Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Scienze Fisiche e Naturali
133° (2015), Vol. XXXIX, Parte II, Tomo I, pp. 7-19

ANDREA RINALDO*

Reti fluviali come corridoi ecologici (per specie, popolazioni e patogeni)**

1. La prolusione al 233° Anno Accademico dell'Accademia dei XL, del cui invito sono grato al suo Presidente Emilia Chiancone, discute brevemente la rilevanza di alcune domande di ricerca tuttora aperte, a fronte di alcuni risultati teorici e sperimentali recenti acquisiti, sul ruolo ecologico delle reti fluviali. Questo ruolo è indagato rispetto alla biodiversità delle comunità interessate (attraverso lo studio delle metacomunità che si stabiliscono negli ecosistemi fluviali), alle invasioni biologiche (attraverso lo studio delle migrazioni di popolazioni) e alle dinamiche di trasmissione di malattie veicolate dall'acqua (sia *waterborne* che *water-based*).

2. La Figura 1 suggerisce i limiti delle nostre capacità di quantificare e predire fenomeni connessi con il ruolo di reti fluviali agenti come corridoi ecologici. Infatti contrarre una malattia, come per esempio il colera, presuppone l'ingestione di un numero «sufficiente» di patogeni la cui ecologia è legata all'acqua e la cui concentrazione dipende da fattori chimici, fisici e biologici – non ultimi i fenomeni di trasporto a scala dei bacini idrografici. Predire la concentrazione di patogeni in un punto dello spazio in un tempo arbitrario appare tuttora un compito impossibile, così come stabilire la probabilità che il giovane mostrato in Figura si ammali. La debolezza delle predizioni di fenomeni di questo tipo è alla base della nostra incapacità di dare un valore spendibile in senso economico e sociale ai servizi che gli ecosistemi provvedono. Nel caso di specie delle dinamiche ecologiche che si stabi-

* Socio dell'Accademia. Laboratoire d'Écohydrologie, École Polytechnique Fédérale de Lausanne e Dipartimento ICEA, Università di Padova. Email: andrea.rinaldo@unipd.it

** Prolusione per l'inaugurazione del 133° Anno Accademico. Roma, 7 maggio 2015, Biblioteca dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Scuderie Vecchie di Villa Torlonia.

Fig. 1. Questo giovane del Bangladesh intendeva mostrarmi, bevendola, che la sacra acqua del fiume Meghna (un tributario del complesso sistema deltaico del Gange-Brahmaputra) nei pressi dell'abitato di Matlab non sono la causa della contrazione di colera, endemico in quelle zone. Lì si è stabilita una sede del Centro internazionale per lo studio delle malattie diarroiche (ICDD) perché il patogeno del colera non è solamente endemico in quell'area, ma si sospetta che sia evoluto proprio in quel contesto per diffondersi poi, in tutte le sue varianti, su scala globale. Si sarà poi ammalato il ragazzo?

liscono in una rete fluviale, con i vincoli impliciti indotti dalla dispersione forzatamente direzionale guidata dalla loro topologia, alcuni risultati recenti di cui parlerò sono incoraggianti ma ancora lontani da un loro uso predittivo sistematico.

Per queste ragioni è difficile determinare l'intero valore anche sociale del capitale ambientale in qualunque contesto che includa ecosistemi fluviali. Oggi, per contro, emerge una letteratura mirata alla integrazione del pensiero economico con quello ambientale considerando criticamente la valutazione economica per costruire una nozione condivisibile di sostenibilità dello sviluppo. Per crescita economica, infatti, dovremmo immaginare una vera crescita nella ricchezza delle Nazioni, ovvero il valore sociale dell'intero capitale ambientale di un'economia, non la crescita del prodotto interno lordo (GDP) né di indicatori di sviluppo generici. Il concetto «largo» di ricchezza ci invita a estendere la nozione di capitale ambientale ben oltre l'uso convenzionale che se ne fa normalnente [Dasgupta, 2013], ovvero che per svi-

luppo sostenibile dovremmo intendere lo sviluppo in cui la ricchezza pro capite, aggiustata per la sua distribuzione e inclusiva del valore del capitale ambientale, non diminuisce nel tempo. Al contrario, l'intera architettura del pensiero economico sullo sviluppo (*development thinking*) è oggi da considerarsi diametralmente opposta alla Natura, e appare chiaro che stiamo vivendo gli albori di un nuovo modo di misurare la ricchezza delle Nazioni, e dunque il loro progredire o regredire secondo misure sensate dell'intero valore del capitale ambientale (Fig. 2). Allo stesso modo, mettere in un conto economico la perdita di valore del capitale naturale presuppone una nuova cultura quantitativa capace di prevedere l'evoluzione dei servizi degli ecosistemi.

