

Il degrado della biosfera

Abstract: The position of man in the biosphere and the interaction of its activities with the different sectors of the earth's ecosphere are bringing the Earth system into a drastically different state from that in which the development of advanced civilizations was possible.

Una delle domande più inquietanti sulla storia del genere umano che ci poniamo oggi è la seguente: come mai *Homo sapiens*, che mostra la sua specifica eccezionalità all'interno del genere *Homo*, vive come cacciatore-raccoglitore per il 90% della sua vita biologica, per poi sviluppare soltanto negli ultimi millenni l'agricoltura, e le civiltà complesse che ne derivano, grazie all'accumulo di un surplus energetico ed economico?

La risposta a questa domanda potrebbe risiedere nei dati climatici riportati in figura 1. Semplicemente perché prima dell'optimum climatico dell'Olocene, l'agricoltura sarebbe stata impossibile.

I valori di arricchimento nell'isotopo ^{18}O dei campioni ottenuti dai carotaggi del ghiaccio della Groenlandia, mostrano come il periodo che inizia nel tardo Pleistocene sia, dal punto di vista climatico, particolarmente stabile, oltre che mediamente più caldo del periodo di oltre sessantamila anni precedente. Le frequenti, rapide e significative variazioni del clima avrebbero, in questo lungo periodo precedente all'Olocene, reso molto difficile, se non impossibile, la programmazione delle attività necessarie per l'esistenza stessa di una civiltà agricola. L'andamento recente del cambiamento climatico, e molti altri fenomeni ecologici innescati dalle azioni dell'uomo, di cui parleremo in questo capitolo, indicano una tendenza del sistema ad uscire da questo optimum ambientale, e a percorrere un dominio dei parametri ambientali, mai esplorato negli ultimi milioni di anni.

Il sistema costituito dal pianeta Terra può essere rappresentato come in figura 2. La biosfera – la comunità delle specie viventi, dai batteri alle megattere

Nicolò Bellanca, University of Florence, Italy, nicolo.bellanca@unifi.it, 0000-0002-3809-3455

Luca Pardi, CNR-IPCF, Institute for Chemical-Physical Processes, Italy, luca.pardi@pi.ipcf.cnr.it, 0000-0002-6870-1490

FUP Best Practice in Scholarly Publishing (DOI 10.36253/fup_best_practice)

Nicolò Bellanca, Luca Pardi, *Il degrado della biosfera*, pp. 47-67, © 2020 Author(s), CC BY 4.0 International, DOI 10.36253/978-88-5518-195-2.07, in Nicolò Bellanca, Luca Pardi, *O la capra o i cavoli. La biosfera, l'economia e il futuro da inventare*, © 2020 Author(s), content CC BY 4.0 International, metadata CCO 1.0 Universal, published by Firenze University Press (www.fupress.com), ISSN 2704-5919 (online), ISBN 978-88-5518-195-2 (PDF), DOI 10.36253/978-88-5518-195-2

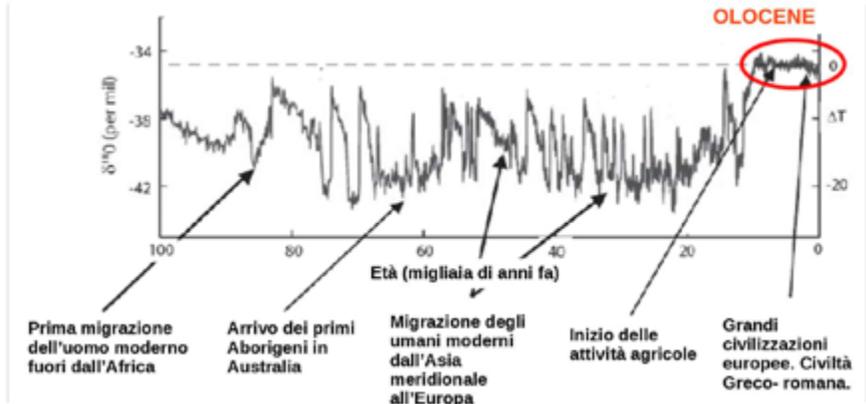


Figura 1. Variazione della temperatura media locale in Groenlandia (scala destra) stimata mediante il rapporto isotopico $\delta^{18}\text{O}$ (scala sinistra) negli ultimi 100.000 anni.

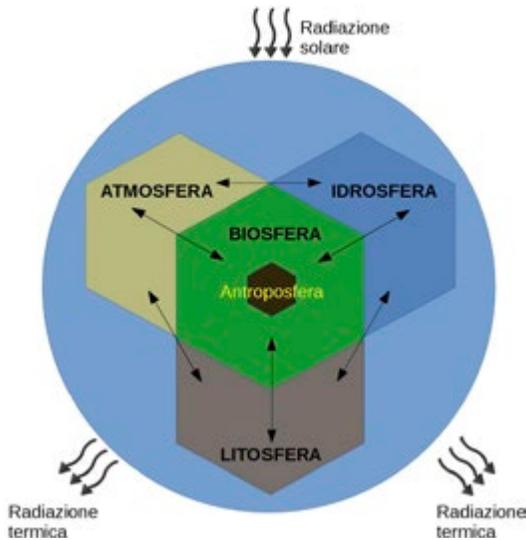


Figura 2. Rappresentazione schematica dell'ecosfera con le sue quattro componenti, le interazioni fra esse e l'antroposfera (adattata Kump et. al 2010).

– si sviluppa su un substrato inorganico, con componenti liquide (l'idrosfera), solide (la litosfera) e gassose (l'atmosfera), e viene alimentato da un flusso di energia (potenza) che in massima parte proviene dal Sole e in minima parte dal flusso geotermico.

Dal punto di vista energetico, l'insieme degli organismi che popolano la biosfera in questo momento della storia del pianeta, dipende, quasi interamente,

dal flusso di energia radiante solare. Globalmente questo flusso è dell'ordine di 80.000 TW (1 TW = 10^{12} Watt o Joule/sec). Una parte di questa radiazione solare viene catturata dagli organismi fotosintetici, per generare la materia organica necessaria per sostenere il proprio metabolismo e costruire i propri tessuti. L'ordine di grandezza del flusso energetico che prende la strada del processo fotosintetico è di 100 TW (lo 0,125% del flusso totale di radiazione solare che raggiunge il pianeta). Sulla fotosintesi si costituiscono le catene trofiche (complessi di organismi che dipendono gli uni dagli altri per il nutrimento) interne alla biosfera, nelle quali si inserisce anche l'uomo. Al momento non esistono altre fonti di cibo per gli organismi viventi. Alcuni organismi autotrofi (in grado di sintetizzare le molecole organiche che formano i loro tessuti, a partire da atomi e molecole semplici tratte dall'ambiente inorganico circostante) estremofili (adattati a condizioni ambientali estreme), marginalizzati in habitat ristretti, vivono del flusso geotermico. Il resto degli 80.000 TW del flusso solare non è "sprecato", in quanto energizza processi dinamici abiotici che sono comunque essenziali per l'esistenza della vita: il ciclo dell'acqua, le correnti termoaline, le correnti eoliche, e così via. Un quadro approssimativo del budget energetico terrestre è riportato in tabella 1.

Come si vede dalla tabella 1, il flusso energetico captato dalla fotosintesi è circa cinque volte quello che alimenta il metabolismo sociale ed economico umano, 18.4 TW.

Ogni organismo ha diverse strategie per massimizzare il proprio successo biologico, cioè per mantenersi in vita il tempo necessario ad assicurare la propria discendenza, intercettando una parte del flusso energetico disponibile. La competizione fra queste strategie porta ad una forma di "pace" che non è, in senso strettamente termodinamico, equilibrio, ma viene definita *omeostasi ecologica*: un insieme di meccanismi di controllo, che nascono dall'interazione fra organismi e fra organismi e ambiente abiotico, e che mantengono l'oscillazione delle variabili biofisiche (umidità, temperatura, livelli di concentrazione di elementi e composti essenziali, e così via) all'interno di intervalli tollerabili per la vita. Il termine "omeostasi" in questo contesto è mutuato dalla medicina, nella quale assume significato più preciso e misurabile. L'ipotesi di Gaia è alla base di questa visione dell'ecosfera come superorganismo dotato di propri sistemi omeostatici di controllo.

L'evoluzione biologica si svolge all'interno di questo stato di non-equilibrio, che presenta sempre nuove condizioni alle quali gli organismi tentano di adattarsi con i mezzi che hanno a disposizione. Quando falliscono come individui muoiono, quando falliscono come specie (categoria tassonomica) si estinguono.

In genere le variazioni dei parametri ecologici, determinate da fenomeni astronomici o di altra natura, sono relativamente lente e permettono un adattamento efficace alla maggior parte degli organismi. In queste condizioni, si ha un tasso di estinzione delle specie che definiamo normale in riferimento a quanto si può inferire dal registro fossile. Quando le variazioni sono repentine (grandi fenomeni vulcanici, impatti meteorici, *et similia*), molte specie non riescono ad adattarsi alle nuove condizioni e si osservano le grandi estinzioni di massa.

