

TTS

Arquitectura i sostenibilitat

Albert Cuchí Burgos

Temes de Tecnologia i Sostenibilitat
Temas de Tecnología y Sostenibilidad



EDICIONS UPC

cityes



Arquitectura i sostenibilitat

Albert Cuchí Burgos

Primera edició: desembre de 2005

Coordinació de la col·lecció: CITIES, Centre Interdisciplinari de Tecnologia, Innovació i Educació per a la Sostenibilitat.
<http://www.upc.edu/cities>

Aquesta publicació s'acull a la política de normalització lingüística i ha comptat amb la col·laboració del Departament de Cultura i de la Direcció General d'Universitats, de la Generalitat de Catalunya.

En col·laboració amb el Servei de Llengües i Terminologia de la UPC.

Disseny de la coberta: Edicions UPC
Fotografia de coberta: Albert Cuchí

© Albert Cuchí Burgos, 2005

© Edicions UPC, 2005
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL
Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona
Tel.: 934 016 883 Fax: 934 015 885
Edicions Virtuals: www.edicionsupc.es
A/e: edicions-upc@upc.es

Producció: Quality Impres, S.L.
Comte Güell 24-28, 08028 Barcelona

Dipòsit legal: B-4139-2006
ISBN: 84-8301-839-X

Imprés en paper lliure de clor 

Són rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del copyright, sota les sancions establertes a la llei, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment, inclosos la reprografia i el tractament informàtic, i la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec públics.

Presentació

Teniu a les mans un nou exemplar de la col·lecció Temes de Tecnologia i Sostenibilitat, promoguda per Cíties en el marc de la planificació de sostenibilitat de la UPC. Actualitzar els programes formatius de nivell universitari no és una qüestió senzilla, però segurament és necessària i essencial per formar professionals de futur que puguin contribuir, cadascun des del seu lloc de treball, al desenvolupament sostenible.

El pas que aquesta col·lecció ens proposa és consolidar nous conceptes, paradigmes i coneixements, posant a l'abast materials originals que permetin introduir conceptes ambientals i de sostenibilitat a disciplines tecnològiques impartides a la UPC. Aquesta col·lecció es compon d'una sèrie de publicacions teòriques que analitzen les relacions entre àrees de coneixement tècniques i el medi ambient. Així mateix, cal destacar que cada una d'aquestes publicacions consta de materials pràctics (exemples, casos d'estudi, etc.) disponibles a Internet, els quals es van actualitzant de forma dinàmica i periòdica.

Els destinataris d'aquesta col·lecció són tant els docents com els alumnes de les àrees de coneixement vinculades a la matèria, que vulguin aprofundir en les interrelacions entre aquesta disciplina i les qüestions relacionades amb la sostenibilitat.

Part pràctica complementària: <http://biblioteca.upc.es/e-ambit>

Índex

1	Introducció	11
2	Sostenibilitat i tècnica	13
2.1	La sostenibilitat feble	14
2.2	La sostenibilitat forta	15
3	Sostenibilitat i arquitectura	23
4	L'ensenyament de la tecnologia arquitectònica	27
4.1	Crítica a la situació actual	27
4.2	La resposta necessària. L'arquitecte com a gestor de recursos	28
4.3	L'organització de la docència actual: estratègies i continguts. El missatge ambiental subjacent	29
5	Els objectius docents per a una formació sostenibilista de l'arquitecte	33
6	Els cicles materials a l'arquitectura	35
7	Els residus domèstics	39
8	Els materials de construcció	43
8.1	La fusta	46
8.2	La terra	48
8.3	La pedra	49
9	Els fluxos energètics	61
10	L'aigua	73
11	Conclusions	79
12	Comentari bibliogràfic	83

*“...por una nueva forma de repensar la arquitectura
como recurso ambiental de toda la humanidad.”
Declaración de Barcelona sobre edificación sostenible
28 de mayo de 2003*

1 Introducció

L'objectiu d'aquest treball és generar una reflexió sobre la necessitat de promoure una reordenació radical dels estudis de tecnologia arquitectònica partint de la sostenibilitat com a objectiu social i, per tant, com a criteri restrictiu en la valoració de les propostes arquitectòniques i dels sistemes tècnics disponibles per produir-les. L'entorn que produeix aquesta reflexió és la potenciació de l'ambientalització curricular dins la UPC mitjançant el pla de medi ambient, com un dels eixos vertebradors de la formació dels seus titulats, fent propi l'objectiu de fomentar l'assoliment d'una societat amb un desenvolupament sostenible.

La demanda d'un desenvolupament sostenible no és, com habitualment es presenta, una exigència addicional que es pugui agregar senzillament a la funcionalitat dels nostres edificis per mitjà de l'aplicació d'algunes restriccions i prestacions que aquests hagin de presentar. La sostenibilitat exigeix un canvi del sistema tècnic imperant, que afecta les pròpies bases del sistema productiu de la nostra societat.

