



AgEcon SEARCH

RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.



La Valutazione dei Servizi Ecosistemici. Proposta per un Approccio Termoeconomico

Longhitano D.¹

¹ Istituto Nazionale di Economia Agraria (INEA)
longhitano@inea.it

Paper prepared for presentation at the 1st AIEAA Conference
'Towards a Sustainable Bio-economy: Economic Issues and Policy Challenges'

4-5 June, 2012
Trento, Italy

Summary

The main objective of this communication is to review the theoretical ecosystem and agroecosystem services assessment's methods and to propose a thermoeconomic approach. The logic of thermoeconomic approach consists in analysing the use of natural resources during the production process, interpreting it as a thermodynamic conversion in order to assess the overall specific energy consumption of the systemic components arriving at estimates of fluxes and energy costs. This study analyses comparatively the main thermoeconomic-based approaches to verify the feasibility of the "energy value" as an appraisal criterion of agroecosystem services. In particular among the reviewed approaches the Emergy synthesis seems the most appropriate tool to be empirically applied on the study of agricultural systems even at the farm level, and this in particular taking into account the new architecture of the database of the Italian FADN, although they are complementary tools to traditional methods of decision analysis.

Keywords: thermoeconomic approach, agroecosystem services, exergy, emergy, environmental accounting

JEL Classification codes: Q56, Q57

La Valutazione dei Servizi Ecosistemici. Proposta per un Approccio Termoeconomico

Davide Longhitano¹

¹ Istituto Nazionale di Economia Agraria (INEA)

1. INTRODUZIONE

La programmazione di politiche ambientali e agroambientali deve tenere conto di molti aspetti come l'incremento demografico, i cambiamenti climatici e il progressivo degrado di molte risorse naturali e servizi ecosistemici. Per questo a livello europeo è stata modulata la *Strategia 2020*, centrata sulla crescita economica sostenibile e che ha portato alla recente comunicazione della Commissione *L'innovazione per una crescita sostenibile: una bioeconomia per l'Europa* (COM [2012] 60). Quest'ultima ha come scopo principalmente di promuovere un piano d'azione basato su un approccio interdisciplinare e intersettoriale, coerente al problema della crescita sostenibile al fine di incentivare aspetti legati alla crescita della competitività mediante l'innovazione e l'uso efficiente delle risorse naturali, riconciliando la sicurezza alimentare con lo sfruttamento sostenibile delle risorse. In questo modo è possibile affrontare le grandi sfide dei cambiamenti climatici e del declino della biodiversità amplificate dagli evidenti rischi della crisi economica in corso nei Paesi occidentali. Il termine "bioeconomia" in questo caso si riferisce a un'economia fondata sulle risorse biologiche provenienti dagli ecosistemi terrestri e marini e sui loro meccanismi, comprese le risorse di scarto rappresentate dai rifiuti, incentivando lo sviluppo e l'espansione di quella che Gunter Pauli ha recentemente definito "*Blue Economy*", un'economia cioè fondata su tecnologie ispirate dal "funzionamento" della natura attraverso la strategia della *biomimesi*. Sempre in questo contesto si inseriscono gli orientamenti dalla Commissione concretizzati nelle recenti Comunicazioni COM [2010] 672 e COM [2011] 244, che riconoscono l'agricoltura come attività che produce beni pubblici ambientali, caratterizzando anche il dibattito sulla riforma in corso della Politica Agricola Comune (PAC) post-2013. L'agricoltura, infatti, svolge un ruolo chiave nella produzione di beni e servizi che hanno un valore per la collettività ma che non riescono a essere sufficientemente valorizzati sul mercato, pertanto la sfida sta nell'assicurare agli agricoltori il ricavo di un reddito equo dal mercato, continuando il contributo espresso nella fornitura di servizi ambientali fondamentali per il benessere sociale. Tuttavia, queste posizioni presuppongono la necessità di un cambiamento culturale di paradigma da parte non solo delle Istituzioni pubbliche ma anche degli operatori agricoli implicando una visione delle politiche agricole radicalmente diversa rispetto al passato, verso cui la tutela del capitale naturale non può più essere percepita come "sacrificio del benessere" bensì come una sua massimizzazione. Tutto ciò quindi pone l'attenzione sulla valutazione dei servizi ecosistemici, che nel caso dell'agricoltura richiede come assunto fondamentale la visione globale delle interazioni che si instaurano a livello ambientale nel processo produttivo. In tal senso emerge la centralità dell'agroecosistema inteso come la sede di trasformazione simultanea di flussi di materia ed energia (input) in prodotti agricoli finali (output) e da cui possono generarsi servizi e disservizi ecosistemici. Un agroecosistema, infatti, si caratterizza come un complesso di componenti interagenti, dove ogni componente è a sua volta un sistema. Di conseguenza il suo comportamento non deriva dalla sovrapposizione di effetti, bensì si contraddistingue per la presenza di "proprietà emergenti", cioè che si manifestano solo a un certo stadio di organizzazione. In tal senso la stessa sostenibilità può essere definita come una proprietà emergente dell'ambiente. Il riconoscimento di questa complessità e della stessa struttura sistemica è quindi cardinale nella valutazione dei servizi ecosistemici. Su questa base con la presente comunicazione si vuole riconsiderare concettualmente il processo valutativo dei servizi agroecosistemici proponendo l'approccio interdisciplinare *termoeconomico*, sviluppato a livello teorico partendo dall'analisi bioeconomica di Georgescu-Roegen e spesso considerato eterodosso negli studi economici. La logica

dell'analisi termoeconomica consiste nell'analizzare l'utilizzo delle risorse naturali durante il processo produttivo, interpretandolo come una trasformazione termodinamica in modo da poter valutare complessivamente il consumo energetico specifico delle componenti sistemiche arrivando alla stima dei flussi e dei costi energetici. Lo studio analizza comparativamente i principali metodi basati sull'approccio termoeconomico al fine di individuare il grado di effettiva fattibilità dell'utilizzo del "valore energetico" come criterio di stima dei servizi agroecosistemici.

2. IDENTIFICARE, QUANTIFICARE E VALUTARE I SERVIZI ECOSISTEMICI

Un ecosistema rappresenta la combinazione complessa e dinamica di organismi viventi con il loro ambiente naturale. Da queste intime interrelazioni i sistemi ecologici svolgono numerose funzioni fornendo direttamente e indirettamente beni e servizi fondamentali per la sopravvivenza (Costanza *et al*, 1997). Su tale base i Servizi Ecosistemici (SE) possono essere definiti come quell'insieme di processi e condizioni che si stabiliscono negli ecosistemi naturali rendendo possibile la sopravvivenza della vita umana (Daily, 1997). Questi riguardano ad esempio il cibo, l'acqua e il suo approvvigionamento, la purificazione dell'aria, il riciclo naturale dei rifiuti, la formazione del suolo, l'impollinazione e i meccanismi regolatori naturali, ecc... Al fine di valutare approfonditamente le conseguenze che i cambiamenti degli ecosistemi possono avere sul benessere dell'umanità, nel 2001 le Nazioni Unite hanno implementato il *Millennium Ecosystem Assessment* (MA), un programma di ricerca orientato alla valutazione degli ecosistemi in modo da identificare i principali cambiamenti in corso e le possibili opzioni per ripristinare, conservare e migliorare l'uso sostenibile degli stessi. Il progetto ha portato alla stesura di quattro volumi in cui sono stati messi in risalto gli stati degli ecosistemi, le loro tendenze e potenziali scenari futuri. Tra i principali aspetti emersi dal rapporto del MA appare il significativo impatto che l'attività antropica ha avuto e continua ad avere sullo stato di salute degli ecosistemi. In particolare su 24 servizi ecosistemici studiati, solo 4 hanno mostrato un miglioramento nel corso dell'ultimo cinquantennio, 15 risultano in grave declino, mentre 5 si trovano in uno stato sostanzialmente stabile, sebbene minacciati in alcune zone del globo (MA, 2005). Complessivamente il MA stima che il 60% dei SE del pianeta sia in uno stadio di degrado di cui il livello più critico riguarda la biodiversità e in particolare quella delle specie marine, minacciate dai cambiamenti climatici e dall'inquinamento da nutrienti. Le conseguenze sul lato del benessere dell'umanità dovute alla perdita della biodiversità e di altri SE sono palesi e costituiscono una barriera notevole anche al raggiungimento degli obiettivi della Dichiarazione del Millennio (*Millennium Declaration*) dell'ONU, come la riduzione della fame nel Mondo definita nell'impegno di dimezzare il livello di affamati entro il 2015 (UN, 2008)¹. Secondo il *Millennium Ecosystem Assessment* i SE possono essere classificati in quattro categorie principali quali: i servizi di approvvigionamento (fornitura di cibo, acqua, legname e fibre); i servizi di regolazione (regolazione di condizioni climatiche, assimilazione dei rifiuti, diffusione delle malattie); i servizi culturali (relativi alla bellezza, all'ispirazione e allo svago, contribuendo al benessere spirituale); e i servizi di supporto (formazione del suolo, fotosintesi, cicli biogeochimici). È quindi abbastanza chiara l'importanza della tutela degli ecosistemi e della loro capacità di fornire beni e servizi su cui si basa la stessa esistenza umana, anche se risulta difficile se non impossibile, valutare i SE in termini economici, sebbene questo passaggio appare fondamentale al fine di orientare specifiche politiche volte alla protezione dei patrimoni naturali. La sfida in particolare è quella di integrare il valore dei SE nei processi decisionali. Tuttavia i metodi di valutazione tradizionali basati sui meccanismi di scambio sul mercato non sempre considerano adeguatamente l'insieme delle funzioni svolte dagli ecosistemi. Il rischio è quindi che il valore stimato dei

¹ Questa consapevolezza ha portato nel 2007 i ministri dell'ambiente del G8+5 nella Conferenza di Potsdam a promuovere uno studio globale sui benefici economici della biodiversità, vagliando un progetto sull'economia della perdita degli ecosistemi e della biodiversità (*The Economics of Ecosystems and Biodiversity*, TEEB) in modo da migliorare la comprensione del valore economico dei servizi ecosistemici (TEEB, 2008).