L'inadeguatezza di indicatori economici come il prodotto interno lordo si percepisce chiaramente dallo studio della propagazione delle malattie veicolate dall'ac-

Fig. 2. Co-evoluzione di ambiente naturale e ambiente costruito in una barena della Laguna di Venezia. La bellezza delle forme delle reti di canali a marea è funzionale a un complesso ecosistema i cui servizi (anche culturali, come la bellezza della morfologia lagunare e delle trame di vegetazione alofila tali da far pensare che anche l'ambiente, come la città che ospita, Venezia, sia impregnato di *Kunstwollen*) sono da secoli sfruttati anche ai fini economici – in questo caso evidenziati dalle reti da pesca (le «vele» bianche che si vedono nell'immagine).

Fig. 3. Nella stagione delle piogge nell'Africa subsahariana (in questo caso nel Burkina Faso) la formazione di corpi idrici temporanei e la costruzione di invasi e canali di irrigazione per l'uso delle acque ha grandemente esteso l'*habitat* per la chiocciola che serve da ospite intermedio nel ciclo dei parassiti che causano la scistosomiasi (o bilarzosi), una malattia debilitante che provoca permanenti deficit cognitivi e problemi cronici. Mentre il beneficio economico associato allo sviluppo dell'agricoltura è certamente misurabile con indicatori economici come il GDP, i costi associati con i ritardi cognitivi non sono misurabili, rendendo assai discutibili misure dello sviluppo economico e sociale alla maniera delle curve di Kutsnez (che suggeriscono minori disuguaglianze al crescere dello sviluppo economico) [Piketty, 2013].

qua, in specie quelle endemiche. Ad esempio (Fig. 3), è conclamata la correlazione fra sviluppo di opere di utilizzazione dell'acqua (invasi e reti idrauliche di irrigazione) e incremento di incidenza di malattie parassitarie come la scistosomiasi nell'Africa subsahariana [Steinmann *et al.*, 2006]. Il vero problema nasce dal fatto che il beneficio connesso con l'uso dell'acqua è quantificabile in termini diretti da indicatori economici, mentre il costo connesso con una larga parte della perdita di capitale ambientale (o associato con fattori come il deficit cognitivo indotto dal ricorrere della malattie in età scolare) non lo è affatto. Dunque dovremmo proprio concludere che le tesi ottimiste «kutnesziane» sul fatto che lo sviluppo economico comporta la riduzione delle diseguaglianze va decisamente riconsiderata [Piketty, 2013].

3. Le geometrie dendritiche abbondano in natura, e coprono una vasta gamma di scale. Le osserviamo nel nostro sistema polmonare, nei sentieri che le formiche tracciano per procurarsi del cibo, nelle piante, nei sistemi fluviali come nelle rotte migratorie, per citarne alcune, ed è del tutto evidente che processi essenziali per sostenere la vita umana e le società si svolgono su strutture dendritiche: come la vascolarizzazione della rete polmonare è essenziale per la nostra stessa esistenza, così stormi di uccelli migrano lungo reti misteriosamente fissate da una combinazione di spunti innati e di memoria spaziale. Così gli insediamenti umani (e dunque le direttrici delle migrazioni di popolazioni) storicamente si sono stabiliti lungo reti fluviali per sfruttarne le risorse idriche, come gli ecosistemi ripariali – le acque correnti formano le reti quintessenziali in Natura – e le malattie trasmesse dall'acqua, come il colera, si diffondono attraverso corpi idrici collegati fra loro [e.g. Bertuzzo *et al.*, 2008; Rinaldo *et al.*, 2012].

Le reti fluviali sono il prodotto della coevoluzione di fenomeni geologici e idrologici (la «produzione» di sedimenti per uplift geologico e la loro «dissipazione» per il trasporto di massa prodotto da erosione fluviale nelle zone canalizzate e da diffusione per un coacervo di processi decompositivi diversi in zone non canalizzate) che si caratterizza come un fenomeno dissipativo, aperto e caratterizzato da un gran numero di gradi di libertà. Formano paesaggi auto-organizzati descritti da leggi di scala generali e da simmetrie profonde delle parti e del tutto che si dimostrano indipendenti dalla miriade di diversi fattori climatici, geologici, relativi alla litologia esposta o alla copertura vegetale che operano in Natura [Rodriguez-Iturbe e Rinaldo, 1997]. I processi di trasporto relativi forniscono una naturale integrazione delle dinamiche idrologiche, ecologiche e geomorfologiche che vi si svolgono. Le profonde similitudini esistenti tra tutti i tipi di reti fluviali, in uno con il ruolo chiave che queste strutture dendritiche svolgono nelle dinamiche dei processi fisici, chimici o biologici che ospitano, suggeriscono l'utilità della ricerca di caratteri statistici universali, la caratteristica dell'organizzazione di un sistema complesso auto-organizzato.

