

Matteo Clementi, Carlotta Fontana,

Dipartimento di Architettura e Studi Urbani, Politecnico di Milano, Italia

matteo.clementi@polimi.it

carlotta.fontana@polimi.it

**Abstract.** L'articolo indaga la possibilità di adottare indicatori e metodi analitici caratteristici dell'ecologia dei sistemi viventi per comprendere diversi fenomeni di metabolismo territoriale e orientare processi di sostenibilità profonda nella trasformazione dei tessuti urbani, a supporto di un modello economico circolare e autosostenibile.

L'interpretazione del tema orizzontale/verticale è duplice: da un lato, il sostrato materiale del processo progettuale è osservato da un livello elevato, tale da consentire di coglierne connessioni sistemiche necessarie alla scala ecoambientale; dall'altro, la costruzione di reti interattive promuove l'emergere di nuove configurazioni nei processi decisionali.

L'approfondimento degli strumenti analitico-operativi dei processi metabolici naturali associa la scelta della configurazione fisica orizzontale o verticale al conseguimento del seguente obiettivo: massimizzare il lavoro ottenibile (ovvero il servizio prestato per abitare, alimentarsi e muoversi) a parità di energia solare utilizzata: la principale legge che regola l'evoluzione degli ecosistemi naturali terrestri (Odum, 1996) e rappresenta il criterio fondamentale per definire la sostenibilità profonda nei processi di pianificazione/progettazione/produzione dell'ambiente costruito (Daly, 2008).

**Parole chiave:** Sostenibilità profonda; Metabolismo territoriale sostenibile; Design sistemico; LCA; Material Flow Analysis.

**Ambito tematico di riferimento:** processi di crescita e sviluppo - modelli di crescita a economia circolare delle aree urbane e periurbane; "ruralizzazione" della città densa e produzione per la sussistenza; mixité funzionale nei modelli a sviluppo orizzontale/verticale.

## Approccio

Recenti ricerche sul metabolismo urbano sostenibile (Ferrao e Fernandez, 2013), (Baccini e Brunner, 2012) hanno rilevato come gli strumenti propri dell'analisi del ciclo di vita di prodotti e servizi (LCA - Life Cycle Assessment, MFA - Material Flow Analysis) mettano in luce la potenzialità di rendere tra loro compatibili gli strumenti di analisi e rappresentazione propri sia

The systemic approach in sustainable environmental planning: references to the ecology of living systems

**Abstract.** The article investigates the possibility of adopting indicators and analytical methods characteristic of the living systems ecology to understand different territorial metabolism phenomena. In addition to explore and orient deep sustainability processes in the transformation of the urban fabric, supporting a circular and self-sustaining economic model.

The interpretation of the horizontal / vertical theme is twofold: on one hand, the material substrate of the design process is observed by a high level, such as enabling to grasp systemic connections necessary to eco-environmental scale; on the other hand, the construction of interactive networks promotes the emergence of new configurations in decision-making processes.

The in-depth analysis of the analytical tools applied to natural metabolic processes combines the choice of horizontal or vertical physical configuration to achieve the

dell'ecologia dei sistemi viventi, sia della progettazione sostenibile.

Affinchè ciò sia possibile è necessario poter individuare e rappresentare le macrorelazioni tra il sistema antropico e il sistema naturale che lo ospita, nella consapevolezza che le dinamiche che caratterizzano il sistema antropizzato di cui il progetto fa parte siano comunque interne all'ecosistema naturale ospitante.

A tal fine questo testo propone un'attività di indagine che si articola in più fasi:

- conoscere, individuare i nodi del sistema e l'insieme di relazioni;
- quantificare i flussi scambiati e stoccati;
- georeferenziare per gestire le dinamiche (progettazione orizzontale georeferenziata).

## Conoscere, individuare i nodi del sistema e l'insieme di relazioni

I principi di sostenibilità, così come espressi da Herman Daly, fanno esplicito riferimento alla necessaria uguaglianza tra la velocità di prelievo delle risorse rispetto alla capacità di rigenerazione delle stesse e la velocità di immissione dei rifiuti rispetto alla velocità di assorbimento degli stessi.

Tali principi regolano da sempre il funzionamento di tutti gli ecosistemi naturali, ne consegue che lo studio di strategie progettuali orientate alla sostenibilità preveda in primo luogo approfondimenti su come un sistema naturale si organizzi per gestire le risorse rinnovabili locali, caratterizzate da un'erogazione energetica stazionaria (Daly, 1990).

Un ecosistema naturale è costituito da dinamiche circolari di materia, caratterizzate da attività di consumo e produzione in

following objective: maximizing the work obtainable (ie. the service provided to live, feed and move) with the same solar energy used. This constitutes the main law that regulates the evolution of natural terrestrial ecosystems (Odum, 1996) and represents the fundamental criterion for defining profound sustainability in the planning / design production processes of the built environment (Daly, 2008).

**Keywords:** Deep sustainability; Sustainable territorial metabolism; Systemic design; LCA; Material Flow Analysis.

## Approach

Recent research on sustainable urban metabolism (Ferrao and Fernandez, 2013), (Baccini and Brunner, 2012) have found that the tools used to study the life cycle of products and services (LCA - Life Cycle Assessment, MFA - Material Flow Analysis ) highlight

the potential to make compatible the analysis and representation tools of both the ecology of living systems and sustainable design.

For this to be possible it is necessary to be able to identify and represent the macrorelations between the anthropic system and the natural system that hosts it; also to be aware that the dynamics which characterize the anthropic system which the project is part of are still internal to the host natural ecosystem.

To this end, this text proposes an investigation activity that is divided into several phases:

- identifying the nodes of the system and the set of relationships among them;
- quantify the flows exchanged and stored;
- georeferencing to manage dynamics (georeferenced horizontal design).

01 | Rappresentazione semplificata di un ecosistema autosostenuto minimo, un acquario (autore: Matteo Clementi)  
*Simplified representation of a minimum self-sustaining ecosystem, an aquarium (author: Matteo Clementi)*

stretta relazione tra loro e moderate da nodi di accumulo/stoccaggio.

In esso le fluttuazioni della primaria e unica fonte esterna al sistema, la fonte solare sono gestite tramite speciali strumenti di accumulo energetico, in proporzione dei quali vengono regolati i flussi.

L'adozione di un punto di vista sistemico nella progettazione ambientale sostenibile prevede in primo luogo di tradurre le scelte di progetto in strategie di gestione degli scambi di energia e materia all'interno del sistema, individuando i principali nodi e raggruppandoli sulla base dei ruoli che assolvono nella gestione dell'energia e della materia.

Emerge la necessità di individuare i produttori, ovvero tutti i nodi che utilizzano l'unica fonte esterna al sistema (la fonte solare) per produrre biomassa e ossigeno, i consumatori, che operano un'attività di controllo sui nodi produttori consumando le risorse da questi trasformate, immettendo rifiuti nel sistema (nutrimento per i nodi produttori) e i nodi di accumulo dei flussi emessi da entrambe le categorie (Odum, 1996).

