

J. Valdivielso (comp.)

Les dimensions socials de la crisi ecològica

Ed. UIB, 2003

La perspectiva biofísica de la relació home-natura: Economia Ecològica

Jesús Ramos Martín¹

(versió 26/04/03)

1. Introducció

L'estudi de la relació entre l'activitat econòmica i el medi que ens envolta és antiga en economia. No obstant és cert que darrerament la teoria econòmica sembla haver-la oblidada. És per això que quan sortí la disciplina que avui s'anomena "economia ecològica" va implicar una ruptura amb la manera amb la qual la teoria econòmica convencional descrivia nostra relació amb el medi ambient.

El present capítol no pretén explicar en profunditat que és el que s'entén per economia ecològica², si no més aviat descriure breument el que creiem són les característiques principals que la fan diferent de la resta de disciplines: la inconmensurabilitat de valors, la seva anàlisi en termes biofísics, i les seves repercussions al nivell de la generació de polítiques, que la fan ser un exemple del que es coneix com a ciència post-normal.

L'estructura del que segueix és, per tant:

La Secció 2 en introdueix la relació existent entre el pensament dels fisiòcrates i els economistes clàssics amb el medi ambient, tot emfatitzant la seva relació amb la terra com a font de riquesa. La següent secció presenta el pensament neoclàssic. El problema dels residus i no només de l'accés a recursos és tractat en la Secció 4, mentre que la Secció 5 presenta la influència de la termodinàmica sobre l'economia ecològica, tot posant de manifest el caràcter biofísic d'aquesta. La Secció 6 presenta unes pinzellades sobre el que és l'economia ecològica, i la següent secció profunditza en les implicacions polítiques i per tant en el concepte de ciència post-normal, per arribar a unes conclusions breus tot seguit.

¹ Departament d'Economia i d'Història Econòmica, i Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals, Universitat Autònoma de Barcelona, correu electrònic: Jesus.Ramos@uab.es.

² Per a això el lector pot consultar Costanza (1991); Martínez-Alier (1987); Martínez-Alier i Roca Jusmet (2000) i les referències que allà trobarà.

2. Els fisiòcrates i el pensament clàssic

Tal i com menciona Proops (1979: 125), l'economia no ha tingut en compte l'energia ni els materials en qualsevol dels paradigmes, a part de considerar-los només com a “bens de consum” o “factors de producció”³. Aquesta falta de consideració no ha estat el cas del medi ambient en general, i de la terra en particular. Així, durant la història del pensament econòmic els economistes han mostrat el seu interès en tres temes principals:

- (i) La producció de bens i serveis i la generació de riquesa a través de la transformació d'inputs introduïts des de la natura.
- (ii) La escassetat de recursos.
- (iii) Les conseqüències de la producció, per exemple la contaminació.

Els Fisiòcrates es centraven en la producció, tot considerant la terra com el productor final del valor de les coses. Ells consideraven la terra com a productora doncs ens proporcionava un excedent que podia ser obtingut un cop alguns inputs s'havien usat (Christensen, 1989). Així ells tenien al cap una mena d'analogia entre els sistemes vius i l'aprovisionament de l'economia⁴. És en aquesta manera que hem d'interpretar el *Tableau Economique* de Quesnay (1758), en el qual ell mirà d'aplicar les seves idees Cartesianes a l'anàlisi de la generació de la riquesa i del valor (veure Mirowski, 1989 i Cleveland, 1987 per a més detalls). Quesnay va concloure que la producció de bens podia ser vista com una mera transformació de materials i aliments extrets de la terra (Christensen, 1989), en el que és, clarament, una interpretació biofísica del procés econòmic.

Aquest enfocament cap a la part productiva de l'economia és el que va distingir també el pensament clàssic del neoclàssic. El fet, però, de que pareessin més atenció a la part productiva no vol dir que entenguessin *completament* els fonaments biofísics del procés econòmic. Així, tot i que Malthus i Ricardo van reconèixer que tota la producció feta per l'home es basava en materials que provenien de la natura, no es van adonar de que es podia dir el mateix dels productes i processos naturals. És a dir, en les seves explicacions del procés econòmic no van fer ús de les lleis de la termodinàmica, desenvolupades en els anys 1840s i 1850s. Amb més detall, van usar la Primera Llei de

³ Mirowski (1989: capítols 3 i 4) té una altra opinió i presenta algunes analogies entre la física i l'economia, principalment presentant el “valor” com una substància que es conserva en moviment (1989: 186), en una clara analogia amb el concepte d'energia.

⁴ Aquesta idea d'entendre l'economia com l'aprovisionament de la *polis* ve de la distinció d'Aristòtil entre *oikonomia* i *crematística*.

la termodinàmica (conservació de la matèria i l'energia) per a explicar la producció de manufactures però no la producció de la terra, que per a molts d'ells tenia un caràcter gairebé sagrat⁵. No obstant, la introducció del concepte d'*estat estacionari* per part de John Stuart Mill (1866) va significar un reconeixement dels límits que la natura imposava al desenvolupament econòmic, fet que després va analitzar l'economia ecològica⁶. Per altra banda, Malthus (1798) va ser el primer en posar de manifest l'aparent contradicció entre una població creixent i uns recursos escassos, tot posant com a exemple la terra cultivable. Aquest tipus d'anàlisi va ser seguit més tard per part de Jevons (1865) en el seu clàssic assaig sobre el carbó.

Tot i escriure després de que les lleis de la termodinàmica fossin formulades, Marx no integrà el treball de Podolinsky, un físic socialista Ucraïnès, en la seva anàlisi, en el que pot interpretar-se com a un error miòpic del filòsof⁷. Així, no va usar termes de l'ecologia humana, com ara els fluxos d'energia i materials, a la seva teoria, tal i com recomanava Podolinsky. Si ho hagués fet, tant la seva teoria del valor com de l'evolució dels sistemes econòmics hauria estat diferent⁸. De fet, les idees de Podolinsky eren molt avançades per al seu temps. Va tenir la idea de modelitzar la productivitat del treball com una funció de la quantitat d'energia usada per a subsidiar-lo. També va desenvolupar el concepte de “retorn energètic de l'input energètic (energy return on energy input) sota el nom de “coeficient econòmic”, i ho va aplicar als éssers humans, tot arribant a la conclusió de que l'home té la capacitat de transformar una cinquena part de l'energia obtinguda del menjar en treball muscular. Aquest resultat pot ser interpretat com un fonament biofísic de la teoria del valor. Tal i com diu Martínez-Alier (1987: 51) “en economia Podolinsky pensà que havia reconciliat els Fisiòcrates amb la teoria del valor treball”. Els seus conceptes, com ens fa notar Cleveland (1987) han mostrat ser mot poderosos, i han estat usats després per diferents analistes biofísics, com ara Cleveland et al. (1984) i Odum (1971). Es una pena que Marx, l'últim dels economistes clàssics amb interès en el procés productiu a través de la transformació de diferents

⁵ De fet, com diu Mirowski (1989), le llei de Say – la oferta crea la seva pròpia demanda – pot interpretar-se com una aplicació del principi de conservació esmentat abans.

⁶ Daly (1990) va distingir entre creixement (increment quantitatiu en una escala física) i desenvolupament (millora qualitativa o realització de potencialitats), tot permetent l'existència d'un desenvolupament qualitatiu sense la necessitat de creixement.