Tabella 1. Budget energetico terrestre. Si riporta l'ordine di grandezza dei diversi flussi di energia che interessano l'ecosfera. Si tratta dell'energia che raggiunge la superficie terrestre quindi il flusso totale della radiazione solare diminuita dell'albedo e dell'assorbimento da parte dell'atmosfera. Sulle terre emerse è riportato sia il flusso naturale che la stima delle porzioni di quel flusso intercettate dall'uomo. Per la fotosintesi, il valore fra parentesi è la stima della quota indirettamente controllata dall'uomo. L'uso antropico dell'energia è aggiornato al 2018. (Adattata da Makarieva et al. 2008).

Budget energetico terrestre in TW		1TW = 10 ¹² W
Totale (oceani e terre emerse)		% del totale
Radiazione solare	80000	100,00C
Evaporazione	40000	50,00C
Calore sensibile	20000	25,00C
Correnti termoaline	1000	1,25C
Correnti eoliche	1000	1,25C
Fotosintesi	100	0,12E
Flusso geotermico totale	15-30	
Solo terre emerse		
	Natura	Uomo
Radiazione solare	30000	0,004
Evaporazione	5000	nu
Traspirazione	3000	nu
Correnti eoliche	300	0,01
Fotosintesi	60	15-(40]
Potenza fluidodinamica idrologica	3	0,3
Transizione osmotica (mare-fiumi)	3	nu
Onde oceaniche	3	0,0001
Maree	1	0,0001
Sorgenti geotermiche concentrate	0,3	0,01
Uso antropico dell'energia		18,4

Dal punto di vista strettamente biologico, cioè relativo alla vita e al suo mantenimento, non esistono (non ancora almeno) fonti di energia alimentare aggiuntive a quella generata dal processo fotosintetico. Ogni organismo intercetta un rivolo particolare di quel flusso e su quello vive e si riproduce. Le diramazioni di energia biochimica del flusso iniziato dalla fotosintesi, costituiscono la catena trofica che dai produttori primari, attraverso i consumatori primari e secondari, si conclude con gli organismi detritivori e decompositori, che chiudono l'intricato insieme dei cicli biogeochimici rimettendo in continuazione in circolo i nutrienti essenziali, metalli, azoto, fosforo e così via.

In figura 3 si propone uno schema della struttura della biosfera, sotto il profilo del flusso di energia che la attraversa e dei cicli bio-geochimici che vi si sono instaurati in oltre tre miliardi di anni di evoluzione. Il flusso energetico della radiazione solare ad alta frequenza e bassa entropia in ingresso, Φ_{in} , è bilanciato dal flusso di radiazione termica (a bassa frequenza e alta entropia) in uscita, Φ_{out} . Il flusso in ingresso viene intercettato dall'insieme degli organismi fotosintetici che convertono l'energia radiante in energia chimica (essenzialmente gluco-

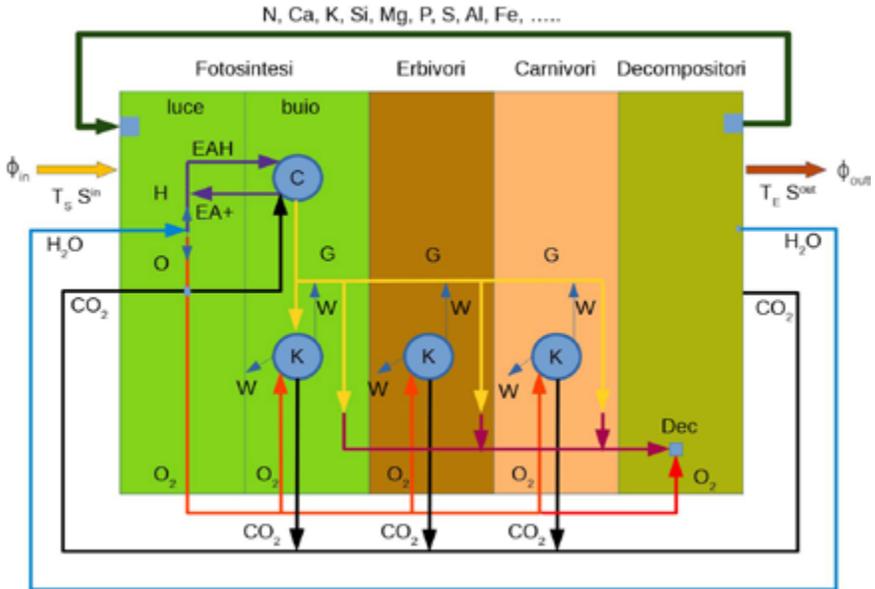


Figura 3. Schema diagrammatico della biosfera (adattata da Sertorio e Renda 2009). Luce, buio = fasi luminosa e oscura del processo. C = ciclo di Calvin, K = Ciclo di Krebs, G = flusso di massa: zuccheri, cellulosa, proteine W = potenza bio-meccanica, EA = accettore di elettrone, EAH = accettore elettrone legato a idrogeno, Dec = decomposizione, $T_s = 5800$ K temperatura dei fotoni provenienti dal sole. $T_E = 300$ K temperatura media del pianeta. Φ_{in} e Φ_{out} flussi radiativi in entrata e uscita. S_{in} e S_{out} = entropia in ingresso e in uscita.

sio), attingendo alla parte inorganica dell'ecosfera (si veda figura 2) per la parte materiale: la CO_2 dall'atmosfera per il carbonio, l'acqua (H_2O) per l'idrogeno, dall'idrosfera e altri elementi come l'azoto, il fosforo e i metalli dalla litosfera.

La fotosintesi si svolge in due fasi, una luminosa ed una oscura, e il Ciclo di Calvin è il suo motore biochimico. Essa è anche l'origine della formazione dell'ossigeno molecolare, che ne è un sottoprodotto. In questo complesso sistema vi sono organismi estremamente specializzati, che concentrano la loro strategia sul consumo di una singola risorsa, o di una gamma molto limitata di risorse, e organismi più generalisti. Fra questi, l'uomo si distingue per l'estrema varietà delle strategie di sostentamento che adotta. L'etologia umana è, come abbiamo detto nel capitolo precedente, ben da prima della comparsa di *sapiens*, basata sull'uso di strumenti extrasomatici o protesi: la tecnologia.

Possiamo distinguere fra "protesi di potenza" e "protesi di abilità". Le prime sono, come è stato accennato nel capitolo primo, mezzi per concentrare i flussi naturali di energia e indirizzarli al fine di compiere lavoro, mentre le seconde sono mezzi per accrescere le capacità di controllo sugli ecosistemi, comunicare, elaborare modelli della realtà, tramandare cultura, e così via. Un arco con le

frecce, così come il motore della petroliera, sono protesi del primo tipo, mentre un papiro, così come un computer, sono protesi del secondo tipo.

La strategia comportamentale centrata sull'uso di strumenti, diventa sempre più importante nel corso degli ultimi quindici millenni, ed è uno dei principali motori e oggetti dell'evoluzione culturale. Con l'ingresso nell'era delle macchine, l'uomo inizia a utilizzare energia fotosintetica fossile per "dirottare" verso i propri scopi quote crescenti di quel flusso fotosintetico di 100 TW. Le stime più recenti indicano che l'uomo si appropria di una porzione intorno al 25% della produttività primaria netta (si veda il box 1), cioè dell'energia chimica creata dalle piante attraverso la fotosintesi, depurata dalla respirazione (la Produttività Primaria Netta o PPN). Questa quantità della PPN, di cui l'uomo si appropria sotto forma di cibo, fibre naturali, legname, cellulosa e altri prodotti di origine vegetale, viene sottratta a quel flusso di 100 TW, e quindi all'insieme delle altre specie. Una singola specie si appropria di un quarto del flusso fotosintetico disponibile.

Una prova di voracità inedita nella storia naturale. È inevitabile che vi siano effetti negativi sul resto della biosfera. Qualcuno potrebbe controbattere che l'uomo ha aumentato in modo straordinario la produttività della terra. Questo è vero, ma ci sono due aspetti da considerare: il primo è che tale aumento di produttività è stato ottenuto grazie all'uso intensivo di sussidi energetici, principalmente di origine fossile. La meccanizzazione dell'agricoltura, l'irrigazione forzata usando acque di falda, la sintesi e l'applicazione di fertilizzanti e fitofarmaci, sono pratiche possibili solo grazie al consumo di petrolio e gas. In secondo luogo, questi aumenti di produttività sono serviti a favorire le specie vegetali utili all'uomo, a discapito delle specie selvatiche, imponendo una progressiva semplificazione genetica e funzionale agli ecosistemi agricoli. In terzo luogo, gli aumenti di produttività in agricoltura si sono realizzati, almeno in parte, consumando il suolo fertile, una risorsa lentamente rinnovabile che è stata fortemente depauperata, come qualsiasi altra risorsa minerale (potremmo in effetti parlare di estrazione anche in questo caso), dalle tecnologie dell'agricoltura industriale. Nell'applicare la propria strategia tecnologica, l'uomo ha compresso lo spazio vitale del resto degli organismi in uno spazio più ristretto, fatta eccezione per un manipolo di specie alleate, commensali ed opportuniste; ma, più ancora, ha imposto all'ecosistema terrestre delle variazioni di parametri molto rapide nel tempo e ha incrementato, sia localmente che globalmente, il tasso di estinzione di una gran parte di specie appartenenti alle più disparate divisioni tassonomiche.