In relazione ai principi di sostenibilità espressi da Daly, all'interno del generico ecosistema globale sono individuabili due categorie principali tra i nodi di stoccaggio, una relativa alle risorse messe a disposizione dai produttori e una relativa ai rifiuti immessi da parte dei consumatori (tra i quali troviamo le principali dinamiche emesse dai sistemi antropizzati).

L'autoregolazione, che caratterizza i sistemi viventi naturali, avviene come di seguito descritto: prendendo, ad esempio, un sistema autosufficiente semplificato come quello di un acquario, in cui l'unico flusso in entrata è la fonte solare. Il sistema chiuso ospita degli agenti di produzione, le alghe e degli agenti consumatori,

02 | Gli attori interni all'acquario, distinti per la specifica attività svolta nell'ecosistema (fonte energetica, nodi produzione, nodi di accumulo associati alla produzione, nodi consumatori - nodi di accumulo associati all'attività di consumo) (autore: Matteo Clementi)  
*The actors inside the aquarium, distinguished by the specific activities carried out in the ecosystem (energy source, production nodes, accumulation nodes associated with production, consumer nodes - accumulation nodes associated with consumption activity) (author: Matteo Clementi)*

alcuni pesci. Le prime utilizzano la fonte solare per trasformare l'anidride carbonica in biomassa alimentare e ossigeno, i secondi si cibano delle alghe emettendo rifiuti metabolici che costituiscono risorse per le prime (Fig. 1). Se uno dei due flussi principali, come per esempio quello di generazione di risorse, rallenta (per esempio a causa della riduzione delle fonte solare), il sistema di stimolazione circolare fa in modo che anche l'altro rallenti fino a quando non si stabiliscono le quantità di accumulo necessarie affinché il flusso possa di nuovo aumentare. I diversi attori interni al sistema condividono il compito dell'autoregolazione.

Se i produttori accumulano risorse sotto forma di energia chimica stoccata nella biomassa presente all'interno del sistema, i consumatori, si approvvigionano dell'energia stoccata e immettono rifiuti nel sistema, ovvero nutrienti per il nodo produttore, effettuando un compito più delicato di regolazione della capacità produttiva del nodo produttore.

I flussi che circolano all'interno del sistema sono direttamente proporzionali alla quantità di materia e energia "stoccata" (Fig. 2).

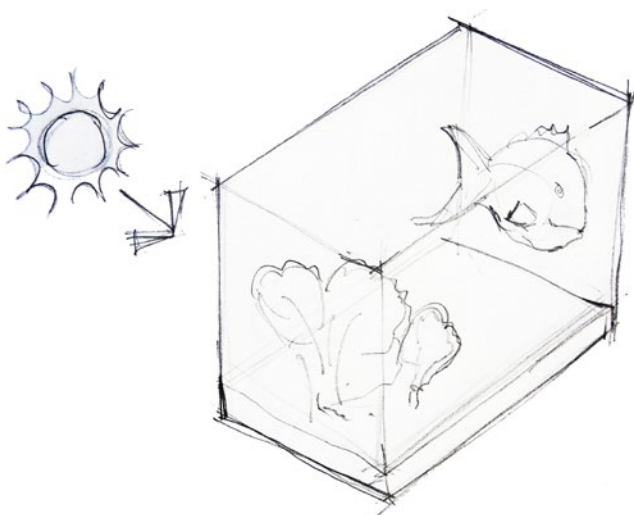
### Quantificare i flussi scambiati e stoccati

L'individuazione dei principali nodi di scambio e delle dinamiche e flussi scambiati costituisce

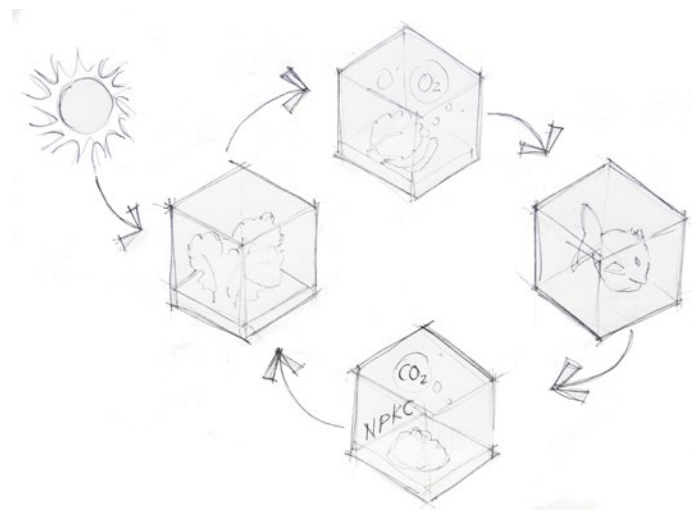
un buon punto di partenza per individuare le relazioni sistemiche tra l'ambiente costruito e l'ecosistema che lo ospita, il primo difatti gestisce le principali dinamiche di consumo in un sistema antropizzato (Fig. 3, Fig. 4).

La schematizzazione semplificata del funzionamento di un ecosistema rende difficile comprendere il ruolo di manufatti architettonici all'interno di tali dinamiche. Per arrivare a tale livello di risoluzione è necessario focalizzarsi principalmente sui nodi di con-

01 |



| 02

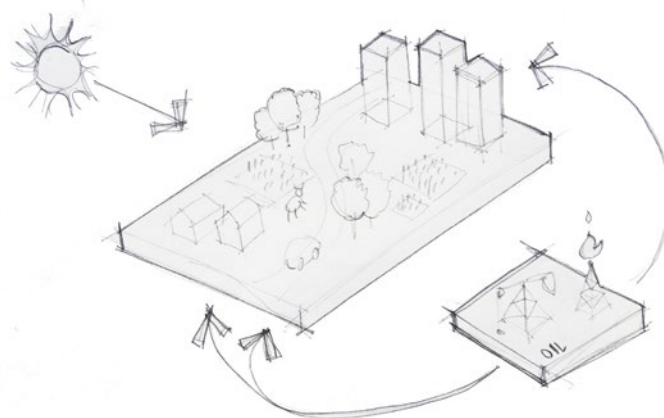


03 | Rappresentazione semplificata di un insediamento urbano, del territorio che lo ospita e delle principali fonti energetiche che lo alimentano (fonte solare e fonti non rinnovabili) (autore: Matteo Clementi)

Simplified representation of an urban settlement, of the territory that hosts it and of the main energy sources that feed it (solar source and non-renewable sources) (author: Matteo Clementi)

04 | Semplificazione degli attori interni al sistema territoriale di supporto ad un insediamento urbano, raggruppati per macrofunzioni all'interno dell'ecosistema (produzione, accumulo consumo) (autore: Matteo Clementi)

Simplification of the actors within the territorial support system for an urban settlement, grouped by macro-functions within the ecosystem (production, accumulation and consumption) (author: Matteo Clementi)