4. Ha senso, nella dinamica di sistemi complessi aperti all'immissione di energia e materia, la nozione generale di equilibrio? La figura retorica del *naturale equilibrio* incombe su di noi perché è semplice e intuitiva. L'immagine di una Natura statica che, forzata da agenti diversi, blocca la sua evoluzione in un suo stato preferenziale suggerisce anche l'idea che questo stato, in via di principio, possa essere conservato [Bak, 1996; anche in Gore, 1993]. È questa idea che motiva molti ambientalisti verso la conservazione generica, e non a caso: nell'arco di una vita umana il mondo naturale usualmente cambia pochissimo e dunque il concetto di equilibrio sembra del tutto affine alla nostra esperienza, quasi ovvio. Esiste forse da un punto di vista evoluzionistico uno stato preferenziale in Natura? E se esiste, come possiamo stabilire che sia proprio quello che noi vediamo ora? La risposta a queste domande è, in generale, negativa. Non esiste una forma speciale per molti processi naturali. Così,

ad esempio, non esiste un fiordo tipico nella costa della Norvegia per forma o lunghezza perché ne esistono di tutte le dimensioni, e tutti simili. La lucentezza delle macchie di plankton sulla superficie del mare descritta da Steinbeck in *Cannery Row* ha forme simili se guardo vicino o lontano, una le ricorda tutte (*one thing is all things*). La Natura spesso si esprime con un linguaggio geometrico suo proprio, i cui segni sono rimasti a lungo misteriosi, in cui la parte è simile al tutto [Mandelbrot, 1982]. La teoria che spiega matematicamente le forme naturali, e che le ha dato il nome dal latino *fractum* (irregolare, contorto, spezzato), è la geometria frattale. Questa geometria nuova ci ha costretti a guardare con occhi diversi le forme della Natura più di duemila anni dopo la geometria di Euclide: le montagne non sono coni, le nuvole non sono sfere né le coste semplici spezzate come i fulmini o le traiettorie di una molecola o di un filo di fumo. Se le si toglie la scala, la carta geografica che mostra una rete fluviale può sembrare la mappa del torrente sotto casa, ma può essere invece quella del Rio delle Amazzoni o del Mississippi: la Natura fabbrica le reti idrografiche statisticamente simili alla scala di poche centinaia di metri o di centinaia di migliaia di chilometri. Le somiglianze delle forme naturali a diverse scale, generalmente definite come proprietà di auto-similarità della struttura di forme in cui le parti sono simili al tutto, sono le stimmate dell'auto-organizzazione dei sistemi dissipativi, aperti all'immissione di massa o di energia e caratterizzati nella loro evoluzione da molti gradi di libertà. Sono, cioè, le stimmate di «come funziona la Natura» [Bak, 1996].

5. Il tema generale del funzionamento della Natura, spinoso per riduzionisti di tutte le discipline, è diventato di dominio comune. Una di queste, diventata popolarissima, pretende di spiegare le epidemie sociali in termini di meccanismi di soglia [Gladwell, 1998]. Le esegesi dei soggetti sociali connettori, generatori di valanghe di attività sociale, sono servite a spiegare e divulgativare fenomeni complessi. Se si assegnasse a caso l'equivalente di connessioni sociali (ad esempio, una rete di conoscenze mondane), noi vivremmo in una società terribilmente democratica in cui tutti saremmo più o meno sociali nello stesso modo, mediamente con lo stesso numero di reietti e di super-mondani. Così non è mai nelle società di tutti i tipi – esistono moltissimi *pariah*, e pochissimi soggetti sociali superconnessi. Da un punto di vista astratto, la distribuzione delle connessioni in un processo auto-organizzato ha a che fare con l'idraulica [Barabasi, 2002] e perfino con i black-out elettrici, intepretabili come sono con le fragilità di reti interconnesse [Buchanan, 2002]. Un esempio interessante di come collassi macroscopici si propaghino a cascata in grandi sistemi di reti deriva da un modello astratto di connessioni, le *small world networks* (reti di com'è piccolo questo mondo) [Watts, 1999]. Il nome, così fascinoso, è legato a un esperimento di scienze sociali proposto dallo psicologo Stanley Milgram. Il problema posto da Milgram era quello di far recapitare una missiva spedita da un punto X del pianeta a una persona ignota in un posto Y arbitrariamente lontano (spedite la

