

Riccardo Maria Pulselli  
Dipartimento di Chimica  
Università di Siena  
pulselli@unisi.it

CHIMICA  
FISICA,  
CHIMICA

## DELL'AMBIENTE E DEI BENI CULTURALI IL GRUPPO DI ECODINAMICA DI SIENA



"Emergence of novelties". Fotografia dalla mostra "Sacro e Sorriso. Natura e Mercati tra Gange e Chichicastenango" di Enzo Tiezzi

*Un aspetto della ricerca in tema di ambiente è la sua duplice impostazione: una, di carattere teorico epistemologico, tesa ad indagare la complessità dei sistemi reali e a delineare i criteri della sostenibilità; l'altra rivolta a sviluppare nuovi strumenti per studiare processi di trasformazione, ecosistemi, sistemi territoriali ed economici. La coerenza tra questi due livelli è alla base dell'attività del gruppo di ecodinamica di Siena.*

**N**on è insolito constatare che, nell'immaginario collettivo, la chimica viene recepita come una scienza che opera all'interno di un limitato campo d'azione ed è spesso interpretata nell'unica accezione classica della chimica molecolare. In realtà, le scienze chimiche affrontano da sempre una vasta gamma di tematiche e indagano fenomeni a diversi livelli e scale dimensionali e temporali. Sappiamo che l'energia, la materia, perfino le emozioni, il pensiero, la vita stessa, sono manifestazioni di processi chimici più o meno complessi. Proprio in virtù del fatto che la chimica pervade tutte le forme ed espressioni del mondo reale, il suo approccio coinvolge trasversalmente numerosi campi della conoscenza. Soprattutto in tempi recenti, la chimica si pone come cardine, punto di contatto tra settori e discipline diverse come l'ecologia, le scienze ambientali ed anche l'economia, le scienze del territorio e dei beni culturali. È perciò interesse dei ricercatori nell'ambito delle scienze chimi-

che verificare verso quali frontiere sia opportuno orientare la ricerca in questo settore, avendo cura di mantenere una propria ortodossia di fondo. In particolare, un obiettivo al quale oggi è essenziale rivolgere la massima attenzione, promuovendo l'integrazione e la sinergia tra studiosi nei vari campi del sapere, è certamente quello di perseguire uno sviluppo duraturo e sostenibile.

A questo criterio è ispirata l'attività del *gruppo di ecodinamica* dell'Università di Siena, diretto da Enzo Tiezzi e formato da un'equipe di ricercatori nel campo della chimica fisica, della chimica dell'ambiente e dei beni culturali. All'interno del gruppo, collaborano chimici ed ecologi, dottori in scienze naturali e ambientali, economisti, ingegneri e architetti. L'inizio dell'attività risale agli anni Sessanta, dalla collaborazione di Enzo Tiezzi con Barry Commoner presso la Washington University di St. Louis, che ha portato ad estendere il campo di ricerca dalle risonanze magnetiche allo studio dell'ambiente e degli ecosistemi. Poi, negli anni

Settanta, la collaborazione con il premio nobel Ilya Prigogine ha aperto nuove prospettive verso lo studio dei sistemi viventi attraverso la visione della fisica e termodinamica evolutiva. Le numerose collaborazioni con gruppi di ricerca nazionali e internazionali, instaurate e consolidate negli anni, hanno infine contribuito ad estendere le competenze dei ricercatori di Siena rispetto alle questioni ambientali e a sviluppare una visione rigorosa e articolata del tema della sostenibilità.

## Chimica fisica, strutture dissipative, reazioni oscillanti

La termodinamica è la scienza che permette di spiegare i processi generali che regolano il comportamento dei sistemi viventi e di affrontare tematiche esistenziali come l'origine e il mantenimento della vita sul pianeta, la complessità e l'emergere di novità in natura. Un aspetto rilevante della ricerca condotta dal gruppo di ecodinamica di Siena consiste nello spiegare, in termini teorici, il comportamento di sistemi dinamici complessi a partire dall'osservazione di alcune particolari reazioni chimiche oscillanti, ma anche di organismi viventi, ecosistemi e, vedremo, sistemi economici e sociali (un'accurata e articolata trattazione scientifica sui recenti sviluppi delle scienze evolutive e dell'epistemologia della scienza è raccolta nel volume "Verso una Fisica Evolutiva" di Enzo Tiezzi [1], che riprende il percorso già intrapreso da Prigogine).

Prigogine ha definito questi sistemi *strutture dissipative* per la capacità di organizzarsi in forme coerenti e mantenerle nel tempo. Queste proprietà sono dovute a due caratteristiche essenziali e necessarie. La prima è che un sistema dissipativo è un sistema aperto, cioè in relazione con l'ambiente esterno con il quale attiva scambi di energia e materia. La seconda è che una struttura dissipativa è un sistema complesso con una configurazione d'insieme coerente e in grado di adattarsi a sollecitazioni indotte dall'ambiente circostante e autoorganizzarsi.

In una recente pubblicazione, risultato di una collaborazione di vari autori, "A New Ecology; Systems Perspective" [2], sono state descritte le principali proprietà degli ecosistemi, a partire dalla termodinamica di Prigogine, per individuare i principi basilari di una teoria ecologica dei sistemi in grado di orientare le nuove tecniche di osservazione della natura. In particolare, in questo volume, Tiezzi e Ulanowicz hanno posto l'attenzione sul concetto di "ontic openness" ad indicare che ogni

sistema è unico nel suo genere in quanto risultato di un percorso evolutivo epigenetico in cui elementi e sistemi diversi si sono combinati in una successione di scelte e eventi causali. L'autoorganizzazione di un sistema è garantita dalla presenza di un confine, un'interfaccia che permette di modulare le relazioni tra il sistema e l'ambiente esterno e ne condiziona l'evoluzione.

Tiezzi, Marchettini e coautori [3] hanno osservato queste caratteristiche nella formazione di ecosistemi naturali. Un emblematico caso di studio recentemente documentato è quello della formazione spontanea di biodiversità in barriere naturali nella laguna di Venezia, dette barene. Sono significative inoltre le similitudini e complementarità riscontrate, con la collaborazione di Emilio Del Giudice [4], tra la visione della termodinamica evolutiva e quella della fisica quantistica. In particolare, i criteri di formazione di strutture dissipative in natura sembrano coincidere sempre con l'esistenza di domini di coerenza definiti nell'ambito della teoria dei campi quantici (quantum field theory).