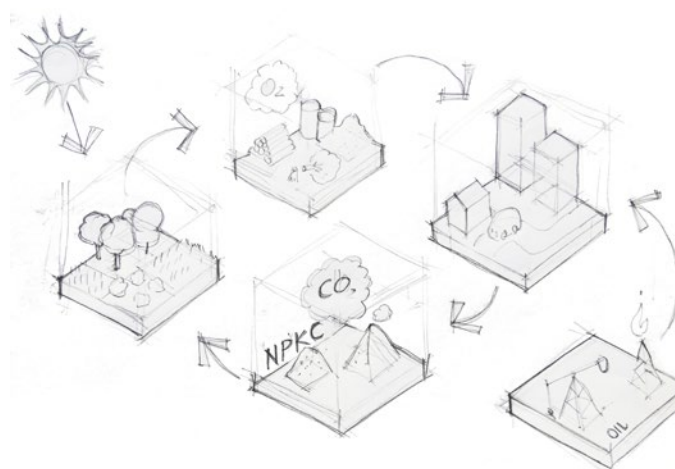
sumo e definirne le caratteristiche specifiche. A tale proposito è di estrema utilità il lavoro di Baccini e Brunner, pubblicato nel testo “Metabolism of the Anthroposphere” (Baccini e Brunner, 2012). Gli autori, utilizzando gli strumenti applicativi dell’analisi dei flussi di materia (MFA), fanno chiarezza su come articolare le informazioni caratteristiche delle dinamiche di consumo di un sistema insediativo in modo tale da poter essere adeguate ad una valutazione del metabolismo territoriale. In particolare individuano e articolano tali dinamiche nelle seguenti categorie (Fig. 5):

- “To Nourish and to Clean”, Nutrirsi e Pulire/lavarsi;
  - “To Reside and Work”, Abitare e Lavorare;
  - “To Transport and Communicate”, Muoversi e Comunicare.
- Avere scelto delle attività e non dei manufatti specifici sta ad indicare che una corretta rappresentazione e gestione delle dinamiche di consumo implica individuare e quantificare i dati associabili alla persona o a comunità di persone. Si fa riferimento al servizio prestato dai manufatti, tutte le dinamiche sono quindi espresse per individuo e non per mq o per edificio. Il sistema si popola finalmente di dati quantitativi ed è possibile individuare le quantità in gioco espresse dai nodi consumatori.

### Gestire le dinamiche (progettazione orizzontale georeferenziata)

Una volta configurato il sistema semplificato di riferimento è fondamentale specificare che, affinché il confronto tra dinamiche naturali e dinamiche antropizzate sostenibili possa essere di supporto all’attività progettuale, è necessario operare nelle

stesse condizioni al contorno. Ovvero condizioni caratteristiche dei sistemi alimentati esclusivamente da fonti rinnovabili locali. Lo sviluppo di scenari progettuali dovrà partire da tale assunto di fondo, condizioni di utilizzo anche parziale di fonti non rinnovabili farebbero perdere il nesso logico fondamentale.



### Identifying the nodes of the system and the set of relations.

The principles of sustainability, as expressed by Herman Daly, make explicit reference to the necessary equality between the rate of withdrawal of resources as well as the regeneration capacity of the same and the waste input speed compared to the its speed of absorption.

These principles have always regulated the functioning of all natural ecosystems, it follows that the study of design strategies oriented to sustainability, first of all provides insights on how a natural system is organized to manage local renewable resources, characterized by a stationary energy supply (Daly, 1990).

A natural ecosystem consists of circular dynamics of matter, characterized by consumption and production activities in close relationship with each

other and moderated by accumulation / storage nodes.

In it the fluctuations of the solar energy, which is the primary and only external source to the system, are managed through special energy storage nodes, in proportion to which flows are regulated.

The adoption of a systemic point of view in sustainable environmental design involves first of all translating project choices into strategies to manage energy and matter within the system, identifying the main nodes and grouping them on the basis of the roles they perform in energy and material management.

The need arises to identify the producers, ie all the nodes that use the only external source to the system (the solar source) to produce biomass and oxygen, the consumers, who operate a control activity on the produc-

ing nodes consuming resources from these transformed, by introducing waste into the system (nourishment for the production nodes) and the accumulation nodes of the flows emitted by both categories (Odum, 1996).

In relation to the sustainability principles expressed by Daly within the generic global ecosystem, two main categories of storage nodes are identified, one relating to the resources made available by producers and the other relating to the waste placed by consumers (among which we find the main dynamics emitted by the anthropized systems).

The self-regulation that characterizes the natural living systems is carried out as described below, taking, for example, a simplified self-sufficient system as that of an aquarium, whereas the single incoming flow is the solar source. The closed system hosts pro-

duction agents, algae and consumer agents, some fish. The former use the solar source to transform carbon dioxide into biomass food and oxygen, the latter feed on algae emitting metabolic waste that constitute resources for the first (Fig. 1).

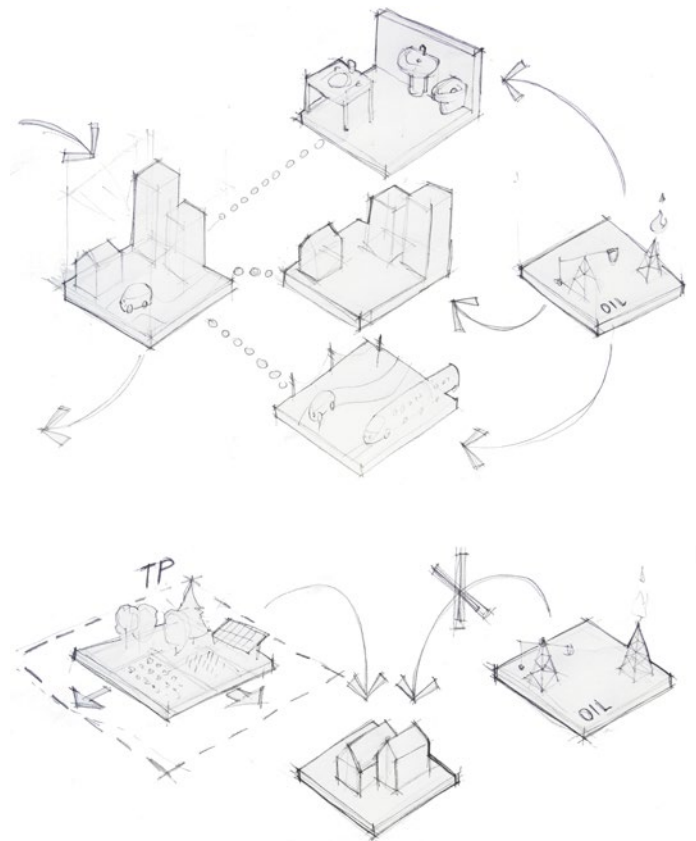
If one of the two main flows, such as the resource generation process, slows down (for example due to the reduction of the solar source), the circular stimulation system causes the other to slow down until the accumulation quantities necessary for the flow can increase again. The different actors within the system share the task of self-regulation.

