusioni

Si è messo in evidenza il legame indissolubile che esiste tra lo stato di conoscenza del valutatore e le valutazioni che questi produce. In particolare, quando si afferma che la valutazione di una probabilità è sostanzialmente soggettiva non s'intende dire che essa può essere for-

6 Tuttavia, tale probabilità potrebbe essere ritenuta ancora bassa. In effetti, l'esempio nel primo paragrafo mostra che, nonostante tale aumento, è sconveniente intraprendere un'azione mitigatrice, se i valori delle probabilità e delle perdite fossero effettivamente quelli assegnati.

mulata in maniera arbitraria, ma piuttosto per sottolineare la responsabilità che cade sul valutatore di produrre una valutazione che incorpori in maniera coerente tutte le informazioni di cui effettivamente dispone. Ciò significa che le stime di probabilità sono da considerarsi corrette se e solo se incorporano correttamente tutte le informazioni disponibili. Quest'aspetto richiede una riflessione attenta; infatti, esso prevede implicitamente che le stime dei rischi cambino in ragione del livello d'informazione del valutatore, e ancora che la validità delle stesse decada in caso di acquisizione di conoscenze ulteriori e/o all'occorrenza dell'evento d'interesse.

Si è visto pure come sia opportuno esprimere i rischi in termini delle perdite che l'esperimento/fenomeno può produrre e delle probabilità associate. Solo la valutazione delle conseguenze, infatti, può rendere comparabili decisioni per la gestione dei rischi e confrontabili rischi diversi. Da qui scaturisce la possibilità di indirizzare, nel modo ottimo (secondo un criterio di utilità) le risorse per la mitigazione dei rischi. A tale proposito sono stati discussi brevemente i concetti di *perdita attesa* e *decisione ottima*. In conclusione, conoscenza, probabilità, perdite, sono le parole chiave per un approccio allo stato dell'arte alla valutazione e gestione dei rischi.

Bibliografia

- Benjamin J.R., Cornell C.A. (1970) *Probability, statistics and decision for civil engineers*, McGraw-Hill.
- de Finetti B. (1990) *Theory of probability: a critical introductory treatment*, John Wiley & Sons.
- Erto P. (2008) *Probabilità e statistica per le scienze e l'ingegneria*, terza edizione, McGraw-Hill.
- Grandori G., Guagenti E. (2012) *Rischio sismico. Decidere in condizioni di incertezza*, McGraw-Hill.
- Mood A.F., Graybill M.A., Boes D.C. (1974) *Introduction to the theory of statistics*, terza edizione, McGraw-Hill.

Probabilmente

Guido Trombetti

La probabilità è un numero compreso tra 0 e 1 che si applica ad un insieme di eventi. Un ampio inventario di eventi dai dadi alla roulette, al lotto, persino al calcio, mostra se e quanto può incidere il caso.

Forse niente è più scivoloso dei concetti del calcolo delle probabilità. Vanno maneggiati con estrema cura. In fondo sono concetti che ognuno usa tutti i giorni. Anche per prendere le decisioni più banali. Intanto che cosa è la probabilità? È un numero compreso tra 0 ed 1. A che cosa si applica la probabilità? Ad un insieme di eventi. Per intenderci pensiamo ad un comune dado. Con le facce numerate da 1 a 6. Perfettamente bilanciato. Cioè non truccato. Per evento intendiamo ogni situazione che sia riferita ad un lancio del dado. “Esce 3” è un evento. “Esce un numero pari” è un evento. “Esce un numero più grande di 2” è ancora un evento. Chiunque risponderebbe che la probabilità dell’evento “esce 3” è $1/6$. Mentre quella dell’evento “esce un numero pari” è $3/6$. Così quella dell’evento “esce un numero più grande di 2” è $4/6$. Se un evento ha probabilità 0 si parla di “evento impossibile”. Se ha probabilità 1 di “evento certo”. Per esempio ognuno degli eventi “esce un numero più grande di 8” o “esce il numero $5/7$ ” è un evento impossibile. Ha probabilità 0. Così come gli eventi “non esce un numero più grande di 8” o “esce un numero positivo” sono eventi certi. Ognuno di essi ha probabilità 1. E finché si gioca con i dadi tutto è facile. Quasi ovvio. Eppure le nozioni di evento impossibile e di evento certo possono diventare insidiose. Sul piano semantico addirittura

paradossali. Un evento certo non è detto che si verifichi certamente! Così come un evento impossibile potrebbe verificarsi! Per intenderci facciamo un esempio. Pensiamo ad un bidone con base circolare. E pensiamo che l’area del cerchio di base sia 1. Lanciamo a caso nel bidone una pallina tanto piccola da poter essere assimilata ad un punto. Qual è la probabilità che la pallina si fermi in una determinata regione A del cerchio? È più che ragionevole assegnare ad un evento di questo tipo la probabilità “area di A”. Più grande è A più grande sarà la probabilità che la pallina si fermi in A. Adesso fissiamo un singolo punto P nel cerchio di base del cilindro. Qual è la probabilità dell’evento “la pallina si ferma in P”? Poiché l’area di un punto è 0 la probabilità dell’evento è 0. Cioè si tratta di un evento impossibile. Eppure potrebbe verificarsi che la pallina si fermi proprio in P. Anche perché la pallina in qualche punto è pur vero che si fermerà. Così la probabilità dell’evento “la pallina si ferma in un punto del cerchio diverso da P” è 1. Perché l’area del cerchio privato di un punto è uguale all’area del cerchio e cioè vale 1. Quindi l’evento “la pallina si ferma in un punto del cerchio diverso da P” è un evento certo... che ovviamente non è certo che si verifichi.

È chiaro che dal punto di vista del giocatore d’azzardo l’evento “la pallina si ferma in un punto del cerchio diverso da P” merita qualunque scommessa. Sal-

vo poi ad imprecare al destino cinico e baro.

Lasciamo i dadi e passiamo al lancio di una moneta. Per parlare di una delle leggi più citate e forse meno comprese del calcolo delle probabilità.

La “legge dei grandi numeri” (Jakob Bernoulli, *Ars Conjectandi*, 1713): in una serie di prove ripetute nelle medesime condizioni, al crescere del numero delle prove, la percentuale dei casi in cui si verifica un evento (ad esempio l’evento “esce testa”) “tende” a coincidere con la probabilità dell’evento stesso.

Cioè lanciando un gran numero di volte la moneta la percentuale dei casi in cui esce testa “tende” ad essere il 50%.

Riflettiamo un attimo. Vogliamo lanciare una moneta 100 volte. Se nei primi 60 lanci esce croce la legge dei grandi numeri non dice che nei successivi 40 lanci è più probabile che esca testa. La moneta “non ha memoria dei casi precedenti”. Al sessantunesimo lancio la probabilità che esca testa continua ad essere il 50%. Così come al sessantaduesimo... La legge dei grandi numeri indica un comportamento asintotico che non influenza l’esito della singola prova. C’è la possibilità che nei successivi 40 lanci si bilanci un po’ la bizzarra sequenza “60 volte croce”? Ovviamente sì. Ma non vi è alcuna regolarità certa cui potersi riferire. Colui il quale ne immaginasse una per scommettere sconsideratamente andrebbe in rovina. Come tanti che, interpretando la legge in modo allegro, si sono ostinati a giocare al raddoppio sui ritardi.

Per finire un caso che può apparire paradossale.

Se per mille lanci consecutivi esce testa posso mai credere che la probabilità che esca testa ancora al milleunesimo lancio sia il 50%? In un caso del genere probabilmente il grande Bruno De Finetti avrebbe invocato il concetto di “probabilità soggettiva”. Concludendo: è molto ragionevole pensare che la mo-

neta sia truccata. E che quindi al lancio successivo esca ancora testa.

Quando si parla di probabilità non si può non pensare al gioco d’azzardo. E quindi alla roulette. La roulette è, nell’immaginario collettivo, l’emblema del rischio. Capace di stregare anche persone di straordinaria qualità. Eppure è tra i giochi d’azzardo più “equi”. Non c’è confronto, ad esempio, tra l’onestà della roulette e quella del “lotto”. Ma cosa significa che un gioco è “equo”? Scommetto S. Incasso I (cioè guadagno I - S) se si verifica un certo evento (esce il rosso, esce un numero tra 1 e 12, esce il 27, ecc.). Meno l’evento è probabile più rischio, più devo incassare. Il gioco è “equo” se vi è una proporzione “equa” tra la scommessa e l’incasso. Cioè se S diviso per I è uguale alla probabilità P che l’evento si verifichi. In sintesi il gioco è equo se $S/I = P$. Pensiamo di giocare una fiche sul rosso. Nel caso esca rosso incasseremo due fiche. Quindi $S = 1$ e $I = 2$. D’altro canto nella roulette vi sono 37 numeri di cui 18 rossi e 18 neri. Vi è poi lo zero. Se esce vince il banco. Quindi la probabilità di vittoria è data (casi favorevoli diviso casi possibili) da $18/37$ e cioè, arrotondando, 0,4865. Mentre $S/I = 1/2 = 0,5$. Quindi il gioco non è equo perché 0,4865 è più piccolo di 0,5. Quale sarebbe l’incasso “giusto” a fronte della scommessa di una fiche? Basta risolvere l’equazioncina di primo grado (solito quaderno a quadretti della scuola media) $1/I = 0,4865$ e si trova $I = 2,0542$. Poiché si incassano solo 2 (e non 2,0542) fiche si ha che l’incasso è il 97,3% del “giusto”. Questa percentuale è detta **rendimento**. Rimane fissa, nel caso della roulette, per ogni puntata ordinaria. Un gioco equo ha un rendimento del 100%. Lo scarto del 2,7% è detto **tassa dello zero**. Lo zero, infatti, crea l’“iniquità” a favore del banco. Chi organizza (e cioè il casino) deve pur guadagnare! Analogamente se punto 1 fiche su un numero ed il numero esce ne

incasso 36. Non ci vuole molto per capire che l'incasso equo dovrebbe essere di 37. E 36 è circa il 97,3% di 37. Chi ne ha voglia può facilmente calcolare che l'estratto semplice nel lotto ha un **rendimento** al di sotto del 65% (assumiamo si incassi 11 volte la posta). Si capisce allora che la roulette è "quasi equa". In una serata il vantaggio del banco è minimo. Addirittura trascurabile. Ma sui tempi lunghi c'è poco da sperare. Un esempio estremo. Si parte dalla cifra di cui dispone il giocatore, dalla vincita che spera di realizzare e dalla tattica di gioco che vuole usare. Il giocatore possiede 200 fiche. Giocandone sul rosso una a puntata ne vuole incassare due. Cioè incrementare di una fiche il suo capitale. Appena è in vantaggio di una fiche si ritira. Immaginate un signore che se esce rosso fa un passo avanti altrimenti fa un passo indietro (**passeggiata casuale**). Ed appena si trova un passo avanti al punto di partenza ha vinto. Se il gioco fosse equo mediamente il signore avanzerebbe di zero passi. Uno avanti ed uno indietro. Poiché c'è da pagare la tassa sullo zero che è del 2,7%, in media arretrerà di "0,027 passi". In realtà ci saranno sequenze consecutive di rossi e di neri. Che so, 3 neri, 2 rossi, 1 nero, 4 rossi... Ed è estremamente probabile che il signore si trovi, in un determinato istante, un passo avanti (ha vinto la sua fiche) ben prima di trovarsi 200 passi indietro (ha perso tutto il capitale). Il tizio, però, non si accontenta di vincere 1 fiche. E pensa di ripetere il giochetto per 200 sere sperando di possederne alla fine 400. Se la probabilità che il trucco funzioni una sera è p (mettiamo anche il 99%) qual è la probabilità che funzioni per 200 sere? È molto interessante calcolare la probabilità che il giocatore perda l'intero capitale giocando indefinitamente (che nel concreto significa per moltissime sere). Che si verifichi, cioè, l'evento noto quale **rovina del giocatore**. A tal proposito vale una formula

che dà la **probabilità di rovina** (e cioè di perdere tutto prima di aver raggiunto l'obiettivo). La scrivo perché è carina. Nessuno si senta obbligato a leggerla. P è la probabilità di vincere un singolo colpo. Q (cioè $1 - P$) quella di perdere. Indichiamo Q/P con A . La probabilità di rovina (per un gioco non equo) è data da $(A^h - A^x)/(1 - A^x)$. Nel caso di capitale iniziale 10 con obiettivo finale 20 il giocatore va in bancarotta con probabilità circa 0,608. Se l'obiettivo è 40 la probabilità di rovina cresce circa allo 0,907. Se vuol vincere 200 partendo da 200... è matto! (Anche con un gioco equo ci si può rovinare e la probabilità è $1 - h/x$). Sia chiaro. Non si può ridurre il fenomeno del gioco d'azzardo a formule. Troppi gli elementi emotivi e psicologici in campo. Si pensi soltanto alle pagine o, forse ancor più alla vita, di Dostoevskij. Mi torna anche alla mente un'intervista a Vittorio De Sica. Il grande regista parlava di sé. Del suo cinema. Raccontava di aver girato qualche film "brutto" perché oppresso dai debiti di gioco. Perché? Questa, come la ricordo, la sua spiegazione: «Le motivazioni che spingono al gioco le può comprendere solo chi le avverte. Cioè un giocatore. Tutto dipende dal magico piacere di sentirsi sempre vicino alla fortuna senza riuscire ad afferrarla mai». Tutto ciò ben sanno i padroni dei casino. Anche senza aver studiato la probabilità né letto Dostoevskij. In conclusione comunque: è possibile arricchirsi con la roulette? Sì, certamente... acquistando un casino. Una curiosità. Probabilità e statistica si affacciano anche in ambiti in cui sembrava impossibile potessero intervenire. Come ad esempio nel calcio. Se nel basket il gioco delle squadre e dei singoli giocatori è abitualmente quantificato da una serie di dati, nel calcio di solito non si va molto al di là del numero di goal segnati. Si potrebbe pensare, del resto, che in uno sport dove un singolo tiro in porta azzecato può rovesciare una

partita in cui la squadra avversaria aveva dominato per un'ora e mezzo senza mai segnare, le statistiche significano poco. E invece qualche tempo fa G.K. Skinner e G.H. Freeman, ricercatori dell'Università del Maryland, hanno pubblicato su *Journal of applied statistics* un articolo dal titolo *Soccer matches as experiments: how often does the 'best' team win?*. Gli autori effettuano un'accurata analisi statistica. E concludono che in un torneo la probabilità che non vinca la squadra più forte è del 78%. Quindi: il calcio è quasi una tombola! Anatema! Anatema! Gridano gli appassionati. Che senso ha più parlare di tattiche o di tocco di palla, di diagonali o di capacità di saltare l'uomo se poi molto spesso chi vince è più scarso? Ovviamente non entro nei dettagli dell'"approccio bayesiano" utilizzato nell'articolo. Dico soltanto che uno dei nodi sta nel fatto che i risultati non sono regolati dalla "proprietà transitiva". Cioè se la squadra A batte la squadra B e la squadra B batte la C non è detto che la C batta la A. Secondo i due studiosi per rimediare occorre cambiare le regole. Ad esempio far proseguire un match fino a che una delle due squadre non abbia un vantaggio di due o tre reti.

A questo punto il matematico lascia il campo all'appassionato. E ripete quando già scritto. Il calcio. Le tattiche. Il 4-3-3. Il 3-4-2-1. Aperture sulle fasce. Ripartenze. Cursori. Rifinitori. Così ci piace *sognare il mondo del calcio*. Nella realtà il suo fascino risiede nei larghi

marginii di imprevedibilità del risultato. Il palo. La deviazione occasionale. La svista arbitrale. Il tocco sbagliato ad un metro dalla linea di porta. Il ciuffo d'erba che cambia la traiettoria della palla. E quindi il risultato della partita. Il caso, i «tenui ed eterni interstizi di assurdità» (Borges). Questo è il calcio. Questo è il suo fascino.

Una partita di tennis equilibrata finisce 6-4,4-6,6-4. Si giocano più o meno 200 colpi. Mettiamo che in venti occasioni (e sono tante) decida un falso rimbalzo o un soffio di vento. Certamente non andranno tutte a favore dello stesso giocatore. E comunque restano 180 punti a disposizione. Quanto può incidere il caso? Molto poco. Nel calcio non è così.

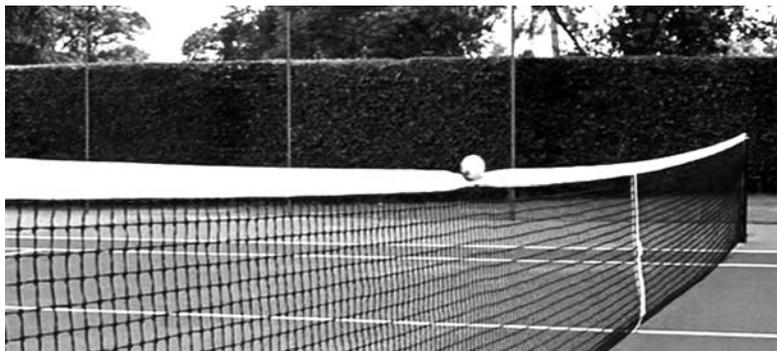
Per finire una curiosità. Già nel canto sesto del Purgatorio fa capolino la probabilità:

Quando si parte il gioco de la zara, colui
che perde si riman dolente, repetendo
le volte, e tristo impara.

Il gioco della zara era sostanzialmente il gioco dei dadi. Se ne lanciavano tre. Si ottenevano tre numeri. Bisognava indovinare il risultato della loro somma.

Dante descrive il giocatore che perde intento a riflettere sulle sequenze di numeri uscite. Sembra echeggiare la definizione frequentista di probabilità. Quella secondo la quale al crescere delle prove la frequenza relativa di un evento si avvicina alla sua probabilità (primi decenni del Novecento). All'epoca di Dante non erano noti nemmeno i rudimenti della probabilità. La cui nascita come disciplina scientifica va collocata alla metà del 1600. Quando Pascal e Fermat si scambiavano lettere intorno alla soluzione di problemi posti dal Cavaliere di Méré. Giocatore d'azzardo, «un fannullone dal vivace ingegno».

Qual è la probabilità
che la pallina
cada nel campo
dell'avversario?
(fotogramma finale
del film *Match point*
di Woody Allen).



Il rischio vulcanico: dall'empirismo al probabilismo

Paolo Gasparini

I processi vulcanici sono fenomeni complessi il cui andamento può essere previsto solo con modelli probabilistici statistici nei quali la quantificazione delle incertezze inerenti i dati e i modelli è un requisito fondamentale. Ma si tratta sempre e solo di probabilità ed è possibile che si verifichi l'evento di probabilità minore o che le misure prese si rivelino eccessive. Non potendosi azzerare il rischio il parametro di riferimento è il rischio accettabile per una data comunità.

La gestione del rischio vulcanico, come quella dei rischi meteorologico e idrogeologico, riguarda un fenomeno che non arriva all'improvviso, come i terremoti, ma è spesso preannunciato da altri fenomeni. Nel caso delle eruzioni questi sono una serie di eventi (terremoti, sollevamenti del suolo, cambiamento della composizione chimica e della temperatura delle fumarole) concentrati in un'area abbastanza circoscritta e nota a priori. Spesso bisogna decidere cosa fare per mitigare gli effetti prodotti da variazioni delle caratteristiche eruttive di vulcani attivi da secoli (per esempio l'Etna, lo Stromboli o il Kilauea). Per prendere queste decisioni le autorità di gestione (e la stessa popolazione) si basano fortemente sul parere di coloro che studiano i vulcani, i vulcanologi. I vulcanologi solo da pochi decenni costituiscono un gruppo abbastanza integrato come saperi e approccio alla ricerca, ma sono stati a lungo separati tra ricercatori di origine fisico-matematica (geofisici, modellisti), chimica (geochimici, magmatologi, petrologi), naturalisti (geologi, sedimentologi), storici. Ognuno di questi settori tende a pesare in modo diverso i dati a disposizione. Ciò ha dato origine a frequenti incomprensioni e accanite dispute, minando il raggiungimento di una visione unitaria di ciò che sta per accadere, e a volte anche la credibilità del "vulcanologo".

L'attendibilità dell'informazione fornita dipende inoltre dalla qualità delle reti di monitoraggio del vulcano che non è la stessa dappertutto. Anzi la maggior parte dei vulcani del mondo non è monitorata da reti strumentali, ma solo attraverso i satelliti che li sorvolano.

In queste condizioni la previsione dell'evoluzione dell'attività di un vulcano e di una conseguente possibile eruzione è risultata spesso contraddittoria, confusa, difficilmente comprensibile per le autorità che devono gestirne gli effetti e per la stessa popolazione.

Questa situazione è andata decisamente migliorando negli ultimi decenni e, secondo molti vulcanologi, il caso che ha segnato il confine tra "il Medio Evo" e l'introduzione di metodologie più scientifiche nella gestione delle eruzioni vulcaniche è stata la sequenza di piccole eruzioni freatiche avvenute al vulcano La Soufrière dell'isola di Guadaloupe nelle Antille Francesi nel 1976.

