

1

L'ambiente e l'economia

- 1.1 Le funzioni dell'ambiente*
- 1.2 L'ecosistema*
- 1.3 Flussi d'energia e cicli della materia*
- 1.4 L'impatto delle attività umane sull'ecosistema*
- 1.5 La visione circolare del sistema economico*
- 1.6 Modelli input-output d'impatto ambientale*

Premessa

L'obiettivo di questo capitolo è quello di descrivere l'interdipendenza tra il sistema economico e l'ambiente. Gli strumenti analitici della teoria economica possono contribuire a spiegare tale relazione di interdipendenza, la quale si caratterizza, come dimostreremo nei capitoli successivi, per la presenza di esternalità ambientali che sono una delle cause del “fallimento del mercato”. In questo capitolo descriviamo le funzioni economiche svolte dall'ambiente e alcuni concetti fondamentali della scienza ecologica, nonché i flussi di materia e di energia presenti negli ecosistemi. In armonia con il funzionamento degli ecosistemi, il modello dei flussi circolari è valido anche per descrivere il funzionamento del sistema economico. La schematizzazione dell'impatto delle attività umane sull'ecosistema è utile introduzione alla tipologia degli inquinanti ed alla classificazione delle fonti d'inquinamento. Infine, l'analisi input-output viene impiegata per quantificare l'impatto ambientale dell'attività economica, anche con lo svolgimento di esercizi numerici.

1.1 Le funzioni dell'ambiente

L'ambiente fornisce un'ampia varietà di servizi e svolge tre importanti funzioni per il sistema economico. Innanzi tutto l'ambiente fornisce agli organi-

smi viventi il *supporto alla vita* tramite le funzioni dell'ecosistema e in particolare una *capacità naturale di assimilazione dei rifiuti* provocati dagli organismi viventi. Il sistema economico rilascia nell'ambiente sostanze inquinanti e può attenuarne la contaminazione mediante la riduzione delle emissioni inquinanti ed il riciclaggio dei rifiuti. Tuttavia l'ambiente è anche in grado di fornire una capacità, ben più limitata, di assimilazione dei rifiuti provocati dalle attività economiche. La seconda funzione svolta dall'ambiente è quella di fornire le *risorse naturali*, come acqua, ossigeno o risorse genetiche, e le *materie prime* per i processi produttivi, le quali possono essere sia di tipo rinnovabile come le foreste o le fonti energetiche rinnovabili (energia solare, eolica, idraulica, maree, geotermia ecc.), sia di tipo non rinnovabile come i minerali e le fonti fossili d'energia. Infine la terza funzione dell'ambiente è quella di fornire risorse ricreative e di rappresentare di per sé un *bene estetico* in quanto fonte diretta d'utilità per la vita umana. Tra i beni estetici si includono i parchi nazionali, i rifugi e le aree protette per gli animali selvatici e le specie vegetali endemiche.

Le funzioni dell'ambiente dal punto di vista economico sono rappresentate in Figura 1.1. Il sistema economico preleva risorse e materie prime dall'ambiente e le trasforma in beni e servizi nei processi di produzione e consumo. Le risorse sono restituite all'ambiente come rifiuti e sostanze inquinanti le quali possono essere assimilate dall'ambiente stesso. Il riciclaggio dei rifiuti ed un rigoroso controllo delle emissioni inquinanti possono ridurre il grado di contaminazione dell'ambiente ed il prelievo indiscriminato di risorse. *L'economia delle risorse naturali* studia i problemi connessi all'utilizzo delle risorse naturali fornite dall'ambiente, in particolare le modalità d'esaurimento delle risorse e le modalità di evoluzione del prezzo in relazione a diverse forme di mercato. *L'economia dell'ambiente* studia invece l'effetto dell'attività economica sul sistema ambientale, in particolare analizza que-

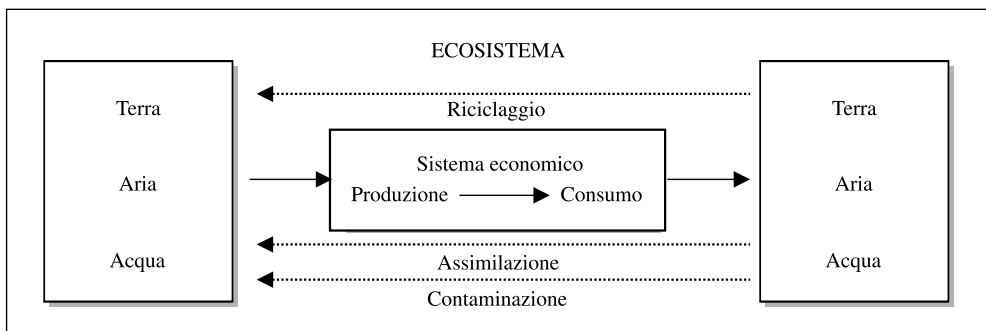


Figura 1.1 Il sistema economico nell'ecosistema

stioni relative al “fallimento del mercato” provocate da esternalità ambientali negative e positive, esamina gli strumenti più opportuni per dare risposta agli effetti del fallimento del mercato, propone metodologie per misurare il valore economico dei beni ambientali in assenza di uno specifico mercato in grado di valorizzare gli stessi beni ambientali.

1.2 L'ecosistema

L'analisi dell'interdipendenza tra il sistema ambientale e il sistema economico richiede un breve richiamo di alcuni concetti mutuati dall'ecologia. Il termine *ecosistema*, espressione abbreviata di sistema ecologico, identifica un insieme composto da organismi viventi, dal loro ambiente e da tutte le interazioni che esistono in un particolare spazio. L'ecosistema può riferirsi ad un piccolo angolo di territorio, ad esempio uno stagno, come alla biosfera cioè all'ecosistema della Terra che garantisce l'esistenza agli esseri viventi.

Ogni ecosistema è composto da due componenti: fattori abiotici (senza vita) e fattori biotici (viventi). I fattori abiotici di un ecosistema sono i suoi componenti fisici e chimici, come ad esempio le piogge, la temperatura, la luce solare. Ogni specifico essere vivente manifesta un suo caratteristico grado di tolleranza alla variabilità dei fattori abiotici. Per molti ecosistemi terrestri il grado di piovosità determina la variabilità della copertura vegetale del terreno (foresta, prateria o deserto). La variabilità nella temperatura determina la tipologia della vegetazione. Ad esempio, il clima caldo-umido delle regioni equatoriali determina le foreste pluviali tropicali caratterizzate, tra l'altro, da alberi che possono raggiungere 60 metri d'altezza; mentre nelle regioni a clima freddo-umido crescono foreste di conifere.

I fattori biotici di un ecosistema sono rappresentati dalle cose viventi: funghi, piante, animali e micro-organismi. Gli organismi vivono in popolazioni, cioè gruppi della stessa specie che occupano un dato territorio. Le popolazioni sono gruppi dinamici, che cambiano in numero, età, struttura e composizione in corrispondenza di variazioni ambientali. Una popolazione non vive mai isolata in un ecosistema, ma condivide le risorse disponibili con altre popolazioni. Una comunità è definita come un insieme di popolazioni che vivono in una data area.

Nell'ambito di ciascuna comunità vi sono differenti tipologie di relazione, cooperative e non cooperative. Una relazione molto familiare è quella nota tra il predatore e la sua preda: un organismo uccide un altro organismo per cibo. L'interazione tra predatore e preda determina benefici non solo, ovviamente, per il predatore ma anche per la popolazione delle prede, poiché il predatore elimina organismi ammalati (di più facile cattura), deboli o an-

ziani. Una tale predazione tiene sotto controllo il numero delle prede e assicura altresì alle stesse disponibilità sufficiente di cibo. Se l'uomo o altre circostanze naturali alterano l'equilibrio dell'interazione predatore-preda a favore o del predatore come della preda la stessa sopravvivenza dell'ecosistema può essere messa a repentaglio.

Un altro tipo d'interazione che si riscontra nei sistemi viventi è il cosiddetto commensalismo, una particolare interazione che favorisce una specie e che è neutra per un'altra specie. Ad esempio, i batteri del nostro intestino producono limitatissimi benefici all'organismo ma in compenso ricevono un'abbondante disponibilità di cibo. Il mutualismo è un tipo d'interazione che si dimostra benefica ad entrambi gli organismi; mentre il neutralismo è un esempio di mancanza d'interazione tra organismi che vivono a contatto. Il parassitismo è un tipo di relazione mediante la quale un organismo (parassita) vive sopra o dentro un altro organismo (ospitante). Da quest'interazione il parassita ottiene cibo cibandosi lentamente dell'ospitante o sottraendo alimenti all'ospitante. Infine, un'interazione molto importante è quella della competizione per le risorse o tra membri di una stessa specie o tra membri di specie differenti. La competizione è un fattore importante nel processo della selezione naturale.

In ciascun ecosistema vi sono organismi produttori, detti *autrofi*, in grado di catturare l'energia solare e di produrre la maggior parte delle molecole alimentari per la loro stessa sopravvivenza. Nell'ambito dell'ecosistema si formano catene e reti alimentari nel cui ambito gli organismi produttori (piante e fitoplancton) alimentano gli organismi consumatori primari (erbivori) e questi, a loro volta, gli organismi consumatori secondari e terziari (carnivori). Nell'ambito di queste catene e reti alimentari è importante il ruolo degli organismi detritivori (come le formiche ed i divoratori di carogne) e soprattutto quello degli organismi decompositori (funghi e batteri). I decompositori digeriscono le piante morte ricche di cellulosa e le scorie azotate degli animali e così facendo producono biossido di carbonio e acqua ma in più rilasciano solfati, nitriti, nitrati e altri ioni minerali. I decompositori svolgono il ruolo essenziale di riciclaggio degli ioni minerali.

Un ecosistema è un sistema biologico, chimico e fisico interdipendente e dinamico, in altre parole un sistema sempre in mutamento. Esso è un sistema dinamico nel senso che le parti che lo compongono possono cambiare di giorno in giorno, ma nel complesso esse rimangono più o meno le stesse. Questa condizione che descrive un ecosistema come uno stato d'equilibrio dinamico, o *steady state*, implica uno stato di stabilità.