lettera a un vostro conoscente il più vicino possibile alla destinazione, pregandolo di provare a farla arrivare ad un suo conoscente più vicino al destinatario a noi ignoto). Milgram si chiese quanti passaggi fossero necessari per arrivare mediamente a destinazione, avendo cura di ripetere l'esperimento con molti originatori e bersagli diversi. Intuitivamente verrebbe da pensare a centinaia di passaggi intermedi — come si fa ad arrivare a una persona che non conosci a Los Angeles se parto da Padova usando solo reti di conoscenze personali? Invece il numero di passaggi è (teoricamente e sperimentalmente) sorprendentemente basso. In media sei passaggi ci separano da chiunque al mondo, sei gradi di separazione (resi celebri dalla commedia *Six degrees of separation*) ci legano nella rete globale delle conoscenze da chiunque sulla terra. Attraverso sei conoscenti posso arrivare direttamente al Dalai Lama o al Papa se sono un contadino della Birmania. È un risultato sorprendente. Le moderne teorie delle connessioni nelle reti naturali, fra le quali vanno annoverate quelle delle conoscenze sociali di ciascuno di noi, spiegano invece bene questo fatto per la crescita esponenziale delle possibili connessioni di un sistema in rete, e sono sintomi di una stessa sindrome: la complessità. Le reti di connessioni sociali, come quelle fisiche, evolvono verso uno stato stabile, caratterizzato da carattere diretto e aggregato insieme, ottimo in qualche senso evolutivo rispetto al trasporto di massa, energia o informazione. Le parole d'ordine della neonata scienza della complessità sono caos, frattali e le leggi di scala (o di potenza) che descrivono matematicamente le strutture invarianti rispetto ad ingrandimenti o contrazioni, che si assomigliano sempre, cioè, nonostante qualunque cambio di scala nella loro osservazione, dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande.

Dunque la profondità media di un fiordo della Norvegia cambia a seconda del numero di fiordi su cui tale media è calcolata, perché non esiste un fiordo tipico, né una sua dimensione preferenziale rispetto a tutte le altre — se potessi misurare un numero infinito di forme, potrei osserverarne di ogni profondità, dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande. La malattia si riconosce dai sintomi, e la sindrome di varianza infinita si manifesta con la dipendenza della fluttuazione media di un segnale dalla durata della sua misura. La misura della fluttuazione media (la varianza) cresce sempre al crescere dell'archivio che si usa per calcolarla. Più passa il tempo, più realizzazioni del fenomeno sono osservate: e con queste, le fluttuazioni anomale del segnale rispetto alla media, segnali fortissimi o assai deboli, che fanno aumentare questa misura della sua irregolarità. La lunghezza del confine fra Polonia e Germania, stabilito dal corso della Vistola, differiva di chilometri nelle stime tedesche e polacche dell'800 perché misurata su mappe di scala diversa, dunque diversamente capaci di risolvere quelle irregolarità che, ingrandite, ne rivelano sempre di nuove, diverse eppure simili. Questo effetto, chiamato misticamente allometrico dai geografi del secolo scorso (che non ne capivano l'origine ma lo osservavano quando provavano a misurare medesime quantità su mappe di scala diversa), suggerisce un mondo di equivoci possibili. Anche la struttura dei linguaggi mostra tipici caratteri di auto-organizzazione. La distribuzione della frequenza nell'uso delle parole o dei

simboli ha caratteri universali qualunque sia la lingua, dallo spagnolo a un qualunque dialetto della Nuova Guinea. La struttura del linguaggio è in qualche modo ineluttabile, tanto che la distribuzione della frequenza delle parole usate nei testi è dello stesso tipo in *Mody Dick* e nella *Divina Commedia*, resiste a linguaggi, grammatiche, epoche e culture diverse e lontanissime.