La recente collaborazione con le Università di Palermo, Sassari e Firenze ha focalizzato l'attenzione sulle dinamiche di particolari reazioni chimiche, come la reazione di Belousov-Zhabotinsky (BZ) [5-8], che, attraverso manifestazioni eclatanti (Fig. 1), potrebbero fornire utili informazioni per migliorare la nostra capacità di comprendere i processi di formazione di strutture ordinate dal caos. Non a caso, "order out of chaos" è un'espressione tipica della scuola di Prigogine per descrivere un tipico aspetto del comportamento dei sistemi complessi.

Dalla termodinamica alla modellistica ambientale, agli indicatori di sostenibilità.

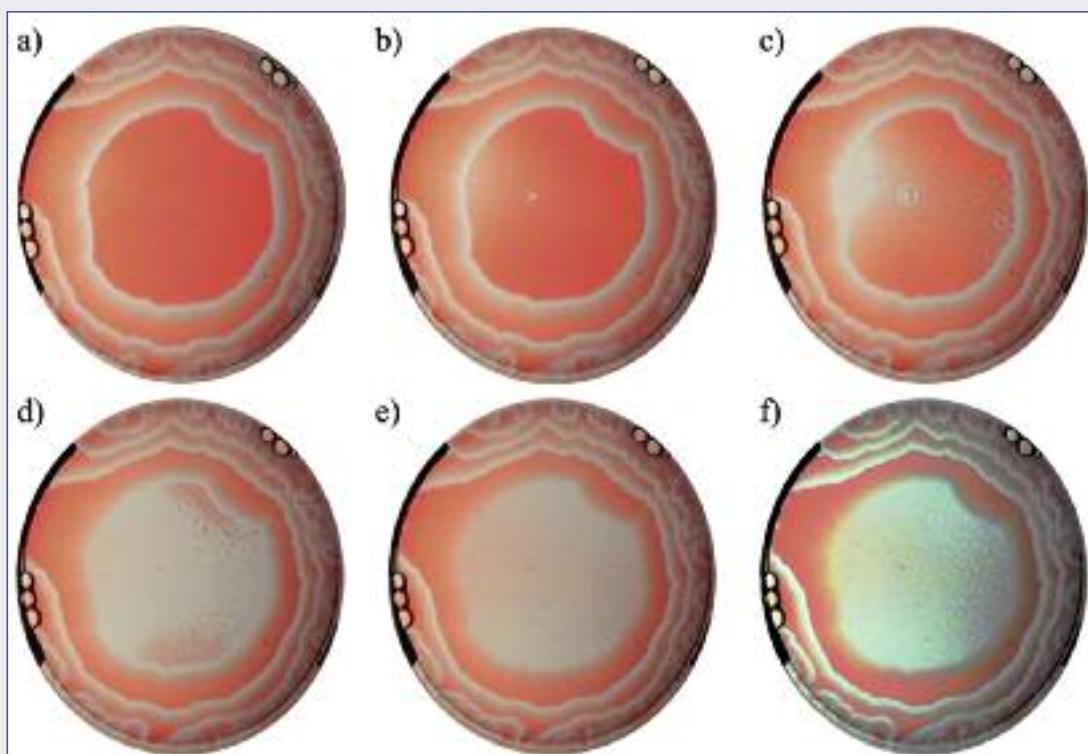


Fig. 1 - Coesistenza di strutture stazionarie (al centro del reattore) e onde concentriche in una reazione BZ condotta in sistemi spazialmente estesi e in presenza di micelle anioniche. Il tempo trascorso tra i fotogrammi a)-f) è di 18 secondi

# CHIMICA & AMBIENTE

Howard Odum è stato un professore di scienze ambientali all'Università della Florida ed è noto per aver ideato interessanti teorie e modelli termodinamici per l'analisi su base energetica di sistemi reali, di scale e complessità diverse, naturali e antropici. Egli sosteneva che "serve un *macroscopio* per vedere il tutto". L'idea del *macroscopio* di Odum è abbastanza efficace per descrivere un approccio di studio che il gruppo di ecodinamica di Siena ha fatto proprio. La costruzione di modelli ambientali in forma di schemi e diagrammi risponde all'esigenza di ricercare una visione d'insieme di un sistema per osservare le relazioni tra le componenti, i processi interni e quelli tra il sistema e l'esterno. La potenzialità applicativa della modellistica di Odum ha permesso ai ricercatori di spaziare su diversi campi d'indagine elaborando informazioni per l'analisi di sistemi agricoli [9-11], processi produttivi [12, 13], sistemi di gestione di risorse idriche [14] e rifiuti [15], tecniche costruttive [16], processi di messa in opera e uso di edifici [17], oltre che per lo studio di ecosistemi [18] e di vasti ambiti territoriali [19, 20].

Con riferimento a questi ultimi, lo studio parte da un presupposto essenziale: le attività di una comunità e l'insieme eterogeneo dei processi di trasformazione presenti in un territorio sono supportati da risorse, nelle modalità in cui la natura, prima, e il mercato, poi, le rendono disponibili. Un *diagramma energetico* offre una visione d'insieme

dei principali processi e delle dinamiche di un ampio sistema territoriale che raccoglie aspetti diversi e differenti settori di attività in un unico colpo d'occhio (Fig. 2). Sono rappresentate, oltre agli elementi costitutivi, le principali fonti di risorse, gli scambi di energia e materia, i flussi in entrata verso il sistema (che Odum chiamava *driving energies*), output e scarti del sistema stesso.

I sistemi territoriali sono stati oggetto d'indagine in un libro dal titolo "City out of Chaos. Urban Self-organization and Sustainability" [21], in particolare, con lo scopo di promuovere un nuovo approccio operativo allo studio e alla gestione delle città contemporanee.

L'elaborazione di dati statistici attraverso metodi di contabilità ambientale e il calcolo di indicatori sono il mezzo attraverso il quale è possibile ottenere una misura del livello di sostenibilità o insostenibilità di sistemi o processi. Un'accurata trattazione dei più diffusi indicatori di sostenibilità è stata presentata nel libro "La Soglia della Sostenibilità; ovvero quello che il PIL non dice" [22], il quale, secondo Peter N. Jones del Bauu Institute di Boulder (Colorado), è "una road map della sostenibilità".

