

Fiorenzo Ferlaino

Reti urbane e resilienza ambientale

(doi: 10.14650/95930)

Scienze Regionali (ISSN 1720-3929)

Fascicolo 1, gennaio-aprile 2020

Ente di afferenza:

Consorzio Bess (bess)

Copyright © by Società editrice il Mulino, Bologna. Tutti i diritti sono riservati.

Per altre informazioni si veda <https://www.rivisteweb.it>

Licenza d'uso

L'articolo è messo a disposizione dell'utente in licenza per uso esclusivamente privato e personale, senza scopo di lucro e senza fini direttamente o indirettamente commerciali. Salvo quanto espressamente previsto dalla licenza d'uso Rivisteweb, è fatto divieto di riprodurre, trasmettere, distribuire o altrimenti utilizzare l'articolo, per qualsiasi scopo o fine. Tutti i diritti sono riservati.

Reti urbane e resilienza ambientale

Fiorenzo Ferlaino

Urban Networks and Environmental Resilience

In the last years the concept of resilience received great attention. The concept does not have a univocal definition. Rather, it evokes the resistance of the social and environmental systems to human shocks, in the first place climate change. This paper focuses on the relationship between the territory and the environmental resilience, investigating the role of urban network organizations. The system of cities forms a hierarchical network model that varies according to the trade-offs *efficiency/complexity*, *low cost/diseconomies*, *vulnerability/resilience*. Therefore, the impact of human activity on the environment is studied in relationship with the increase in urbanization in a cross-country analysis. The work shows that, in an environmental resilience model, the catastrophic scenario is a concrete possibility beyond a certain threshold of consumption of natural capital.

Keywords: economic impacts of globalization, environment, demographic economics, regional and urban history.

JEL classification: F60, F64, J10, N90.

1. Introduzione

Negli ultimi anni il concetto di resilienza ha avuto una larghissima eco, soprattutto a seguito del rapporto di Folke *et al.* (2002). Il concetto non ha una definizione univoca ma è molto evocativo rispetto alle possibilità di risposta agli shock antropici (in primo luogo al cambiamento climatico) dei sistemi sociali e in particolare del sistema terra, attraverso l'auto-organizzazione. È stato quindi assunto nei documenti europei e svolge un ruolo centrale nella valutazione delle politiche comunitarie (European Commission, 2014) e in ogni ambito disciplinare: economico, sociologico, psicologico, territoriale.

L'articolo intende indagare il rapporto tra la resilienza e i sistemi urbani evidenziando, nella prima parte, l'esistenza di almeno due differenti concezioni del significato di resilienza, quella fisico-ingegneristica e quella

Fiorenzo Ferlaino: IRES-Piemonte, Via Nizza 18, 10125 Torino, Italia. E-mail: ferlaino@ires.piemonte.it

ecologico-evoluzionistica, la prima orientata a definire la *persistenza* e resistenza del modello originario, la seconda le sue *trasformazioni*; si passa quindi a sostenere che tutte le distribuzioni di potenza, *in primis* il sistema urbano, esprimano strutture resilienti entro un *trade-off* che tenta di regolare la dia-logia *vulnerabilità-adattamento*, attraverso reti maggiormente gerarchiche o maggiormente equopotenziali; si entra quindi nel merito della resilienza in ambito ambientale e si indaga quali siano i motivi della resilienza ambientale urbana attraverso la I-PAT Equation; infine si prova, per mezzo di un modello, a definire il dominio di possibilità della resilienza in campo ambientale.

Il termine resilienza deriva dal latino *resilire*, rimbalzare, tornare indietro. In letteratura si sono definiti nel tempo tre concetti di resilienza: quello fisico-ingegneristico, quello ecologico e quello evoluzionistico o socio-ecologico (Davoudi, 2012; Davoudi *et al.*, 2013). Queste concezioni si sono formate nel tempo e hanno approfondito aspetti diversi della resilienza: la fisico-ingegneristica ha approfondito gli aspetti di resistenza e di persistenza, l'ecologica gli aspetti ambientali e relativi alla vulnerabilità e agli equilibri dei sistemi, infine, quella socio-ecologica l'interazione tra l'uomo e l'ambiente concentrandosi sugli aspetti relativi all'adattabilità, trasformazione, auto-organizzazione. In questo processo si è passati da una visione meccanicistica a una visione dinamica e quindi interattiva. Anche le metodologie sono cambiate passando da leggi generali fisiche allo studio di sistemi viventi dinamici, a studi specifici dell'interazione uomo-ambiente e di casi il più delle volte difficilmente generalizzabili.

Restando nell'ambito della teoria dei sistemi, questa visione può ulteriormente essere sintetizzata entro due apparati concettuali della resilienza, quella fisico-meccanica e quella ecologico-evolutiva. Per giungere a tale sintesi occorre andare oltre il modello concettuale antropocentrico che concepisce la natura e l'ambiente in interazione dialogica con l'uomo (Folke *et al.*, 2010) e assumere la visione «antropocena» (Williams *et al.*, 2011; Zalasiewicz, Williams, 2012) che vede l'uomo e le sue pratiche non separato dalla natura bensì prodotto di quest'ultima:

Con l'ecologia termina un'epoca storica cominciata con l'umanesimo rinascimentale e forse prima: l'uomo non è più al centro dell'universo ma è uno dei tanti organismi che per vivere deve entrare in relazioni d'equilibrio con le altre componenti naturali, l'uomo non definisce la natura ma ne è un portato, può modificarla ma ogni sua azione finalizzata a «dominare» e controllare gli oggetti intorno non è definita da una relazione causa-effetto univoca ma biunivoca: l'effetto diviene causa e si ripercuote sull'insieme degli oggetti in modo spesso sconosciuto e imprevedibile. L'ecologia è lo studio di queste relazioni e di questa imprevedibilità. Una volta si diceva che la natura non esiste in quanto è sempre una natura antropica oggi bisogna aggiungere che l'uomo è sempre un elemento naturale e pertanto uno dei tanti che ne definisce il significato (Ferlaino, 2005, p. 8).

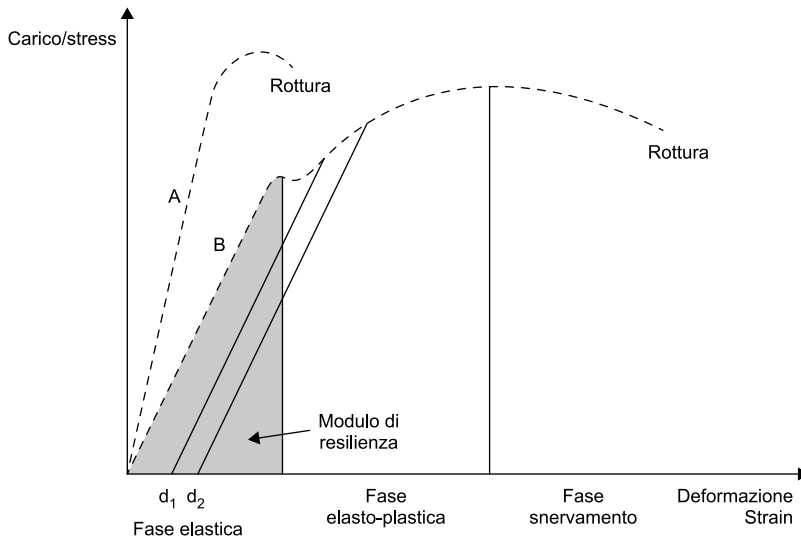


Figura 1: Resilienza: il modello meccanico.

2. Il modello meccanico della resilienza: resistenza e persistenza del modello

In meccanica il modulo di resilienza (Figura 1) è l'area che definisce la fase elastica di un materiale (curva B, area più scura) in cui vige la legge di Hooke di proporzionalità tra la forza di trazione e l'allungamento del materiale (ad esempio una provetta o una molla di acciaio). La resilienza in fisica è cioè la fase in cui una molla sottoposta a carico ritorna alla sua lunghezza originale. Se si supera il punto di resilienza si hanno deformazioni permanenti del materiale (ad esempio d_1 , d_2 , ecc.). Si entra quindi nella fase plastica in cui il materiale sebbene si deformi permanentemente mantiene una sua elasticità. Si arriva poi allo snervamento cioè al massimo punto di comportamento elastico; nella fase di snervamento si ha deformazione (allungamento) per carichi via via minori fino alla rottura. L'area della fase plastica (sia quella elasto-plastica che quella di snervamento, fino alla rottura) definisce la «tenacità» del materiale. Materiali più tenaci sono anche detti «duttili» (ad esempio curva B) mentre quelli scarsamente tenaci sono detti «fragili» (curva A).

La dinamica espressa dalla curva A è interessante perché ha un alto modulo di resilienza meccanica ma una scarsa tenacità, che avvicina il punto di rottura; diversamente B esprime la curva di un materiale sottoposto a carico molto più duttile e tenace.

Tale concetto «meccanico» di resilienza è una buona metafora anche per le scienze sociali e economiche (Holling, 1996). Il modello meccanico di resilienza

è particolarmente utile inoltre entro dimensioni temporali di breve periodo (congiunturali), in quanto è in grado di fornire elementi interpretativi su cui valutare il cambiamento elastico o lo shock di un sistema. L'innalzamento dello *spread*, la caduta repentina della borsa ma anche la perturbazione di una città a seguito di un attacco terroristico (shock), possono essere letti attraverso il modello meccanico: si richiede al sistema di essere resiliente e di ritornare nel più breve tempo possibile allo stato precedente. In tal senso un sistema (sociale, istituzionale, economico, finanziario, territoriale, ecc.) è resiliente se ha la capacità di rispondere ad uno shock esogeno ritornando in tempi brevi all'equilibrio originale. Shock di entità superiore potrebbero facilmente essere riassorbiti dalla fase elasto-plastica che renderebbe il sistema dinamico. Anzi, proprio tali impatti potrebbero essere i fattori di cambiamento del sistema che evolverebbe grazie alla sua capacità di assorbire gli shock prossimi allo snervamento (punto di incapacità di tenuta del sistema) passando, da d_1 a d_2 .

È evidente che sistemi di questo tipo non tengono conto della natura evolutiva della società contemporanea, che cambia continuamente. Sul medio-lungo periodo il modello meccanico è inapplicabile in quanto per la società industriale e post-industriale il cambiamento è la regola e pertanto la misura della resilienza, quale variazione dallo stato iniziale, appare poco significativa e incapace di esprimere questa dinamica «Resilience, the capacity to lead to a continued existence by incorporating change» (Berkes *et al.*, 2003).

Entrano in gioco molti attributi dei sistemi resilienti che comprendono il capitale sociale, i servizi eco-sistemici, la diversità culturale e biologica, l'apprendimento adattivo e altre forme di risposta (Pimm, 1984; Walker, Salt, 2006).

3. Gerarchia e reti di potenza delle città

In un sistema complesso, il cambiamento esprime il potenziale di creare opportunità evolutiva, crescita, sviluppo, innovazione. Come afferma la *United Nations International Strategy for Disaster Reduction* la resilienza è

the ability of a system, community, or society exposed to hazards to resist, absorb, accommodate to and recover from the effects of a hazard in a timely and efficient manner, including through the preservation and restoration of its essential basic structures and functions (UN, 2009).