De fet, el concepte de desenvolupament sostenible neix de la constatació i de la presa de consciència de les conseqüències inexorables que el nostre sistema productiu ocasiona al medi, i prové de les bases que el recolzen. La base tècnica del nostre sistema productiu, els combustibles fòssils i l'accés sistemàtic als recursos minerals que l'ús d'aquestes fonts d'energia permet, ens sembla avui natural, de tan estesa com està en tots els camps, però ha estat producte d'una transformació que ha alterat, en el transcurs de dos segles, la nostra cultura, entesa com a relació amb el medi.

La relació entre els sistemes tècnic i productiu de les societats occidentals i els problemes de supervivència que el repte de la sostenibilitat planteja és directa, és causal; per tant la reflexió sobre les bases tècniques de qualsevol activitat, com ara l'arquitectura, resulta ineludible. L'extensió d'aquest sistema productiu arreu del món i la globalització progressiva de les xarxes comercials que el suporten, com també el volum de recursos implicats en el sistema, fan que el repte de la sostenibilitat sigui ara un repte global que afecta a tots i totes les activitats humanes.

El material que es vol produir constitueix tant un instrument pedagògic com, sobretot, una demostració de la necessitat i de la viabilitat del canvi que es proposa cap a una visió sostenibilista de l'ensenyament de la tecnologia arquitectònica. Si necessitem un nou sistema tècnic, l'ensenyament, com a aportació de coneixements, d'habilitats i sobretot de valors, és un element clau en aquest canvi. Per tant, aquest treball és una mostra dels coneixements, i sobretot de la seva nova articulació, necessaris per afrontar el repte d'una ambientalització real dels estudis de la tecnologia arquitectònica.

Algú es preguntarà si és honest plantejar un ensenyament *tècnic* sobre principis ètics determinats, com ara la sostenibilitat. En tot cas, però el que realment no és honest és pretendre que la tècnica és independent de les formes socials que l'han creada i la usen; que no forma part del conjunt

d'instruments amb els quals una cultura configura les relacions amb el seu entorn i, per tant, que és separable dels valors que la sustenten. El que no és honest, doncs, és defensar avui un ensenyament basat en una pretesa neutralitat de la ciència i de la tècnica, com si no fossin resultat d'un procés històric i, per tant, reflex de l'estructura social que les ha produït i les usa.

2 Sostenibilitat i tècnica

Quina és la relació entre la demanda de sostenibilitat i l'arquitectura? En què afecta el desenvolupament sostenible els sistemes tècnics? Quines restriccions imposa?

Si bé es tracta d'un concepte econòmic i social, la sostenibilitat es mostra sovint com una exigència essencialment tècnica, que, si bé afecta el debat econòmic i polític, pren substància i contingut en els processos tècnics que la nostra societat produeix.

En aquest apartat es vol analitzar, des de la definició del concepte de desenvolupament sostenible, la repercussió que té en el camp de l'arquitectura, i valorar tant la situació actual com les línies i tendències de futur que l'exigència de sostenibilitat marca. I, sobretot, fer-nos conscients de les veritables implicacions que el concepte de sostenibilitat estableix, no tant sobre el camp de treball de l'arquitectura, com sobre els propis fonaments tècnics de les professions que exercim.

El concepte de sostenibilitat, si bé és fruit d'una evolució llarga i complexa que, segons alguns autors, té les arrels en els fisiòcrates i és enunciat a principi dels anys vuitanta per Lester Brown, troba una formulació estàndard a l'informe "Our common future", resultat dels treballs de la Comissió Mundial pel Medi Ambient i el Desenvolupament, de les Nacions Unides, comissió encarregada de determinar les condicions en què caldria establir un desenvolupament compatible amb la conservació del medi.

L'informe, conegut com a Informe Bruntland, en referència a la seva coordinadora Gro Harlem Bruntland, presenta el model de desenvolupament sostenible com a paradigma, com a requisit per permetre el manteniment de la capacitat dels sistemes naturals que han d'assegurar la continuïtat en el temps del desenvolupament humà de la població mundial.

La definició de Bruntland és, per acceptació general, la definició estàndard del concepte de desenvolupament sostenible. Des de la seva presentació el 1987 i l'ús posterior que se'n va fer als debats a Nacions Unides, s'ha difós per tot el món com l'enunciat més acceptat entre totes les propostes que pretenen un desenvolupament ambientalment adequat. D'aquesta acceptació neixen una sèrie de fites, en forma de compromisos internacionals que reforcen el seu paper fundacional, i alhora una diversitat d'interpretacions que dilueixen el compromís que pretén aportar, cosa que li ha valgut l'acusació de "poc concloent" de què ha estat sovint objecte l'informe Bruntland.