SE potrebbe non includere pienamente la loro reale funzione di supporto alla sopravvivenza e al benessere dell'umanità a causa della distanza concettuale tra efficienza economica e stabilità ecologica (Sagoff, 2011). In particolare l'economia dei SE non può fare a meno di una teoria ecologica generale che permette da un lato la corretta identificazione dei servizi ecosistemici e della loro funzione sul benessere collettivo, e dall'altro consente di definire anche tramite il sistema dei prezzi, un'indicazione sulla loro effettiva scarsità e vulnerabilità di fronte alla domanda. Ciò presuppone una forte collaborazione interdisciplinare finalizzata all'intima comprensione dei principi ecologici e biofisici che regolano gli ecosistemi stessi per poi passare a una valutazione d'insieme. È quindi evidente l'esigenza di un cambio di paradigma sul campo della valutazione basata su una sorta di "valore biofisico" riconoscendo la complessità anche concettuale del valore di un servizio ecosistemico (Liu *et al*, 2010). Il presente contributo si basa su tale considerazione prendendo in rassegna alcuni dei principali metodi di valutazione biofisica al fine di compararne l'applicabilità nel caso specifico della valutazione economica dei servizi agroecosistemici. L'agricoltura, infatti, oltre a usufruire di molti SE (es. l'impollinazione anemofila ed entomofila, il ciclo dei nutrienti, il controllo naturale di organismi potenzialmente dannosi, ecc.), figura al contempo come un'attività che fornisce servizi ecosistemici (Heal e Small, 2002), o più propriamente servizi agroecosistemici (SAE).

3. L'APPROCCIO TERMOCOMUNICAZIONE

In questo studio per approccio *termoeconomico* si intende l'analisi dei processi economici utilizzando le basi teoriche della termodinamica e dell'ecologia. Più precisamente il termine "termoeconomia" è stato coniato da Tribus ed Evans (1963) in riferimento alla combinazione tra l'analisi economica e termodinamica nello studio dei costi energetici nel processo di desalinizzazione delle acque marine. La termoeconomia, infatti, si è sviluppata soprattutto nel campo dell'ingegneria ecologica e termotecnica in relazione all'ottimizzazione dei costi di produzione energetici utilizzando i flussi *exergetici*² (per questo definita anche *exergoeconomia*) come base razionale per l'ottimizzazione delle risorse energetiche (Valero *et al*, 1993). In realtà l'idea di combinare l'analisi economica con i principi della fisica compare già agli albori dell'affermazione della stessa scienza economica intorno alla metà del 1700 con la dottrina fisiocratica, la quale riconosceva la supremazia della "terra" assumendo che la formazione della ricchezza avvenisse esclusivamente grazie all'agricoltura, unica attività produttiva a differenza di quella manifatturiera e del commercio considerate improduttive e sterili. Più avanti con l'avanzamento degli studi sulla termodinamica dovuti a Carnot e Clausius inizia una vera e propria corrente (sotto certi aspetti rivoluzionaria) sull'analisi dei processi economici alla luce delle leggi della fisica e della biologia su cui Lotka (1924) coniò il termine di "economia biofisica". Il primo studioso che ha applicato i principi della termodinamica all'analisi economica, tentando di conciliare la teoria del valore basata sul lavoro, è stato il teorico socialista Podolinsky (1883), il quale evidenziava alcune criticità della stessa idea di socialismo scientifico giacché trascurava i limiti fisici delle risorse naturali (Cleveland, 1987). Molti sono gli studi e gli autori che seguono approcci interdisciplinari analoghi utilizzando il ricorso a modelli biofisici nell'analisi economica³. Un esempio è Frederick Soddy (1922), Nobel per la chimica nel 1921, che analizzò la crescita economica intesa nell'aumento di produzione e consumo, di fronte alle leggi che regolano la disponibilità delle risorse naturali. Con l'avvento e l'avanzare della crisi degli anni trenta, si svilupparono vere e proprie correnti di pensiero come quella del movimento tecnocratico americano (*Technical Alliance*) teorizzato da Howard Scott che presupponeva che l'energia fosse il fattore determinante dello sviluppo economico al punto di proporre la sostituzione della moneta con dei certificati energetici, emessi in funzione dell'ammontare

² Si veda più avanti

³ Per una rassegna storica si veda ad esempio Cleveland (1987), Martinez-Alier (1987), Bryant (2009).

totale dell'energia usata per la produzione di beni e servizi (Cleveland, 1987). Tuttavia è dall'inizio degli anni settanta del secolo scorso che questi studi si consolidano anche in conseguenza ai diversi problemi che si presentarono come emergenza globale. Si pensi alle crisi energetiche o alla sempre più evidente degradazione ambientale dovuta alle attività produttive, il che ha stimolato la presa di coscienza da parte della comunità scientifica e della stessa opinione pubblica, rafforzata dopo la pubblicazione dello studio di Meadows e colleghi "*The Limits to Growth*" (1972) commissionato dal Club di Roma. Il rapporto Meadows, infatti, metteva in luce le criticità alla crescita economica e demografica, imposte dalla limitata disponibilità di risorse naturali e della limitata capacità di assorbimento degli inquinanti da parte dell'ambiente. Sempre nello stesso periodo appare l'opera di Barry Commoner (1971) che affronta le principali problematiche ambientali di quegli anni segnando il percorso disciplinare dell'ecologia politica. È in questo periodo che si sviluppa l'analisi energetica applicata all'economia, al fine di valutare in termini assoluti la quantità di energia richiesta nella produzione di beni e servizi. Inizialmente sono stati seguiti due approcci, l'analisi Input-Output e l'analisi di processo. La prima mira a valutare l'energia totale impiegata, secondo lo schema di elaborazione contabile proposto da Leontief (1986) in modo da evidenziare anche l'interdipendenza strutturale di un sistema economico, descrivendo i flussi energetici impiegati tra tutti i settori in un tempo dato. L'analisi di processo invece, consente di avere informazioni più dettagliate sui consumi energetici mediante un esame sistemico del processo produttivo riguardante gli input diretti e indiretti utilizzati (Nillsson e Kristoferson, 1976; Ozkan *et al*, 2004). Col passare del tempo sono state affinate le tecniche di analisi energetica, implementando diverse applicazioni operative estendibili su piccola e su larga scala. Sempre in questo periodo cominciano i lavori pionieristici di Georgescu-Roegan (1971; 1975) che introduce il concetto di entropia e della seconda legge della termodinamica nello studio dei processi economici. Altri importanti contributi derivano dalle ricerche di Odum (1971) che basandosi sul principio di massima potenza di Lotka (1922) definisce i presupposti per l'analisi energetica degli ecosistemi sviluppando i concetti di *eMergia* ed *Embodied Energy*, intendendo il contenuto totale di energia contenuta negli input necessari a produrre un dato output. Molto rilevanti sono ancora i contributi di Ayres (Ayres e Kneese, 1969; Ayres 1978) dove è utilizzato un modello di bilancio materia-energia ispirato al primo principio conservativo della termodinamica; di Daly (1977) che introduce i principi dell'economia dello stato-stazionario, da cui deriva la regola del capitale naturale costante; di Costanza (1980) che sviluppa ulteriormente i principi della *embodied energy* e le sue implicazioni sulla teoria del valore economico. Tutto ciò ha portato all'affermarsi di un campo di ricerca economico ben definito quale appunto l'*Ecological Economics*, il cui obiettivo di studio mira ad affrontare le relazioni tra ecosistemi e sistemi economici nel senso più ampio, rinsaldando il presupposto dell'interdisciplinarietà e distinguendosi dall'economia ambientale e dall'analisi economica tradizionale poiché considera il sistema economico come un sottosistema di quello ecologico (Costanza, 1991)⁴. L'avanzare degli studi e dell'interesse da parte della comunità internazionale sul rischio potenziale dei cambiamenti climatici ha visto rinnovare all'inizio del millennio l'interesse verso approcci interdisciplinari tra termodinamica, energia ed economia (Bryant, 2009). Diversi sono i contributi presentati nell'ultimo decennio. Tra quelli di carattere più generale si ricordano Candeal *et al* (2001) che accostano la teoria dell'utilità a quella dell'entropia termodinamica, quello di Chen (2007) che propone una teoria termodinamica dell'economia ecologica da un punto di vista biofisico, mentre Bryant (2009) prova a formulare una teoria generale termodinamica dell'economia affrontando in questa prospettiva la politica monetaria e l'economia dei prodotti energetici anche alla luce dei cambiamenti climatici. Tornando alla questione originaria che anima la presente comunicazione, di seguito sono rassegnati alcuni degli studi che utilizzano l'approccio termoeconomico nella valutazione dei servizi ecosistemici e della sostenibilità, basati su alcuni concetti fondamentali della termodinamica, quali l'entropia e l'exergia.

⁴ Un esempio concreto di questa affermazione disciplinare è dato dall'istituzione dell'*International Society of Ecological Economics* (ISEE) nel 1989, di cui Robert Costanza è stato il primo presidente (<http://www.ecoeco.org> - accesso: Aprile 2012).

3.1. *Entropia, servizi e disservizi ecosistemici*

Gli studi economici fondati sull'approccio termodinamico possono seguire diversi criteri come ad esempio quello del bilancio materia-energia del processo produttivo, ispirato al primo principio conservativo della termodinamica, oppure quello basato sulla seconda legge. In questo caso sono presi in considerazione i limiti imposti dall'irreversibilità che caratterizza molti processi di trasformazione (economici) introducendo il concetto di *entropia*. In termodinamica l'entropia rappresenta una funzione di stato, cioè dipende soltanto dallo stato del sistema prescindendo dal tipo di trasformazione seguita. Accettando la definizione data da Georgescu-Roegen, l'entropia può essere definita come una sorta di *indice della quantità di energia non disponibile in un dato sistema termodinamico in un dato momento della sua evoluzione* (Georgescu-Roegen, 1975, p.45). Pertanto, il senso economico dell'entropia può coincidere con il concetto di "scarsità" di una determinata risorsa. Infatti, considerando un processo produttivo come se fosse una trasformazione termodinamica in un sistema aperto, in grado cioè di scambiare materia ed energia con l'esterno, il processo di depauperamento entropico interessa non soltanto una parte di energia ma la stessa materia coinvolta nella trasformazione. Nella sua analisi Georgescu-Roegen, partendo dalle intuizioni di Prigogine sulla termodinamica dei sistemi aperti, enfatizza gli aspetti legati alla materia il cui ruolo spesso è relegato soltanto a veicolo di trasporto dell'energia in una trasformazione termodinamica. In questo modo si riconosce che il riciclaggio completo dei materiali è impossibile e il sistema, richiedendo un flusso continuo di input di risorse, tende a produrre continuamente residui (entropia) da allocare nell'ambiente. Ciò introduce quella che Georgescu-Roegen definisce la "quarta legge della termodinamica" per cui *in ogni sistema chiuso la materia utilizzabile si degrada irreversibilmente in materia non utilizzabile*. In questo caso la materia "utilizzabile" rappresenta quella che si trova in uno stato in cui è consentita una determinata trasformazione chimica o fisica, e che quindi possiede valore in senso economico, contrariamente alla forma "inutilizzabile".