Come suggeriscono gli autori, il calcolo di indicatori risponde alla necessità di esprimere, attraverso un'informazione

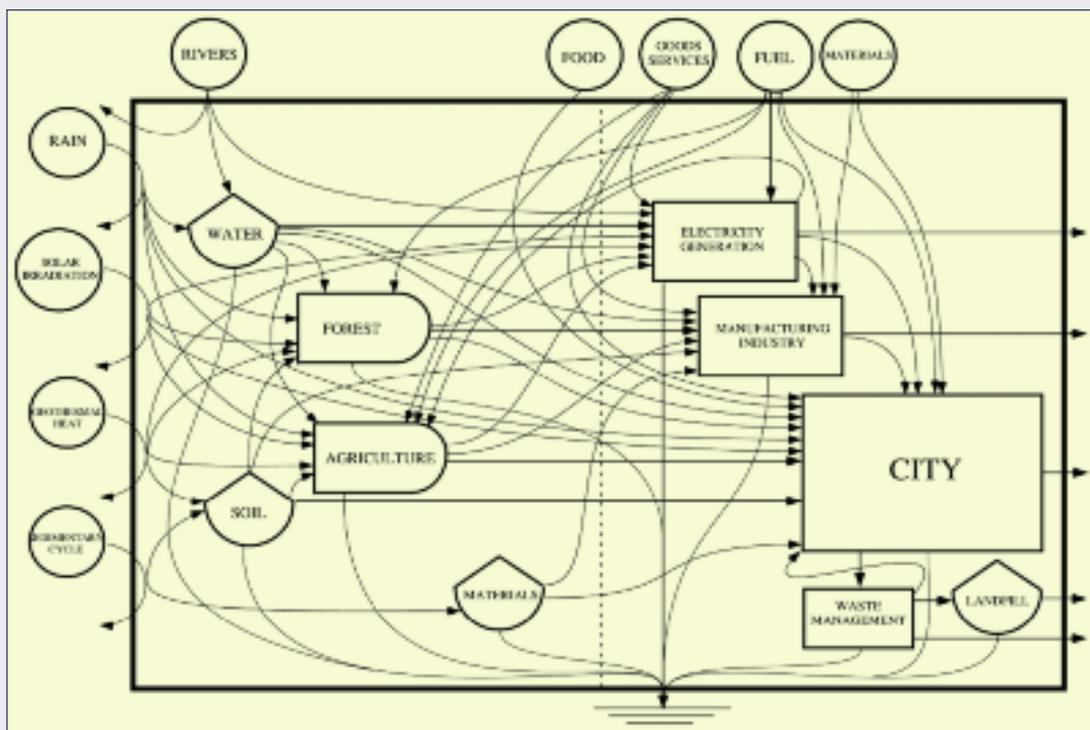


Fig. 2 - Diagramma di un sistema territoriale e dei flussi di energia e materia che lo alimentano

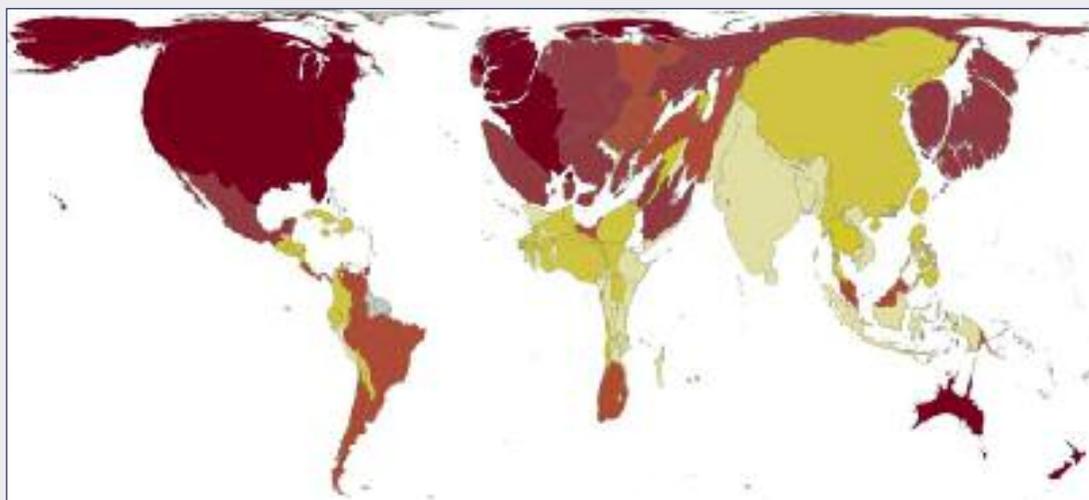


Fig. 3 - Mappa dell'impronta ecologica dei paesi del mondo - UNEP, WCMC, WWF. Living Planet Report. World Wildlife Found Editor, 2006. I Paesi sono rappresentati proporzionalmente alla loro impronta ecologica complessiva. La scala di colori è relativa al valore dell'impronta pro-capite

sintetica, una chiara diagnosi sullo stato di salute di un sistema o processo.

Enzo Tiezzi, nella prima edizione del 1984 del suo libro *Tempi Storici, Tempi Biologici* [23], ha affermato che il problema della sostenibilità è un problema di tempi. Un organismo che consuma più rapidamente di quanto l'ambiente produca per la sua sussistenza non ha possibilità di sopravvivenza. Che i due tempi, di prelievo e di rigenerazione, di emissione e di assorbimento, siano fuori fase è dimostrato dal calcolo dell'*Impronta Ecologica*, un indicatore ideato da William E. Rees e Mathis Wackernagel, negli anni Novanta (l'impronta della popolazione mondiale è pari 1,3 pianeti). L'impronta ecologica corrisponde alla superficie di ecosistemi necessari a produrre le risorse ambientali utilizzate e ad assorbire le emissioni di una popolazione o di un dato processo (si esprime in m<sup>2</sup> globali). Il confronto tra impronta ecologica e biocapacità permette di stilare il bilancio ecologico e valutare il deficit o il surplus ecologico di una regione (Fig. 3).

Nell'ambito del progetto SPIn Eco (i risultati del progetto sono stati pubblicati in un numero speciale del *Journal of Environmental Management*, **86**, 2008) [9, 18, 24, 25], che ha coinvolto molti ricercatori dell'Università di Siena in collaborazione con altre Università in Europa e negli Stati Uniti, sono stati calcolati alcuni indicatori di sostenibilità per il territorio della provincia di Siena. L'impronta ecologica di Siena ha mostrato un deficit del 3% rispetto alla biocapacità, una condizione decisamente virtuosa rispetto a quelle normalmente riscontrate in altre regioni d'Italia e, in generale, nei Paesi industrializzati. È stata inoltre elaborata una *valutazione emergetica* [18] per stimare la quantità di *energia solare equivalente* (sej) utilizzata a monte dei principali processi, con riferimento sia alle attività antropiche, sia ai cicli naturali che generano le risorse (energia solare, ciclo sedimentario, calore geotermico, etc.). Nel caso di Siena è risultato che il valore totale dell'emergia in entrata è dovuto per oltre il 30% a beni importati dall'esterno e acquisiti dal mercato. Parte delle risorse utilizzate (54%) sono prelevate da riserve locali non rinnovabili.