Il concetto d'equilibrio dinamico può essere meglio chiarito con un semplice esempio. Ipotizziamo di osservare per una ventina d'anni uno stesso

ecosistema forestale in uno stadio di maturità nel suo sviluppo. Questo sistema si trova in uno stato di stabilità se possiamo osservare che: i) il numero totale delle specie botaniche è pressoché costante d'anno in anno, ii) le stesse specie sono presenti ogni anno, iii) l'ampiezza della popolazione di ciascuna specie è approssimativamente la stessa di ogni anno. Tutto ciò significa che quell'ecosistema forestale è stabile. Stabilità non implica che tutte le parti dell'ecosistema operino in perfetta armonia. Anzi, la stabilità è sovente il risultato di una competizione o di un conflitto: gli animali competono per procacciarsi una disponibilità alimentare limitata, i predatori cacciano le prede ecc.

La stabilità è il risultato di forze in opposizione che costantemente agiscono per regolare la dimensione delle popolazioni di un ecosistema. Queste forze possono essere suddivise tra quelle che tendono ad accrescere la popolazione (*fattori di sviluppo*) e quelle che tendono a diminuirla (*fattori di riduzione*).

Tra i fattori biotici di sviluppo ricordiamo: saggio di riproduzione; capacità di adattamento al cambiamento ambientale o a migrare verso nuovi *habitat*; abilità nel competere, nel mimetizzarsi, nel difendersi, nel cercare cibo; adeguata disponibilità di alimenti. E tra quelli abiotici: luminosità e temperatura favorevoli, ambiente chimico favorevole. Tra i fattori biotici di riduzione ricordiamo: predatori, malattie, parassiti, competitori, assenza di cibo o di un *habitat* favorevole. Tra quelli abiotici: clima sfavorevole, assenza d'acqua, alterazioni nell'ambiente chimico.

Cambiamenti nelle condizioni abiotiche e biotiche si manifestano con grande regolarità negli ecosistemi. Gli ecosistemi sono complessi sistemi che si regolano in modo autonomo, poiché sono dotati di capacità di recupero (*resilienza*) in quanto sono in grado di riportare in equilibrio il sistema che ha subito perturbazioni, relativamente piccole, provocate non solo da cause naturali ma anche dall'attività umana.

1.3 Flussi d'energia e cicli della materia

Gli organismi in grado di sviluppare la fotosintesi, come ad esempio le piante, rappresentano il primo anello della catena alimentare degli esseri viventi in quanto sono in grado di catturare l'energia solare, la fonte ultima d'energia per tutti gli ecosistemi. Le piante sono in grado di catturare solamente l'1% o il 2% dell'energia che il sole trasmette alla Terra. Tuttavia, l'intero mondo vivente è costruito attorno a questa piccola frazione d'energia solare.

L'attività economica è tributaria non solo dell'energia solare ma anche di altre forme energetiche, nonché di risorse naturali non energetiche. Come è

noto, l'energia è disponibile in molte forme, tra le quali il calore, la luce, il suono, l'elettricità, l'energia meccanica, geotermica, chimica, magnetica. Pur essendo differenti, queste forme hanno in comune la capacità di svolgere lavoro, che nella cellula significa il mantenimento dell'organizzazione biologica. Tutte le forme d'energia possono essere classificate in due gruppi: energia potenziale ed energia cinetica. L'energia potenziale è l'energia immagazzinata, come ad esempio nel carbone o nel cibo sotto forma d'energia di legame chimico, che può svolgere lavoro quando è liberata. L'energia cinetica, in contrasto, è l'energia posseduta dagli oggetti in movimento, come ad esempio una massa d'acqua. Tutte le forme d'energia sono soggette alle leggi della termodinamica. La prima legge, detta legge della conservazione dell'energia, recita che l'energia non può essere né creata né distrutta, ma può essere solamente trasformata da una forma all'altra. Questa legge ci ricorda che è necessario verificare il bilancio energetico di un sistema, cioè che la quantità d'energia in input deve sempre essere uguale alla quantità in output più le quantità disperse durante il processo di conversione.

Mentre la prima legge riguarda le *quantità* (input e output) della conversione energetica, la seconda legge considera la *qualità* dell'energia durante il processo di conversione di una forma in un'altra. La seconda legge recita che ogni trasferimento d'energia è accompagnato da una perdita energetica, di solito sotto forma di calore: l'energia si degrada durante la conversione da una forma energetica ad un'altra, in altre parole che l'energia va da una forma più concentrata ad una meno concentrata durante la conversione. Ad esempio, quando la benzina viene bruciata nel motore di un'automobile, essa viene convertita da una forma molto concentrata (energia da legame chimico) a una meno concentrata (energia termica) per essere successivamente trasformata in energia meccanica. Le forme concentrate d'energia possono offrire una gran quantità di lavoro, quelle meno concentrate possono invece offrire una minor quantità di lavoro. Dal punto di vista delle leggi della termodinamica, l'universo è un sistema in decadimento perché tutta l'energia di alta qualità disponibile è progressivamente convertita in calore, la forma d'energia di più bassa qualità. Questo processo di decadimento è detto *entropia* o disordine (caos). Nell'universo l'entropia prevale col passare del tempo, ma nell'ambito di questo caos vi sono nicchie di ordine. La più importante per noi è la vita biologica in quanto il sistema vivente crea ordine dal disordine. Ad esempio le piante rimuovono molecole di anidride carbonica dall'atmosfera per formare molecole organiche alimentari. In questo modo il processo entropico è invertito grazie al consumo d'energia che è fornito dalla luce solare. A sua volta, la luce solare, che le piante utilizzano sulla Terra per creare ordine, è ottenuta dal graduale decadimento del sole; ma l'ordine creato sulla Terra dai

sistemi viventi è di molto inferiore al disordine creato dal decadimento del sole. Tirando le somme il disordine (entropia) prevale.

Le leggi della termodinamica governano tutto il mondo vivente, dal più piccolo batterio alla più grande balena. Esse limitano l'evoluzione degli ecosistemi e possono essere usate per guidare la crescita delle attività economiche lungo un sentiero sostenibile.

La Figura 1.2 schematizza il flusso dell'energia trasmessa dal sole alla Terra e le modalità di passaggio tra i livelli trofici che compongono l'ecosistema. Le proporzioni del disegno non sono corrette per ragioni grafiche. L'energia fornita dalla luce solare viene catturata e fissata nel corso del processo di fotosintesi dagli organismi produttori. L'energia passa poi nei cibi e, sotto forma d'energia di legame chimico, si trasferisce da un livello trofico all'altro mediante la catena alimentare. L'energia giunge infine al livello degli organismi decompositori. Ogni trasferimento d'energia si realizza con un rendimento energetico di circa il 10%. L'energia restante risulta dispersa nell'ambiente sotto forma di calore. Il flusso d'energia solare è essenziale per il funzionamento di un ecosistema.

Nell'ambito della biosfera, l'energia e la materia si muovono sempre associate, ad esclusione dell'energia solare utilizzata dalle piante per il processo di fotosintesi. Tale associazione si realizza attraverso i legami chimici presenti in alcuni composti organici ad elevato contenuto energetico e formati ad opera degli organismi fotosintetici. Diversamente dall'energia, che durante i processi di conversione si degrada e non può quindi essere riutilizzata, la materia vie-

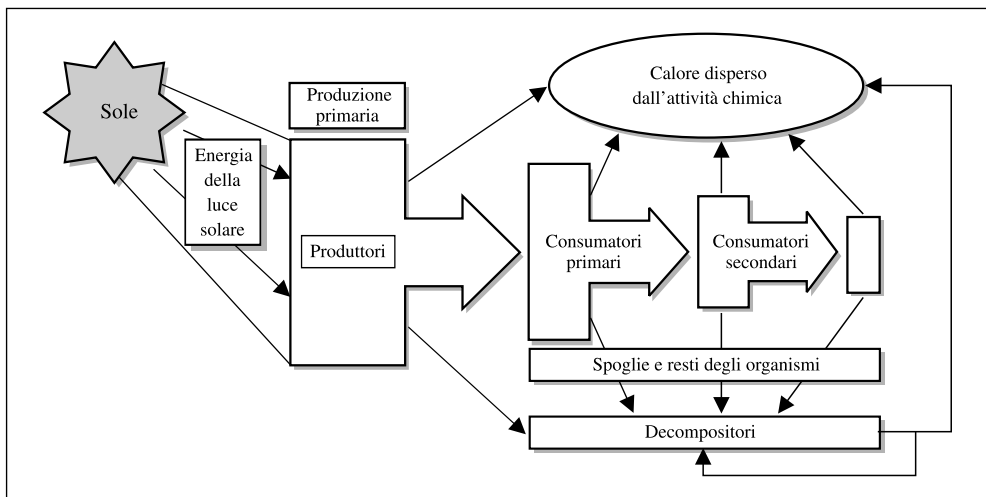


Figura 1.2 L'energia nell'ecosistema

ne costantemente e incessantemente riciclata tra le comunità viventi ed i componenti abiotici dell'ambiente.

La biomassa è la materia organica creata dalle piante o da altri organismi fotosintetici e trasferita attraverso la catena alimentare, quindi è la sostanza che dà la vita. Sappiamo che non tutta la biomassa creata al primo livello trofico è convertita in biomassa nel secondo livello trofico. In altre parole, non tutta la materia pianta si converte in materia animale: l'ammontare di biomassa trasferita da un livello a quello immediatamente superiore varia dal 5% al 20% in relazione a specifiche catene alimentari. Se vogliamo rappresentare questo processo in modo grafico, la biomassa presente nei differenti livelli trofici origina la cosiddetta *piramide della biomassa*.

Il legame chimico che mantiene uniti i composti organici della biomassa contiene un'enorme quantità d'energia potenziale. Questa energia può essere rilasciata quando, ad esempio, la biomassa viene bruciata o viene decomposta in cellule nelle piante, negli animali o nei micro-organismi. Anche i flussi energia rappresentati nel grafico di Figura 1.2 possono essere rappresentati a mezzo di una *piramide dell'energia*.