All'inizio di quell'anno una serie di piccole esplosioni sulla sommità del vulcano lanciò proietti di vario tipo nell'interno dell'area craterica. Le esplosioni continuarono per diversi mesi. Il Prefetto dell'isola, preoccupato dal perdurare dell'attività, si rivolse agli esperti dell'*Institute de Physique du Globe* di Parigi (IPGP), diretto da Claude Allegre, geochimico francese di rinomanza internazionale (sarebbe poi diventato Ministro della Ricerca nel governo di François Mitterrand) e di Haroun Tazieff, diret-



Sommità del vulcano La Soufrière, sull'isola di Guadaloupe.

tore di ricerca al CNRS (il Consiglio Nazionale delle Ricerche Francese), il quale era a quell'epoca il vulcanologo francese di maggiore esperienza sull'at-



tività dei vulcani. I pareri furono diametralmente opposti: il gruppo di Claude Allegre sosteneva che la probabilità di una eruzione magmatica di grandi dimensioni fosse molto elevata (vicina al 100%), mentre Tazieff sosteneva che la probabilità che l'attività evolvesse verso eruzioni di maggiore portata fosse molto scarsa. Le autorità governative scelsero di non correre alcun rischio («voglio rischio zero» dichiarò il Prefetto) e evacuarono i circa 73.000 abitanti dell'intera zona occidentale dell'isola, la Basse Terre, provocando una brusca interruzione dell'attività economica prevalente di quella zona, la produzione di banane.

Il problema era che entrambi i pareri non erano altro che opinioni di esperti (*expert opinions*) basate su pochi dati: quella di Tazieff sul comportamento eruttivo che aveva riscontrato in altri vulcani, quella dell'IPGP su pochi e imprecisi dati sismici e di deformazione del suolo. Ai governanti non venivano forniti, al di là delle reciproche denigrazioni, elementi sufficienti per una scelta maggiormente consapevole.

Dopo tre mesi in cui non successe nulla di nuovo gli abitanti della Basse Terre cominciarono a premere sulle autorità per ritornare alle proprie abitazioni. Il Governo francese, non riuscendo ad ottenere un'opinione concorde, non ebbe altra scelta che istituire una commissione internazionale al di sopra delle parti che valutasse la situazione, e desse un parere sul quale basare la scelta di far tornare o non la gente alle proprie case.

La commissione era presieduta da uno dei maggiori sismologi dell'epoca, Frank Press del *Massachusetts Institute of Technology* (futuro consigliere scientifico di Jimmy Carter) e formata tra gli altri da Shigeo Aramaki che dirigeva la sezione vulcanologica dell'*Earthquake Research Institute* di Tokyo, da Gudmundur Sigvaldasson dell'Istituto Vulcanologico Islandese, da Richard Fiske dell'Os-

servatorio Vulcanologico delle Hawaii, da Franco Barberi (futuro Ministro della Protezione Civile Italiana nel governo Dini) che allora dirigeva le ricerche vulcanologiche del Progetto Finalizzato di Geodinamica, e da me che ero Direttore dell'Osservatorio Vesuviano.

La Commissione si riunì in novembre, cioè tre mesi dopo l'evacuazione, e constatò immediatamente come non vi fossero dati a sostegno della possibilità di un'eruzione magmatica perché:

- «le misure di deformazioni del suolo mostrano solo in una località un'evidenza di rigonfiamento, la quale può essere però spiegata in modo più semplice e prosaico»;
- «le evidenze sismiche sono inconcludenti per le grandi incertezze nella determinazione degli ipocentri... e i tremori sismici registrati non hanno le caratteristiche dei tremori vulcanici»;
- «non esiste evidenza di materiale magmatico nei proietti lanciati dalle esplosioni freatiche».

La Commissione concluse che le esplosioni erano molto probabilmente legate all'attività di una falda acquifera riscaldata (attività freatica) e che «la probabilità di avere una caduta di blocchi di dimensione pericolosa a distanze maggiori di un paio di chilometri dal cratere è molto bassa».

Fu messo in evidenza come qualsiasi opinione che comporti una previsione debba contenere le informazioni sui dati scientifici sui quali si basa e una stima delle incertezze sui dati. Nonostante riconoscesse la necessità di effettuare qualsiasi previsione in termini probabilistici quantitativi, la Commissione non fu in grado di farlo e basò il suo giudizio sulla mancanza di evidenze che diagnosticassero un contributo magmatico alle esplosioni.

Nel rapporto con le Autorità la Commissione mise in chiaro che la previsione,

compito degli scienziati, non deve contenere indicazioni sul comportamento da tenere per ridurre il rischio, ma deve limitarsi ad essere la base sulla quale i gestori dell'emergenza scelgono le misure da attuare.

Il Governo francese si convinse che la richiesta di rischio zero era molto ardua da rispettare, se non impossibile, e permise immediatamente il ritorno degli evacuati. Il danno economico sofferto fu di diverse centinaia di milioni di dollari. L'attività del vulcano declinò per ritornare ai livelli precedenti nell'aprile del 1977.

Questo caso portò all'attenzione dei vulcanologi la necessità di considerare i processi vulcanici come fenomeni complessi non lineari, il cui andamento può essere previsto solo con modelli probabilistici statistici nei quali la quantificazione delle incertezze inerenti i dati e i modelli è un requisito fondamentale. Ciò richiedeva un cambiamento concettuale nell'interpretazione delle osservazioni sui vulcani. I fenomeni osservati non dovevano essere più interpretati come semplici relazioni causa-effetto (questo tipo di terremoti porterà ad una eruzione di questo tipo, ecc.), ma devono essere parte integrante di un sistema costituito da un numero molto grande di variabili tra loro correlate e descrivibile solo con leggi probabilistiche.

Prima di allora il gestore dell'emergenza riceveva dalla comunità vulcanologica "opinioni esperte" del tipo di quelle che hanno provocato l'evacuazione della Basse Terre. L'opinione fornita dal vulcanologo conteneva esplicitamente o implicitamente la indicazioni sulle azioni da intraprendere per diminuire il rischio. È quanto accadde nel 1970 nell'area flegrea quando ci si accorse improvvisamente che il suolo si era sollevato di quasi un metro nella zona di Pozzuoli e cominciarono ad essere registrati piccoli terremoti nella stazione sismica più vicina, quella dell'Istituto di



Lo Stromboli.

Fisica Terrestre a Largo San Marcellino, a Napoli. Basandosi su questi pochi dati fu espresso un parere, necessariamente prudentiale, che provocò, tra mille polemiche politiche e scientifiche, la prima evacuazione del Rione Terra e la conseguente costruzione del Rione Toiano. Il rischio vulcanico era valutato con “opinioni esperte” o con approcci deterministici nei vulcani di tutto il mondo, inclusi i più monitorati come il Kilauea e i vulcani giapponesi.

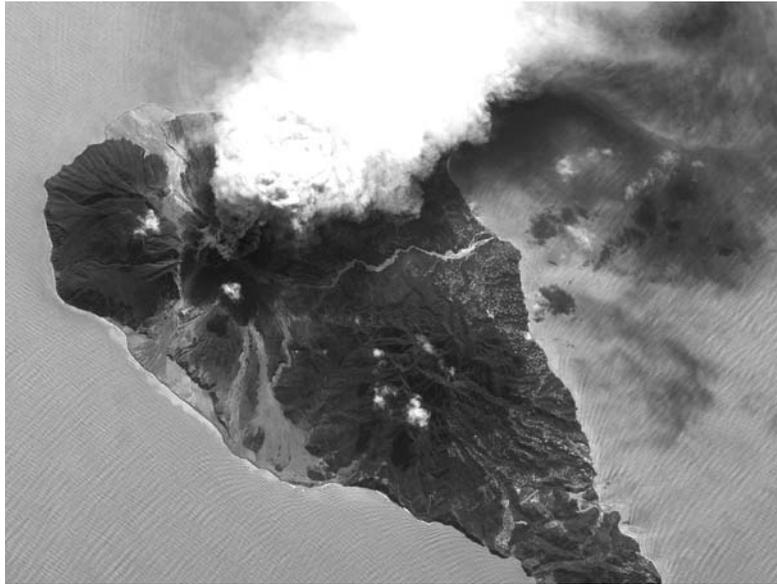
Veduta del Rione Terra a Pozzuoli.



I vulcanologi sono stati spesso le prime vittime di valutazioni sbagliate. È quanto successo ad esempio sul vulcano Galeras, in Colombia, sul quale una piccola improvvisa esplosione uccise, nel marzo del 1993, sei vulcanologi che si erano recati sul cratere per effettuare misure geofisiche e prelievi di gas. L'autore di questo articolo, insieme a due suoi colleghi, Giuseppe Luongo e Lucio Lirer, ha rischiato la stessa fine quando è sceso nella piana craterica di Stromboli per prelevare campioni di lava durante la tranquilla eruzione del 1966. Mal interpretando un lungo periodo di intermittenza nelle esplosioni, risalirono appena in tempo sul bordo del cratere.

La tragedia più rilevante avvenne per la discordanza di opinioni sulla pericolosità del vulcano Unzen che una mattina di giugno del 1991 indusse Katia e Maurice Krafft, vulcanologi e autori di centinaia di foto e bellissimi film sui vulcani, ad entrare in una zona, che era stata interdetta dai vulcanologi giapponesi, insieme ad altre 41 persone tra le quali numerosi giornalisti e vigili del fuoco. Furono investiti da un'improvvisa nube piroclastica che li uccise. Il ripetersi di questi incidenti indusse la IAVCEI, l'Associazione Internazionale di Vulcanologia, ad elaborare un codice di comportamento per i vulcanologi.

Nel frattempo l'applicazione di metodi quantitativi probabilistici basati su dati di elevata attendibilità contribuì a diminuire i danni dell'eruzioni di molti vulcani. La spaventosa eruzione del Monte St. Helens, che avvenne nel 1980 negli Stati Uniti Nord Occidentali, fu un evento imprevisto, ma l'applicazione di metodi probabilistici alle susseguenti fasi eruttive fu molto efficace e semplificò molto la gestione delle emergenze. E così avvenne per l'eruzione del Pinatubo, una delle più grandi del XX secolo, avvenuta nel 1991 nell'isola di Luzon, nelle Filippine.



Soufrière, il vulcano dell'isola di Montserrat.

Circa 800 persone perirono, soprattutto a causa delle colate di fango generate si dopo l'evento eruttivo principale, ma circa 60.000 persone furono salvate con una tempestiva evacuazione. L'esempio migliore dell'efficacia dei metodi quantitativi probabilistici nella gestione delle emergenze è costituito dall'attività eruttiva di un'altra Soufrière, il vulcano dell'isola di Montserrat, un'isola caraibica facente parte dei territori d'oltremare del Regno Unito. L'attività eruttiva iniziata nel 1997 è ancora in corso. Metà dell'isola è stata evacuata ed è tuttora interdetta. Le azioni di prevenzione degli effetti sono programmate con la necessaria frequenza basandosi sulle informazioni quantitative della probabilità di ogni tipo di evento (collasso di un duomo lavico, colate piroclastiche, lahars, ecc.) in una data finestra temporale (giorni, settimane, mesi).

Nel tempo, il numero dei vulcani ben monitorati sta aumentando drasticamente. Il miglioramento nella qualità dei dati a terra e satellitari e la disponibilità di calcolatori con capacità di analisi di giga o terabyte permettono l'elaborazione di complessi modelli quantitativi che forniscono ai gestori informazioni sempre più aderenti alla realtà.

Il punto da non dimenticare mai è che questi modelli, per quanto raffinati, forniscono sempre e solo probabilità ed è sempre possibile che avvenga l'evento di probabilità minore o che le misure prese si rivelino eccessive. È impossibile pretendere che le decisioni da prendere siano quelle che portano all'azzerarsi del rischio, piuttosto esso, calcolato attraverso le probabilità di accadimento di un dato scenario e delle sue conseguenze, deve avere come parametro di riferimento il rischio accettabile per una data comunità.

Bibliografia

- Barberi F., Gasparini P. (1979) Letter to the editor, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 6:1-2.
- Fiske R.S. (1984) *Volcanologists, journalists and the concerned local public: a tale of two crises in the Eastern Caribbean*. In: F.R. Boyd (ed.) *Explosive Volcanism*, National Academic Press, Washington, D.C.
- Press F., Aramaki S., Barberi F., Fiske R., Gasparini P., Sigvaldason S. (1976) *Report of the Soufriere Committee*, Ministère des Outre-mer, Paris.
- Sparks L.S.J., Aspinall W. (2004) *Volcanic activity: frontiers and challenges in Forecasting, Prediction and Risk Assessment*. In: *The state of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics*, IUGG *Geophysics Monographs*, Vol. 19.

Previsione operativa dei terremoti e decisioni

Gordon Woo, Warner Marzocchi

Un'adeguata regolamentazione antisismica è la migliore difesa contro i terremoti. Ma diversi motivi spingono a trovare misure aggiuntive per la riduzione del rischio sismico. Compito di scienziati e decision makers è quello di esplorare nuove possibili azioni di mitigazione del rischio. Questo è lo scopo principale della cosiddetta previsione probabilistica operativa dei terremoti.

La maggior parte delle vittime causate da un terremoto è dovuta a crolli di edifici e strutture. Per questo motivo un'adeguata regolamentazione antisismica è la migliore difesa che abbiamo contro i terremoti. Tuttavia, esistono diversi motivi che spingono a trovare misure aggiuntive per la riduzione del rischio sismico. Per esempio, molte costruzioni sono state costruite prima della definizione delle regole antisismiche più recenti. Un'eventuale opera di rinforzamento (retrofitting) potrebbe costare fino al 30-50% del valore della casa e quindi risultare troppo onerosa per molti proprietari. Inoltre, il retrofitting richiede un certo tempo per essere messo in opera, e non può essere ritenuto una valida opzione quando si prendono in considerazione variazioni del rischio sismico di pochi giorni, come durante una sequenza sismica. Infine, le regole di edilizia antisismica sono basate sulle mappe di pericolosità che non considerano gli effetti di possibili eventi estremi; per esempio, il terremoto di Christchurch, in Nuova Zelanda, nel febbraio 2011, ebbe livelli di scuotimento del terreno molto maggiori di quelli utilizzati per definire le regole antisismiche. Per questi motivi, gli scienziati e i decision makers hanno il dovere di esplorare nuove possibili azioni di mitigazione del rischio sismico, da aggiungere ad una definizione sempre più accurata di regole edilizie antisismiche adeguate.

Questo è lo scopo principale della cosiddetta previsione probabilistica operativa dei terremoti.

La previsione probabilistica operativa dei terremoti

Dopo il terremoto di L'Aquila del 2009, il governo italiano nominò una *Commissione internazionale per la previsione dei terremoti (International Commission for Earthquake Forecasting, ICEF)* che aveva lo scopo di descrivere possibili iniziative future per la gestione del rischio sismico nel breve termine (giorni/settimane). La principale conclusione della commissione è stata quella di incoraggiare lo sviluppo di una previsione probabilistica operativa dei terremoti (*Operational Earthquake Forecasting, OEF*) e di protocolli quantitativi e trasparenti per il decision making. Essenzialmente, OEF è definita come l'insieme delle procedure per la stima e per la diffusione di informazioni ufficiali relative alla variazione temporale della pericolosità sismica, al fine di aiutare la società a prepararsi all'accadimento di un terremoto potenzialmente distruttivo. Questo processo coinvolge due attività chiave: l'aggiornamento continuo della probabilità di accadimento di un terremoto e/o di possibili scuotimenti del terreno; e la diffusione di informazioni ufficiali per aumentare la preparazione delle comunità minacciate dal terremoto.

Il termine *variazione temporale* indica che la pericolosità sismica, intesa come la probabilità di scuotimento del terreno in una finestra spazio-temporale, non è costante nel tempo. Tradizionalmente, le regole antisismiche vengono stabilite sulla base di stime di pericolosità per i prossimi 50 anni. Tali stime probabilistiche sono spesso considerate costanti nel tempo, per cui si potrebbero utilizzare le stesse mappe anche per pianificare azioni di riduzione del rischio su scale di tempo più brevi. Tuttavia, sappiamo che il tasso di sismicità ha variazioni molto grandi, ben oltre quelle aspettate per un processo che non dipende dal tempo. L'evidenza più chiara di queste variazioni è dato dalle sequenze sismiche composte di terremoti ravvicinati nello spazio e nel tempo, chiamati *cluster* sismici; un terremoto crea una perturbazione nelle aree limitrofe aumentando la probabilità di avere altri terremoti nelle vicinanze nel breve termine (da giorni a settimane).

L'utilizzo di modelli basati sui *cluster* sismici per descrivere le sequenze sismiche dopo un grande terremoto (dette in maniera colloquiale "sequenze di assestamento") stanno diventando molto popolari. L'ICEF suggerì che modelli analoghi potessero essere usati proficuamente anche per seguire l'evoluzione di una qualsiasi sequenza sismica, anche quindi quelle che non sono state generate da un grande terremoto. In genere, terremoti ravvicinati nel tempo di piccola e media magnitudo generano spesso molta preoccupazione tra le persone. Alcune volte i terremoti distruttivi sono effettivamente preceduti da crisi sismiche più o meno lunghe; allo stesso tempo, la maggior parte dei terremoti distruttivi non sono anticipati da sequenze sismiche risentite dalla popolazione e la maggior parte delle volte le sequenze finiscono senza eventi importanti. I sismologi non sono ancora in grado di distinguere le caratteristi-

che delle sequenze che anticipano un grande terremoto, ma oggi è chiaro che l'osservazione di una sequenza aumenta la probabilità di tale evento.

Allo stato attuale, le informazioni di questi modelli non sono prese in considerazione per stabilire misure di riduzione del rischio sismico. L'ostacolo maggiore è che una sequenza sismica può aumentare di molto la probabilità di accadimento di un forte terremoto nei giorni successivi, anche 100-1.000 volte, ma la probabilità assoluta rimane molto spesso ben al di sotto dell'1%. Ciò significa che ogni azione di riduzione del rischio intrapresa risulterebbe quasi sempre essere inutile e classificata come un falso allarme. E questo potrebbe erodere la credibilità degli scienziati e dei decision makers presso la società.

Il decision making con basse probabilità

La Scienza e il decision making hanno due differenze sostanziali. Un ricercatore può decidere se pubblicare o meno un lavoro scientifico in base al grado di conoscenza che ha sull'argomento, mentre un decision maker deve fare delle scelte importanti e spesso in modo rapido, indipendentemente dal grado di incertezza sul fenomeno che minaccia la popolazione. Inoltre, la ricerca non ha certezze e si esprime spesso in termini di probabilità che è un valore continuo tra 0 e 1; il decision making, invece, segue una logica booleana, cioè fare o non fare una determinata azione di riduzione del rischio. Un modo per riconciliare questi due mondi e utilizzare le stime probabilistiche nel decision making è dato dall'analisi dei costi e benefici.

L'analisi dei costi e dei benefici

L'analisi dei costi e benefici è quanto di più comune si possa immaginare. In modo più o meno consapevole, tut-

te le nostre scelte nel quotidiano sono derivate da valutazioni di questo tipo. Alcuni ricercatori sostengono che anche l'evoluzione dell'uomo si sia sviluppata seguendo regole simili all'analisi dei costi e benefici.

In generale, si può dire che un'azione di riduzione del rischio è conveniente se i suoi costi di attuazione C sono minori dei benefici che ne derivano pL , dove p è la probabilità di avere un certo evento distruttivo e L sono le perdite causate da questo evento, cioè $C < pL$. Considerando che, come detto in precedenza, i valori di p nei giorni prima di un grande terremoto sono comunque bassi, le azioni di riduzione del rischio sismico dovrebbero avere un costo C basso. Per esempio, è stato dimostrato che l'evacuazione di una città, anche di piccole dimensioni, non può essere mai giustificata con un'analisi di questo tipo (almeno con le capacità previsionali attuali).

Prendere delle decisioni a fronte di probabilità basse ha conseguenze importanti. L'alto numero di falsi allarmi previsti suggerisce che le azioni di riduzione del rischio obbligatorie imposte alla società potrebbero portare ad una perdita di credibilità degli scienziati e decision makers. Inoltre, è ampiamente risaputo che le persone hanno una percezione del rischio molto diversa; in sintesi, le persone tendono a dare un diverso valore alla variabile L e anche ai costi C . Per esempio, di fronte allo stesso rischio del fumo di sigaretta, ci sono persone che smettono di fumare ed altri che continuano senza particolari problemi. Persone con figli piccoli possono essere meno inclini ad accettare rischi, mentre invece alcune categorie professionali spesso accettano rischi molto alti inerenti la loro professione (giornalisti in aree di guerra, vulcanologi, ecc.). In pratica, questo significa che la disuguaglianza $C < pL$ potrebbe essere diversa da persona a persona.

Per questi motivi, per la gestione di casi analoghi a questi sono state proposte strategie diverse rispetto all'imposizione dall'alto di azioni di riduzione del rischio. Una soluzione possibile al problema potrebbe essere quella di suggerire alla popolazione possibili misure di riduzione del rischio lasciando libere le persone se adottarle o non. In inglese esiste un termine che descrive questa situazione, *nudge* (incoraggiare, esortare), che è anche il titolo di un libro molto importante scritto da Richard Thaler e Cass Sunstein. In estrema sintesi, il libro sostiene che le persone tendono a non gradire di essere spinti forzatamente a fare qualcosa, anche nel caso sia palesemente per il loro bene; per esempio, il divieto di uso di alcolici o di sigarette. Ciò deriva dal fatto che ognuno di noi ha una sua propria disuguaglianza da rispettare $C < pL$. Ciò che invece è ritenuto accettabile è una sorta di *nudging* verso comportamenti più virtuosi, lasciando però ad ogni persona la libertà di scelta. In sintesi, ogni persona diventa un decision maker per se stesso e per la propria famiglia.

Nel passato, ogni pericolo con una bassa probabilità non veniva comunicato per paura di causare panico, che avrebbe potuto anche portare a danni maggiori dell'evento stesso. Ora il mondo è cambiato. Dopo l'11 settembre, in tutti gli aeroporti viene comunicato il livello di allerta terroristico senza però imporre nessuna drastica azione ai viaggiatori. Sta nel singolo individuo, opportunamente informato, decidere se viaggiare oppure aspettare un momento in cui il pericolo sia minore.