6. L'idea di fondo, che mi pare iperuraniamente bella, è che l'origine dinamica della geometria della Natura risponda a una tendenza di fondo universale dei grandi sistemi aperti all'immissione di massa o energia con molti gradi di libertà, propria non già dei dettagli delle componenti del sistema, ma di un suo comune denominatore complessivo. Di tutta la Natura, insomma: né disegno intelligente, con l'imposizione di un esito evolutivo, né evoluzione caotica, con il suo fardello di perenne imprevedibilità. La resistenza all'idea di inevitabilità nell'auto-organizzazione è formidabile, specie in certe *enclave* accademiche legate al *tenet* riduzionistico: se si riuscisse a dissezionare un sistema nei suoi componenti elementari e capire nel dettaglio i processi alla scala più piccola, quella dei suoi componenti miscroscopico-elementari, solo allora anche la capacità di capire il comportamento a grande scala, complessità inclusa, sarebbe garantita. La dinamica collettiva del volo di stormi di uccelli o di intere classi di pesci in movimento è dominata dai tempi di reazione degli organi sensoriali degli animali e dalla creazione di leadership. Le forme, strane e diverse, che si generano non sono casuali e basta seguirle con lo sguardo per percepire struttura, organizzazione e finalità. Pretendere di spiegare la dinamica degli stormi di uccelli in volo dal DNA dei componenti il gruppo è riduzionismo. La dinamica di grande scala richiede il collante delle proprietà individuali ma si fa descrivere da altro, e la dinamica microscopica per le migliaia di individui che si muovono collettivamente non solo è improba a farsi: è probabilmente anche inutile. Così l'approccio riduzionistico, influenzato com'è dalla necessità di specificare troppi dettagli – i parametri dei processi microscopici che operano in natura – è candidato improbabile a spiegare le ricorrenze nelle forme naturali. Come può accadere che tutte le reti fluviali si assomiglino, senza riguardo per le differenze di clima, vegetazione, pedologia o geologia dei loro bacini? È sensato immaginare che esista un Demiurgo illuminato che, munito di cacciavite celeste, aggiusti ovunque i miliardi di parametri che governano i processi geomorfologici locali di erosione e deposito per far emergere le stesse forme fluviali ovunque e dappertutto? Non è forse più sensato, al contrario, immaginare che le forme che ricorrono in Natura siano il prodotto di qualche proprietà intrinseca della evoluzione stessa piuttosto che di qualche improbabile sincronizzazione dei pezzi individuali che costituiscono il sistema naturale? E che dunque per forza – e non per caso – doveva andare a finire così?

Una caratteristica della organizzazione delle strutture frattali che si sviluppano in grandi sistemi dinamici è la presenza di attività e di forme di tutte le dimensioni, nello spazio e nel tempo. Le valanghe che si producono in un mucchio di sabbia

lentamente alimentato dall'esterno un grano alla volta (innescate ad esempio quando il salto fra due grani adiacenti superi una certa soglia), sono di tutte le dimensioni, microscopiche o grandi quanto il sistema intero. L'effetto domino nelle dinamiche cooperative descrive il contagio dell'instabilità che si propaga come nelle tavolette che cominciano a cadere e ne urtano altre e altre ancora. Così si formano le valanghe di tutte le dimensioni nella pila di sabbia, irresistibile metafora della Natura. Se accade che la distribuzione delle valanghe sia senza scala caratteristica, il sistema è indotto ineluttabilmente ad evolvere verso uno stato critico in cui la minima perturbazione produce il disastro – la valanga grande quanto il versante intero, il terremoto *big one* che distruggerà San Francisco, la tempesta perfetta. Questa caratteristica è consistente con l'osservazione che un sistema complesso evolve in modo intermittente, a scatti, piuttosto che in modo graduale e progressivo. Come la distribuzione della magnitudo dei terremoti obbedisce alla legge di Gutemberg-Richter, una legge di potenza del rilascio di energia in un terremoto, così le fluttuazioni degli indicatori economici sono di ogni dimensione e seguono leggi di potenza che descrivono grandi eventi intermittenti descritti da un famoso studio sulle variazioni del prezzo del cotone. Le grandi oscillazioni della borsa, come il crollo catastrofico del 1929, sono eventi attesi e connaturati alla dinamica di sistemi complessi. Le grandi fluttuazioni che producono i disastri (i casi estremi) per le piogge e portate dei fiumi, sono purtroppo molto più probabili di quanto ci faccia pensare il placido mondo di Gauss che rifiuta le grandi fluttuazioni.

La differenza fra il mondo probabilistico Gaussiano e quello di Lèvy sono alla base di queste differenze. Il primo, che corrisponde al campo di validità del teorema del limite centrale in probabilità, implica un decadimento molto rapido della probabilità di eventi grandi in modo anomalo rispetto alla media. Questi risultano pertanto veramente improbabili, come la possibilità che una scimmia battendo a caso sulla tastiera di una macchina da scrivere produca una pagina di Shakespeare. Le distribuzioni di Lèvy sono invece caratterizzate da un decadimento lento delle code delle distribuzioni di probabilità e dunque la probabilità di eventi estremi risulta incomparabilmente più grande. Le distribuzioni che descrivono matematicamente queste catene di eventi sono quelle del limite di somme di variabili aleatorie indipendenti particolari. Se gli eventi singoli hanno qualche loro speciale irrequietezza, infatti, l'evento estremo (la tempesta perfetta, l'onda anomala, il terremoto distruttore) non appare più come esito di un'improbabile coincidenza di molti eventi concorrenti, mediamente grandi e indipendenti fra loro. Un solo evento basta e avanza per creare un disastro. Questa fluttuazione anomala generata da una sola grande fiammata è di gran lunga più probabile del concatenarsi di molti eventi che si sommano per produrre lo stesso evento intenso. Questo è, in parole, il mondo di Lévy, ovvero quello della natura assai più spesso di quanto il tranquillo, assopito e prevedibile mondo di Gauss voglia farci sperare.