Qual è l'implicazione di queste *piramidi ecologiche*? Poiché la biomassa e l'energia decrescono al crescere dei livelli trofici, pochi organismi possono essere sostenuti ai più alti livelli trofici. Infatti, i carnivori che si collocano al più alto livello della catena alimentare spesso rappresentano la più piccola popolazione dell'ecosistema. Inoltre, i carnivori sono i primi ad essere minacciati dalla distruzione della catena alimentare per opera delle attività umane. Un'altra implicazione delle piramidi ecologiche è che molti più individui possono essere sostenuti da un ecosistema quanto più essi si nutrono ai livelli trofici inferiori: in altre parole, consumare carne è molto più dispendioso dal punto di vista energetico che consumare fieno. Se ad un vitello vengono date 20 mila kilocalorie di mais, queste si trasformano in 2 mila kcalorie di carne (ricorda la legge del 10% nelle conversioni energetiche) che bastano ad alimentare una sola persona per un giorno. Se, invece, le 20 mila kilocalorie di mais vengono mangiate direttamente dall'uomo (la polenta è pure buona!), questa biomassa alimenta 10 persone per un giorno. Infine, una terza implicazione delle piramidi ecologiche è che la perdita di biomassa da un livello trofico a quello successivo riduce la lunghezza della catena alimentare. In generale, la catena alimentare non ha più di quattro livelli trofici poiché l'ammontare di biomassa al vertice della catena alimentare non è sufficiente a sostenere un ulteriore livello.

In Economia usiamo il concetto di produttività per misurare la capacità produttiva del fattore lavoro o di un settore industriale, o il prodotto interno lordo (PIL) di un intero sistema economico. Allo stesso modo è misurata la

produttività di un ecosistema. La misura più comune è la kilocaloria di biomassa prodotta in un anno, per metro quadro di superficie ($\text{kcal/m}^2/\text{anno}$). In un ecosistema la produttività è il saggio di conversione dell'energia solare in energia potenziale della biomassa. Il saggio totale d'energia assimilata da parte degli organismi produttori è detto produttività primaria lorda (*PPL*). Il *PPL* è ridotto dai consumi respiratori degli organismi produttori, che gli ecologi chiamano "respirazione cellulare" (*R*). Sottraendo al *PPL* la quantità d'energia *R* si ottiene il saggio di produttività primaria netta (*PPN*): $PPN = PPL - R$.

Gli studi sulla produzione di biomassa nei diversi ecosistemi della Terra ci permettono di comprendere l'importanza delle varie aree del globo nei cicli dell'ossigeno e del carbonio, poiché la produttività è direttamente correlata al consumo di ossigeno ed alla produzione di carbonio delle piante. La protezione di queste aree è di vitale importanza per il benessere del nostro pianeta e di noi stessi.

Un sistema economico è basato fondamentalmente su flussi di beni prodotti dal sistema agricolo e da quello industriale e che sono utilizzati dalla popolazione, i consumatori. L'*economia* di un ecosistema è molto simile. Mentre l'energia fluisce in un ecosistema attraverso le conversioni energetiche e riemerge alla fine sotto forma di calore, gli elementi chimici essenziali alla vita circolano ininterrottamente all'interno dell'ecosistema. La materia organica e quella inorganica fluiscono dalle piante (i produttori) verso gli animali (i consumatori), ma in natura questi nutrienti fluiscono in modo circolare cosicché la materia è riciclata e quindi può essere riusata dall'ecosistema. La maggior parte degli elementi viene riciclata sotto forma di sostanze nutritive minerali (ioni minerali). Poiché il ciclo di tali sostanze implica l'attività sia geologica che biologica dell'ecosistema, gli ecologi chiamano questi cicli naturali come *cicli biogeochimici* o *cicli nutrienti*. Alcuni cicli biogeochimici possono essere semplicissimi e terminare dopo pochi stadi. Alcuni cicli possono essere molto complessi

Circa 40 elementi, rispetto ai 92 elementi naturali, sono essenziali alla vita. Sei di questi elementi – carbonio, ossigeno, idrogeno, azoto, fosforo e zolfo – formano il 95 % della massa di tutte le piante, di tutti gli animali e di tutti i micro-organismi. Questi sei elementi sono chiamati *macronutrienti*. I cicli nutrienti, oltre al *ciclo dell'acqua*, sono essenziali alla vita e possono essere alterati dalle attività umane. L'attività umana può violare in modo grave questa legge fondamentale degli ecosistemi quando disperde materia inquinante o quando preleva materia dai cicli naturali.

Il *ciclo del carbonio* è uno tra i più importanti cicli nutrienti, grazie al quale viene riciclato il biossido di carbonio (CO_2) rilasciato da tutti gli organismi viventi. Il ciclo del carbonio è costituito da due fasi. Durante la prima

fase, detta fotosintesi, il biossido di carbonio presente in atmosfera è catturato dalle piante e dalle alghe e convertito in molecole organiche con l'aiuto della luce solare. I prodotti principali della fotosintesi sono l'ossigeno e il glucosio, ossia due nutrienti essenziali degli organismi non-fotosintetici. Nella seconda fase, il processo inverso della fotosintesi, gli organismi non-fotosintetici consumano l'ossigeno e le molecole organiche, rilasciando biossido di carbonio. Pertanto, tutta la vita animale può esistere sulla Terra grazie alle piante, le quali sopravvivono grazie al biossido di carbonio rilasciato dagli animali.

Il carbonio ritorna in atmosfera anche per effetto della decomposizione della catena alimentare: gli organismi decompositori consumano i rifiuti organici delle piante e degli animali, li convertono in tessuti viventi ed energia e liberano biossido di carbonio mediante la respirazione cellulare. Ma il carbonio può ritornare in atmosfera anche mediante la combustione dovuta sia a cause naturali, come ad esempio l'autocombustione dei boschi, sia dovuta all'attività umana.

L'attività umana può interferire nel ciclo del carbonio dell'ecosistema biosfera in due modi principali: distruggendo le foreste e la vegetazione che usano il biossido di carbonio presente in atmosfera per la produzione di molecole organiche, oppure rilasciando enormi quantità di biossido di carbonio durante la combustione di petrolio, di carbone e di gas naturale, cioè di sostanze organiche fossilizzate e depositate nei giacimenti minerari durante le ere geologiche. L'effetto combinato di queste due attività umane fa crescere la concentrazione di biossido di carbonio in atmosfera e provocare un innalzamento della temperatura media della Terra che potrebbe avere effetti devastanti sul clima e sulla vita.

1.4 L'impatto delle attività umane sull'ecosistema

Per illustrare cosa si intende per impatto delle attività umane sull'ecosistema (vedi Figura 1.3), prendiamo ad esempio la produzione di carbone e la sua combustione per produrre energia elettrica. L'impatto di queste due attività (trascuriamo l'impatto dovuto all'attività di trasporto per semplificare l'esempio) si manifesta nella forma d'inquinamento dell'aria, dell'acqua e del suolo. L'inquinamento dell'aria è provocato dalle attività minerarie, in particolare se svolte con miniere a cielo aperto. La combustione del carbone per generare elettricità è causa d'inquinamento, sotto forma di ceneri e di emissioni di particolati, di anidride carbonica, di anidride solforosa e di altri inquinanti. L'inquinamento dell'acqua si può manifestare durante la stessa attività di estrazione (liscivazione del terreno provocato dalle acque piovane) o da reazioni chimiche. L'inquinamento del suolo si manifesta, in particolare con la produzione

di carbone da miniere a cielo aperto, in quanto occorre rimuovere enormi volumi di terreno al fine di mettere a nudo la vena carbonifera. Quest'attività causa sia la distruzione della vegetazione di larghe superfici di territorio e dell'*habitat* per gli animali, sia l'inquinamento delle falde acquifere, ma anche la distruzione del preesistente paesaggio.

Le forme d'inquinamento precedentemente descritte hanno effetti sugli organismi viventi. Per esempio l'anidride solforosa emessa dalla combustio-