El desenvolupament sostenible que presenta Bruntland és essencialment una demanda ètica, una proposta d'igualtat en la distribució dels recursos, la qual per tant, ha d'obtenir l'acord polític i la seva plasmació en l'àmbit del dret. No és casual que l'informe conclougui amb la demanda de la promulgació d'un seguit de drets polítics en clau ambiental per part de les Nacions Unides.

I encara que la definició de desenvolupament sostenible de Bruntland imposa explícitament una sèrie de restriccions de caràcter marcadament tècnic en la gestió dels recursos que el medi ofereix, per tal de garantir que les generacions futures hi puguin tenir accés, com ara sobre la gestió dels recursos renovables o no renovables; la demanda de sostenibilitat es refereix, d'una forma explícita, al desenvolupament econòmic i social; és un repte dirigit al camp de l'economia.

La satisfacció de les necessitats, que es vol continuar mantenint en el futur, es realitza per mitjà de béns i serveis que són el resultat del procés productiu generat pel sistema econòmic. Per produir aquests béns i serveis, cal utilitzar recursos obtinguts del medi i transformar-los en els productes que la societat mitjançant el mecanisme social, ja sigui de mercat o de planificació, establert per acordar les necessitats a la capacitat del sistema productiu. Aquesta utilització de recursos és la que, en realitzar-se sobre un estoc determinat, ocasiona la disminució de la capacitat de les generacions futures per obtenir béns i serveis i, consegüentment, de satisfer les seves necessitats.

L'acceptació del repte de Bruntland s'ha produït efectivament des del camp de l'economia, i per mitjà de dues postures enfrontades respecte a la capacitat del nostre sistema econòmic per donar-hi resposta.

2.1. La sostenibilitat feble

D'una banda, per mitjà de les institucions acadèmiques i funcionals de l'economia estàndard en la branca de l'anomenada economia ambiental –l'enfocament de la *weak sustainability* o “sostenibilitat feble” –que pretén respondre la demanda de Bruntland dins el quadre formal de la ciència econòmica establerta.

Segons aquest enfocament, el que cal mantenir estable al llarg del temps és el valor de la producció, és a dir, el valor del conjunt de béns i serveis produïts pel sistema econòmic que satisfan les necessitats de la societat. Mantenint el nivell de producció, es manté la capacitat de satisfer les necessitats al llarg del temps. Cal veure, doncs, quins són els factors que determinen la producció del sistema econòmic.

Els factors de producció són, segons l'economia estàndard, les primeres matèries, el capital i el treball, organitzats en la funció de producció que defineix la capacitat productiva del sistema. Tradicionalment, s'ha fet palesa l'elasticitat dels factors en la funció de producció, això és, la capacitat de substituir un factor per un altre mitjançant els canvis tecnològics oportuns. De fet, un factor tradicional de millora de l'eficiència del sistema productiu ha estat el canvi tecnològic, que ha permès la substitució del factor més limitant per una combinació diferent dels altres factors més disponibles. La substitució del treball pel capital ha estat una tendència evolutiva tradicional del nostre sistema productiu.

El nou repte s'interpreta, des d'aquesta visió, com la necessitat de compensar la disminució progressiva de les primeres matèries, conscients ja que el seu estoc és, per a la nostra societat globalitzada, una quantitat finita.

La proposta de l'enfocament de la “sostenibilitat feble” es basa en la flexibilitat comprovada de la funció de producció i proposa la substitució de la minva de les primeres matèries per inversió adequada en capital per tal de mantenir constant la producció final i, per tant, la capacitat de satisfer les necessitats de la societat.

Això genera restriccions i planteja problemes específics que cal resoldre dins el quadre conceptual de l'economia estàndard:

- la necessitat de detectar i conservar els serveis ambientals crítics per a la vida a la terra;
- la valoració, en unitats monetàries, del capital natural per poder mesurar l'equilibri necessari entre la pèrdua de primeres matèries i la inversió compensatòria en capital;