Nell'ambito del più recente progetto REGES (Riduzione delle Emissioni di Gas ad Effetto Serra), realizzato in collaborazione con l'Amministrazione Provinciale di Siena e con il RINA spa, è stato presentato un *Inventario Gas Serra* [25], basato sui criteri del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Questo è servito a calcolare la portata delle emissioni di gas serra (CO<sub>2</sub> equivalente) direttamente o indirettamente imputabili alle attività presenti nella provincia (si veda in proposito un approfondimento nei numeri 5 e 8 del 2008 de *La Chimica & l'Industria* [26, 27]). È risultato che, nella provincia di Siena, più del 70% di quanto emesso viene assorbito dagli ecosistemi locali. Questo progetto rappresenta il primo caso in Europa di certificazione delle emissioni e delle rimozioni di gas serra da parte di un Ente Pubblico secondo la norma ISO 14064 (che regola la certificazione degli inventari dei gas ad effetto serra).

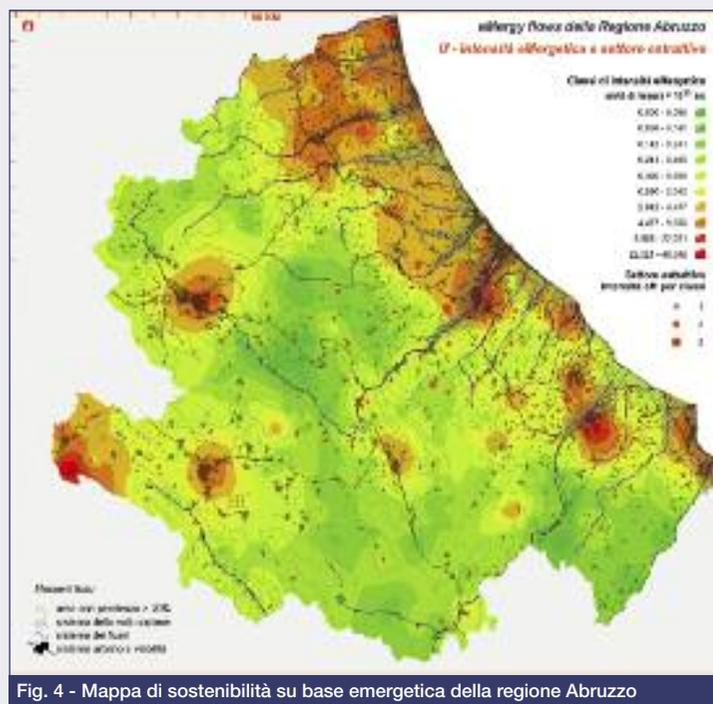
Metodi e indicatori hanno inoltre un vasto campo di applicazione su specifici processi produttivi. Oltre ai più consolidati metodi di valutazione emergetica e LCA, recentemente è stata sperimentata un'applica-

zione del calcolo dell'impronta ecologica all'agricoltura per fare un confronto di due vini toscani prodotti da uva biologica e da uva convenzionale. È risultato che ad ogni bottiglia di vino da produzione biologica corrisponde un'impronta (7,17 *global m*<sup>2</sup>) pari alla metà di quella del vino prodotto in maniera semi-industriale (13,98 *global m*<sup>2</sup>) [10]. Nel giugno 2006, Siena ha ospitato il footprint forum, convegno mondiale dell'impronta ecologica. La seconda edizione sarà ospitata nuovamente a Siena dal 7 all'11 giugno 2010.

## Termodinamica e sistemi territoriali: mappe di sostenibilità

Ipotizziamo di voler misurare il carico ambientale delle attività umane su un territorio in relazione ai diversi usi del suolo e di poterlo rappresentare in una mappa. Lo scopo sarebbe quello di approfondire la conoscenza degli effetti delle attività che hanno luogo in ogni specifico ambito territoriale, dei principali processi, delle diverse intensità d'uso delle risorse ambientali o delle loro emissioni, e osservarne concretamente la disposizione sul territorio. In questa direzione è stato predisposto uno studio specifico, sviluppato per conto del *Settore Direzione Parchi Territorio Ambiente Energia* della Regione Abruzzo. La rappresentazione di patterns cromatici, visualizzati su una base cartografica, ha individuato uno schema organizzativo generale e raccontato un aspetto inedito delle dinamiche del sistema territoriale abruzzese. I risultati mostrano come la condizione d'uso delle risorse ambientali sia diffusa in maniera disomogenea su tutta l'area e diversamente nei vari ambiti locali. Il calcolo è stato eseguito su base emergetica (Fig. 4).

Nella mappa, i valori più alti sono indicativi di un'area dinamica, interessata da intensi consumi e processi di trasformazione delle risorse.



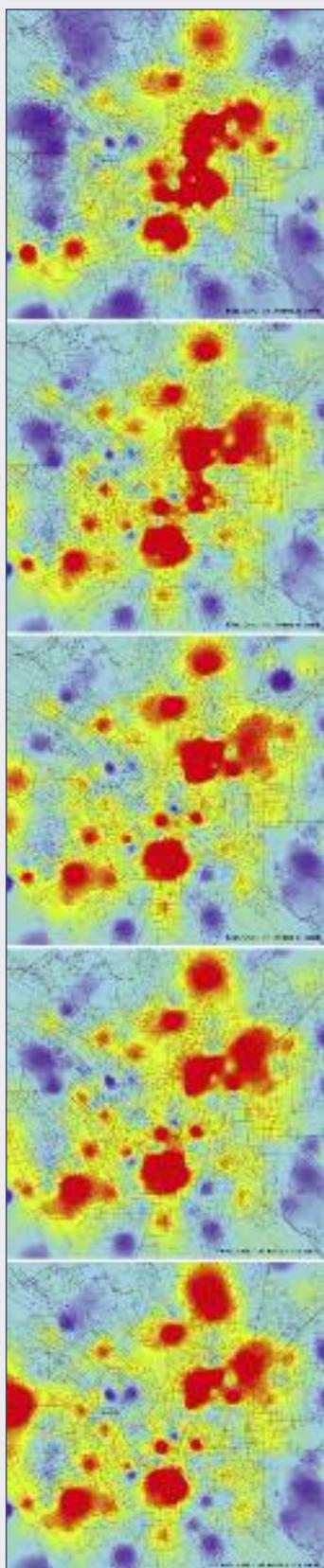


Fig. 5 - Variazioni della densità di popolazione rilevate attraverso l'intensità di attività della telefonia mobile nella città di Milano