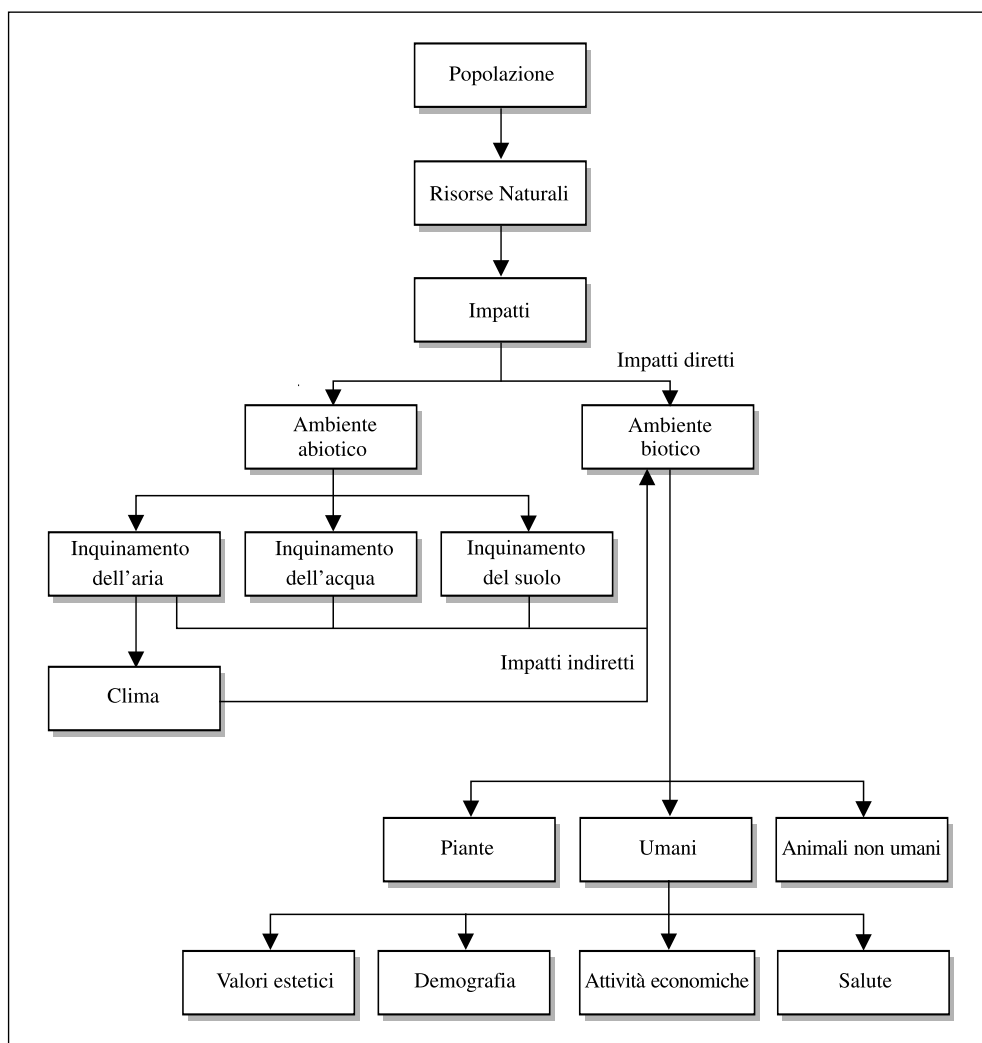


Figura 1.3 Sequenza degli impatti sull'ambiente causati dall'attività umana

ne di carbone negli impianti termoelettrici è trasformata in solfito e solfato in atmosfera; questi acidi sono trasportati dalle correnti d'aria e riversati sulla terra sotto forma di deposizioni acide che distruggono le forme viventi presenti nei laghi e le foreste. L'inquinamento atmosferico si manifesta anche con una maggiore concentrazione di carbonio in atmosfera che può provocare il cosiddetto "effetto serra", in altre parole un aumento significativo della temperatura media della terra che può causare la desertificazione di terre temperate, aumento del livello medio degli oceani, con tutte le conseguenze immaginabili. L'inquinamento delle acque dovuto all'attività mineraria distrugge pesci e piante acquatiche o corrode le strutture metalliche. Questi sono ovviamente alcuni tra i molteplici esempi che possono essere ricordati nello schematizzare gli effetti indiretti dell'impatto delle attività umane. Oltre agli effetti diretti sull'ambiente abiotico ed indiretti su quello biotico, l'attività umana provoca effetti diretti sull'ambiente biotico. L'attività economica può distruggere l'*habitat* degli animali selvatici e causare l'estinzione delle specie alterando il funzionamento degli ecosistemi; come può irrimediabilmente inquinare le falde acquifere più vicine alla superficie, costringendo la captazione a livelli sempre più profondi. L'attività economica può causare grandi spostamenti di popolazioni, come può causare sia lo sviluppo che il declino economico di intere aree legate allo sfruttamento di particolari risorse naturali. Infine un'altra forma d'impatto diretto si manifesta sulla salute degli esseri umani, con costi sia psicologici sia sociali.

1.4.1 Tipologia degli inquinanti

Una semplice e prima classificazione degli inquinanti riguarda la loro capacità di accumularsi nel tempo o nella loro tendenza ad essere dissipati poco dopo essere stati emessi. Quindi, il danno causato all'ambiente da sostanze inquinanti dipende dalla capacità di assimilazione dell'ambiente. Da questa capacità discende un criterio generale di classificazione degli inquinanti tra inquinanti-stock ed inquinanti-fondo. Nel primo caso l'ambiente non possiede (o ha in misura limitatissima) capacità di assimilazione e quindi gli inquinanti si accumulano, come ad esempio le sostanze radioattive, le plastiche non-biodegradabili, i metalli pesanti (come ad esempio il piombo), alcune sostanze chimiche (come ad esempio la diossina). Nel secondo caso l'ambiente possiede capacità d'assimilazione quando il tasso d'inquinamento è inferiore a quello d'assimilazione; pertanto non si ha accumulo. Ad esempio, i batteri presenti in un corso d'acqua ricco d'ossigeno sono in grado di trasformare un inquinante di tipo organico in materia inorganica non dannosa; le piante e gli oceani sono in grado di assorbire il biossido di carbonio emesso in atmosfera. Ciò che distingue un inquinante-stock da un inquinante-fon-

do è che il secondo non viene distrutto ma trasformato in sostanza non dannosa per l'ecosistema.

I residui ed i rifiuti (inquinanti) rilasciati dall'attività umana possono interferire anche gravemente sul funzionamento dei cicli biogeochimici. In generale, l'inquinamento è dovuto alla presenza di materia ed energia la cui natura, localizzazione o quantità causano effetti indesiderati sull'ambiente. L'inquinamento può essere definito in relazione alle sue cause originali che possono essere ricondotte alla natura, e in questo caso si parla d'inquinanti naturali, o all'attività umana, ed in questo caso si parla d'inquinanti antropogenici. Gli inquinanti naturali sono contaminanti che provengono da processi naturali, come ad esempio i gas associati al decadimento di piante o animali o quelli rilasciati in atmosfera dalle eruzioni vulcaniche. Gli inquinanti antropogenici sono provocati dalle attività umane e sono costituiti principalmente dai residui associati ai processi di produzione e consumo, come ad esempio gas e particolati derivanti dalla combustione o rifiuti prodotti da processi di trasformazione industriale. Gli inquinanti antropogenici che non possono essere assimilati dall'ambiente si accumulano negli organismi viventi e si trasferiscono lungo la catena alimentare.

1.4.2 Classificazione delle fonti d'inquinamento

Le fonti d'inquinamento sono molteplici: dalle automobili alle discariche, ai campi agricoli a coltivazione intensiva. Le fonti d'inquinamento possono essere classificate in relazione alla mobilità della sorgente inquinante in *fonti fisse*, come ad esempio una centrale termoelettrica, ed in *fonti mobili*, come ad esempio un'automobile. La sorgente di inquinamento può essere unica e facilmente individuabile, e in questo caso si parla di *fonte individuabile* come ad esempio un collettore che scarica liquami in un fiume; quando la sorgente non è individuabile e degrada l'ambiente in modo indiretto contaminando una vasta area, come ad esempio l'inquinamento dell'Adriatico dovuto all'uso di diserbanti trasportati dalle acque dei fiumi, si parla di *fonte non-individuabile*.

In alcuni casi l'inquinamento può avere effetti circoscritti ad un'area limitata, ad una regione o a tutto il pianeta. Si parla, rispettivamente, d'*inquinamento locale, regionale e globale*. Un esempio d'inquinamento locale, in un'area urbana, è causato dallo *smog* provocato dai fumi rilasciati dai camini o dai veicoli a motore; un altro esempio d'inquinamento locale può essere rappresentato dai rifiuti solidi urbani abbandonati o ammassati in discariche a cielo aperto. Quando il livello d'inquinamento locale supera certe soglie di attenzione, la qualità della vita risulta deteriorata e l'inquinamento può causare gravi malattie.

L'inquinamento regionale si estende ben oltre la localizzazione della fonte d'inquinamento. Un esempio di inquinamento regionale è rappresentato dalle *deposizioni acide*, cioè di composti acidi che si miscelano in atmosfera con altre particelle e cadono sulla terra come polveri oppure miscelate con nebbia, neve o pioggia (da cui il detto piogge acide). Questi composti sono prodotti da reazioni chimiche con diossidi di zolfo o ossidi di azoto che sono entrambi rilasciati durante la combustione di combustibili fossili (carbone, petrolio, gas). Le deposizioni acide sono inquinanti regionali in quanto i venti trasportano tali composti verso aree relativamente distanti dalla sorgente di emissione. Le deposizioni acide sono particolarmente pericolose in quanto causano malattie polmonari, l'acidificazione dei fiumi e dei laghi con la perdita della vita acquatica, la distruzione delle piante e delle foreste, l'erosione delle costruzioni e in particolare dei monumenti storici pervenuti intatti dopo centinaia di anni o di millenni.

L'inquinamento globale coinvolge tutta la biosfera. Un esempio è il problema del *riscaldamento globale* o *effetto serra*, noto anche come *global warming*. La luce solare irradia la Terra passando attraverso l'atmosfera ed è riflessa dalla Terra, dove è parzialmente assorbita dai cosiddetti "gas serra" (si tratta di sei gas la cui immissione nell'atmosfera risulta di provato effetto riscaldante: biossido di carbonio, metano, ossido di azoto, idrofluorocarburi, perfluorocarburi ed esafluoruro di zolfo). Grazie a questo fenomeno naturale la temperatura media della Terra è di circa 20 °C, altrimenti la stessa temperatura sarebbe almeno di -20 °C. Pertanto, l'effetto serra è un processo favorevole alla vita. Tuttavia, alcune attività umane possono contribuire ad aumentare la quantità di gas-serra presenti in atmosfera fino a causare l'innalzamento della stessa temperatura naturale. Conseguentemente, l'effetto-serra causato dalle attività umane, anche concentrate in una sola regione della Terra, potrebbe alterare irrimediabilmente le condizioni climatiche, i livelli degli oceani, la produttività delle regioni agricole di tutto il globo.

Un altro esempio d'inquinamento globale è rappresentato dalla diminuzione dello *strato di ozono* causata dal rilascio di particolari inquinanti. Lo strato dell'ozono protegge la Terra dalle pericolose radiazioni ultraviolette, le quali possono indebolire il sistema immunitario dell'uomo o accrescere i rischi di cancro della pelle, o possono arrecare danni agli ecosistemi. Nel 1985 fu scoperto che sull'Antartide si era aperto un "buco" nello strato di ozono esteso quanto il Nord America. Si ritiene che la diminuzione dello strato di ozono sia principalmente causata da composti chimici detti clorofluorocarburi (CFC). Questi prodotti sono stati impiegati nelle macchine frigorifere, negli apparecchi di condizionamento dell'aria, o come propellente negli aerosol.

1.5 La visione circolare del sistema economico

Le argomentazioni svolte precedentemente hanno messo in luce importanti implicazioni che scaturiscono dall'interazione tra ambiente e sistema economico. La visione lineare del funzionamento del sistema economico dovrebbe essere sostituita da una visione di tipo "circolare", in armonia con il processo di funzionamento degli ecosistemi. L'attività economica produce beni dal cui consumo si ottengono servizi che fruttano "utilità". I beni materiali sono ottenuti trasformando (o riciclando) risorse naturali prelevate dall'ambiente. In questo modo l'ambiente svolge la funzione di fornitore di risorse che servono come input all'attività economica. Le risorse naturali possono essere *rinnovabili* (*RR*) o *non rinnovabili* (*RNR*). Queste ultime, a loro volta, possono essere *riciclabili*, come i minerali, o *non riciclabili*, come le fonti fossili d'energia. Il territorio è una risorsa particolare in quanto in parte rinnovabile e in parte non rinnovabile. Le risorse esauribili sono come una donazione derivante da un'eredità che è stata accumulata dalla natura nel corso delle ere geologiche e la cui disponibilità è, per definizione, limitata. Le risorse esauribili non possono essere riprodotte nell'ambito della dimensione temporale dell'attività umana

Le risorse rinnovabili possiedono una capacità biologica di riproduzione (Figura 1.4) la quale risulta compromessa quando il tasso di utilizzo (u) della risorsa stessa supera quello di crescita o di capacità rigenerativa (p). Quando ciò si manifesta con sistematica continuità, la risorsa naturale tende all'estinzione o all'esaurimento.