Il decision making individuale

In generale, spesso le crisi presentano una vasta gamma di possibili minacce: di conseguenza esiste una gamma molto estesa di possibili azioni di riduzione del rischio. Questo vale sia nel caso in cui le decisioni vengano prese dall'alto,

sia per eventuali azioni di mitigazioni prese a livello individuale.

In questo ultimo caso, il problema è come consigliare alle persone un modo di comportamento virtuoso che riduca il rischio per la persona. Thaler e Sunstein, nel loro libro *Nudge*, suggeriscono che la prima azione di fondamentale importanza è un'informazione chiara sul tipo di rischio. Nel libro è riportato un esempio relativo agli effetti sulla salute di determinati prodotti. È bastato pubblicare una lista dei prodotti in base al loro contenuto di componenti nocivi per indurre la popolazione a cambiare significativamente i loro acquisti. Nel contesto del rischio sismico, ogni persona dovrebbe essere informata sulla vulnerabilità della propria abitazione, del posto dove lavora, della scuola dei propri figli, della chiesa che frequenta, ecc. La tecnologia moderna potrebbe permettere di accedere facilmente a questo tipo di informazioni, per esempio tramite Google. Questo tipo di informazioni è di fondamentale importanza perché potrebbe portare a diversi tipi di azioni individuali. Per esempio, una persona che vive in una casa ad alta vulnerabilità potrebbe essere più riluttante a rimanere nella propria abitazione durante una sequenza sismica e quindi decidere di trasferirsi temporaneamente da un'altra parte.

Oltre a questo tipo di informazione di base, si possono prefigurare altri tipi di azioni di riduzione del rischio a basso costo. La lista che segue non ha la pretesa di essere esaustiva, ma offre già un'ampia gamma di possibili azioni.

Azioni individuali a basso costo per la riduzione del rischio

Nel caso di azioni imposte alla società da decision makers, le regole adottate devono essere basate su una ragionevole analisi dei costi e benefici, che sia trasparente e chiara per chiunque. In questo modo, ogni azione intrapresa può

essere giustificata in ogni momento del processo di decision making. Nel caso di azioni prese individualmente, non occorre più avere protocolli di azione trasparenti, perché ogni persona sarebbe responsabile solo per se stessa o per la sua famiglia. Ciò non toglie, ovviamente, che ogni azione intrapresa individualmente debba seguire una propria analisi dei costi e dei benefici.

È chiaro che questo tipo di approccio non permetterà di salvare tutte le vite umane, ma anche nel caso serva a salvare una sola vita in più, sarebbe un approccio che merita di essere perseguito. Di seguito riportiamo una selezione di alcune possibili azioni personali.

a) *Aumento dello stato di allerta personale.* Un individuo che è in stato di allerta diventa più reattivo per reagire ad un evento pericoloso, nel caso questo avvenga. Gli allerta antiterrorismo emanati negli aeroporti hanno anche lo scopo di aumentare lo stato di allerta delle persone verso atteggiamenti sospetti. Come esempio semplice di un'azione di questo tipo, si consideri una sequenza sismica che svegli una persona durante la notte. In questo caso, preparare i vestiti (uscire in pigiama in inverno potrebbe causare parecchi problemi) ed eventualmente organizzarsi per uscire rapidamente in caso le scosse aumentino potrebbe diminuire anche di poco la possibilità di subire danni, ad un costo incommensurabilmente basso.

b) *Preparazione.* In ogni famiglia e in ogni posto di lavoro, scuola, ecc., ci dovrebbe essere un corredo di emergenza nel caso avvenga un terremoto. Questo dovrebbe includere, tra altre cose, acqua, torce, batterie, maschere per proteggersi dalla polvere, attrezzature per il primo soccorso e attrezzi per scavare. Durante una sequenza sismica, le persone potrebbero verificare la disponibilità di questi corredi per l'emergenza.

È ormai assodato che le esercitazioni per prepararsi ai terremoti portano a salvare delle vite. Se è molto tempo che queste esercitazioni non vengono fatte, la presenza di una sequenza sismica potrebbe essere un buon motivo per farne una.

c) *Turisti e non-residenti.* Qualsiasi persona che debba visitare (per proprio piacere o per lavoro) un'area in cui c'è stato un aumento del rischio sismico può decidere di rivedere i propri piani. La sostituzione di una meta turistica può essere fatta a costi minimi. Nel caso invece la visita sia legata ad un importante motivo di lavoro, la persona può valutare accuratamente i vantaggi e gli svantaggi di tale viaggio. Nell'ottobre del 2010, il dipartimento di stato degli Stati Uniti diramò un'allerta terroristica per i viaggiatori verso l'Europa. Alcuni viaggi di lavoro furono modificati come conseguenza di tale allerta, ma non tutti. È giusto che ogni azienda/persona sia libera di decidere in base alle proprie priorità ed esigenze.

d) *Residenti.* In caso di incremento dell'attività sismica e di eventuali allerta emessi, un residente locale che vive in una costruzione sismicamente vulnerabile può scegliere tra una gamma di azioni a basso costo, per esempio farsi ospitare da amici o parenti che abbiano una casa più resistente, prendersi un periodo di vacanza che si intendeva fare da tempo, o persino trasferirsi a vivere in macchina, in un caravan, oppure in una tenda piantata nel proprio giardino.

Lo stesso ragionamento vale per edifici pubblici particolarmente vulnerabili come, per esempio, le chiese. Durante una crisi sismica, si potrebbe prendere in considerazione di espletare le funzioni religiose in po-

sto più sicuri, ad esempio, se il tempo lo consente, anche all'aperto.

Spesso le crisi sismiche possono durare anche mesi, ed è ovvio che molte di queste opzioni non potrebbero essere prese per tutto il periodo. Ma la diminuzione del tempo di esposizione (per esempio andando in vacanza due settimane), pur non garantendo che il sisma avvenga proprio in quelle due settimane, diminuisce il rischio complessivo nella zona. È possibile pensare anche ad altri tipi di azioni di riduzione del rischio, come per esempio rendere disponibili strutture pubbliche per le persone che lo richiedano. Ciò comporta costi più elevati, per cui diventa necessaria un'attenta analisi dei costi e dei benefici globale.

Riassumendo

La nostra difesa migliore contro i terremoti è costruire le abitazioni in maniera adeguata, seguendo le normative antisismiche vigenti. Tuttavia, esistono ulteriori misure aggiuntive che possono ridurre il rischio sismico su scale di tempo più brevi. Queste misure possono essere prese da ogni persona nel momento in cui sia informata correttamente su come il rischio sismico varia nel tempo. La lista di azioni riportata in questo articolo non ha la pretesa di essere esaustiva, e non garantisce che ogni persona possa azzerare il rischio da terremoto (i terremoti possono avvenire quando non c'è nessuna sequenza sismica risentita). Tuttavia, in un'ottica complessiva, questo tipo di azioni porterebbero, inevitabilmente, ad una riduzione delle perdite nel caso avvenga un terremoto, e ogni persona ridurrebbe la probabilità di subire gravi infortuni da questo tipo di eventi.

Cambiamento climatico: un clima di incertezza

Alexander García-Aristizábal

Da molti anni una buona parte della comunità scientifica ritiene che i cambiamenti climatici siano dovuti sia alla variabilità naturale che all'azione dell'uomo, ma non poche sono le incertezze. I mutamenti climatici sono un fenomeno nel quale le incertezze abbondano, ma spesso sono trascurate sia nella descrizione delle proiezioni del clima, sia nell'analisi dei dati che ne derivano.

Le condizioni atmosferiche influenzano profondamente le attività umane. Quando questi fenomeni assumono particolare intensità e sono in grado di causare direttamente o indirettamente dei danni, allora si associa il rischio di danni a persone o cose. Uno dei nostri interessi fondamentali è proprio quello di valutare la *pericolosità* (intesa come probabilità di superare una certa soglia di intensità del fenomeno in un certo intervallo temporale) e il *rischio* (inteso come danni attesi o probabilità di superare un determinato valore di danno) derivati da eventi atmosferici estremi.

In questo contesto, l'informazione di variabili climatologiche come precipitazione, temperatura (massima e minima), velocità del vento, umidità, ecc., costituiscono parametri di riferimento per le valutazioni di pericolosità e rischio. Questa informazione generalmente si può ottenere da cataloghi di dati passati; tuttavia, dato che frequentemente la finestra temporale dei dati è limitata per le analisi degli eventi meno frequenti (oppure non esistono osservazioni per un determinato luogo), una possibilità è quella di considerare dati sintetici derivati da modelli climatici (*General Circulation Models*, GCM). Independentemente della sorgente dei dati, un problema più critico è sollevato forse quando s'introduce nel discorso il cambiamento climatico.

Seguendo la definizione adottata dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) il cambiamento climatico «si riferisce a un cambio nello stato del clima che può essere identificato (per esempio usando test statistici) attraverso cambiamenti nella media e/o la variabilità delle sue proprietà, e che persiste per un lungo periodo di tempo (decade o più)» [1-3]. Mentre da una prospettiva paleoclimatica questo fenomeno è fondamentalmente legato alla variabilità naturale di diversi fattori (quali irraggiamento solare, caratteristiche atmosferiche, oceani, parametri interni o esterni al pianeta, ecc.), da molti anni una buona parte della comunità scientifica (IPCC) ritiene che questi cambiamenti possano essere dovuti sia alla variabilità naturale che all'azione dell'uomo [1-3] tramite attività come la deforestazione e le emissioni di gas serra derivate dall'uso di combustibili fossili.

Il ruolo delle attività antropiche sul clima è oggetto da tempo di un ampio dibattito scientifico: da una parte, alcuni scienziati ritengono che l'uomo attraverso le sue emissioni di gas serra sia responsabile di gran parte del periodo di riscaldamento che sta attraversando oggi la Terra; altri scienziati ritengono invece sopravvalutato il peso attribuito all'uomo sul clima, ritenendo l'attuale periodo di riscaldamento climatico come una fase naturale opposta ai periodi (naturali) di raffreddamento climatico.

Senza entrare nel campo specifico del dibattito sul peso delle attività umane sul clima (che è oggetto di studio dei climatologi) il nostro obiettivo è di fare una discussione generale sulle incertezze nei modelli di cambiamento climatico. Naturalmente una discussione “integrale” sulle incertezze associate ai modelli climatici sarebbe un compito molto complesso; tuttavia, da una prospettiva generica, è possibile evidenziare le criticità dei dati climatologici ottenuti da osservazioni e modelli climatici, le principali sorgenti di incertezze, i limiti per la quantificazione, ecc. In particolare, dal punto di vista di “utilizzatori” dell’informazione, quando si usano queste tipologie di dati è importante avere un’idea precisa di che cosa si sta quantificando per dare un senso chiaro ai risultati.

Il clima, un sistema certamente variabile: le osservazioni

Indipendentemente dal dibattito sul peso delle attività antropiche, è chiaro che il clima non ha mai un carattere puramente statico, ma è sempre in fase di cambiamento, passando da fasi più calde a fasi più fredde, alla ricerca di un nuovo equilibrio all’interno del sistema. Sono diversi i fattori che provocano i mutamenti climatici terrestri, che vanno da variazioni nell’orbita terrestre e nell’attività solare, alle attività vulcanica, ecc., all’uomo, che, con l’emissione di gas serra, ne modificano la composizione. Stando solo alle osservazioni registrate, secondo l’ultimo rapporto dell’IPCC le temperature superficiali medie globali sono aumentate di $0,7^{\circ}\text{C} \pm 0,18^{\circ}\text{C}$ considerando un trend lineare negli ultimi 100 anni [4]. Se si considera il tasso di riscaldamento negli ultimi 50 anni, questo è quasi il doppio di quello registrato nel corso degli ultimi 100 anni ($0,13^{\circ}\text{C} \pm 0,03^{\circ}\text{C}$ vs. $0,07^{\circ}\text{C} \pm 0,02^{\circ}\text{C}$ per decennio) [4].

Altre osservazioni indicano inoltre che variazioni in eventi estremi di temperatura sono coerenti con il riscaldamento del clima. Ad esempio, esistono dati che indicano una diffusa riduzione del numero di giorni di gelo in regioni di media latitudine e un aumento del numero di estremi caldi dal 70 al 75% delle regioni dove i dati sono disponibili [4]. Altri esempi vengono dalle piogge: le precipitazioni sono in generale aumentate in zone al nord di 30°N nel periodo 1900-2005, mentre una tendenza al ribasso dal 1970 domina i tropici. È probabile tuttavia che ci sia un aumento del numero di episodi di precipitazioni intense in diverse regioni, anche in quelle in cui vi è stata una riduzione della quantità di precipitazione totale, in linea con un clima sempre più caldo e le quantità crescenti di vapore acqueo osservate nell’atmosfera [4].

Tutte queste variazioni e altre che si possono trovare in letteratura sono testimonianza del carattere variabile del sistema climatico. Dal punto di vista della valutazione di pericolosità e rischio, questo fatto è da tenere in considerazione poiché le ipotesi di stazionarietà nelle analisi dei dati potrebbero essere violate. Purtroppo in molte zone il problema principale è la scarsa disponibilità di dati osservati e in quelli esistenti una finestra temporale troppo ridotta per un’analisi corretta degli eventi più estremi (e meno frequenti), che sono generalmente quelli più importanti dal punto di vista del rischio. Un’alternativa per cercare di aggirare questo problema è utilizzare dati sintetici da modelli climatici; questa è una delle tante motivazioni del crescente interesse per la modellazione del clima, oltre all’interesse fondamentale di cercare di valutare gli effetti che le variazioni delle forzanti radiative hanno sul sistema climatico. Attenzione, però, perché questa tipologia di dati

dovrebbe essere manipolata con estrema cautela avendo sempre presenti le molte limitazioni e incertezze intrinsecamente associate.

I modelli climatici e le proiezioni del clima

Un modello climatico è una rappresentazione numerica del sistema climatico sulla base di proprietà fisiche, chimiche e biologiche dei suoi componenti, le loro interazioni e processi di feedback, considerando tutte o alcune delle sue note proprietà [2, 4]. I modelli climatici sono spesso utilizzati per fare proiezioni della risposta del sistema climatico di fronte a diversi *scenari* di emissione o concentrazione di gas a effetto serra, degli aerosol e delle *forzanti radiative* (*radiative forcing scenarios*).

Due importanti concetti devono essere considerati: anzitutto, l'uso del termine "proiezione climatica", che si distingue dalle "previsioni climatiche" per sottolineare che le proiezioni climatiche dipendono dagli scenari delle forzanti di emissione/concentrazione/radiative utilizzate, le quali si basano su ipotesi associate, ad esempio, a futuri sviluppi socio-economici e tecnologici che possono o non possono accadere e quindi intrinsecamente incerti [4]. Il secondo concetto da tener presente è, appunto, quello di *scenario*. Uno *scenario* è una descrizione plausibile e spesso semplificata di come il futuro si può sviluppare, sulla base di un insieme di ipotesi internamente coerenti e consistenti, riguardanti forze motrici e relazioni chiave fra i componenti [4, 5]. Nel nostro caso prendiamo in considerazione in particolare gli scenari di emissione che sono una rappresentazione plausibile del futuro sviluppo delle emissioni di sostanze potenzialmente attive radiativamente (ad esempio, gas a effetto serra e aerosol), sulla base di

un insieme coerente ed internamente consistente di assunzioni sulle forzanti (come lo sviluppo demografico e socio-economico, il cambiamento tecnologico, ecc.) [1, 2, 4]. Da questi scenari derivano gli scenari di concentrazione, che sono utilizzati come input nei modelli climatici per calcolare proiezioni climatiche.

Modelli climatici ed incertezze nelle proiezioni

La costruzione e quantificazione delle proiezioni del clima si basa su diverse sorgenti d'informazione:

1. i modelli climatici (GCM);
2. il *downscaling* delle simulazioni del modello GCM;
3. la comprensione della fisica dei processi che regolano le risposte regionali;
4. i dati recenti (la storia) di cambiamento climatico (e.g., [6]).

Le incertezze nelle proiezioni del clima sorgono a ogni passaggio necessario per la loro preparazione e calcolo, come la parametrizzazione del modello, la variabilità naturale dei fenomeni, la determinazione degli scenari di emissione e concentrazione, le forzanti, la risposta del clima, ecc. [7]. Oltre alle canoniche incertezze dovute alla variabilità naturale del sistema (che possiamo chiamare incertezza aleatoria), esistono dunque anche delle incertezze dovute all'imperfetta conoscenza del problema (a livello di definizione dei modelli, valori nei parametri, condizioni iniziali e al contorno, ecc.) che possono essere grossolanamente accorpate come incertezze epistemiche (o almeno con una grande componente epistemica).

Da un punto di vista quantitativo, alcune incertezze possono (e devono) essere esplorate, analizzate e anche quantificate fino a una certa misura, ad esempio attraverso l'uso combinato di osservazioni e modelli, usando gerar-

chie di modelli ed eseguendo *ensemble simulations*. Quest'ultimo approccio rappresenta in particolare una risorsa fondamentale per lo studio della gamma di risposte "plausibili" del clima di fronte a una certa forzante [8]. Gli *ensembles* possono essere applicati in diversi modi, ad esempio:

1. raccogliendo risultati da una serie di modelli di centri di ricerca diversi (*ensemble "multi-modello"*), per considerare così l'impatto delle differenze strutturali fra i modelli;
2. generando simulazioni con differenti condizioni iniziali (*ensemble "intra-modello"*) per caratterizzare le incertezze dovute alla variabilità dei fenomeni;
3. variando diversi parametri interni del modello in un rango di valori plausibili (*ensembles di "modelli con perturbazioni stocastiche"*).

Una discussione interessante su questo argomento può essere trovata in [7, 9]. Diversi esempi di applicazioni di *ensembles* per la quantificazione di incertezze si trovano ad esempio in [6, 8-12].

Altre incertezze, come quelle derivate dalla costruzione di scenari di emissione e concentrazione, sono più difficili da essere rintracciate e quantificate. Infatti, nell'elaborazione dei diversi scenari da parte dell'IPCC (e lavori precedenti), spesso si fa riferimento al fatto che a ogni possibile scenario non è assegnata una probabilità di occorrenza, neppure un peso o una preferenza rispetto a un altro [2, 4]. Questa determinazione è comprensibile visto che, come descritto prima, gli scenari (e.g., di emissione) vengono costruiti considerando possibili sviluppi demografici, economici, politici, ecc., che sono delle ipotesi alle quali difficilmente si potrebbero assegnare probabilità. Da una parte considerare diversi scenari è un modo di esprimere le incertezze *epistemiche* sull'andamento di alcuni parametri che influiscono sulle

forzanti (che agiscono nella circolazione atmosferica), dall'altra parte però rimane indeterminato il *peso* o la probabilità di occorrenza di ogni scenario. Gli effetti di questa incertezza epistemica sono evidenti quando si vedono le diverse proiezioni (e.g. al 2050) di parametri climatici come la temperatura o la precipitazione considerando diversi scenari.

La domanda spontanea è: posso costruire una distribuzione di probabilità usando le proiezioni da diversi scenari per determinare l'incertezza (almeno epistemica) nei parametri climatici derivati dal modello? Per fare questo si dovrebbe implicitamente o esplicitamente assegnare dei pesi (o delle probabilità) agli scenari, dando in questo modo più "credibilità" ad alcuni di loro. Si potrebbe pensare anche, di fronte all'incertezza massima, di assegnargli lo stesso peso e quindi assumere tutti come equiprobabili. Tuttavia, ogni scenario ha delle implicazioni che li rendono possibili *path* mutuamente escludenti.

Pericolosità e rischio: eventi estremi ed incertezze che si aggiungono

Il cambiamento climatico porta a variazioni nella frequenza, intensità, estensione territoriale e durata di eventi climatici estremi, potendo eventualmente causare eventi estremi senza precedenti [7]. Inoltre, la variazione temporale dell'esposizione combinata con una maggior frequenza di eventi (anche se non estremi in senso statistico), può generare un aumento nella frequenza dei disastri. Considerando il nostro particolare interesse nella valutazione di pericolosità e rischio, oltre alle incertezze puramente associate ai dati (siano essi osservati o generati da modelli climatici), l'analisi dei dati stessi per le stime di pericolosità e rischio aggiunge ulteriori

componenti di incertezze che provengono, ad esempio, dalla selezione dei modelli probabilistici applicati per la stima di quantili (e.g. di parametri d'intensità di precipitazione, temperatura, vento, ecc.), oppure dai modelli fisici usati per propagare in superficie gli effetti di un determinato evento (e.g., per le inondazioni dopo piogge intense).

Per la valutazione della pericolosità, in particolare, gli eventi che generalmente sono importanti sono quelli a intensità maggiore che di solito sono anche quelli meno frequenti. Per questo motivo in queste analisi spesso si fa uso della teoria di Eventi Estremi (EVT, [13]) che fornisce uno strumento per derivare una distribuzione completa di probabilità di eventi a bassa probabilità, e quindi permette l'analisi della probabilità di occorrenza di eventi che sono al di fuori del campo dei dati osservati.

Logicamente, questo esercizio ha le sue limitazioni e aggiunge non poche sorgenti d'incertezza. Se le analisi si basano su dati osservati, la finestra temporale dei dati diventa critica ad esempio per la selezione del modello probabilistico più adeguato, per l'identificazione di possibili *trend* nei dati, oppure per i valori d'intensità estrema che si possono estrapolare (e.g., la valutazione di eventi a maggior periodo di ritorno sarebbe inapplicabile oppure con scarsa confidenza). Questo fatto, oltre all'interesse per la proiezione di eventi estremi sotto l'ipotesi di cambiamento climatico, ha fornito una delle motivazioni per lo sviluppo di tecniche di regionalizzazione o di *downscaling* [14]. Queste tecniche possono produrre dati per analisi a scala regionale e locale, e quindi teoricamente, molto più importanti per l'analisi di eventi estremi. Tuttavia, i dati generati usando queste tecniche sono limitati enormemente dall'affidabilità dell'informazione proveniente dai modelli climatici a grande scala [7].