Considerando un agroecosistema quale sede di trasformazione simultanea di flussi di materia ed energia (input) in prodotti agricoli finali (output) (Pimentel *et al*, 1973), è possibile analizzare alcuni interessanti aspetti legati al secondo principio della termodinamica. A tal fine è necessario introdurre un altro importante concetto, quello di ecosistema *successionalmente vicino*, cioè l'ecosistema presente prima dell'agroecosistema. Tra i due stati, infatti, si instaura una relazione di successione temporale caratterizzata dall'introduzione di flussi energetici artificiali tramite le lavorazioni, l'immissione di input produttivi, gli ordinamenti colturali ecc.. (Odum E.P., 1969; Fath *et al*, 2004). La successionalità di un agroecosistema ha un importante significato sotto il profilo termodinamico se si considera il cambio di stato che interviene nella trasformazione che intercorre dall'ecosistema originario in equilibrio (climax). In questo caso, infatti, il passaggio può essere visto come una trasformazione termodinamica di un sistema aperto. In realtà i sistemi viventi in evoluzione come gli ecosistemi, sono ben lungi dall'equilibrio termodinamico trovandosi in uno stato definito di "quasi-stazionarietà" o "non-equilibrio" (Prigogine, 1967). Ciò implica la possibilità di ottenere trasformazioni nel sistema con valori di entropia più bassi di quella iniziale, cioè con una perdita irreversibile inferiore di energia utilizzabile, a condizione che ci sia un flusso continuo di entropia negativa (neg-entropia) al di fuori del sistema stesso, rappresentato dall'irradiazione solare. È questo il meccanismo che Prigogine chiama *pompa entropica*, per la quale il flusso continuo di energia solare permette negli ecosistemi da un lato l'incremento del livello di complessità e di organizzazione, e quindi la produzione degli stessi servizi ecosistemici, e dall'altro l'allontanamento dell'entropia prodotta (Prigogine e Kondepudi, 1998; Franzese *et al*, 2003). L'immissione dei flussi energetici ausiliari, che caratterizzano la trasformazione dell'ecosistema in agroecosistema, turba in parte questo meccanismo determinando una sovrapproduzione di entropia⁵. Considerando quindi questa sovrapproduzione all'interno di un agroecosistema (anche una singola

⁵ In questo modo si realizza una sorta di transizione quasi-stazionaria termodinamicamente reversibile. Infatti, almeno teoricamente, l'eventuale interruzione dei flussi energetici artificiali potrebbe consentire il "ritorno" alle condizioni naturali originarie (Jørgensen *et al*, 2005).

azienda agricola) la stessa può rappresentare un indicatore dello stato di degrado (degradazione dei suoli, abbassamento del pH, rilascio di sostanze inquinanti nelle falde, ecc.), consentendo almeno in teoria di valutare eventuali "disservizi" agroecosistemici, spiegando e quantificando l'impatto della pressione antropica (Ulanowicz e Hannon 1987; Svirezhev e Svirejeva-Hopkins, 1998). Partendo da questi presupposti, Steinborn e Svirezhev (2000) formalizzano una relazione in grado di quantificare la sovrapproduzione di entropia in alcuni sistemi agricoli a nord della Germania ottenendo significativi risultati sull'indicazione di degrado ambientale, sintetizzata nella seguente:

$$(1) \quad \varepsilon = \frac{1}{T} \left[W + \left(1 - \eta + \frac{\eta}{c} \right) - P_0 \right] \equiv \frac{1}{T} \left[y \left(\frac{1}{\eta} + \frac{1}{c} - 1 \right) - P_0 \right]$$

dove ε rappresenta la sovrapproduzione di entropia di un generico agroecosistema rispetto a quello naturale di riferimento (successionalmente vicino), T misura la temperatura media assoluta (in gradi Kelvin) durante un ciclo vegetativo (corrispondente alla media stagionale dell'agroecosistema), W è il flusso totale di energia ausiliaria, η è un coefficiente di efficienza dato dal rapporto in termini energetici tra output e input, P_0 rappresenta la produzione lorda dell'ecosistema successionalmente vicino all'agroecosistema, y è la resa agricola, mentre c è un parametro che stima le perdite dirette per respirazione e metabolismo della produzione totale dell'agroecosistema. Tuttavia, il calcolo su ampie scale risulta notevolmente complicato e dispendioso a proposito della difficoltà nel reperire i dati e le informazioni ambientali sullo stato ecologico dell'ecosistema successionalmente vicino, da cui dipende lo stesso bilancio entropico.

3.2. L'analisi exergetica

In un generico processo energetico trasformativo l'energia può assumere diverse forme rispettando il principio di conservazione espresso nella prima legge della termodinamica. L'energia, infatti, può essere solo convertita. Tuttavia, nei vari processi di conversione una quota di energia si degrada irreversibilmente sotto forma di calore (entropia), in accordo al secondo principio della termodinamica. Sotto questo punto di vista si configura una gerarchia delle varie forme energetiche, discriminabili in funzione di una sorta di "qualità" intesa nella quota di energia effettivamente disponibile, in grado cioè di fornire lavoro utile. Questa qualità può essere espressa nel concetto di *exergia* formulato da Rant nel 1956, cioè *l'ammontare massimo di lavoro estraibile da un sistema portato in equilibrio con l'ambiente circostante* (Szargut *et al*, 1988; Szargut, 2005). Partendo da questo concetto negli ultimi decenni si è sviluppata l'analisi exergetica, un approccio termodinamico avente come fine l'identificazione e la quantificazione delle perdite energetiche associate all'irreversibilità che caratterizza tutti i processi trasformativi. L'exergia è quindi relazionata all'entropia, anche se a differenza di questa non è una variabile di stato ma dipende direttamente dalla situazione corrente dell'ambiente, pertanto l'exergia potrebbe assumere un interessante ruolo come strumento di contabilità ambientale, consentendo di esprimere anche giudizi economici (Jorgensen *et al*, 2004).

Sebbene l'analisi exergetica sia stata tradizionalmente utilizzata per i processi industriali, da circa un decennio sono avanzati gli studi che la applicano ai sistemi naturali, compresi gli agroecosistemi. Prendendo, infatti, a riferimento un sistema dissipativo come quello ecologico, supportato cioè dalla conversione di flussi di energia e materia, l'exergia può essere utilizzata come variabile per descrivere lo stato del sistema figurando indirettamente come misura delle risorse disponibili. Questo esercizio di contabilità comporta la definizione di equivalenti exergetici su tutti i flussi di materia ed energia (Wall *et al*, 1994). Sostanzialmente in un ecosistema per la produzione di beni e servizi ambientali si attivano processi di conversione e trasferimento di exergia globale da input di risorse naturali, i quali a loro volta possono figurare come materie prime assumendo valore economico. In questi termini l'exergia rappresenta una grandezza di misura quantitativa e qualitativa di tutti i flussi e tutte le forme di energia e materia che rientrano nelle risorse naturali, pertanto è possibile esprimere il tutto in funzione di un'unica unità di misura. Lo stesso ragionamento vale nel caso degli agroecosistemi, dove la produzione di servizi SAE quali

l'approvvigionamento di cibo e materie prime, la sicurezza idrogeologica, il mantenimento del paesaggio rurale, ecc.... sono tra loro intimamente collegati a questi processi trasformativi. Definendo, quindi, in termini energetici i SAE, l'analisi exergetica potrebbe rappresentare un efficace strumento di valutazione anche ai fini della pianificazione di politiche specifiche⁶. Molto interessanti su questa base sono gli studi condotti da Jorgensen (Jorgensen, 1992; Jorgensen *et al*, 2004) dove utilizza l'approccio exergetico nella valutazione dei servizi ecosistemici introducendo il concetto di *eco-exergia*. Quest'ultima è intesa come l'energia chimica disponibile incorporata nei costituenti della materia vivente ed è anche interpretabile come distanza dall'equilibrio termodinamico. In un recente contributo lo stesso autore (Jorgensen, 2010) ha calcolato il contenuto exergetico e il livello di complessità di diversi SE facendo poi una comparazione in termini monetari rispetto ai risultati emersi dal lavoro seminale sulla loro valutazione di Costanza *et al* (1997), attribuendo prezzi derivati dai costi reali dell'energia. L'eco-exergia in altre parole rappresenta la capacità di compiere lavoro di un ecosistema e può essere determinata dal prodotto tra un gradiente di energia chimica e un descrittore dipendente. In questo modo è possibile stimare indirettamente il valore di un SE, facendo riferimento all'incremento annuo di eco-exergia contenuta ad esempio nella biomassa totale, nell'informazione genetica, in una rete ecologica, ecc... La stima può avvenire in termini fisici dopo aver identificato esattamente tutti i flussi energia-materia di un ecosistema, partendo da diverse variabili quali la concentrazione di ogni elemento considerato e specifici coefficienti di ponderazione proporzionali al potenziale chimico e all'informazione contenuta nel DNA delle strutture viventi⁷. Hau e Bakshi (2004) partendo dalla più tradizionale analisi del consumo cumulato di exergia nei processi industriali, hanno formalizzato un algoritmo sistemico per calcolare il consumo di exergia dei processi ecologici nella produzione di materie prime (*Ecological Cumulative Exergy Consumption* – ECEC) identificando e quantificando l'ammontare dei contenuti exergetici di tutte le risorse che entrano nel processo produttivo. Bastianoni *et al* (2005) applicano l'analisi exergetica agli agroecosistemi, confrontando due sistemi viticoli localizzati in Toscana e Piemonte. In tal caso gli autori identificano tre flussi exergetici principali rappresentati 1) dal contenuto di exergia dei prodotti finali; 2) dall'exergia accumulata nell'agroecosistema⁸; 3) dall'exergia necessaria ad attivare e controllare gli stessi processi produttivi. Il consumo è determinato dall'ammontare di exergia contenuta negli input più i costi exergetici indiretti per mantenerli disponibili. I valori e i coefficienti di conversione utilizzati dagli autori fanno prevalentemente riferimento sia a dati pubblicati in letteratura (per i contenuti degli input utilizzati e l'eco-exergia) sia ad analisi dirette effettuate in laboratorio (produzione e biomassa). Un altro interessante approccio è quello proposto da Hoang e Alauddin (2011), che partendo dall'algoritmo messo a punto da Dewulf *et al* (2007) per il calcolo dei flussi di exergia cumulata dall'estrazione di risorse dall'ambiente naturale (*Cumulative Exergy Extraction from Natural Environment* CEENE), e dall'analisi exergetica basata sull'analisi del ciclo di vita dei materiali (LCA) (Cornelissen e Hirs, 1997; Sciubba, 2001), sintetizzano un metodo per derivare l'ammontare di exergia delle risorse e dei servizi ecosistemici che partecipano alla produzione agricola. Il criterio consiste nel calcolare l'exergia totale estratta durante la produzione agricola contabilizzando contemporaneamente l'exergia cumulata in tutti gli input industriali (pesticidi, fertilizzanti, energia elettrica, ecc.), economici ed ecosistemici e in tutti gli output ottenuti. L'algoritmo di calcolo prevede anzitutto l'identificazione e la precisa localizzazione di tutti i flussi di materia ed energia da parte del sistema naturale di riferimento (nel caso specifico gli agroecosistemi), seguita dalla quantificazione exergetica mediante la conversione dei rispettivi contenuti energetici tramite coefficienti appresi da studi analoghi. Una volta calcolato l'ammontare di exergia cumulata nei flussi in entrata e in quelli in uscita, applicando una relazione analoga al bilancio dei materiali, data dalla loro differenza, è possibile stimare l'insieme delle perdite della degradazione entropica e