Quest'argomentazione è rappresentata nei successivi grafici (Pierce e Turner, 1991), nei quali il segno "+" rappresenta un effetto di retroazione positivo (cioè incrementale) sullo stock di risorse, mentre quello "-" rappresenta un effetto di retroazione negativo (cioè decrementale). L'effetto netto positivo si ha quando il tasso di utilizzo è inferiore a quello di rigenerazione (cioè quando $u < p$); nel caso contrario, quando il tasso di utilizzo è superiore a

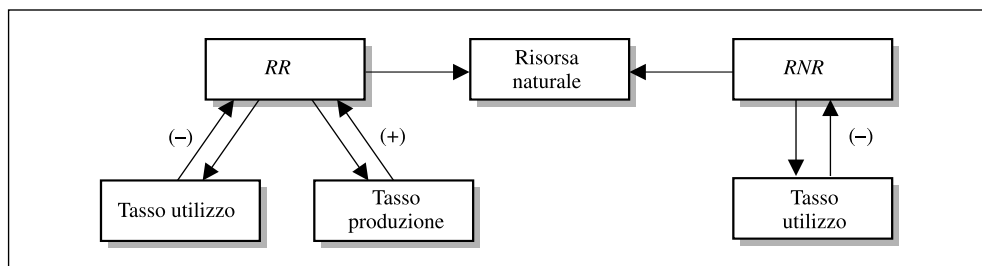


Figura 1.4 Effetti positivi e negativi di retroazione

quello di rigenerazione ($u > p$), si ha un effetto netto negativo. Si ricordi che il tasso di rigenerazione è nullo ($p = 0$) nel caso delle risorse non rinnovabili e quindi l'effetto netto è sempre negativo.

Durante l'acquisizione di risorse naturali, la produzione di beni (ossia di trasformazione delle risorse naturali) e il consumo dei beni stessi vengono generati prodotti di rifiuto (che indichiamo rispettivamente con R_n , R_p ed R_c) che sono rilasciati nei corpi recettori dell'ambiente (aria, acqua, suolo). Il flusso di tali prodotti si accumula ai rifiuti generati naturalmente dall'ecosistema nell'ambito del processo biologico. Graficamente possiamo schematizzare la precedente argomentazione con il grafico di Figura 1.5.

La differenza sostanziale tra i rifiuti naturali e quelli provocati dall'attività economica consiste essenzialmente nel fatto che l'ecosistema svolge, come abbiamo precedentemente schematizzato, anche una parallela attività di assimilazione dei propri rifiuti. Al contrario, l'attività economica può svolgere una parziale attività di riciclaggio di quei rifiuti aventi valore economico (rottami, vetro, carta ecc.) e un'attività di abbattimento di specifici inquinanti, quando le normative ambientali espressamente lo impongono. Pertanto, i corpi recettori dell'ambiente devono sobbarcarsi un ulteriore lavoro per provvedere anche all'assimilazione dei rifiuti delle attività economiche. Quando il rilascio di inquinanti ed i rifiuti delle attività economiche superano la capacità naturale di ripristino dell'equilibrio dinamico di un particolare ecosistema, si può manifestare un progressivo degrado ambientale.

La relazione tra la quantità di risorse naturali sottratte all'ecosistema in un dato periodo è esattamente uguale alla somma dei rifiuti scaricati nell'ambiente, in altre parole $N = R_n + R_p + R_c$. Questa equivalenza è stabilita dalla prima legge della termodinamica. Boulding (1966) ha messo in evidenza il ruolo della termodinamica descrivendo l'economia della Terra con la metafora di una navicella spaziale. Come gli Argonauti della mitologia greca and-

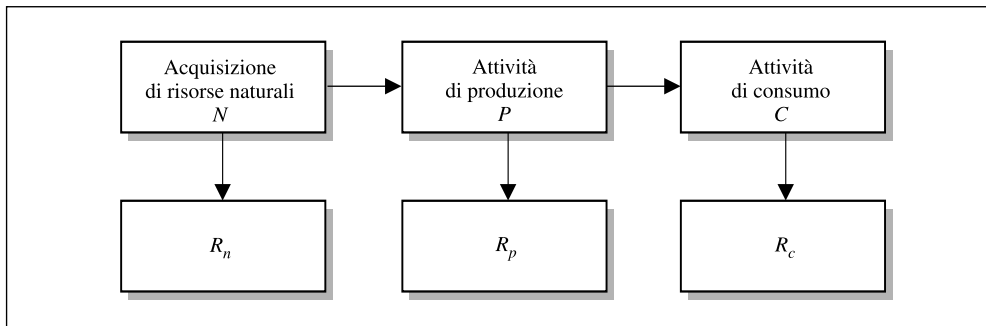


Figura 1.5 Produzione di rifiuti nell'ambito dell'attività economica

vano alla ricerca del vello d'oro con la loro fragile imbarcazione, così gli abitanti della Terra sono immaginati in un'odissea nello spazio a bordo di una navicella carica di acqua, cibo e tecnologie. La sola energia utilizzabile, per aumentare il carico utile per la sopravvivenza, è rappresentata dall'energia solare che può essere sempre captata dalla tecnologia di bordo. Purtroppo lo stock di risorse alimentari si riduce progressivamente durante il viaggio spaziale fino al loro esaurimento se la tecnologia di bordo non è in grado di riciclare i rifiuti e riottenere in continuazione cibo ed acqua. La bella metafora della Terra vista come un'astronave isolata nello spazio c'impone di pensare l'economia del sistema economico Terra come un sistema economico chiuso, nel senso che le parti del sistema non sono tra loro in relazione lineare (Risorse-Produzione-Consumo) con il fine ultimo di creare utilità ma sono in relazione circolare: ogni parte del sistema è in relazione diretta e mediata con altre parti. Conseguentemente non è possibile affermare che il fine ultimo di un sistema economico è quello di creare utilità, perché le leggi della termodinamica pongono vincoli alle azioni che si possono intraprendere per ottenere quell'utilità.

L'attività di riciclaggio non può riguardare tutti i rifiuti prodotti dall'attività economica ma solo una parte, più o meno consistente. Non tutto è riciclabile per effetto della seconda legge della termodinamica: l'entropia pone un limite all'opportunità economica e, a volte, alla possibilità "fisica" di recuperare e riciclare. Il limite imposto dall'entropia implica che dobbiamo considerare il sistema economico come un sistema "chiuso", cioè un sistema circolare come un qualsiasi ecosistema. Per rappresentare la circolarità del sistema economico, riprendiamo gli schemi grafici precedenti e includiamo le attività di riciclaggio, svolte dalle attività economiche, e quelle di assimilazione dei rifiuti, svolte in via residuale dall'ecosistema (Figura 1.6). I rifiuti prodotti che durante le fasi di acquisizione di risorse naturali, di produzione e di consumo dei beni in parte possono essere raccolti e riciclati rappresentano una sorta d'offerta (r) supplementare di risorse naturali (come il risparmio energetico rappresenta un'offerta d'energia). Il flusso restante (RR), che non è fisicamente possibile oppure economicamente interessante riciclare, è irrimediabilmente rilasciata nei corpi recettori dell'ambiente (A). L'ambiente, come detto precedentemente, possiede una capacità biologica di accogliere i rifiuti e di assimilarli, cioè di degradarli in sostanze non più inquinanti. Se la qualità e il flusso quantitativo dei rifiuti residuali risultano compatibili con il tasso di assimilazione (a), cioè se $RR < a$, allora s'innescia una retroazione positiva nel senso che il sistema economico circolare funziona come un ecosistema, sebbene continui a manifestarsi il depauperamento dello stock di risorse non rinnovabili. Se i rifiuti rilasciati pregiudicano tale capacità di assimilazione, cioè se $RR > a$,

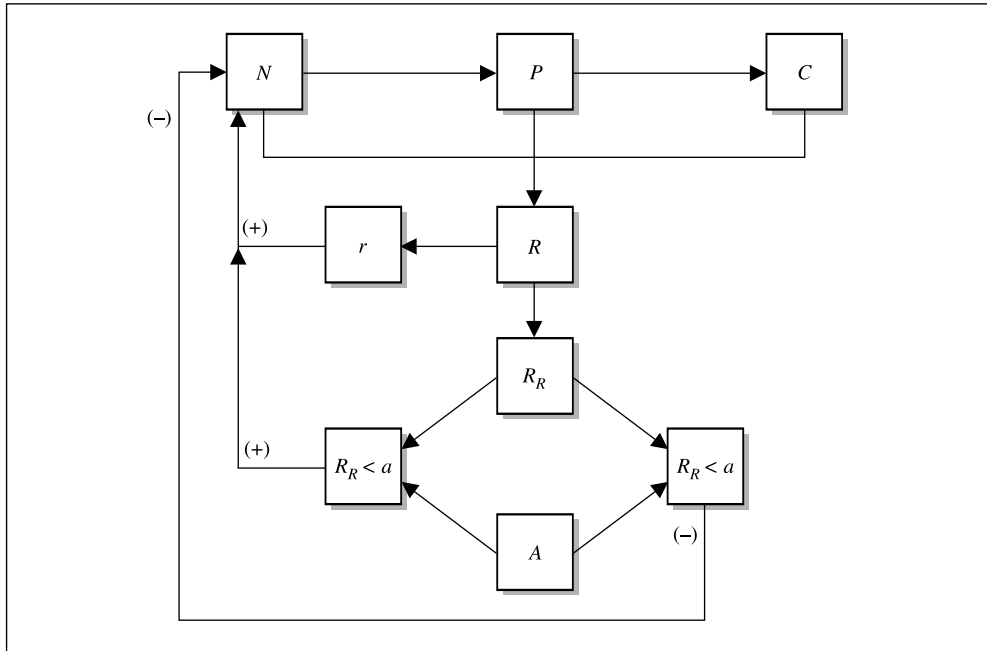


Figura 1.6 Riciclaggio e assimilazione dei rifiuti

allora si manifesta anche il depauperamento della capacità di assimilazione e quindi viene meno la funzione economica dell'ambiente di restituire i rifiuti assimilati sotto forma di risorsa rinnovabile.