se. Le aree urbanizzate con alta densità di servizi, insieme ai distretti industriali e alle sedi commerciali, coincidono con queste aree a maggiore intensità. La densità di popolazione incide sulla base dei consumi energetici, idrici e alimentari; le attività produttive incidono sulla base dei movimenti e flussi di merci che interessano i vari settori manifatturieri; la localizzazione delle cave e miniere incide proporzionalmente alle quantità di materiali estratti (queste sono state rappresentate come spots circoscritti). Le superfici agricole e le aree boschive o naturali indicano una disponibilità di suolo libero da presenze antropiche. Queste zone coincidono con le aree a minore intensità di flussi in entrata. L'intensità di flussi di energia e materia provenienti, in massima parte (circa il 70% nel caso dell'Abruzzo), dal mercato globale, permette di interpretare ogni ambito territoriale come parte di un sistema interessato da reti di processi che superano la dimensione locale. La mappa dei flussi, offre dunque un punto di vista privilegiato per osservare la consistenza di queste reti immateriali, non osservabili altrimenti. Ci chiediamo in che modo flussi di energia e materia sono convogliati sul territorio. Come si dispongono nello spazio e con quali intensità? Quanta parte dei flussi che alimentano il territorio viene dall'esterno e dal mercato globale? È evidente che tanto più un sistema è organizzato, articolato, dinamico, tanto maggiore sarà la domanda di energia e materia necessaria a supportare l'insieme di attività che si svolgono al suo interno.

## Dalla termodinamica alla cinetica dei sistemi urbani

Una recente ricerca ha rivolto l'attenzione alla componente propriamente dinamica dei sistemi urbani. Questo studio ha portato allo sviluppo di una tecnica sperimentale di monitoraggio che è in grado di apprezzare le variazioni della densità di popolazione in tempo reale e osservarne i movimenti e le dinamiche in relazione allo spazio fisico della città. Lo scopo è quello di indagare aspetti della cinetica di un sistema territoriale vasto. Infatti, la teoria cinetica è nata per spiegare le caratteristiche essenziali della materia sulla base dell'ipotesi che essa sia costituita da innumerevoli piccole particelle in movimento. Nella comune applicazione ai gas, questa teoria permette di calcolare il comportamento macroscopico del gas in base alle proprietà microscopiche (velocità, energia cinetica, ecc.) delle molecole che lo compongono. Anche la cinetica chimica studia le variazioni di concentrazione di reagenti e prodotti nel tempo. Ispirandosi a queste teorie, lo studio sulle variazioni di densità della popolazione nel tempo è stato il pretesto per indagare le possibili correlazioni tra le varie parti del sistema, tra la popolazione e le strutture del territorio. I patterns di densità, visualizzati attraverso la tecnologia delle telecomunicazioni mobili, sono stati interpretati come un'espressione tangibile dell'organizzazione generale del sistema sociale urbano e del livello di dinamismo che questo sostiene (Fig. 5).

Il progetto di studio sulle dinamiche urbane è stato sviluppato in collaborazione con il SENSEable City Laboratory del Massachusetts Institute of Technology di Boston, con il patrocinio dell'Assessorato alla Tutela della Qualità della Vita e dell'Ambiente della Provincia di Pescara e con il contributo di Telecom Italia Mobile [21, 28-32]. In questo caso l'oggetto dell'indagine era un'ampia area urbanizzata che identifichiamo come il sistema metropolitano di Pescara. Attualmente è in corso un progetto di ricerca denominato MOTO (mobilità Toscana), finanziato nell'ambito del bando ricerca e innovazione in campo territoriale e ambientale della Direzione Generale delle Politiche Territoriali Ambientali.

## Economia ecologica: come integrare ecologia, economia e termodinamica

Uno dei capisaldi fondamentali dell'analisi dei sistemi economici è il Prodotto Interno Lordo (PIL), la cui crescita o massimizzazione, a giudicare dall'attuale modello di gestione delle economie nazionali, è un obiettivo strategico di ogni azione politica. Il PIL rappresenta la dinamicità di un sistema economico, perché è il valore monetario di ciò che l'economia di un paese produce in un anno. È opinione comune che la sua crescita sia foriera di opulenza, occupazione, sicurezza e, in generale, benessere diffuso. Tuttavia, la crescita economica ha dei limiti biofisici, all'approssimarsi dei quali emergono fattori di stress, sia dal punto di vista sociale che ambientale.

L'attenzione per le conseguenze dell'attività umana e per la base biofisica sulla quale essa poggia ha portato alla ricerca di metodi atti ad integrare la contabilità economica tradizionale. Una delle tecniche