If the producers accumulate resources in the form of chemical energy stored in the biomass inside the system, the consumers, procure stored energy and feed waste into the system, nutrients for the producer node, carrying out

05 | *Articolazione del principale nodo di consumo di un ecosistema urbano in sottocategorie, nutrirsi e pulire, risiedere e lavorare, muoversi e comunicare (autore: Matteo Clementi)*  
*Articulation in sub-categories of the main consumption node of an urban ecosystem, feeding and cleaning, reside and work, move and communicate (author: Matteo Clementi)*

| 05

06 | *In un sistema basato esclusivamente sulle fonti rinnovabili il mancato utilizzo di risorse non rinnovabili implica un aumento di territorio utile a produrre risorse (autore: Matteo Clementi)*  
*In a system based exclusively on renewable sources the avoided use of non-renewable resources implies an increase in the territory useful for producing resources (author: Matteo Clementi)*



| 06

D'altronde il perseguimento di principi di sostenibilità profonda, e l'annullamento delle emissioni di CO<sub>2</sub> entro il 2050 auspicato dai più recenti report dell'IPCC (IPCC, 2018), dagli obiettivi di sostenibilità dell'ONU e dai recenti accordi di Parigi implicano tale condizione basilare.

Le semplificazioni proposte nei paragrafi precedenti illustrano il funzionamento generico di un ecosistema come un insieme di relazioni tra nodi produttori e consumatori che utilizzano l'unica fonte esterna al sistema, la fonte solare per immettere nell'ambiente risorse utili. La materializzazione fisica di tali nodi produttori presuppone l'individuazione di superfici orizzontali di riferimento con la funzione di collettori solari, e produttori di biomassa, che insieme costituiscono un ambito territoriale specifico. La distribuzione della fonte solare sulla superficie terrestre assegna al territorio un ruolo di intermediario fondamentale nei processi di sviluppo sostenibile, attribuendogli la caratteristica di territorio produttivo (TP): idoneo alla produzione di materia e trasformazione di energia per i nodi consumatori che lo abitano. A partire dalle dinamiche di consumo caratteristiche di un insediamento, così come classificate da Baccini e Brunner, in un sistema completamente sostenibile il territorio produttivo assume il ruolo pratico di:

- produrre risorse per alimentarsi (to nourish);
- assorbire e rigenerare le dinamiche del lavarsi e smaltire i rifiuti (to clean) (sono inclusi in questa categoria tutti i flussi materiali in uscita dagli edifici, ovvero rifiuti solidi e liquidi
- offrire materiali ed energia per poter abitare e lavorare (to reside and work)
- offrire materiali ed energia per muoversi e comunicare (to transport and communicate)

a more delicate task of regulating the productive capacity of the producer node.

The flows that circulate within the system are directly proportional to the quantity of matter and energy "stored" (Fig. 2).

#### Quantifying the flows exchanged and stored

The identification of the main exchange nodes and exchanged dynamics and flows is a good starting point to identify the systemic relationships between the built environment and the ecosystem that hosts it, the first in fact manage the main consumption dynamics in an anthropized system (Fig. 3, Fig. 4).

The simplified schematic of an ecosystem functioning makes it difficult to understand the role of architectural artifacts within such dynamics. To

reach this level of resolution it is necessary to focus mainly on consumption nodes and define their specific characteristics. In this regard, the work of Baccini and Brunner, published in the text "Metabolism of the Anthroposphere" (Baccini and Brunner, 2012) is extremely useful.

The authors, using the tools of material flows analysis (MFA), clarify how to articulate the characteristic information of the consumption dynamics of a settlement system in such a way that it can be adapted to an assessment of the territorial metabolism. In particular, they identify and articulate these dynamics in the following categories (Fig. 5):

- "To Nourish and to Clean"
- "To Reside and Work";
- "To Transport and Communicate".

Having chosen activities and not specific artifacts indicates that a correct

In un bilancio di energia e materia che abbia la finalità di abbattere le emissioni climalteranti con la massima efficienza d'uso, il territorio produttivo (TP) si fa sinonimo di offerta. Dove le condizioni produttive del territorio lo consentono, l'annullamento delle emissioni climalteranti richiede il riorientamento delle dinamiche di consumo (associate all'abitazione, all'alimentazione e ai trasporti) verso il territorio locale, favorendo processi di autosostenibilità locale/ "riterritorializzazione", ovvero di riconnessione tra città e territorio (Odum e Odum, 2001) (Magnaghi, 2010) (Fig. 6).

representation and management of consumption dynamics implies identifying and quantifying the data that can be associated with the person or community of people. Since it refers to the service provided by the artifacts, all the dynamics are therefore expressed per individual and not per square meter or per building. The system is finally populated with quantitative data and it is possible to identify the quantities at stake expressed by the consumer nodes.

#### Managing dynamics (georeferenced horizontal design)

Once the reference simplified system has been configured, it is essential to specify that, in order to compare natural dynamics and sustainable human dynamics, it is necessary to operate in the same boundary conditions: namely characteristic conditions of the systems powered exclusively by local

renewable sources. The development of design scenarios will have to start from this basic assumption, conditions of use, even partial, of non-renewable sources would lose the fundamental logical connection.

Besides the pursuit of deep sustainability principles, and the cancellation of CO<sub>2</sub> emissions by 2050, hoped for by the most recent IPCC reports (IPCC, 2018), by the UN sustainability objectives and by the recent Paris agreements imply this basic condition.

The simplifications proposed in the previous paragraphs illustrate the generic functioning of an ecosystem as a set of relationships between producer and consumer nodes that use the solar source to introduce useful resources into the environment. The physical materialization of these production nodes presumes the identification of horizontal reference surfaces with the

Come già anticipato nell'abstract e approfondito nei paragrafi seguenti, un sistema naturale tende ad evolversi in direzione della massima efficienza d'uso dell'energia solare incidente sul territorio ospitante. Il trasferimento di tale strategia all'ambito della progettazione sostenibile implica la valutazione delle scelte di progetto sulla base del territorio produttivo coinvolto, minore sarà il suo ammontare a parità di servizio prestato maggiore sarà l'efficienza d'uso dell'energia solare incidente sul territorio.

Affinchè gli strumenti di supporto alla progettazione sostenibile possano rispondere a tale necessità, si rende necessario da un lato adottare strumenti adeguati alla gestione delle dinamiche coinvolte, ovvero basati sulla georeferenziazione dei dati alle differenti scale, dall'edificio ad ambiti provinciali o regionali, e dall'altro approfondire l'ambito dell'ecologia dei sistemi viventi per individuare strategie adeguate di intervento.

### Georeferenziare LCA e MFA

L'Innesco e l'implementazione di processi di riterritorializzazione caratteristici della progettazione sostenibile implicano l'associazione di dinamiche di consumo relative ad una specifica attività e porzioni di territorio produttivo utili ad alimentare tale servizio. La rappresentazione finalizzata alla gestione e in particolare alla progettazione di filiera può essere affidata a Sistemi Informativi Territoriali (SIT o GIS), che consentano di articolare nel tempo e nello spazio le dinamiche caratteristiche di un sistema territoriale tendente all'autosostenibilità.