Per rappresentare, infine, la terza funzione economica dell'ambiente ovvero la funzione estetica, possiamo collegare l'utilità derivante dal consumo dei beni a quella derivante dal godimento dei beni naturali visti come beni estetici (Figura 1.7). Il capitale naturale non è costituito solamente da beni che possono essere trasformati in prodotti di consumo e offrire quindi un "servizio", come ad esempio il gas naturale che opportunamente bruciato offre il servizio di riscaldamento di una casa. Il capitale naturale è costituito anche dai ghiacciai eterni dell'Antartide che possono essere compromessi dal surriscaldamento provocato dall'effetto-serra, dalle balene, dalle spiagge coralline, dalla biodiversità genetica della foresta amazzonica oppure anche semplicemente dal profilo meramente paesaggistico delle Dolomiti, o dai monumenti millenari egizi, greci o romani che andrebbero distrutti dalle deposizioni acide. Questo capitale naturale costituisce un bene in sé e per sé per il solo fatto di esistere, anche se personalmente non si potrà mai avere l'opportunità di visitare l'Antartide, la barriera corallina australiana, il Gran Canyon o il Pantheon. La distruzione del capitale naturale, in via diretta o anche indiretta per effetto

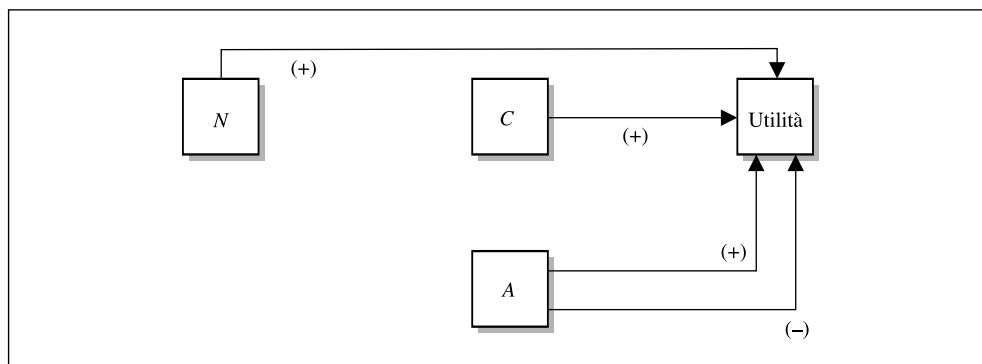


Figura 1.7 Le determinanti dell'utilità

dell'inquinamento, riduce l'utilità mentre la sua preservazione ne mantiene invariata l'utilità nel tempo, anche per le generazioni future.

In Figura 1.7 l'utilità è determinata non solo dall'utilizzo del capitale naturale, N , e dal consumo dei beni prodotti dal sistema economico, C , ma anche dall'effetto attribuibile all'attività di assimilazione svolta dall'ambiente, A .

In letteratura sono state sviluppate metodologie che cercano di approssimare una così complessa schematizzazione del sistema economico circolare: il modello di bilancio dei materiali (Ayres e Kneese, 1969) ed il modello input-output ambientale (Leontief, 1970). Il primo modello integra i flussi fisici di massa in un modello economico di equilibrio generale mentre il secondo rappresenta una versione semplificata del modello di equilibrio generale. Nel paragrafo successivo modelliamo l'interdipendenza tra il sistema ambientale ed il sistema economico secondo la metodologia proposta dal premio Nobel W. Leontief. Nel prossimo capitolo rivisitiamo il modello del flusso circolare del sistema economico al fine di costruire le basi teoriche del modello economico interdipendente con il sistema ambientale. La teoria dell'equilibrio economico generale fornisce l'approccio analitico più coerente per studiare l'interdipendenza tra un sistema economico ed il sistema ambientale.

1.6 Modelli input-output d'impatto ambientale

1.6.1 Le basi analitiche dell'analisi input-output ambientale

L'analisi input-output, secondo le parole di W. Leontief (1970, pag. 262), "descrive e spiega il livello di produzione di ogni settore dell'economia di un dato paese in relazione ai corrispondenti livelli di attività di tutti gli altri settori". L'interdipendenza tecnica fra i livelli di produzione può essere de-

scritta in termini di coefficienti strutturali. L'analisi input-output è un insieme di schemi contabili e di modelli atti a valutare gli effetti di variazioni di quantità e/o di prezzo che hanno avuto origine in un settore e che si sono trasmessi ad altri settori. L'analisi input-output è tuttora uno strumento teorico di gran rilevanza applicativa e il suo schema contabile è divenuto parte integrante del corpo d'informazioni necessarie per costruire i (più sofisticati) modelli applicati di equilibrio economico generale. Gli Istituti Centrali di Statistica provvedono a compilare e diffondere le tabelle input-output, anche note come "tavole delle interdipendenze settoriali".

Lo schema contabile alla base del modello input-output è costituito da quattro tabelle (o quadranti) che rilevano i flussi di risorse primarie, di beni e di servizi impiegati nelle diverse produzioni o utilizzati per soddisfare la domanda finale. Il sistema produttivo è suddiviso in un certo numero (ad esempio n) di settori e, in relazione alla quantità e qualità delle osservazioni statistiche disponibili, ciascun settore può rappresentare o beni prodotti oppure unità produttive. Senza qui entrare nel merito dei problemi di aggregazione dei dati statistici di base (si veda per i dettagli Miller e Blair, 1985, cap. 5), passiamo ad esaminare per sommi capi lo schema contabile input-output.

In Figura 1.8 sono rappresentati i quattro quadranti. Il quadrante IV è vuoto in quanto lo schema contabile input-output non considera i flussi riguardanti la distribuzione secondaria del reddito (valore aggiunto) generato dalle attività produttive tra i vari agenti del sistema economico (imprese, famiglie, stato, resto del mondo). Uno schema contabile così articolato prende il nome di "matrice di contabilità sociale" (Pyatt e Round, 1985). Nello schema input-output tradizionale, dunque, i quadranti rilevanti sono tre: il quadrante dei flussi intersettoriali (I), ovvero i flussi di beni e servizi prodotti da

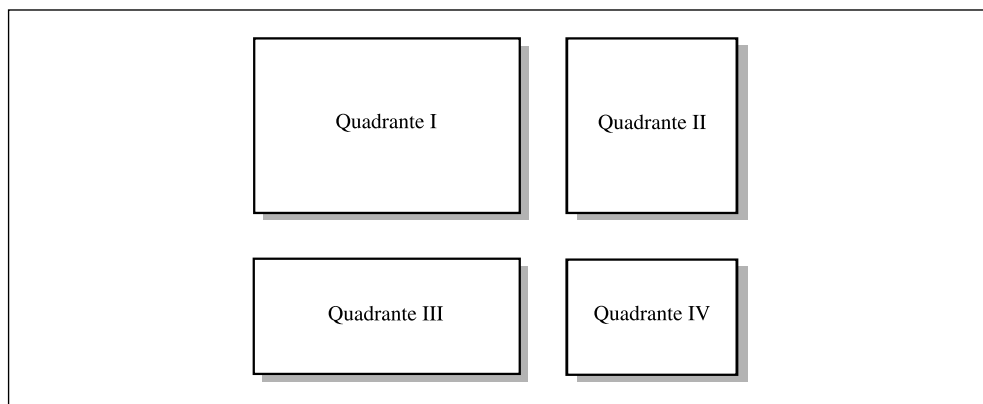


Figura 1.8 Lo schema contabile del modello input-output

un settore e acquistati da altri settori come input intermedi; il quadrante dei flussi degli utilizzatori finali (II), ovvero i consumi delle famiglie, i consumi collettivi, gli investimenti pubblici e privati e le esportazioni; il quadrante del valore aggiunto prodotto da ogni settore economico e la sua distribuzione ai fattori primari (III) impiegati nella produzione, ovvero al fattore lavoro e al capitale strumentale e finanziario. Nell'ambito di questo quadrante sono contabilizzati anche le importazioni e le imposte indirette sulla produzione. I flussi dei quadranti possono essere espressi in quantità oppure in valore monetario. Quando i flussi sono espressi in quantità la somma per colonne non può essere effettuata; quando i flussi sono espressi in valore monetario la somma complessiva per riga coincide con quella per colonna, per ogni n -esimo settore. La somma totale del quadrante III è detta prodotto interno lordo e coincide con la somma totale del II quadrante, la quale contabilizza invece la destinazione del reddito nazionale (consumi, investimenti, esportazioni).

Il passaggio dal semplice schema contabile al modello (lineare) input-output richiede l'adozione di alcune ipotesi fondamentali. Procediamo per fasi successive iniziando a rappresentare algebricamente il legame tra i quadranti sopra detti. Si supponga che lo schema input-output sia costituito da n righe ($i = 1, 2, \dots, n$) e da n colonne ($j = 1, 2, \dots, n$), cioè da n settori. Si indichi con X_i la produzione del settore i -esimo. Si indichi con $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in}$, le quantità fisiche cedute dall' i -esimo settore ai settori $1, 2, \dots, j, \dots, n$. Si chiami p_i il rispettivo prezzo. Siccome n sono le righe e le colonne dei settori produttivi nel quadrante I, il prodotto tra x_{ij} e p_j rappresenta il valore monetario della transazione tra il settore i -esimo ed il settore j -esimo. Si indichi con y_i la quantità fisica ceduta dal settore i -esimo alla domanda finale. In questo caso, per semplificare l'esposizione, la domanda finale non è suddivisa tra le sue componenti (consumo, investimenti ecc.). Il primo ed il secondo quadrante possono essere rappresentati algebricamente con il seguente sistema di equazioni, detto "sistema delle quantità":

$$\begin{aligned} X_1 p_1 &= x_{11} p_1 + x_{12} p_1 + x_{13} p_1 + \dots + x_{1j} p_1 + \dots + x_{1n} p_1 + y_1 p_1 \\ &\vdots \\ X_n p_n &= x_{n1} p_n + x_{n2} p_n + x_{n3} p_n + \dots + x_{nj} p_n + \dots + x_{nn} p_n + y_n p_n \end{aligned}$$

Ciascuna uguaglianza del sistema si semplifica subito mediante divisione per il prezzo corrispondente che è lo stesso per tutti i termini:

$$\begin{aligned} X_1 &= x_{11} + x_{12} + x_{13} + \dots + x_{1j} + \dots + x_{1n} + y_1 \\ &\vdots \\ X_n &= x_{n1} + x_{n2} + x_{n3} + \dots + x_{nj} + \dots + x_{nn} + y_n \end{aligned}$$

Ora conviene definire il seguente quoziente come il rapporto tra la quantità di provenienza i -esima impiegata dal settore j -esimo e la quantità prodotta dal settore j -esimo:

$$0 \leq a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j} < 1$$

Questo quoziente non è altro che il cosiddetto coefficiente (medio) di produzione. Per l'economista, le grandezze a_{ij} sono date dalle tecniche di produzione, mentre le grandezze p_i e X_j appartengono alla sfera delle decisioni economiche. Nell'ambito del modello input-output sono adottate le seguenti ipotesi fondamentali.