Occorre quindi estendere la duttilità del sistema, ridurre la sua fragilità o per dirla con Kasperson e Kasperson (2001) la sua vulnerabilità. La vulnerabilità è per alcuni versi il rovescio della medaglia dell'adattabilità, sebbene esprima caratteristiche peculiari del sistema, come vedremo in seguito. Quando un sistema (sociale o ecologico) perde elasticità, diventa vulnerabile e anche piccoli cambiamenti possono essere devastanti. Il problema diventa

allora quello ridurre la vulnerabilità del sistema e consentirgli di rispondere efficacemente agli shock attraverso nuova organizzazione. Per la teoria dei sistemi si passa in tal caso dai sistemi omeostatici, tesi a ripristinare il modello esistente, ai quelli omeoretici che cambiano forma conservando tuttavia il percorso dinamico intrapreso (Waddington, 1977), il flusso energetico (Prigogine *et al.*, 1979).

La questione è in gran parte risolta dai risultati della teoria delle reti (Buchnan, 2003) dove il modello meccanico lascia il posto a un modello molto più articolato e dinamico. Il risultato più importante individua nelle reti (siano esse ecologiche, sociali o di altro tipo) definite da una distribuzione di potenza le strutture a più elevata resilienza o efficienza (Erzsébet, Barabasi, 2003).

La legge di potenza è la distribuzione che caratterizza i sistemi complessi. Come sappiamo, la curva a campana, la gaussiana, descrive fenomeni in cui la distribuzione dei valori è frutto del caso. La legge di potenza descrive invece distribuzioni di fenomeni circolari cumulativi, gravitazionali, emulativo-competitivi, in cui alcuni valori o nodi della rete sono più attrattivi di altri. Tipico è il caso della distribuzione delle città sul territorio. Esse non hanno tutte lo stesso rango in quanto alcune esercitano, nel tempo, processi circolari cumulativi (maggiore ricchezza che produce maggiori attività, più forte attrazione di risorse umane, più alta ricerca e innovazione, ecc.) che ne incrementano la dimensione e ne innalzano la dimensione e il posizionamento relativo. Come è noto, la legge che correla la dimensione urbana della popolazione al suo rango gerarchico è definita «legge rango-dimensione» e segue la distribuzione di potenza di Pareto-Zipf (Zipf, 1949; Rosen, Resnick, 1980).

Le reti o i grafi relazionali di un sistema ecologico, sociale, informatico, seguono la stessa distribuzione iperbolica. Sono note, oltre la legge di Zipf, distribuzioni di potenze del tutto simili, individuate per ambiti diversi: la legge di Pareto (Pareto, 1896) per la distribuzione della ricchezza nella società, di Gibrat (Gibrat, 1931) per la distribuzione del rango dimensionale delle imprese, di Juran (Juran, 1951) per la distribuzione degli errori nel controllo di qualità, di Baran (Baran, 1964) per le reti di telecomunicazione. La distribuzione di potenza oltre a opporsi concettualmente alla distribuzione statistica gaussiana ha anche la caratteristica di essere una distribuzione frattale (Mandelbrot, 1987): un sottoinsieme spazializzato dell'universo esprime esso stesso una distribuzione di potenza. Così il sistema urbano mondiale segue la legge di Zipf ma anche i sistemi nazionali e regionali. Queste tipologie di reti si creano in virtù di due principi: il «principio di minimo sforzo» o *preferential attachment* e il principio di «efficienza» del sistema.

Il *preferential attachment* afferma una ovvietà: è preferibile muoversi verso luoghi in cui si ha maggiore probabilità di benessere oppure connettersi al nodo con maggiore potenza e minor costo, ecc. In pratica questo principio afferma che la probabilità che un nodo si connetta a un altro nodo dipende dal numero di connessioni già possedute da quest'ultimo, maggiori sono le

connessioni presenti su un nodo più alta è la probabilità che altri nodi si connettano a esso. In informatica, ad esempio, connettersi a un nodo *hub*, che possiede già moltissime connessioni, garantisce sul rapporto tra la potenza dello stesso e la sua economicità. I fenomeni emulativi, tipici dei modelli di diffusione ecologici (ma che riguardano anche le innovazioni tecnologiche, i comportamenti, l'adozione di risposte e moltissime altre questioni) trovano nel principio del minimo sforzo e nel *preferential attachment* una spiegazione evidente di efficacia del sistema. Un nodo con maggiori connessioni garantisce sull'efficacia e crea quindi nuove connessioni. È il caso, ad esempio, delle città a elevata attrattività sociale ed economica.

Creare maggiore connettività o ridondanza, creare quindi percorsi ciclici in reti perfettamente gerarchiche, accresce la resistenza del sistema allontanandone il punto di rottura. Tuttavia esiste una soglia oltre la quale il numero di connessioni a un nodo crea diseconomie e ciò spinge il sistema a crescere e ampliarsi in potenza e economicità. Succede così che la distribuzione delle catene alimentari in un ecosistema, delle città, del numero di nodi e dei rispettivi link della rete di internet, ecc. sia definita da una rete gerarchica, che presenta alcuni o diversi cicli e che struttura una distribuzione comunque iperbolica in cui pochi (o pochissimi) *hub* gestiscono molte connessioni mentre i nodi inferiori ne gestiscono via via meno. Una catena trofica sarà, ad esempio, sempre formata da pochi grandi animali che utilizzano risorse alimentari di un numero maggiore di più piccoli animali (in genere il rapporto è 1 a 10) delle classi inferiori che utilizzano risorse minori e così via.

Nei sistemi ambientali, sociali, economici, la vulnerabilità non è un dato a priori, come nel modello meccanico, ma è modificabile dalla struttura connettiva reticolare interna. Maggiori sono le connessioni cicliche tra i nodi maggiore è la resilienza del sistema, cioè la sua capacità di resistere a shock esogeni. Tuttavia esiste un *trade-off* tra vulnerabilità-precarità e resilienza-adattamento che deriva dal rapporto tra la gerarchia interna alla rete, che permette di economizzare i contatti tra un nodo e un altro (minimo sforzo connettivo), e la sua ridondanza ciclica.

Un albero gerarchico è una rete che non presenta ciclicità e come è noto è la struttura più economica (minori connessioni) per trasmettere e ricevere decisioni e informazioni e per velocizzare scelte (alberi di ricerca). È la struttura cioè più efficiente. Ma esso è estremamente vulnerabile e precario, in quanto l'eliminazione di una connessione di rango elevato esclude la possibilità di raggiungere il relativo sottoalbero. Creare delle connessioni ridondanti o cicliche permette di accrescere l'adattabilità del sistema e ne riduce la vulnerabilità. Il *trade-off* di ogni sistema si gioca appunto tra due modelli ideali difficilmente presenti in natura: tra la massima gerarchizzazione e efficienza (l'albero, che implica anche elevatissima vulnerabilità) e la massima resilienza e ridondanza presente in un grafo completo (Figura 2). L'una e l'altra struttura esprimono dei «tipi ideali», nella realtà è il *mix* dei due modelli a definire la distribuzione di potenza. L'albero è altamente

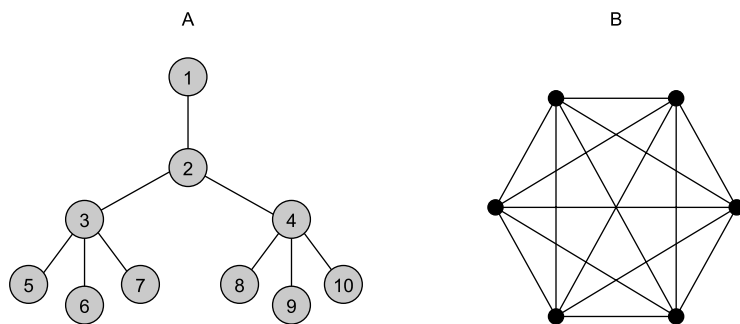


Figura 2: Grafo ad albero (A) e completo (B).

efficiente in quanto minimizza le connessioni (non ha percorsi ripetitivi e ridondanti) ma è estremamente precario e vulnerabile, il grafo completo esprime una situazione di distribuzione equipotenziale altamente adattabile ma con costi elevatissimi di connessioni.

Il risultato di questo *trade-off* sono appunto le reti di potenza. Il successo dipende dall'aver quindi un basso grado di separazione (diametro del Piccolo Mondo)¹ e una elevata resilienza (presenza di cicli chiusi). Questo *trade-off* è un equilibrio dinamico che caratterizza il comportamento e la struttura dei diversi sistemi complessi e li spinge a crescere, quando si manifestano diseconomie interne, e a creare nuovi cicli chiusi che arricchiscono le potenzialità del sistema, ne accrescono il controllo e la capacità adattiva (Holling, 2001). Quanto più un sistema sociale è semplice e gerarchizzato tanto più è efficiente, ma anche vulnerabile, mentre tanto più è complesso (presenza di cicli chiusi) tanto più è resiliente ma meno efficiente e costoso. L'efficienza può essere misurata come l'inverso del numero di connessioni al nodo mentre il costo dal numero di connessioni totali.

Considerando, a esempio, il sistema urbano, la legge empirica di Pareto-Zipf afferma che la popolazione della città di rango n (P_n) è data dalla popolazione della città più importante (P_o) che divide il rango della città n elevato dell'esponente α caratteristico del grado di gerarchizzazione del sistema.

$$P_n = P_o (n^{-\alpha})$$

La determinazione dell'esponente, ovvero del parametro caratteristico del sistema territoriale, è ottenuta attraverso la trasformazione logaritmica:

$$\log P_n = \log P_o - \alpha \log n$$

¹ Il diametro di un grafo è la lunghezza del «più lungo cammino breve», ovvero la più grande lunghezza del cammino minimo (in termini di numero di archi) fra tutte le coppie di nodi.

dove α è la pendenza della retta interpolante costruita per punti in un grafico con scala logaritmica e definisce appunto il parametro caratteristico della distribuzione urbana del territorio considerato. Definisce cioè il *trade-off* tra vulnerabilità e adattabilità, tra grafo gerarchico e grafo completo. Maggiore è l'elasticità della distribuzione di potenza (minore è α) maggiore è la resilienza del sistema.

Le strategie di auto-organizzazione possono essere diverse: se la chiusura dei cicli viene programmata rispetto ai bisogni e alle falle che si creano nella rete, il sistema può non crescere e tendere dinamicamente verso un equilibrio dinamico, se invece prevale l'emulazione e il minimo sforzo allora la crescita del sistema, più o meno caotica, può essere una strategia tendente a creare nuovi cicli chiusi e incrementarne la resilienza.

Le città, lo abbiamo visto, seguono tale distribuzione e nel tempo (soprattutto negli ultimi secoli) le connessioni gerarchico-piramidali, tipiche degli stati e degli imperi, si sono, e soprattutto si stanno, trasformando in relazioni iper-connesse e pertanto fortemente resilienti. La globalizzazione, intesa come iper-connesione, può cioè essere vista sia come causa che come risposta agli impatti sociali e ambientali. L'aumento della popolazione ha spinto verso lo sviluppo dei consumi privati e della conseguente produzione, ma tutto questo ha richiesto una crescita della complessità e della distribuzione urbana della popolazione nonché l'utilizzo crescente dei flussi energetici dissipativi necessari al mantenimento di questo nuovo ordine. Tutto ciò ha come conseguenza per un verso l'immissione di CO₂ nell'atmosfera e il *Climate Change* (la crescita dell'impatto) ma anche lo sviluppo di economie di scala e un più parsimonioso utilizzo delle risorse personali nelle società maggiormente urbanizzate. È quello che mostreremo nei prossimi paragrafi.