⁷ Per a una anàlisi en profunditat de Podolinsky i altres pares de la “energètica”, així com una revisió de la rellevança de l'anàlisi energètica com a fonament de l'economia ecològica, vegeu el llibre seminal de Martínez-Alier (1987).

⁸ Per exemple, si hagués usat el treball de Podolinsky, la seva concepció de la crisi del capitalisme degut a un deteriorament de les “relacions de producció” hauria canviat vers els límits impossats a l'ulterior desenvolupament de les “forces productives”, imposats per les lleis físiques i ecològiques.

inputs no fes ús de les lliçons de l'anàlisi termodinàmica per a completar la seva anàlisi del procés econòmic.

3. L'enfocament neoclàssic

L'enfocament neoclàssic representa un canvi dràstic en el paradigma econòmic en el sentit de Kuhn (1962). Com diu Christensen (1989), tot usant el model d'optimització, adaptat de la mecànica analítica, l'economia neoclàssica va canviar el focus de la dinàmica productiva a l'anàlisi del valor en canvi⁹. No obstant, Jevons (1865) adreçà, a *The Coal Question*, el tema dels recursos limitats com una restricció per al desenvolupament, tot arribant a la conclusió que un resultat paral·lel a l'increment de la eficiència termodinàmica en l'ús del carbó era l'increment del consum total de carbó (Martinez-Alier, 1987)¹⁰. Aquesta línia argumental va ser perduda per el mateix Jevons, i per altres autors, quan ignoraren els fonaments biofísics del capital, tot concentrant-se en el capital financer. La mateixa falta d'interès per les primeres matèries pot trobar-se més tard a Marshall (1920), tot i que ell va dir allò de que “La Meca de tot economista rau en la biologia econòmica més que en la dinàmica econòmica” (1920: xiv).

De fet, com hem mencionat abans l'economia neoclàssica es centra en l'anàlisi de l'intercanvi de bens i serveis entre els diversos agents econòmics, tot emfatitzant el paper de les preferències del consumidor i la dotació de recursos, per tal de garantir l'equilibri de l'economia. Això implica considerar el medi ambient només com una restricció més que ens ve donada.

Per a entendre millor l'economia neoclàssica hem de tenir en compte que segueix la mecànica clàssica en la seva descripció del procés econòmic. Es a dir, tant la producció com el consum i la distribució son processos singulars que poden ser analitzats de forma separada, no solament per a entendre'ls, però també per a fer prediccions. Com a la mecànica, els economistes busquen trobar “lleis universals” que poden ser aplicades a tot arreu i a tot hora.

En particular, els economistes neoclàssics interpreten el sistema econòmic com a un *sistema aïllat*¹¹ al qual uns factors de producció (terra, capital i treball) i uns bens i

⁹ Per a una anàlisi en profunditat de la influència de la geometria i la física en la economia neo-clàssica vegeu Mirowski (1989: capítols 5 i 6).

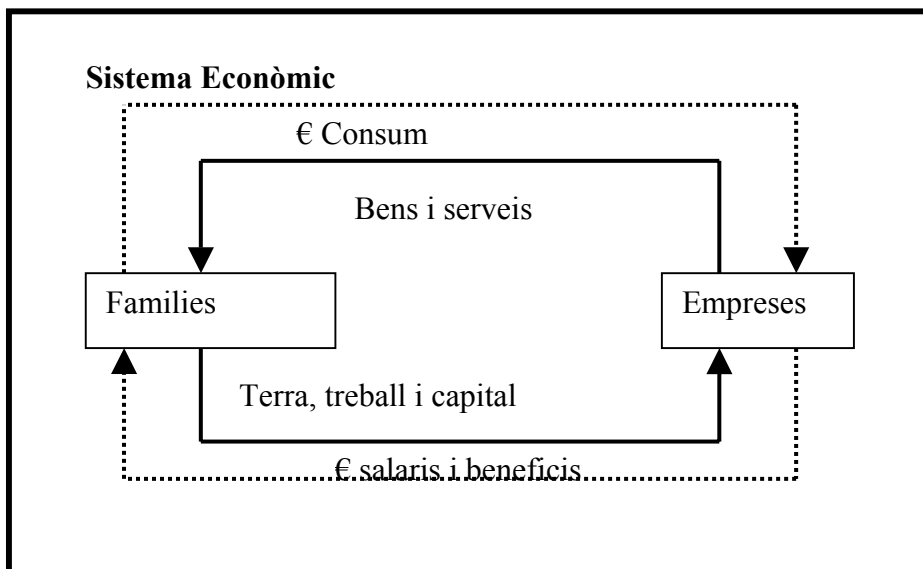
¹⁰ Quelcom anomenat més tard la paradoxa de Jevons per un altre acadèmic del mateix nom (Jevons, 1990)

¹¹ Un sistema aïllat és aquell que no intercanvia energia ni materials amb el seu medi; un sistema tancat

serveis són intercanviats entre les empreses i les famílies, en el que es coneix com el flux circular del valor en canvi (o de la renda). En més detall, les empreses paguen a les famílies pels factors de producció (ingrés nacional), mentre que les famílies paguen a les empreses pels bens i serveis finals (producte nacional). Aquest cercle és el que es presenta a la Figura 1.

Quan representem el procés econòmic d'aquesta manera estem considerant els recursos naturals, la tecnologia, les preferències com a donats. Es a dir, no estem tenint en compte els fonaments biofísics del procés econòmic, ni per la banda de la necessitat de recursos ni per la banda de les conseqüències de la producció i el consum en la forma de residus. Es a dir que tractem el sistema econòmic com si es fos una mena de capsa negra (Dyke, 1994).

Figura 1: El flux circular de la renda



Font: Hall et al. (1986: 39)

El flux circular del valor en canvi o renda considera els recursos naturals com a il·limitats. Amb la seva èmfasi en l'assignació als mercats, la teoria neoclàssica no pot tractar el tema de l'escala de l'economia respecte el medi ambient (Daly, 1992). Quan més tard, l'economia dels recursos naturals va desenvolupar-se en el marc de la teoria neoclàssica (vegeu Pearce i Turner, 1990; Scott, 1985) va tractar les amenaces de l'escassetat i de la contaminació tot usant les metodologies tradicionals de l'economia. Així els mètodes que es desenvoluparen van ser:

només intercanvia energia però no materials; i un sistema obert intercanvia tant energia com materials amb el medi.

- (i) Optimització en el cas de la gestió dels recursos naturals (tant renovables com exhauribles).
- (ii) Assignació de drets de propietat sobre la contaminació (o més generalment sobre les externalitats) per tal d'incorporar-les al sistema de preus, i per tant en el procés de decisió dintre del mecanisme de mercat.

El mateix problema que passa amb l'escala el trobem amb la qüestió del temps. Donat que es segueix la mecànica, a on tots els processos són reversibles, les seves equacions i models són simètrics en el temps, és a dir que el temps pot ser sumat o restat sense que això afecti als models, podem tornar enrera i no hi ha, per tant, irreversibilitat. En aquest punt és bo de mencionar la distinció que va fer Georgescu-Roegen entre “temps” i “Temps”. Per a Georgescu-Roegen (1971: 135), “*T* representa el Temps, concebut com a una corrent de la consciència, o si ho voleu, com a una successió contínua de ‘moments’, però *t* representa la mesura d'un interval (*T'*, *T''*) per un *rellotge mecànic* (èmfasi a l'original).