Si stima che il tasso attuale di estinzioni sia dalle 100 alle 1000 volte superiore a quello considerato normale. Questo fenomeno comporta una progressiva perdita di biodiversità genetica (le estinzioni appunto) e funzionale, cioè la riduzione delle ridondanze tipiche dei sistemi ecologici, per merito delle quali una funzione, ad esempio quella di depurazione operata dagli organismi detritivi e decompositori, viene svolta da molte diverse specie. Il recente allarme sul progressivo assottigliamento delle popolazioni di insetti impollinatori, è un altro esempio di impoverimento genetico e funzionale. Mettendo sempre più in crisi quelli che, con linguaggio economicista, vengono definiti "servizi ecosiste-

mici”, alcuni dei quali sono schematicamente descritti nello schema di figura 3, oltre che nella parte rappresentata dai produttori primari, come assorbitori di CO_2 , nella funzione degli organismi detritivori e decompositori che rimettono in ciclo gli elementi essenziali.

Il problema che si pone a questo punto è quello di dare una misura quantitativa degli effetti dell'azione attuale della specie umana nell'ecosistema terrestre contemporaneo. Generalmente, nei testi che parlano di ecologia umana, si comincia dal concetto più facile da comprendere, ma anche più sfuggente: la “capacità di carico”. Questo utile concetto ha il difetto principale di essere difficilmente determinabile in modo quantitativo, per una popolazione che non sia sottoposta ad un esperimento controllato e limitato nello spazio e nel tempo.

Possiamo determinare in modo soddisfacente la capacità di carico di una porzione di foresta boreale, rispetto ad una popolazione di cervi, ma non la capacità di carico degli ecosistemi terrestri rispetto alla popolazione umana. Questo fatto ci costringe perciò, inevitabilmente, su un piano qualitativo, che può essere efficace a livello divulgativo, ma ha scarso valore scientifico.

Vi sono altri tentativi di quantificare l'impatto ambientale dell'azione umana sull'ecosfera, e alcuni di essi sono validati scientificamente. Parliamo, ad esempio dell'“impronta ecologica”, per la quale però le critiche si appuntano sul fatto che la stima riduce un fenomeno poliedrico, come l'insieme degli impatti umani sull'ambiente, ad un unico numero, gli ettari globali. Inoltre, il metodo sottostima l'impatto della componente energetica, riducendo gli effetti dell'uso dei combustibili fossili alle sole emissioni di CO_2 . Si veda il paragrafo successivo per una discussione critica anche di questi concetti relativi all'impatto ambientale umano.

L'insieme delle interazioni fra società industriale ed ecosfera terrestre è rappresentato in figura 4. La complessità di queste interazioni rispetto a quelle caratteristiche di altre specie di primati non potrebbe essere più evidente. Dal punto di vista materiale, la principale differenza, ampiamente documentata nel capitolo primo, è rappresentata dal fatto che la società umana basa la sua espansione sull'estrazione di risorse energetiche e materiali da miniera.

Qui intendiamo per “risorsa da miniera” ogni risorsa estratta dalla crosta terrestre con mezzi meccanici, da accumuli esistenti in virtù dei processi geochimici di genesi e formazione dei giacimenti minerali concentrati. In un certo senso anche le piante sono “minatori”, in quanto estraggono dal suolo l'azoto, il fosforo, il calcio e altri elementi necessari per il loro metabolismo. Ma le piante compiono questa operazione mineraria da accumuli che si trovano nella parte superficiale della crosta terrestre, il suolo fertile (la cosiddetta pedosfera) e vengono continuamente ripristinati dai cicli biogeochimici, con tempi di ricostituzione che determinano il limite superiore della produttività primaria (i cosiddetti fattori limitanti). L'uomo estrae minerali da giacimenti a profondità che vanno dalle decine di metri a diversi chilometri di profondità, da accumuli che si costituiscono in virtù di processi geologici che hanno i tempi della dinamica tettonica del pianeta, cioè si misurano in centinaia di milioni di anni.

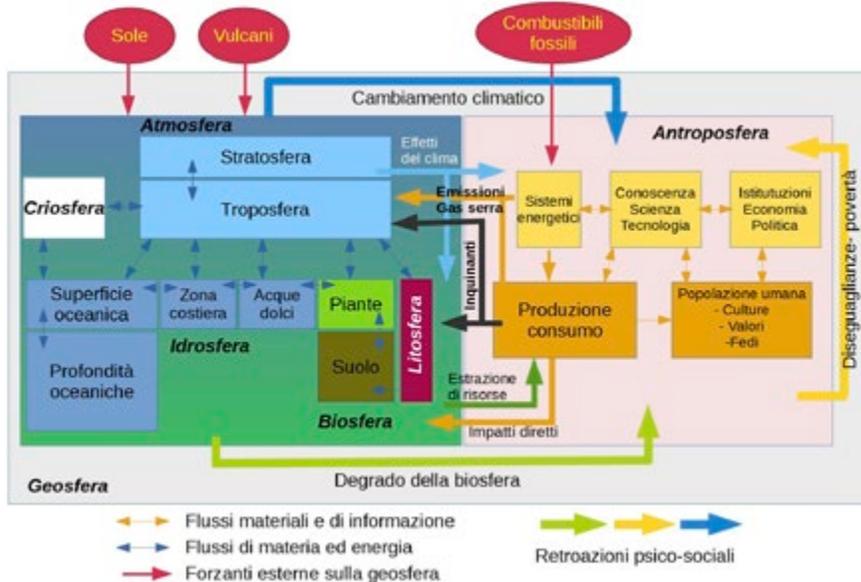


Figura 4. Interazioni fra società industriale ed ecosfera terrestre.

Questo comportamento ha temporaneamente moltiplicato, per almeno un ordine di grandezza, la popolazione umana sopportabile dagli ecosistemi terrestri. L'uomo estrae da miniera le fonti energetiche e quelle minerali (si veda il capitolo primo), le trasforma in manufatti che dopo il consumo diventano rifiuti. Questi ultimi si accumulano nei diversi compartimenti dell'ambiente. Più precisamente, una parte non piccola delle risorse minerali non energetiche si accumulano anche in un comparto dell'antroposfera che chiamiamo "tecnosfera".

La tecnosfera ha assunto nel corso degli ultimi due secoli la dimensione di trentamila miliardi di tonnellate: una massa che include tutte le strutture urbane e suburbane, le infrastrutture e i mezzi di trasporto, le infrastrutture industriali, civili e militari, quelle agricole, e così via. Per rendere comprensibile la stima di questa tecnomassa, è sufficiente pensare che essa ammonta ad una media di 200 Kg per ogni metro quadrato della superficie delle terre emerse. La tecnosfera può quindi essere considerata un accumulo di risorse estratte dalla crosta terrestre e riorganizzate sulla superficie.

Diffidando degli indici descritti nel prossimo paragrafo, come possiamo quantificare l'effetto dell'uomo sull'ambiente? In una serie di articoli pubblicati dal 2009 al 2020, i ricercatori dello Stockholm Resilience Center hanno individuato un numero limitato, ma esaustivo, di processi indotti dall'azione umana sugli ecosistemi terrestri, che definiscono una serie di confini ecologici (*Planetary Boundaries*), superando i quali si entra in una zona di rischio crescente. I confini individuati riguardano essenzialmente alcuni cicli bio-geo-chimici: quello del carbonio (che determina sia il cambiamento climatico che l'acidifica-

zione dei mari), quello dell'azoto e del fosforo (determinati dalle attività agricole), quello dell'acqua e quello dell'ozono stratosferico, poi abbiamo la modifica dell'uso del suolo – un processo che abbraccia i fenomeni della deforestazione e dell'aumento dell'erosione e che attiene anch'esso alle attività agricole –, vari tipi di inquinamento chimico, il carico atmosferico di aerosol e infine la perdita di integrità della biosfera, che in qualche modo è il terminale di tutti gli altri fenomeni e abbraccia sia i fenomeni di estinzione che quelli relativi alla perdita funzionale. La lista dei processi individuati, e le variabili misurabili che ne quantificano i confini di sicurezza per l'azione umana, è elencata in tabella 2. In questa tabella il processo planetario, che era stato inizialmente individuato come “Perdita di Biodiversità”, viene diviso nelle tre componenti che descrivono l'Integrità della Biosfera sulla terraferma, negli ecosistemi di acque dolci e negli ecosistemi marini.