⁶ Hoang e Alauddin (2011) hanno prodotto un interessante rassegna degli studi sulla sostenibilità dei sistemi agricoli condotti tramite l'analisi exergetica nei Paesi OECD selezionando alcuni indicatori implementabili su larga scala.

⁷ Per maggiori dettagli sul calcolo e significato si veda: Jorgensen (1992; 2010); Bastianoni *et al* (2005); Jørgensen *et al* (2005; 2007).

⁸ Questo flusso rappresenta l'eco-exergia e misura il grado di organizzazione dell'agroecosistema.

dei residui rilasciati nell'ambiente, cioè l'exergia contenuta nei flussi materiali ed energetici potenzialmente inquinanti.

Quest'approccio offre diverse potenzialità nella valutazione dei SAE, proprio perché a differenza di altri metodi basati sull'analisi energetica, permette di stimare la qualità dei flussi stessi ottenendo una chiara indicazione sulle quantità effettivamente disponibili, e quindi sull'efficienza dei sistemi, figurando come un interessante strumento di supporto nella definizione, guida e pianificazione di politiche agroambientali⁹. Tuttavia, nonostante i promettenti risultati empirici riportati in letteratura, l'eventuale estensione di valutazioni sistemiche su larga scala basate sull'analisi exergetica, presenterebbe non poche difficoltà. Infatti, nonostante l'alto livello di efficienza e di rigore scientifico, si tratta di uno strumento poco flessibile, che richiede un notevole numero di dati e misurazioni difficilmente disponibili, oltre al rischio di discordanze che possono sopravvenire dall'utilizzo dei fattori di conversione specifici poiché manca un riferimento universalmente accettato di pesi per i vari materiali.

3.3. *La sintesi emergetica*

La sintesi emergetica è stata proposta alla fine degli anni ottanta dall'ecologo Howard T. Odum (1996) al fine di coniugare aspetti ambientali ed economici uniformando tutti gli input, i flussi e gli output in funzione dell'energia solare - il flusso energetico primario che regola tutti i processi ecologici. In questo modo è possibile valutare i prodotti e i servizi ecosistemici in base alla quantità di energia solare richiesta nella loro generazione. Più precisamente per emergenza s'intende la quantità di energia disponibile (exergia) di un tipo, utilizzata direttamente e/o indirettamente per ottenere un servizio o un prodotto specifico (Odum, 1996). Pertanto, l'emergia rappresenta una sorta di memoria energetica¹⁰ dei precedenti flussi exergetici che via via hanno subito la degradazione entropica durante i processi trasformativi necessari per supportare un certo sistema (Scienceman, 1987). Odum parla più specificamente di *emergia solare* intendo l'equivalente energetico di energia solare. In altre parole, il contenuto emergetico di un prodotto o di un servizio esprime la quantità di energia solare usata direttamente o indirettamente nella sua produzione. L'emergia¹¹ rappresenta una grandezza estensiva, dipendente dalle dimensioni del sistema ed è misurata in *solar emergy joule* (sej) (Odum, 1996). Al concetto di emergenza si associa quello di *trasformità* ovvero l'emergia necessaria per ottenere un'unità di energia (sej/J). Nel caso in cui si contabilizza un prodotto espresso in unità di massa, il coefficiente di conversione analogo alla trasformità è l'*emergia specifica* (sej/kg). L'utilizzo di questa grandezza permette di avere un'informazione più rigorosa dell'effettivo costo ambientale necessario a supportare un dato processo ecosistemico, espresso dalla quantità di energia solare "consumata". A differenza delle altre analisi, infatti, l'approccio in questione consente di mantenere una prospettiva olistica, combinando il sistema ecologico ed economico mediante l'inventario di tutti i flussi materia-energia realizzati durante i processi produttivi, e per questo si preferisce il termine sintesi ad analisi, proprio per la caratteristica complessità che nasce dalla combinazione di più sistemi (Tilley e Swank, 2003; Brown e Cambell, 2007). Nel caso specifico dei SE l'interesse operativo di questo metodo è notevole, giacché permette una valutazione completa delle risorse naturali, contabilizzando tutti gli input non esprimibili in termini monetari e catturando tutti i costi ambientali necessari a supportare un dato flusso produttivo. La filosofia di base che caratterizza questo strumento sta proprio nella concezione del valore della risorsa naturale, non più definito come valore percepito dal sistema delle preferenze umane e dalla disponibilità a pagare, bensì come valore "donato" dall'ammontare di risorse naturali investite durante i processi produttivi.

⁹ Ad esempio, è interessante la proposta formulata da Szargut (2005) di introdurre tra gli strumenti finanziari designati nelle politiche ambientali una sorta di tassa ecologica proporzionale all'effettivo costo termoeconomico di un prodotto in un determinato mercato, ipotizzando modalità di pagamento simili all'IVA.

¹⁰ Lo stesso termine emergia deriva dall'unione di *embodied energy*.

¹¹ In questo lavoro il termine emergia quando non diversamente esplicitato si riferisce a quella solare.

Più precisamente Odum introduce il concetto di *donor value* in antitesi al tradizionale modello di valore "ricevuto", per esprimere tramite il contenuto emergentico di un bene o servizio, l'ammontare del costo ecologico sostenuto attraverso percorsi selettivi su scala globale, al fine di supportare il livello gerarchico occupato nell'ecosistema (Chen *et al*, 2009). In altre parole la produzione e il consumo sono interpretati come processi trasformativi della forza direttrice primordiale, cioè l'energia solare. Questa teoria implica un cambiamento di paradigma nello stesso percorso valutativo che muta da una prospettiva antropocentrica a un'eco-centrica, espressa nella proposizione "esternalizzare le internalità" per la quale il sistema economico è solo un sottosistema di quello ecologico (Odum e Odum, 2000). Molti sono gli studi che negli ultimi anni hanno proposto la sintesi emergentica per la valutazione dei SE e delle risorse naturali in genere. Le applicazioni variano anche dal punto di vista territoriale, essendo lo strumento in questione adattabile su piccola e su larga scala. Tra i lavori più recenti ad esempio si ricorda quello di Brown e Campbell (2007) che propongono l'approccio emergentico nella valutazione del capitale naturale e dei servizi ambientali di alcuni sistemi forestali negli Stati Uniti. Più precisante gli autori quantificano l'emergia di tutti gli stock (capitale naturale) e i flussi energetici (servizi ambientali di supporto e regolazione) necessari a supportare la produzione forestale, esprimendoli in equivalenti monetari (*em*\$) al fine di operare una comparazione. Molto interessante è il rapporto commissionato dall'ente internazionale canadese IISD (*International Institute for Sustainable Development*) al fine di approfondire i punti di forza e le criticità dell'approccio emergentico sulla valutazione dei SE (Voora e Thrift, 2010). Lo studio analizza dettagliatamente 21 applicazioni su sistemi agricoli e su ecosistemi, confrontando i risultati con l'opinione scientifica di diversi esperti. Dal contributo emergono importanti spunti di riflessione e raccomandazioni inerenti all'utilizzo di questo approccio per la valutazione di SE in relazione soprattutto alla complessità di calcolo e all'esigenza di accostare per confronto altri approcci biofisici. Huang *et al* (2011) propongono una metodologia di analisi innovativa, basata sulla sintesi emergentica, per la valutazione di SE nelle zone periurbane intorno alla città cinese di Taipei, tenendo conto del cambiamento d'uso del suolo (es. *urban sprawl*) nel periodo 1971–2006. Gli autori, dopo aver identificato diversi sottosistemi (aree naturali e forestali, zone agricole e aree umide) quantificato i rispettivi flussi di SE forniti, definendo una matrice di impatto per analizzare sistemicamente il ruolo di ogni componente sull'ecosistema periurbano cogliendo importanti elementi strategici per la pianificazione territoriale sostenibile. Watanabe e Ortega (2011) implementano una valutazione biofisica per alcuni SE su scala mondiale, partendo dalla stima dei prezzi dei flussi biogeochimici in funzione del loro contenuto in emergia convertito in equivalenti monetari. In questa analisi gli autori suggeriscono uno strumento innovativo in grado di supportare la pianificazione di specifiche politiche e meccanismi di pagamento per i servizi ecosistemici e i costi delle emissioni di gas serra. Molte sono le applicazioni orientate alla valutazione della sostenibilità ambientale tramite la sintesi di specifici indicatori utilizzati a volte per intere economie. Un esempio è di Ulgiati e colleghi (1994) che implementano la sintesi emergentica sul sistema economico italiano esprimendo indici specifici di sviluppo sostenibile sui principali settori economici nazionali (1990). Più recentemente Jiang *et al* (2008) definiscono uno studio integrato di contabilità emergentica sul sistema economico cinese (2004), rilevando le pressioni ambientali che il crescente sviluppo economico ha avuto a livello locale e comparando i risultati con ricerche analoghe effettuate in altri paesi (Brasile, Australia, Nuova Zelanda). Per quanto riguarda le applicazioni ai sistemi agricoli Chen *et al* (2006) approfondiscono il livello di sostenibilità dei sistemi agricoli dopo la riforma agraria cinese (iniziata nel 1978) nel periodo 1980-2000. A livello italiano si ricorda la ricerca svolta da Bastianoni e colleghi (2005) che confrontano il grado di sostenibilità di alcuni sistemi agricoli localizzati nelle zone di coltivazione del Chianti in Toscana. Franzese *et al* (2006) quantificano le richieste lorde di emergia per la produzione di mais in Italia tramite un'analisi comparata energetica ed emergentica. Castellini *et al* (2006) confrontano sistemi di produzione in regime biologico e convenzionale di allevamenti avicoli in Umbria, mentre La Rosa *et al* (2008) implementano un approccio analogo in alcuni agrosistemi siciliani dediti alla produzione agrumicola (arancia rossa) al fine di comparare le performance ambientali in diversi regimi gestionali. Ancora, molto interessante è il lavoro di Pizzigallo *et al* (2008) che combinano l'approccio