4. De la limitació dels recursos a la limitació dels embornals

Tot seguint la tradició de Gray (1913, 1914) i Hotelling (1931) quan analitzaven la taxa òptima d'extracció d'un recurs esgotable, els economistes dels anys 1960s començaren un altre cop a analitzar la relació entre el procés econòmic i el medi ambient. El treball de Barnett i Morse (1963) s'agafa normalment com a referència per a aquest revival. Aquell treball portà a un aferrissat debat entre els optimistes tecnològics (que pensen que o bé la tecnologia o la substitució entre recursos resoldran el problema de l'escassetat), i els pessimistes tecnològics. El debat s'animà amb la publicació de l'informe al Club de Roma, *The Limits to Growth*, per part de Meadows et al. (1972) i per l'embargament àrab de petroli del 1973 (Costanza, 1989).

No obstant, tot i que el debat encara continua¹², pensem que en el futur immediat, les restriccions que la natura imposarà al procés econòmic no vindran tant per la part d'escassetat de recursos com per la impossibilitat per al medi d'absorbir les quantitats creixents de residus generades pel sistema econòmic

¹² La idea optimista de la desmaterialització de l'economia (o Corba de Kuznets Ambiental) és defensada per acadèmics que provenen de l'Ecologia Industrial (com ara Von Weizsäcker et al., 1997) o del Metabolisme Industrial (com Ayres, 1998) que segueixen el treball anterior de Malenbaum (1978). Però això és questionat per d'altres autors més pesimistes (o potser realistes) com ara De Bruyn and Opschoor (1997), De Bruyn (1999), Herring (1999), Jevons (1990), Ramos-Martin (2001).

5. Tot definint els límits: termodinàmica

5. 1. La Primera Llei de la termodinàmica

Com hem mencionat tant els economistes clàssics com els neoclàssics es van adonar, tot i que de forma parcial i de manera diferent, dels límits que imposa la Primera Llei de la termodinàmica sobre el procés econòmic. Abans, però, de continuar, repassem la classificació dels sistemes segons és entesa des de la física:

- *Un sistema aïllat* no intercanvia ni matèria ni energia amb el seu medi.
- *Un sistema tancat* intercanvia energia però no matèria amb el medi.
- *Un sistema obert* intercanvia tant energia com matèria amb el medi.

Tant els sistemes aïllats com els tancats són només idealitzacions, útils per a desenvolupar la teoria, però en realitat sempre n'hi ha algun tipus d'intercanvi d'energia i materials entre un sistema i el seu medi (Hall et al., 1986).

La *Primera Llei de la Termodinàmica*, o la llei de la conservació de l'energia (i la matèria) va ser desenvolupada cap al 1840s, i diu que l'energia (i la matèria) no pot ser pas ni creada ni destruïda, si no que es conserva. Té moltes implicacions, com ara que l'energia d'un sistema aïllat es manté constant. Però en el cas dels sistemes oberts (com ara els sistemes econòmics), implica que la massa de matèria que tenim a un sistema ha de canviar en la mateixa proporció a la diferència entre la matèria que entra al sistema menys la matèria que en surt (Ruth, 1993: 51). Això, per als sistemes econòmics té una importància cabdal pel que fa als residus, i a la seva relació amb els inputs.

De fet, La Primera Llei ens ensenya que tots els inputs usats en un procés productiu es convertiran, al final, en una barreja de productes finals i residus (Buenstorf, 2000). Una altra aplicació d'aquesta llei es troba en l'anàlisi input-output, el qual, tot i no tenir en compte les interaccions dinàmiques entre l'economia i el medi ambient, ens dona una descripció de les interaccions entre els diferents sectors econòmics y entre el sistema econòmic i el medi¹³.

¹³ Veure Duchin (1988, 1996), Duchin and Lange (1994), i Duchin and Szyld (1985) per a una descripció de la metodologia input-output per al cas ambiental, i Proops et al. (1993) per a una aplicació per al cas de les emissions de CO₂.

5. 2. La Segona Llei de la Termodinàmica

La Segona Llei de la Termodinàmica, o el *principi de l'entropia*, és sens dubte la peça de teoria termodinàmica que més ha influït en el pensament econòmic.

Abans de continuar, però, hem de definir energia com la capacitat de realitzar treball, en el sentit de la física. El treball es doncs una forma d'energia, com també ho és el calor. No obstant tots dos són, d'alguna manera, diferents. Tenen diferents *qualitats*. De fet, tot el treball pot ser convertit en calor, però el revers no és possible. Així, necessitem una mesura de la qualitat de l'energia, i aquesta mesura és l'*entropia*.

Tal i com ens recorden Faber et al. (1996) tots els processos de canvi consumeixen (o dissipen) energia. Quan dissipem energia, l'energia disponible o lliure¹⁴ es transforma en treball i calor. Aquell calor, no obstant, no pot ser convertit de nou en treball mecànic sense l'addició de més energia (Hall et al., 1986: 5). Això es el que es coneix com la *Segona Llei de la Termodinàmica*. Mes específicament, la llei diu que l'entropia (que recordem és la mesura de la energia no disponible) d'un *sistema aïllat* tendeix cap a un nivell màxim. L'entropia, per tant, defineix diferències de qualitat entre diversos tipus d'energia. A més, la llei ens recorda que la eficiència relativa a tota transformació de calor en treball és inferior al 100%. Una altra definició, en la mateixa tradició fenomenològica, ens diu que intercanvis espontanis de calor entre dos cossos només poden tenir lloc en una direcció, que és des del cos calent cap al fred, en línia amb el que ens diu l'experiència (Faber et al., 1996: 99).

En termes teòrics, la entropia es pot definir així (Georgescu-Roegen, 1971: 129, 130):

$\Delta S = \Delta Q / T$ “a on ΔS is l'increment d'entropia, ΔQ l'increment de calor transferit des del cos calent al fred, i T és la temperatura absoluta a la qual es va fer la transferència”.

Josiah Willard Gibbs va clarificar després el concepte d'energia, en distingir entre entropia i energia lliure o disponible, més tard coneguda com a *exergia*. Aquesta distinció ens permet de parlar amb més propietat i entendre les definicions anteriors en un altre sentit. Així, quan en un sistema aïllat l'entropia és màxima, l'exergia ha de ser per naturalesa zero. L'exergia no és, per tant, una variable que es conservi, com ara l'energia. De fet l'exergia és allò que la gent quotidianament anomena energia. L'exergia pot perdre's o adquirir-se a qualsevol procés físic (Ayres, 1998) en forma de calor de baixa temperatura. Aquestes característiques fan pensar alguns acadèmics que

¹⁴ En termodinàmica clàssica es fa la distinció entre energia lliure o disponible (la qual pot transformar-se en treball mecànic) i energia no disponible o limitada (que no es pot transformar en treball mecànic)

l'exergía és el veritable factor de producció limitant. Seria per aquesta escassetat de l'exergía que aquesta seria considerada d'interès des d'un punt de vista econòmic.