4. La città come struttura dissipativa resiliente

Nel 2008 la popolazione urbanizzata mondiale ha superato la soglia del 50% e oggi si assesta intorno al 54%. Nel 1990, vi erano dieci «mega-città» con più 10 di milioni di abitanti, che rappresentavano poco meno del sette per cento della popolazione urbana mondiale (circa 153 milioni di persone); nel 2014, secondo il rapporto delle Nazioni Unite, *World Population Prospects* (UN, 2015), nel mondo ci sono 28 mega-città che ospitano circa il 12% della popolazione urbana mondiale (453 milioni di persone). Sebbene l'Europa sia il continente più urbanizzato, ben 16 *megacities* si trovano in Asia, quattro in America Latina, tre in Africa e in Europa, e due in Nord America. Si sta strutturando cioè una rete di potenza crescente i cui flussi tra i suoi nodi sono in incremento sia per l'aumento della popolazione (circa 75 milioni l'anno, equivalente alla popolazione della Germania), sia per l'attrazione locale esercitata dalle città.

La tesi che sosteniamo è quella che l'aumento della popolazione sia il *driver* che spinge verso una struttura sociale sempre più complessa. Tale complessità è espressa dalle città in quanto organismi maggiormente resilienti, tendenti a mantenere l'ordine sociale e nel contempo a ottimizzare le risorse ambientali in termini relativi (pro capite).

Tale tesi nasce dal dibattito sorto oltre venti anni fa sulla natura delle città come strutture dissipative formulato dal premio Nobel Ilya Prigogine, insieme a Peter M. Allen e Robert Herman (Prigogine *et al.*, 1979). Le strutture dissipative definiscono particolari organizzazioni ordinate dei sistemi aperti fisico-energetici, complessi e autopoietici (Maturana, Varela, 1985). Rappresentano cioè un modello e una «metafora» scientifica dell'organizzazione e della dinamica dei sistemi territoriali, dei suoi nodi e delle sue reti connettive.

Le conseguenze ambientali di questa tesi sono state indagate in passato (Ferlaino, 2005; 2012). In questo paragrafo si intende verificarne la tenuta empirica attraverso l'aggiornamento dei dati e attraverso la verifica della corrispondenza delle stesse correlazioni e dinamiche allora descritte.

Per valutare l'impatto ambientale e le dinamiche in atto occorre richiamare brevemente la IPAT *Equation* di Ehrlich e Holdren (Ehrlich, Holdren, 1971). La IPAT *Equation* è un modello qualitativo, molto semplice e sintetico, che misura l'impatto ambientale globale. Il modello esprime l'impatto totale come effetto moltiplicativo della popolazione mondiale, della misura dei consumi effettuati e dello stato della tecnologia presente.

$$\text{Impact } I = \text{Population } (P) \times \text{Affluence } (A) \times \text{Technology } (T) \quad [1]$$

Dove:

A = consumi per abitante (C/P)

T = l'impatto per unità di consumo (I/C)

In termini quantitativi la formula diventa:

$$I = P \cdot \frac{C}{P} \cdot \frac{I}{C} \quad [2]$$

che è equivalente a:

$$I = P \cdot \frac{PIL}{P} \cdot \frac{I}{PIL} \quad [3]$$

Alla scala globale cresce sia la popolazione, il primo fattore P , sia la quantità di consumi (il PIL pro capite, secondo fattore) mentre esiste una vasta letteratura che si interroga sull'ipotesi che l'impatto ambientale diminuisca al crescere del PIL, ovvero (detto con i termini della IPAT) si interroga sulla possibile diminuzione dell'impatto tecnologico e, quindi, della relativa crescita della produttività per unità energetica e materiale consumato. L'aumento della produttività energetica accompagnata dalla

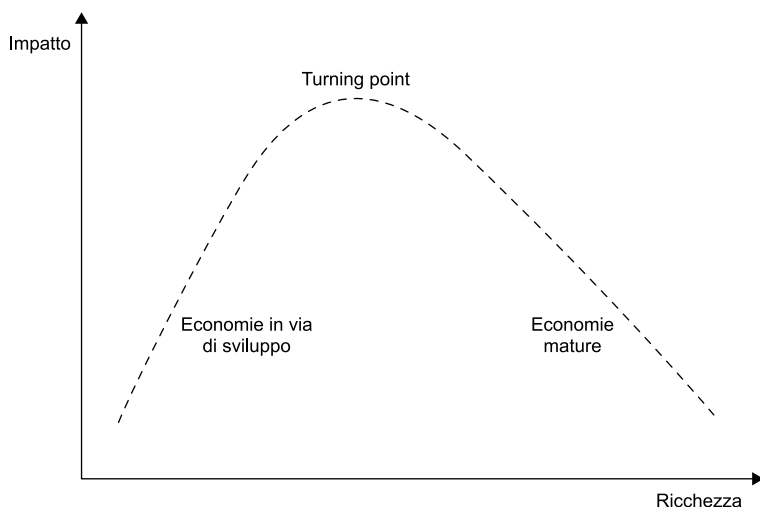


Figura 3: La curva di Kuznets ambientale.

crescente smaterializzazione delle merci porterebbe, secondo questi autori, a mantenere costante la crescita del benessere (soprattutto dei servizi collettivi), diminuendo il consumo di capitale naturale. Questo processo di «scollamento» della crescita del PIL (ma soprattutto del benessere) dalla crescita del consumo di capitale naturale è chiamato *delinking* o *decoupling*.

Il tema del *delinking* è piuttosto dibattuto (Mazzanti, Zoboli, 2005) e ruota intorno alla dimostrazione di una ipotesi teorica che afferma che l'impatto tecnologico cresca a bassi livelli di *Affluence*, di consumo o di PIL/P, quindi raggiunga un picco, a livelli intermedi, per poi invertire la curva e cominciare a decrescere, per alti livelli di consumo. Tali curve sono chiamate *Environmental Kuznets Curve* (EKC) e il dibattito è orientato a comprendere se alla scala globale possa esistere una curva di Kuznets per i consumi ambientali. È stato dimostrato che la formulazione classica dell'EK-Curve (Figura 3) è frutto, a livello globale, di una *false cause* e di una *false correlation* (Bagliani *et al.*, 2006; Ferlaino, 2005). Esiste invece una *Urban Curve* che esprime a nostro avviso la resilienza ambientale delle città cioè il tentativo di adattamento delle società fortemente urbanizzate ai consumi individuali energetici.

L'analisi si fonda su un approccio sincronico *cross-country* con dati del 2010-2014 (la precedente aveva dati del 2008, si veda Ferlaino, 2014). In particolare, nello studio sono state considerate solo le nazioni con più di 5 milioni di abitanti (e senza omissioni nel database). Complessivamente sono stati presi in considerazione 120 paesi su 227. Il valore medio della popolazione è di quasi 60 milioni di abitanti contro la media di 1,32

milioni del resto dei paesi esclusi. I valori di emissione della CO₂ sono ricavati dal *World Data Development Indicators* della Banca mondiale (World Data Bank, 2014; dati 2014); il PIL, il consumo di energia, i tassi di fertilità, la popolazione e l'urbanizzazione percentuale sono raccolti da Brinkhoff (2014) e sono stati controllati sul *World Factbook* (2014) della CIA (CIA, 2014) e il *World Economic Outlook Database* del Fondo Monetario Internazionale (2014), le serie storiche della popolazione e del PIL sono tratte da *Maddison Project and Historical Statistics of the World Economy: 1-2010 AD* (Maddison, 2010).

Riprendiamo la IPAT e analizziamo ognuno dei membri dell'equazione, la *population*, P, l'*affluence*, PIL/P e la *technology*, I/PIL, quindi il risultato complessivo di I.

Come è noto, il primo termine della IPAT, la popolazione, sta crescendo e sembra seguire l'andamento di una equazione logistica. L'andamento logistico è contenuto nello schema della transizione demografica, così come descritta in demografia.

La popolazione tenderebbe quindi a muoversi verso una nuova capacità di carico, verso un asintoto e un nuovo equilibrio. È difficile ancora indicare quantitativamente questo nuovo equilibrio ma le ipotesi ONU indicano scenari al 2030 di 8,5 miliardi e al 2050 di 9,725 miliardi di abitanti (UN, 2015), mentre il flesso della logistica sembra essere stato raggiunto solo da qualche anno. Comunque sia,

la fine del Novecento è segnata da un rallentamento demografico che lascia intravedere la possibilità di una stabilizzazione della popolazione mondiale (Véron, 2009).

Nella IPAT *Equation* il fattore Popolazione è sicuramente il maggiore responsabile dell'impatto ambientale in senso assoluto. In termini relativi l'importanza di questo fattore diminuisce se si confronta la sua crescita con i consumi e con il secondo fattore, il PIL/P. Fatte 100 al 1950 sia la popolazione che il PIL pro capite mondiale, è interessante osservare che mentre la prima ha un andamento quasi-lineare negli ultimi anni, il secondo, l'*Affluence* (i consumi), ha un andamento più che proporzionale (Figura 4).

Il secondo termine dell'equazione ($\Delta C/\Delta P$) è quindi maggiore di 1. Tuttavia la dinamica del PIL per abitante cambia notevolmente se si considera il livello di urbanizzazione. È risaputo da tempo che la città sia una forma di ottimizzazione economica in quanto massimizza il benessere sia dei produttori che dei consumatori (Launhardt, 1885; Christaller, 1932; Isard, 1956; Perroux, 1966) agglomerandoli e riducendone i costi di trasporto. La correlazione mostra (Figura 5) qualche cosa di più, cioè che la ricchezza pro capite cresce più che proporzionalmente con l'affermarsi del modello distributivo urbano-metropolitano.

In modo opposto è correlata la fertilità. È indubbio che al crescere del reddito il tasso di fertilità diminuisca, ma è interessante che esso tenda a

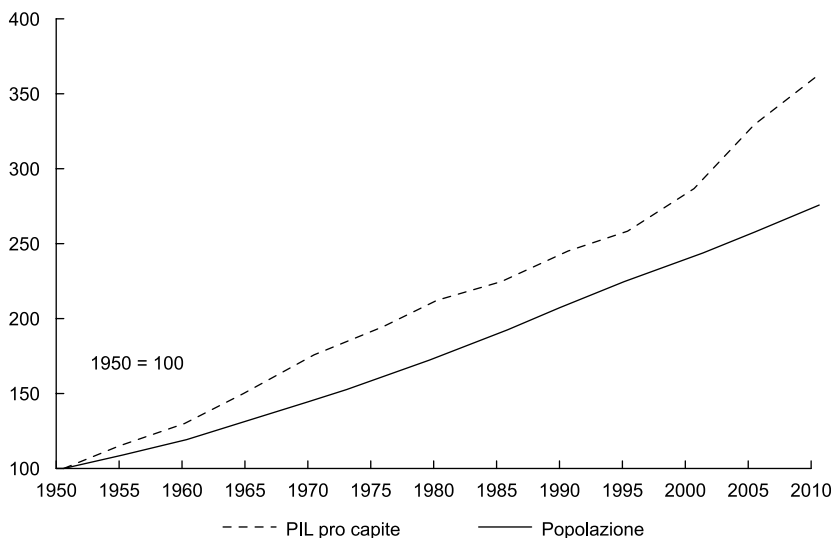


Figura 4: Crescita della popolazione e del Prodotto interno lordo (medio) nel mondo (1950 = 100).