energetico con la valutazione del ciclo di vita (LCA) confrontando il processo produttivo biologico con quello convenzionale a livello aziendale su due sistemi vitivinicoli toscani.

Entrando nel dettaglio della valutazione energetica dei servizi agroecosistemici, è necessario fare alcune considerazioni di carattere ecologico. Un ecosistema è rappresentato dalle relazioni mutualistiche che si instaurano tra un determinato ambiente fisico (clima, atmosfera, litosfera, risorse idriche) e la biomassa vivente (produttori, consumatori e decompositori). Si tratta di sistemi complessi (qualità data dal grado di interazione tra le componenti) auto-organizzanti, in grado cioè di svilupparsi e strutturarsi autonomamente aumentando il proprio livello di complessità (biodiversità). La capacità di autorganizzazione è una proprietà emergente che si esprime dall'intima connessione tra le componenti degli ecosistemi (es. sistema radici-suolo-microrganismi) a loro volta strutturate gerarchicamente intorno ai flussi di energia solare. Più precisamente l'energia solare subisce delle trasformazioni qualitative nel suo percorso tra i vari compartimenti ecologici che implicano un incremento della quota di energia utilizzabile (exergia)¹² (Odum, 1988). Queste dinamiche regolano anche la capacità di sopravvivenza ed evoluzione degli stessi sistemi naturali, introducendo quello che Odum formula come principio di "massima empotenza" (*Maximum Empower Principle*) secondo il quale nei sistemi ecologici prevale lo sviluppo di quei compartimenti e di quelle relazioni che massimizzano l'utilizzo dell'empotenza, cioè il flusso di energia disponibile di un tipo utilizzata direttamente o indirettamente per mantenere flussi e stock di un altro tipo – l'emergia. In tal senso il concetto di trasformatività può essere interpretato come il costo di mantenimento di un dato processo, essendo un indicatore del livello gerarchico di convergenza verso lo stato di massima empotenza, mentre l'emergia totale misura il livello di autorganizzazione del sistema (Ulgiati e Brown, 2009).

In un generico sistema, l'ammontare di emergia totale (Em) può essere derivato partendo dai contenuti energetici (E_i) e dalle trasformatività (Tr_i) specifici per ogni flusso/prodotto i -esimo corrispondente¹³ (Odum, 1996):

$$(2) \quad Em = \sum_i Tr_i E_i$$

La trasformatività dei vari prodotti/flussi, per com'è stata definita sopra, può essere calcolata dalla fonte primaria solare. Infatti, per definizione la trasformatività dell'energia solare è unitaria, il che consente di impostare un calcolo sistemico per derivare quella di tutti gli altri prodotti via via ottenuti. L'algoritmo di calcolo dell'ammontare di emergia in un sistema rispetta le regole definite dall'algebra energetica di Odum (1996), basata sul fatto che l'emergia a differenza dell'energia segue una logica di memorizzazione piuttosto che di conservazione¹⁴. Entrando nel merito applicativo per la valutazione dei SAE, questa può essere sintetizzata nei seguenti passaggi:

- Specificazione dell'agroecosistema: consiste nella definizione del contesto geografico, biofisico e socioeconomico dell'agroecosistema o della regione spaziale oggetto dello studio (ad es. tramite ortofoto e mappe georeferenziate), al fine di identificare attentamente tutti gli stock e i flussi di materia ed energia che riguardano le risorse naturali e le varie attività che partecipano al processo produttivo.

¹² Ad esempio l'energia solare trasformata in biomassa dagli organismi fotosintetici.

¹³ L'emergia può essere espressa matematicamente come la variazione totale di energia utile (exergia) di una risorsa nel tempo t : $Em(t) = \int_{-\infty}^t \dot{E}x(\tau) d\tau$, dove $\dot{E}x$ rappresenta la potenza exergetica, cioè la variazione del flusso di energia utile rispetto al tempo τ . Per una trattazione matematica più rigorosa si veda Giannattoni (2002).

¹⁴ Ciò implica che il contenuto energetico dell'output è sempre pari alla somma di quella degli input. Nel caso di coprodotti, tutti hanno lo stesso contenuto energetico ma diversa trasformatività poiché il contenuto energetico è diverso. Viceversa nel caso in cui un flusso si dirama in più flussi, ognuno (*split*) ha un contenuto energetico proporzionale all'energia fluente, benché la trasformatività non vari. Infine, nel caso di un flusso di retroazione l'emergia non può essere contabilizzata due volte.

- Identificazione di servizi agroecosistemici oggetto di valutazione: si tratta di individuare i SAE che possono essere forniti dal sistema e le loro interazioni tramite il diagramma emergetico di Odum, uno schema grafico dei flussi input-output tipicamente rappresentato con la simbologia dei circuiti elettrici (fig. 1). In questo modo possono essere meglio identificati e schematizzati i flussi che svolgono funzioni di regolazione e supporto nel sistema, caratterizzando i SAE.
- Sintesi emergetica dei SAE: rappresenta la fase operativa di valutazione vera e propria che consente di determinare il contributo totale delle risorse naturali che hanno partecipato alla generazione del servizio o prodotto mediante una tabella input-output dove sono riportati i dati (unità di massa o energia) e le informazioni (trasformità o emergenza specifica) di ogni stock e flusso presente nel diagramma¹⁵. In base, quindi, ai percorsi evidenziati nel diagramma emergetico e alle regole algebriche definite, si applica la (2) ottenendo l'emergia corrispondente.

Per quanto riguarda l'insieme dei flussi di stock ed energia in un generico agroecosistema questi si dividono in quattro tipologie:

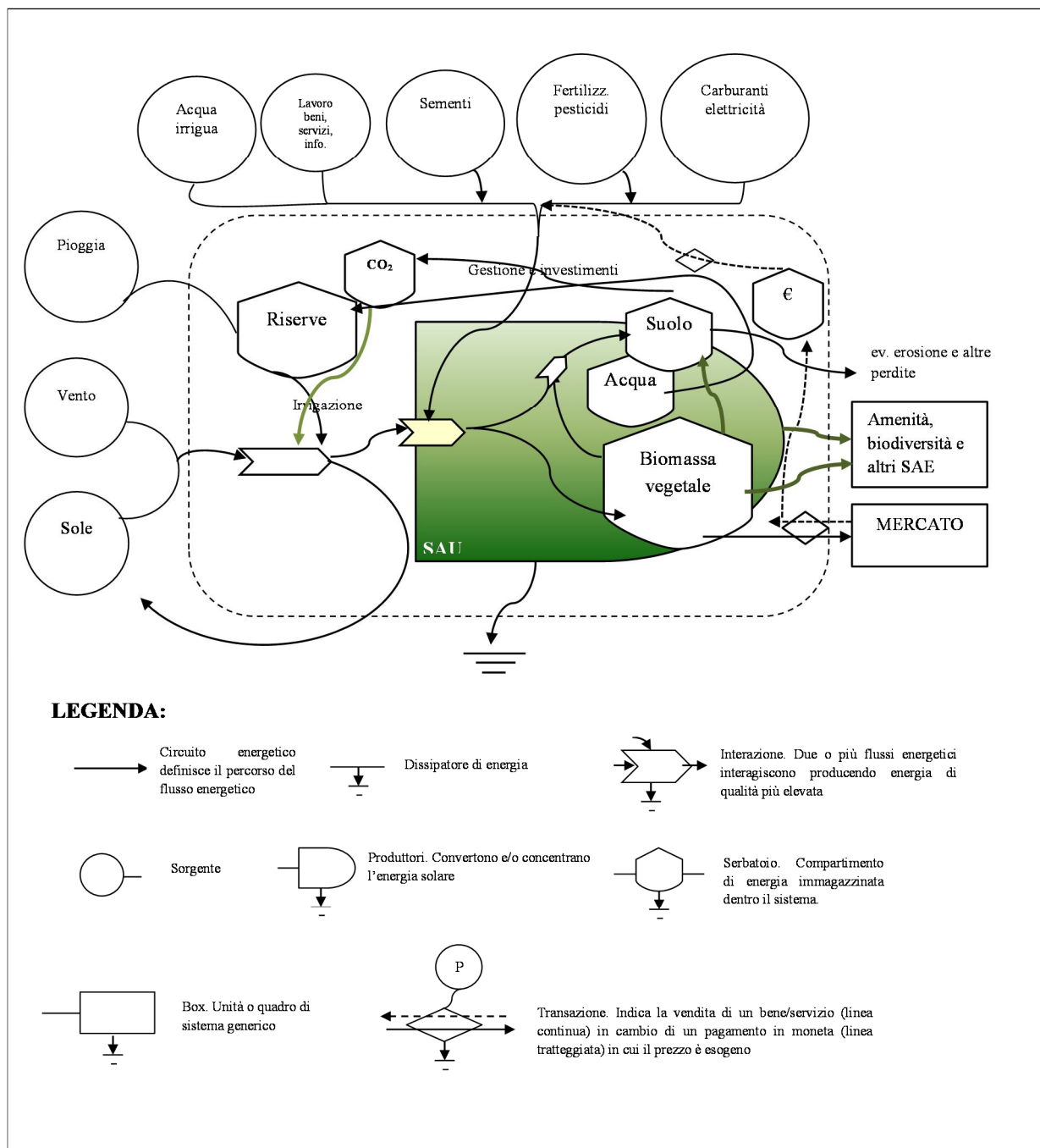
1. Risorse da fonti rinnovabili (R): energia solare, pioggia, vento, lavoro, ecc..
2. Risorse da fonti non rinnovabili locali (NR): perdita suolo fertile, acqua irrigazione
3. Risorse importate (F): vari input produttivi (combustibile, elettricità, fertilizzanti, pesticidi, servizi, lavoro, ecc..)
4. Produzione di beni e servizi: cibo, fibre, paesaggio, ecc...