Després d'haver introduït el concepte d'entropia, quines son les seves repercussions per al procés econòmic? En primer lloc, la llei exclou la reversibilitat de molts processos (Faber, 1985). Això es pot veure clarament de la pròpia formulació de Clausius de la Segona Llei, “el calor no pot mai, per sí mateix, anar d'un cos amb baixa temperatura cap un altre amb alta temperatura” (citada a Proops, 1979: 35). Això implica, tal i com ja s'ha dit, que qualsevol procés a la natura donarà com a resultat un augment de l'entropia. Aquest resultat va fer Eddington de parlar de l'anomenada ‘fletxa del temps’, segons la qual l'augment de l'entropia ens determina la direcció del Temps en el sentit de Georgescu-Roegen. La implicació ambiental d'això és que qualsevol ús de recursos que suposi anar més enllà dels cicles ecològics donarà lloc a una degradació del medi que serà irreversible, amb les subsegüents conseqüències que això comportarà per al desenvolupament econòmic.

La segona implicació és la de l'eficiència, doncs la segona llei ens posa els límits sobre l'eficiència a la qual els materials i la energia poden ser usats (Ruth, 1993). Això fa que l'objectiu de la contaminació zero sigui físicament impossible, especialment si tenim en compte que el reciclatge és intensiu en exergía. Això vol dir que tot i reciclant, més entropia és generada cada cop que hi ha un procés, donat que aquest mai no assoleix el 100% d'eficiència en la conversió.

Un aspecte final a considerar és que, derivat de l'anàlisi termodinàmica, la productivitat en l'ús dels recursos, que té a veure amb l'eficiència ecològica, no és suficient per a garantir la integritat del sistema (Binswanger, 1993). Es a dir, millores relatives en l'ús dels recursos poden anar de la mà d'augmentos en els usos de recursos en termes absoluts, i des d'un punt de vista ambiental això és el que importa.

En conclusió, l'entropia no hauria de ser vista com a una eina analítica per part dels economistes (Faber et al., 1996). Només hauria de fer-se servir per a entendre les interaccions entre l'economia i el medi ambient, d'una forma conceptual (Binswanger, 1993) de tal manera que entenguem els límits físics que posa el medi ambient sobre el procés econòmic.

6. Economia Ecològica¹⁵: El sistema econòmic com a subsistema

¹⁵ No es la intenció en aquesta secció de descriure en profunditat aquest nou camp de coneixement. Per a una descripció històrica del naixement de l'economia ecològica, vegeu Martínez-Alier (1987). Per a una

del sistema natural

L'economia ecològica¹⁶ és un aplec de disciplines que s'ha vingut desenvolupant en els darrers anys. Pren la producció, o la transformació de l'energia i els materials, com el punt focal d'anàlisi, tal i com el pensament clàssic havia fet, però usa a la seva anàlisi elements de la termodinàmica. No obstant, això no vol dir que no adreci també els temes estudiats per l'economia neoclàssica.

6. 1. Introducció: 'Oikonomia'

Aristòtil va distingir entre 'crematística' i 'oikonomia'. Per a ell, la primera era l'estudi de la formació dels preus i de l'intercanvi, quelcom que nosaltres avui dia relacionem amb el que s'entén per 'economia' en la seva definició tradicional proporcionada per Robbins. En contrast, oikonomia representaria l'anàlisi de l'aprovisionament material del "oikos" (llar) o de la "polis" (la ciutat-estat). Per tant, oikonomia significaria fer una anàlisi biofísica del procés econòmic. Això pot ser anomenat "ecologia humana" o "economia ecològica". És precisament aquest interès en els fonaments biofísics del procés econòmic, tornant al pensament d'Aristòtil i dels economistes clàssics, el que distingeix l'economia ecològica de la neoclàssica.

6. 2. Anàlisi energètica

Aquest renovat interès per l'anàlisi biofísica deu molt al treball i les contribucions d'analistes energètics com ara Podolinsky i Lotka. La contribució de Lotka al debat va ser bàsicament la seva afirmació de que la selecció natural tendeix a:

- (i) Incrementar el flux d'energia que circula a través dels sistemes biològics
- (ii) Incrementar la eficiència energètica dels processos biològics.

Més específicament, les paraules originals de Lotka (1922: 148) van ser que "la selecció natural operaria de tal forma que s'incrementés la massa total del sistema orgànic, que augmentés la taxa de circulació de matèria a través del sistema, i que s'incrementés el flux total d'energia a través del sistema sempre i quan existeixi una fracció no utilitzada de matèria i energia disponible (nostra traducció)". Hi ha dos enfocaments a l'anàlisi de Lotka. Un es desenvolupa per Odum, que defensa l'existència d'una llei universal de

presentació dels principals autors i temes d'anàlisi vegeu Costanza (1991). Per als darrers desenvolupaments vegeu la revista *Ecological Economics* (<http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/0/5/index.htm>), i per altra informació visiteu la pàgina web de la Societat Internacional d'Economia Ecològica (<http://www.ecologicaleconomics.org>)

¹⁶ A vegades també anomenada economia biofísica, i després "bioeconomia" per Georgescu-Roegen.

l'evolució. L'altre veu la contribució de Lotka sense cap mena de determinisme (O'Connor, 1991; Buenstorf, 2000), però només com una mera descripció de regularitats passades que poden ajudar a entendre l'evolució d'una manera més fenomenològica.

Odum es va referir al principi de Lotka com el 'maximum power principle' (Odum and Pinkerton, 1955), i el va prendre com si fos una llei universal. Aquest tipus d'arguments, com diu Martínez-Alier (1987), poden portar a idees properes al Darwinisme social¹⁷, segons el qual l'explicació de l'èxit de la espècie humana entès com la seva capacitat d'aprenentatge per a fer ús de les fonts energètiques, podria ser extrapolat intraespecíficament per a explicar diferències en el si de la societat humana. Per contra, l'ús de la teoria de la selecció natural de forma intraespecífica no hauria de passar de la metàfora. El que és el mateix, tenint en compte que "l'assignació humana de recursos energètics i materials a diferents usos no pot ser explicada només per les ciències naturals. L'economia *no hauria* d'arribar a ser només ecologia humana" (Martínez-Alier, 1987: 15-16, èmfasi a l'original, la meua traducció).

En resum, tot i que l'economia ecològica es basa també en part en les idees d'aquests analistes energètics, l'anàlisi de Podolinsky, Lotka o altres no s'ha de prendre de forma literal, sinó solament com a una metàfora o una eina que podem fer servir per a millorar el nostre enteniment del funcionament dels processos econòmics des de la vessant biofísica. Per exemple, la distinció introduïda per Lotka en primer lloc (1956), i després proposada per Georgescu-Roegen (1975) com a un concepte de treball per a l'anàlisi energètica de la bioeconomia i la sostenibilitat, entre fluxos energètics exosomàtics¹⁸ i endosomàtics¹⁹ resulta molt útil quan analitzem els sistemes humans. Així, energia exosomàtica pot significar coses molt diferents depenent de l'estat de desenvolupament d'un país. Així en un país ric, equival pràcticament en la seva totalitat al que es coneix com "energia comercial", mentre que a un país més pobre pot implicar fonts més tradicionals d'energia com ara energia animal, vent, aigua, i foc (Giampietro et al., 2001). Així, alguns autors argumenten que "la ratio entre l'energia exosomàtica i

¹⁷ De fet, el mateix Lotka (1956: 304) va puntualitzar el fet que alguns autors havien provat de construir un sistema de "biodinàmica (dinàmica social)" basat en "l'equivocada identificació dels preus i quantitats econòmiques relacionades amb el factor d'intensitat de l'energia".