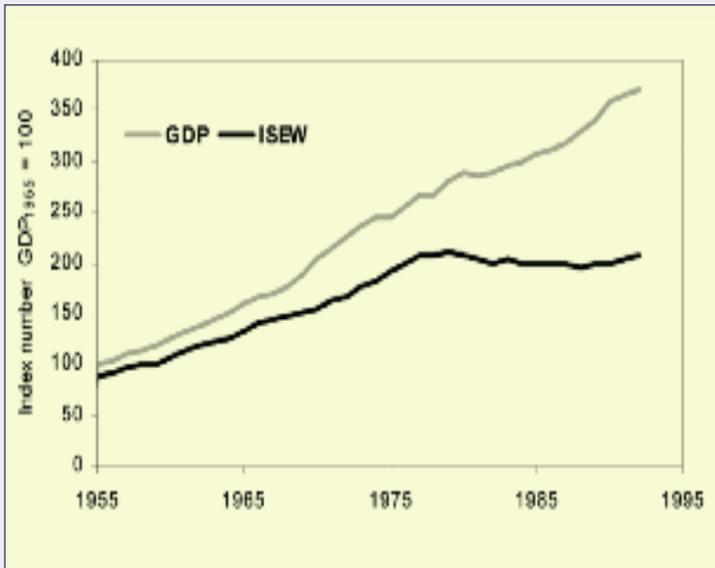


Fig. 6 - Esempio di ISEW vs. PIL per una economia nazionale

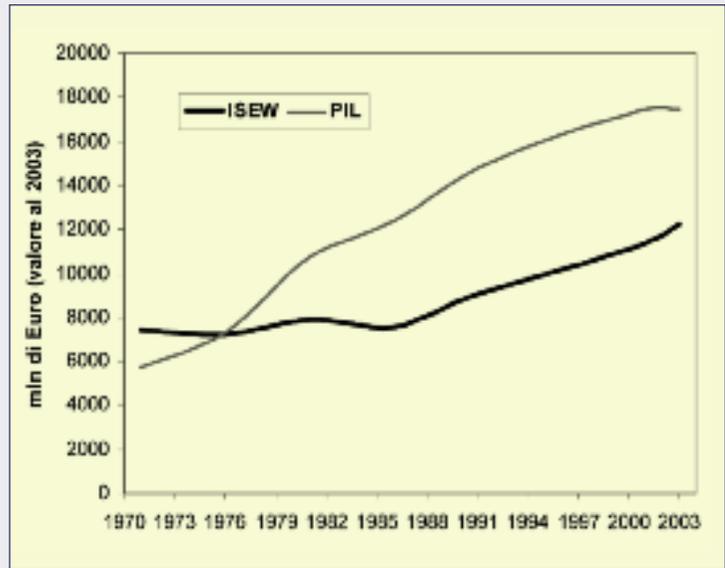


Fig. 7 - ISEW vs. PIL della Provincia di Modena (1971-2003)

di maggiore interesse consiste nel calcolo dell'indice di benessere economico sostenibile (ISEW), che coniuga esigenze economiche con elementi di sostenibilità e qualità ambientale. Nato da una proposta di Daly e Cobb nel 1989, in seno alla disciplina dell'Ecological Economics, al fine di ottenere un'immagine più completa del progresso economico e del benessere della popolazione, l'ISEW apporta alcune correzioni allo schema che presiede al calcolo del PIL: per esempio sottrae i costi sociali derivanti dall'inquinamento dell'aria e dell'acqua e dai danni ambientali di lungo termine; sottrae le spese difensive sostenute dalle famiglie per la salute e l'educazione; sottrae il deterioramento delle risorse naturali rinnovabili e l'esaurimento delle risorse naturali non rinnovabili. Inoltre al computo viene aggiunto, come elemento essenziale del benessere, il valore del lavoro domestico svolto in famiglia e generalmente non contabilizzato. Costituisce un apporto significativo anche la distribuzione del reddito (una distribuzione più equa fa crescere l'ISEW) e sono considerati i servizi offerti dai beni durevoli e dalle infrastrutture pubbliche come benefici, mentre è attribuito un valore negativo al loro costo.

Studi fatti a livello di economie nazionali mostrano come l'ISEW cresca quasi parallelamente al PIL fino ad un certo punto oltre il quale esso stagna o addirittura decresce a causa delle pressioni indotte dalla crescita economica (Fig. 6). Il gruppo di Siena ha pubblicato le prime applicazioni in Italia dell'ISEW a livello provinciale e regionale (Fig. 7) dando un contri-

buto significativo al dibattito sul nuovo pensiero economico ecologico [33, 34]. Anche dai risultati ottenuti per questi sistemi è visibile il gap tra la ricchezza misurata dal PIL e il benessere rappresentato dall'ISEW.

I risultati dell'ISEW e la sua discrepanza dal PIL rafforzano la convinzione che i sistemi antropici vadano studiati utilizzando una molteplicità di strumenti in modo da ottenere informazioni complementari utili per il governo del territorio e delle risorse. Integrazioni tra diversi strumenti sono possibili. Ad esempio è stato possibile apprezzare l'attinenza tra la stagnazione dell'ISEW, nonostante il PIL continui a crescere, e alcune problematiche ambientali rappresentate dall'aumento dell'Impronta Ecologica rispetto alla Biocapacità di una regione [35]. È stato constatato che in alcuni casi il momento del superamento dell'IE sulla Biocapacità coincide con il momento in cui un aumento di ricchezza economica (PIL) non corrisponde più ad un miglioramento delle condizioni di vita (ISEW) (Fig. 8).

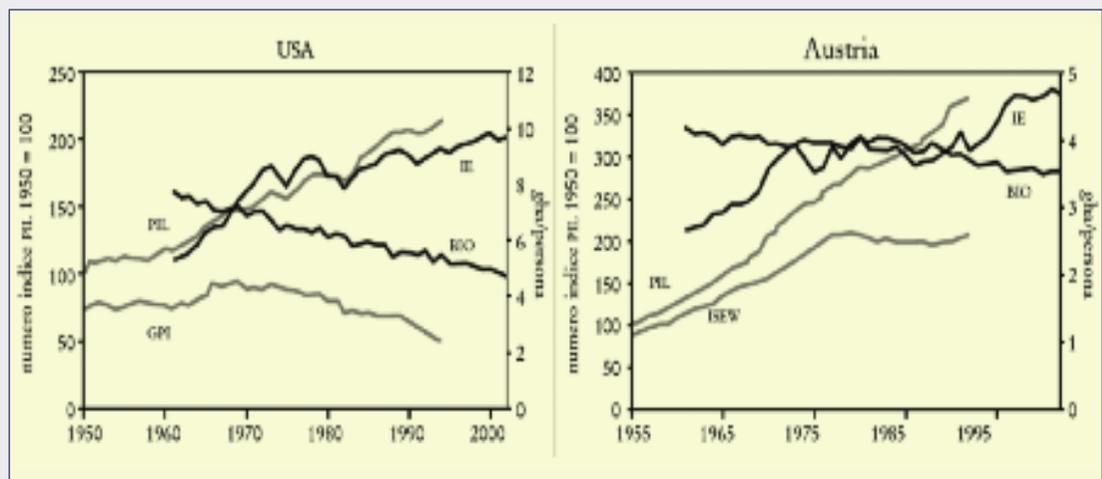


Fig. 8 - Analisi comparata di ISEW vs PIL e Impronta Ecologica vs Biocapacità. Il superamento dell'IE rispetto alla biocapacità coincide con la decrescita dell'ISEW