L'attuale diffusione di software GIS libero e aperto (open source) mette a disposizione di tutti gli ambiti disciplinari coinvolti nei processi della progettazione autosostenibile, strumenti utili

function of solar collector and biomass producer, which together constitute a specific territorial area.

The distribution of solar energy on the earth's surface gives the territory a crucial intermediary role in sustainable development processes, giving it the characteristic of productive territory (TP): suitable for the production of matter and transformation of energy for consumers nodes that inhabit it.

Starting from the consumption dynamics characteristic of a settlement, as classified by Baccini and Brunner, in a completely sustainable system the productive territory assumes the practical role of:

- produce resources to nourish;
- absorb and regenerate the dynamics of washing and disposing of waste (to clean) (this category includes all flows out of buildings, ie. solid and liquid waste;

- offer materials and energy to be able to live and work (to reside and work);

- offer materials and energy to move and communicate (to transport and communicate).

In a balance of energy and matter that has the aim of reducing the pollution at maximum efficiency of use, productive territory (TP) becomes synonymous of local renewable offer. Where the production conditions of the territory allow it, the cancellation of climate-altering emissions requires the reorientation of consumption dynamics (associated with housing, food and transport) to the local area, favoring processes of local self-sustainability/"reterritorialization", reconnection between city and territory (Odum and Odum, 2001) (Magnaghi, 2010) (Fig. 6)

As already anticipated in the ab-

per proficue connessioni interdisciplinari. La rappresentazione geografica transcalare, sotto forma di mappa (a tutte le scale di intervento), fa confluire sullo stesso piano orizzontale (astrazione del territorio) le dinamiche di interazione e scambio tra gli attori coinvolti nel processo progettuale. Le attività chiamate in causa da Brunner e Baccini vedono il territorio produttivo entrare a far parte della materializzazione fisica e spaziale dei propri processi di filiera (Clementi, 2018).

Per esempio in scenari "carbon neutral", nel caso delle attività inerenti il risiedere e lavorare (reside and work), un'abitazione potrebbe ricorrere all'utilizzo di biomassa vegetale per coprire la domanda energetica associata al riscaldamento invernale. Tale scelta comporterebbe un'occupazione di suolo relativa all'estensione di bosco utile alla produzione del combustibile. Maggiori saranno le lavorazioni associate alla filiera (per esempio per la produzione di cippato o pellet) maggiori saranno i consumi di energia ad esse associati, di conseguenza maggiori saranno le estensioni di territorio produttivo impegnato nella produzione di biodiesel (in sostituzione del gasolio) o per esempio di coperture solari fotovoltaiche in sostituzione di una parte dell'energia elettrica utilizzata; Maggiore sarà la distanza tra il luogo di approvvigionamento del materiale/fonte energetica e il luogo di consumo, maggiore sarà l'estensione del possibile territorio seminativo dedicato a colture energetiche.

Questo esempio vuole dare un'idea di cosa si intende per territorio produttivo quando si affronta il tema della progettazione "carbon neutral", e quali sono alcune delle sue possibili materializzazioni fisiche. Vuole inoltre fare emergere la necessità di adottare strumenti GIS per la quantificazione e gestione ottimale di tali differenti porzioni di territorio produttivo. L'obiettivo della

abstract and deepened in the following paragraphs, a natural system tends to evolve in the direction of the maximum efficiency of solar energy use incident on the host territory. The transfer of this strategy to the field of sustainable design implies the evaluation of the project choices on the basis of the productive territory involved, the lower will be the amount related to the service provided, the greater will be the use efficiency of the solar energy incident on the territory.

In order for sustainable design support tools to meet this need, it is necessary on the one hand to adopt appropriate tools to manage the dynamics involved, ie. based on the geo-referencing of data at different scales, from the building to provincial or regional areas, and on the other, deepen the ecology of living systems to identify appropriate strategies for intervention.

### Georeferencing LCA and MFA

The initiation and implementation of "reterritorialization" processes imply the association of consumption dynamics related to a specific activity and portions of productive territory useful to feed this service. The representation aimed at management and in particular the supply chain design can be entrusted to Geographic Information Systems (GIS), which allow to articulate in time and space the dynamic characteristics of a territorial system tending to self-sustainability.

The current spread of free and open GIS software (open source) makes available to all the disciplines involved in the processes of self-sustainable design, useful tools for profitable interdisciplinary connections. The transcalar geographical representation, in the form of maps (at all scales of intervention), brings together on the



progettazione resta infatti quello di ridurre la sua estensione a parità di servizio prestato.

### Strategie e funzioni obiettivo (goal functions)

Se la georeferenziazione dei processi di filiera delle principali attività di consumo offre la possibilità di gestire i processi decisionali interni alla progettazione ambientale autosostenibile, l'approfondimento delle strategie adottate dagli ecosistemi viventi nei processi evolutivi fornisce spunti interessanti per orientare le scelte di progetto nella direzione della massima efficienza d'uso di energia e materia. Le dinamiche evolutive dei sistemi viventi, in contesti indisturbati, sono caratterizzate da strategie comuni di gestione dell'energia e delle relazioni tra gli attori interni all'ecosistema. L'ambito dell'ecologia dei sistemi ha denominato tali strategie come "goal functions", ovvero "funzioni obiettivo", utili a individuare le ragioni della prevalenza di un ecosistema su un altro nelle dinamiche evolutive. Enzo Tiezzi in "Verso una fisica evolutiva") li sintetizza come segue (Tiezzi, 2006) :

- massimo immagazzinamento;
- massimo flusso di emergenza;
- massimizzare la quantità di emergenza;
- massimo ascendente;
- massimo riciclaggio;
- massimo tempo di residenza (...);
- minimo rapporto tra flusso di emergenza ed exergia.

In particolare Fath, Patten e Choi (Fath *et al.*, 2001) hanno riconosciuto in esse un unico atteggiamento comune a tutti gli ecosistemi in evoluzione. Gli autori riconducono tutte le funzioni obiettivo a due condizioni di fondo: massimizzare il flus-

same horizontal plane (abstraction of the territory) the dynamics of interaction and exchange between the actors involved in the design process. The activities in question by Brunner and Baccini see the productive territory becoming part of the physical and spatial materialization of their supply chain processes (Clementi, 2018).

For example, in "carbon neutral" scenarios, in the case of activities related to residing and working, a home could use plant biomass to cover the energy demand associated with winter heating. This choice would involve land occupation related to the extension of the forest useful for the production of the fuel. The more will be the processes associated with the supply chain (for example for the production of wood chips or pellets) the greater the energy consumption associated with them will be. Consequently the greater will

be the extension of the productive territory involved in the production of biodiesel (instead of diesel) , as well as the area of photovoltaic solar roofs needed to replace a portion of the electricity used; Furthermore, the greater will be the distance between the place of supply of the material/energy source and the place of consumptions, the greater will be the amount of arable land dedicated to energy crops.