Incetnze: quantificare quello che è quantificabile

In qualsiasi delle sue interpretazioni, il cambiamento climatico è un fenomeno nel quale le incertezze abbondano a ogni elemento ma che non sempre sono evidenziate, e spesso sono trascurate sia nella descrizione delle proiezioni del clima, sia nell'analisi dei dati che ne derivano. Nel nostro particolare interesse, questo costituisce un problema fondamentale per la valutazione di pericolosità e rischio, sia che facciamo analisi usando dati osservati sia che si usino quelli derivati da modelli climatici.

Se si considera l'ipotesi di cambiamento climatico, il primo dei punti che devono essere presi in considerazione è valutare l'effetto che questo fattore può avere nei dati, per testare la fattibilità o meno di basare le analisi su un'ipotesi di stazionarietà dei processi. Se si analizzano dati osservati, come per qualsiasi studio di questo genere, è importante considerare le limitazioni che impone la lunghezza della finestra temporale dei dati per evitare di fare proiezioni temporali oltre quello che i dati permettono, oppure estrapolare intensità a periodi di ritorno troppo lunghi. D'altra parte, se si hanno a disposizione dati derivati da modelli climatici, è importante avere una idea molto precisa di quello che rappresentano, le ipotesi di base nella loro elaborazione (modello, scenari), e le incertezze che sono state considerate.

Una trattazione quantitativa *rigorosa* delle incertezze associate a una qualsiasi analisi che consideri il cambiamento climatico e le proiezioni derivate dai modelli climatici è praticamente impossibile. Tuttavia, con le necessarie affermazioni sulle caratteristiche dei dati e i rispettivi condizionamenti, una valutazione delle incertezze quantificabili è una pratica più che doverosa, non solo per dare più significato ai risultati ottenuti, ma anche

per chiarire il più possibile le implicazioni delle conclusioni.

Ad esempio, consideriamo il caso seguente preso dall'attuale progetto CLUVA (Climate Change and Urban Vulnerability in Africa) [15]. In CLUVA sono state fatte delle proiezioni del clima fino all'anno 2050 considerando diversi scenari di emissione dell'IPCC [15]. Usando i dati generati dai modelli climatici e applicando la teoria di eventi estremi, sono state derivate curve di probabilità di superamento di diversi valori d'intensità come quella illustrata nella Figura 1. Come si vede nella Figura 1, alcune incertezze sono state quantificate e propagate fino al risultato finale. Ma cosa rappresentano queste incertezze?

Per rispondere a questa domanda, è necessario considerare tutta l'informazione usata per generare il risultato. Quello mostrato nella Figura 1 è stato raggiunto con le seguenti condizioni:

1. i dati climatici sono stati generati considerando un singolo modello (i.e., una parametrizzazione specifica);
2. è stato considerato un singolo scenario di emissione: il RCP4.5 [15] (nota: anche se in CLUVA sono considerati diversi scenari, qui volutamente ne usiamo solo uno per la discussione);
3. non sono stati usati ensambles di modelli né di soluzioni perturbando i parametri (nota: ensambles intra-

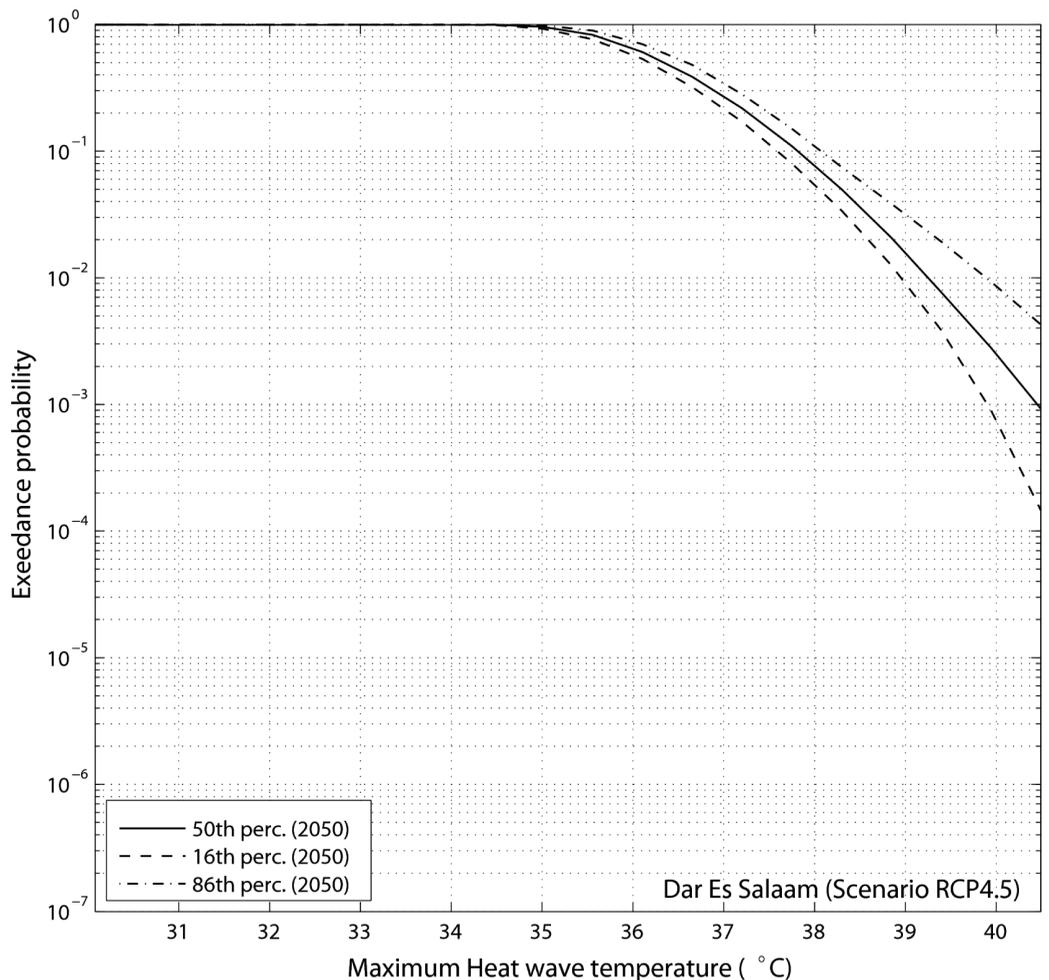


Figura 1. Curva di probabilità di superare un certo valore di temperatura massima in un'onda di calore di durata superiore a 3 giorni, in Dar Es Salaam (Tanzania), derivata da dati prodotti da un modello regionale e considerando lo scenario RCP 4.5 del IPCC (e.g. [4, 7]). Dati del progetto CLUVA [15].

- modello sono stati fatti in CLUVA, ma non riguardano il caso specifico qui illustrato);
4. sono stati estratti dei valori massimi annuali nei parametri e fatta inferenza sui parametri del modello statistico che spiegava in modo migliore i dati;
 5. è stato valutato l'effetto che le incertezze sui parametri del modello statistico hanno nella stima finale di probabilità di superamento di una certa soglia.

Con questa informazione è possibile dare una risposta più accurata alla domanda posta in precedenza. In pratica, le incertezze che si vedono in Figura 1 si devono esclusivamente alle incertezze derivate dalla stima dei parametri del modello statistico usato per descrivere i dati (EVT).

Con questa premessa, la domanda successiva a cui si deve rispondere è dunque: Che cosa rappresentano le probabilità (di eccedenza) riportate in Figura 1? Considerando le condizioni elencate in precedenza, sappiamo che i risultati ottenuti sono condizionati da una serie di decisioni prese:

1. che il modello (**M**) e la parametrizzazione scelta siano perfetti;
2. che lo scenario di emissione considerato (**Sc**) sia quello che effettivamente descriva quello che accadrà (queste due ipotesi significano in pratica che assumiamo che i dati siano perfetti);
3. che il modello probabilistico usato per descrivere i dati (i.e., **EV**) è quello adeguato.

Allora, cosa sono le probabilità di eccedenza così calcolate? Questo lo possiamo scrivere in termini generici, per un'intensità qualsiasi (**IM**), come:

$$P(\mathbf{IM} \geq \mathbf{IMt} \mid \mathbf{M} = \text{"vero"}; \mathbf{Sc} = \text{"vero"}; \mathbf{EV} = \text{"vero"})$$

dove **IMt** si riferisce a una certa soglia di intensità, ed il simbolo **|** significa "condizionato a". In pratica, in questo esempio si può vedere come il risultato probabilistico ottenuto ha un senso ed è più chiaramente indicato rendendo comprensibili tutti i condizionamenti impliciti nel risultato (che per un osservatore esterno possono non essere chiari). Lo stesso discorso è valido per le incertezze quantificate, visto che così è possibile capire i principali elementi d'incertezza che sono stati propagati nel risultato finale.

Se si può dire che sul clima futuro si possono effettuare delle ipotesi affette da incertezza, sarebbe però opportuno quantificare sempre quello che è quantificabile ed evidenziare i condizionamenti e le ipotesi date per certe nelle stime.

Bibliografia

1. IPCC (1996) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton, J.T., et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 572 pp.
2. IPCC (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton, J.T., et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
3. IPCC (2012) *Climate Change: New Dimensions in Disaster Risk, Exposure, Vulnerability, and Resilience. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Allen S.K., Tignor M., Midgley P.M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
4. IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S.,

- Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
5. Nakićenović N., Swart R. (eds.) (2000) *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 599 pp.
 6. Christensen J.H., Christensen O.B. (2007) A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century, *Climatic Change*, 81(S1), 7-30.
 7. IPCC (2012) *Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment*. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Allen S.K., Tignor M., Midgley P.M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
 8. Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E. (2007) *Climate models and their evaluation*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 589-662.
 9. Knutti R., Abramowitz G., Collins M., Eyring V., Glecker P.J., Hewitson B., Mearns L. (2010) *Good practice guidance paper on assessing and combining multi model climate projections*. In: *Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi-Model Climate Projections*, Stocker T.F., Dahe Q., Plattner G.-K., Tignor M., Midgley P.M. (eds.), IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, pp. 1-13.
 10. Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.C. (2007) *Global climate projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, pp. 747-845.
 11. Tebaldi C., Knutti R. (2007) The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365(1857), 2053-2075.
 12. Tebaldi C., Sanso B. (2009) Joint projections of temperature and precipitation change from multiple climate models: a hierarchical Bayesian approach, *Journal of the Royal Statistical Society Series A – Statistics in Society*, 172(1), 83-106.
 13. Coles S. (2001) *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 208 pp.
 14. Carter T.R., Jones R.N., Lu X., Bhadwal S., Conde C., Mearns L.O., O'Neill B.C., Rounsevell M.D.A., Zurek M.B. (2007) *New assessment methods and the characterisation of future conditions*. In: *Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., Van Der Linde P.J., Hanson C.E. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 133-171.
 15. CLUVA (2012): *Climate Change and Urban Vulnerability in Africa*, sito web visitato il 21/09/2012: <http://www.cluva.eu>.

Probabilità e Protezione Civile

Mauro Dolce, Daniela Di Bucci

Le previsioni probabilistiche a medio e lungo termine di catastrofi, quali ad esempio i terremoti, sono un importante strumento di prevenzione e mitigazione del rischio. Oggi, con la nuova legge 100/2012 si perviene ad un avanzamento nell'idea di previsione contenuta nella legge 225/1992, con l'introduzione del concetto di "identificazione degli scenari di rischio probabili".

Venti anni fa, con la legge 225/1992, veniva istituito il Servizio Nazionale della Protezione Civile (SNPC) al fine di tutelare l'integrità della vita, i beni, gli insediamenti e l'ambiente dai danni o dal pericolo di danni derivanti da calamità naturali, da catastrofi e da altri eventi calamitosi. Da allora i compiti del SNPC, sotto il coordinamento del Dipartimento della Protezione Civile (DPC), riguardano le attività volte alla previsione e alla prevenzione dei rischi, al soccorso delle popolazioni sinistrate e ad ogni altra attività necessaria e indifferibile, diretta al contrasto e al superamento dell'emergenza e alla mitigazione del rischio. La gestione delle informazioni probabilistiche da parte del SNPC e, in particolare, del DPC riguarda soprattutto la previsione e la prevenzione dei rischi.

Oggi, con la nuova legge 100/2012 si perviene ad un avanzamento nell'idea di previsione contenuta nella legge 225/1992, con l'introduzione del concetto di "identificazione degli scenari di rischio probabili", intendendo come attività di previsione quelle dirette «dove possibile, al preannuncio, al monitoraggio, alla sorveglianza e alla vigilanza in tempo reale degli eventi e dei livelli di rischio attesi». Inoltre, vengono rese esplicite le singole attività volte a evitare o a ridurre al minimo la possibilità che si verifichino danni conseguenti agli eventi. Queste attività, "non strutturali", sono: l'allertamento, la pianificazione

dell'emergenza, la formazione, la diffusione della conoscenza della protezione civile, l'informazione alla popolazione, l'applicazione della normativa tecnica e le esercitazioni. In ognuno di questi punti il DPC ha a che fare con informazioni di natura probabilistica su cui basare le proprie attività, decisioni e comunicazioni, specie verso l'esterno.

Le previsioni probabilistiche a medio e lungo termine di catastrofi, quali ad esempio i terremoti, sono un importante strumento di prevenzione e mitigazione del rischio. Come suggerito anche nei più recenti studi di sintesi (Commissione ICEF [1]), la scala temporale di una previsione probabilistica è chiaramente molto significativa nella determinazione del suo valore ai fini decisionali. Un esempio è rappresentato dalle mappe di pericolosità sismica, che sono dei modelli di previsione probabilistica a lungo termine dei terremoti. Indipendenti o dipendenti dal tempo, in Italia come in ambiti internazionali, queste mappe costituiscono le basi per la pianificazione di emergenza, per la formazione, la diffusione della conoscenza, l'informazione alla popolazione, nonché per l'applicazione della normativa tecnica. Ad esempio, la previsione probabilistica a lungo termine dei terremoti per l'Italia fornisce una probabilità, approssimativamente del 15%, che ci sarà un terremoto di magnitudo 6 da qualche parte nel Paese durante l'anno successivo alla data considerata. Questo

tipo di previsioni fornisce un importante dato di ingresso per le norme tecniche per le costruzioni, poiché la pericolosità sismica è alta quando integrata su decenni di vita di un edificio.

Anche per quanto riguarda la pianificazione di emergenza alla scala nazionale, nel tracciare le linee per la definizione dell'intervento del SNPC in caso di terremoti di rilevanza nazionale il DPC ha adottato di recente un approccio innovativo, che si basa non più su singoli scenari di evento, ma sulla mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale (Ordinanza PCM del 28 aprile 2006, n. 3519), quindi su un dato di tipo probabilistico. Questa scelta si fonda sulla considerazione che, come recentemente accaduto in Nuova Zelanda (2010-2011) e, in passato, in molte zone del territorio italiano, eventi sismici con magnitudo confrontabili, accaduti ad alcune decine di chilometri di distanza, hanno determinato scenari molto diversi tra loro sia per numero di vittime che per entità del danno. Alla scala nazionale, è evidente la scarsa significatività del singolo scenario rispetto al quadro generale della pericolosità. Ciò ha suggerito un cambio di strategia nella definizione dei piani di emergenza nazionali, che non possono guardare al singolo evento (altro sarebbe un piano di emergenza a livello comunale o provinciale) ma devono essere finalizzati a un intervento efficace ed efficiente a fronte di un terremoto che possa verificarsi dovunque nelle aree di maggiore pericolosità sismica. Ne consegue che l'elemento guida nello sviluppo di piani nazionali deve essere la pericolosità (basata sull'intensità di possibili scosse con prefissata probabilità), valutata in corrispondenza di strutture di interesse per la gestione dell'emergenza (quali porti, aeroporti, linee di comunicazione, strutture strategiche, ecc.), insieme alla vulnerabilità e quindi al rischio di queste ultime. In caso di evento, sulla base di queste informazioni si possono

fare valutazioni immediate, ancorché da verificare sul territorio, sull'agibilità o la disponibilità di queste strutture, e studiare strategie alternative in relazione a diversi scenari di scuotimento.

La più significativa prospettiva futura per le finalità di protezione civile è però rappresentata dall'utilizzo di previsioni probabilistiche a breve termine, per eventi ad alta e bassa probabilità di accadimento, ma comunque caratterizzati da gravi conseguenze in caso di occorrenza.

Per quanto riguarda i vulcani, ad esempio, la prospettiva decennale voluta dal DPC per i progetti di ricerca che finanzia attraverso l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia pone come uno degli obiettivi prioritari la valutazione della pericolosità vulcanica in termini probabilistici. Questo approccio è già in via di sviluppo per alcuni aspetti specifici, come la pericolosità da caduta di cenere e da colate piroclastiche per eruzioni quali ad esempio quelle sub-Pliniane, ma il fine ultimo è di estenderlo anche ad altri tipi di eruzione. L'obiettivo è di realizzare simulazioni e mappe di pericolosità basate sulle probabilità di occorrenza dei diversi scenari eruttivi. Per le finalità operative del DPC, in particolare, la sfida è quella di migliorare le conoscenze su tematiche quali la probabilità di occorrenza di un'eruzione e delle diverse tipologie eruttive attese; sulla distribuzione probabilistica di nuove bocche eruttive in caldere come i Campi Flegrei; sulla pericolosità connessa alla rimobilizzazione della cenere depositatasi in diversi momenti, più o meno vicini nel tempo, sui versanti dei rilievi; sulla durata dei fenomeni eruttivi e il volume di magma coinvolto; sulla probabilità di occorrenza dei diversi fenomeni sin-eruttivi associati (emissioni gassose, terremoti, instabilità di versante, ecc.).

Un altro tema di frontiera per gli aspetti di protezione civile in Italia è quello legato al rischio da tsunami e, anche in



Comitato operativo della Protezione Civile (da <http://www.protezionecivile.gov.it/>).

questo caso, i tempi brevi che caratterizzano l'attraversamento di un bacino limitato come quello del Mediterraneo da un'onda di maremoto impongono dei vincoli alla risposta del SNPC. L'attivazione del sistema non può avvenire altro che, in caso di occorrenza di un terremoto, sulla base di una stima probabilistica della sua tsunamigenicità, ottenuta da una valutazione delle sue caratteristiche spaziali e di magnitudo, non potendosi attendere i tempi necessari ad avere la certezza dello tsunami in corso per poter intraprendere delle azioni di protezione civile.

Argomento che richiede un approfondimento se possibile ancora maggiore è la previsione probabilistica operativa a breve termine dei terremoti. Infatti, al di là del dibattito scientifico ancora aperto sulle diverse metodologie di calcolo per questo tipo di previsioni, dal punto di vista della protezione civile l'aspetto sostanziale di questa materia risiede nel fatto che, per un dato giorno, le possibilità di accadimento di una scossa di terremoto potenzialmente dannosa sono estremamente basse. Le attuali politiche di previsione probabilistica devono quindi essere adattate ad un contesto di bassa probabilità, qual è l'Italia. In questo quadro, l'interpretazione ai fini

operativi delle previsioni probabilistiche a breve termine è problematica, poiché le probabilità di accadimento di un forte terremoto possono variare localmente di giorno in giorno anche di uno o due ordini di grandezza, ma rimangono tipicamente molto basse in senso assoluto.

Come descritto nel rapporto conclusivo della Commissione ICEF [1], in pochissime regioni sismicamente attive, come ad esempio in California, si fa ordinariamente uso delle previsioni probabilistiche operative dei terremoti. Gli esperti di previsioni probabilistiche generalmente operano in un contesto di bassa probabilità, e raramente hanno occasione di elaborare probabilità a breve termine per eventi rilevanti maggiori di un dato (basso) valore percentuale. Anche in questi casi, comunque, l'uso di modelli formalizzati è limitato e la diffusione pubblica delle informazioni sulle previsioni probabilistiche piuttosto sporadica.

Invece, la previsione probabilistica a breve termine degli *aftershock* che seguono un terremoto forte è effettuata in diversi paesi, anche se la sua implementazione in termini operativi, che comprende il regolare aggiornamento su scala nazionale, non è ancora completa in nessuno dei paesi con le competenze più avanzate su questi aspetti; questi ultimi, però, ne sostengono con forza la ricerca.

I pochi esempi sinora esposti sono già sufficienti a mostrare come una serie di incertezze intrinseche nell'utilizzo di informazioni di tipo probabilistico debbano essere necessariamente affrontate, da parte di chi sulla base di queste dovrà prendere delle decisioni, attraverso la definizione di azioni standard, definite in tempo di normalità e condivise con il SNPC. In questo modo possono essere ridotti i margini di incertezza nella concitata fase di emergenza ed essere adottate azioni indipendenti dal decisore che, in

quel momento, sarà chiamato a rappresentare il sistema in un quadro definito di assunzione di responsabilità.