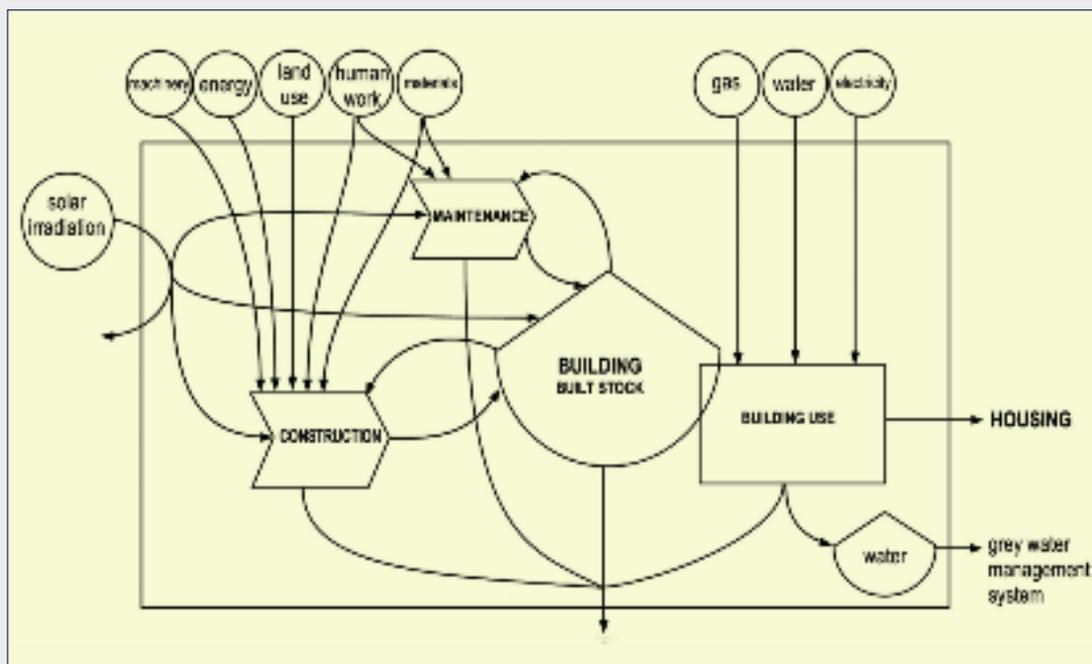


Fig. 9 - Diagramma energetico dei processi di costruzione, restauro, manutenzione e uso di un edificio

## Applicazioni della modellistica ambientale ai beni culturali

Tecniche di contabilità ambientale e indicatori di sostenibilità - come l'embodied energy, la valutazione emergetica, l'impronta ecologica, il bilancio gas serra, l'analisi del ciclo di vita - sono stati impiegati per valutare il livello di sostenibilità/insostenibilità di processi produttivi. Uno studio specifico ha riguardato le procedure di costruzione, restauro, manutenzione e uso di edifici storici, o anche di nuova edificazione.

Nel caso di un edificio è stato individuato uno schema di funzionamento che include vari processi (Fig. 9). La costruzione o il restauro di un edificio richiedono un uso intensivo di materiali ed energia, cioè flussi che formano uno stock permanente. Le risorse utilizzate nelle fasi di restauro e manutenzione sono necessarie per compensare il degrado entropico dell'edificio. In linea teorica, il flusso in entrata verso il serbatoio serve a compensare l'invecchiamento e il disfacimento delle parti. L'uso dell'edificio, infine, richiede un ulteriore apporto di risorse, attraverso le reti di impianti. Tutti questi processi possono essere quantificati e valutati nell'ottica di aumentare il livello di sostenibilità dell'abitare (housing).

Sono stati ottenuti risultati attraverso l'applicazione di metodi come l'analisi emergetica per la valutazione degli edifici. Sono state prodotte valutazioni dettagliate dei singoli materiali [12], delle parti costruttive [17], delle tecnologie costruttive impiegate anche in relazione alle condizioni climatiche generali (efficienza energetica) [16]. Il calcolo dell'impronta ecologica ha permesso di stimare l'area occupata "indirettamente" per la costruzione e l'uso di un edificio residenziale [35]. La definizione di nuovi standard, basati su indicatori di sostenibilità che valutano l'uso delle risorse naturali, potrebbe aiutare a contenere l'espansione della città individuando un limite fisico alla crescita della sua impronta. Tutte le operazioni di restauro e recupero di edilizia esistente

risultano in un guadagno netto di capitale naturale. L'applicazione di indicatori ai beni culturali rappresenta una fase sperimentale obbligata per contribuire alla definizione di percorsi e criteri valutativi applicabili al settore delle costruzioni storiche e moderne. Un ulteriore contributo in questa direzione è dato dall'Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment - LCA), un metodo analitico di valutazione dei potenziali impatti ambientali (es. riscaldamento globale, acidificazione, eutrofizzazione etc.) associati alla produzione di un servizio o prodotto (industriale, artigianale, agroalimentare etc.), attraverso la ricostruzione accurata dei processi di tutta la filiera produttiva, considerando l'intero ciclo di vita

"dalla culla alla tomba". Questa tecnica di valutazione, standardizzata secondo le serie 14040 e 14044 della normativa di certificazione ambientale ISO, è stata applicata ad un processo artigianale di produzione di vetro e cristallo [13] e ha permesso di evidenziare le fasi critiche di una lavorazione artigianale storicamente insediata nella località di Colle Val d'Elsa (Siena) e individuare soluzioni per ridurre gli impatti e migliorare le prestazioni di un'attività industriale ormai radicata sul territorio.

In questo percorso di integrazione tra studi legati all'ambiente e ricerche in tema di beni culturali, un caso eclatante da ricordare è quello che, per iniziativa di Enzo Tiezzi e Riccardo Francovich, ha visto la collaborazione del gruppo di ecodinamica con ricercatori di archeologia di Siena. I rilievi delle concentrazioni di arsenico nella Piana di Scarlino in Maremma, storicamente compromessa dall'inquinamento, hanno infatti portato ad individuare la locazione degli antichi insediamenti etruschi e ha permesso di ricostruire l'evoluzione storica del territorio a partire dalla sua prima vocazione mineraria [37-39].

Oltre agli studi integrati descritti finora, è stato recentemente intrapreso un filone di ricerca relativo al restauro di beni artistici. Un progetto in corso di svolgimento riguarda uno studio e un successivo intervento di restauro su un'opera di Pietro Lorenzetti per conto della Fondazione MPS.