This example wants to give an idea of what is meant by productive territory when dealing with the theme of carbon neutral design, and which are some of its possible physical materializations. It also wants to highlight the need to adopt GIS tools for the quantification and optimal management of these different portions of productive territory. The goal of the design remains indeed to reduce its extension for the same service provided.

so di energia utilizzabile e massimizzare l'accumulo di energia utilizzabile, in estrema sintesi entrambi condividono l'obiettivo di massimizzare il lavoro ottenibile a parità di energia solare equivalente utilizzata (minimo rapporto tra flusso di emergenza ed exergia, per approfondimenti vedi il paragrafo seguente).

Una volta assunta un'appropriate articolazione delle informazioni secondo quanto introdotto nei paragrafi precedenti, in un sistema antropizzato alimentato esclusivamente da fonti rinnovabili le funzioni obiettivo costituiscono utili linee guida per la definizione delle strategie di intervento. A tal fine sono state raggruppate in tre macrocategorie: funzioni indicative delle quantità gestite nel sistema, funzioni indicative della forma del sistema, funzioni relative alla gestione nel tempo.

### Quantità

Tra le funzioni obiettivo che interessano le quantità gestite dal sistema quella che maggiormente sintetizza e include le altre è la tendenza al minimo rapporto tra flusso di emergenza ed exergia. Tale funzione ci dice che tra due ecosistemi prevale quello che riesce a massimizzare il flusso di energia solare equivalente scambiata dagli attori (Emergia) (Odum, 2006), utile a compiere lavoro (Exergia) (Jorgensen, 1981), il che equivale a dire massimizzare l'efficienza d'uso dell'energia solare equivalente a parità di lavoro effettuato.

Nel caso esemplificativo citato nel paragrafo precedente, inerente le filiere per il riscaldamento delle abitazioni, il lavoro si fa sinonimo del servizio prestato, di conseguenza la condizione sopra espressa è equivalente al minimo ammontare di energia solare equivalente utilizzata per alimentare il servizio. In estrema sintesi è espressa la necessità di un minore coinvolgimento

### Strategies and goal functions

If the georeferencing of the supply chain processes of the main consumption activities offers the ability to manage internal decision-making processes to self-sustainable environmental design, the deepening of the strategies adopted by the living ecosystems in the evolutionary processes provides valuable insights to guide the design choices in the direction of maximum efficiency of energy and matter use.

The evolutionary dynamics of living systems, in undisturbed contexts, are characterized by common strategies of energy management and organization of relationships among the actors within the ecosystem. Recent studies have referred to these strategies as "goal functions", useful to identify the reasons for the prevalence of an ecosystem on another in the evolutionary dynamics. Enzo Tiezzi in "Towards

an evolutionary physics" summarizes them as follows (Tiezzi, 2006):

- maximum storage;
- maximum flow of energy;
- maximize the amount of energy;
- maximize ascendancy;
- maximum recycling;
- maximum residence time (...);
- minimum relationship between energy flow and exergy.

In particular Fath, Patten and Choi (Fath *et al.*, 2001) have recognized in them a unique attitude common to all the evolving ecosystems. The authors lead all the goal functions to two basic conditions: maximizing the flow of usable energy and maximizing the accumulation of usable energy; in a nutshell, both share the objective of maximizing the work achievable with the same equivalent solar energy used (minimum relationship between energy flow and exergy, see following paragraph).

di territorio produttivo utile a mantenere temperature di confort negli spazi abitativi durante il periodo invernale.

La principale ed ovvia strategia adottabile in questa direzione sposa l'obiettivo dell'incremento dell'efficienza d'uso di energia. Iniziative di riqualificazione energetiche delle abitazioni esistenti comporterebbero una minore estensione di territorio produttivo associata ad una minore necessità di energia. In questo caso, l'approccio coerente con l'analisi del ciclo di vita obbliga a tenere in considerazione le principali dinamiche coinvolte nei processi associati alla riqualificazione energetica, affiancando ai consumi di energia nella fase d'uso dell'abitazione le lavorazioni, i materiali e le relative quantità di energia utili ad alimentare tali processi. Nell'ipotesi che tutte le attività coinvolte utilizzino fonti rinnovabili ecco comparire differenti estensioni di territorio produttivo antagoniste, da un lato si riduce la quantità di energia nella fase d'uso dall'altro aumenta l'energia utile alla produzione di nuovi materiali utilizzati e ad alimentare i processi stessi di produzione edilizia. Tra differenti ipotesi di intervento "a zero emissioni" sarà maggiormente sostenibile quella che implicherà un minor contributo di energia rinnovabile in tutte le fasi del proprio ciclo di vita, e di conseguenza una minor estensione di territorio produttivo necessario.

### Forma

L'incremento del flusso di scambio tra i nodi in un sistema basato esclusivamente sull'uso dell'energia solare e derivati è strettamente legato al proprio livello di sviluppo, ovvero alla possibilità di incrementare l'efficienza di scambio di materia e utilizzo di energia tra gli attori. L'evoluzione naturale di un ecosistema, in assenza di disturbi esterni, tende a far prevalere questa condi-

Once an appropriate articulation of the information has been assumed as introduced in the previous paragraphs, in an anthropized system powered exclusively by renewable sources, the goal functions are useful guidelines for the definition of the intervention strategies. To this end they have been grouped into three macro-categories: functions indicative of the quantities managed in the system, functions indicative of the form of the system, functions related to management over time.

### Quantity

Among the goal functions that affect the quantities managed by the system, the one that most synthesizes and includes the others is the tendency to the minimum ratio between the flow of energy and exergy. This function tells us that between two

ecosystems the one that manages to maximize the flow of equivalent solar energy exchanged by the actors (emergy) (Odum, 2006), useful for carrying out work (Exergy) (Jorgensen, 1981), prevails. Which is equivalent to maximize the use efficiency of equivalent solar energy to the same work performed.

In the exemplary case mentioned in the previous paragraph, concerning the supply chains for homes winter heating, work becomes synonymous with the service provided. Consequently, the condition expressed above is equivalent to the minimum amount of solar energy used to power the service. In a nutshell, a lower amount of productive territory (PT) useful to maintain comfort temperatures in the living spaces during the winter period, is required.

The main and obvious strategy to be

zione, definita sinteticamente nella funzione obiettivo relativa al "massimo ascendente".

Il livello di sviluppo di un sistema è misurato attraverso l'indicatore dell'"ascendente" che a sua volta è il risultato del prodotto del flusso totale scambiato tra gli attori del sistema e l'AMI - Average mutual information (informazione reciproca media) (Ulanowics, 1997). Questo secondo indicatore fa riferimento alla forma del sistema e alle relazioni tra i nodi che lo compongono, un valore alto dell'AMI corrisponde ad alti livelli di articolazione dei flussi scambiati tra loro.