¹⁸ Ús de fonts energètiques per a conversions energètiques fora del cos humà per al metabolisme social, però que encara operen sota control humà.

¹⁹ Ús de l'energia necessària per al manteniment del metabolisme d'un ésser humà, és a dir, conversions energètiques lligades a processos humans fisiològics que estan alimentats per energia que prové del menjar (Giampietro et al., 2001).

l'endosomàtica ens indica fins a quin punt la “tecnologia humana” està alimentant la capacitat dels humans de controlar la producció i el consum de bens i serveis. La ratio és més o menys 5/1 en la majoria d'economies de subsistència (donat que es deu a l'ús de biomassa per al foc i a l'energia animal en quant a l'ús exosomàtic), mentre que arriba fins a valors de fins 90/1 en els països desenvolupats” (Giampietro et al., 2001; vegeu també Giampietro, 1997)

6. 3. El sistema econòmic com a sistema obert unidireccional

“L'economia ecològica adreça les relacions entre els ecosistemes i els sistemes econòmics en un sentit ampli” (Costanza, 1989: 1, la meua traducció). No obstant no pensem que sigui una “ciència i gestió de la sostenibilitat” (Costanza, 1991), sinó més aviat de la (no)sostenibilitat, donat que l'economia ecològica es centra en estudiar allò que no és sostenible.

Central a l'economia ecològica és el reconeixement de que els sistemes econòmics no només afecten el medi ambient, sinó que directament depenen de les funcions de suport a la vida que ens prové el medi per a la nostra supervivència. És adir, hi ha una relació mútua, una coevolució (Norgaard, 1994; Gowdy, 1994). De fet, els sistemes econòmics utilitzen matèria i energia per a sostenir-se i créixer, i és aquesta producció i consum la que transforma la matèria i la energia que transforma el medi ambient que ens envolta.

Amb aquestes eines de l'ecologia i l'economia, Odum (1989) va distingir entre tres tipus d'ecosistemes:

- (i) *Ambients naturals* o ecosistemes alimentats per l'energia del sol. Aquests sistemes són els que donen suport bàsic a la vida, i són auto mantinguts.
- (ii) *Ambients domesticats* o ecosistemes alimentats per l'energia del sol, però subsidiats pels humans. Produeixen aliments i fibres, i són recolzats per energia industrial.
- (iii) *Ambients fabricats* o sistemes urbans industrials alimentats per combustibles, bàsicament de caràcter fòssil.

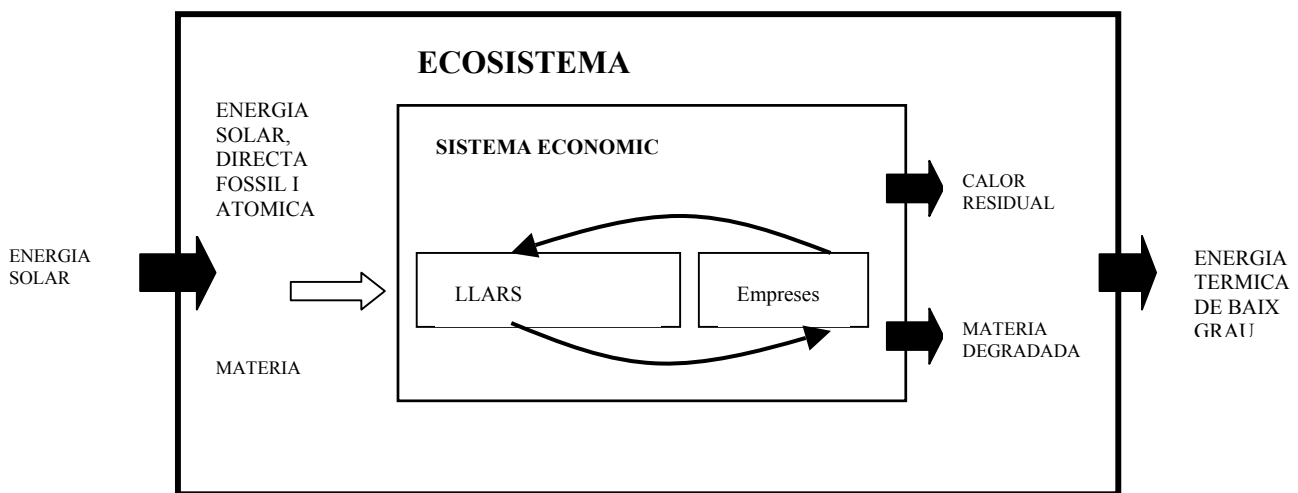
Usant aquesta distinció ens podem adonar de que els ambients fabricats (entre els quals el sistema econòmic pot ésser considerat) no són auto-mantinguts, i per tant depenen de l'output dels altres dos tipus de sistemes.

El sistema econòmic pot veure's com un sistema obert unidireccional; un subsistema immers dintre d'un sistema major que és el sistema natural Terra, el qual es

pot aproximar com a un sistema tancat (veure Figura 2).

Daly²⁰ (1991: 36) va denominar aquesta transformació d'energia i materials el “transflux” (throughput en anglès), que seria el flux físic entròpic de matèria i energia des de les fonts naturals, a través de l'economia humana i de retorn cap als embornals de la natura). Això és el que Georgescu-Roegen va descriure com el “flux metabòlic” de la societat.

Figura 2: El sistema econòmic com a subsistema obert unidireccional



Font: Hall et al. 1986: 39

Com es pot veure la Figura 2, el “procés econòmic és sostingut per un flux irreversible, unidireccional d’energia i materials amb baixa entropia des del medi ambient, a través del sistema econòmic, i de retorn cap al medi natural en forma d’energia no disponible i materials d’alta entropia” (Cleveland and Ruth, 1997: 205).

L’energia solar dona lloc a la producció de bens i serveis naturals, mentre que l’energia industrial (electricitat o combustibles fòssils) ajuda el sistema econòmic a transformar matèria en productes per al consum. Al final del procés, el consum d’aquests productes representarà la generació de residus en la forma d’energia i matèria degradada (amb alta entropia). D’aquesta manera ens adonem de com tant els sistemes naturals i els domesticats estan subsidiant el sistema econòmic, com a sistema fabricat.

És veritat, però, que la Figura 2 podria completar-se amb una fletxa que representés el reciclatge de materials (per part dels humans o de la natura), però hem de

²⁰ Tot seguint Boulding, com ell amteix diu.

tenir en compte que el reciclatge material mai no és complert al 100%, i que el reciclatge de l'energia no és factible, que és el que explica que al final el transflux sigui unidireccional (de baixa a alta entropia). És per això que, usant aquestes idees de la Segona Llei de la Termodinàmica, parlem d'irreversibilitat. De fet, tal i com va dir Daly (1996: 53), “no consumim matèria/energia, però consumim (usem de forma irrevocable) la capacitat de reorganitzar la matèria/energia”.