## La transdisciplinarietà della ricerca

Il gruppo di ecodinamica di Siena ha una forte connotazione transdisciplinare che è un punto essenziale del percorso di ricerca intrapreso. Questo aspetto è spesso manifestato da gruppi, aziende e altri enti soltanto come uno slogan propagandistico ma solo in pochi di questi casi viene attuato realmente. Il concetto di transdisciplinarietà indica una fusione tra discipline tale da portare al superamento delle barriere accademiche e alla nascita di nuove discipline. Appare chiaro come

l'elemento fondamentale della definizione della transdisciplinarietà sia il fatto che essa superi qualcosa. Herman Daly e Joshua Farley, nel loro manuale di Economia Ecologica, forniscono una chiave di lettura del concetto di transdisciplinarietà sostenendo che la struttura disciplinare della conoscenza è un problema di frammentazione, una difficoltà da superare piuttosto che un criterio da soddisfare. I problemi reali non rispettano i confini accademici. Si deve credere certamente che il pen-

siero debba essere *disciplinato*, nel senso che deve rispettare la logica e i fatti, ma che non debba essere *disciplinare*, nel senso di limitare se stesso agli strumenti e alle metodologie tradizionali che sono incasellati nei dipartimenti universitari». Coerentemente con questa idea di interazione e contaminazione, la ricerca del gruppo di Siena è orientata ad intraprendere strade in grado di aprire le porte del sapere accademico a possibili ulteriori integrazioni disciplinari.

## Bibliografia

- [1] E. Tiezzi. Verso una Fisica Evolutiva. Donzelli, Roma 2006; Steps Towards an Evolutionary Physics. WITpress, Southampton 2006.
- [2] S.E. Jørgensen *et al.*, A New Ecology: Systems Perspective. Elsevier, Amsterdam 2007.
- [3] G. Cecconi *et al.*, Ecological Modelling, 2009, in press.
- [4] E. Del Giudice *et al.*, Ecological Modelling, 2009, in press.
- [5] A. Magnani *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2004, **126**, 11406.
- [6] S. Ristori *et al.*, *Chem. Phys. Lett.*, 2007, **436**, 175.
- [7] F. Rossi *et al.*, *J. Theor. Biol.*, 2008, **255**, 404.
- [8] F. Rossi *et al.*, *J. Phys. Chem. B.*, 2008, **112**, 7244.
- [9] A.C.I. Pizzigallo *et al.*, *Journal of Environmental Management*, 2008, **86**, 396.
- [10] V. Niccolucci *et al.*, *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2008, **128**, 162.
- [11] E. Tiezzi *et al.*, Enciclopedia UTET - Storia della Cultura Italiana, in press.
- [12] R.M. Pulselli *et al.*, *Ecological Indicators*, 2008, **8**, 647.
- [13] R.M. Pulselli *et al.*, *International Journal of Life Cycle Assessment*, in press.
- [14] N. Marchettini *et al.*, ECOSUD Ecosystems and Sustainable Development, 2009, in press.
- [15] C. Granai *et al.*, in *Brownfields 2006*, C.A. Brebbia, U. Mander (Eds.), WITpress. Southampton, UK, 2006, 31-38.
- [16] R.M. Pulselli *et al.*, *Building and Environment*, 2009, **44**, 920.
- [17] R.M. Pulselli *et al.*, *Energy and Buildings*, 2007, **39**(5), 620.
- [18] A. Specchiulli *et al.*, *Science of the Total Environment*, 2008, **402**(2-3), 285.
- [19] R.M. Pulselli *et al.*, *Journal of Environmental Management*, 2008, **86**, 342.
- [20] R.M. Pulselli *et al.*, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **133**, 1.
- [21] R.M. Pulselli, E. Tiezzi, Città Fuori dal Caos, Donzelli, Roma 2008; City out of Chaos. WITpress, Southampton, 2009.
- [22] F.M. Pulselli *et al.*, La soglia della sostenibilità: ovvero quello che il PIL non dice, Donzelli, Roma 2007; The Road to Sustainability: GDP and future generations. WIT Press, Southampton, 2008.
- [23] E. Tiezzi. Tempi Storici, Tempi Biologici: venticinque anni dopo, Donzelli, Roma 2005; The End of Time, WIT Press, Southampton, 2003.
- [24] M. Bagliani *et al.*, *Journal of Environmental Management*, 2008, **86**, 354.
- [25] R. Ridolfi *et al.*, *Journal of Environmental Management*, 2008, **86**, 365.
- [26] S. Bastianoni *et al.*, *Chimica e Industria*, 2008, **90**(5), 98.
- [27] E. Tiezzi, N. Marchettini, *Chimica e Industria*, 2008, **90**(8), 94.
- [28] C. Ratti *et al.*, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2006, **33**(5), 727.
- [29] R.M. Pulselli *et al.*, *International Journal of Ecodynamics*, 2006, **1**(2), 125.
- [30] R.M. Pulselli *et al.*, *Abitare la Terra*, 2006, **16**, 30.
- [31] R.M. Pulselli *et al.*, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2008, **3**(2), 121.
- [32] R.M. Pulselli, P. Romano, *Dinamiche dei Sistemi Urbani - Urban Systems Dynamics*, Alinea, Firenze, 2009.
- [33] F.M. Pulselli *et al.*, *Ecological Economics*, 2006, **60**(1), 271.
- [34] F.M. Pulselli *et al.*, in *Ecological Economics Research Trends*, C.C. Pestova (Ed.), Nova Science Publishers Inc., Hauppauge, NY, 2007, 251.
- [35] V. Niccolucci *et al.*, *Ecological Economics*, 2007, **60**(4), 667.
- [36] S. Bastianoni *et al.*, *Ambio*, 2007, **36**(7) 559.
- [37] S. Focardi, E. Tiezzi. *Journal of Toxicology and Industrial Health*, 2009, in press.
- [38] A. Donati *et al.*, *Annali di Chimica*, 2005, **95**(3-4), 161.
- [39] A. Donati *et al.*, *International Journal of Ecodynamics*, 2007, **2**(1), 24.

# ABSTRACT

## Physical Chemistry, Environmental and Cultural Heritage Chemistry. The Ecodynamics Group of Siena

Research in environmental field has two sides: a theoretical epistemological one, aimed to investigate complexity in real systems and highlight sustainability principles; the other aimed to develop new tools for studying transformation processes, ecosystems, regional and economic systems. Coherence between these two sides is a key point in the activity of the Ecodynamics group of Siena.