In effetti, una delle mete più importanti da raggiungere nell'uso operativo delle previsioni probabilistiche è la loro trasposizione in attività decisionali. Ad oggi non esiste un approccio formale per convertire le probabilità di occorrenza dei terremoti in azioni di mitigazione. **Una strategia che può assistere gli organi decisionali è la predisposizione di soglie di probabilità di accadimento dei terremoti a cui associare specifiche azioni di mitigazione minime, tenendo conto del loro impatto sulla popolazione e sulle attività dell'uomo.** Queste soglie dovrebbero trovare supporto in analisi oggettive, per esempio di tipo costi/benefici, al fine di giustificare le azioni intraprese in un processo decisionale. È chiaro, pertanto, che soglie di probabilità e azioni ad esse collegate devono essere definite e adottate attraverso un ampio percorso di condivisione in tempo di normalità. Tuttavia, stanti i bassi valori di probabilità attesi, ci si può aspettare che le azioni siano ad alta efficacia ma a basso impatto. Un esempio assai significativo è rappresentato dalle soglie adottate dal Consiglio della California di Valutazione delle Predizioni dei Terremoti (CEPEC), un consiglio di esperti istituito formalmente nel 1976. A seguito di terremoti forti o in altre situazioni di attività sismica in rapida evoluzione, il CEPEC generalmente – ma non regolarmente – aderisce a un protocollo di notifica che stabilisce delle categorie di allerta per terremoti con $M \geq 7$ secondo quattro livelli di probabilità di accadimento in 3 giorni: D (0,1-1%), C (1-5%), B (5-25%), e A (> 25%). Da quando il protocollo è stato adottato, circa venti anni fa, la soglia di probabilità di Livello A del 25% non è mai stata raggiunta, e la soglia di probabilità di Livello B del 5% è stata superata solo due volte. Livelli C di al-

lerta sono stati emessi in una decina di occasioni; questi allerta illustravano in termini probabilistici la possibile evoluzione del fenomeno in atto e hanno permesso alle autorità di intraprendere un'azione di risposta al considerevole interesse pubblico che si era manifestato a seguito di scosse non dannose ma percepite dalla popolazione. Per le più comuni situazioni di Livello D, non vengono emessi pubblicamente allerta formali. Per effettuare un paragone con i valori di probabilità sul nostro territorio nazionale basti considerare che, nelle ore immediatamente precedenti al terremoto di L'Aquila del 6 aprile 2009, la probabilità di avere terremoti di magnitudo superiore a 5,5 nelle 24 ore successive era pari allo 0,05%.

Un utilizzo corretto e tempestivo di informazioni di natura probabilistica per finalità di protezione civile non può prescindere, naturalmente, da una proficua e continua interazione con la comunità scientifica nell'ambito del SNPC, sia in tempo di normalità che in fase di emergenza. In tempo di normalità, infatti, è necessario sviluppare una solida comunione di intenti che porti ad una scelta condivisa dei parametri e delle incertezze nel passaggio delle informazioni probabilistiche, su cui poi si baseranno le decisioni e le azioni da intraprendere in fase di emergenza.

Questo rapporto tra scienziati e *decision-makers* è caratterizzato da una forte dinamicità. Da una parte, come ben illustrato da Eric Leroi [2], gli scienziati spesso modellano eventi passati per comprenderne la dinamica, mentre chi decide ha bisogno di modelli descrittivi di qualcosa che accadrà in futuro. Il quadro che esce dall'approccio probabilistico, poi, è per propria natura affetto da incertezze, mentre la decisione da prendere si riconduce quasi sempre a un sì o un no certo. Anche il problema del tempo è significativo: gli scienziati



Campo tende della Protezione Civile (da <http://www.protezionecivile.gov.it/>).

necessitano di tempi relativamente lunghi per avere più dati e ridurre quindi le incertezze, preferendo aspettare piuttosto che sbagliare, come sottolineato da Gordon Woo [3]. Per contro, chi decide è in genere chiamato a dare una risposta immediata, ancorché basata spesso su basse probabilità di occorrenza corredate da larghe incertezze. Ci sono, dunque, ancora molti spazi di azione in cui chi decide e chi fa ricerca possono progredire insieme, e tra questi spazi non da ultimo quello della comunicazione, innanzi tutto tra comunità scientifica e DPC. Da una parte, infatti, chi decide deve essere consapevole del significato delle informazioni probabilistiche che riceve e delle relative incertezze. Deve essere perciò un utente esperto e preparato a maneggiare questo tipo di informazioni comprendendone potenzialità e limiti. Dall'altra parte, la comunità scientifica è chiamata ad indirizzare meglio la propria ricerca su temi dettati dalla "domanda" di protezione civile, e ad operare uno sforzo per comunicare i risultati delle proprie analisi in termini di proposte e soluzioni, indispensabili per chi su quelle basi deve gestire popolazioni e territorio.

Un ultimo passaggio importante per la gestione delle informazioni proba-

bilistiche nelle attività di protezione civile è quello della loro comunicazione al pubblico. Questo tema, che la protezione civile condivide con altri ambiti, primo tra tutti quello medico, ma anche quello industriale, rappresenta un vero e proprio campo di ricerca che si basa sull'integrazione di diversi elementi. Il primo elemento è senza dubbio la padronanza tecnica, da parte di chi comunica, del significato e delle implicazioni delle informazioni probabilistiche di cui è chiamato a dare spiegazione e a rispondere, unita alla capacità di rendere i concetti comprensibili ad una platea non specialistica. Il secondo aspetto riguarda, per contro, la dimestichezza che ha la popolazione a raffrontarsi con un'informazione probabilistica. Infatti, se da una parte il pubblico è ormai maturo per sapere che un evento pericoloso "è probabile", dall'altra lo è meno per gestire operativamente questo tipo di informazioni e soprattutto le loro variazioni nel tempo. Questo punto è oggetto di un percorso di formazione e di informazione che il DPC e la comunità scientifica che lo affianca hanno intrapreso da anni con convinzione, e che mantengono vivo anche in momenti di tagli della spesa pubblica come quelli che stiamo vivendo. Bisogna poi aggiungere che non sempre la popolazione di una certa area ha una percezione del rischio adeguata alla situazione in cui si trova: è il caso di molte zone soggette, ad esempio, ad una pericolosità sismica moderata (che però può comportare un rischio elevato a causa dell'alta vulnerabilità del patrimonio edilizio), come anche di aree vulcaniche attive in cui l'edificio vulcanico non presenti una morfologia ben riconoscibile (come nel caso delle caldere rispetto ai classici e ben visibili coni) o i tempi di ricorrenza delle eruzioni siano lunghi. A questo si aggiunge che, a parità di probabilità di accadimento di un certo evento, esso viene percepito come più o meno peri-

coloso in funzione di aspetti di natura prettamente psicologica, come la dimestichezza che si ha con esso (ad esempio ammalarsi a causa del fumo), o la volontarietà con cui ci si espone ad esso (ad esempio subire un incidente in automobile), che rendono l'assunzione del rischio consapevole e quindi meglio accettata. Anche questi pochi esempi rendono chiaro che, nel rilasciare informazioni probabilistiche sull'occorrenza di eventi pericolosi, un'efficace comunicazione al pubblico può essere conseguita solo applicando al contenuto informativo di natura tecnica i principi stabiliti dalla ricerca nelle scienze sociali.

Bibliografia

1. Jordan T.H., Chen Y.-T., Gasparini P., Madariaga R., Main I., Marzocchi W., Papadopoulos G., Sobolev G., Yamaoka K., Zschau J. (2011) Operational Earthquake Forecasting – State of Knowledge and Guidelines for Utilization. Report by the International Commission on Earthquake Forecasting for Civil Protection. *Annals of Geophysics*, 54 (4). doi: 10.4401/ag-5350.
2. Leroi E. (2010) *Landslide Risk Assessment & Decision Making. Lectio magistralis*, 85° Congresso Nazionale della Società Geologica Italiana. Pisa, 6-8 settembre 2010.
3. Woo G., 2011. Earthquake decision making / Processo decisionale in caso di terremoto. *Ambiente Rischio Comunicazione*, 1, 7-10. ISSN 2240-1520.

Decidere nell'incertezza

Guido Bertolaso

Per molti fenomeni oggi è possibile una attività di previsione scientifica, basata su modelli e simulazioni sempre più articolate e complesse. Per altri, come i terremoti, la scienza riconosce l'impossibilità di prevedere il luogo, l'intensità ed il tempo del loro verificarsi. La decisione nell'incertezza non rappresenta un particolare problema se si colma la distanza tra istituzioni e scienza.

Decidere nell'incertezza. Non è una situazione rara, è sperimentata da ogni essere umano ogni volta che si trova di fronte ad alternative che riguardano il futuro, che riguardano possibili comportamenti tali da ottenere conseguenze ed effetti anche opposti, che riguardano problemi complessi dei quali non tutte le dimensioni sono note.

Noi spesso usiamo come sinonimi i verbi decidere e scegliere, ma in origine i riferimenti dei due vocaboli erano diversi. Consultando un dizionario etimologico, si scopre che "scegliere" viene da eligere, optare per la parte migliore di qualcosa, mentre "decidere" deriva da de-cidere, che vuol dire tagliare, mozzare, indicando un gesto risolutivo ma brusco, un gesto di separazione e di divisione, un gesto irrimediabile.

È questo l'aspetto più complicato del "decidere", perché tornare sulle proprie decisioni spesso è letteralmente impossibile: non si tratta infatti del semplice privilegiare un aspetto su altri, ma di staccare il corso degli eventi da ogni altro possibile decorso, con conseguenze che diventano inevitabili, non controvertibili.

Ed è per questo che gli uomini, da sempre, hanno cercato mille vie e modi per ridurre l'incertezza, che rende ancor più drammatica la decisione: viste le conseguenze, come dicevamo irrimediabili, è chiaro che l'incertezza, generata dalla mancata conoscenza dei futuri svilup-

pi della decisione, dall'impossibilità di conoscere con sufficiente affidabilità gli esiti futuri dell'opzione compiuta la rende simile ad una sorta di scommessa, per sua natura incerta e aleatoria.

Al tempo in cui gli uomini erano convinti che gli esiti delle azioni umane fossero condizionati dal Fato, dal Destino e dal volere degli Dei, la riduzione dell'incertezza era affidata alle pratiche divinatorie delle caste sacerdotali: la cosa importante, per decidere, era sapere in anticipo come la pensavano gli Dei, come dal cielo veniva valutata la decisione che si intendeva adottare. Questa pratica non è morta neppure oggi: in molte culture l'opzione tra più alternative possibili viene definita e sostenuta ricorrendo alla funzione sacerdotale, incaricata di indagare e rivelare la benevolenza divina. Ho incontrato questa pratica in Sri Lanka, quando la Protezione Civile Italiana gestì lavori per qualche decina di milioni di euro in opere realizzate in favore delle vittime dello tsunami del dicembre 2004. Prima di avviare un qualsiasi progetto, prassi voleva che un monaco buddista approvasse la data di avvio del cantiere e desse indicazioni precise sull'orientamento delle abitazioni e delle strutture da realizzare, per evitare ogni difficoltà nel completamento dei lavori iniziati dovuta alla non realizzata armonia e al mancato accordo tra cielo e terra.

La protezione dai disastri, nella nostra Europa, è stata chiesta al cielo per se-

coli, finché non si arrivò ad ammettere che i disastri naturali e le catastrofi non erano imputabili né al disdegno celeste, né alla crudeltà di una Natura antropomorfizzata ostile agli uomini, gelosa e vendicativa, ma più semplicemente a decisioni umane avventate e irresponsabili, irrispettose delle leggi della natura. Fu il terremoto di Lisbona del 1755 a scatenare il dibattito risolutivo sulla questione. I maggiori filosofi e teologi europei si confrontarono aspramente sul tema, sulle ragioni e sulle cause di un disastro – un fortissimo terremoto seguito da uno tsunami – che fece decine di migliaia di morti non solo in Portogallo, ma anche in altri Paesi europei e del Nord Africa, oltre a radere al suolo la capitale lusitana. Tra loro, Voltaire, Leibniz, Rousseau e il giovane Kant.

Le conclusioni cui arrivò il confronto tra le diverse posizioni, che interessò tutta l'Europa per anni, segnarono la sconfitta di coloro che vedevano la causa del disastro nella collera divina e l'affermarsi della tesi antropocentrica dei danni, cui rimediare con maggiori conoscenze scientifiche della natura. Di qui la nascita e il forte sviluppo della sismologia – lo stesso Kant dedicò tre volumi ai terremoti e alle loro cause – ma anche di tutte le altre discipline della ricerca naturalistica.

Il compito di ridurre l'incertezza passò, quindi, dagli esperti di cose del cielo ai conoscitori della natura e degli uomini, agli scienziati. Oggi, a distanza di più di due secoli, siamo ancora allo stesso punto: è la ricerca scientifica, con le sue scoperte e le sue acquisizioni, che ci permette la riduzione dell'incertezza, attraverso informazioni aggiuntive, più accurate e puntuali, sui fenomeni naturali, sulle dinamiche dei processi naturali che abbiamo imparato a definire come rischiosi, sulle loro localizzazioni.

Il concetto di “rischi naturali” nasce dall'incontro tra la conoscenza scientifi-

ca della natura e la nozione di rischio, di origine economica, nata, pare, nell'Italia dei mercanti del millecento e milleduecento e poi diventata, a partire dal '600, la base di calcolo per la determinazione dei valori assicurativi delle merci e delle navi che solcavano, affrontando incognite e pericoli di ogni tipo, le acque degli oceani e dei mari del mondo.

Il rischio naturale, come il rischio legato ad una spedizione marittima, diventa un'entità calcolabile e misurabile, secondo scale e metodi di valutazione prodotti dalla ricerca scientifica. La metodica di base di queste operazioni di “assegnazione di valori” – quantitativi, di frequenza temporale, ecc. – a determinati fenomeni naturali è di natura statistica e probabilistica. Ogni evento è diverso da tutti gli altri e molti aspetti del loro verificarsi non sono noti, ma dall'analisi e dallo studio della ripetizione di serie di eventi dello stesso tipo si rintracciano tratti comuni e costanti, che forniscono importanti elementi di conoscenza sui fenomeni “rischiosi” per l'uomo, per la sua vita, le sue attività e per tutto ciò che è stato costruito per rendere agevole e confortevole ogni funzione della vita personale e collettiva.

Chi decide interventi ed azioni che riguardano la natura e i suoi rischi dispone oggi di una base conoscitiva che i nostri antenati non avevano. Il livello raggiunto dalla conoscenza scientifica dei rischi è oggi, entro soglie probabilistiche note, molto più affidabile rispetto al passato anche relativamente recente, al punto che, per diversi fenomeni, è oggi possibile un'attività di previsione scientifica, basata su modelli e simulazioni sempre più articolate e complesse. Basti pensare all'affidabilità delle previsioni relative ai fenomeni meteorologici, molto più precise oggi di quanto non fosse possibile anche solo dieci anni fa.

Ogni conoscenza scientifica seria enuncia e dichiara i propri limiti, legati ai progressi delle diverse discipline e dei

supporti tecnologici utilizzati: mentre per la meteorologia si tratta di limiti di precisione spaziale della previsione – non è possibile localizzare i fenomeni previsti oltre certe soglie dimensionali del territorio – oppure di possibilità di escludere l'accadimento imprevisto di fenomeni atipici e “fuori serie”, per altre discipline, come la sismologia, la scienza riconosce l'impossibilità di prevedere il luogo, l'intensità ed il tempo di fenomeni catastrofici, per la mancanza di segnali premonitori individuati e verificati nella loro affidabilità.

La decisione nell'incertezza, entro le soglie dell'affidabilità delle informazioni e conoscenze scientifiche che la stessa comunità scientifica riconosce ed ammette, non rappresenta un particolare problema, se il collegamento tra chi studia e in qualche caso prevede e chi decide è funzionale, stabile, collaudato e organicamente costruito e mantenuto in una “rete” di competenze diverse e sinergiche, come quella costruita dalla Protezione Civile in Italia.

È per la sicurezza che mi veniva da questo collegamento organico e consolidato tra chi ha responsabilità di decidere azioni di protezione civile e quanti rappresentano il meglio della conoscenza scientifica sui rischi che, quando rivestivo il ruolo di responsabile della nostra Protezione Civile, ho ripetuto tante volte che un così elevato numero di vittime causate dall'uragano Katrina a New Orleans a fine agosto 2005, fenomeno che per la sua cinematica di movimento ed elevata dimensione spaziale lo rende altamente prevedibile, noi non le avremmo avuto, perché da noi le previsioni, del resto precise ed accurate, di cui disponevano gli americani nei giorni precedenti il disastro avrebbero fatto scattare la macchina dei soccorsi in tempo utile per mettere in salvo la popolazione.

A rendere difficile, oggi, il compito di chi deve decidere nell'incertezza in ma-

teria di rischi naturali non è perciò la conoscenza scientifica, o il fatto che essa produca risultati non certi, ma “solo” probabilistici secondo una scala conosciuta, ma la distanza tra i mondi delle istituzioni da un lato e della scienza dall'altro rispetto a quella che si è venuta affermando come cultura dominante, diffusa, socialmente condivisa, o almeno ad alcuni suoi aspetti particolarmente rilevanti.

Ci siamo abituati ad imputare molti problemi, molte difficoltà della vita di ciascuno di noi e della collettività ad alcuni nuovi concetti, come la globalizzazione, lo spostamento di potere tra la politica e l'economia, il peso delle tecnologie della comunicazione, ed altre voci di questo genere. Con questo insieme di nozioni, alle volte rigorose, ma spesso utilizzate in modo del tutto approssimativo, cerchiamo di spiegare una serie di cambiamenti che constatiamo ogni giorno, che sembrano essersi affermati con una rapidità ineguagliata dalle istituzioni di tutti i settori, da quello statale, a quello politico, a quello religioso, scientifico, culturale.

Il ritardo, lo scarto tra i cambiamenti repentini che abbiamo subito e di cui siamo parte, e le istituzioni che governano e ordinano il cambiamento nelle nostre società, tuttora ancorate a schemi e modelli ormai inefficaci e superati, produce il senso di caos, di confusione, di frammentazione e di “relativismo” che percepiamo come un problema, come un aumento sproporzionato e ingovernabile dell'incertezza, che non viene più dalla nostra scarsa o insufficiente conoscenza dei fatti, della natura, delle cose, dei processi, ma dalla scarsa informazione che abbiamo sui meccanismi di adeguamento personali e collettivi al cambiamento.

È esperienza diffusa la perdita di autorità e di autorevolezza delle istituzioni in tutti i campi, la facilità con la quale si moltiplicano, tra le generazioni e tra i

territori, differenze di stili, di comportamenti, di valori, la perdita di significato di simboli e costruzioni culturali che ci hanno “tenuto insieme” per decenni, la sensazione di una crescita esponenziale della complessità dei problemi. Ogni soluzione di un singolo problema, ogni decisione, ogni azione che riguardi un tema specifico e circoscritto, un singolo aspetto della nostra convivenza, del nostro territorio, della nostra vita collettiva sembra non avere dimensioni sufficienti a durare e produrre gli effetti positivi desiderati. Ogni questione, anche semplice, sembra richiedere risposte di sistema.

Le “riforme”, di cui il sistema politico parla da decenni, diventano sempre più irreali, sempre più complicate, subordinate come sono a condizioni di fattibilità per lo meno improbabili. Il discorso che le riguarda diventa così fine a se stesso, una sorta di palingenesi che tutti assolve e tutto spiega in termini di impossibilità.

La divisione dei compiti tra le istituzioni e tra i vari livelli che ne assicurano la vita – come quelle tra istituzioni politiche e Amministrazioni, tra soggetti istituzionali preposti ai processi decisionali e quelli preposti al controllo e alla verifica – sembra essere saltata con conseguenze non più valutabili, ma solo deprecabili nei termini della reiterata e ormai abituale denuncia della ingovernabilità e dei suoi danni.

Di fronte alla complessità e al crescere della confusione, la reazione di molti è quella di rifuggire le responsabilità, delle quali si percepisce soprattutto il costo personale e sociale. Decidere è diventata un’attività a rischio. Per conseguenza, vediamo che chi dovrebbe decidere è sempre più preoccupato nel farlo. Più che delle conseguenze dirette delle sue decisioni, o mancate decisioni, il decisore si preoccupa delle conseguenze indirette, in termini di grane amministrative o di interventi della magistratura.

Aumenta perciò il ricorso ad una sorta di difesa dalle decisioni, che consiste in primo luogo nel rinviarle fin che è possibile, e poi nel fare ricorso alla copertura di “procedure” che dovrebbero assicurare il buon esito di qualsiasi processo decisionale senza esporre all’assunzione di responsabilità nessuno dei soggetti coinvolti.

La stessa attività scientifica non è più al riparo di quella griglia di rispetto, di attesa e quasi di stupore che l’ha accompagnata per anni, assicurando ai suoi protagonisti la stima dei cittadini e l’apprezzamento della pubblica opinione. I risultati probabilistici oggi non sono più accettati di buon grado, come una conquista, ma sembrano un risultato insufficiente. Dalla scienza la “gente” vuole certezze, non probabilità; dalle istituzioni, decisioni che sollevino i singoli e le collettività dagli effetti negativi di scelte passate, magari reiterate per anni o decenni.

Quando la certezza non c’è, quando il disastro si verifica, c’è ormai sempre qualcuno che lo descrive e lo analizza a posteriori come un disegno perfettamente chiaro ed esplicito, che solo la cattiva intenzione, gli interessi nascosti o l’insufficienza professionale di chi lo ha guardato ex ante non ha permesso di riconoscere e capire. I “media”, sempre a caccia di emozioni forti e di occasioni di contrasto e di conflitto, molto più vendibili all’opinione pubblica che le semplici, dure verità, enfatizzano spesso queste posizioni.

Del resto, la natura probabilistica di molte conoscenze sui rischi comporta la necessità di pronunciamenti scientifici che hanno la stessa natura delle decisioni, comportano una assunzione di responsabilità legata alla necessità di interpretazioni e letture dei dati non automatiche, ma filtrate attraverso la conoscenza e l’esperienza dello scienziato. La conseguenza, anche nel mondo scientifico, è la stessa che si verifica tra

i decisori: grande preoccupazione nel proteggersi dalle conseguenze indesiderate di ogni pronunciamento, di ogni analisi, di ogni previsione.