6. 4. Sostenibilitat forta

Per a analitzar la relació entre el sistema econòmic i la natura, l'economia ecològica disposa de diversos conceptes com ara la sostenibilitat dèbil i la sostenibilitat forta. S'entén per sostenibilitat dèbil (Pearce and Atkinson, 1993) quan mantenim el benestar de la població constant o creixent (entès com a riquesa o consum material); això es basa en la idea de que existeix una completa capacitat de substitució entre el capital fabricat per la humanitat i la natura, i que tots dos poden ser valorats en termes monetaris. Per contra, la sostenibilitat forta (Noël and O'Connor, 1998) reconeix l'existència d'una sèrie de bens i serveis que ens proporciona la natura (l'anomenat capital natural crític) que és necessari per a mantenir i regular els sistemes i, per tant, no pot ser substituït per capital fabricat (Barbier and Markandya, 1990). En comptes de ser substituïts, diríem que són complementaris. Això comporta que segurament necessitarem una sèrie d'indicadors biofísics que ens permetin de conèixer la qualitat dels sistemes per a fer una diagnosi més certera i promoure polítiques ambientals, tot evitant el reduccionisme econòmic a l'hora de prendre decisions.

7. Implicacions normatives: “Orquestració de les ciències” i Ciència post-normal

L'economia ecològica també analitza els nous sistemes complexos ambientals. Per tant, a diferència de l'economia neoclàssica, es centra, entre d'altres coses, en l'evolució de les economies, en el procés d'arribar a ser, en el canvi estructural, i en l'aparició de la novetat (en la forma de canvi tecnològic, per exemple), totes elles característiques mostrades pels sistemes complexos. La presència de novetat, els mecanismes de retroalimentació entre els diferents nivells de la jerarquia dins el sistema, i la seva anticipació als canvis, garanteixen que sempre tindrem incertesa quan analitzem les economies com a sistemes complexos. Aquesta és una de les raons per defensar una nova epistemologia. De fet, quanta més recerca hi apliquem, més incertesa generarem,

doncs apareixen noves preguntes i es troben noves relacions entre les diferents variables. En paraules de Faber y Proops quan parlen dels problemes ambientals (1998: 110, la meua traducció), "sovint provoquen l'aparició de fenòmens impredecibles (novetat) (...) això implica que la seqüència simple de problema → ciència → tècnica → solució no és necessàriament vàlida. Ans el contrari, podem experimentar que la nostra millora en el coneixement pot inclòs dificultar la cerca de solucions". Això provoca que la impredecibilitat sigui rellevant per a l'economia ecològica, i especialment per a la formulació de polítiques.

No obstant, els nous problemes ambientals es caracteritzen per que els fets son incerts, hi ha valors en disputa, el que està en joc és molt, i les decisions que es necessiten són urgents (Funtowicz y Ravetz 1991: 137). En aquest context, l'economia ecològica defèn una nova epistemologia per a tractar la complexitat. Així, en un context dominat per la incertesa i la ignorància (no sabem el que no sabem), necessitem un nou enfocament per a tractar aquests problemes. Aquestes idees han estat desenvolupades sota diferents perspectives que són complementàries, i que inclòs a vegades es solapen, com és l'enfocament "post-estructural" o "posmodern" (Denzin 1994), la "ciència cívica" (O'Riordan 1996), o la "ciència post-normal" (Funtowicz y Ravetz 1991). Es diu que l'economia ecològica és un exemple de ciència post-normal (Funtowicz y Ravetz 1994).

Sota aquest enfocament no s'argumenta que no es pugui utilitzar el coneixement científic generat de la manera tradicional, però que hi ha una sèrie de problemes emergents caracteritzats per la complexitat i la incertesa en els quals la ciència "normal" no pot fer servir els mètodes tradicionals (com ara la seqüència mencionada abans de problema → ciència → tècnica → solució).

En ciència post-normal s'admet la impossibilitat d'assolir una realitat objectiva degut a les característiques inherents canviants dels sistemes analitzats, i degut al fet de que tota investigació es veu afectada pels valors de l'investigador, per la qual cosa no podem parlar d'una "ciència lliure de valors o neutral". Amb aquest rerafons, la generació de polítiques es torna un procés multidimensional en el qual l'investigador és només una de les possibles fonts de coneixement, entre moltes altres (com ara el sentit comú, les creences, etc.), que tracten d'influir en el resultat final.

En la ciència post-normal, la recerca i la generació de coneixement no es duen amb. La finalitat de proveir a qui pren les decisions amb una solució al problema per evitar-li Aixà que sigui ell o ella qui prengui aquesta decisió, i legitimar els seus actes. Ans el contrari, la idea és crear un enteniment contextual sobre el tema de tal forma que mantinguem informats a tots els actors involucrats en el procés de presa de decisions, però tot deixant que siguin ells qui arribin a una solució satisfactòria de compromís. Aquesta solució de compromís no té per objecte ser un reflex de la “veritat”, però una visió de la realitat construïda socialment (Clark et al. 1995: 118), un enteniment consensuat tant del problema com de les formes d’afrontar-lo.

Com diuen Kay et al. (1999: 737, la meua traducció), “el programa de la ciència post-normal consisteix en proveir d’una base d’enteniment necessària per a desentraynar la complexitat (aparició de novetat, la incertesa irreductible, la causalitat interna), de tal forma que puguem anticipar satisfactòriament quan això sigui possible, i adaptar-nos, quan sigui apropiat o necessari, als canvis en els sistemes auto-organitzats dels quals som una part integrada i dependent”.

En ciència post-normal, per tant, s’assumeix que tant en la ciència com en el procés de presa de decisions hi ha judicis de valor, és per això que hem de garantir la qualitat del procés de presa de decisions, en comptes del resultat final, donat que no existeix una veritat objectiva (Funtowicz y Ravetz 1994: 200). Per a això, reprenent les idees de Simon (1983), hauríem de passar d’una racionalitat orientada al resultat final o substantiva a una altra racionalitat procedimental, en la qual el fet rellevant sigui la qualitat del procés de generació del coneixement en comptes del resultat final. Aquesta racionalitat procedimental implicaria una extensió de la comunitat d’evaluadors de les decisions a individus d’altres disciplines i a aquelles persones afectades per la decisió. El treball del científic consistiria, per tant, en assumir i tractar de gestionar la incertesa que caracteritza cada camp per tal d’obtenir informació de la més alta qualitat possible (Funtowicz y Ravetz 1994: 200).

Així, tant la complexitat del sistema analitzat, com el subjectivisme inherent en la seva descripció i enteniment, ens fan defensar la necessitat de fer servir descripcions no-equivalents del nostre sistema per tal de guanyar robustesa. Això es pot fer utilitzant les idees d’altres disciplines, el sentit comú, o fins i tot les històries populars. Això és el

que s'ha anomenat pluralisme metodològic (Norgaard, 1989), o 'consilience' (Wilson, 1998). Tots dos conceptes, però, no són més que l'aplicació de la idea d' Otto Neurath (1944) de la unitat dialèctica o la orquestració de les ciències (tal i com cita Martínez-Alier, 1987: 207), i forma part de la base del concepte de ciència post-normal, que també inclou coneixement popular, no tingut en compte per Neurath. És per això que la bioeconomia (com li deia Georgescu-Roegen) o l'economia ecològica, com a ciència post-normal que és, defèn l'ús de diferents disciplines en la nostra anàlisi.