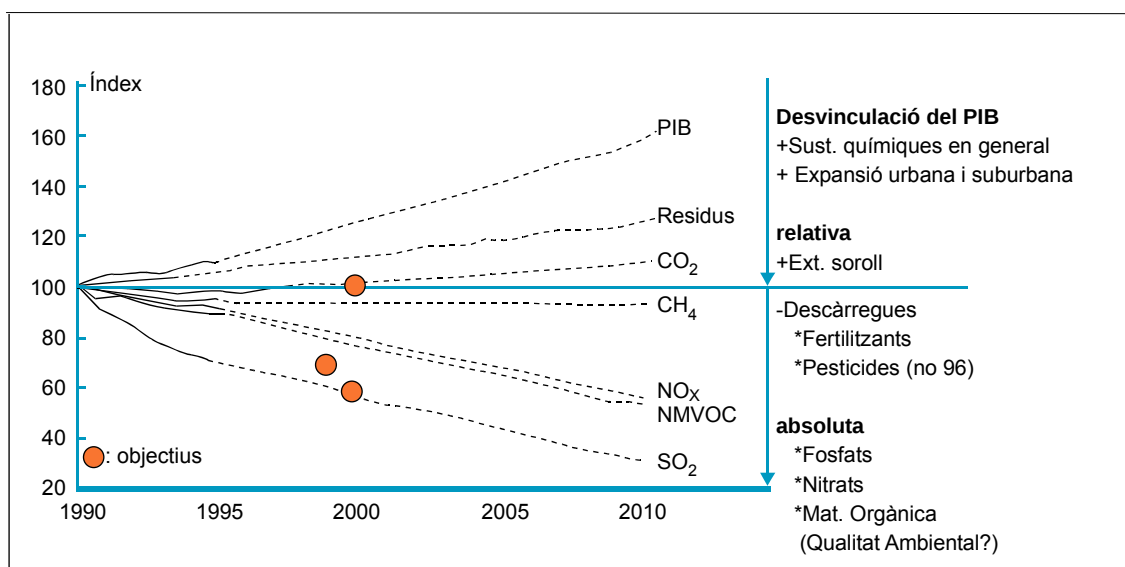
- els criteris de gestió adequats dels recursos no renovables, tant per a la seva extracció com per a la seva reinversió; sense pèrdua d'ingrés.

Les dues darreres qüestions configuren el camp de treball de l'economia ambiental, que recull camps de l'economia estàndard diversos, des d'aquesta nova visió. Les recerques i publicacions d'aquest nou camp són àmplies, i el seu ressò és gran en els àmbits de decisió polítics i empresarials.

El predomini d'aquesta visió de la sostenibilitat —que, per exemple, fa teòricament compatible el creixement econòmic continuat amb el desenvolupament sostenible— es fa palès amb l'assoliment d'acords internacionals per a la salvaguarda dels serveis ambientals crítics, com ara els acords per a la biodiversitat, la protecció de la capa d'ozó o l'estudi de les alteracions de l'atmosfera i del clima a causa de les emissions de gasos d'efecte hivernacle, qüestió aquesta que resulta molt més difícil d'acordar perquè toca un tema sensible —com es veurà més endavant— per al nostre sistema tècnic.

Així mateix, el tractat d'Amsterdam de 1997 estableix el desenvolupament sostenible com un dels objectius de la Unió Europea (UE), refereix el model de desenvolupament econòmic i social que cal definir per a la seva societat. La direcció que pren la política ambiental de la UE és tractar de desvincular el creixement econòmic —el valor monetari de la producció— dels impactes ambientals que el sistema productiu ocasiona, i així genera un desenvolupament sostenible emmarcat dins el paradigma de l'economia ambiental.

El quadre següent mostra els resultats (i les previsions futures a dia d'avui) de les polítiques de la UE en aquesta desvinculació entre una sèrie d'emissions considerades indicadores de l'impacte ambiental i l'evolució del valor de la producció del seu sistema econòmic (PIB).



Al quadre adjunt s'aprecia com els residus generats i les emissions de CO₂, tot i que no segueixen el mateix pendent que el PIB, registren un ascens paral·lel, a diferència d'altres emissions que s'han pogut desacoblar clarament. És possible realment, a llarg termini, aquest desacoblament entre els recursos materials i la generació d'utilitat per part del sistema econòmic?

2.2. La sostenibilitat forta

L'alternativa a aquesta visió de l'economia estàndard sorgeix de l'anomenada economia ecològica, branca considerada com l'enfocament de l'*strong sustainability* o de "sostenibilitat forta". Parteix de

visions sobre la relació entre l'economia i la natura molt anteriors a l'enunciat del concepte de sostenibilitat i, per tant, és incorrecte i injust considerar el seu discurs com a resposta al plantejament de l'economia ambiental, però l'anàlisi que en fa és determinant. Els punts sobre els quals fonamenta la seva crítica són:

- la impossibilitat d'acceptar, de forma indefinida, l'elasticitat en la substitució del capital natural per altres factors;
- la insuficiència del mercat com a mecanisme d'assignació eficient dels recursos no renovables, mentre les generacions futures no hi poden fer valer les seves preferències;
- la impossibilitat intrínseca de valorar de forma monetària el capital natural, ja que la natura no entén d'intercanvis mercantils i és l'autèntica “productora” dels recursos que utilitzem.