Allo stesso modo, anche l'evoluzione biologica è segnata da improvvise puntuazioni dove periodi in cui si verifica un ritmo sostenuto di estinzioni e speciazioni

interrompono lunghi periodi di stasi Steven J. Gould, carismatico scienziato e divulgatore, decifrò questi segni nell'evoluzione biologica. È riuscito perfino a leggere il disegno generale della selezione naturale nelle trame dei mosaici della Basilica di San Marco a Venezia o, nel gioco del *baseball*, nella mostruosa durata della serie di partite con batture valide di Joe Di Maggio nel 1941. Questo modo di funzionare caratterizza molti meccanismi della Natura che solo oggi possiamo capire e decodificare.

Forse allora, in generale, può proprio dirsi che è proprio l'*equilibrio* che non esiste in natura, nonostante le frequenti affabulazioni che lo tirano in ballo. Il mondo naturale è perennemente lontano da un equilibrio statico e morto. La morte, sola, è equilibrio perfetto. La vita e il mondo attorno a noi si organizzano da sé in stati diversi e mutabili verso i quali è spinta ineluttabilmente la dinamica del sistema dalla mano invisibile che guida l'evoluzione. L'assenza di scale caratteristiche nelle fluttuazioni di un fenomeno *fractus*, il segno geometrico delle dinamiche auto-organizzate, suggerisce che gli eventi estremi non sono atti di Dio – imprevedibili! eccezionali! – ma ovvie e inevitabili ricorrenze. Questa nuova comprensione della geometria della natura, con le implicazioni che esige dalle dinamiche che la generano, spinge a forme diverse di accettazione e comprensione dei fenomeni naturali.

7. A dire il vero, esiste una notevole mole di lavori sulla dinamica dei processi che operano su reti (i dendriti che mi interessano sono un sottoinsieme delle reti in generale, gli *alberi* – ovvero nodi che ricapitolano un'area sorgente unitaria connessi da rami nella cui struttura esiste un unico percorso fra qualunque coppia di nodi), anche affrontati nella letteratura che tratta di epidemiologia, ecologia o sociologia. Questi studi sono per lo più relativi all'ambito detto di campo medio che offre semplificazioni matematicamente convenienti. Lo studio stocastico sulla evoluzione spazio-temporale (dunque spazialmente esplicito della descrizione dei processi) delle comunità vive (specie, popolazioni, patogeni) è un campo relativamente nuovo e di grande interesse. Voglio rapidamente citare come significativi i meccanismi relativi alle dinamiche spaziali nelle configurazioni delle comunità locali imposte dalle reti fluviali e l'anisotropia della diffusione di specie, agenti patogeni o altri agenti di interesse lungo i corsi d'acqua. Tale anisotropia — l'essenza delle reti fluviali — si rivela indispensabile, come mostrato in particolare soluzioni esatte di propagazione di invasioni biologiche [Campos *et al.*, 2006; Bertuzzo *et al.*, 2007; Muneepeerakul *et al.*, 2007]. La configurazione dei sistemi fluviali esercita un effetto decisivo sulla distribuzione spaziale della biodiversità [Muneepeerakul *et al.*, 2008; Carrara *et al.*, 2012].

Un ingrediente essenziale delle migrazioni di popolazioni umane anche prima della Storia è la constatazione che i coloni non occupavano tutto il territorio (isotropicamente, nel linguaggio dei modelli continui omogenei), ma piuttosto fiumi e laghi vicino ai quali le comunità si stabilivano per sfruttarne le risorse (acqua da bere, energia, trasporti). È interessante lo studio quantitativo, fisico o biologico, degli effetti delle eterogeneità del paesaggio rispetto alle direttrici delle migrazioni [Ammermann e Cavalli-Sforza, 1984; Forte e Mendez, 1999; Campos *et al.*, 2006].