In questo contesto un “confine” differisce da quello che in altre pubblicazioni, e anche in questo testo, viene definito “limite”. Un confine è una soglia che può essere trasgredita con un certo grado di rischio, che aumenta quanto più ce ne allontaniamo. Invece un limite è una soglia che non può essere spostata come, ad esempio, la quantità di una certa risorsa presente nella crosta terrestre. Come si vede dalla tabella 2, per uno dei confini selezionati la variabile critica non è stata individuata. Esso è l'inquinamento, determinato dall'introduzione negli ecosistemi di entità chimiche nuove (nella storia del pianeta), come molti inquinanti chimici di livello atomico e molecolare e di materiali di sintesi come le plastiche. Per il carico di aerosol in atmosfera si è individuato la variabile di controllo, ma si è in grado, per ora, di produrre i valori solo in un'area circoscritta. La varietà di questi fenomeni non ha permesso ancora, a distanza di 11 anni dalla pubblicazione del primo lavoro sull'argomento, di trovare una variabile che soddisfi lo scopo di definire un confine di sicurezza per questi due processi planetari. Il lavoro è quindi ancora in fase di costruzione.

La figura 5 fornisce una rappresentazione integrata dei confini citati, che ha la funzione di delimitare uno spazio all'interno del quale l'attività umana potrebbe essere sostenibile. Quello che gli autori definiscono “spazio di sicurezza per l'azione umana”. Uno spazio che, almeno per alcuni dei confini individuati, è stato già ampiamente superato.

Il maggior pregio di questo approccio sta nel cogliere la multidimensionalità dell'interazione fra uomo e ambiente. Ogni processo infatti individua, o si pone il problema di individuare, una variabile di controllo che permetta di determinare quantitativamente il confine di sicurezza, un intervallo di incertezza, e una zona di rischio conclamato per ciascun processo.

Il metodo riconosce la rilevanza globale e locale di alcuni processi e, soprattutto, l'importante aspetto dell'esistenza di interazioni fra processi che, nella maggior parte dei casi, amplificano gli effetti diretti dell'azione umana sui confini, attraverso meccanismi biofisici o antropici, portando ad un superamento dei livelli di sicurezza e/o di rischio individuati.

Quest'ultima osservazione apre la strada allo studio di come l'impatto su uno dei confini possa influenzare lo stato di altri confini, attraverso diversi tipi

Tabella 2. Variabili di controllo, confini planetari e intervalli di incertezza relativi ai processi inerenti al sistema planetario, individuati dallo Stockholm Resilience Center.

Confine planetario	Variabile/i di controllo	Valore pre-industriale	Valore di confine	Zona di incertezza: dal valore di confine a:	Zona di incertezza (valore normalizzato)	Valore attuale	Valore attuale normalizzato
Cambiamento climatico	Concentrazione di CO ₂ , Forzante radiativa ^{a)}	280 ppm 0 W/m ²	350 ppm +1.6 W/m ²	450 ppm 1.5 W/m ²	2.0 ^{b)} (2.4-1.5)	404 ppm 2.3 W/m ²	2.0 ^{c)}
Integrità della biosfera (terrestre)	Indice di integrità della Biosfera (BII)	100%	90%	80%	6.0	84.6	1.5
Integrità della biosfera (acqua dolce)	Funzionalità degli ecosistemi ^{d)}	-	-	-	-	-	1.8
Integrità della biosfera (oceani e mari)	Funzionalità degli ecosistemi ^{e)}	-	-	-	-	-	1.4
Cambiamento del sistema dei terreni	Area rimboschita di foreste	100%	75%	54%	1.8	62%	1.5
Flusso bio-geo-chimici (ciclo del P e del N)	Flusso di P dai fertilizzanti al suolo e fissazione industriale e biologica intrinseca di N	0 t _g P yr ⁻¹ 0 t _g N yr ⁻¹	6.2 t _g P yr ⁻¹ 82 t _g N yr ⁻¹	11.2 t _g P yr ⁻¹ 82 t _g N yr ⁻¹	1.6 ^{f)} (1.8-1.3)	14 t _g P yr ⁻¹ 150 t _g N yr ⁻¹	2.3 ^{g)} (2.3-2.4)
Acidificazione degli oceani	Concentrazione di ioni carbonato, Stato di saturazione dell'argonite rispetto al valore pre-industriale	100%	80%	70%	1.5	84%	0.80
Uso dell'acqua dolce	Consumo di acqua (DU) ^{h)}	~0 km ³ yr ⁻¹	6000 km ³ yr ⁻¹	6000 km ³ yr ⁻¹	1.5	2900 km ³ yr ⁻¹	0.45
Carico di aerosol	AOD ⁱ⁾ (misurato sul subcontinente indiano)	0.17	0.25	0.50	4.1	0.3	1.6
Impoverimento della strato di Ozono stratosferico	Colonna totale di Ozono alle latitudini nordiche	290 DU ^{j)}	Riduzione del 5%	Riduzione del 10%	2.0	Riduzione del 2.2%	0.44
Introduzione di nuove specie	Specie esotiche introdotte	-	-	-	-	-	-

a) Forzante radiativa al confine dell'atmosfera relativa al periodo preindustriale preso pari a 0.

b) BII: *Biosphere Intactness Index*.

c) Per l'integrità della biosfera in ambiente di acqua dolce e marino, la variabile di controllo non è stata quantificata (semplicemente non esistono stime del BII acquatico). Per le stime dello stato attuale (ultima colonna) usate nel resto del lavoro, si usano valori dedotti e consistenti con altri confini.

d) Acqua blu (*Blue Water*), acqua prelevata dai corpi idrici superficiali (fiumi, laghi, e così via) o dalle falde acquifere sotterranee rinnovabili.

e) AOD: *Absorption Optical Depth*. Misura fotometrica delle proprietà di assorbimento della luce (solare) da parte del carico colonnare di aerosol in atmosfera. Aerosol è il termine che si usa per la dispersione di un liquido o di un solido in un gas. Nebbie, nubi e fumi sono aerosol.

f) Nuove entità sono materiali e molecole di sintesi rilasciati nell'ambiente, come molti tipi di inquinanti chimici, le plastiche, i materiali a base di amianto, inquinanti radioattivi, e così via.

g) Nel caso in cui siano presenti più variabili di controllo, si prende la media delle variabili normalizzate riportate in parentesi.

h) DU: *Dobson unit*. L'unità Dobson è lo spessore (in decine di μm) dello strato di gas puro che si formerebbe dalla quantità totale contenuta nella colonna atmosferica verticale in condizioni standard (10⁵ Pa di pressione e 273.15 K di temperatura).

i) Ω_{arag} Stato di saturazione rispetto all'Aragonite. L'aragonite è una delle due forme allotropiche del carbonato di calcio e quella più solubile. Molti animali marini formano le loro strutture di sostegno (ad esempio coralli e molti molluschi specialmente nella fase giovanile) in aragonite. Quando Ω_{arag} > 1 l'aragonite non si scioglie in acqua, quando Ω_{arag} < 1 essa si scioglie.

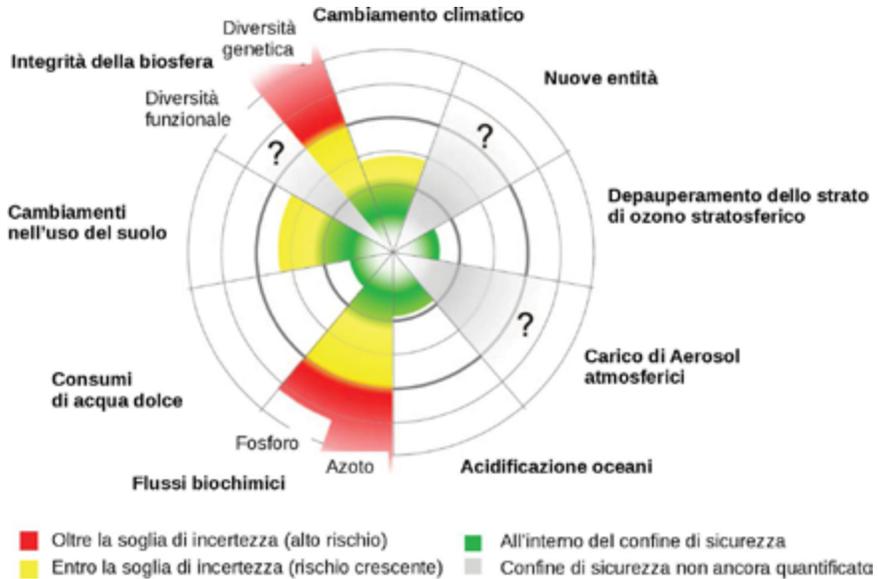


Figura 5. Rappresentazione grafica dei nove confini planetari e dello stato delle relative variabili di controllo. La zona verde è interna ai confini di sicurezza individuati in tabella 2. La zona gialla corrisponde all'ingresso nella zona di incertezza da parte della variabile di controllo, la zona rossa indica il raggiungimento dell'area di rischio. Per i processi segnati con un punto interrogativo non è possibile quantificare lo stato delle variabili di controllo, oppure tali variabili non sono state identificate.

di interazioni, che possono essere mediati sia da fattori biofisici che antropici. Un esempio tipico di interazione biofisica è dato dall'interazione fra cambiamento climatico e integrità della biosfera, due processi che sono legati da forti cicli di retroazione positiva. Un degrado della biosfera, ad esempio la perdita di superficie forestale, diminuisce la capacità di assorbimento della CO_2 da parte delle piante e ha quindi l'effetto di aggravare il cambiamento climatico. Quest'ultimo, a sua volta, determina generalmente un declino dell'integrità della biosfera, attraverso diversi meccanismi di stress sugli organismi, quando essi faticano ad adattarsi al mutare rapido delle condizioni climatiche.