Prima ipotesi. I flussi intersettoriali dal settore i -esimo al settore j -esimo dipendono interamente ed esclusivamente dal totale dell'output del settore j -esimo:

$$x_{ij} = a_{ij} X_j$$

Il coefficiente tecnico misura una relazione fissa tra output di un settore ed input da altri settori. Le economie di scala sono ignorate in quanto si suppone che il sistema produttivo operi in condizioni di rendimenti costanti nella scala della produzione. In altre parole, se il settore j -esimo vuole triplicare l'output deve triplicare anche l'impiego degli input.

Seconda ipotesi. Gli input vengono impiegati dal settore j -esimo in proporzioni fisse. In altre parole, al variare dell'output, la proporzione tra due input non varia.

Queste due ipotesi derivano dal particolare tipo di funzione di produzione adottato nell'analisi input-output: la funzione leonteviana. Questa funzione non ammette possibilità di sostituzione tra gli input ma solamente complementarietà. In altre parole, dosi maggiori di un solo input rispetto al suo minimo ottimale (dato dal coefficiente tecnico) sono inutili. Se si vuol aumentare il livello di produzione occorre, invece, aumentare contemporaneamente la dose di tutti gli input. Si ricorda che la funzione di produzione leonteviana è diagrammata (Figura 1.9) con un isoquanto ad angolo retto, e convesso verso l'origine degli assi perché si suppone valida la legge della produttività marginale decrescente.

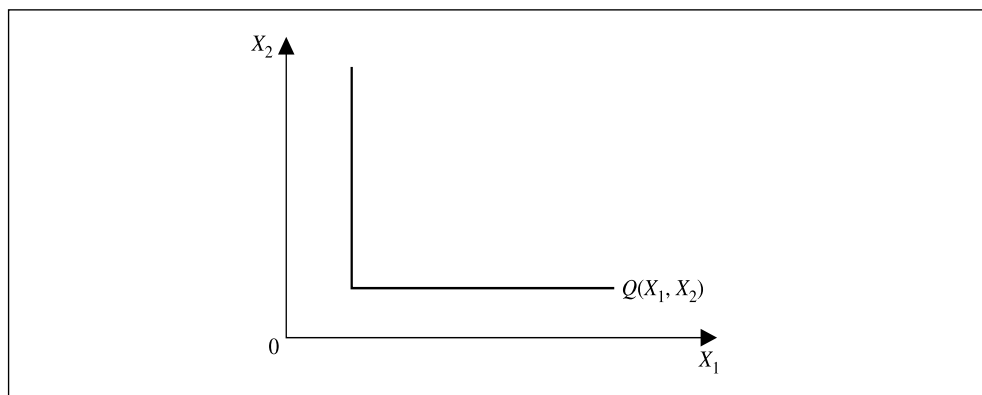


Figura 1.9 Isoquanto della funzione di produzione leonteviana

Il sistema delle quantità può essere riscritto inserendo opportunamente i coefficienti tecnici:

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 + \dots + a_{1j}X_j + \dots + a_{1n}X_n + y_1 \\ \vdots & & & & & & \vdots \\ X_n &= a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + a_{n3}X_3 + \dots + a_{nj}X_j + \dots + a_{nn}X_n + y_n \end{aligned}$$

o nel seguente modo con la notazione matriciale:

$$x = Ax + y$$

dove x rappresenta il vettore dell'output settoriale, A la matrice dei coefficienti tecnici e y il vettore della domanda finale. Poiché si suppone che la matrice A sia data, il sistema può essere risolto nell'incognita x se il vettore y della domanda finale è considerato esogeno. La soluzione è:

$$x = (I - A)^{-1} y$$

dove I è la matrice identità e la matrice $(I - A)^{-1}$ è detta (matrice) inversa di Leontief: ogni suo elemento indica l'ammontare di produzione totale x che i settori devono produrre affinché la stessa merce sia disponibile nelle quantità y richieste dalla domanda finale. Questa matrice evidenzia la dipendenza di ciascuna produzione settoriale da tutti i componenti della domanda finale. Per ogni possibile combinazione di consumi, investimenti ed esportazioni, possiamo immediatamente calcolare, grazie alla matrice inversa, le quantità totali che ciascun settore deve produrre. Ovviamente queste quantità totali

sono in parte riutilizzate dal sistema produttivo ed in parte destinate alla domanda finale, per cui $x \geq y$.

Affinché il sistema ammetta soluzione economicamente significativa, occorre che la matrice $(I - A)$ goda di alcune proprietà (per la dimostrazione matematica di tali proprietà si rinvia a Pasinetti, 1975): la matrice deve essere non-singolare, e quindi ammettere inversa, e la matrice inversa deve essere non-negativa. Condizione necessaria e sufficiente perché ciò si verifichi è che, per ogni settore, sia possibile produrre output netti positivi, cioè l'output deve essere superiore all'input complessivo. Una tale matrice di coefficienti di input che garantisce questa condizione è detta matrice "produttiva". I valori del vettore dell'output settoriale possono essere interpretati in un duplice modo, in relazione ad una duplice possibilità d'applicazione del modello input-output.

La soluzione $x = (I - A)^{-1}y$ fornisce i livelli delle produzioni settoriali affinché livelli ipotizzati della domanda finale possano essere soddisfatti. Ma la soluzione precedente può anche essere riscritta nel seguente modo:

$$\Delta x = (I - A)^{-1} \Delta y$$

Secondo questa rappresentazione, il modello input-output fornisce la previsione della variazione delle produzioni settoriali rispetto a variazioni ipotizzate nella domanda finale. Da questo punto di vista, il modello può essere visto come una disaggregazione del modello keynesiano, nel quale il livello della produzione è determinato dal livello della domanda aggregata, fino al limite della capacità produttiva del sistema economico.

Precedentemente abbiamo anticipato una prima interpretazione economica della matrice inversa di Leontief. Il suo significato economico appare più comprensibile se paragonato al significato economico della matrice dei coefficienti tecnici A . Ciascun elemento della matrice A rappresenta la quantità fisica di merce i -esima richiesta dal settore j -esimo per la produzione di un'unità fisica di merce j -esima. Ciascun elemento rappresenta, quindi, fabbisogni diretti di merci per la produzione di merci da destinare agli impieghi intermedi. Al contrario, ciascun elemento della matrice inversa, anche noto come moltiplicatore leonteviano, rappresenta la quantità fisica di merce i -esima che occorre produrre per l'intero sistema economico per ottenere una unità fisica di merce j -esima da consegnare alla domanda finale. Ciascun elemento rappresenta, in questo secondo caso, il fabbisogno totale (detto anche fabbisogno diretto e indiretto) di merci per la produzione di merci da destinare alla domanda finale. Tale definizione è in contrapposizione a quella di moltiplicatore keynesiano, la quale spiega le variazioni nel reddito in funzione delle variazioni nella domanda autonoma.

Ora siamo in grado di esaminare alcune tra le possibili estensioni del modello input-output tradizionale all'analisi ambientale, sulla base di alcuni esempi tratti da Miller e Blair (1985, cap. 7). In particolare consideriamo i seguenti modelli: il modello d'impatto dell'inquinamento, il modello con merci "ecologiche", ed infine il modello con generazione d'inquinamento e con attività di disinquinamento.

1.6.2 Modello d'impatto dell'inquinamento.

Il modello d'impatto dell'inquinamento, riconducibile alla famiglia dei modelli input-output energetici, associa una particolare "matrice delle emissioni inquinanti" al modello leonteviano tradizionale. Ciascuna riga della matrice delle emissioni inquinanti rappresenta le emissioni di inquinante di tipo k -esimo per unità di produzione di un generico settore n -esimo. Per quanto riguarda le emissioni provocate dalla combustione di fonti fossili (monossido di carbonio CO, ossidi di azoto NO_x, ossidi di zolfo SO_x, particolati, composti organici volatili COV), la matrice delle emissioni si ottiene trasformando opportunamente le informazioni desunte dai bilanci energetici in bilanci delle emissioni inquinanti. Informazioni riguardanti altre tipologie d'inquinamento legate alle attività di produzione e consumo sono rese disponibili dagli istituti statistici nazionali.

Indichiamo con E questa matrice (di dimensione k, n) delle emissioni inquinanti e dividiamo ciascuna colonna per l'output settoriale x : otteniamo quindi una nuova matrice E che rappresenta la quantità di inquinante di tipo k -esimo per unità di output settoriale $E = E \hat{x}^{-1}$, dove \hat{x}^{-1} indica l'inversa del vettore diagonalizzato dell'output settoriale. Il prodotto tra la matrice delle emissioni per unità di output per il vettore dell'output settoriale fornisce il vettore delle emissioni totali di inquinante di tipo k -esimo:

$$\varepsilon = E x$$

Se sostituiamo al simbolo x la relazione analitica che lo determina e indicata nel paragrafo precedente, possiamo esprimere il vettore delle emissioni totali in funzione del vettore (esogeno) della domanda finale:

$$\varepsilon = E(I - A)^{-1} y$$

Il prodotto tra la matrice E e la matrice inversa $(I - A)^{-1}$ dà una nuova matrice, i cui singoli elementi rappresentano i valori settoriali del moltiplicatore leonteviano dell'ambiente: in altre parole, ciascun elemento rappresenta l'impatto

dell'inquinamento totale di tipo k -esimo generato da una unità di domanda finale settoriale.

Esercizio svolto 1.1 Determinazione dell'impatto ambientale settoriale

Si applichi lo schema analitico ad un semplice esempio numerico per valutare l'ammontare complessivo delle emissioni di diossidi di zolfo SO_x e di composti organici volatili COV in funzione della domanda finale, note la matrice dei coefficienti tecnici, la matrice inversa, la matrice delle emissioni unitarie e il vettore della domanda finale.

Matrice dei coefficienti A			Matrice inversa $(I - A)^{-1}$		
	Settore 1	Settore 2		Settore 1	Settore 2
Settore 1	0,3	0,2	Settore 1	1,58	1,05
Settore 2	0,1	0,7	Settore 2	0,53	3,68

Matrice unitaria delle emissioni inquinanti E			Vettore output x	
	Settore 1	Settore 2		
SO_x	0,5	1,1	Settore 1	10
COV	0,7	0,7	Settore 2	10

Vettore delle emissioni totali		Vettore domanda finale y	
SO_x	15,811	Settore 1	5
COV	14,007	Settore 2	2

Matrice dei moltiplicatori leonteviani dell'ambiente			
	Settore 1	Settore 2	
SO_x	1,373	4,473	
COV	1,477	3,311	

Si ripeta l'esercizio modificando a piacere i dati del vettore della domanda finale.