Aquest darrer punt és el més punyent, des del punt de vista tècnic, de la seva crítica a l'economia ambiental. La valoració monetària de les primeres matèries extretes del medi no té més sentit que el valor social de títol per accedir al repartiment de la producció que s'atorga a qui, també socialment, es reconeix com a propietari seu; no implica cap tipus de remuneració per a qui realment ha produït el material: la natura. El servei prestat pel medi només es podria compensar a la natura per mitjà de la restitució del valor autèntic que ha aportat al sistema econòmic amb el material que ha subministrat.

Els processos de producció que apliquem als materials, com també el consum mateix, no suposen –encara que les paraules que utilitzem així ho indiquin– ni “producció” ni “consum” de materials: la matèria ni es crea ni es destrueix. En termes econòmics, el que es produeix és “utilitat”, això és, adequació, per mitjà de la selecció i l'organització dels materials obtinguts del medi, amb vista a proveir un servei determinat, un servei que “s'extreu” del producte en el moment del consum, i des d'aquí es desorganitzen els materials, es converteixen “residus” i es dispersen pel medi.

Quina és la utilitat que ofereixen els recursos i què manca en els residus? Quin és el servei real que la natura ens ofereix?

Els materials que considerem recursos presenten, respecte d'altres i en oposició als residus, una certa disposició –que podríem anomenar “ordre”–, que és més propera a la disposició necessària per oferir la “utilitat” buscada. Així, per exemple, el que dóna utilitat als minerals comercials respecte a d'altres –i, amb ella, el valor econòmic– és que tenen una llei o concentració de metall superior a altres menes.

Amb l'ajuda d'energia, proveïda per un altre tipus d'organització en un altre tipus de materials, augmentem l'organització d'aquests materials naturals fins al punt adequat per proveir el servei, després del qual es dispersen en el medi en un procés continuat de desorganització, fenomen conegut com a degradació entròpica i que marca la tendència en els processos naturals cap a la màxima dispersió de materials i energia.

Amb el procés de conversió de recursos en residus dispersos –propi del nostre sistema productiu– estem gastant una part del capital natural que la Terra ens ofereix (la seva concentració en certs materials, per exemple) i augmentant la velocitat de dispersió amb què els processos físics naturals haurien operat.

Des d'una consideració estricta de la sostenibilitat física, mantenir la capacitat de les generacions futures per satisfer les seves necessitats implica mantenir el capital natural que ens hem trobat a la natura, de manera que puguin disposar del mateix nivell de recursos que la generació actual. Mantenir constant aquest capital natural implica “retornar” els residus a la qualitat de recursos, retornar-los al mateix nivell d'organització en què els trobem a la natura per poder-los tornar a utilitzar, això és,

tancar els cicles materials en tots els processos tècnics

Aquesta exigència de sostenibilitat requereix el reciclatge dels residus fins a tornar-los la qualitat de recursos a un ritme adequat, i això implica:

- l'ús d'energia; energia per moure els materials i energia per als processos necessaris per retornar-los al nivell d'organització adequat;
- la tecnologia necessària per fer-ho, per als processos tant de recuperació i concentració com de reorganització de materials;
- l'organització social que mantingui l'interès econòmic per realitzar el conjunt del procés.

El nostre sistema productiu només considera viable econòmicament el camí des del recurs natural fins al producte, i dedica al residu tan sols l'atenció necessària per allunyar-lo abans que no ens cobreixi – dispersant-lo al medi amb un fort impacte– o ens ocasioni problemes de salut, i només presta atenció al reciclatge quan la concentració momentània de residu es troba amb una llei superior a la de les mines naturals.

La societat, fins que no atengui aquesta necessitat de tancar el cicle, no desenvoluparà les tecnologies de concentració i l'organització social necessàries per fer-ho, ja que prefereix viure del capital natural que la proveeix de recursos, amb la qual cosa lleva a les generacions futures la possibilitat de fer-ho. Aquí cal una decisió política, i en aquest context pren tot el sentit la demanda de sostenibilitat expressada en els termes de la definició de Bruntland.

Però hi ha algú que tanqui els cicles materials? Existeix algun sistema tècnic que serveixi d'exemple? Hi ha algun model d'organització per tancar el cicle dels materials?

El planeta Terra és un sistema amb un balanç d'intercanvi de materials amb el seu entorn pràcticament nul, i està sotmès a un flux d'energia en forma de radiació d'alta temperatura que dispersa cap a l'espai en forma de radiació a baixa temperatura. En aquest sistema, s'ha desenvolupat un model de reciclatge de materials aprofitant principalment aquesta degradació de l'energia solar (l'energia tampoc no es crea ni es destrueix), el qual es manté operatiu des de fa alguns milers de milions d'anys, i del qual formem part: la biosfera.