Vi sono numerosi di tali cicli attivi fra le variabili in gioco. Questo aspetto è schematizzato in figura 6, dove i processi planetari sono graficamente collegati da frecce che identificano le relazioni dirette e le retroazioni fra di loro, nonché l'intensità delle stesse rappresentata dallo spessore del tratto. Questa rappresentazione dinamica, è basata sull'uso di grafi *force-directed*, in cui ciascun nodo dell'insieme è soggetto ad una forza attrattiva (tipo forza elastica di Hooke), proporzionale all'intensità di interazione con gli altri nodi, e rappresenta in modo soddisfacente una visione olistica del sistema Terra, pur nel quadro di una inevitabile semplificazione dei fenomeni.

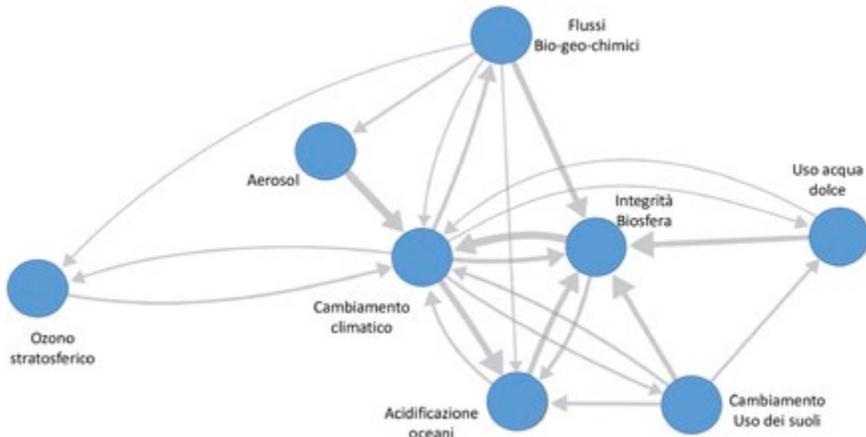


Figura 6. L'interazione fra i processi che individuano lo spazio di sicurezza è rappresentata con frecce di spessore proporzionale all'intensità. L'impatto umano su uno dei confini può spostare il confine stesso, modificando il valore della variabile di controllo, oppure impattare un altro confine direttamente attraverso meccanismi biofisici, oppure attraverso la risposta sociale all'impatto originario. In questa figura le tre componenti relative all'integrità della biosfera della tabella 2 sono state accorpate.

Il grafico conferma la posizione centrale dei nodi riguardanti il Cambiamento Climatico e l'Integrità della Biosfera. Le interazioni fra i diversi processi sono mediate da meccanismi naturali, di origine biofisica, o da diversi meccanismi di origine antropica. L'impatto diretto dell'azione umana determina in primo luogo un effetto su uno dei confini. Questo effetto diretto si può propagare ad altri confini attraverso meccanismi biofisici: ad esempio, il cambiamento di uso dei suoli indotto dalla necessità di destinare aree forestali all'agricoltura (deforestazione), fa aumentare le emissioni di carbonio e impatta sia il processo relativo al cambiamento climatico, sia quello di acidificazione degli oceani.

D'altra parte vi sono meccanismi di interazione fra processi che sono guidati da attività umane reattive nei confronti degli effetti indotti da qualche impatto sui confini. Ad esempio, nel processo reciproco di quello descritto sopra, cioè quando la ridotta produttività agricola indotta dal cambiamento climatico porta ad un aumento della deforestazione al fine di creare nuovi suoli agricoli.

Vi sono infine altri meccanismi antropici che agiscono parallelamente alle forzanti biofisiche e reattive descritte. Ciò avviene quando si instaurano forzanti parallele, che sono originate dalle forzanti reattive. Questo, ad esempio, è il caso dell'aumento dei flussi bio-geo-chimici e dell'uso di acqua dolce, che derivano dal dissodamento di zone forestali al fine di allargare il suolo agricolo. L'azione dei tre tipi di mediazione è illustrato in figura 7.

L'impatto antropico diretto delle emissioni manifesta i suoi effetti sul cambiamento climatico, il quale (fra gli altri effetti) riduce la produttività dei suoli agricoli. La reazione umana a questo effetto conduce a ricavarne nuovi terreni

agricoli da aree selvagge (deforestazione), che ha un effetto immediato sull'aumento delle emissioni, che rinforza l'impatto sul cambiamento climatico, e un effetto indiretto (parallelo) nell'aumento del consumo di acqua dolce e nell'applicazione di fertilizzanti, che a loro volta vanno a impattare altri due processi dell'insieme considerato: i cicli bio-geo-chimici e il consumo di acqua dolce, modificandone le variabili di controllo e i confini di sicurezza.

Resta il fatto che, per quanto le interazioni possano essere mediate sia da fattori biofisici che antropici, esse sono, in ultima analisi, causate originariamente dall'impatto delle attività umane su qualche confine planetario, che innesci la catena di risposte successive. L'estrema complessità della rete di interazioni interne all'ecosfera terrestre, illustrata in modo semplificato in figura 6, è basata considerando soltanto le interazioni con meccanismo di mediazione biofisica.

Le osservazioni hanno permesso di trovare un'evidenza per oltre la metà delle 90 interazioni considerate fra coppie di confini planetari della tabella 2. Inoltre, per 35 di tali interazioni, si è potuto trovare una vera e propria caratterizzazione quantitativa. Soltanto 6 interazioni mediate per via biofisica conducono ad un'attenuazione di un fenomeno collegato. È quindi ragionevole concludere che, in generale, le interazioni in questione tendono ad amplificare l'impatto umano sugli ecosistemi terrestri.

È chiaro, dunque, che includendo l'intera gamma degli impatti umani sull'ecosfera, oltre a quelli diretti anche quelli reattivi e paralleli, si giunge ad

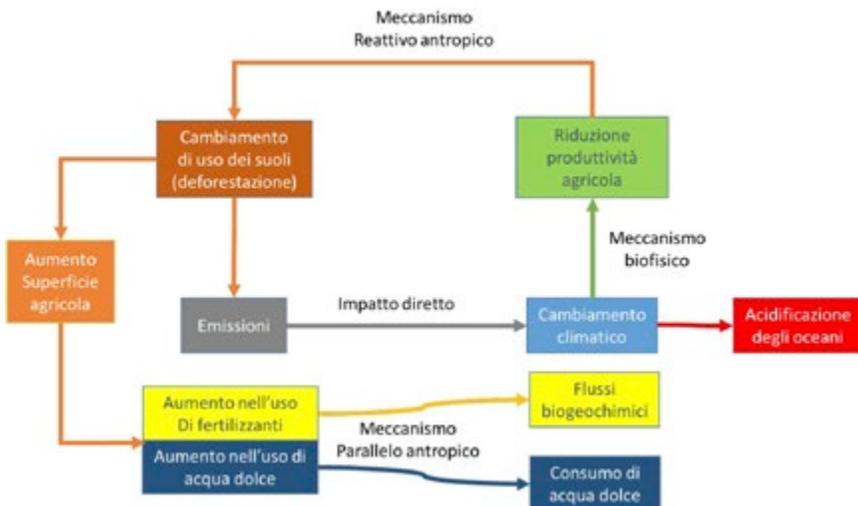


Figura 7. Esempio di interazione fra diversi processi planetari. Effetti sulle variabili di controllo e confini di sicurezza, mediati dai tre meccanismi fondamentali: quello biofisico, quello antropico reattivo e quello antropico parallelo. Le frecce indicano solo i meccanismi innescati dall'impatto diretto e non l'insieme delle relazioni fra i diversi processi come rappresentato nella figura 6.

una nuova e più completa definizione dello spazio sicuro per l'azione umana rappresentato in figura 5, come l'insieme degli impatti umani che, agendo sui confini planetari, fanno sì che nessuno di essi sia trasgredito.