Dall'insieme delle interazioni che si stabiliscono è quindi possibile individuare e quantificare dal punto di vista emergetico i beni prodotti e i servizi ambientali forniti. Più precisamente, in accordo alla classificazione del *Millennium Ecosystem Assessment*, nel caso dei SAE possono individuarsi: la produzione di cibo e materie prime tra i servizi di provvigione; l'attività protettiva nei confronti dell'erosione tra quelli di regolazione; l'attività ricreativa e di fruizione tramite paesaggi rurali tra i servizi culturali; il ciclo dei nutrienti, il sequestro del carbonio atmosferico, la formazione dei suoli (nel caso di foraggiere permanenti) tra quelli di supporto. Ovviamente la loro offerta dipende dal tipo di agrosistema considerato e dal contesto geoclimatico, ivi comprese le modalità di gestione.

Una volta configurato il sistema dal punto di vista emergetico, è possibile verificare il contributo di ogni flusso di risorse ambientali ed economiche e l'istaurarsi di particolari interazioni che nel complesso lasciano emergere la fornitura di specifici servizi (ad esempio i flussi rappresentati dalle frecce in verde nella figura 1). La loro quantificazione consente dunque di stimare il valore emergetico dei singoli servizi identificati. Le principali difficoltà si presentano nella conversione in termini energetici di ogni componente e nella ricerca dei coefficienti di trasformità. In genere, si parte dai dati climatici disponibili per zona geografica del flusso di energia solare annua, mentre le singole trasformità possono essere derivate direttamente mediante analisi specifiche, o da studi analoghi già effettuati. Infine, gli output e gli input possono essere appresi direttamente dalle statistiche territoriali disponibili.

¹⁵ Per ulteriori dettagli sulla procedura di calcolo della sintesi emergetica si veda: Odum (1988, 1996); Brown e Ulgiati (2004). Inoltre, per gli sviluppi teorici e per l'aggiornamento dei vari indici si può fare riferimento alle varie pubblicazioni delle conferenze biennali della comunità scientifica *Emergy Systems* (www.emergysystems.org accesso: Aprile 2012).

Figura 1 – Diagramma emergetico degli stock e dei flussi di un generico agroecosistema e legenda della simbologia utilizzata.



Fonte: riadattato da Odum (1996), Hoang e Alauddin (2011), Watanabe e Ortega (2011)

Considerando il diagramma emergetico riportato in figura 1 è possibile distinguere i vari processi dalla tipologia dei flussi e degli stock considerati. Andando da sinistra verso destra il contenuto emergetico aumenta progressivamente. Infatti, la convergenza verso livelli di organizzazione più alti implica una maggiore quantità di energia necessaria a supportare il componente. I servizi prodotti sono rappresentati oltre che dalla produzione agricola, anche dai flussi evidenziati in verde, quali ad esempio il sequestro del biossido di carbonio nel suolo, la biodiversità in base alla presenza di elementi naturali, il ciclo dei nutrienti, ecc.. Tutti questi stock e flussi, almeno in principio, possono essere valutati in funzione del loro contenuto emergetico, giungendo al calcolo di un valore finale che tiene conto in modo olistico della complessità che caratterizza i sistemi naturali. Molto interessante è anche la possibilità che questo approccio offre nella

definizione di indicatori di sostenibilità e di convertire in termini monetari i valori espressi in emergia. A tal fine, infatti, Odum (1996) introduce una relazione che lega la produzione di beni e servizi di un economia alla circolazione di moneta, esprimibile nel concetto di *em-dollaro* (em\$). Quest'ultimo rappresenta l'equivalente di emergia di un prodotto (*i*) espresso in unità di moneta (ad esempio euro, *em€_i*) ottenuto rapportando il contenuto emergetico del prodotto/sistema (*Em_i*) per un coefficiente specifico pari al rapporto tra l'emergia totale di un economia di riferimento (*Em_P*) e il suo prodotto interno lordo (PIL) sintetizzabile nella seguente:

$$(3) \quad em\epsilon_i = \frac{Em_i}{\left(\frac{Em_P}{PIL}\right)}$$

dove il coefficiente $\frac{Em_P}{PIL}$ indica l'equivalente di risorsa necessaria per supportare l'economia. Tra gli indicatori emergono in particolare: il *carico ambientale* pari al rapporto tra l'emergia dei flussi di risorse importate (F) e non rinnovabili (NR) e i flussi rinnovabili (R); la *resa emergetica*, un indicatore di efficienza dato dal rapporto tra il contenuto emergetico dei prodotti per gli input importati; l'indice di sostenibilità dato dal rapporto tra resa emergetica e carico ambientale; la *densità emergetica*, pari al rapporto tra l'emergia totale e l'area del sistema. La definizione di indicatori di sostenibilità basati sull'approccio energetico racchiude notevoli potenzialità sulla comparazione di diversi comprensori territoriali consentendo ad esempio di effettuare specifiche analisi geografiche e di definire mappe di sostenibilità anche con l'ausilio di strumenti in GIS (Franzese *et al*, 2003). Questi aspetti lasciano intravedere l'idoneità di quest'approccio in particolare per applicazioni empiriche al settore agricolo, al fine non solo di avere elementi di valutazione dei SAE ma anche come strumento di monitoraggio del livello di sostenibilità a livello aziendale. Tuttavia, al pari dell'analisi exergetica, quest'approccio non ha ancora un largo consenso accademico, nonostante il continuo affinarsi delle metodologie di calcolo, per via di una serie di criticità legate ad esempio alla mancanza di una standardizzazione accreditata sui coefficienti di trasformabilità, in particolare per il fatto che i database di riferimento sono in continuo sviluppo ed aggiornamento così come gli aspetti computazionali (Voora e Thrift, 2010).

4. DISCUSSIONE

Facendo riferimento a quanto rassegnato sopra, la tabella 1 mette in luce alcuni degli studi che applicano l'approccio termoeconomico all'analisi della sostenibilità e alla valutazione dei servizi ecosistemici. Questi sono suddivisi per contesto analitico e livello spaziale di riferimento. Inoltre sono messe in evidenza le fonti dei dati utilizzati nei singoli studi. Per quanto riguarda gli agrosistemi, la sintesi emergetica appare come lo strumento analitico più utilizzato, specialmente quando l'unità spaziale coincide con quella aziendale. Ciò lascia supporre che l'approccio emergetico sia anche il più idoneo tra gli strumenti termoeconomici per la valutazione dei servizi agroecosistemici, sebbene l'ipotesi operativa di estensione di un'analisi di valutazione su larga scala implichi diverse criticità. Le difficoltà principali non riguardano soltanto aspetti teorico-concettuali ma sono dovute alla mancanza di un sistema standardizzato universalmente riconosciuto. Questo in particolare è vero per i fattori di conversione energetica, che prescindendo dalla metodologia seguita, rappresentano il comune denominatore in tutti gli approcci descritti. Tuttavia, negli ultimi anni la letteratura si è sviluppata moltissimo a livello internazionale con studi empirici condotti su tutti i settori produttivi. Simili approcci sono stati anche proposti come strumenti di contabilità nazionale per il monitoraggio della sostenibilità, arrivando a definire database globali per implementare le analisi a livello di singola nazione (Sweeney *et al*, 2009). Per tali ragioni c'è motivo di credere che l'analisi termoeconomica si svilupperà in futuro a forza della sempre più urgente richiesta di interdisciplinarietà nell'affrontare e raccordare la dicotomia concettuale che antepone gli interessi economici a quelli ambientali.

Tabella 1. Alcuni esempi di approccio termoeconomico applicato alla valutazione dei SE e nell'analisi della sostenibilità suddivisi per unità spaziale, tipo di approccio e contesto analitico.

Livello spaziale	Tipo di approccio	Contesto di analisi	Fonti dati principali	Riferimenti bibliografici
Globale	Analisi exergetica	Valutazione servizi ecosistemici	Letteratura su precedenti analisi	<i>Jorgensen (2000; 2010)</i>
	Sintesi emergetica	Contabilità nazionale e creazione database	Statistiche nazionali e letteratura	<i>Sweeney et al, 2009</i>
		Valutazione servizi ecosistemici	IPCC, letteratura	<i>Watanabe e Ortega (2011)</i>
Nazionale	Analisi exergetica	Analisi sostenibilità e contabilità ambientale su agroecosistemi	Letteratura, OECD, FAO, Eurostat	<i>Hoang e Alauddin (2011)</i>
		Analisi sostenibilità ed efficienza filiera agroenergetica	Letteratura e statistiche nazionali	<i>Dewulf et al (2005)</i>
		Analisi sostenibilità filiera pomodoro in serra	Letteratura e statistiche nazionali	<i>Lagerberg e Brown (1999)</i>
	Sintesi emergetica	Valutazione servizi ecosistemici forestali	Letteratura e statistiche nazionali	<i>Brown e Campbell (2007)</i>
		Contabilità ambientale nazionale	Letteratura e statistiche nazionali	<i>Ulgiati et al (1994;); Wall et al (1994)</i>
Territoriale	Analisi exergetica	Analisi sostenibilità ed efficienza viticoltura	Letteratura e misurazioni dirette	<i>Bastianoni et al (2005)</i>
	Sintesi emergetica	Contabilità ambientale	Letteratura e statistiche nazionali	<i>Franzese et al (2003)</i>
		Analisi sostenibilità su agroecosistemi	Letteratura e statistiche nazionali	<i>Martin et al (2006)</i>
		Valutazione servizi ecosistemici	Letteratura, statistiche territoriali	<i>Huang et al (2011)</i>
	Misura entropia	Analisi sostenibilità su agroecosistemi	Misure e analisi dirette	<i>Steinborn e Svirezhev (2000)</i>
Aziendale	Sintesi emergetica	Analisi sostenibilità su agroecosistemi	Letteratura, misurazioni e analisi dirette	<i>Agostinho et al (2004); Castellini et al (2006, Franzese et al (2006); Pizzigallo et al (2008), La Rosa et al (2008)</i>