La biosfera és el model i el recurs principal de què disposem en el repte d'aconseguir tancar els cicles materials en els processos tècnics.

La biosfera és el model en la mesura que s'ha adequat a l'ús dels materials en cicles de diversa magnitud temporal i espacial, cicles que es mouen entre dipòsits de materials i amb velocitats proporcionades a les quantitats d'elements gestionats, i amb energies disponibles.

Així, la biosfera s'estén sobre la superfície de la litosfera i la hidrosfera, en ambdós casos majoritàriament propera a la interfície amb l'atmosfera, i els tres entorns funcionen alhora com a dipòsits dels elements necessaris i zones de trànsit, aprofitant que l'energia solar mou l'aigua des de la hidrosfera fins a l'atmosfera, que l'energia de la gravetat fa caure una part sobre la litosfera i l'escola de nou cap a la hidrosfera, i que l'energia geotèrmica recicla lentament els materials en la litosfera, incloent-hi el fons de la hidrosfera. Basa la seva estratègia de gestió dels materials sobre el cicle de l'aigua i l'energia solar captada per les plantes verdes, aprofitant el primer com a gran cinta transportadora de materials i la segona com l'energia necessària per operar-la.

La biosfera és el recurs principal que tenim, ja que proporciona la tecnologia de reciclatge per tancar el cicle de molts materials, de forma que obtenim d'ella molts recursos i absorbeix nombrosos residus.

De fet, quan parlem, com ho fa l'informe Bruntland, de materials renovables o no renovables ens referim en el primer cas, de materials el cicle del qual és tancat per la biosfera i, si els obtenim i tornem els seus

residus en la forma i amb el ritme adequat, poden ser-nos procurats de forma pràcticament il·limitada en el temps, i així s'obté el model de recurs per a un desenvolupament sostenible. Material no renovable és el que no entra en aquest circuit biosfèric, i el seu cicle cal que sigui gestionat totalment pel nostre sistema tècnic.

La biosfera es presenta així com el capital principal, sigui com a model o com a suport tècnic, per accedir al desenvolupament sostenible, i cal valorar-la com la nostra millor "màquina".

Un exemple central en aquesta visió del cicle tècnic és la consideració dels tipus d'energia utilitzables i la seva productivitat.

Com és conegut, la disponibilitat d'energia és imprescindible per poder realitzar qualsevol activitat. Moure materials, transformar-los, mantenir un espai en unes condicions diferenciades respecte al seu entorn; tota activitat del cicle tècnic requereix l'ús d'energia. I l'energia l'obtenim de diverses fonts, encara que la més habitual és aprofitar l'energia química continguda en els enllaços de determinats materials. Així, per exemple, a escala mundial, l'any 1998 el 79,6% de l'energia comercial es va obtenir dels combustibles fòssils.

Font	Energia Primària (EJ)	Energia Primària (10 ⁹ TEP)	% del total
Combustibles fòssils	320	7,63	79,6
Petroli	142	3,39	35,3
Gas natural	85	2,02	21,1
Carbó	93	2,22	23,1
Renovables	56	1,33	13,9
Hidràulica	9	0,21	2,2
Tradicional	38	0,91	9,5
"Noves" renovables ^d	9	0,21	2,2
Nuclear	26	0,62	6,5
Nuclear ^e	26	0,62	6,5
Total	402	9,58	100,0

Si la condició necessària de sostenibilitat dels processos tècnics és que cal tancar els cicles materials, hem de tancar també els cicles dels materials que ens proveeixen d'energia: un cop realitzada la combustió dels hidrocarburs, per exemple, hauríem de recollir les espècies químiques resultants i tornar a ordenar-les en la forma original. Malauradament, aquesta segona part del cicle ens exigiria més energia de la que hem obtingut cremant el combustible, de manera que, si es fa dins el sistema tècnic, no resulta profitós emprar combustibles si n'hem de tancar el cicle material.

La biosfera, en canvi, aprofita la degradació de l'energia solar com a principal font energètica del sistema: l'única que arriba al planeta continuadament en forma de radiació de temperatura elevada (5.000°K) i que es retorna també continuadament a l'espai en forma de radiació a baixa temperatura (uns 300°K). A banda de l'energia geotèrmica, que recicla lentament els minerals, l'energia potencial de la gravetat és, com ja s'ha comentat, la font essencial d'energia que mou el sistema biosfèric.

De fet, tan sols la "high tech" biosfèrica és capaç de reciclar els combustibles –reduint de nou el carboni– i retornar-ne les cendres a materials portadors de nou d'energia química als seus enllaços a través de la captació i la fixació d'una quantitat molt superior d'energia solar. Si volem disposar de la potència que ens ofereixen els combustibles fòssils, cal considerar la quantitat de biosfera que necessitem per tancar els seus cicles materials: l'estarem utilitzant com a "gran màquina" del nostre sistema tècnic.