Dato che la maggior parte delle interazioni ha l'effetto di amplificare gli impatti diretti, ci si aspetta che, includendo nel modello tali interazioni, lo spazio sicuro per l'azione umana si riduca. Ciò è quanto appare, quando si confrontano gli effetti di due componenti allargate degli impatti umani sull'ecosistema terrestre: 1) quelli determinati dalle attività agricole (il cambiamento dei suoli, i cicli biogeochimici e l'uso di acqua dolce), da una parte; e 2) l'effetto delle emissioni che causano il Cambiamento Climatico e, di conseguenza, l'Acidificazione degli Oceani.

In pratica, si cerca di quantificare l'effetto combinato delle interazioni rappresentate in figura 6 sui processi planetari, illustrati in figura 5, attraverso i meccanismi biofisici ed antropici di figura 7. Il confronto è esplicitato in figura 8, dove le variabili relative ai processi legati all'attività agricola sono riportati lungo l'asse orizzontale, mentre quelle relative a Cambiamento Climatico e Acidificazione degli Oceani sono lungo l'asse verticale.

Si noti che in questa figura le variabili sono normalizzate rispetto al valore del confine di sicurezza al quale assumono valore unitario, mentre il valore 0 corrisponde al valore non normalizzato pre-industriale. Lo spazio sicuro è l'area colorata in verde, che è il luogo geometrico dei punti nei quali tutte le variabili implicate sono al di sotto del confine di sicurezza. In assenza di interazioni, lo spazio sicuro sarebbe lo spazio tratteggiato, perché i primi confini che vengono superati sono quelli relativi al Cambiamento Climatico e ai Cicli biogeochimici.

Come atteso, sulla base di quanto detto sopra, permettendo di agire all'intero insieme di interazioni, lo spazio sicuro (area verde) viene distorto e ristretto, assumendo una forma quasi triangolare. È sempre a causa delle interazioni, che l'area verde si estende al di sopra del valore di confine (variabile normalizzata eguale ad 1) per la variabile del Cambiamento Climatico. Qui infatti gioca un ruolo un processo che è esterno all'insieme di variabili scelte in figura 8: grazie all'effetto attenuante sulla radiazione in ingresso del Carico Atmosferico di Aerosol, a livelli moderati o bassi di attività agricole, le emissioni climalteranti possono leggermente eccedere il limite di sicurezza stimato in assenza di interazioni.

L'effetto delle attività legate all'agricoltura tendono però a ridurre rapidamente il confine di sicurezza, come mostrato dalle linee oblique a pendenza negativa. Le pendenze relative ad ogni diverso impatto, che rappresentano quantitativamente l'interazione fra coppie di confini, sono ricavate da un'estesa indagine bibliografica sulla letteratura scientifica. Superato il confine di sicurezza, il sistema entra nella zona di incertezza in cui almeno una delle variabili è oltre il confine di sicurezza: gradazioni sempre più scure di giallo, indicano le successive trasgressioni da parte di altre variabili. Analogamente la zona di rischio conclamato, colorata in successive gradazioni di rosso, è quella in cui almeno una variabile è uscita dall'intervallo di incertezza.

Lo studio quantitativo di questi fenomeni può dare indicazioni importanti sull'efficacia delle politiche di protezione dell'ambiente e di rientro dalla zo-

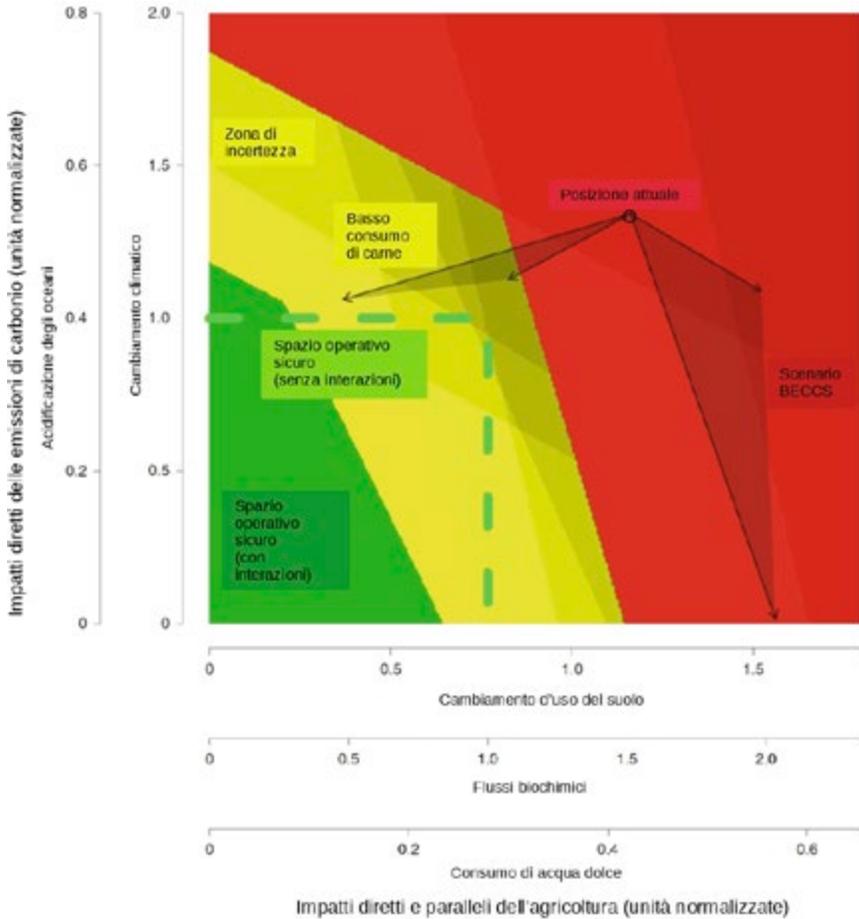


Figura 8

na di rischio. In figura 8 sono confrontate due possibili politiche di rientro che implicano cambiamenti nella filiera della produzione agricola: la prima basata sulla generalizzata produzione di bioenergia, combinata con l'uso di tecniche di cattura e stoccaggio del carbonio (BECCS: *Bio-Energy Carbon Capture Storage*); la seconda su una transizione globale ad una dieta carnea più contenuta. Come si vede, la traiettoria BECCS, comportando una maggiore attività agricola, ha una traiettoria che non comporta alcun avvicinamento alla frontiera dello spazio di sicurezza. Una dieta carnea ridotta, al contrario, pur avendo un impatto minore, sembra andare nella direzione necessaria.

Questo approccio multidimensionale al problema dell'ecologia umana ci sembra il più appropriato per descrivere un fenomeno che è altamente poliedrico. Ad esempio, questo punto di vista coglie la molteplicità dei problemi ambien-

li indotti dall'attività umana, al di là della monodia sul cambiamento climatico che, per quanto possa essere forse il problema più serio a medio termine, non è sicuramente l'unico problema che sarebbe necessario affrontare immediatamente. Il metodo mette anche in risalto effetti che, in assenza di modelli adeguati, possono apparire controintuitivi, ad esempio l'effetto poco rilevante, dal punto di vista del rientro nell'alveo della sostenibilità, della strategia BECCS, illustrata in figura 8.

Per completezza, nel prossimo paragrafo prendiamo in considerazioni approcci diversi e, secondo noi, meno soddisfacenti.

Capacità di carico, formula IPAT e impronta ecologica

Questo paragrafo è dedicato ad un approfondimento critico di tre nozioni-chiave tramite le quali, nella letteratura recente, si è tentato di misurare l'impatto antropico sull'ecosfera: la capacità di carico, l'impronta ecologica e la formula $I = PAT$. Esso può venire saltato, senza pregiudicare la comprensione del filo espositivo del capitolo.

Quello della "capacità di carico", o capacità portante, di un ecosistema è un concetto ecologico tanto semplice da comprendere quanto difficile da stimare. In effetti, una popolazione come quella umana appartiene ad un ecosistema coincidente con l'intera ecosfera planetaria, e che attinge ad una varietà quasi incalcolabile di risorse naturali, in quantità solo in parte note o stimabili. La capacità di carico è definita come il livello di popolazione massimo di una specie che può venire supportato dall'ecosistema che la ospita. Questa grandezza è relativamente facile da stimare in osservazioni o esperimenti mirati su determinate popolazioni in ecosistemi limitati. Un qualsiasi libro di ecologia che il lettore avrà voglia di consultare riporterà una consistente serie di esempi pratici.