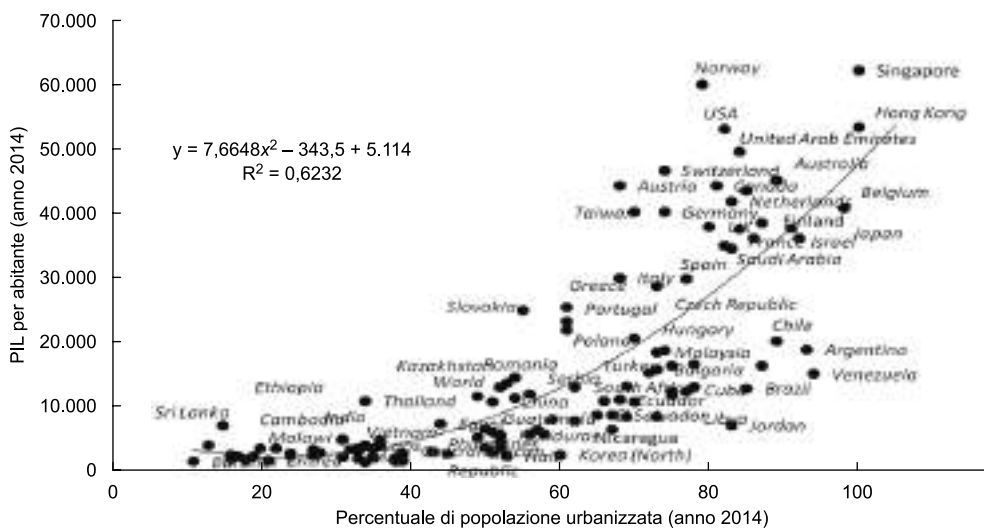


Figura 5: Correlazione tra PIL per abitante e percentuale di popolazione urbanizzata (anno 2014).

diminuire seguendo una iperbole (Figura 6), al crescere della percentuale di popolazione urbanizzata. La città moderna è cioè un «buco nero» demografico. La sua crescita è cioè tutta riferibile alla forte attrattività che esercita sugli spazi circostanti, ai flussi migratori di origine rurale che confluiscono in essa quale fonte di maggiore benessere. L'esplosione demografica degli ultimi due secoli dipenderebbe cioè dal complesso rapporto tra il nuovo modello

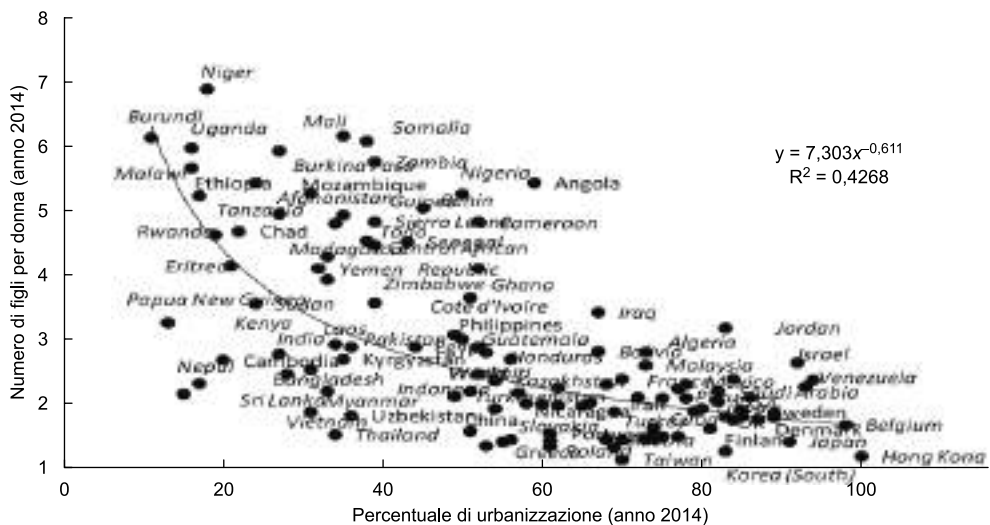


Figura 6: Rapporto tra percentuale di popolazione urbanizzata e il tasso di fertilità (2014).

urbano-industriale e il precedente modello rurale che ha originariamente generato un calo incredibile della mortalità e quindi, in un secondo tempo, un calo della fertilità nelle società maggiormente urbanizzate (transizione demografica).

Se si correlano i tassi di fertilità con i tassi di urbanizzazione la relazione appare evidente e mostra l'effetto «buco nero» della natalità: la città attira popolazione da luoghi rurali ad alta fertilità fornendo loro benessere (ricchezza e maggiore speranza di vita) e rendendone implosiva la riproduzione.

È interessante notare che maggiore è l'urbanizzazione più si converge verso comportamenti riproduttivi simili. La differenziazione dei percorsi evolutivi diminuisce con l'urbanizzazione e nelle metropoli, nei territori-città (quelli con tassi di urbanizzazione del 90-100%), nelle megalopoli, i tassi di fertilità sono molto bassi.

Veniamo al terzo fattore, la *Technology*. Per considerare l'impatto è stata usata una *proxy* significativa, il consumo energetico definito dalla somma dei consumi petroliferi, di gas e elettrici standardizzati (1 Kcalth = 4,186 J). È interessante evidenziare come il consumo energetico² sia fortemente correlato (linearmente) con il PIL (r -quadro = 0,84) e ciò contraddice l'ipotesi della EKC a livello globale (Figura 7).

Se si correla invece il consumo energetico per unità di PIL con l'urbanizzazione, l'intercetta polinomiale evidenzia una relazione complessa, tendente ad assumere una forma a U rovesciata (una parabola, Figura 8). La lettura di

² Non è stata considerata la Tunisia che ha avuto nel 2010 un consumo energetico per abitante decisamente anomalo rispetto al resto degli altri paesi.

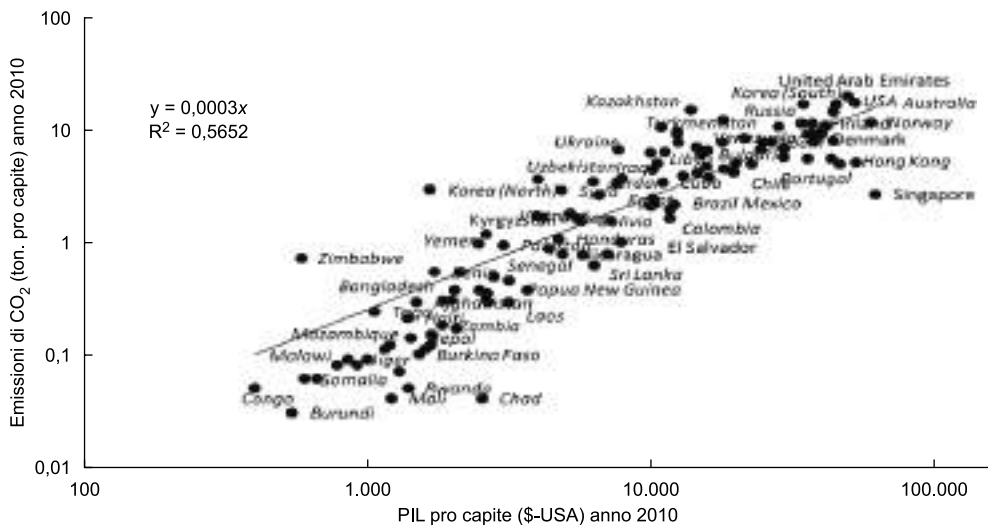


Figura 7: PIL pro capite e emissioni di CO₂ pro capite.

questa relazione sembra suggerire che la città svolga un doppio ruolo: al crescere dell'urbanizzazione si avrebbe un aumento esponenziale dell'impatto generato ma oltre una certa soglia (circa il 60% di popolazione urbanizzata) la crescita tenderebbe a diminuire, fino a raggiungere intensità decisamente minori.

L'energivorità andrebbe quindi correlata a due diverse processualità: la città agirebbe in un primo tempo come acceleratore dell'impatto, generando cioè «crescita»³ e, in una seconda fase, quella dei sistemi territoriali maturi, quando l'urbanizzazione ha superato una certa soglia (oltre il 60%-70% della popolazione urbanizzata) genererebbe «sviluppo», ovvero implementerebbe il benessere attenuando la crescita dell'impatto (in termini relativi, per persona). La curva sembra evidenziare la transizione dall'economia agricola a quella industriale, energivora e inquinante, seguita dalla più recente transizione dalla base industriale tradizionale, alla base economica dei servizi e dell'industria innovativa a maggiore rendimento energetico (fase *smart* dello sviluppo).

Tale processo in effetti non è una canonica EKC, in quanto non è definita da una diminuzione del carico ambientale in ragione dell'aumento del PIL (che abbiamo visto crescere proporzionalmente nell'analisi *cross-country*) quanto in virtù di una forma di sviluppo a maggiore produttività energetica e inserito in una organizzazione particolare della società fatta di città e metropoli in grado di creare crescenti economie di scala. La causa di questo andamento non dipenderebbe quindi solo dalle tecnologie usate (i consumi energetici pro capite crescono con la ricchezza) quanto dall'innescarsi di economie di

³ Per crescita si intende l'implementazione del benessere quantitativo economico a scapito dell'ambiente (Tiezzi, Marchettini, 1999).

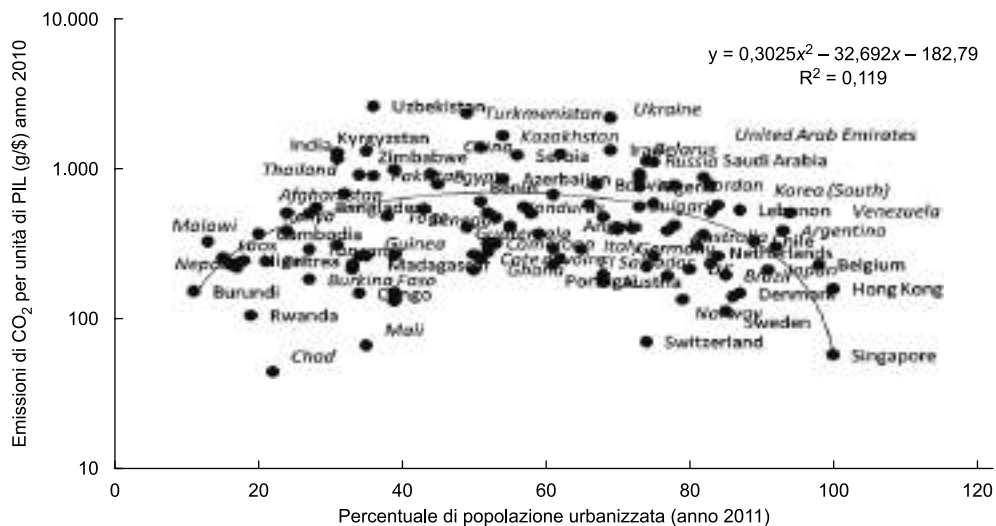


Figura 8: Relazione tra l’impatto generato da una unità di PIL prodotto [scala log.] e la percentuale di popolazione urbanizzata.

scala territoriali che intervengono quando la concentrazione sociale diviene maggiore e supera determinate soglie.