Oltre al ruolo cruciale che la topologia e la metrica delle reti fluviali hanno su biodiversità e invasioni biologiche, i controlli idrologici impliciti nel funzionamento dei bacini fluviali giocano un ruolo centrale nella diffusione di malattie veicolate dall'acqua [Bertuzzo *et al.*, 2008; Rinaldo *et al.*, 2011]. Un risultato teorico in questo campo mi sembra particolarmente importante per le implicazioni pratiche che comporta [Gatto *et al.*, 2012]. Infatti la comprensione, la previsione e il controllo di epidemie di malattie veicolate dall'acqua (come il colera) sono obiettivi primari di ogni politica di salute pubblica, ma pongono problemi difficili perché le distribuzioni delle infezioni sono influenzate dalla struttura spaziale dei contatti e delle esposizioni alla trasmissione del contagio, e da asincronia temporale. Anche se oggi la descrizione spazialmente esplicita dei fenomeni è grandemente aiutata dai sistemi informativi geografici che mappino grandezze idrologiche (per esempio, la distribuzione della precipitazione nello spazio e nel tempo), le infrastrutture di trasporto, la rete idraulica, la distribuzione della popolazione e di *proxies* dello sviluppo economico e sociale del territorio), le condizioni precise per l'instabilità dello stato privo di malattia in sistemi spazialmente espliciti sono complicate. Gatto *et al.* (2012) hanno mostrato analiticamente che le condizioni locali di instabilità (tipicamente definiti da un numero di riproduzioni, R_0, grossomodo indicativo, se maggiore di 1, di un gruppo di infezioni che si amplifica piuttosto che attenuarsi) non sono né necessarie né sufficienti per indicare la stabilità del sistema spaziale – le reti idrauliche funzionano da connettori e dunque potenzialmente da amplificatori delle epidemie. Altrettanto fanno le reti di mobilità umana, grande vettore del diffondersi di epidemie non solo di malattie *waterborne*. Ciò che mi sembra notevole è che il risultato è esatto: e consente di determinare le condizioni di incipiente instabilità delle infezioni epidemiche insieme alle direttrici generali dei percorsi spaziali dell'infezione. I modelli matematici di questo tipo si dimostrano quindi adatti a provvedere fondamentali informazioni sul corso di una epidemia, potenzialmente in grado di aiutare la gestione delle emergenze in tempo reale con l'allocazione mirata di medicinali salva-vita (come il numero e la distribuzione delle borse di idratazione nel caso del colera; o anche il dispiegamento di forze e infrastrutture mediche e infermieristiche nello spazio e nel tempo) e anticipando l'impatto di interventi mirati al controllo (come la somministrazione di antibiotici e vaccini).

8. In conclusione di questa prolusione, ci si chiede quali domande (di ricerca e applicative) possano essere studiate con i nuovi strumenti che muovono dalla osservazione dei caratteri ricorrenti esibiti dalle reti fluviali. Come progettare campagne di prevenzione per contenere efficacemente la diffusione di una malattia di origine idrica? Come integrare piani per la gestione di grande scala di risorse idriche che includano la protezione di preziosi servizi degli ecosistemi? Quali strategie spaziali possiamo impiegare per ridurre al minimo la perdita di biodiversità così criticamente in pericolo in tutto il mondo negli ecosistemi fluviali? Come hanno potuto le etero-

geneità nel paesaggio fluviale e la struttura delle reti fluviali influenzare la metastoria, la storia della storia, per il loro ruolo nel condizionare le grandi direttrici delle migrazioni storiche delle popolazioni? (è credibile che universalmente le direzioni di migrazione riflettano le esigenza di acqua, energia e trasporto dei colonizzatori?) Cosa può leggersi di rappresentativo del mondo vivente nella struttura ricorrente delle forme fluviali? Che effetti hanno le eterogeneità nella distribuzione delle risorse e nella geometria del substrato dei processi sui processi di invasione biologica? Attese le caratteristiche comuni che percepiamo tra diverse strutture dendritiche e i più diversi sistemi complessi nel mondo naturale e nel mondo artificiale, mi chiedo se queste domande, già importanti per sé secondo il mio parere, non possano aiutare anche a identificare e rispondere ad altre questioni correlate di ambito diversissimo. Non ho una risposta definitiva oggi. Ma credo fermamente che la qualità della ricerca sia inevitabilmente più legata alla qualità delle domande che ci poniamo che a quella delle risposte che riusciamo a dare, incomplete e parziali come esse sono fatalmente. Vi ringrazio.

BIBLIOGRAFIA

Ammermann, A. J., L. L. Cavalli-Sforza (1984), *The Neolithic transition and the genetics of population in Europe*, Princeton University Press, Princeton, NJ.

Bak, P. (1996), *How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality*, Copernicus-Springer, New York.

Barabasi, A. L. (2002), *Linked*, Perseus, New York.

Bertuzzo, E., S. Azaele, A. Maritan, M. Gatto, I. Rodriguez-Iturbe, A. Rinaldo (2008), On the space-time evolution of a cholera epidemic, *Water Resour. Res.*, 44, W01424.