Conclusió

Tot resumint els arguments presentats en aquest capítol, s'ha presentat una evolució del pensament ambiental dins la ciència econòmica, i com aquest ha canviat al llarg del temps. Per als fisiòcrates l'interès estava al procés econòmic, que per definició es biofísic, històric i evolucionari. Els economistes clàssics canviaren cap a un interès en l'escassetat. El reconeixement de l'escassetat pot interpretar-se com un interès en definir els límits al creixement econòmic. Això, però, no es va mantenir amb els economistes neoclàssics, els quals es centraren en l'intercanvi i l'equilibri de l'economia, en comptes de la producció. És per això que desenvoluparen una sèrie d'eines basades en la mecànica clàssica. Més tard, els economistes dels recursos naturals, amb aquestes mateixes eines, es centraren un altre cop en l'escassetat i mencionaren el problema dels residus. No obstant, la seva resposta va ser en la forma "d'assignacions òptimes" de recursos en el primer cas, i de definició de "drets de propietat" en el segon cas. Aquestes solucions, tot i ser de molta utilitat en alguns casos, són ben lluny de ser una 'panacea' quan ens enfrontem als problemes ambientals complexos.

Quan analitzem la relació entre l'economia i el medi ambient, la teoria termodinàmica ens ofereix arguments molt útils. Tot i això, hem de tenir cura de la utilització que en fem, doncs els conceptes de la termodinàmica han de ser aplicats només als sistemes apropiats.

De la Primera Llei es deriva que en tot procés tots els inputs es converteixen, finalment, en outputs. La Segona Llei, no obstant, té més implicacions. Ens proporciona limitacions a la eficiència dels processos (per exemple el perfecte reciclatge és impossible), i degut a la irreversibilitat de la degradació de l'energia (des de energia disponible a no disponible), defineix el que es coneix com la Fletxa del Temps en l'evolució del sistema, en la forma d'un augment de la generació d'entropia. No obstant

el concepte d'entropia no hauria de ser considerat com a una eina d'anàlisi, però com una base per a un millor enteniment de la relació entre economia i medi ambient, que ens apunta la necessitat de tenir la història en compte quan duem a terme la nostra anàlisi.

De la termodinàmica arribem a la conclusió que la major restricció imposada pel medi ambient és la de fer compatible l'escala temporal humana amb l'escala temporal ecològica, de tal forma que puguem garantir la sostenibilitat tot sense destorbar els processos ecològics que donen suport a la vida en la Terra.

Per la seva banda també hem presentat l'economia ecològica, que es tracta d'una multi-disciplina que restitueix l'interès de l'anàlisi econòmica en l'aprovisionament del 'oikos' o de la 'polis'. Es a dir, s'interessa en els fonaments biofísics del procés econòmic. En fer aquesta aproximació, utilitza conceptes i eines desenvolupades per analistes energètics o ecòlegs com ara Podolinsky, Lotka, i Odum.

L'economia ecològica veu el sistema econòmic com a un subsistema obert, que es troba dins del sistema natural Terra, que és tancat. Aquí, el procés econòmic és vist com unidireccional i sostingut per un flux continu d'energia i materials de baixa entropia, que finalment tornaran al medi ambient degradats en la forma de calor i materials de rebuig. Aquest fet imposa algunes limitacions al creixement físic del subsistema, tal i com s'ha mencionat per al cas de l'escala.

Per últim, s'ha sostingut que en aquest context de complexitat i incertesa una nova epistemologia és necessària per a analitzar la relació entre el sistema econòmic i el medi ambient, i que aquesta era la ciència post-normal, juntament amb una orquestració de les ciències.

Agraïments

Agraïxo al projecte de la UE, *Development and application of a multi-criteria software decision analysis tool for renewable energy sources (MCDA-RES)*, contracte NNE5-1999-NNE5/273/2001, per el recolzament parcial a aquesta investigació. Així com al Grup de Recerca Consolidat, 2001SGR 00163.

Referències

Ayres, R.U. (1998) "Eco-thermodynamics: economics and the second law", *Ecological Economics*, 26: 189-209.

- Barbier, E.B., and Markandya, A. (1990) “The conditions for achieving environmentally sustainable growth”, *European Economic Review*, 34: 659-669.
- Barnett, H.J., and Morse, C. (1963) *Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resource Availability*. John Hopkins, Baltimore.
- Binswanger, M. (1993) “From microscopic to macroscopic theories: entropic aspects of ecological and economic processes”, *Ecological Economics*, 8: 209-234.
- Buenstorf, G. (2000) “Self-organization and sustainability: energetics of evolution and implications for ecological economics”, *Ecological Economics*, 33: 119-134.
- Christensen, P.P. (1989) “Historical roots for ecological economics – biophysical versus allocative approaches”, *Ecological Economics*, 1: 17-36.
- Clark, N.; Pérez-Trejo, F.; Allen, P. (1995): *Evolutionary Dynamics and Sustainable Development: A Systems Approach*. Edward Elgar. Aldershot, UK.
- Clausius, R. (1865) *Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie*. F. Vieweg, Braunschweig.
- Cleveland, C.J. (1987) “Biophysical economics: historical perspective and current research trend”, *Ecological Modelling*, 38: 47-73.
- Cleveland, C.J., and Ruth, M. (1997) “When, where, and by how much do biophysical limits constraint the economic process: A survey of Nicholas Georgescu-Roegen’s contribution to ecological economics”, *Ecological Economics*, 22: 203-224.
- Cleveland, C.J., Costanza, R., Hall, C.A.S., and Kaufmann, R. (1984) “Energy and the U.S. economy: a biophysical perspective”, *Science*, 225: 890-897.
- Costanza, R. (1989) “What is ecological economics?”, *Ecological Economics*, 1: 1-7.
- Costanza, R. (ed.)(1991) *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*. Columbia University Press, New York.
- Daly, H.E. (1990) “Toward some operational principles of sustainable development”, *Ecological Economics* 2:1-6.
- Daly, H.E. (1991) *Steady State Economics: Second Edition with New Essays*. Island Press, Washington DC.
- Daly, H.E. (1992) *Steady-State Economics*. Earthscan Publications, London.
- Daly, H.E. (1996) “Consumption: value added, physical transformation and welfare”, in Costanza, R., Segura, O., and Martinez-Alier, J. (eds.): *Getting Down to Earth*. Island Press, Washington DC.
- de Bruyn, S.M. (1999) “The need to change attractors”, *Ökologisches Wirtschaften*, 3: 15-17.
- de Bruyn, S.M., and Opschoor, J.B. (1997) “Developments in the throughput-income

relationship: theoretical and empirical observations”, *Ecological Economics*, 20: 255-268.

Denzen, N. (1994) “The art and politics of interpretation”, in Denzen, N., and Lincoln, Y. (Eds.): *Handbook of Qualitative Research*. Sage Publications, London.

Duchin, F. (1988) “Analyzing structural change in the economy”, in Ciaschini, M. (ed.): *Input-Output Analysis: Current Developments*. Chapman and Hall, London.

Duchin, F. (1996) “Ecological economics: the second stage”, in Costanza, R., Segura, O., and Martinez-Alier, J. (eds.): *Getting Down to Earth*. Island Press, Washington DC.