Alla scala locale i termini del dibattito appaiono convergere con questo risultato ed evidenziano il ruolo che nei sistemi maturi gioca l’organizzazione urbana e metropolitana.

Ad esempio, l’energia per persona, ovvero l’energia incorporata e importata in un anno dalla città di Torino (misurata in joule-solari) era, secondo i dati IRES (anno 1998), la metà di quella regionale e inferiore a quella nazionale. Lo stesso risultato si è ottenuto valutando l’impronta ecologica per persona della provincia di Torino. Sempre allo stesso anno, essa risultava inferiore a quella regionale e minore delle altre province con l’eccezione del Verbano-Cusio-Ossola (la più bassa in assoluto tra le province del Piemonte).

Sono risultati passibili di generalizzazione? Sembrerebbe di sì: Liverpool aveva al 2001 una EF (*Ecological Footprint*) di 4,15 gha/ab., contro una media della Gran Bretagna di 4,9 gha/ab. (Barret, Scott, 2001); Berlino aveva, al 2000, una impronta ecologica di 4,06 gha/ab. contro i 4,7 gha/ab. della Germania (Pacholsky, 2000) e in Scozia, dove è stata fatta un’analisi molto accurata, ben cinque città sulle sei studiate hanno delle impronte minori alla media nazionale⁴ (Chambers *et al.*, 2004)⁵.

⁴ Edinburgh 5,12 gha/ab., Dundee 5,04, Inverness 5,00, Glasgow 4,91, Angus 4,78, contro una EF (*ecological footprint*) di 5,35 gha/ab. per la Scozia. Solo Aberdeen 5,37 ha una impronta superiore alla media nazionale. Altre stime per Londra danno una EF uguale alla media nazionale, qualora si tolga la quota dovuta ai turisti.

⁵ Questi valori sono tanto più significativi se si considera che i calcoli dell’impronta ecologica si basano più sui consumi (e sulla quantità di biocapacità necessaria a rigenerarli) che sui flussi produttivi.

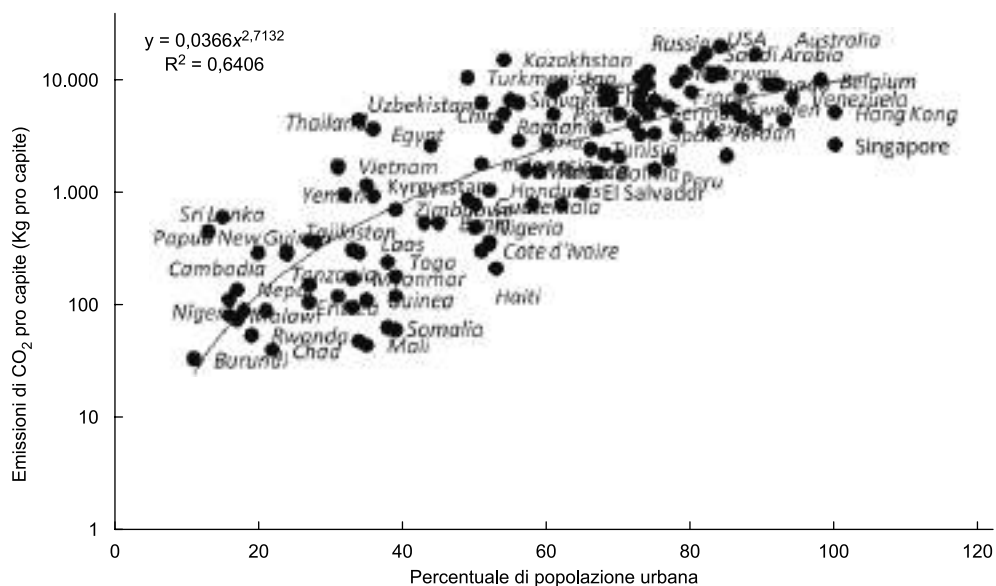


Figura 9: Emissioni totali pro capite [scala log.] e percentuale di popolazione urbana.

Esiste quindi un differenziale tra le nazioni a scarsa urbanizzazione e quelle fortemente urbanizzate, che colloca le seconde entro processi maggiormente virtuosi di produttività energetica e materiale, dettati anche dalla più efficiente organizzazione territoriale e dal migliore utilizzo delle economie di scala generate. In altri termini la forma urbana non è certamente indifferente e appare chiaro che la dispersione genera forti esternalità negative e costi collettivi incomparabilmente più alti (Camagni *et al.*, 2002) nonché una impronta ecologica per abitante (Høyer, Golden, 2003) decisamente maggiore.

È interessante notare che sebbene con l'urbanizzazione l'impatto per persona cresca esponenzialmente, esso non segue l'andamento dei consumi ma ha un profilo che tende a contrastare la crescita più che proporzionale di questi ultimi (Figura 9). La resilienza della città emerge in tutto ciò.

L'organizzazione morfologica urbana sembra rispondere all'aumento della popolazione (alla «bomba demografica») attraverso un ordine che mantiene la sua complessità sociale, implementando il benessere, la speranza di vita e i consumi, ma nello stesso tempo tendendo a far implodere la natalità per persona e diminuendo la velocità di crescita dell'intensità energetica e degli impatti nei territori fortemente urbanizzati. In questo senso si può dire che la città è una struttura dissipativa resiliente. La città contemporanea avanzata si comporta cioè come una struttura che tende a migliorare le condizioni qualitative (consumi) della popolazione e nel contempo tende a contenere e resistere all'impatto generato dalla crescita della popolazione, attraverso l'implosione della fertilità, e dei consumi,

attraverso una tendenziale ottimizzazione dei suoi flussi energetici e l'implementazione delle economie di scala.

Il risultato (espresso in Figura 10) appare chiaro: col crescere dell'urbanizzazione l'impatto continua a crescere in forma logaritmica con una tendenza verso profili di consumo meno energivori di quelli precedenti. Tutto questo è certamente importante. Ma basta a rendere sostenibile il modello sociale urbano?

5. Panarchia e sistemi dissipativi

Nei sistemi sociali il concetto di resilienza è legato alla capacità di cambiare strategia, di saper far fronte alle perturbazioni e agli shock innovandosi, di adattarsi e modellare/modellarsi al cambiamento e all'imprevedibile. Gli studiosi della resilienza hanno riconosciuto quattro caratteristiche fondamentali della resilienza che sono state definite la *resistenza*, la *precarietà*, la *panarchia*, e la *latitudine*.

i) La *resistenza* è una caratteristica della resilienza e definisce quanto e come il sistema è complessivamente resistente al cambiamento. Il concetto è stato ampiamente trattato nei paragrafi 1 e 2.

ii) La *panarchia* integra il sistema considerato con quelli che lo determinano: a causa delle interazioni che hanno luogo a diverse scale, la resilienza di un sistema dipenderà dalle influenze degli stati e delle dinamiche alle scale superiori e inferiori, dei meta-sistemi e dei sotto sistemi.

L'integrazione di questo concetto con la teoria generale rimanda ancora una volta ai sistemi dissipativi.

Consideriamo un sistema panarchico composto da sottosistemi $i = 1 \dots n$. La variazione dell'entropia S , nel tempo dt , che indichiamo con dS , dovrà rispettare il secondo principio della termodinamica: $dS = dSe + \sum dSi > 0$, dove dSe rappresenta l'entropia del sistema esterno (meta sistema) e $\sum dSi$ rappresenta l'entropia prodotta dai sistemi intermedi (ad esempio, i differenti quartieri di una città). L'entropia totale del sistema dovrà, per la seconda legge della termodinamica essere sempre positiva: $dS > 0$.

Questo non implica che anche i sistemi intermedi $\sum dSi$ debbano essere entropici. La sola restrizione posta dalla seconda legge della termodinamica sarà che: $dSe > -\sum dSi$. Ovvero la neghentropia dei sistemi intermedi deve essere minore dell'entropia del meta sistema.

Pertanto si può avere neghentropia e ordine nei sistemi intermedi per $\sum dSi < 0$. Questo significa che i sottogruppi considerati possono strutturare ordine (neghentropia) a costo che nel meta sistema si abbia un consumo energetico maggiore, una maggiore dissipazione. Ovvero, maggiore è la panarchia nel sistema, maggiori saranno i consumi energetici del meta sistema (ad esempio, del meta sistema urbano). Detto in altri termini, maggiore è la complessità e la resilienza del sistema (la sua panarchia) maggiore saranno

i flussi energetici che lo attraverseranno. Il problema della sostenibilità si pone quindi in modo evidente nei sistemi resilienti in quanto l'incremento di resilienza implica un incremento di complessità e necessariamente un incremento di dissipazione energetica.

iii) La *precarietà* indica la vulnerabilità del sistema, quanto esso sia vicino alla sua soglia di rottura.

iv) Per *latitudine* infine si intende l'ammontare massimo entro cui un sistema può cambiare senza perdere la propria abilità al recupero, ovvero il suo dominio di funzionalità (Gunderson, Holling, 2001; Walker *et al.*, 2004).

I concetti di precarietà-vulnerabilità e di dominio-latitudine rimandano al concetto di soglia e di rottura che affronteremo attraverso un modello dinamico.

Integrazione, resistenza, vulnerabilità e dominio definiscono la resilienza di ogni sistema. Ma esso è in primo luogo, lo abbiamo visto, una struttura ordinata, che può variare il suo ordine interno grazie alla quantità di flussi energetici che lo attraversano. La produzione dell'uomo trasforma materia disordinata in materia ordinata secondo definite modalità che la rendono utile grazie all'energia. Le fabbriche, le officine, gli uffici, trasformano materiale e informazione disordinata in oggetti utili e in informazione comprensibile con le stesse modalità.

Allo stesso modo i sistemi complessi autopoietici e i sistemi biologici sono strutture che mantengono il loro ordine interno grazie a un enorme dissipazione di energia. Qualsiasi sistema relazionale (aperto) scambia energia e materia e mantiene il suo ordine dissipando calore. L'utilizzo crescente di energia è un vincolo che informa, pre-ordina, prestabilisce qualsiasi forma di adattamento culturale o sociale. Le città sono dei sistemi il cui ordine è mantenuto proprio attraverso una continua dissipazione energetica (Prigogine, 1979) e «all'interno dell'economia umana, i flussi energetici ed emergenti si concentrano verso i centri, cosa che spiega gli insediamenti e le città» (Odum, 2005). Non è un caso che l'energia impiegata dall'uomo nel mondo è la metà dell'intero capitale naturale utilizzato. Tuttavia non possiamo fare a meno di questa enorme quantità di energia dato che la produzione, l'autorganizzazione e la vita (l'autopoiesi), sono strutture dissipative. Se concentriamo l'analisi sull'energia, che è il fattore necessario per il mantenimento dell'ordine nei sistemi produttivi e nei sistemi auto poietici, dobbiamo considerare diverse tipologie energetiche.