Tornando alla proposta di base sull'eventuale applicazione della contabilità emergetica per la valutazione dei SE forniti dall'agricoltura italiana, la verifica empirica potrebbe essere costituita dall'attuale architettura informativa della principale banca dati delle aziende agricole, la Rete di Informazione Contabile Agricola (RICA). In particolare l'indagine campionaria RICA gestita dall'Istituto Nazionale di Economia Agraria (INEA) ha visto riorganizzare negli ultimi anni la metodologia di rilevazione ristrutturando radicalmente il sistema informativo di raccolta, elaborazione e consultazione delle informazioni, realizzando un modulo di contabilità generale che collega alla contabilità analitica dei dati microeconomici anche le analisi di processo e delle tecniche produttive delle aziende agricole. Cio, infatti, consentirebbe di avere una base informativa in grado di supportare valutazioni non solo economiche ma anche di impatto ambientale. Questi risultati sono stati ottenuti mediante l'implementazione del software di contabilità GAIA (Gestione Aziendale Imprese Agricole) che acconsente alla tenuta di una contabilità generale in partita doppia, permettendo il controllo dei flussi di input output all'interno dell'azienda¹⁶. Avendo quindi a disposizione un sistema standardizzato di coefficienti di trasformabilità ed energia specifica, e identificando fisicamente l'azienda agraria con l'agroecosistema è possibile distinguere i flussi energetici ausiliari (lavorazioni, trattamenti fitosanitari, concimazioni, ecc..) e contabilizzarli dal punto di vista emergetico insieme ai prodotti ottenuti accordando la valutazione indiretta di alcuni SAE espressi in equivalenti di energia solare. Detta procedura, inoltre può essere rafforzata in previsione delle innovazioni sui metodi di rilevazione RICA che dall'anno contabile di esercizio del 2011 riguarderanno la registrazione puntuale precisa delle quantità fisiche degli input produttivi come i fertilizzanti oltre che altre informazioni sulla quantità di acqua irrigua effettivamente consumata, fitofarmaci, georeferenziazione, ecc.. in accordo alle richieste effettuate dalla Commissione (Reg (UE) 385/2012) per la revisione di tutto il sistema dell'intera rete contabile agricola europea (*Farm Accountancy Data Network - FADN*).

In sintesi, la proposta si concreta nell'implementare l'analisi emergetica al fine di identificare e valutare i servizi agroecosistemici fornibili dal settore agricolo, fermo restando l'esigenza di approfondire e superare la serie di incertezze che emergono proprio dalla complessità che caratterizza l'applicazione di questi strumenti al settore agricolo. Non sono poche, infatti, le critiche sollevabili riguardo alla mancanza di legami formali con concetti correlati in altre discipline, di coefficienti standardizzati oltre che per l'eccessiva laboriosità degli algoritmi di calcolo. Dal punto di vista prettamente economico, inoltre è totalmente ignorato il sistema dalle preferenze umane e della domanda sostituendo alla tradizionale visione antropocentrica quella ecocentrica, per la quale il valore si concentra solo sul lato dell'offerta del sistema e dei costi (energetico-ambientali) sostenuti per fornire un determinato prodotto (Voora e Thrift 2010).

5. QUALCHE RIFLESSIONE CONCLUSIVA

In termini economici i servizi ecosistemici possono essere considerati come una sorta di infrastruttura di supporto alla società umana, pertanto diventa fondamentale integrare il loro valore nei processi decisionali. Tuttavia, come descritto, esistono non poche difficoltà nella loro identificazione e valutazione. In particolare, nel caso dei SE fornibili dall'agricoltura, se su grandi linee è possibile descrivere le interazioni tra sistemi agricoli e ambiente naturale, l'esercizio si complica notevolmente per analisi a grana più fine. La struttura spaziale di attinenza, infatti, coinvolge un gran numero di agenti non solo dal lato dell'offerta ma anche della domanda e non è facile isolare delle singole unità. I SAE derivano dal contesto naturale di riferimento caratterizzato da rilevante complessità da cui derivano comportamenti non sempre lineari per il gran numero di variabili implicate e per gli effetti prodotti dalla loro interazione. Su tale base anche piccole variazioni delle condizioni iniziali possono avere grandi effetti non sempre prevedibili, proprio per la caratteristica delle proprietà emergenti dei sistemi complessi. Inoltre, come evidenziato dal diagramma emergetico,

¹⁶ Per maggiori informazioni: <http://www.gaia.inea.it/> (accesso: Maggio 2012)

difficilmente i SE sono tra loro separabili e distinguibili giacché si producono proprio dalle interazioni tra più comparti (es. rapporto pianta-suolo), pertanto gli agroecosistemi andrebbero compresi come sistemi che creano economie di scopo rispettando logiche di produzione congiunte. Il riconoscimento di questa struttura è cardinale nella valutazione dei SAE. La complessità ecologica degli agroecosistemi rappresenta il punto di partenza nella comprensione della loro capacità di fornire servizi, il che chiarisce le difficoltà oggettive che possono emergere in un processo valutativo basato esclusivamente su metriche monetarie poiché il mercato non può includere pienamente aspetti legati alle relazioni biofisiche che si stabiliscono. Su tale base s'inscrive la proposta che anima il presente studio. Come visto, infatti, l'approccio termoeconomico potrebbe essere un utile strumento di supporto nella definizione di azioni politico-economiche che mirino al raggiungimento di obiettivi di sostenibilità, complementare ad altri strumenti analitici. Ciò deriva dal fatto che tutti i processi di produzione e consumo sono interpretati come processi di conversione energetica, e soggetti pertanto alle leggi universali della termodinamica. Tra i metodi rassegnati, la sintesi emergetica sembra lo strumento analitico più idoneo nel caso di sistemi agricoli, consentendo di esprimere tutti i prodotti e i servizi nella stessa unità di misura, cioè in base alla quantità di energia solare richiesta nella loro generazione. Il valore del SAE ottenuto, infatti, indica l'ammontare del costo ecologico sostenuto necessario a supportare il sistema e il suo livello di organizzazione, espresso in equivalenti di energia solare (*solar emjoule*). Ciò permette di andare oltre l'analisi economica tradizionale, amplificando la prospettiva di valutazione da antropocentrica a eco-centrica per la quale il sistema economico è solo un sottosistema di quello ecologico. L'approccio emergetico, inoltre permette di esaminare in modo esauriente anche il grado di sostenibilità tramite la definizione di specifici indicatori di sostenibilità, applicabili anche su scala aziendale. Ciò potrebbe produrre vantaggiosi risvolti anche in visione del dibattito in corso per la definizione della nuova PAC incentrata principalmente su una nuova forma di pagamenti ecologici che rientrano nel cosiddetto processo di inverdimento o *greening*, potenziando gli strumenti di intercettazione e incentivazione della produzione di beni pubblici e SAE. Tuttavia questi approcci sono stati oggetto di diverse critiche da parte della comunità scientifica, a causa della ancora esigua disponibilità di sistemi e metodologie standardizzate anche a livello internazionale (ad esempio per i coefficienti di conversione, che non sempre sono aggiornati e adeguati alle varie situazioni). Inoltre, gli algoritmi di calcolo sono ancora eccessivamente laboriosi e poco flessibili per applicazioni su larga scala. Per tali ragioni è necessario uno sforzo alla ricerca di un dialogo interdisciplinare in grado di superare i limiti anteposti, prendendo coscienza della complessità che governa l'essenza di tutti i sistemi ecologici. Ciò anche superando se necessario il paradigma riduzionista e il metodo analitico tradizionale e supportando sempre più una prospettiva olistica che tenga conto non solo del valore economico di mercato di questi beni, ma anche del valore ecologico, secondo lo stesso concetto di *donor value* teorizzato da Odum, offrendo una strada più chiara nel prosieguo degli obiettivi di sostenibilità e sviluppo sostenibile a cui tutta l'umanità è chiamata.

BIBLIOGRAFIA

- Agostinho, F.D.R., Ortega, E., Diniz, G. (2004). *Evaluation of family-managed small farms using energy methodology*. In Ortega, E. and Ulgiati, S (eds): Proceedings of IV biennial international workshop "Advances in Energy Studies". Unicamp, Campinas, Brazil. June 16-19.
- Ayres, R., (1978). *Resources, Environment, and Economics: Applications of the Materials/Energy Balance Principle*. Wiley - Interscience. US: New York.
- Ayres, R.U. and Kneese, A.V.(1969). Production, Consumption, and Externalities. *The American Economic Review*, 59 (3): 282-297.
- Bastianoni, S., Nielsen, S.N., Marchettini, N., Jorgensen, S.E. (2005). Use of thermodynamic functions for expressing some relevant aspects of sustainability. *International Journal of Energy Research*, 29:53-64
- Brown, M.T., and Campbell, E. (2007). Evaluation of natural capital and environmental services of U.S. national forests using energy synthesis. – Final report, Center for Environmental Policy – University of Florida, Gainesville.