Nella professione medica, ormai, ogni singola decisione del medico è subordinata all'esplicita accettazione, da parte del paziente, delle sue possibili conseguenze negative. Le mille firme richieste a chiunque debba essere sottoposto ad un intervento, ad un esame, ad una cura importante non hanno alcuna efficacia terapeutica, ma soltanto quella di valere come protezione di chi, per missione e mestiere, deve adottare decisioni importanti per la salute e la vita di un altro. La distonia tra le attese dell'opinione pubblica, che reagisce all'aumentata incertezza della vita quotidiana con un forte aumento della domanda di assicurazioni e di certezze, e gli operatori della scienza e delle istituzioni è certamente cresciuta negli ultimi anni, alimentata da un clima culturale che sembra favorire l'immagine e le dimensioni virtuali alla realtà, alle sue leggi, alle sue implacabili consequenzialità.

Interi mondi, come quello politico, hanno reagito alla diminuzione di potere reale trasferendosi sul piano della virtualità e dell'immagine. Il voto oggi non premia chi ha fatto e chi fa, ma chi ha saputo raccontarsi meglio, suscitare sogni, vendere speranze ed illusioni, nascondere la crudezza delle situazioni reali. È più facile promettere che realizzare, è più facile immaginare mondi inesistenti che studiare e governare l'unico mondo reale.

La scienza non può permettersi questo percorso, strettamente legata com'è ad un positivismo genetico che la obbliga a confrontarsi continuamente con la realtà. Ma la strada è aperta per personaggi che si autodefiniscono "scienziati", ma rinnegano nei loro comportamenti la natura sociale e collettiva della conoscenza scientifica. Il lavoro dei singoli assume valore e significato quando è riconosciu-

to, discusso ed infine accettato dalla comunità dei pari. Senza questo passaggio non si ha scienza, ma si possono avere risultati di ricerca abbastanza interessanti per chi ha fame di emozioni e non di conoscenza. La via dell'accademia e dei riconoscimenti scientifici per costoro è chiusa, ma resta aperta quella della notorietà ottenuta grazie all'adozione da parte del sistema dei media o di qualche parte di esso.

Chi resta fedele ad un approccio positivista, così strettamente legato all'esperienza culturale dell'Occidente negli ultimi secoli, oggi ha difficoltà maggiori che in passato nello svolgere senza conseguenze negative la propria attività. Resta vero però che è grazie ai tanti che, nonostante tutto, ancora non hanno abdicato dalla loro funzione di decisori e di scienziati che la nostra società continua a funzionare.

Le sfide di oggi, la cresciuta complessità dei problemi, non si affrontano con la fuga. Chi si considera impegnato al bene comune non dispone di vie di fuga facili. La maggiore complessità e i cambiamenti si affrontano aumentando gli sforzi per conoscere meglio la realtà, per adeguare i metodi e i paradigmi della conoscenza, per aumentare la capacità di controllare valori e parametri di quantità sempre crescenti di dati. La tecnologia, in particolare quella informatica, in questo ha dato agli scienziati un supporto determinante negli ultimi due decenni, aumentando a dismisura le capacità di raccolta, trasmissione ed analisi dei dati. Grandi attese si possono nutrire nella prospettiva di una cresciuta disponibilità e capacità di approccio interdisciplinare ai problemi, che aiutano a superare i limiti dell'autoreferenzialità di tante discipline. Molte cose buone potranno venire da un'attenzione maggiore della scienza ai temi della comunicazione, attraverso lo sforzo di adottare non solo il linguaggio che si usa tra pari ma anche canoni di comunicazioni adatti

a raggiungere direttamente l'opinione pubblica.

Nessuno però si aspetta oggi, dalla scienza, un mutamento di approccio e di metodo tale da far dimenticare il calcolo probabilistico per assestarsi sulla via delle affermazioni apodittiche e incontrovertibili, delle certezze. Sarebbe bello e desiderabile se ciò avvenisse, ma soltanto per tutti coloro che non vedono l'ora di poter abbandonare a qualche sistema automatico il peso e la responsabilità delle decisioni, che contengono una dose insopprimibile di assunzione di rischio, di proiezione di esperienza e conoscenza personali, di incertezza riguardo agli esiti delle decisioni. La realtà dei fatti va in tutt'altra direzione: la ricerca scientifica, dopo Einstein, si è avvicinata più alla filosofia che all'ingegneria, senza però rinunciare ai paradigmi di fondo di questa attività dell'umana conoscenza.

Ho sperimentato di persona quanto possono essere difficili e faticose da sopportare molte delle conseguenze negative alle quali ho prima fatto riferimento, generate dai cambiamenti, dai loro riflessi sulla cultura corrente e dalle contraddizioni che ne sono nate. Ho cercato di restare fedele all'impegno di servire il mio Paese e i miei concittadini non rinunciando ad assumere responsabilità dirette, non rinunciando a decidere per governare situazioni e processi complessi, ancorando la mia azione alle informazioni scientifiche di cui disponevo senza cedere alle ansie, alle attese, alle promesse dell'irrazionalità emotiva suscitate e sostenute

dall'industria mediatica, che affida all'andamento dell'audience la decisione di dare più spazio a Piero Angela o a Giacobbo.

Le difficoltà e i problemi che ho incontrato non mi sono venuti dalla qualità e dalla natura delle informazioni che ho ricevuto sui rischi che dovevo affrontare dalla comunità scientifica che si è dedicata allo studio dei rischi. Non è questa l'incertezza che ha pesato sul mio lavoro, ma quella nata dal crescere, accettato da tanti come un'opportunità, del disordine dei ruoli e delle funzioni nel campo delle istituzioni, dall'affermarsi di un modo di guardare ai problemi approssimativo e semplicistico, dalle reazioni feudali di tanti piccoli poteri che si sentono minacciati dal cambiamento.

Sono ottimista, per il futuro. Lo sono perché so che sono tantissimi quelli che, nonostante le difficoltà e a rischio di non avere fama e visibilità, continuano a fare seriamente il loro lavoro. A fare i medici preoccupati di curare i loro pazienti più che della carriera, a fare gli scienziati più preoccupati di venir pubblicati sulle riviste internazionali serie piuttosto che diventare consulenti di una qualche regione, a servire da dirigenti pubblici il Paese badando ai risultati della loro azione piuttosto che alla crescita delle loro reti di amicizie e protezioni.

Fin d'ora possiamo cominciare a ringraziarli per quanto di buono, ed è tanto, che il loro lavoro di oggi consegnerà al nostro futuro.

Divulgazione scientifica e letteratura

Guido Trombetti

Un contributo fondamentale alla divulgazione scientifica può darlo la letteratura. Che è spesso intrisa di sapere scientifico. In particolare molti celebri racconti potrebbero rappresentare un efficace veicolo di divulgazione.

Il dibattito sull'importanza della divulgazione scientifica riprende fiato periodicamente. E con esso quanto abbia più o meno nuociuto alla crescita della cultura nel suo complesso la separazione tra sapere scientifico e umanistico che i più ascrivono a responsabilità di Croce e Gentile. Su ciò poco so e non mi pronuncio. Quello che è certo è che la cultura scientifica non è ancora oggi diffusa come sarebbe necessario. Tempo fa Roland Omnès, fisico teorico di fama, in un'intervista a L'Espresso diceva: «La maggior parte degli individui purtroppo ignora tutto della scienza... Così nessuno sa niente delle leggi fondamentali della scienza, la cui scoperta rappresenta per l'umanità una svolta importante almeno quanto la comparsa del monoteismo».

È insomma il tema della comunicazione tra il mondo della scienza ed i cittadini. La vita è sempre più influenzata dalle conoscenze che si sviluppano nei laboratori. In generale, purtroppo, si tendono a comunicare solo gli aspetti spettacolari degli eventi scientifici. L'immagine della scienza ne risulta distorta. Delle idee alla base del lavoro di ricerca nulla. Si pensi a tutta la tecnologia che accompagna il quotidiano, che usiamo senza la più pallida informazione sui principi che la governano. Eppure essa cambia gli usi, i costumi, il linguaggio. Mi viene in mente sempre lo stesso esempio. Il cellulare. Siamo raggiungibili in ogni

luogo ed in ogni istante. Siamo controllabili, grazie alla scia che esso lascia. Ci spinge a scrivere "ke" invece di "che" e "x" invece di "per". Ma come funziona? Boh! Più importante ancora è l'osservazione che oggi, molto più di ieri, conoscere significa poter scegliere con consapevolezza. E quindi in ultima analisi poter partecipare alla vita democratica. Riflettiamo a quanti sono i temi di rilievo etico e sociale su cui è impossibile assumere una posizione lucida senza avere un'idea del principio scientifico che è alla base del contendere. Le staminali. L'energia. I grandi temi ambientali. **Quello della diffusione della cultura scientifica è una sfida fondamentale a cui gli scienziati ed i mezzi di informazione non possono sottrarsi.** Come osserva Omnès quello che conta non è il suscitare meraviglia bensì **trasmettere il metodo scientifico.** La cui essenza è discutere, ragionare, dubitare. E quindi di conseguenza mettere al riparo dai rovinosi eccessi di ogni tipo di fondamentalismo. Siamo lontani dai tempi arcaici quando la convinzione della pericolosità delle nuove conoscenze era così sentita dagli scienziati da indurli a creare sette segrete. La famosa scuola di Pitagora si vuole fosse un circolo esclusivo. Ai suoi membri era vietato di divulgare le conoscenze sviluppate. La scoperta dei numeri irrazionali era un segreto da custodire gelosamente perché capace di scuotere l'ordine costituito. La visione moderna ribalta tale punto di vista. La

conoscenza va trasmessa a tutti, affinché essa possa essere utilizzata e criticata nelle ipotesi su cui si fonda, nel metodo che impiega, nelle informazioni e nei dati di cui fa uso.

Non si persegue affatto il raggiungimento della verità assoluta. Gli scienziati sostanzialmente creano modelli, cioè semplici schemi, per spiegare i fenomeni. E se compare un fenomeno nuovo, mai osservato prima né spiegabile con il modello in uso cosa si fa? Si cambia (si cerca un nuovo) modello. Senza che ciò significhi che quello precedente era “sbagliato”.

Un contributo fondamentale alla divulgazione scientifica può darlo la letteratura. Che è spesso intrisa di sapere scientifico. In particolare molti celebri racconti. Che potrebbero rappresentare a mio avviso un efficace veicolo di divulgazione.

I racconti, si sa, sono spesso considerati, come genere letterario, figli di un dio minore. Niente a che vedere con il grande romanzo. Eppure ho sempre avuto la sensazione che nulla più di un racconto bello sia il segnale della grandezza di uno scrittore. Sia l'indice di una genialità sintetica e fulminante. Penso ad esempio a *Il procuratore della Giudea* di Anatole France. O a *Il naso* di Gogol. Penso a *Surrasine* di Balzac. Penso allo straordinario *La biblioteca di Babele* di Borges o alla raccolta *Gente di Dublino* di Joice... Leggete *I sette messaggeri* di Dino Buzzati che fa parte dei *Racconti Matematici*. Bellissima raccolta curata qualche anno fa da Claudio Bartocci. Che ospita autori del calibro di Borges, Calvino, Asimov, Cortàzar... Una novella deliziosa, *I sette messaggeri*. Sviluppata su un reticolo matematico. Detta così la cosa, può venire il sospetto di una lettura complicata. Ed invece è esattamente il contrario. Proviamo ad esaminare la matematica del racconto. Ben consci di non rendere un gran servizio alla leggerezza di Buzzati. Un

principe parte per un viaggio alla scoperta del suo regno. Ma più procede innanzi più è assalito dal dubbio «che il regno si estenda senza limite alcuno e che, per quanto io avanzi, mai potrò arrivare alla fine». Il principe è preoccupato di perdere i contatti con i suoi cari. Così

fra i cavalieri della scorta scelsi i sette migliori, che mi servissero da messaggeri... vi spedii il primo, Alessandro, fin dalla sera del mio secondo giorno di viaggio, quando avevamo percorso già un'ottantina di leghe. La sera dopo, per assicurarmi la continuità delle comunicazioni, inviai il secondo, poi il terzo, poi il quarto, consecutivamente, fino all'ottava sera di viaggio, in cui partì Gregorio. Il primo non era ancora tornato.

Ci raggiunse la decima sera, mentre stavamo disponendo il campo per la notte, in una valle disabitata. Seppi da Alessandro che... in una giornata, mentre noi avanzavamo di quaranta leghe lui ne divorava sessanta, ma non di più.

Così fu degli altri. Bartolomeo, partito per la città alla terza sera di viaggio, ci raggiunse alla quindicesima; Caio, partito alla quarta, alla ventesima solo fu di ritorno. Ben presto constatai che bastava moltiplicare per cinque i giorni fin lì impiegati per sapere quando il messaggero ci avrebbe ripresi.

Si tratta di un raffinato esercizio. Che Buzzati inserisce con levità nel racconto. Senza che il lettore, fosse anche il più fiero avversario della matematica, ne riceva alcun fastidio. Proviamo a risolverlo. Con il rischio di far calare il numero di lettori della novella.

Se la velocità della carovana del principe è 1, quella del messaggero è 1,5, dice Buzzati. Il messaggero parte dopo k giorni. Dopo altri n giorni il principe sarà arrivato al punto $(k + n) \times 1 = k + n$. Infatti viaggia a velocità 1. Il mes-

saggero che viaggia a velocità 1,5 in n giorni percorre uno spazio 1,5n. Ma deve prima tornare indietro di k quindi si troverà nel punto 1,5n - k. Perché si incontrino deve essere $k + n = 1,5n - k$. Si trova $n = 4k$. Quindi principe e messaggero si incontrano dopo $k + 4k$ (cioè 5k) giorni!!!
Ogni messaggero raggiunto il principe riparte di nuovo il giorno successivo.

Dopo cinquanta giorni di cammino, l'intervallo fra un arrivo e l'altro dei messaggeri cominciò a spaziarsi sensibilmente; mentre prima me ne vedevo arrivare al campo uno ogni cinque giorni, questo intervallo divenne di venticinque...

In realtà l'intervallo di tempo tra il ritorno di due messaggeri cresce velocemente. Nel primo viaggio è di 5 giorni. Nel secondo di 25. Poi di 125, 625, 3.125, 15.625...

Trascorsi che furono sei mesi l'intervallo fra un arrivo e l'altro dei messaggeri aumentò a ben quattro mesi. Essi mi recavano oramai notizie lontane...

In effetti nel terzo viaggio i messaggeri ritornano al campo ogni 125 giorni. Cioè, più o meno, ad un intervallo di quattro mesi (Buzzati forse sarebbe stato più preciso dicendo "trascorsi che furono otto mesi").

Ma otto anni e mezzo sono trascorsi. Stasera cenavo da solo nella mia tenda quando è entrato Domenico, che riusciva ancora a sorridere benché stravolto dalla fatica. Da quasi sette anni non lo rivedevo... Ripartirà per l'ultima volta. Sul taccuino ho calcolato che, se tutto andrà bene, io continuando il cammino come ho fatto finora e lui il suo, non potrò rivedere Domenico che fra trentaquattro anni. Io allora ne avrò settantadue...

In effetti Domenico arriva nel 3.280-imo giorno. L'ultima volta era partito nel 656-imo giorno. Quindi non si vedevano da $3.280 - 656 = 2.624$ giorni. All'incirca 7,2 anni. Se Domenico riparte il giorno dopo ritornerà nel 16.405-imo giorno. Cioè dopo 13.124 giorni. All'incirca dopo 36 anni. Quindi Buzzati faceva i conti. E poi li tramutava in leggerezza!

Riuscendo in una operazione sublime. Utilizzare la matematica nella sua fine bellezza.

E a proposito della contaminazione tra matematica e letteratura, un altro avvincente racconto che mi viene da ricordare è *L'hotel straordinario* di Stanislaw Lem. Anch'esso contenuto nella già ricordata raccolta *Racconti Matematici*.

È possibile giocare con l'infinito senza annoiare? Lem, grande scrittore di fantascienza, ci riesce. In una lontana galassia vi è un albergo con una straordinaria caratteristica. Un numero infinito di stanze. Presso l'Hotel si tiene un convegno di zoologia cosmica cui partecipano infiniti studiosi. Cioché non vi sono stanze libere. Tutto esaurito. Arriva un ospite di passaggio amico del direttore dell'albergo. Per trovargli posto il direttore ordina al cameriere di sistemarlo nella stanza n. 1. «E l'ospite che è nella 1?» chiede il cameriere. «Sistematelo nella 2, quello che è nella 2 sistematelo nella 3, quello della 3 nella 4 e così via». L'ospite resta incantato dalla particolare proprietà dell'infinito. Con la stessa tecnica se l'albergo avesse avuto un numero finito di stanze l'ospite dell'ultima stanza sarebbe finito fuori dall'hotel. Ciò perché dieci più uno fa undici. Mille più uno fa mille e uno. Invece infinito più uno fa ancora infinito! Il giorno successivo viene chiesto all'ospite di spostarsi nella stanza 1.000.000. La cosa non lo sorprende. Sono arrivati 999.999 zoologi ritardatari. Ed è necessario liberare per ognuno di loro una stanza. Il giorno dopo accade di peggio. In fila alla reception

vi è una infinità di nuovi ospiti. I partecipanti al congresso interstellare dei filatelici. Il problema è molto più complesso. Non si tratta più di trovar posto ad un numero finito di nuovi ospiti bensì ad un numero infinito. Dopo un'ora di impasse il geniale direttore trova la soluzione. «Spostate l'ospite della stanza 1 nella 2, quello della 2 nella 4, quello della 3 nella 6, quello della stanza n nella stanza $2xn$ ». Così si liberano infinite stanze. Tutte quelle dispari. Che sono per l'appunto infinite. In esse si sistemano i filatelici. Ad ogni filatelico viene consegnato un biglietto. Con l'indicazione della stanza. A quello che era al posto n della fila tocca la stanza $2xn-1$. Tutti, filatelici e non, sono sistemati. Finito il convegno gli zoologi partono. Restano così vuote infinite stanze. E la cosa irrita il direttore. Perciò trasferisce l'ospite della 3 nella 2 quello della 5 nella 3 quello della 7 nella 4 e così via. In tal modo nell'albergo risulta di nuovo il tutto esaurito. A quel tempo i costruttori (grandi speculatori intergalattici) avevano edificato (in mancanza di piano regolatore) un'infinità di alberghi con infinite stanze. «Per far ciò avevano smantellato così tante galassie che l'equilibrio intergalattico ne era stato sconvolto... Era stato quindi chiesto loro di chiudere tutti gli hotel eccetto il Cosmos... Al direttore del Cosmos era stato chiesto di spostare tutti gli ospiti da un numero infinito di hotel – ognuno dei quali con infiniti ospiti – ad un unico hotel (il Cosmos) che era già pieno!» Non ci crederete. Gli infiniti ospiti degli infiniti alberghi vengono *comodamente* alloggiati tutti al Cosmos. Come ci si riesce? Se volete saperlo leggete il racconto di Lem.

Il direttore del Cosmos, contento di aver risolto il problema, organizza una festa. Gli occupanti delle stanze pari arrivano in ritardo. E trovano tutte le sedie occupate. Si devono così fare gli opportuni spostamenti per far sedere tutti senza ri-

correre a sedie aggiuntive. Il cuoco aveva preparato esattamente una porzione di gelato a testa. Eppure ogni ospite ne ebbe due. Come mai? «Spero –osserva Lem – che a questo punto il lettore sia in grado di immaginare da solo come questo possa essere successo».

Ma se si parla di letteratura e scienza non si può non fare un rapido riferimento alla Divina Commedia. Dove abbondano riferimenti alla scienza, per quello che al tempo poteva dirsi scienza. Ed alla matematica in particolare. La *forma mentis* di Dante è intrisa di cultura numerologica. I numeri posseggono proprietà simboliche. Ma Dante li usa anche per rappresentare quantità e per fare calcoli.

Lo incendio lor seguiva ogni scintilla;
Ed eran tante, che 'l numero loro
Più che il doppiar degli scacchi s'im-
milla.

(XXVIII – Paradiso)

Per capire dov'è la matematica della terzina bisogna ricordare una leggenda, evidentemente nota a Dante.

Un mercante per distrarre un Faraone ipocondriaco gli spiegò un gioco che aveva inventato. Il gioco degli scacchi. Il Faraone lo trovò molto divertente. E disse al mercante di esprimere un qualunque desiderio. «Voglio tanti chicchi di grano quanti se ne ottengono mettendone 1 sul primo quadratino della scacchiera, 2 sul secondo, 4 sul terzo, 8 sul quarto e così via raddoppiando il numero ad ogni casella». Il Faraone rispose «Sarai accontentato». Ma non aveva fatto bene i conti. Per mantenere la promessa erano infatti necessari $2^{64} - 1$ e cioè 18.446.744.073.709.551.615 chicchi di grano (circa diciotto miliardi di miliardi!). Vale a dire la produzione di grano di tutto il mondo per molti anni! Il numero si ricava effettuando la somma $1 + 2 + 2^2 + 2^3 + \dots + 2^{63}$ che vale $2^{64} - 1$. Basta ricordare una formuletta

mandata certamente a memoria, anche dai dantisti, alle scuole medie. Dante doveva avere un'idea che quel numero fosse enorme. Ma è ben difficile che sapesse calcolarlo.