L'energia totale (T) disponibile è infatti data dalla somma degli *stock* di energia finita (F), in genere fossile quale carbone, petrolio, gas, ma anche nucleare, più l'energia ricavata da fonti rinnovabili (R). L'uso di energia finita comporta dei problemi in quanto l'attività di trasformazione e l'utilizzo dei depositi geologici di materiale energetico dispiega nell'ambiente sostanze che ne modificano irrimediabilmente la struttura e composizione: sostanze climalteranti (nel caso dei combustibili fossili) o scorie radioattive (nel caso dell'energia nucleare). L'uomo libera in un tempo piuttosto breve quello che

la natura ha stivato in milioni di anni. Le energie rinnovabili sono a loro volta composte da due tipologie di vettori: quelli rigenerabili (B) da biomassa e quelli che dispongono di fonti che si possono considerare inesauribili e pertanto infinite (I). Rientrano nelle prime i biocarburanti, il biogas, gli oli vegetali, il cippato, ecc. e nelle seconde l'energia solare, eolica, geotermica, idroelettrica, delle correnti del mare o dei fiumi, l'energia mareomotrice (delle maree), quella osmotica (del gradiente salino marino), la talassotermica (del gradiente termico), ecc. Pertanto:

$$T = F + R = F + B + I$$

Se consideriamo quindi la resilienza ambientale in qualche modo correlata con l'energia disponibile se ne deve dedurre che essa è almeno in potenza infinita. In realtà l'economia capitalistica si è concentrata (forse perché più facile da estrarre, certo perché è più controllabile da pochi ed è pertanto remunerativa) verso l'utilizzo degli stock energetici finiti: l'85% dell'energia mondiale deriva da fonti fossili finite. L'energia infinita e rigenerabile⁶ assomma al 9-10% degli utilizzi totali.

L'energia da fonti fossili non è altro che biomassa finita e stoccata da milioni di anni nelle viscere della terra. In questo contesto la resilienza del sistema ambientale andrebbe correlata alla capacità dello stesso di metabolizzare gli shock dovuti agli impatti, a esempio la CO_2 emessa, restituendola sotto forma di nuova biomassa e ossigeno. La capacità di rigenerazione e metabolizzazione del sistema coinciderebbe verosimilmente con la sua resilienza. Ci poniamo la seguente domanda: qual è il *dominio* e la soglia di *vulnerabilità* entro cui un sistema che utilizza energia da biomassa è in grado di rigenerare le risorse utilizzate? Quali sono le relazioni che determinano gli utilizzi sostenibili della biomassa?

6. Rigenerazione, resilienza e catastrofe

Il modello che proponiamo prova a fornire una risposta alle domande poste. Esso è una rielaborazione in termini ambientali di un modello di Peter M. Allen e della scuola di Bruxelles di analisi dei sistemi complessi (Allen, 1982; Ferlino, 2002).

Sia X l'energia da biomassa disponibile. Essa può essere pensata in forma riduttiva come quota parte della biomassa rigenerabile B usata come fonte energetica oppure in forma estesa come biomassa complessiva di $B + F$ (fos-

⁶ Esiste una differenza tra energia infinita e rigenerabile in quanto la prima deriva fondamentalmente dal sole o da processi derivati (venti, maree, ecc.) mentre l'energia rigenerabile deriva dalla biomassa prodotta.

sile) usata come energia. Il modello resta comunque valido sebbene cambino le temporalità e le quantità in gioco.

Φ è invece il capitale artificiale (macchine, residenze, capannoni, infrastrutture, ecc.) creato dalle attività umane che può essere attivo Y (quando si usa e si consuma energia) oppure a riposo Y^* (non si usa energia).

Nel modello, il capitale artificiale creato dalle attività umane fa uso di energia X derivante solo dalla biomassa. X ha un andamento logistico, lo vedremo in seguito.

Il modello è definito cioè dalle seguenti variabili:

X , energia da biomassa disponibile, di cui:

b , tasso di trasformazione (uso) della biomassa del capitale naturale in energia;

N , sono le risorse totali (presenti nel suolo e sottosuolo) che permettono a X di svilupparsi, è la *carrying capacity* del sistema ambientale, ovvero il potenziale di capitale utilizzabile. Se si considerano le fonti fossili di biomassa allora N comprende la biomassa esistente B rigenerabile e la biomassa da fonti fossili: $N = B + F$;

Y^* , densità del capitale artificiale a «riposo», cioè parte del capitale artificiale che all'istante di tempo considerato non usa energia;

Y , densità del capitale artificiale attivo, che usa energia;

τ , tempo medio di riposo di un'unità di capitale Y^* ;

α , consumo medio di un'unità di Y . In termini ecologici è il consumo di un'unità di X da parte di Y è cioè la velocità di consumo energetico da biomassa;

Φ , capitale artificiale totale umano prodotto (a riposo + attivo), cioè: $Y^* = \Phi - Y$.

Si possono scrivere le seguenti equazioni differenziali:

$$\frac{dY}{dt} = -\alpha YX + \frac{1}{\tau}(\Phi - Y) \quad [4]$$

$$\frac{dY^*}{dt} = \alpha YX - \frac{1}{\tau}Y^* \quad [5]$$

Le equazioni affermano che Y cresce a scapito di X ed è inoltre in competizione con sé stesso mentre cresce in base alla presenza di capitale artificiale totale (riposo e attivo). All'opposto, la crescita del capitale a riposo è sinergico con la presenza di Y e del capitale naturale e in competizione con sé stesso.

Sviluppando e raccogliendo Y nella 4 si ha:

$$\frac{dY}{dt} = \frac{1}{\tau}\Phi - Y\left(\frac{1}{\tau} + \alpha X\right) \quad [6]$$

Nello stato stazionario $dY/dt = 0$ per cui:

$$Y^{\circ} = \frac{\Phi \frac{1}{\tau}}{\frac{1}{\tau} + \alpha X} = \frac{\Phi}{1 + \alpha X \tau} \quad [7]$$

Y° è il valore d'equilibrio del capitale umano attivo, ovvero il capitale produttivo usato all'istante dato. Se il tempo τ di riposo è molto piccolo (alta produttività) allora la quantità di capitale attivo è all'equilibrio molto grande.

Vediamo ora invece la dinamica dell'energia prodotta da biomassa. L'equazione del capitale naturale è assunta in forma logistica. X è definito dal tasso di trasformazione b cui viene sottratta la competizione interna e la competizione esterna del capitale umano attivo ($-\alpha Y X$). Maggiore è la *carrying capacity*, cioè la quantità di biomassa presente nel sistema, maggiore è la possibilità di crescita di X ; maggiore è il capitale attivo, maggiore è il consumo di X e minore la sua crescita. L'equazione logistica è cioè:

$$\frac{dX}{dt} = bX \left(1 - \frac{X}{N}\right) - \alpha Y X \quad [8]$$

Sostituendo il capitale Y il suo valore d'equilibrio si ha:

$$\frac{dX}{dt} = bX \left(1 - \frac{X}{N}\right) - \frac{\alpha \Phi X}{1 + \alpha X \tau} \quad [9]$$

Esistono due casi limite. Per $x \gg 1/\alpha\tau$, ovvero in una situazione di prosperità di energia da biomassa l'equazione tende a:

$$\frac{dX}{dt} = bX \left(1 - \frac{X}{N}\right) - \frac{Y}{\tau} \quad [10]$$

In questo caso se i tempi di consumo sono lenti (grandi) o è scarso il capitale artificiale attivo allora si ha una crescita logistica di energia da biomassa. È il caso delle società a basso consumo energetico (agricole, della caccia e della pesca).

Nelle società avanzate b è molto piccolo in quanto occorre considerare l'energia fossile F stipata nella terra. In questo caso il tasso di trasformazione di biomassa in energia tende a zero e la crescita di X è tanto più negativa quanto maggiore è Y o piccolo il tempo medio di riposo di Y^* .

Nel caso di scarsità X , $x \ll 1/\alpha\tau$, allora si ha una situazione auto competitiva e l'equazione diviene quella di una preda in un sistema Lotka-Volterra, in cui la dinamica appare molto rallentata:

$$\frac{dX}{dt} = bX \left(1 - \frac{X}{N}\right) - \alpha Y X \quad [11]$$

Studiamo l'equilibrio dell'energia X . Sarà determinato da $dX/dt = 0$ con $Y = Y^{\circ}$, ovvero con il capitale artificiale attivo definito anch'esso nello stato

stazionario. Sostituendo pertanto la [7] nella [8] e ponendo l'equazione a zero si ha:

$$bX\left(1 - \frac{X}{N}\right) - \frac{\alpha\Phi X}{1 + \alpha X\tau} = 0 \quad [12]$$

Ovvero:

$$X\left[X^2 + X\left(\frac{1}{\alpha\tau} - N\right) + \frac{N}{\tau}\left(\frac{\Phi}{b} - \frac{1}{\alpha}\right)\right] = 0 \quad [13]$$

Tale sistema complesso può esprimersi sinteticamente attraverso il suo potenziale d'equilibrio definito dall'equazione [13]. Esso è una parabola che descrive lo stato di equilibrio del sistema e cioè la sostenibilità ecologica.

Le soluzioni di questa equazione si hanno per $X = 0$ e per le due radici dell'equazione di secondo grado:

$$X^\pm = \frac{1}{2}\left(N - \frac{1}{\alpha\tau}\right) \pm \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha\tau} - N\right)^2 + 4N\left(\frac{1}{\alpha\tau} - \frac{\Phi}{\tau b}\right)} \quad [14]$$

Per $b = F\alpha$ questa equazione si semplifica e diviene:

$$X^\pm = \frac{1}{2}\left(N - \frac{1}{\alpha\tau}\right) \pm \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\alpha\tau} - N\right) \quad [15]$$

da cui si ricavano le due radici.

La prima esprime la situazione di un ciclo neutro.

$$X^\pm = \frac{1}{2}\left(N - \frac{1}{\alpha\tau}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\alpha\tau} - N\right) = 0 \quad [16]$$

La seconda esprime una situazione instabile, essendo la parte reale positiva ($N >> 1/\alpha\tau$).

$$X^- = \frac{1}{2}\left(N - \frac{1}{\alpha\tau}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\alpha\tau} - N\right) = \left(N - \frac{1}{\alpha\tau}\right) \quad [17]$$

Per $\Delta = 0$ si trovano infine le due radici coincidenti che si hanno per:

$$b = \frac{4N\Phi}{\tau\left(N + \frac{1}{\alpha\tau}\right)^2} \quad [18]$$

Lo studio della stabilità quindi ci dice che l'equazione [13] ha un punto di equilibrio in $X = 0$, uno in $b = \Phi\alpha$ e, infine uno con i valori di b dati dalla [18].

Se approfondissimo lo studio troveremmo:

$x = 0$ è stabile per valori di $b < \Phi\alpha$

$x = 0$ è instabile per valori di $b > \Phi\alpha$.

Si hanno due situazioni significative:

x^- è instabile nell'intero suo dominio,

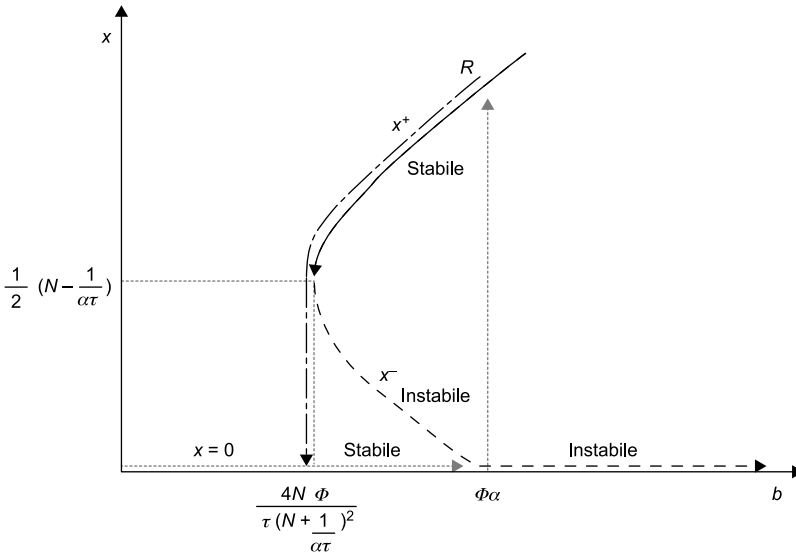


Figura 10: Diagramma di biforcazione del sistema.

x^+ è stabile nell'intero suo dominio cioè per valori di

$$b > \frac{4N\Phi}{\tau\left(N + \frac{1}{\alpha\tau}\right)^2}.$$

Il comportamento del sistema è quello illustrato in Figura 10.