- Bryant, J. (2009). *Thermoeconomics: A thermodynamic approach to economics*. VOCAT International Ltd, UK: Harpenden.
- Candea, J.C., De Miguel, J.R., Indurain, E., Mehta, G.B. (2001). Utility and entropy. *Economic Theory*, 17: 233-238.
- Castellini, C. Bastianoni, S. Granai, C., Dal Bosco, A. Brunetti, M. (2006). Sustainability of poultry production using the emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114: 343-350.
- Chen, J. (2005). *The physical foundation of economics: an analytical thermodynamic theory*. World Scientific. China: Singapore.
- Chen, G.Q., Jiang, M.M., Chen, M., Yang, Z.F., Lin, C. (2006). Emergy analysis of Chinese agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 115: 161-173
- Chen, G.Q., Jiang, M.M., Yang, Z.F., Chen, M., Jia, X., Zhou, J.B. (2009). Exergetic assessment for ecological economic system: Chinese agriculture. *Ecological Modelling*, 220: 397-410.
- Cleveland, C.J. (1987). Biophysical economics: historical perspective and current research trends. *Ecological Modelling*, 38: 47-73.
- Coomoner, B. (1971). *The closing circle*. Bantam Books. US: New York
- Cornelissen, R.L., Hirs, G.G. (1997). Exergetic optimization of a heat exchanger. *Energy Conversion Management* 38 (15-17), 1567-1576.
- Costanza, R., (1980). Embodied energy and economic valuation. *Science*, 210: 1219-1224.
- Costanza, R. (ed.) (1991). *Ecological Economics. The Science and management of Sustainability*. Columbia University Press, US: New York.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Suttonkk, P., van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253-260.
- Daily, G.C. (ed.) (1997). *Nature's services: societal dependence on natural systems*. Island Press, US: Washington DC.
- Daly, H.E., (1977). *Steady-State Economics*. Freeman, US: San Francisco, CA.
- Daly, H.E., (1990). Toward some operational principle of sustainable development. *Ecological Economics*, 2: 1-6.
- Dewulf, J., Van Langenhove, H., Van De Velde, B. (2005). Exergy-Based efficiency and renewability assessment of biofuel production. *Environmental Science and Technology*. 39: 3878-3882
- Dewulf, J., Bösch, M.E., De Meester, B., Van Der Vorst, G., Van Langenhove, H., Hellweg, S., Hudijbregts, A.J., (2007). Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource accounting. *Environmental Science and Technology*. 41: 8477-8483
- Fath, B.D., Jorgensen, S.E., Patten, B.C., Straskraba, M. (2004). Ecosystem growth and development. *BioSystems*, 77: 213-228.
- Franzese, P.P., Riccio, A., Scopa, A. (2003). Analisi eMergetica in ambiente GIS per la valutazione della sostenibilità ambientale: il caso studio del Comune di Roccamonfina, *Biologi Italiani*, 8: 61-66.
- Franzese, P. P., Russo, G.F., Ulgiati, S. (2006). Richieste di energia in agricoltura: valutazione comparata energetica ed emergetica, *Biologi Italiani*, 3: 49-55.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press, US: Cambridge, MA.
- Georgescu-Roegen, N. (1975). *Energia e miti economici*. Edizione 1998 - Bollati Boringhieri, Italia: Torino.
- Giannantoni, C. (2002). *The Maximum Em-Power Principle as a basis for Thermodynamics of quality*. Servizi Grafici Editoriali snc, Italia: Padova.
- Hau, J. L., Bakshi, B.R. (2004). Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, 178: 215-225.
- Heal, G.M. and Small, A.A., (2002). Agriculture and ecosystem services. In Gardner, B. and Rauser, G. (eds). *Handbook of Agricultural Economics*, Volume 2, 1343-1368. Elsevier Science B.V., Holland: Amsterdam.

- Hoang, V-N., and Alauddin, M. (2011). Analysis of agricultural sustainability: A review of exergy methodologies and their application in OECD countries. *International Journal Energy Research*, 35:459-476.
- Huang, S-L. Chen, Y-H., Kuo, F-Y., Wang, S-H. (2011). Emergy-based evaluation of peri-urban ecosystem services. *Ecological Complexity*, 8: 38-50.
- Jiang, M.M., Zhou, J.B., Chen B., Chen, G.Q. (2008). Emergy-based ecological account for the Chinese economy in 2004. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 13: 2337-2356.
- Jorgensen, S. E. (1992). Exergy and ecology. *Ecological Modelling* 63: 185-214.
- Jorgensen, S. E. (2010). Ecosystem services, sustainability and thermodynamic indicators. *Ecological Complexity*, 7: 311-313.
- Jorgensen, S. E., Odum, H.T., Brown, M.T. (2004). Emergy and exergy stored in genetic information. *Ecological Modelling*, 178: 11-16.
- Jorgensen, S.E., Costanza, R., Xu, F.L. (2005). *Handbook of ecological indicators for assesment of ecosystem health*. CRC Press, US Boca Raton, pp. 5–104
- Jørgensen, S.E., Fath, B., Bastiononi, S., Marques, M., Muller, F., Nielsen, S.N., Patten, B.C., Tiezzi, E., Ulanowicz, R. (2007). *A new ecology. Systems perspectives*. Elsevier, Holland: Amsterdam.
- Lagerberg, C. and Brown, M.T. (1999). Improving agricultural sustainability: the case of Swedish greenhouse tomatoes. *Journal of Cleaner Production*, 7(6): 421-434.
- La Rosa, A.D., Siracusa, G., Cavallaro, R. (2008). Emergy evaluation of Sicilian red orange production. A comparison between organic and conventional farming. *Journal of Cleaner Production*, 16: 1907-1914.
- Leontief, W. (1986). *Input-Output Economics*, Oxford University Press, US: New York.
- Liu, S., Costanza, R., Farber, S., Troy, A. (2010). Valuing ecosystem services. Theory, practice, and the need for a transdisciplinary synthesis. *Annal of the New York Academy of Sciences*, 1185: 54-78.
- Lotka, A.J. (1922). Contributions to the energetics of evolution. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 8: 147-151
- Lotka, A.J. (1924). *Elements of Physical Biology*. Williams and Wilkins, US: Baltimore, MD.
- MA (2005). Living beyond our means: natural assets and human well-being. Available on <http://www.maweb.org/documents/document.429.aspx.pdf> (accesso: Aprile 2012).
- Martinez-Alier, J. (1987). *Ecological Economics*. Basil Blackwell, US: New York.
- Meadows, D.H., Behrens, W.W., Meadows, D.L., Randers, J. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books. US: New York.
- Nilsson, S. and Kristoferson, L., (1976). Energy Analysis and Economics, *Ambio*, 5 (1): 27-29
- Odum, E.P. (1969) The strategy of ecosystem development. *Science* 164: 262-270
- Odum, H.T. (1971). *Environment, power, and society*. Wiley - Interscience, US: New York.
- Odum, H.T. (1996). *Environmental accounting. Emergy and environmental decision making*. John Wiley & Sons, Inc., US: New York.
- Odum, H. T. (1988). Self- Organization, transformity and information. *Science*, 242: 1132-1139.
- Odum, H.T. and Odum, E.P., (2000). The energetic basis for valuation of ecosystem services. *Ecosystems*, 3: 21-23.
- Ozkan, B., Akcaoz, H., Fert, C. (2004). Energy input–output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, 29: 39-51.
- Pauli, G. (2010). *The blue economy. 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs*. Paradigm Publishers. US: Boulder, CO.
- Pimentel, D., Hurd, L.E., Bellotti, A.C., (1973). Food production and energetic crisis. *Science* 182: 443–449.
- Pizzigallo, A.C.I., Granai, C., Borsa, S. (2008). The joint use of LCA and emergy evaluation for the analysis of two Italian wine farms. *Journal of Environmental Management*, 86: 396-406.

- Podolinsky, S.(1883). Menschliche Arbeit und Einheit der Kraft. *Die Neue Zeit*, Vol. 1. September.
- Prigogine, I. (1967). *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, Interscience Publisher, US: New York.
- Prigogine, I. and Kondepudi, D. (1998). *Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures*. John Wiley & Sons, UK: Chichester.
- Rant, Z. (1956). Exergie, ein neues Wort für "Technische Arbeitsfähigkeit". *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 22: 36-37.
- Sagoff, M. (2011). The quantification and valuation of ecosystem services. *Ecological Economics*, 70: 497-502.
- Scienceman, D.M. (1987). *Energy and emergy*. In: Pillet, G., Murota, T. (eds). *Environmental economics.*: Roland Leimgruber, Switzerland: Geneva.
- Sciubba, E. (2001). Beyond thermoeconomics? The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. *Exergy. An International Journal* 1 (2), 68–84.
- Soddy, F. (1922). *Cartesian Economics*. Hendersons, UK: London.
- Steinborn, W., and Svirezhev, Y. (2000). Entropy as an indicator of sustainability in agro-ecosystems: North Germany case study. *Ecological Modelling*, 133: 247-257.
- Svirezhev, Y. M. (2000). Thermodynamics and ecology. *Ecological Modelling*, 132: 11-22.
- Svirezhev, Y. M., and Svirejeva-Hopkins, A. (1998). Sustainable biosphere: critical overview of basic concept of sustainability. *Ecological Modelling*, 106: 47-61.
- Szargut, J. (2005). Exergy Analysis. *Academia*, 3 (7): 31-33.
- Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., (1988). *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*. Hemisphere Publ. Corp. US: New York.
- TEEB (2009). The Economics of Ecosystems and Biodiversity for national and international Policy Makers. United Nations Environment Programme.
- Tribus, M., Evans. R. B. (1963). Thermo-economics of Sea Water Conversion, Dept. Engineering, University of California, Los Angeles, Rept. 62-53 (February 1963).
- Ulanowicz, R.E. and Hannon, B.M. (1987). *Life and the production of entropy*. Proc. Royal Soc. UK: London, pp. 181–192.
- Ulgiate, S., Odum, H., Bastianoni (1994). Emergy use, environmental loading and sustainability. An emergetic analysis of Italy. *Ecological Modelling* 73: 215-268.
- UN (2008). The Millennium Development Goals Report. United Nations, US: New York.
- Valero, A., Serra, L., Lozano, M.A. (1993). Structural theory of thermoeconomics. In Richter, H.J.(ed). *Thermodynamics and the design analysis and improvement of energy systems*. AES-Vol. 30/HTD-Vol. 266, pp. 241-247, ASME (American Society of Mechanical Engineers). US: New York.
- Voora, V., Thrift, C. (2010). Using Emergy to Value Ecosystem Goods and Services. International Institute for Sustainable Development (IISD) - Alberta Environment, Alberta.
- Wall, G., Sciubba, E., Naso, V. (1994). Exergy use in the Italian society. *Energy*, 19, (12): 1267-1274.
- Watanabe, M.D.B., and Ortega E. (2011). Ecosystem services and biogeochemical cycles on a global scale: valuation of water, carbon and nitrogen processes. *Environmental Science & Policy*, 4: 594-604.