Aquesta “quantitat de biosfera” es pot mesurar per mitjà del que Rees i Wackernagel han definit com la “petjada ecològica” (*ecological footprint*), és a dir, la quantitat de territori necessari per produir el recurs i absorbir els residus; en aquest cas, per tancar el cicle de carboni dels combustibles.

La taula següent ens mostra la “productivitat” energètica anual d'una hectàrea de territori o, expressada en forma de petjada ecològica, la quantitat de territori necessària per produir 100 GJ (Gigajoules, milers de milions de Joules), obtinguda de diferents fonts:

Energy source	productivity GJ/hectare & year	footprint hectare/100 GJ & year
Fossil fuel:		
ethanol approach	80	1.25
CO ₂ absorption approach	100	1.0
biomass replacement approach	80	1.25
Hydro-electricity (average)	1000	0.1
lower course	150-500	0.2-0.67
high altitude	15000	0.0067
Solar hot-water	>40000	0.0025
Photovoltaics	1000	0.1
Wind energy	12500	0.008

(Font: Mathis Wackernagel; William Rees. *Our Ecological Footprint*. Canadà: New Society Publishers, 1996)

Per tal d'avaluar la quantitat de territori necessari per tancar el cicle dels combustibles fòssils, Rees i Wackernagel proposen tres aproximacions diferents: considerar la seva substitució per etanol obtingut del conreu de plantes la transformació posterior de les quals permetrà obtenir aquest combustible; la seva substitució per combustibles obtinguts de la biomassa, o bé considerar el tancament del cicle del carboni –el component principal de les cendres dels combustibles fòssils amb l'aigua– mitjançant la seva reducció en el creixement de vegetació. En tots tres casos, per cada 100 GJ d'energia obtingut de combustibles fòssils cal dedicar la productivitat anual d'una hectàrea de biosfera.

Si considerem que un litre de benzina procura uns 40 MJ (megajoules, milions de joules) d'energia en la seva combustió i que un automòbil pot recórrer uns 15 quilòmetres amb aquest combustible, la quantitat de territori necessària per fixar el carboni alliberat en recórrer 37.500 km anuals és d'una hectàrea. Un automòbil familiar pot recórrer fàcilment la meitat d'aquesta quantitat, i aleshores necessita mitja hectàrea per absorbir les emissions degudes al seu consum.

Però el quadre de Rees i Wackernagel mostra també l'eficiència territorial de l'obtenció d'energia per mitjà d'altres fonts. Així, veiem com l'energia hidroelèctrica és, en general, deu cops més eficient que l'ús de combustibles fòssils, igual que l'energia fotovoltaica; que l'energia eòlica la supera en 125 cops, i com l'energia solar tèrmica –amb un sistema de captació tan poc eficient com els plafons tèrmics plans– és 400 cops més eficient que cremar hidrocarburs. Fent una lectura comparativa de l'eficiència dels sistemes energètics competitius econòmicament avui dia amb els combustibles fòssils, veiem que són aquells que superen la seva eficiència, com a mínim, en un factor 100, i aquest el valor resulta una aproximació al “dumping” ambiental que possibilita l'ús dels combustibles fòssils com a subministradors d'energia.

En qualsevol cas, des d'aquest enfocament de la sostenibilitat, es conclou que l'ús de l'energia és limitat ja que la disponibilitat territorial és limitada, i s'estableix un rànquing d'eficiència de les diferents fonts energètiques que altera substancialment l'ordenació actual establerta al mercat amb l'única consideració del seu cost monetari.

Però la dependència dels recursos biosfèrics no és nova. Al contrari, un sistema tècnic "orgànic" ha estat el model històric sobre el qual s'han edificat les societats ancestrals, prèvies a la revolució industrial que va modificar tan radicalment les nostres formes de producció.

Així, per exemple, es considera que amb els sistemes disponibles a començament del segle XIX era possible obtenir anualment, de forma sostenible, d'una hectàrea de bosc una quantitat de fusta de l'ordre de 5 m³, cosa que, considerant un poder calorífic de 12 MJ/kg i una densitat de 500 kg/m³, suposava una disponibilitat anual de 30.000 MJ/ha de bosc. Igualment, obtenir la potència d'un animal de tir o de càrrega depenia de la disponibilitat d'una porció de territori destinada a la seva alimentació.

Una tona de carbó extreta de les mines proporcionava una quantitat d'energia similar mercès a una potència calorífica superior de 30 MJ/kg. La utilització d'aquesta font d'energia permetia "alliberar" una quantitat de sòl equivalent per destinar-la a l'alimentació humana, i així també s'obviava la necessitat de pastures per animals de tir o boscos per a fusta. La superfície total d'Anglaterra, Gal·les i Escòcia, el centre inicial de la revolució industrial, estesa avui per tot el món, és de 228.000 km². El 1820 l'extracció de carbó de la Gran Bretanya va suposar la disponibilitat d'un muntant d'energia equivalent a la que podia proporcionar tot el seu territori si s'hagués destinat exclusivament a produir energia.