«Lo sviluppo consiste in un aumento di organizzazione e genera un'articolazione progressiva dei flussi tra i nodi di un sistema, indipendentemente dalle sue dimensioni (cambiamento delle connessioni e della ripartizione dei flussi tra i nodi): due sistemi possono al loro interno organizzare molto diversamente un identico flusso totale. Per articolazione massima (e minima connessione) si intende la situazione nella quale ogni nodo scambia flussi con un altro nodo soltanto e che per articolazione minima (e massima connessione) si intende la situazione nella quale ogni nodo scambia uguali flussi con tutti i nodi e con se stesso» (Pignatti e Ingegnoli, 1996).

Ecco delinearsi le linee generali della forma del sistema di cui il progetto sarà parte. Il proprio livello di articolazione affianca alla strategia di massimizzare l'efficienza d'uso dell'energia solare equivalente, indicazioni sulla forma del sistema, ovvero sulle relazioni reciproche tra i nodi che lo compongono e di conseguenza sulle relazioni tra dinamiche di consumo e territorio. Il concetto di sviluppo porta con sé il concetto di progettazione circolare locale (Capra, 2016). Tra sistemi che presentano lo stesso livello di "articolazione" i sistemi locali registrano la maggior efficienza d'uso di energia e materia.

adopted in this direction marries the goal of increasing the energy use efficiency. Deep energy retrofit initiatives would result in a smaller extension of productive territory associated with a lower need for energy. In this case, the approach consistent with the life cycle analysis obliges to take into account the main dynamics involved in the process, combining the energy consumption in the use phase of the house, the materials and the relative amounts of energy useful to fuel these building processes.

Assuming that all the activities are powered by renewable sources, different antagonistic quantities of productive territory emerge, on the one hand the amount of energy in the use phase is reduced, on the other, in order to feed the same building processes, the energy useful for the production of new building materials increases. Be-

tween different hypotheses of "zero emissions" intervention, the one that will involve a lower contribution of renewable energy in all the phases of its life cycle and, in particular, a smaller extent of necessary productive territory, will be more sustainable,

### Form

The increase in the exchange flow between the nodes in a system based exclusively on the use of solar energy and derivatives is closely linked to its level of development, ie. the possibility of increasing the efficiency of material exchange and the use of energy between the actors. During the natural evolution of an ecosystem, in the absence of external disturbances, this condition, briefly defined in the goal function of the "highest ascendent", tends to prevail.

In particular, the level of development

Progettare per aumentare il livello di sviluppo del sistema implica da un lato incrementare l'efficienza d'uso di energia e materia (vedi paragrafo precedente) dall'altro integrare processi di filiera tra di loro in modo tale da poter chiudere i cicli alla scala locale utilizzando scarti o rifiuti di produzione di una filiera come risorse per un'altra. A parità di energia in entrata aumentano i nodi utili a compiere lavoro, di conseguenza aumenta l'efficienza d'uso di energia e materia a parità di servizio prestato.

Tornando al caso esemplificativo dei flussi attivati dall'esigenza di riscaldamento nel periodo invernale, potrebbe essere pensabile in alcuni casi il ricorso ad impianti di cogenerazione a biogas, prodotto da reflui animali. In quest'ultimo caso, la progettazione integrata di filiera comporterebbe contemporaneamente il coinvolgimento delle categorie di consumo dell'abitare e del nutrirsi, facendo ampliare l'ambito di riferimento associato al servizio prestato (e di conseguenza il lavoro effettuato).

In questo caso, nell'ipotesi di scenari alimentati esclusivamente da fonti rinnovabili, la strategia adottata comporterebbe il coinvolgimento di un'estensione di territorio produttivo utile alla produzione dei mangimi animali, dei biocombustibili utilizzati in tutti i processi di filiera, e di energia elettrica prodotta da varie e possibili fonti rinnovabili locali, ognuna caratterizzata da differenti occupazioni di suolo produttivo a seconda della tipologia.

Non è nelle intenzioni di questo articolo fare emergere soluzioni migliori di altre, tale classificazione deve essere il risultato di un'effettiva contabilità di territorio produttivo necessario in tutte le fasi del ciclo di vita dei processi coinvolti nell'espletazione di un determinato servizio. Tale valore andrebbe quindi messo a confronto con il TP effettivamente disponibile nei

of a system is measured by the indicator of the "ascendent" which in turn is the result of the product of the total flow exchanged between the actors of the system and the AMI - Average mutual information (Ulanowicz, 1997). This second indicator refers to the form of the system and to the relationships between the actors, a high value of the AMI corresponds to high levels of articulation of the flows exchanged between the nodes.

«Development consists of an increase in organization and generates a progressive articulation of the flows between the nodes of a system, regardless of its size (change of connections and the distribution of flows between the nodes): two systems can internally organize an identical total flow differently. By maximum articulation (and minimum connection) we mean the situation in which each node exchange

s flows with another node only and by minimal articulation (and maximum connection) we mean the situation in which each node exchanges equal flows with all the nodes and with himself» (Pignatti and Ingegnoli, 1996).

Here are the general lines of the form of the system, which the project will be part of. Its level of articulation adds to the strategy of maximizing the use efficiency of equivalent solar energy, indications on the form of the system. Information on the reciprocal relations between the nodes that compose it are provided and consequently on the relationships between consumption dynamics and territory.

The concept of development brings with it the one of local circular design (Capra, 2016). Between systems that have the same level of articulation, local ones record the highest efficiency in energy and material use.

differenti ambiti. Ipotizzando una riconversione verso sistemi autosostenuti alla scala interregionale/nazionale, può essere utile dare dei riferimenti di massima sul territorio disponibile nel contesto italiano, rispetto al TP necessario, dando un'idea di massima in riferimento alla fattibilità dell'adozione di strategie orientate all'autosufficienza locale per il contesto italiano. Lammontera di territorio per persona disponibile in media sul territorio nazionale ammonterebbe, difatti, a 5.126 mq (EEA, 2012).

Da valutazioni di autosostenibilità pubblicate per il contesto italiano e limitate alle categorie dell'alimentazione, abitazione e trasporti privati, il totale del TP necessario ammonterebbe a circa 9.000/1.000 mq/persona (Scudo e Clementi, 2015). Considerando che di 5.126 mq disponibili per persona in Italia sono attualmente produttivi per la biomassa 4.360 mq/persona (2.540 mq di coltivazioni agrarie, 1.520 mq di bosco, 300 mq di pascolo), il confronto tra territorio produttivo necessario e disponibile fanno emergere la necessità di incrementare l'efficienza d'uso di energia solare, e di conseguenza diminuire il TP utile ad espletare il servizio di supporto alle attività delle comunità insediate.