La capacità di carico, così definita, non è un limite invalicabile e in molti casi viene infatti trasgredita da una popolazione animale, dando luogo ad una situazione che si definisce di tracimazione ecologica (in letteratura inglese: *ecological overshoot*). Un'altra caratteristica della capacità di carico è il fatto che non è costante: può variare infatti per fattori esogeni, come il cambiamento dei flussi energetici che attraversano l'ecosistema interessato, oppure endogeni, ad esempio l'aumento di una o più popolazioni che si avvicinano al limite della capacità di carico e che, così facendo, degradano le condizioni ambientali e riducono la capacità dell'ecosistema di sostenerle.

Che la popolazione umana abbia raggiunto e superato la capacità di carico dell'ecosfera terrestre, è un fatto spesso ragionevolmente affermato, ma difficile da accertare. Una delle misure più popolari della dinamica ecologica della popolazione umana in relazione alla capacità di carico, è quella dell'"impronta ecologica" della popolazione umana globale, o limitata a suoi sottosistemi: stati nazione, città, regioni e perfino singoli individui. Nella forma della famosa identità $I = PAT$, dove l'impronta ecologica I è data dal prodotto della popolazione per il livello di affluenza A (consumi/ ricchezza) per il fattore tecnologico

T, il concetto è un valido strumento didattico e divulgativo che coglie i principali aspetti della dinamica ecologica di *Homo sapiens* nella società industriale.

Nondimeno, a livello scientifico sono diversi i problemi che questa formula solleva. Il primo è il fatto che la formula assume il prodotto di grandezze indipendenti, mentre è chiaro che ciascuna delle tre variabili sul lato destro dell'identità interagisce dinamicamente con le altre. Per comprendere meglio il significato dell'identità, si può far riferimento ad una sua forma concreta, che dà la misura all'effetto di popolazione, affluenza e tecnologia nel caso delle emissioni di carbonio. Questa concreta forma dell'identità, detta *identità di Kaya*, misura le emissioni di carbonio come:

$$F = P * \frac{G}{P} * \frac{E}{G} * \frac{F}{E}$$

Dove P è la popolazione, G/P il PIL procapite, E/G l'intensità energetica e F/E l'intensità di carbonio. Questa forma, usata nei rapporti sul cambiamento climatico dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), è, matematicamente, un'identità, ossia un'uguaglianza vera per tutti i valori che si possono attribuire alle variabili, il che non significa, come qualcuno ha detto, che si tratti di una forma di tautologia, è infatti caratteristica propria delle identità esprimere la forma del rapporto fra le variabili in essa contenute. Tuttavia, anche in questo caso il problema principale dell'interdipendenza delle variabili va perduto. Se dunque, nell'identità di Kaya, si risolve il problema della metrica, essa rappresenta una misura incompleta dell'impronta carbonica dell'uomo.

Nella versione generale I = PAT, la questione della metrica rimane aperta. Come misurare, ad esempio, il fattore tecnologico? Ci sono trattazioni divulgative che usano il numero di brevetti come approssimazione del fattore tecnologico; ma ciò significa assumere che la tecnologia sia sempre un fattore maggiore di uno, aumentando sempre I. In realtà la tecnologia ha un ruolo ambivalente: può talvolta essere un fattore che, riducendo le emissioni per unità di energia, cioè aumentando l'efficienza, diminuisce l'impronta. È abbastanza ovvio che l'impatto ambientale di una flotta di pescherecci moderni supera quello della flotta delle barche a vela dei pescatori tradizionali delle isole dei Bagiuini (anche a parità di numero di pescatori), ma è altrettanto vero che l'impatto ambientale di un motore a combustione interna odierno è inferiore a quello di un analogo motore di cinquant'anni fa.

Uno dei tentativi di risolvere il problema della metrica nella stima dell'impatto ambientale umano, è quello perseguito da Wackernagel e collaboratori con il calcolo dell'impronta ecologica (d'ora in avanti, IE). Quest'ultima è definita come la superficie biologicamente produttiva del pianeta, necessaria per generare le risorse che una popolazione consuma e per assorbire i cascami dei suoi consumi. In questo modo l'impronta viene ridotta ad una misura di area (tipicamente ettari).

L'IE, come misura dell'impatto ambientale, è dunque un indice aggregato, che si riduce ad un singolo numero che viene generalmente confrontato

con un altro indice aggregato, quello che misura, sempre in termini di superficie, cioè ettari, la bioproduttività del territorio su cui la popolazione in questione vive. Su questa base si è generato un metodo di calcolo che permette di stimare l'IE delle nazioni, di comunità più ristrette (ad esempio in Italia si stimano anche le IE regionali), dei singoli individui, e dell'intera popolazione planetaria.

La stima dell'IE viene spesso divulgata in termini di numero di pianeti che una data comunità (nazione o altro) richiederebbe, se l'intera popolazione mondiale avesse consumi pro capite come quelli della comunità in questione. Così si afferma che, ad esempio, un cittadino statunitense consuma come se avesse a disposizione 4 o 5 pianeti Terra, significando con questo che l'IE media USA eccede la produttività biologica del pianeta di un fattore pari a 4 o 5. In queste stime si rivela che soltanto alcuni paesi economicamente arretrati, o con ancora grandi aree non antropizzate o debolmente antropizzate, hanno un IE inferiore alla bioproduttività. Questa narrativa del "numero di Terre" è quella che informa il noto *overshoot day*, nel quale si celebra il giorno dell'anno in cui l'umanità nel suo complesso cessa di utilizzare le risorse rigenerate dal pianeta ogni 365 giorni e inizia a consumare il capitale naturale.

L'IE è il primo tentativo di dare una misura al livello di tracimazione ecologica della popolazione umana rispetto ad una stima della capacità di carico (la citata bioproduttività). Essa poggia su molteplici assunzioni opinabili, ma ciò è inevitabile: ogni metrica che intenda sintetizzare un'ampia gamma di fenomeni complessi, comporta semplificazioni, errori e lacune. Tuttavia, per restare valida, l'IE dovrebbe riuscire a non eliminare l'essenziale. Ebbene, la pressione antropica sull'ambiente proviene non soltanto dall'estrazione di varie risorse dal suolo, ma anche dalle varie forme d'inquinamento che ne compromettono la biocapacità. Trascurando queste forme essenziali, poiché manca un modo ovvio per tradurle in ettari, l'IE determina una sistematica distorsione al ribasso della pressione del metabolismo sociale ed economico sull'ambiente.

L'altra critica che qui evochiamo segnala che, nel calcolo dell'IE, l'unico impatto considerato nell'uso delle fonti fossili è quello legato alle emissioni di CO₂. A sua volta, l'aumento delle emissioni è ricondotto unicamente al cattivo utilizzo del suolo, in particolare alla deforestazione. Dentro questa impostazione, il modo più semplice per ridurre l'impatto ecologico globale consisterebbe nel dedicare ampie aree di terra alla piantagione di *Eucalyptus*, una pianta che nelle zone tropicali e subtropicali ha un tasso di sequestro di carbonio compreso tra le 5 e le 10 tonnellate per ettaro all'anno. Basterebbe coprire di *Eucalyptus* un'area estesa meno della metà degli Stati Uniti d'America, per compensare un'IE pari a un intero pianeta. Sarebbe però una risposta fasulla, in quanto le emissioni di CO₂ possono avere altre origini, il loro assorbimento può essere realizzato in altri modi, anche senza foreste che coprano molta terra, e infine potrebbero ridursi sostituendo i combustibili fossili con energia rinnovabile.

Eguale fitness evolutiva ed energia extra-metabolica

Quello che abbiamo argomentato nel capitolo, può essere riproposto invocando un risultato scientifico recente: la regola dell'eguale *fitness evolutiva*. La fitness, termine traducibile come "idoneità", definisce il successo riproduttivo di un genotipo, che è il corredo genetico di un organismo. La fitness dipende da come viene utilizzata l'energia metabolica. L'energia metabolica è infatti il processo di conversione dell'energia chimica organica, derivata principalmente dalla fotosintesi, in energia meccanica e termica. Senza il metabolismo, un organismo non può sopravvivere, crescere e riprodursi.

La regola dell'eguale fitness evolutiva stabilisce che, nello stato stazionario e con errori di arrotondamento, tutti gli organismi si sostituiscono, da una generazione all'altra, con la stessa quantità di energia. Essa si verifica in quanto: 1) vi è un *trade-off* tra tempo di generazione e potenza produttiva, per cui gli organismi più piccoli e più caldi durano meno, ma producono biomassa a velocità più elevate, rispetto agli organismi più grandi e più freddi; 2) il contenuto energetico della biomassa è essenzialmente costante, $\sim 22.4 \text{ kJ g}^{-1}$ di peso corporeo secco; e 3) anche la frazione della produzione di biomassa incorporata nella prole sopravvissuta è compresa in un intervallo di $\sim 10\text{--}50\%$, che è molto stretto se si pensa all'estrema varietà degli organismi che vi rientrano.