Infine, in base al significato economico di ciascun moltiplicatore leonteviano dell'ambiente, si individui l'importanza di ciascun settore nel determinare l'impatto ambientale.

1.6.3 Modello con merci ecologiche

Con il modello precedente abbiamo definito gli impatti diretti e indiretti delle emissioni inquinanti come fattori associati alle interdipendenze intersettoriali. Con il modello ecologico possiamo generalizzare la metodologia sviluppata nella sezione precedente al fine di:

- distinguere gli input ambientali (come ad esempio acqua, terra, aria) necessari al processo produttivo dagli output ambientali (ad esempio le emissioni inquinanti) generati dal processo produttivo;
- esprimere input e output ambientali in funzione della domanda finale.

Al riguardo, definiamo una matrice di input ecologico $M = [m_{kj}]$ che rappresenta la quantità assoluta di input ecologico di tipo k -esimo impiegata nella produzione del bene j -esimo. Allo stesso modo definiamo una matrice di output ecologico $N = [n_{js}]$ che rappresenta la quantità assoluta di output ecologico di tipo s -esimo provocata dall'utilizzo del bene j -esimo. Con le matrici $R = [r_{js}]$ e $Q = [q_{js}]$ rappresentiamo le quantità relative di bene ecologico necessarie, rispettivamente, per produrre o per impiegare un'unità di output, essendo:

$$r_{kj} = \frac{m_{kj}}{x_j} \quad q_{js} = \frac{n_{js}}{x_j}$$

I coefficienti d'impatto totale sono ottenuti dal prodotto matriciale tra la matrice R e il vettore dell'output settoriale x per gli input ecologici, e dal prodotto matriciale tra la matrice Q ed il vettore dell'output settoriale x per gli output ecologici.

Se il vettore dell'output x è sostituito dalla relazione leonteviana $x = (I - A)^{-1}y$, i vettori dei coefficienti totali di input e output ecologici possono essere espressi in funzione della domanda finale. Il significato economico dei moltiplicatori leonteviani dell'ambiente, precedentemente chiarito, vale ovviamente anche per questa classe di modelli.

Il prodotto matriciale tra la matrice R e la matrice inversa fornisce una matrice i cui elementi rappresentano la quantità di bene ecologico di tipo k -esimo impiegato in via diretta e indiretta per produrre una unità di bene j -esimo da destinare alla domanda finale. Mentre il prodotto matriciale tra la matrice Q e la matrice inversa fornisce una matrice i cui elementi rappresentano la quantità di bene ecologico di tipo s -esimo ottenuta in via diretta e indiretta conseguente alla consegna di una unità di bene j -esimo alla domanda finale.

1.6.4 Modello con generazione d'inquinamento e attività di disinquinamento

Quest'estensione del modello input-output all'ambiente è stata proposta da Leontief (1970). Lo schema input-output tradizionale è stato esteso da Leontief allo scopo di inglobare esplicitamente nella tradizionale matrice dei coefficienti tecnici i coefficienti di generazione e di abbattimento d'inquinanti. Consideriamo una versione semplificata tratta da Miller e Blair (1985). Ipotizziamo un'economia composta da due soli settori produttivi che descriviamo con il sistema delle quantità nel consueto modo:

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + y_1 \\ X_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + y_2 \end{aligned}$$

Ora immaginiamo che si abbia un unico tipo d'inquinamento generato solamente dall'attività di produzione; per quanto riguarda l'attività di consumo s'ipotizza, per semplicità, che essa non generi alcun inquinamento. Il vettore $z = [z_{pi}]$ definisce le quantità d'inquinamento emesse da ciascun settore.

I coefficienti settoriali d'inquinamento sono definiti nel seguente modo:

$$a_{p1} = \frac{z_{p1}}{X_1} \quad a_{p2} = \frac{z_{p2}}{X_2}$$

L'inquinamento complessivo generato dai due settori produttivi risulta:

$$X_p = a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2$$

Il sistema delle quantità diventa:

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + y_1 \\ X_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + y_2 \\ X_p &= a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + 0 \end{aligned}$$

Il terzo elemento del vettore della domanda finale, associato alla domanda d'inquinamento, è nullo per l'ipotesi precedentemente fatta circa l'assenza d'inquinamento da parte dell'attività di consumo. Questo sistema può essere risolto nel vettore delle incognite x , se consideriamo esogeno il vettore della domanda finale. Utilizzando la simbologia matriciale si ottiene il sistema:

$$\begin{bmatrix} (1-a_{11}) & -a_{12} & 0 \\ -a_{21} & (1-a_{22}) & 0 \\ -a_{p1} & -a_{p2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La soluzione del sistema nelle incognite del vettore x comporta il calcolo della matrice inversa di Leontief, la quale contiene sia i tradizionali moltiplicatori leonteviani (le prime due righe e colonne della matrice) della produzione sia i moltiplicatori leonteviani dell'inquinamento (terza riga e terza colonna).

Indichiamo con $A = [\alpha_{ij}]$ la matrice inversa e riscriviamo la soluzione usando la simbologia matriciale:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La simbologia usata permette di evidenziare il significato dei moltiplicatori leonteviani dell'ultima riga della matrice inversa. I primi due elementi dell'ultima riga indicano la generazione d'inquinamento dovuta alla produzione totale settoriale necessaria per consegnare un'unità di merce alla domanda finale.

Passiamo ora a considerare anche l'attività di disinquinamento. Mantenendo la stessa simbologia utilizzata, il simbolo X_p indica ora l'inquinamento eliminato mediante un processo tecnologico. Ipotizziamo che non sia tecnicamente possibile eliminare tutto l'inquinamento, oppure che non sia necessario eliminarlo completamente perché una minima quantità è tollerata (in quanto l'ambiente è in grado di assimilare parzialmente l'inquinamento provocato dall'attività produttiva). Indichiamo questo livello "tollerato" (o altrimenti detto "domandato") con y_p .

La somma dell'inquinamento eliminato con l'inquinamento "domandato" è uguale, ovviamente, all'inquinamento emesso totale dai due settori produttivi:

$$X_p + y_p = a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + a_{pp}X_p$$

L'attività di disinquinamento impiega input prodotti dai settori che generano inquinamento. Pertanto anche l'attività di disinquinamento, per via indiretta, produce inquinamento.

Finalmente, il sistema delle quantità con generazione di inquinamento e attività di abbattimento diventa il seguente:

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{1p}X_p + y_1 \\ X_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{2p}X_p + y_2 \\ X_p &= a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + a_{pp}X_p - y_p \end{aligned}$$

Mantenendo la precedente simbologia matriciale, si ottiene:

$$\begin{bmatrix} (1-a_{11}) & -a_{12} & -a_{1p} \\ -a_{21} & (1-a_{22}) & -a_{2p} \\ -a_{p1} & -a_{p2} & (1-a_{pp}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ -y_p \end{bmatrix}$$

Il sistema risolto nel vettore delle incognite x si scrive:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ -y_p \end{bmatrix}$$

Mentre i coefficienti dell'ultima riga della matrice inversa rappresentano i moltiplicatori leonteviani dell'inquinamento, quelli dell'ultima colonna rappresentano invece i moltiplicatori leonteviani del disinquinamento. Al variare del valore della domanda d'inquinamento y_p , cioè del livello tollerato d'inquinamento, variano linearmente i livelli settoriali dell'output.

In questa sede non è importante dimostrare le condizioni necessarie e sufficienti che assicurano l'esistenza di soluzioni non-negative. La dimostrazione può essere svolta adattando le condizioni di Hawkins-Simon alla matrice input-output ambientale (si veda il citato Miller e Blair a pag. 248-250). È quindi sufficiente ricordare che occorre:

- i) che l'ammontare di inquinamento generato dall'attività di disinquinamento sia inferiore all'ammontare di inquinamento abbattuto, ovvero che $(1-a_{pp}) > 0$;
- ii) che l'ammontare complessivo di inquinamento generato dal sistema economico sia superiore all'ammontare d'inquinamento "domandato", ovvero che $a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 > y_p$. In altre parole, il modello input-output con inquinamento può essere utilizzato quando il livello d'inquina-

mento generato dall'attività economica è superiore a quello tollerato; conseguentemente il modello input-output soddisfa le condizioni di Hawkins-Simon.

Esercizio svolto 1.2 Impatto settoriale dell'inquinamento e del disinquinamento

Per consolidare i concetti teorici si propone il seguente esercizio tratto da Miller e Blair (1985, pag. 248). Il sistema economico rappresentato nella tabella sotto riportata è composto da due settori tradizionali (settori 1 e 2) e da un settore dedicato al disinquinamento provocato dall'attività degli altri due settori. Il settore 3 contabilizza la "generazione d'inquinamento" quando viene letto secondo la riga; esso invece svolge l'attività di "abbattimento d'inquinanti" quando viene letto secondo la colonna.

Si chiede di calcolare il vettore dell'output in funzione della domanda finale.

Tavola input-output

	Settore 1	Settore 2	Settore 3	Output intermedio	Domanda finale	Output totale
Settore 1	15	25	0,6	40,6	59,4	100
Settore 2	20	5	1,2	26,2	73,8	100
Settore 3	5	4	0	9	-3	6

Matrice dei coefficienti tecnici A_p

	Settore 1	Settore 2	Settore 3
Settore 1	0,15	0,25	0,1
Settore 2	0,20	0,05	0,2
Settore 3	0,05	0,04	0

Matrice inversa $(I - A_p)^{-1}$

	Settore 1	Settore 2	Settore 3
Settore 1	1,268	0,342	0,195
Settore 2	0,283	1,138	0,256
Settore 3	0,075	0,063	1,020

Domanda finale

Settore 1	59,4
Settore 2	73,8
Settore 3	-3

Output calcolato

Settore 1	99,9738
Settore 2	100,0266
Settore 3	6,0444

Il vettore dell'output coincide, salvo per gli arrotondamenti nei calcoli, ai dati di partenza.

Si chiede ora di variare a piacere i valori delle componenti della domanda finale per interpretare gli effetti indotti dal moltiplicatore leonteviano sui livelli d'attività settoriali.