Strategie quali la riqualificazione energetica diffusa dell'edilizia esistente, un cambiamento di dieta a ridotto contributo di proteine animali, orientata alla produzione locale, e la diffusione di pratiche di trasporto più efficienti possono portare a una riduzione del TP utilizzato pari a circa il 55%. fino a circa 4.000 mq/persona (Scudo e Clementi, 2015). Queste valutazioni, per quanto superficiali e suscettibili di approfondimenti, denunciano la fattibilità dell'adozione di strategie orientate all'autosufficienza locale per il contesto italiano

Designing to increase the level of development of the system implies on the one hand increasing the efficiency of energy and matter use (see previous paragraph) on the other hand integrating supply chain processes among them, in order to be able to close the cycles at the local scale. For instance using production waste from one supply chain as resources for another. At the same energy input, the number of nodes useful to perform work increases, consequently the efficiency of energy and matter use for the same service provided increases.

Going back to the example of the flows activated by the need for heating in the winter period, the use of a biogas cogeneration plant, produced from animal waste could be conceivable. In this case, the integrated design of the supply chain would simultaneously involve the consumption category of

dwelling and eating, expanding the scope of reference of the service provided (and consequently the work carried out).

In the hypothesis of scenarios powered exclusively by renewable sources, the adopted strategy would involve an extension of productive territory (PT) useful to produce animal feed, biofuels used in all the supply chain processes, and electricity from various and possible local renewable sources, each one characterized by different occupations of productive land depending on the type.

It is not the intent of this article to bring out better solutions than others, this classification must be the result of an effective accounting of PT necessary in all phases of the life cycle of the processes involved in the performance of a given service. This value should therefore be compared with



## Tempo

Nel caso del “massimo tempo di residenza” entra in gioco la variabile tempo, Cheslak e Lamarra (Cheslak e Lamarra, 1981) chiariscono che i sistemi ecologici si organizzano in modo tale da massimizzare il tempo di residenza dell'energia. Maggiore è il tempo di rinnovo dei cicli interni al sistema e maggiori sono le possibilità per un sistema ecologico di prevalere su un altro. Da un punto di vista progettuale ciò significa riprogettare le filiere nell'ottica del life cycle design. L'obiettivo consisterebbe nell'operare affinché il sistema o componente possa permanere con un ruolo attivo all'interno delle ecosistema ospitante prima di essere immesso come rifiuto. La compatibilità con le altre funzioni obiettivo, in particolare relative alla gestione delle quantità, farebbero orientare strategie di permanenza verso possibili strategie di riuso piuttosto che di riciclo, o comunque verso strategie in cui il riciclo della materia comporti un contributo energetico minimo o minore rispetto ad altri casi.

## REFERENCES

Baccini, P. and Brunner, P.H. (2012), *Metabolism of the anthroposphere: analysis, evaluation, design. Second edition*, MIT Press, Cambridge, US.

Capra, F. and Luisi, P.L. (2016), *The Systems View of Life: A Unifying Vision*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Cheslak, E.F. and Lamarra, V.A. (1981), “The residence time of energy as a measure of ecological organization”, *Energy and Ecological Modelling*, Amsterdam, ND, pp. 591-600.

Clementi, M., Fontana, C. and Rogora, A. (2018), *Open Network for local self sustainability, boosting bioregional development through an open data sharing system*, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W8.

the PT actually available in the different areas. Assuming a reconversion towards self-sustaining systems on the interregional / national scale, it may be useful to give general references to the amount of PT available in the Italian context, compared to the PT required, giving a rough idea regarding the feasibility of adopting strategies oriented to local self-sufficiency for the Italian context. The amount of territory per person available on average on the national territory would amount, in fact, to 5.126 sqm (EEA, 2012). Self-sustainability scenarios published for the Italian context and limited to the category of food, housing and private transport, report that the total amount of PT required would amount to about 9.000/1.000 sqm/person (Scudo and Clementi, 2015). Considering that from 5.126 sqm available per person in Italy, 4.360 sqm are

currently productive for the biomass (2.540 sqm of agricultural crops, 1.520 sqm of woodland, 300 sqm of pasture), the comparison between available and necessary PT bring out the need to increase the efficiency of use of solar energy, and consequently decrease the productive territory useful to carry out services that support the activities of the settled communities. Strategies such as a widespread energy retrofit of existing residential buildings, a change in diet with a reduced contribution of animal proteins and oriented to local production, the diffusion of more efficient private transport practices can lead to a reduction in the used PT equal to about 55%, to about 4.000 sqm/person (Scudo and Clementi, 2015). These assessments, although superficial and susceptible to in-depth analysis, denounce the feasibility of adopting strategies aimed

Daly, H.E. (1990), “Toward some operational principles of sustainable development”, *Ecological Economics*, Vol. 2, pp.1-6.

Daly, H. (2008), *Ecological Economics and Sustainable Development: Selected Essays of Herman Daly (Advances in Ecological Economics)*, Edward Elgar Pub, Cheltenham, UK.

EEA, European Environment Agency (2012), “Copernicus Land Monitoring Service”, available at: url: <https://land.copernicus.eu> (accessed 15 June 2018).

Fath, B.D, Patten, B.C. and Choi, J.S. (2001), “Complementarity of ecological goal functions”, *Journal of theoretical biology*, Vol. 208 (4), pp. 493-506.

Ferrao, P. and Fernandez, J.E. (2013), *Sustainable Urban Metabolism*, MIT Press, Cambridge, US.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2018), “Global Warming of 1.5°C”, IPCC Editions, available at: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

Jorgensen, S.E. and Mejer, H.F. (1981), *Application of exergy in ecological models*, Progress in Ecological Modelling, Editions CEBEDOC, Liege, Belgium.

Magnaghi, A. (2010), *Il progetto locale. Verso una coscienza di luogo*, Bollati Boringhieri Editore, Torino.

Odum, H.T. (1996), *Environmental Accounting*, Wiley and Sons, New York, US.

Odum, H.T. and Odum, E.C. (2001), *A Prosperous Way Down, Principles and Policies*, University Press of Colorado, Louisville, US.

Pignatti, S. and Ingegnoli, V. (1996), *L'ecologia del paesaggio in Italia*, Citta-Studi Editore, Milano.

Scudo, G. and Clementi, M. (2015), “Local Productive systems planning tools for Bioregional Development”, *Proceedings of the “7th International Aesop Sustainable Food Planning Conference”, Localizing Urban Food Strategies. Farming cities and performing rurality*”, Torino.

Tiezzi, E. (2006), *Verso una fisica evolutiva*, Donzelli Editore, Roma.

Ulanowicz, R.E. (1997), *Ecology, the Ascendent Perspective*, Columbia University Press, New York, US.

at local self-sufficiency for the Italian context.

## Time

In the case of “maximum residence time” the time variable comes into play, Cheslak and Lamarra (Cheslak and Lamarra, 1981) clarify that ecological systems are organized in such a way as to maximize the residence time of energy. The greater is the renewal time of internal cycles in the system, the greater will be the chances for an ecological system to prevail over another. From a design point of view this means redesigning the supply chains in the perspective of life cycle design. The goal would be to operate so that the building system or component can remain active in the ecosystem before being introduced as waste. The compatibility with the other goal functions, related to quantity management,

would orient these permanence strategies towards possible reuse rather than recycling, or in any case towards processes in which the recycling of matter involves a minimum or lower energy contribution compared to other cases.