Un canvi d'aquest abast en la disponibilitat energètica implica un canvi cap a un model energètic diferent, i aquest model es desvincula de la biosfera com a font de recursos, i es fa autònom respecte del territori. Fins i tot, el desenvolupament de tècniques agrícoles basades en el consum conspicu d'energia, amb inputs energètics més elevats que l'energia que s'obté en forma d'aliment, permet restringir al mínim la quantitat de territori necessari per a l'alimentació, l'únic del qual no podem prescindir.

Aquest alliberament de la dependència del territori, fomentada per l'ús de recursos energètics no renovables, va permetre un creixement enorme de la població i un augment del flux de materials que va ocupar, amb noves necessitats i estratègies, el sòl alliberat. La majoria dels processos tècnics es van anar adequant a aquesta independència de la biosfera i del territori que la suporta, a mesura que s'abandonava el sistema tècnic "orgànic" pel nou sistema tècnic basat en l'ús sistemàtic de recursos minerals obtinguts mitjançant la potència proporcionada per un recurs energètic també "mineral" encara que d'origen orgànic. Encara avui és possible reconèixer el trànsit des de les primeres matèries orgàniques a les minerals com a base de nombrosos productes de la vida quotidiana: de les fibres naturals com el cotó o el fil, a les fibres sintètiques en el vestit; del cuir i les fibres vegetals en els recipients, al vidre i els plàstics i metalls; tots els productes tradicionals resoltos amb materials de base orgànica han tingut una traducció –òbviament més "econòmica"– a materials de base mineral.

L'accessibilitat als recursos minerals –i, especialment, als metalls– era limitada en una societat orgànica, a causa, essencialment, de la disponibilitat de potència necessària per moure terres per tal d'arribar fins al mineral i separar-ne el metall amb la llei adequada, disponibilitat molt limitada en un entorn orgànic. Tot i així, la història de la mineria prèvia a la revolució industrial és el relat de la desforestació d'amplis territoris i la degradació de moltes zones per obtenir quantitats de metalls ínfimes enfront de les obtingudes posteriorment per la nova cultura tècnica.

Amb la generalització dels combustibles fòssils i de les màquines que transformen la calor de la seva combustió en treball, aquesta potència permet accedir a uns recursos minerals a una escala mai igualada. La independència d'uns recursos orgànics –sempre limitats a la seva producció per quantitats limitades de territori–, aconseguida amb uns nous recursos minerals disponibles en quantitats enormes tan sols augmentant la velocitat de l'extracció, dona lloc a un món diferent.

El bombeig sistemàtic de recursos minerals, la implantació progressiva d'un sistema tècnic de base mineral, provoca la disseminació continuada de nous materials a l'entorn. L'extracció de minerals, la seva transformació en productes i –posteriorment al consum de la seva utilitat– en residus, provoca el bombeig continuat al medi de materials fins aleshores majoritàriament desconeguts en qualitat, en quantitat o en concentració. I aquest medi està ocupat per la biosfera o pels sistemes que li serveixen de suport.

Aquest abocament de materials al medi natural que no poden ser circulats per la biosfera n'ocasiona la degradació progressiva en obturar els seus canals de circulació de materials. La degradació de la biosfera és inherent al bombeig continuat de materials produït pel nostre sistema tècnic mineral. Tots els problemes ambientals actuals poden ser reduïts, en darrera instància, a les alteracions ocasionades per l'emissió de materials a l'atmosfera, a la hidrosfera o al sòl.

Així, l'obertura sistemàtica dels cicles materials que opera el nostre sistema tècnic de base mineral és la causa tant de la disminució continuada dels recursos que plantegen el repte de la sostenibilitat com dels problemes ambientals que afecten la biosfera, el gran recurs de què disposem per aconseguir-la.

L'abandonament de la capacitat productiva de la biosfera –del territori– com a suport del sistema productiu fa que la percepció del problema ambiental s'hagi produït no des d'una perspectiva econòmica sinó bàsicament d'afectacions a la salut –no deixem de ser animals dependents de la biosfera– i de la sensibilitat social envers la natura, el paisatge i la vida vegetal i animal. Tant sols per a les societats “arcaiques”, que encara viuen en un sistema tècnic orgànic, la qüestió es percep com un problema vital, lluny de la percepció social dominant a les societats occidentals. Per a aquelles, el deteriorament del medi natural equival al deteriorament de la seva qualitat de vida.