Eppure non si accontenta. Non raddoppia ad ogni casella (più che il doppiar), ma moltiplica per mille (s'immilla), ovvero: $1 + 1.000 + 1.000^2 + \dots + 1.000^{63}$.

Quanto vale? Circa 10^{189} . Si pensi che una stima del numero di atomi dell'universo dà un massimo di 10^{85} . Verosimilmente Dante voleva riferirsi ad un numero enorme di angeli senza ricorrere all'infinito. Perché l'idea di infinito apparteneva soltanto a Dio.



Caso, caos e decisione

Pietro Greco

Diceva Norbert Wiener, uno che se ne intendeva, che il XX è stato il secolo che ha segnato il passaggio dalla scienza degli orologi alla scienza delle nuvole. Dalla scienza che, dopo aver accettato e per molti versi vinto, la sfida della certezza, si cimenta con la sfida dell'incertezza.

In realtà i guanti a forma di nuvola gettati sul tavolo della conoscenza nel secolo scorso con cui ancora oggi dobbiamo fare i conti sono almeno due. Uno riguarda lo sviluppo interno a diverse scienze, che nel cosmo, nell'universo armoniosamente ordinato e razionalmente descrivibile, ha visto affacciarsi finalmente le nuvole del caos: ovvero dei sistemi dalla dinamica non lineare, dell'evoluzione secondo percorsi non facilmente prevedibile e, infine, della complessità. L'altro guanto riguarda l'irrompere sulla scena della società umana di una serie di problemi – come i cambiamenti del clima – che chiedono ai politici e ai cittadini tutti di confrontarsi con questo caos e di decidere in regime di incertezza.

Per lungo tempo i due guanti della sfida non potevano essere indossati. Cosicché la scienza ha teso a spazzare via il cielo del suo universo meccanico dalle nubi di ciò che è complesso e non lineare, che non funziona appunto come un orologio. Mentre le società umane hanno affrontato i loro problemi, cronicamente caotici, semplicemente senza metodo. Oggi una serie di innovazione tecnolo-

giche – in primo luogo, quelle associate al computer – consente di accettare la doppia sfida: imparare a descrivere in termini scientifici l'universo caotico e imparare a decidere (al meglio) in condizioni di incertezza.

Ma cos'è, dunque, il caos? E perché è così importante occuparsene?

E questo domande, direbbero i filosofi, quale dimensione interessano: quello ontologico o quello gnoseologico? Che, tradotto in parole povere, significa: caos e incertezza sono intrinseci alla natura o sono solo il velo della nostra ignoranza? Non sono problemi astratti. Non solo perché queste domande dividono le comunità di studiosi, ma anche e soprattutto perché sono preliminari alla nostra capacità di cittadini comuni di «decidere in regime di incertezza».

Cerchiamo, allora, di capire cos'è il caos.

Nella cosmologia greca, il *caos* è l'insieme disordinato e indeterminato degli elementi materiali che preesiste al *cosmo*, al tutto meravigliosamente ordinato. Il caos era per i greci la nuvolaglia da cui è emerso quel meraviglioso orologio che è il nostro universo, ordinato e razionale.

Oggi, almeno per i matematici e i fisici, la parola caos ha un significato decisamente meno generale. E anche più deterministico. Il caos, anzi il *caos deterministico*, è la scienza che studia i grandi effetti provocati da piccole cause. O, in termini più rigorosi, l'evoluzione

dei sistemi dinamici non lineari e, comunque, dei sistemi divergenti. Sistemi così sensibili alle condizioni iniziali che la loro evoluzione nel tempo (almeno in un tempo medio-lungo) risulta, di fatto, imprevedibile.

È caotico il sistema clima, probabilmente il sistema geodinamico, lo stesso sistema solare. Sono caotici i sistemi ecologici e le società umane.

Ma, anche se ridimensionato nella sua portata cosmica e ridotto a disciplina matematica che studia solo una parte del tutto, il caos, anzi il caos deterministico, è, a ragione o a torto, uno dei protagonisti della storia scientifica e culturale del Novecento. Almeno della seconda parte del secolo: a partire dagli anni '60 del XX secolo, infatti, il caos deterministico è diventato una disciplina fisico-matematica di successo, che ha prodotto risultati, teorici e applicativi, notevoli.

Che consente (o, almeno, potrebbe consentire) ai politici e ai cittadini tutti di prendere decisioni migliori in regime di incertezza.

Si dice che, il *caos* (nella sua accezione moderna) sia apparso per la prima volta sulla scena a Boston, presso il Massachusetts Institute of Technology, nell'inverno del 1961, sul computer di un meteorologo: Edward Lorenz. L'ignaro studioso si accorge che basta modificare di un decimillesimo il valore di uno solo dei tanti parametri che descrivono un sistema climatico relativamente semplice, perché il calcolatore in breve tempo fornisca un'evoluzione delle condizioni meteorologiche del tutto diversa e inattesa.

Basta modificare leggermente le condizioni iniziali del sistema, perché la sua evoluzione *diverga*.

Le drammatiche differenze tra quei due sistemi meteorologici che partivano da condizioni iniziali quasi simili, apre la mente di Edward Lorenz e sancisce il successo di una metafora: basta dunque il battito d'ali di una farfalla in Amazzo-

nia, pensa e scrive il meteorologo texano, per scatenare un temporale a Dallas.

E poiché nessuno può prevedere se e quando una farfalla batte le ali in Amazonia, né soprattutto computare tutti i battiti d'ali delle farfalle, amazzoniche e non, nessuno, ne conclude Lorenz, può prevedere con certezza se di qui a qualche settimana ci sarà o meno un temporale su Dallas.

L'importanza della scoperta e della metafora di Lorenz non sta nel fornire una valida (e comoda) giustificazione teorica ai servizi meteorologici, che ancora oggi si dicono incapaci di prevedere che tempo farà tra due o tre settimane a Roma o in California. All'inopinata scoperta dell'*effetto farfalla* si attribuisce un ruolo nella storia e nella sociologia della scienza ben più pregnante. Si dice che con essa abbia avuto virtualmente inizio lo sviluppo, fragoroso, di una nuova disciplina scientifica: la scienza del caos, appunto. E che quel battito d'ali sul computer di Lorenz abbia segnato una delle più grandi, se non la più grande frattura epistemologica nella fisica di questo secolo. Perché avrebbe sconfitto definitivamente il determinismo e la causalità rigorosa della meccanica classica, dimostrando sul campo che l'evoluzione dei sistemi dinamici non lineari e comunque dei sistemi divergenti, cioè di gran parte dei sistemi che operano nel mondo macroscopico, è imprevedibile.

In realtà entrambe queste affermazioni non sono del tutto corrette. E impongono alcuni puntualizzazioni.

1. La scoperta del *caos* operata negli anni '60 è in realtà una riscoperta.
2. La riscoperta del *caos* non rappresenta una frattura epistemologica. Né ripropone in termini nuovi il problema del determinismo. Si limita a prendere atto (e non è poco) che ora è possibile confrontarsi con problemi un tempi giudicati intrattabili.
3. La riscoperta del *caos* difficilmente può risolvere l'aporia tra la reversibi-

- lità del tempo conosciuta dalla fisica e l'irreversibilità del tempo che noi sperimentiamo; né fornisce una spiegazione esaustiva della complessità evolutiva dell'universo e delle sue singole parti.
4. La riscoperta del *caos* non è, tuttavia, né una boutade né una semplice moda. Essa rappresenta, probabilmente, una frattura sociologica. Perché ha contribuito non poco a rinnovare gli interessi (scientifici e filosofici) di una parte della comunità scientifica, e della comunità fisico-matematica in particolare, allargandoli da un lato allo studio, trascurato in passato, dei sistemi più complessi (le nuvole di Wiener) e dall'altro a rimuovere (definitivamente?) un mito non della scienza, ma di una certa filosofia scienziata (propria magari anche di qualche scienziato) dell'Ottocento: il mito dell'universo orologio, ovvero della assoluta prevedibilità della natura e delle sue singole parti, nell'accezione gnoseologica del termine, ovvero nell'accezione che ne danno i filosofi che si occupano della teoria della conoscenza. L'uomo può prevedere tutto, in linea di principio, con precisione se non assoluta certo linearmente crescente.

La riscoperta del caos

Non è stato certo Edward Lorenz a scoprire la dinamica non lineare di alcuni sistemi e le sue drammatiche conseguenze. Molto prima, tra il serio e il faceto, Blaise Pascal, che nel XVII secolo si è occupato del caso e ha proposto una teoria matematica della probabilità, aveva fatto notare che:

Se il naso di Cleopatra fosse stato diverso, a cambiare sarebbe stata l'intera faccia del mondo.

D'altra parte il senso comune conosce da sempre l'estrema sensibilità alle condizio-

ni iniziali e, quindi l'instabilità, di alcuni dei sistemi naturali che ci circondano. Ivi inclusi i sistemi creati dall'uomo. Tutti noi abbiamo la percezione di come, a volte, basti un dettaglio piccolo e insignificante per modificare la storia di intero popolo. Recita l'antica filastrocca:

Per colpa di un chiodo si è perduto lo zoccolo;
per colpa dello zoccolo si è perduto il cavallo;
per colpa del cavallo si è perduto il cavaliere;
per colpa del cavaliere si è perduta la battaglia;
per colpa della battaglia il re ha perduto il suo regno.

Forse è meno noto il fatto che l'esistenza dei sistemi instabili era ben conosciuta anche alla nuova scienza e a padri della meccanica classica. Addirittura, come ricorda Jacques Laskar, un astrofisico che ha molto studiato i comportamenti caotici nel sistema solare, la fisica newtoniana – la fisica su cui si basa la visione dell'universo meccanico – nasce con questa consapevolezza. Isaac Newton sa che le sue equazioni gli consentono di calcolare con grande precisione l'orbita di ogni singolo pianeta intorno al Sole. E di prevedere perfettamente dove, guidato dall'attrazione gravitazionale della grande stella, ciascun pianeta sarà tra alcuni secoli o tra alcuni millenni. Purché siano note, ovviamente, la sua posizione e la sua velocità attuale. Isaac Newton, però, sa anche che nel sistema solare non operano solo le interazioni gravitazionali tra il Sole e i singoli pianeti. Ma anche le interazioni gravitazionali tra i pianeti stessi. Sono, queste ultime, interazioni molto più piccole delle precedenti. Delle mere perturbazioni. Sufficienti, tuttavia, a compromettere non solo la predicibilità di lungo periodo della dinamica planetaria, ma persino la stessa stabilità del sistema solare. Tant'è che Dio, ne conclude

Newton, deve personalmente intervenire, di tanto in tanto, per ripristinare l'ordine cosmico minato alla base dal caos generato dalle perturbazioni gravitazionali tra gli oggetti che lo costituiscono.

Newton evoca l'intervento di Dio per allontanare il caos perché non dispone degli strumenti di calcolo infinitesimale che gli consentano di tenere in conto gli effetti perturbativi della mutua attrazione gravitazionale tra i pianeti. E quindi, cosciente della estrema sensibilità del sistema alle condizioni iniziali, per superare questo *gap* della fisica matematizzata, si rivolge al potere divino. La figura di un Dio che interviene storicamente nelle faccende del mondo ogni volta che l'uomo o la fisica non sanno evitarne il collasso, sarà chiamata *Dio dei gaps*. Ci troviamo, quindi, di fronte al paradosso di una fisica, quella newtoniana, accusata di non avere una sensibilità (alle condizioni iniziali) che il suo fondatore ha dimostrato di possedere addirittura in eccesso.

Quella che viene oggi definita razionalità lineare sarà acquisita lentamente nel tempo, quando Leonhard Euler, Joseph-Louis Lagrange e, infine, Pierre-Simon de Laplace, a cavallo tra il XVIII e il XIX secolo, doteranno la fisica degli strumenti per il calcolo delle perturbazioni. In particolare Laplace dimostra che, a causa delle mutue perturbazioni gravitazionali, i pianeti non si muovono su orbite ellittiche fisse e geometricamente perfette, come immaginava Keplero. Ma su orbite se non proprio erratiche, certo un po' contorte e abbastanza mutevoli. Tuttavia queste orbite variabili possono essere predette con notevole precisione grazie a piccole approssimazioni che consentono di portare a termine il calcolo delle perturbazioni. Poiché le approssimazioni adottate sono di gran lunga inferiori alla precisione delle misure che possono essere eseguite alla fine del '700, Pierre-Simon de Laplace ne inferisce che sono sostanzialmente insignificanti. La

legge di Newton, conclude, è in grado di descrivere tutti i movimenti dei pianeti. La stabilità del sistema solare è assicurata e non c'è bisogno di alcun intervento esterno per ripristinarla. A Napoleone che gli chiede quale ruolo abbia Dio nel suo universo, Laplace risponde:

Dio? Non ho bisogno di questa ipotesi.

Il grande successo della tecnica matematica che ha messo a punto, porta il marchese de Laplace a maturare il suo noto pregiudizio metafisico a favore della visione determinista del mondo, sintetizzata in una delle pagine poeticamente più belle della letteratura scientifica di tutti i tempi:

Un'intelligenza che, per un istante dato, potesse conoscere tutte le forze da cui la natura è animata, e la situazione rispettiva degli esseri che lo compongono e che inoltre fosse abbastanza grande da sottomettere questi dati all'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo e quelli dell'atomo più leggero: nulla le risulterebbe incerto, l'avvenire come il passato sarebbe presente ai suoi occhi.

Questo brano è diventato, giustamente, celebre come il *manifesto del determinismo scientifico*. Anche se pochi ricordano le frasi appena successive:

Lo spirito umano offre, nella perfezione che ha saputo dare all'astronomia, una debole parvenza di questa intelligenza.

E ancora:

L'astronomia fisica, la branca della scienza che rende il massimo onore alla mente umana, ci dà un'idea, ancorché imperfetta, di quale sarebbe questa intelligenza [...] La semplicità della legge che regola il moto dei corpi celesti e le relazioni tra le loro masse e distanze ci

consentono di seguire i loro moti con l'analisi fino a un certo punto; e per poter determinare lo stato del sistema di questi grandi corpi nei secoli passati o in quelli futuri è sufficiente al matematico conoscere tramite l'osservazione la loro posizione e la loro velocità in un istante qualunque. L'uomo deve questo vantaggio alla potenza degli strumenti impiegati e al piccolo numero di relazioni che entrano nei suoi calcoli. Ma l'ignoranza delle diverse cause che concorrono alla formazione degli eventi come pure la loro complessità, insieme con l'imperfezione dell'analisi, ci impediscono di conseguire la stessa certezza rispetto alla grande maggioranza dei fenomeni. Vi sono quindi cose che per noi sono incerte, cose più o meno probabili, e noi cerchiamo di rimediare all'impossibilità di conoscerle determinando i loro diversi gradi di verosimiglianza. Accade così che alla debolezza della mente umana si debba una delle più fini e ingegnose fra le teorie matematiche, la scienza del caso o della probabilità.

Il *manifesto del determinismo scientifico* contiene, dunque, l'onesto riconoscimento dell'impossibilità (gnoseologica, direbbero i filosofi) che ha la scienza dell'uomo di prevedere, completamente, tutti gli eventi futuri. Sia a causa della loro intrinseca complessità che dell'imperfezione degli strumenti analitici. Il padre del determinismo scientifico è tra i primi, dunque, a invitare la debolmente umana a usare quella che Ilya Prigogine chiamerebbe una *razionalità probabilistica*, piuttosto che una *razionalità deterministica*, per cercare di spiegare i fenomeni complessi o semplicemente caotici della vita quotidiana.

Se la *razionalità probabilistica* viene suggerita perfino da Laplace, già alla fine del '700, nell'analisi scientifica dei fenomeni complessi, non occorre andare oltre la fine dell'800 o l'inizio del '900 per un esplicito riconoscimento dell'esi-

stenza di sistemi semplici divergenti a causa della loro estrema sensibilità alle condizioni iniziali.

Il matematico francese Henri Poincaré non solo dimostra la non integrabilità, ovvero l'impossibilità di ottenere una soluzione generale esatta, del cosiddetto «problema a tre corpi»; ma scopre che, anche in presenza di leggi naturali perfettamente note, vi sono sistemi la cui evoluzione è strutturalmente imprevedibile, perché piccoli errori nella conoscenza delle loro condizioni iniziali producono grandi errori nella conoscenza delle loro condizioni finali.

Poco dopo Jacques Hadamard si impegna nello studio delle geodetiche, le linee più brevi tra due punti di una certa configurazione geometrica, di alcune particolari superfici a curvatura infinita (le superfici a curvatura negativa). Che è un po' come tentare di seguire le traiettorie di due palle su un biliardo incurvato a sella di cavallo. Hadamard si accorge che ogni differenza, anche minima, nelle condizioni iniziali di due geodetiche che restano a distanza finita, possono produrre una variazione di grandezza arbitraria nell'andamento finale della curva. In altri termini su un biliardo appena appena imperfetto, come lo sono tutti i biliardi del mondo, nessun giocatore potrà mai essere sicuro di vincere. Perché dando il medesimo colpo a due palle che si trovano (quasi) nella medesima posizione anche il più abile giocatore ottiene in breve (o, almeno, relativamente in breve) traiettorie completamente diverse e, quindi, assolutamente imprevedibili. Spostato in ambito cosmico, la partita, sostiene Hadamard, rende di nuovo imprevedibile, e quindi instabile, l'evoluzione di lungo periodo dello stesso sistema solare.

Secondo il filosofo Karl Popper sarebbe stato questo colpo a effetto sul biliardo di Hadamard a segnare il crollo definitivo, che lui evidentemente dà per avvenuto, del determinismo scientifico.

Un'opinione condivisa, peraltro, da numerosi autori, da Ilya Prigogine e Isabel Stengers, fino a Ivar Ekeland. In realtà, ancorché ben affondato e suffragato da una rigorosa analisi matematica, il colpo di Hadamard resta all'interno di quella *imprevedibilità gnoseologica* di alcuni sistemi fisici che è stato lo stesso Laplace a indicare, e non in presenza di un *indeterminismo ontologico* che, secondo molti, solo la meccanica quantistica porterà alla luce.

Insomma, l'incertezza resta un limite della capacità di conoscenza dell'uomo, non un carattere intrinseco della natura.

Resta il fatto, dunque, che la scienza alla fine dell'800 ha già scoperto il comportamento caotico di sistemi dinamici estremamente sensibili alle condizioni iniziali. E che su queste temi in Unione Sovietica lavoreranno a lungo Andrei Kolgomorov e la sua scuola, prima che in Occidente i lavori di Mitchell Feigenbaum e David Ruelle affrontino i problemi non lineari delle turbolenze nei fluidi, che Benoit Mandelbrot introduca il concetto di frattale, che Edward Lorenz si imbatta nell'*effetto farfalla* e che i computer rendano più agevole lo studio matematico e favoriscano la esplosiva (ri)scoperta dei sistemi dinamici estremamente sensibili alle condizioni iniziali.

Caos e determinismo

Le teorie del *caos* hanno molti meriti. Che abbiamo già ricordato e non mancheremo di ricordare ancora. Tra questi meriti, tuttavia, non sembra ci sia quello di aver fornito un contributo rilevante all'evoluzione del dibattito sui fondamenti della fisica. In particolare, né la scoperta né la riscoperta del *caos* rappresentano un'evoluzione del problema filosofico noto come *determinismo*. Sebbene autorevoli filosofi, come Popper,

e autorevoli scienziati, come Prigogine, sostengano il contrario.

In realtà la confusione nasce dall'uso ambiguo che si fa della parola e del concetto di *determinismo*. Troppo spesso e troppo superficialmente ritenuto del tutto intercambiabile con la parola e col concetto di *prevedibilità*.

Il *determinismo scientifico*, nella sua accezione laplaciana, ha un significato ontologico: sostanziale. Esso attiene al comportamento della natura, non alla conoscenza che l'uomo ha della natura. In particolare il *determinismo scientifico à la Laplace* sostiene che esiste una correlazione univoca (ma non necessariamente lineare) tra causa ed effetto. Per cui, dato lo stato di un sistema a un certo tempo, esiste una formula (una mappa, un'equazione differenziale) che consente in linea di principio, beninteso ad un'intelligenza che conosca tutte le forze che agiscono sul sistema e la posizione di ogni suo elemento, di stabilire in modo univoco quale sarà lo stato del sistema in un tempo futuro lungo a piacere o quale era lo stato del sistema in un tempo passato lontano a piacere.

Il *determinismo scientifico* è stato più volte messo in discussione. E con successo. Anche in un "mondo classico". Basta ricordare che già nel 1806 Siméon Denis Poisson si imbatte in soluzioni *singolari*, cioè in soluzioni delle equazioni differenziali utilizzate anche in meccanica classica, che si biforcano a partire da un medesimo stato iniziale. Le soluzioni *singolari* falsificano il teorema di esistenza e unicità delle soluzioni di un'equazione differenziale ordinaria. E Poisson, che è un fisico-matematico di gran classe, comprende che minano la base matematica della concezione deterministica della meccanica. Perché, pur definendo con precisione assoluta certe condizioni iniziali (posizione e velocità di una particella) un dato sistema di equazioni differenziali ordinarie (le equazioni di Newton) potrebbero ammettere, in casi

particolari, due diverse soluzioni (determinazione non univoca del passato e del futuro a partire dal presente). Poisson, che aderisce al pregiudizio metafisico del *determinismo scientifico*, rifiuta di credere nelle conseguenze fisiche della sua scoperta matematica. Sostenendo che lo studio attento dell'evoluzione di un sistema reale può evitare la biforcazione, escludendo l'una o l'altra delle soluzioni alternative. La fisica resta deterministica, sostiene Poisson, sebbene la matematica offra soluzioni non deterministiche. Poisson non è il solo, nel suo tempo, a rifiutare il pregiudizio metafisico indeterminista e ad aderire al pregiudizio metafisico determinista. Per cui il problema posto dalle sue soluzioni viene, di fatto, dimenticato.