Un'alga acquatica a cellula singola ricrea la propria massa corporea in un giorno, ma vive solo per un giorno. Una grande elefantessa femmina impiega anni per produrre il suo primo figlio, ma vive molto più a lungo dell'alga. Per tutte le piante e per gli animali di tutte le taglie, questi due fattori – il tasso di produzione di biomassa e il tempo di generazione – si bilanciano esattamente l'un l'altro, quindi ognuno contribuisce con la stessa energia per grammo di genitore alla generazione successiva.

Poiché gli organismi impiegano all'incirca la stessa quantità di energia, per unità di peso corporeo, per produrre la prole della generazione successiva, nessuna specie ha un vantaggio intrinseco e duraturo nella lotta per l'esistenza. Indipendentemente dalla diversità nella dimensione del corpo, nonché dalla collocazione ecologica e nella storia biologica, tutte le specie vegetali, animali e microbiche sono ugualmente "idonee" nella dinamica dell'evoluzione.

L'eccezione è rappresentata dalla specie umana, quando inizia ad impiegare fonti energetiche extra-metaboliche. Tutte le popolazioni, compresi gli esseri umani, sono sostenute da flussi di energia e materiali provenienti da un ambiente finito. Ma gli umani nelle società moderne, in particolare nelle aree urbane, vivono a densità molto maggiori di quelle dei cacciatori-raccoglitori e delle società preindustriali, consumando energia pro capite fino a due ordini di grandezza maggiore rispetto ai soli bisogni calorici. Ciò dimostra che il rapido aumento delle densità umane, che si è verificato in meno di 10.000 anni, ha coinciso con le innovazioni nella produzione alimentare e nell'uso di energia extra-metabolica da combustibili rinnovabili e fossili. Attraverso l'uso di energia extra-metabolica, gli umani moderni sono sfuggiti ai vincoli energetici che sono imposti

a tutte le altre specie. Anche le specie alleate, cioè quelle addomesticate, sono, grazie all'uomo, sfuggite a questo vincolo.

A sua volta, il ricorso a fonti energetiche extra-metaboliche è avvenuto mediante l'impiego di strumenti extrasomatici o protesi: la tecnologia. Il cerchio energia-tecnologia-civiltà si è saldato, pronto a diventare una spirale espansiva assumendo la forma, storicamente specifica, fonti fossili-tecnologia-capitalismo.

Riferimenti bibliografici

Sulla questione del legame fra sviluppo dell'agricoltura e delle civiltà complesse e clima si veda l'articolo: P. J. Richerson *et al.*, *Was Agriculture Impossible during the Pleistocene but Mandatory during the Holocene? A Climate Change Hypothesis*, "Am. antiq.", 66 (3), 2001, pp. 387-411.

Sulla deriva attuale delle condizioni climatiche, rispetto alla normalità delle ultime centinaia di migliaia di anni: B. Etkin, *A State Space View of the Ice Ages. A New Look at Familiar Data*, "Climatic Change", 100 (3-4), 2010, pp. 403-406.

Per lo studio dell'ecosistema terrestre e le relazioni fra le sue componenti (clima, biosfera, flussi energetici), si veda: L.R. Kump *et al.*, *The Earth System*, Prentice Hall, San Francisco 2010³; L. Sertorio, *Vivere in nicchia, pensare globale*, Bollati Boringhieri, Torino 2005; L. Sertorio e E. Renda, *Ecofisica*, Bollati Boringhieri, Torino 2009; V. Smil, *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*, The MIT Press, Cambridge (Mass.) 2008; A. Kleidon, *Life, Hierarchy, and the Thermodynamic Machinery of Planet Earth*, "Physics of Life Reviews", 7 (4), 2010, pp. 424-460. A. M. Makarieva *et al.*, *Energy Budget of the Biosphere and Civilization: Rethinking Environmental Security of Global Renewable and Non-Renewable Resources*, "Ecological Complexity", 5 (4), 2008, pp. 281-288.

Inoltre si consiglia la consultazione di: E. P. Odum *et al.*, *Fondamenti di ecologia*, Piccin, Padova 2007 (ed. orig. 2006); F. S. Chapin *et al.*, *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, Springer, New York 2011²; S.A. Levin (a cura di), *The Princeton Guide to Ecology*, Princeton University Press, Princeton 2009.

Sulla posizione dell'uomo nella biosfera, oltre ai testi citati sopra, in particolare in relazione all'appropriazione della produttività primaria netta, e ad altri fenomeni di sfruttamento dell'ecosfera terrestre, si vedano anche: P. M. Vitousek *et al.*, *Human domination of Earth's ecosystems*, "Science", 277, 1997, pp. 494-499; H. Haberl *et al.*, *Human Appropriation of Net Primary Production: Patterns, Trends, and Planetary Boundaries*, "Annu. Rev. Environ. Resour.", 39 (1), 2014, pp. 363-391; K.-H. Erb *et al.*, *Analyzing the Global Human Appropriation of Net Primary Production — Processes, Trajectories, Implications*, "Ecological Economics", 69 (2), 2009, pp. 250-259; O. Akizu-Gardoki *et al.*, *Decoupling between Human Development and Energy Consumption within Footprint Accounts*, "Journal of Cleaner Production", 202, 2018, pp. 1145-1157; V. Smil, *Harvesting the Biosphere: The Human Impact*, "Population and Development Review", 37 (4), 2011, pp. 613-636.

Sul fenomeno delle estinzioni di massa indotte dall'attività umana si veda: A. D. Barnosky, *Assessing the Causes of Late Pleistocene Extinctions on the Continents*, "Science", 306 (5693), 2004, pp. 70-75; G. Ceballos *et al.*, *Biological Annihilation via the Ongoing Sixth Mass Extinction Signaled by Vertebrate Population Losses and Declines*, "Proc Nat Acad Sci USA", 114 (30), 2017, pp. E6089-E6096; G. Strona e C.J.A. Bradshaw, *Co-Extinctions Annihilate Planetary Life during Extreme Environmental Change*, "Sci Rep",

8 (1), 2018, pp. 1-12. Rimandiamo anche al classico a carattere divulgativo E. Kolbert, *La sesta estinzione: una storia innaturale*; Neri Pozza, Vicenza 2015.

Sulle formule IPAT e di Kaya si consiglia la consultazione introduttiva delle relative voci wikipedia.

Sull'impronta ecologica si vedano T. O. Wiedmann *et al.*, *The Material Footprint of Nations*, "PNAS", 112 (20), 2015, pp. 6271-6276; M. Wackernagel *et al.*, *Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy*, "Proceedings of the National Academy of Sciences", 99 (14), 2002, pp. 9266-9271. È anche utile il sito web del Global Footprint Network: <<https://www.footprintnetwork.org/>> (09/20).

Per le critiche all'impronta ecologica, si vedano: J.C.J.M. van den Bergh e F. Grazi, *Ecological footprint policy? Land use as an environmental indicator*, "J. Ind. Ecol.", 18 (1), 2014, pp. 10-19; J.C.J.M. van den Bergh e F. Grazi, *Reply to the first systematic response by the Global Footprint Network to criticism: A real debate finally?*, "Ecological Indicators", 58, 2015, pp. 458-463; nonché M. Giampietro e A. Saltelli, *Footprints to nowhere*, "Ecological Indicators", 46, 2014, pp. 610-621.

Sull'estensione della tecnosfera e l'antropocene: J. Zalasiewicz *et al.*, *Scale and Diversity of the Physical Technosphere: A Geological Perspective*, "The Anthropocene Review", 4 (1), 2017, pp. 9-22; W. Steffen *et al.*, *The Anthropocene: Conceptual and Historical Perspectives*, "Proc. R. Soc. A", 369 (1938), 2011, pp. 842-867; W. Steffen *et al.*, *The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature?*, "Ambio", 36(8), 2007, pp. 614-621.

Per quanto riguarda le *Planetary Boundaries* i lavori di riferimento sono i seguenti: J. Rockström *et al.*, *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*, "Ecology and Society", 14 (2), 2009, <<https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>> (09/20); W. Steffen *et al.*, *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet*, "Science", 347 (6223), 2015, pp. 1259855-1259855; S. Lade *et al.*, *Human Impacts on Planetary Boundaries Amplified by Earth System Interactions*, "Nat Sustain", 3 (2), 2020, pp. 119-128. Si veda anche il pamphlet politico sul tema dello spazio di sicurezza per l'azione umana: J. Rockström e A. Wijkman, *Natura in bancarotta: perché rispettare i confini del pianeta*, Edizioni Ambiente, Milano 2014.

Sul paradigma della eguale fitness, si vedano: J. H. Brown *et al.*, *Equal fitness paradigm explained by a trade-off between generation time and energy production rate*, "Nature Ecology & Evolution", 2, 2018, pp. 262-268; J. R. Burger *et al.*, *Extra-metabolic energy use and the rise in human hyper-density*, "Scientific Reports", 7, 2017, <<https://doi.org/10.1038/srep43869>> (09/20).