Bertuzzo, E., A. Maritan, M. Gatto, I. Rodriguez-Iturbe, and A. Rinaldo (2007), River networks and ecological corridors: reactive transport on fractals, migration fronts, hydrochory, *Water Resour. Res.*, 43, W04419.

Buchanan, M. (2002), *Nexus*, Pergamon Press, New York.

Carrara, F., F. Altermatt, I. Rodriguez-Iturbe, A. Rinaldo (2005), Dendritic connectivity controls biodiversity patterns in experimental metacommunities, *Proceedings of the US National Academy of Sciences PNAS*, 109(15), 5761-5766.

Campos, D., J. Fort, and V. Méndez (2006), Transport on fractal river network: Application to migration fronts, *Theor. Popul. Biol.*, 69, 88-93.

Colwell, R. R. (1996), Global Climate and Infectious Disease: The Cholera Paradigm, *Science*, 274 (5295), 2025-2031.

Dasgupta, P. (2013), The nature of economic development and the economic development of Nature, *Economic & Political Weekly*, XLVII, 51, 38-51.

Fort, J., and V. Mendez (1999), Time-delayed theory of the neolithic transition in Europe, *Phys. Rev. Lett.*, 82, 867-870.

Gatto, M., L. Mari. E. Bertuzzo, L. Righetto, R. Casagrandi, I. Rodriguez-Iturbe, A. Rinaldo (2012) Generalized reproduction numbers and the prediction of patterns in waterborne disease, *Proceedings of The US National Academy of Sciences PNAS*, 109(48), 19703-19708.

Gore, A. (1993), *Earth in the balance. Ecology and the Human Spirit*, Penguin Putnam, New York.

Gladwell, M. (2000), *The Tipping Point. How Little Things Can Make a Big Difference*, Little, Brown & Co., New York.

Gould, S. J., R. C. Lewontin (1979), The spandrels of San Marco and the panglossian paradigm. A critique of the adaptationist programme, *Proceedings of the Royal Society of London B,* 205, 581-598.

Hubbell, S. P. (2001), *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*, Princeton University Press.

Mandelbrot, B. B. (1982), *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, San Francisco.

Muneepeerakul, R., J. Weitz, S. Levin, A. Rinaldo and I. Rodriguez-Iturbe (2007), A neutral metapopulation model of riparian biodiversity, *Journal of Theoretical Biology*, 245 (2), 351-363.

Muneepeerakul, R., E. Bertuzzo, H. Lynch, W. B. Fagan, A. Rinaldo, and I. Rodriguez-Iturbe (2008), Neutral Metacommunity Models Predict Fish Diversity Patterns in Mississippi-Missouri Basin, *Nature,* 125, 341-348.

Piketty, T. (2013), *Il capitale nel XXI secolo,* Bompiani, Milano.

Purves, D. W. and S. W. Pacala (2005), Ecological drift in niche-structured communities: Neutral pattern does not imply neutral process, In Biotic Interactions in the Tropics, Burslem, D., Pinard, M., and Hartley, S., Editors, 107-138, Cambridge University Press.

Rinaldo, A. (2009), *Il governo dell'acqua. Ambiente naturale e Ambiente costruito*, Marsilio, Venezia.

Rinaldo, A., W. E. Dietrich, R. Rigon, G. K. Vogel, I. Rodriguez-Iturbe (1995), Geomorphological signatures of varying climate, *Nature*, 374 (6523), 632-635.

Rodriguez-Iturbe, I., A. Rinaldo (1997), *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*, Cambridge Univ. Press, New York.

Rinaldo, A., *et al.* (2012), E. Bertuzzo, L. Mari, L. Righetto, M. Blokesch, M. Gatto, R. Casagrandi, M. Murray, S. M. Vesenbeckh, I. Rodriguez-Iturbe, Reassessment of the 2010-2011 Haiti cholera outbreak and rainfall-driven multiseason projections, *Proceedings of The US National Academy of Sciences PNAS*, 109(17), 6602-6607.

Rinaldo, A., R. Rigon, J. R. Banavar, A. Maritan, I, Rodriguez-Iturbe (2014), Evolution and selection of river networks: statics, dynamics, complexity, *Proceedings of the US National Academy of Sciences PNAS*, 111(7), 2417-2424.

Steinmann, P., J. Keiser, R. Bos, M. Tanner, J. Utzinger (2006), Schistosomiasis and water resources development: systematic review, meta-analysis, and estimate of people at risk, *Lancet Infectious Diseases*, 6, 411-426.

Watts, D. (1999), *Small Worlds. The Dynamics of Networks between Order and Randomness*, Princeton University Press, Princeton.