Nei primi decenni del Novecento, una nuova meccanica, la meccanica quantistica, affronta (e forse a risolve) in modo radicale il tema. In particolare il giovane Werner Heisenberg, col suo *principio di indeterminazione*, dimostrerà nel 1927 l'impossibilità di seguire punto per punto l'evoluzione di un sistema quantistico (come la «traiettoria dell'elettrone») non per la divergenza di una formula matematica, ma per l'impossibilità – di principio, appunto – di conoscerne con precisione assoluta lo stato iniziale del sistema. Come scrive Heisenberg:

Nella formulazione netta della legge di causalità: “se conosciamo il presente, possiamo calcolare il futuro”, è falsa non la conclusione, ma la premessa. Noi *non possiamo* in linea di principio conoscere il presente in ogni elemento determinante.

Non possiamo conoscere con precisione assoluta la posizione e, nel medesimo tempo, la velocità con cui si muove un elettrone. Dunque non possiamo calcolarne la traiettoria.

Heisenberg nega che l'indeterminazione dello stato dell'elettrone sia gnoseologi-

ca, causata dall'ignoranza dell'uomo: è del tutto infruttuoso e insensato, dice, pensare a un mondo *reale*, inaccessibile all'uomo, ma perfettamente determinato in cui è valida la legge di causalità. L'indeterminazione del mondo che emerge dalla *nuova fisica* non è gnoseologica, ma ontologica. È un'indeterminazione reale.

Perciò [...] mediante la meccanica quantistica viene stabilita definitivamente la non validità della legge di causalità.

Neppure l'intelligenza evocata da Laplace potrebbe conoscere, contemporaneamente, la posizione e la velocità di una particella quantistica. E, quindi, prevederne il futuro.

Naturalmente non tutti accettano l'interpretazione di Heisenberg. E non tutti accettano la fine della causalità rigorosa neppure nel mondo a livello quantistico. Non senza combattere almeno, come annuncia Albert Einstein. Tuttavia la meccanica dei quanti rappresenta un punto di svolta, una vera frattura epistemologica. È infatti nel principio di indeterminazione e nella sovrapposizione di tutti gli stati possibili in cui si troverebbe una particella quantistica quando non è sottoposta a misura, che la visione deterministica del mondo trova il punto della sua massima crisi.

Al contrario, come scrive il fisico John Bricmont: «L'esistenza dei sistemi dinamici caotici non influenza in *nessun modo* questa discussione». Non c'è alcun punto di svolta, alcuna frattura filosofica operata dalla riscoperta del *caos*. La dinamica caotica non risolve, perché non affronta, il problema (aperto) del *determinismo* a livello macroscopico. E il motivo è presto detto: perché a livello dei sistemi dinamici macroscopici che si comportano in modo caotico in conseguenza della estrema sensibilità alle condizioni iniziali, l'impossibilità di conoscere con assoluta precisione il

presente è gnoseologica, non ontologica. Detto fuori dal gergo dei filosofi: deriva dalla nostra ignoranza del mondo, non dalla mondo così com'è fatto.

Nessuno discute che un sistema dinamico macroscopico che si comporta in modo caotico sia, a differenza di un sistema quantistico, sempre in uno stato perfettamente definito. Sono i nostri limiti che ci impediscono di verificarlo. Quello che, dunque, i sistemi dinamici caotici mettono in discussione non è il determinismo, ma la *predicibilità* del mondo. Il caos sancisce la nostra incapacità di fare previsioni esatte sulla evoluzione dell'universo macroscopico e delle sue singole parti, che sia valida o no la causalità rigorosa.

Da questa constatazione nasce l'indicazione di un metodo. Verificata la nostra incapacità di conoscere con precisione assoluta l'evoluzione del clima, della geodinamica terrestre o dell'ecosistema Terra, scegliamo di analizzare il mondo con una razionalità probabilistica. Costruiamo scenari di probabilità. Proprio come suggeriva Laplace.

Caos e irreversibilità

Anche in questo caso c'è un problema (metafisico) aperto che difficilmente può essere risolto dalla riscoperta delle leggi del caos. Il problema aperto è quello, enorme, della natura fisica e filosofica del tempo. E, più nello specifico, il problema della *freccia termodinamica del tempo* che sembra essere in contraddizione con le leggi, reversibili rispetto al tempo, della meccanica classica, relativistica e quantistica.

Alcuni negano l'esistenza di un problema, in quanto negano il divenire stesso del mondo. L'universo non diviene, sostengono, semplicemente è. La freccia del tempo sarebbe un'illusione prodotta dai limiti intrinseci di alcuni osservatori *parlanti*.

Altri riconoscono l'esistenza del problema, ma lo ritengono sostanzialmente risolto con il *teorema H* e la soluzione statistica proposti nel secolo scorso da Ludwig Boltzmann.

Altri ancora, infine, non negano l'esistenza di una reale *freccia del tempo*. E non si dicono affatto soddisfatti dalla soluzione di Boltzmann. Ma vedono le *origini della irreversibilità* dell'evoluzione di alcuni sistemi dinamici nelle loro particolari condizioni iniziali, piuttosto che nella natura irreversibile di nuove leggi fisiche da scoprire. All'interno di questo gruppo, c'è chi come Roger Penrose o come Ilya Prigogine, cerca le *origini della irreversibilità* nelle particolari condizioni iniziali in cui è (sarebbe) nato il *nostro* universo.

L'irreversibilità di gran parte dei fenomeni fisici presenti nell'universo è, forse, qualcosa più che un'illusione maturata dall'intelligenza limitata di alcuni osservatori di periferia. La *freccia termodinamica* coesiste, puntando nella medesima direzione, anche con una *freccia cosmologica* oltre che con una *freccia psicologica* del tempo, come nota Stephen Hawking. La loro esistenza sembra indicare che, forse, il problema, filosofico e fisico, del divenire del mondo è ancora aperto. O, per dirla poeticamente con Prigogine, che l'universo è modellato dal fluire del tempo. Certo, in mancanza di una prova decisiva, ogni ipotesi è lecita (fermo restando che sia presentata come ipotesi). Ma è molto difficile che la spiegazione di questo incessante divenire sia banalmente nascosta in qualche proprietà intrinseca attuale dei sistemi dinamici non lineari, piuttosto che in una legge fondamentale della fisica e/o nelle condizioni iniziali da cui ha avuto origine la storia cosmica.

Ma al di là di queste che restano, pur sempre, delle opinioni, c'è il fatto che, finora, dalle leggi del caos non è emerso ancora nulla che possa essere conside-

rato definitivo e fondamentale intorno all'origine della irreversibilità. Il problema resta aperto.

Il caos e il macchinismo

È possibile escludere, per tutte le ragioni su esposte, che il battito d'ali della farfalla di Lorenz e la (ri)scoperta del *caos* rappresentino una frattura epistemologica, l'evento primario che, in questa seconda parte del XX secolo, consente di ristrutturare i fondamenti della fisica.

Tuttavia il battito d'ali della farfalla di Lorenz e la (ri)scoperta del *caos* rappresentano, probabilmente, una frattura sociologica. Un evento primario che consente alla comunità scientifica, a partire dalla seconda parte del XX secolo, di ampliare i propri interessi, estendendoli allo studio di sistemi e fenomeni trascurati ai tempi di Poisson o di Poincaré. Quando furono sì scoperte la fisica e la matematica non lineari, ma senza che questo si traducesse in studi fisico-matematici sistematici dei fenomeni irregolari e non lineari esistenti nel mondo (ovviamente altre discipline scientifiche, come per esempio la biologia, erano al lavoro su questi temi, anche se non possedevano gli strumenti fisico-matematici per completarli).

La (ri)scoperta del *caos* è riuscita, forse perché i tempi sociologici sono infine maturati e certamente perché si è resa disponibile la potenza di calcolo dei computer, a dare agli studi dei fenomeni irregolari e dei comportamenti non lineari un impulso esplosivo. È un merito storico di importanza non trascurabile.

Di più. La (ri)scoperta del *caos* e delle dinamiche non lineari hanno operato un'ulteriore e, forse, più importante, frattura sociologica. Perché, riportando l'attenzione sui fenomeni non esattamente predicibili, sulla pratica impossibilità

di tener sotto controllo tutte le possibili evoluzioni di un sistema (fisico, biologico, sociale), hanno consentito a molti uomini di scienza e, più in generale, al grande pubblico (che di questi temi è stato largamente anche se non sempre lucidamente messo a parte), di superare la grande metafora dell'universo orologio. Una metafora *lineare* del mondo, antica di almeno duemila anni, che in ambito scientifico ha contribuito a rafforzare il paradigma meccanicista. E in un ambito culturale più ampio ha contribuito, almeno negli ultimi due secoli, a creare un'immagine semplicistica (e quindi pericolosa) non tanto del progresso scientifico, quanto del progresso tecnologico. Il merito forse più grande delle scienze del *caos* e dell'insieme delle filosofie è un merito, in qualche modo, indiretto. Che va oltre la scienza e la filosofia della scienza. Aver contribuito a ripensare in termini nuovi, e meno ingenuamente positivisticamente, i limiti e gli effetti impreveduti (e non desiderati) sia di quella idea infantile di poter "controllare il mondo", sia di quella idea di "crescita quantitativa illimitata" che sarebbe resa possibile dallo sviluppo tecnologico e considerata, con un'inferenza di tipo lineare, il mezzo più potente e, a un tempo, il fine dell'emancipazione dell'uomo.

La consapevolezza di vivere in un mondo di nuvole impone una nuova razionalità. Quella razionalità probabilistica di cui parlavano sia Prigogine, sia Wiener sia, a ben vedere, lo stesso Laplace. Ma passare da una razionalità lineare e per certi versi ingenua a una razionalità che costruisce scenari di probabilità e affronta le pieghe della complessità non è impresa facile. Soprattutto fuori dalle mura della repubblica della Scienza. Soprattutto dentro le mura dei mass media, vecchi e nuovi.

Ma di questo parleremo in un'altra occasione.

Progetti e attività di AMRA

In questa rubrica informiamo sulle principali iniziative e progetti in corso da parte di AMRA Scarl nelle sue collaborazioni internazionali

a cura di

Domenico Asprone, Roberto Moretti, Umberto Arena

Networking event “Resilience and sustainability in relation to disasters: a challenge for future cities”: Visione condivisa e raccomandazioni

UN Habitat – World Urban Forum 6, Napoli, 4 settembre 2012

Enti organizzatori:

Università degli Studi di Napoli Federico II e AMRA

Partecipanti:

Gaetano Manfredi, Università degli Studi di Napoli Federico II

Adam Rose, University of South California

Kalliopi Sapountzaki, Harokopio University of Athens

Gertrud Jørgensen, University of Copenhagen

Edith Callaghan, Acadia University

Graham Tobin, University of South Florida

Paolo Gasparini, Università degli Studi di Napoli Federico II, AMRA

Domenico Asprone, Università degli Studi di Napoli Federico II

Gli ambienti urbani, ed in particolare le *mega-cities*, connessi da una fitta e complessa rete di relazioni su scala globale, rappresentano il cuore ed il motore dello sviluppo della società contemporanea mondiale. Ma al contempo rappresentano dei nodi sempre più vulnerabili. Eventi naturali catastrofici, infatti, sono in grado di mettere in ginocchio le città e la rete di relazioni che in esse hanno luogo. Eventi naturali quali eventi meteorici estremi, tra l'altro sempre più frequenti ed intensi per effetto dei cambiamenti climatici in corso, terremoti, tsunami, o eventi indotti dall'uomo, quali attacchi terroristici o incidenti, possono avere conseguenze estreme sulle città e sulle comunità, direttamente ed indirettamente colpite.

La trasformazione delle città deve essere quindi ripensata, perché siano mitigati gli effetti di eventi estremi sulle funzioni vitali delle città e delle comunità, attraverso la ridondanza e la robustezza strutturale degli elementi che costituiscono il tessuto urbano, e perché si riduca il tempo necessario a ripristinare la piena efficienza di tali funzioni vitali. Quindi la resilienza nel breve periodo è necessaria per garantire la sostenibilità nel lungo periodo.

La resilienza nei confronti dei disastri è il processo attraverso il quale le comunità implementano con *efficienza, efficacia ed equità* la loro *capacità di assorbire e mitigare* impatti negativi, anche attraverso sistemi di *real time warning*, nonché *rispondere* e successivamente *adattarsi*, così da *mantenere le proprie funzionalità ed accelerare il recupero*, procedendo verso condizioni migliori, in grado di ridurre le perdite da *disastri futuri*.

I partecipanti al *networking event*, hanno condiviso questa visione ed offrono le seguenti raccomandazioni:

- Promuovere la resilienza è necessario per considerare la vulnerabilità di sistemi complessi interconnessi, che includono le istituzioni, gli individui ed i sistemi fisici.
- La resilienza dovrebbe essere continuamente rivalutata, in quanto i rischi e la vulnerabilità sono caratterizzati da proprietà dinamiche.
- Per promuovere la resilienza è necessario considerare tutti gli *hazard* possibili, includendo gli eventi estremi, gli impatti locali di *hazard* globali e processi di danno cronici.
- La resilienza deve essere integrate in politiche di settore e sistemi di *governance*, lavorando per rimuovere ostacoli legali e normativi.
- La resilienza dovrebbe essere perseguita attraverso un approccio multi-scala integrato, sia per le comunità che per i sistemi fisici.
- La resilienza dovrebbe essere perseguita considerando la cultura locale, le risorse, l'ambiente costruito e naturale e le condizioni socioeconomiche.
- La conoscenza dei rischi di disastri dovrebbe essere incrementata, così come la consapevolezza e la responsabilità di come gli individui e le comunità possono contribuire alla resilienza.
- Per un efficace mitigazione dei rischi è necessario avere la partecipazione di individui e comunità.
- La resilienza dovrebbe essere progettata coerentemente con i principi di giustizia sociale ed ambientale.
- Vanno sviluppati ed implementati metodi di supporto alle decisioni, sia qualitativi che quantitativi, in grado di misurare e verificare la resilienza, considerando esplicitamente le incertezze.
- Va tratto vantaggio da tutte le tecnologie disponibili, inclusi i sistemi di *social network* ed altre tecnologie a basso costo basate sul contributo degli individui.
- Va tratto vantaggio, sia a livello di business individuale che di famiglia, delle tattiche di resilienza a basso costo, come la conservazione degli input critici, lo stoccaggio delle scorte e l'uso di impianti di riserva.
- Va tratto vantaggio dai mercati formali ed informali come potenziali risorse di resilienza intrinseca, in quanto possono fornire segnali del valore delle risorse rimanenti al fine di un efficace processo di riallocazione.
- La resilienza può essere rafforzata diversificando la catena degli approvvigionamenti.
- Le esperienze locali di successo legate alla resilienza dovrebbero essere trasformate in pratiche di lungo periodo da adattare alle diverse condizioni.

Mediterranean Supersite Volcanoes – MED-SUV

Il progetto MED-SUV propone lo sviluppo e l'implementazione delle strutture esistenti e già attive nel monitoraggio vulcanico dei cosiddetti supersiti vulcanici Campi Flegrei/Vesuvio ed Etna (<http://supersites.earthobservations.org/>). Il fine è l'ottenimento di un rilevante guadagno nella conoscenza dei processi geofisici che in essi operano, da poter trasferire nelle strategie di mitigazione del rischio vulcanico.

MED-SUV esplora in dettaglio il monte di dati e conoscenze già acquisite, promuove ricerche di frontiera (di terreno, di laboratorio e modellistiche) per la comprensione dei processi vulcanici e dei segnali geofisici ad esso associati, anche quelli più superficiali e transienti che troppo spesso vengono classificati come “rumore”.

Il progetto presuppone l'integrazione di componenti osservazionali remote e di terreno, con un forte impegno sia 1) verso l'amalgamazione dei sistemi di monitoraggio già in essere e delle relative basi di dati, che 2) nello sviluppo di nuovi sensori per il monitoraggio di parametri di interesse geofisico-vulcanologico.

L'integrazione dei lunghi record temporali dai sistemi di monitoraggio essenzialmente *ground-based*, con quelli derivanti da osservazioni remote (*Earth Observation*, EO) aprirà nuove interessantissime prospettive circa lo sviluppo di metodi e tecniche che permettano di discriminare al meglio, e con ridotta incertezza, tra fenomeni caratterizzanti le fasi pre-, sin- e post-eruttive. MED-SUV considera questo aspetto un fondamentale pre-requisito per migliorare l'efficacia del coordinamento tra la comunità scientifica e quella degli utilizzatori, tra cui gli operatori di protezione civile e i *decision-makers*. Nel guadagno di informazione che si attende da tale integrazione, troviamo quindi l'obiettivo quadro di MED-SUV, ovvero l'applicazione della filosofia delle iniziative Supersites GEO ai Campi Flegrei/Vesuvio e Etna al fine di mitigare il rischio vulcanico.

AMRA ha un ruolo centrale nelle attività mirate al miglioramento della conoscenza della struttura interna e del funzionamento dei vulcani. In particolare, AMRA studierà il sistema idrotermale dei vulcani napoletani, soprattutto Campi Flegrei. L'attività del sistema idrotermale scandisce infatti lo stato di salute del sistema vulcanico alla pari di un battito cardiaco. Conoscere, correlare e modellizzare le sue peculiarità geofisiche e geochemiche, rappresentano passaggi fondamentali per riconoscere anche le più piccole anomalie del sottostante sistema magmatico e fornire indicatori deterministici che portino a valutazioni di corto- e medio-periodo del rischio vulcanico.

Progetto AMRA-Smaltimenti Sud

AMRA e la Smaltimenti Sud di Isernia lavorano assieme dallo scorso giugno 2012 per un progetto mirato ad ottenere una valutazione della fattibilità tecnico-economica del processo di gassificazione a letto fluido per il recupero di energia da residui del processo di selezione dei rifiuti urbani, con riferimento ad una potenzialità di trattamento di 4.000 t/a.

La parte principale delle attività di ricerca sarà costituita da indagini sperimentali su impianti di AMRA, in scala pilota e pre-pilota, che consentiranno l'acquisizione di dati utili alla valutazione di fattibilità tecnica ed economica del processo. Particolare attenzione verrà rivolta ad ottenere informazioni riguardo il quadro normativo/autorizzatorio di impianti di utilizzo di combustibili derivati da rifiuti urbani ed informazioni tecniche e valutazioni economiche necessarie ad una stima affidabile dei costi di investimento iniziale dell'impianto e delle necessarie attrezzature ausiliarie. Verranno acquisiti dati specifici sui principali componenti chiave degli impianti, soprattutto quelli, quali il sistema di pulizia e quello di utilizzo del syngas per la conversione in energia elettrica, per i quali le informa-

zioni tecniche e quelle economiche sono di più difficile acquisizione. Verranno elaborate almeno due tipologie di schemi di flusso dell'impianto di gassificazione che verrà proposto per lo specifico residuo dalla selezione dei rifiuti urbani recapitato dal committente. La convenzione si svilupperà quindi secondo quattro fasi: 1) Inquadramento tecnico-normativo (per definire lo stato dell'arte della tecnologia di gassificazione di rifiuti urbani e combustibili da essi derivati, ed il quadro normativo/autorizzatorio di impianti di utilizzo di combustibili derivati da rifiuti urbani, in particolare il cosiddetto CSS (combustibile solido secondario); 2) Ricerca sperimentale (per valutare le prestazioni del processo di gassificazione ed anche quelle del processo di co-gassificazione, al fine di combinare sinergicamente le caratteristiche di più residui ed accrescere la flessibilità degli impianti); 3) Definizione del processo (che prevederà l'individuazione ed il dimensionamento delle principali scelte progettuali, l'elaborazione di bilanci di materia e di bilanci di energia nonché lo sviluppo dello schema di flusso quantificato dell'impianto); 4) Valutazioni tecnico-economiche (che, anche sulla base di quanto acquisibile dai risultati sperimentali, giungerà a conclusioni sulla fattibilità tecnologica del processo ed elaborerà valutazioni economiche preliminari per una stima affidabile dei costi di investimento iniziale).

Gli autori

Guido Bertolaso

Direttore del Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri dal 2001 al 2010.

Daniela Di Bucci

Geologo, Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri.

Mauro Dolce

Professore di Tecnica delle Costruzioni dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Direttore dell'Ufficio Valutazione, Prevenzione e Mitigazione del Rischio Sismico del Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri.

Pasquale Erto

Professore di Statistica e Calcolo delle Probabilità dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

Alexander García-Aristizábal

Geofisico, ricercatore di AMRA S.c. a r.l.

Paolo Gasparini

Professore Emerito dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Amministratore delegato e Direttore scientifico di AMRA S.c. a r.l.

Massimiliano Giorgio

Professore di Statistica e Calcolo delle Probabilità della Seconda Università di Napoli.

Pietro Greco

Giornalista scientifico e scrittore, è direttore della rivista *Scienza & società* e condirettore del web journal *Scienzainrete*.

Iunio Iervolino

Professore di Tecnica delle Costruzioni dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

Ugo Leone

Già docente di Politica dell'Ambiente all'Università degli Studi di Napoli Federico II, è Presidente del Parco Nazionale del Vesuvio.

Warner Marzocchi

Sismologo, Dirigente di ricerca dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Guido Trombetti

Professore di Analisi Matematica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Rettore dell'Università degli Studi di Napoli Federico II dal 2001 al 2010, è Assessore all'Università e alla Ricerca della Regione Campania.

Gordon Woo

Esperto nello studio delle catastrofi, Risk Management Solutions, London.