Duchin, F., and Lange, G. (1994) *The Future of the Environment: Ecological Economics and Technological Change*. Oxford University Press, New York.

Duchin, F., and Szyld, D. (1985) “A dynamic input-output model with assured positive output”, *Metroeconomica* 37: 269-282.

Dyke, C. (1994): "From entropy to economy: a thorny path", in Burley, P. and Foster, J. (eds.): *Economics and Thermodynamics. New Perspectives on Economic Analysis*. Kluwer, Boston.

Faber, M. (1985) “A biophysical approach to the economy entropy, environment and resources”, in van Gool, W., and Bruggink, J. (eds.): *Energy and Time in Economic and Physical Sciences*. North-Holland, Amsterdam.

Faber, M., and Proops, J.L.R. (1998) *Evolution, Time, Production and the Environment*. Springer, Berlin.

Faber, M., Manstetten, R., and Proops, J.L.R. (1996) *Ecological Economics: Concepts and Methods*. Edward Elgar, Cheltenham.

Funtowicz, S.O., and Ravetz, J.R. (1991) “A new scientific methodology for global environmental issues”, in Costanza, R. (ed.): *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*. Columbia University Press, New York.

Funtowicz, S.O., and Ravetz, J.R. (1994) “The worth of a songbird: Ecological economics as a post-normal science”, *Ecological Economics*, 10: 197-207.

Georgescu-Roegen, N. (1971) *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

Georgescu-Roegen, N. (1975) “Energy and economic myths”, *Southern Economic Journal*, 41:347-381.

Giampietro, M. (1997) “Linking technology, natural resources, and the socioeconomic structure of human society: a theoretical model”, *Advances in Human Ecology*, vol. 6: 75-130.

Giampietro, M., Mayumi, K., and Bukkens, S.G.F. (2001) “Multiple-Scale Integrated Assessment of Societal Metabolism: An Innovative Approach to Development and

Sustainability”, mimeo.

Gowdy, J.M. (1994) *Coevolutionary Economics: The Economy, Society, and the Environment*. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam.

Gray, L.C. (1913) “The economic possibilities of conservation”, *Quarterly Journal of Economics*, 27: 497-519.

Gray, L.C. (1914) “Rent under the presumption of exhaustibility”, *Quarterly Journal of Economics*, 28: 466-489.

Hall, C.A.S., Cleveland, C.J., and Kaufmann, R.K. (1986) *The Ecology of the Economic Process: Energy and Resource Quality*. John Wiley & Sons, New York.

Herring, H. (1999) “Does energy efficiency save energy? The debate and its consequences”, *Applied Energy*, 63: 209-226.

Hotelling, H.C. (1931) “The economics of exhaustible resources”, *The Journal of Political Economy*, 39: 137-175.

Jevons, F. (1990) “Greenhouse: A paradox”, *Search*, 21 (5)

Jevons, W.S. (1865) *The Coal Question; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines*. Macmillan, London.

Kay, J.J., Regier, A.H., Boyle, M., and Francis, G. (1999) “An ecosystem approach for sustainability: addressing the challenge for complexity”, *Futures* 31: 721-742.

Kuhn, T.S. (1962) *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago University Press, Chicago.

Lotka, A.J. (1922) “Contribution to the energetics of evolution”. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 8: 147-154.

Lotka, A.J. (1956) *Elements of Mathematical Biology*. Dover Publications, New York.

Malenbaum, W. (1978) *World Demand for Raw Materials in 1985 and 2000*. McGraw-Hill, New York.

Malthus, T.R. (1778) *An Essay on Population*. Ward, Lock and Company, London.

Marshall, A. (1920) *Principles of Economics*. Macmillan, London.

Martinez-Alier, J. (1987) *Ecological Economics: Energy, Environment, and Society*. Blackwell’s Book Services, Oxford.

Martínez-Alier, J. and Roca Jusmet, J. (2000) *Economía ecológica y política ambiental*, PNUD, Mexico.

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., and Behrens, W.W. (1972) *The Limits to Growth*. PAN Books Ltd., London and Sydney.

- Mill, J.S. (1866) *Principles of Political Economy*, Longman-Green, London.
- Mirowski, P. (1989) *More Heat Than Light*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Neurath, O. (1944) *Foundations of the Social Sciences*. University of Chicago Press, Chicago.
- Noël, J.F., and O'Connor, M. (1998) “Strong Sustainability and Critical Natural Capital”, in Faucheux, S., and O'Connor, M. (eds.) *Valuation for Sustainable Development. Methods and Policy Indicators*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Norgaard, R.B. (1989) “The case for methodological pluralism”, *Ecological Economics*, 1: 37-57.
- Norgaard, R.B. (1994) *Development Betrayed*. Routledge, London.
- O'Connor, M. (1991) “Entropy, structure, and organisational change”, *Ecological Economics*, 3: 95-122.
- O'Riordan, T. (1996) “Democracy and the sustainable transition”, in Lafferty, W.M., and Meadowcroft, J. (eds.): *Democracy and the Environment. Problems and Prospects*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Odum, E.P. (1989) *Ecology and Our Endangered Life-Support Systems*. Sinuauer associates, Sunderland, Massachusetts.
- Odum, H.T. (1971) *Environment, Power, and Society*. John Wiley & Sons, New York.
- Odum, H.T., and Pinkerton, R.C. (1955) “Time's speed regulator: the optimum efficiency for maximum power output in the physical and biological systems”, *American Scientist* 43: 331-343.
- Pearce, D., and Atkinson, G.D. (1993) “Capital theory and the measurement of weak sustainable development: and indicator of 'weak' sustainability”, *Ecological Economics*, 8: 103-108.
- Pearce, D., and Turner, K. (1990) *Economics of Natural Resources and the Environment*. Harvester Wheatsheaf, Great Britain.
- Pearce, D., and Turner, K. (1990) *Economics of Natural Resources and the Environment*. Harvester Wheatsheaf, Great Britain.
- Proops, J.L.R. (1979) *Energy, Entropy and Economic Structure*. PhD Thesis, Keele University.
- Proops, J.L.R., Faber, M., and Wagenhals, G. (1993) *Reducing CO₂ Emissions. A Comparative Input-Output Study for Germany and the UK*. Springer-Verlag, Berlin.
- Quesnay, F. (1758) “Tableau Economique”, in Kuczynski, M., and Meek, R.L. (1972)(eds.): *Quesnay's Tableau Economique*. Macmillan, London.

Ramos-Martin, J. (2001): "Historical analysis of energy intensity of Spain: from a "conventional view" to an "integrated assessment", *Population and Environment*, 22: 281-313.

Ruth, M. (1993) *Integrating Economics, Ecology and Thermodynamics*. Kluwer, Dordrecht.

Scott, A. (1985) *Progress in Natural Resource Economics*. Clarendon Press, Oxford.

Simon, H.A. (1983) *Reason in Human Affairs*. Stanford University Press, Stanford.

Von Weizsacker, E.U., Lovins, A.B., and Lovins, L.H. (1997) *Factor Four. Doubling Wealth, Halving Resource Use*. Earthscan, London.

Wilson, E.O. (1998) *Consilience*. Alfred Knopf, New York.