La dinamica tra il tasso di trasformazione del capitale naturale in energia e la quantità di quest'ultima è complessa. Il sistema per valori di x^+ è stabile. È il caso di società ricche di energia X . Il sistema è resiliente fino al punto

$\frac{4N\Phi}{\tau\left(N + \frac{1}{\alpha\tau}\right)^2}$, oltre esso si ha un comportamento catastrofico e repentinamente

X va a zero.

Più interessante è la relazione esistente tra l'energia X e il capitale artificiale totale (Figura 11).

x^+ è stabile per valori di capitale artificiale Φ compresi tra b/α e $\frac{\tau\left(N + \frac{1}{\alpha\tau}\right)^2}{4N}$.

C'è tuttavia un punto in cui all'aumento di una unità di l'energia X crolla repentinamente a zero. Questo punto definisce il limite della vulnerabilità del sistema mentre l'intero stato stazionario prima di esso definisce il suo dominio di stabilità. La catastrofe ambientale in una situazione di utilizzo di energia prodotta da biomassa è uno scenario da non escludere, uno scenario

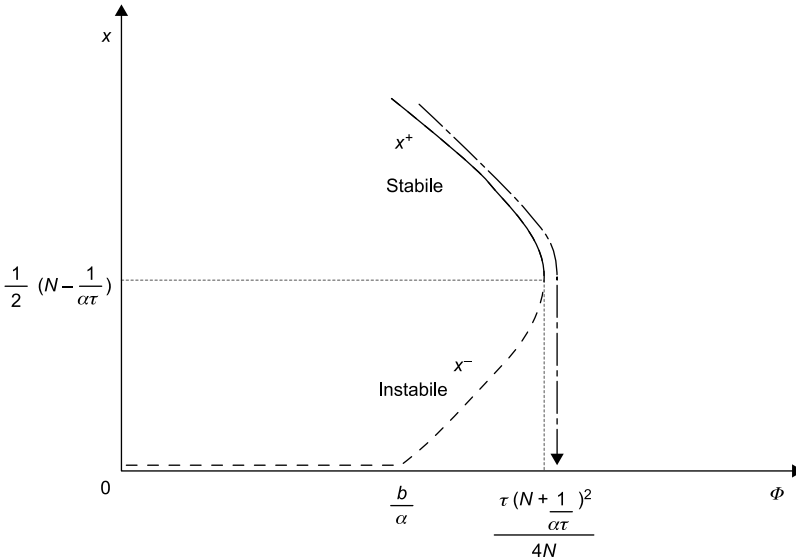


Figura 11: La catastrofe possibile.

possibile. Le attività umane (il capitale artificiale creato) hanno un limite, la produzione ha un limite, la crescita ha un limite. E la resilienza del sistema produttivo ha un punto di rottura, di vulnerabilità, oltre cui non si può andare.

7. Conclusioni

Il sistema urbano è un sistema resiliente in quanto, come abbiamo cercato di dimostrare nel paragrafo 2, è un sistema definito da una distribuzione di potenza. Tali sistemi hanno alcune caratteristiche particolari: sono aperti, sono rappresentabili da reti (con nodi e connessioni), sono sistemi che mantengono ordine interno, sono distribuzioni frattali. La loro resilienza, lo abbiamo visto, dipende dal *trade-off* tra gerarchia e completezza, tra efficienza e ridondanza connettiva (presenza di cicli) della rete. Più cicli chiusi vi sono nella rete maggiore è la resilienza e la complessità ma anche le diseconomie e i costi di connessione.

Le città, che formano il sistema urbano, sono strutture dissipative. Strutture cioè che mantengono l'organizzazione e l'ordine interno a scapito di una continua dissipazione di energia. Il passaggio da una forma d'ordine più semplice a una più complessa necessita necessariamente di maggiori consumi energetici. La globalizzazione e la crescita delle città che la contraddistinguono, implica una maggiore e crescente organizzazione economico-sociale e cioè un incremento d'ordine e di complessità e quindi crescenti consumi energetici. Questo pone un problema enorme di sostenibilità ambientale.

L'urbanizzazione, come abbiamo visto nel paragrafo 3, solo in parte sembra rispondere al problema. L'impatto totale, espresso dall'analisi *cross-country*, continua a crescere col crescere dell'urbanizzazione, sebbene con tassi minori. L'urbanizzazione tuttavia attiva alcuni processi importanti per il mantenimento dell'autorganizzazione, della complessità e della sostenibilità socio-economica: accresce esponenzialmente la ricchezza e i consumi, fa implodere la fertilità, dopo una fase di crescita migliora l'efficienza energetica. Basta tutto questo a confidare nella resilienza ambientale del sistema urbano? La risposta sia dell'*IPAT Equation* sia del modello esposto nel paragrafo 5 è «no». Lo studio della *IPAT Equation* ci informa che l'urbanizzazione migliora gli impatti ma non li riduce. Lo studio del modello di consumo del capitale naturale ci dice che la resilienza è possibile entro determinate soglie di metabolismo produttivo, di trasformazione del capitale naturale in energia e di incremento del capitale artificializzato. La resilienza resta una sfida, una prassi che certo va perseguita ma che non rassicura sul risultato finale. Anzi, può, a nostro avviso, cadere facilmente nel *green washing approach*, letteralmente un «lavaggio verde» teso a rassicurare più che assicurare, a trasmettere il messaggio che tutto si può recuperare e che l'uomo resta l'artefice e il gestore della natura e dei suoi mutamenti.

Nella realtà quello che sta succedendo è estremamente grave. L'umanità sta utilizzando biomassa non sostituibile erodendo il capitale N e incrementando continuamente il capitale artificiale Φ . La caduta catastrofica, come abbiamo mostrato, è uno scenario probabile.

Al momento, stando ai risultati del *Living Planet Report* (WWF, 2014), i consumi di capitale naturale (l'impronta ecologica) sono raddoppiati dal 1961 e sono di circa il 30% superiori a quanto il pianeta può rigenerare in un anno. L'*overshoot day*, cioè la data teorica che segna l'avvenuto consumo del capitale naturale rigenerabile dalla Terra in un anno è sempre più critica: era il 22 agosto nel 2012, il 20 agosto nel 2013, il 19 agosto nel 2014, il 13 agosto nel 2015, l'8 agosto nel 2016, il 2 agosto nel 2017. Ciò significa che nei mesi che seguono, fino al 31 dicembre, l'umanità non consuma capitale naturale rigenerabile ma *stock* di capitale accumulato in milioni di anni, incrementando percentualmente il capitale artificiale e avvicinandosi alla soglia catastrofica individuata dal modello proposto.

Entro le attuali condizioni produttive sappiamo fin dai primi anni settanta che dovremmo aderire alla proposta «crescita zero» (Meadows *et al.*, 1972) o alla più innovativa «decrescita felice» (Latouche, 2007) per non incrementare la vulnerabilità ambientale. Sappiamo inoltre che la resilienza è intrinsecamente connessa con la rottura, lo snervamento, la catastrofe.

Sappiamo infine che per allontanarsi da questo punto occorre seguire alcune linee d'azione euristicamente espresse dal modello:

1. diminuire le risorse energetiche immesse nella fase di trasformazione attraverso l'aumento della produttività energetica (minore quantità di *input* energetico per unità di materia trasformata);

2. smaterializzare quanto più è possibile la produzione per avere una minore quantità di *input* di materia e dare maggiore spazio alla crescita del capitale naturale;

3. allungare il periodo di uso dei prodotti, ovvero aumentare la qualità funzionale temporale delle merci (diminuzione della velocità di produzione degli scarti e conservazione delle risorse, la loro durabilità);

4. diminuire i consumi (minore quantità di *input* energetico e materiale),

5. riutilizzare i prodotti di scarto (estensione della fase di utilizzo dei materiali attraverso la loro rifunzionalizzazione);

6. accelerare la fase di rigenerazione, ovvero incrementare le tecnologie ambientali (la concentrazione di natura).

È possibile un nuovo equilibrio economico e sociale basato sulla durabilità dei prodotti e dei processi, il risparmio energetico e materiale (ottimizzazione ed efficienza produttiva), il riuso, il riciclo e rifunzionalizzazione dei materiali, l'implementazione della rigenerazione naturale dei flussi energetici e materiali?

Per l'economia maggiore è la ricchezza naturale minore è il valore dei prodotti. Si tratta di due tipologie distinte di attività produttive e in conflitto, che implicano misure diverse. Come afferma Howard Odum,

La ricchezza reale comprende tutti i prodotti utili della natura e dell'economia [...]. Per la seconda legge della termodinamica, la ricchezza reale si deprezza e si disperde a velocità crescenti con l'uso. Perciò deve esserci una produzione continua e una sostituzione della ricchezza attraverso il lavoro dell'ambiente e dell'uomo.

Ma mentre per il lavoro dell'uomo si paga un prezzo,

Poiché non si paga denaro per il lavoro dell'ambiente, i valori di mercato non possono essere usati per valutare gli input ambientali.

I contributi dell'ambiente sono anzi inversi ai prezzi:

Quando la pesca è abbondante c'è una crescita economica ma un calo del prezzo (Odum, 2005, p. 105).

Le possibilità di benessere, l'abbondanza di risorse naturali sono in opposizione al valore economico, alle desideranze, alle utilità marginali:

Tutti possono disporre ed usare dell'aria. Ma supponete per poco che foste in una campana pneumatica, e possedeste una perla; la permutereste voi, ovvero non, con un litro d'aria? Certo che sì: ed anzi a campar dalla morte voi, per questo, cedereste l'intera vostra fortuna. [...] L'utilità delle cose dunque, congiunta alla difficoltà più o meno grande di ottenerle, costituisce il loro valore permutabile (Scialoja, 1849, pp. 4-5).

Economia e ricchezza ambientale sembrano concetti opposti e dicotomici. È possibile superare questa dicotomia?

È quello che si sta tentando attraverso l'introduzione di alcuni indicatori importanti che affiancano il PIL per misurare il benessere. È a partire infatti

da queste considerazioni che nel 2008 la «Commissione per la misura delle prestazioni economiche e del progresso sociale», guidata da Joseph Stiglitz, Amartya Sen e Jean Paul Fitoussi, è giunta alla conclusione che il PIL deve essere affiancato da altri indicatori, in grado di tenere conto di aspetti legati al capitale sociale ed ambientale e al concetto di qualità della vita. A livello nazionale, il progetto per misurare il benessere equo e sostenibile (BES), nato da un'iniziativa congiunta del CNEL e dell'ISTAT, si inquadra entro lo stesso dibattito.

È quello che si sta tentando di praticare con la strategia europea 20-20-20 e la riduzione al 2020 delle emissioni di gas serra (del 20% rispetto al 1990), la riduzione del 20% del fabbisogno di energia ricavato da fonti rinnovabili e l'aumento del 20% dell'efficienza energetica.

È quello che si sta tentando di attuare con l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile e con la strategia S3 + 3 (Smart Specialisation Strategy + Strategia dello Sviluppo Sostenibile) orientata all'innovazione, nonché con le politiche volte a rilanciare un nuovo *take-off* innovativo basato sulla *green economy* (Bagliani *et al.*, 2013).

Le città giocano in questo processo un ruolo fondamentale perché sono loro i luoghi deputati dell'auspicato nuovo riequilibrio demografico, economico e sociale. Ma, come abbiamo visto, nessuna certezza è data e un nuovo modello sociale, di uso e di scambio delle risorse, un nuovo modello economico, sebbene necessario appare piuttosto difficile da prefigurare e costruire. Secondo molti teorici della resilienza i sistemi complessi passano attraverso quattro fasi caratteristiche: rapida crescita e sfruttamento (r), conservazione (K), collasso e/o «distruzione creativa» (Ω) rinnovo o riorganizzazione (α) (Gunderson, Holling, 2001; Carpenter *et al.*, 2001). In ambito ambientale siamo ancora alla fase r e ci sono primi segnali della fase K . Ma che senso hanno le fasi Ω e α per il clima, la vegetazione, gli animali, in sintesi per la natura? Forse invitano a un cambiamento profondo, forse annunciano la rottura catastrofica tra l'Antropocene e una nuova era, dopo una nuova estinzione evolutiva di massa: la sesta.

Riferimenti bibliografici

- Allen P. M. (1982), *Nouveaux concepts dans la modélization des systèmes complexes. Cours libres à l'Université Libre de Bruxelles*. Bruxelles: ULB. Mimeo.
- Bagliani M., Bravo G., Dalmazzone S. (2006), *Ecological Footprint: A Consumption-Based Approach to Environmental Kuznets Curves*. Brescia: Dipartimento di Studi Sociali, Università di Brescia.
- Bagliani M., Crescimanno A., Ferlaino F., Nepote D. (2013), *La Green Economy in Piemonte. Rapporto 2013*. Torino: Ed. IRES-Regione Piemonte.
- Baran P. (1964), *Introduction to Distributed Communications Networks. Rapporto RM-3420_PR*. S. Monica: Rand Corporation, California. Disponibile al sito:

- http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2006/RM3420.pdf.
- Barret J., Scott A. (2001), *An Ecological Footprint of Liverpool: Developing Sustainable Scenarios. A Detailed Examination of Ecological Sustainability*. Stockholm: Stockholm Environment Institute and Sustainable Steps Consultant.
- Berkes F., Colding J., Folke C. (a cura di) (2003), *Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Brinkhoff Th. (2014), Disponibile al sito: <http://www.citypopulation.de/>.
- Buchnan M. (2003), *Nexus. La rivoluzionaria teoria delle reti*. Milano: Mondadori.
- Camagni R., Gibelli M. C., Rigamonti P. (2002), *I costi collettivi della città dispersa*. Firenze: Alinea ed.
- Carpenter S., Walker B., Anderies J. M., Abel N. (2001), From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems*, 4, 8: 765-781. DOI: 10.1007/s10021-001-0045-9.
- Chambers N., Griffiths P., Lewis K., Jenkin N. (2004), *Scotland's Footprint. A Resource Flow and Ecological Footprint Analysis of Scotland. Report for Viridis*. Oxford: Best Foot Forward Ltd.
- Christaller W. (1932), *Le località centrali della Germania meridionale*. Milano: Franco Angeli (trad. 1980).
- CIA (2014), *World Factbook*. Disponibile al sito: <https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/geos/tw.html>.
- Davoudi S. (2012), Resilience: A Bridging Concept or a Dead End? *Planning Theory and Practice*, 13, 2: 299-307. DOI: 10.1080/14649357.2012.67712.
- Davoudi S., Brooks E., Mehmood A. (2013), Evolutionary Resilience and Strategies for Climate Adaptation, Planning. *Practice & Research*, 28, 3: 307-322. DOI: 10.1080/02697459.2013.787695.
- Ehrlich P. R., Holdren J. (1971), Impact of Population Growth. *Science*, 171: 1212-1217. DOI: 10.1126/science.171.3977.1212.
- Erzsébet R., Barabasi A. L. (2003), Hierarchical Organization in Complex Networks. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 67, 026112. DOI: 10.1103/physreve.67.026112.
- European Commission (2014), *Resilience Marker. General Guidance, Ref. Ares (2014)3883617*. Bruxelles: EC-Humanitarian Aid and Civil Protection.
- Ferlaino F. (2002), *Geografia sistemica dello sviluppo*. Torino: UTET.
- Ferlaino F. (a cura di) (2005), *La sostenibilità ambientale del territorio. Teorie e metodi*. Torino: UTET-libreria.
- Ferlaino F. (2012), Cities and Sustainability: Environmental Urban Curve and Global-Scale Territorial Scenarios. *Chinese Journal of Regional Science*, 4, 5: 80-92.
- Ferlaino F. (2014), Urban Development and Global Sustainability. *E3S Web of Conferences*, 2, 03001. EDP Sciences. DOI: 10.1051/ e3sconf/ 20140203001.
- Folke C., Carpenter S., Elmqvist T., Gunderson L., Holling C., Walker B. (2002), Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations. *AMBIO A Journal of the Human Environment (AMBIO)*, 31: 437-40. DOI: 10.1579/0044-7447-31.5.437.

- Folke C., Carpenter S., Walker B., Scheffer M., Chapin T., Rockstrom J. (2010), Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society*, 15, 4: 20-28. Disponibile al sito: <http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art20/>.
- Fondo Monetario Internazionale (2014), *World Economic Outlook Database*. Disponibile al sito: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2016/01/weodata/index.aspx>.
- Gibrat R. (1931), *Les Inégalités économiques*. Paris: France.
- Gunderson L., Holling C.S. (a cura di) (2001), *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington DC: Island Press.
- Holling C. S. (1996), Engineering Resilience Versus Ecological Resilience. In: Schulze P. (a cura di), *Engineering within Ecological Constraints*. Washington DC: National Academy Press.
- Holling C. S. (2001), Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. *Ecosystems*, 5, 4: 390-405. DOI: 10.1007/s10021-001-0101-5.
- Høyer K. G., Golden E. (2003), Household Consumption and Ecological Footprint in Norway – Does Urban Form Matter? *Journal of Consumer Policy*, 26, 3: 327-349. DOI: 10.1023/A:1025680422704.
- Isard W. (1956), *Localizzazione e spazio economico*. Milano: Cisalpino (trad. 1962).
- Juran J. M. (1951), *Quality Control Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Kasperson J. X., Kasperson R. E. (2001), *Global Environmental Risk*. Tokyo-London: United Nations University Press and Earthscan.
- Latouche S. (2007), *La scommessa della decrescita*. Milano: Feltrinelli.
- Launhardt W. (1885), Il fondamento matematico dell'economia politica. In: Bagiotti T. (a cura di), *Marginalisti matematici*. Torino: UTET (trad. 1975).
- Maddison Project and Historical Statistics of the World Economy (2010), 1-2010 AD.
- Mandelbrot B. B. (1987), *Gli oggetti frattali. Forma, caso e dimensione*. Torino: Einaudi.
- Maturana H., Varela F. (1985), *Autopoiesi e cognizione. La realizzazione del vivente*. Padova: Marsilio.
- Mazzanti M., Zoboli R. (2005), Waste Indicators, Economic Drivers and Environmental Efficiency: Perspectives and Delinking and Empirical Evidence for Europe. *Quaderno deit*, 12, 200. Ferrara: Università di Ferrara.
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens W. III (1972), *I limiti dello sviluppo: rapporto del System Dynamics Group Massachusetts Institute of Technology (MIT) per il progetto del Club di Roma sui dilemmi dell'umanità*. Milano: Mondadori.
- Odum H. T. (2005), Un'analisi basata su «emergy» ed «emdollari». In: Ferlaino F. (a cura di), *La sostenibilità ambientale del territorio. Teorie e metodi*. Torino: UTET.
- Pacholsky J. (2000), *The Ecological Footprint of Berlin (Germany) for the Year 2000*. Thesis, Stirling University (Scotland).
- Pareto V. (1896), *Corso di economia politica*. Torino: UTET (1971).
- Perroux F. (a cura di) (1966), *L'economia del XX secolo*. Milano: Comunità.

- Pimm S. L. (1984), The Complexity and Stability of Ecosystems. *Nature*, 307: 321-326. DOI: 10.1038/307321a0.
- Prigogine I. (1979), *La nuova alleanza. Uomo e natura in una scienza unificata*. Milano: Longanesi.
- Prigogine I., Allen P. M., Herman R. (1979), *The Evolution of Complexity and the Laws of Nature. A Contribution to the 3rd Generation Report to the Club of Rome: Goals for a Global Society*. Tradotto in italiano in Prigogine I., *La Nuova Alleanza. Uomo e natura in una scienza unificata*. Milano: Longanesi.
- Rosen K. T., Resnick M. (1980), The Size Distribution of Cities: An Examination of the Pareto Law and Primacy. *Journal of Urban Economics*, 8, 2: 165-186. Disponibile al sito: <https://escholarship.org/uc/item/9tt5c711>.
- Scialoja A. (1849), *I principi dell'economia sociale*. Napoli: Nobile Gaetano.
- Tiezzi E., Marchettini N. (1999), *Che cos'è lo sviluppo sostenibile? Le basi scientifiche della sostenibilità e i guasti del pensiero unico*. Roma: Donzelli.
- UN (2009), *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva: United Nations International Strategy for Disaster Reduction-UNISDR.
- UN (2015), *Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects: The 2015 Revision*. Disponibile al sito: <http://esa.un.org/unpp>.
- Véron J. (2009), La popolazione mondiale e lo sviluppo sostenibile. In: Castronovo V. (a cura di), *Storia dell'economia mondiale*. Roma: Laterza, 510-526.
- Waddington C. H. (1977), *Strumenti per pensare. Un approccio globale ai sistemi complessi*. Milano: Arnoldo Mondadori.
- Walker B., Holling C. S., Carpenter S. R., Kinzig A. (2004), Resilience, Adaptability and Transformability in Social-Ecological Systems. *Ecology and Society*, 9, 2: 5. Disponibile al sito: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>.
- Walker B., Salt D. (2006), *Resilience Thinking*. Washington DC: Island Press.
- Williams M., Zalasiewicz J., Haywood A., Ellis M. (a cura di) (2011), The Anthropocene: A New Epoch of Geological Time? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369: 833-1112. DOI: 10.1098/rsta.2010.0339.
- World Data Bank-Development Indicators (2014), *World Data Bank*. Disponibile al sito: <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=world-development-indicators>.
- WWF (2014), *Living Planet Report*. Disponibile al sito: <http://www.wwf.it/news/?10840/Living-Planet-report-WWF-2014>.
- Zalasiewicz J., Williams M. (2012), *The Goldilocks Planet: An Earth History of Climate Change*. Oxford: Oxford University Press.
- Zipf G. K. (1949), *Human Behaviour and the Principle of Least Effort. An Introduction to Human Ecology*. Oxford, England: Addison-Wesley Press.