

Riccardo Pollo, Matteo Trane, Matteo Giovanardi,
Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

riccardo.pollo@polito.it
matteo.trane@polito.it
matteo.giovanardi@polito.it

Abstract. L'architettura e il progetto a scala microurbana si eleggono ad ambiti disciplinari in grado di materializzare le istanze di una società in perenne e rapida evoluzione. La qualità dell'azione progettuale deriva dalla sua caratteristica di aprirsi a contaminazioni esterne, rendendo cruciale il lavoro sulle frontiere della conoscenza e l'ibridazione dei saperi. Il contributo riporta una riflessione sul ruolo del Metabolismo Urbano quale metafora di confine, all'interno della quale è possibile l'interazione tra comunità scientifica, stakeholder, policymaker, progettisti, intesa quale potenziale strumento di indagine e progetto dell'Ecosistema Urbano. A partire da modelli e approcci propri di altri ambiti, si indaga quindi la possibile relazione tra UM, architettura e progettazione ambientale.

Parole chiave: Metabolismo urbano; *Smart Urban Metabolism*; Interdisciplinarietà; Transdisciplinarietà; Progettazione Ambientale.

Introduzione

Con la fine dell'Olocene e l'avvento dell'Antropocene (Crutzen, 2002), l'impatto umano sull'ecosistema naturale è tangibile e quantificabile in termini di cambiamento degli equilibri fisici e biologici della Terra. In questa nuova era geologica, forze di origine umana – l'industrializzazione e l'urbanizzazione – mobilitano persone, beni e informazioni ad un ritmo inedito (Dijst *et al.*, 2018), con notevoli ripercussioni sui pattern di distribuzione e sui caratteri dei flussi di materia e di energia in ambito urbano. La nozione di "complessità" insita nei sistemi urbani e il carattere sistemico dell'attuale crisi ecologica ci spingono infatti a considerare, ai fini della mitigazione delle cause del cambiamento climatico, la città e il territorio nel loro ruolo di "teatro" di processi interconnessi di trasformazione e accumulo di materia ed energia. A tal fine, centrale diviene la comprensione delle dinamiche che originano la presenza, sempre più ingente, di flussi e stock di materia e di energia nel sistema urbano, che determinano i rapporti di equilibrio tra questo e gli ecosistemi naturali periferici (Castán Broto *et al.*, 2012).

Urban Metabolism, interdisciplinary models and design at micro-urban scale

Abstract. The architecture and the micro-urban scale design are elected to disciplines capable of materializing society's perennial and rapid evolution demands. The design quality derives from its characteristic of opening up to external contamination, making work on the frontiers of knowledge and the hybridization of knowledge crucial. The contribution reflects on the Urban Metabolism's (UM) role as a boundary metaphor, within which interaction among the scientific community, stakeholders, policymakers, and designers is possible. This metaphor could then be understood as a potential investigation and design tool for the Urban Ecosystem. UM's possible relationship with architecture and environmental design is investigated, starting from models and approaches typical of other disciplinary fields.

La comprensione di tali processi chiama in causa saperi propri dell'ecologia, della fisica, della biologia, delle scienze naturali, delle discipline sociali ed economiche, coinvolgendo, nel mutato rapporto di forza tra natura e mondo artificiale, il progetto architettonico e urbano come prefiguratori dello spazio fisico all'interno del quale questi processi avvengono. I nuovi saperi e lo sviluppo scientifico pongono dunque oggi al progetto della città e all'architettura, che ne è espressione materiale e «razionalità applicata» (Maldonado, 1992), sfide rinnovate. La prospettiva in cui opera il progetto è dunque sempre più quella dell'Ecosistema Urbano (Nicoletti, 1978).

Dalla coscienza della natura sistemica dei fenomeni a scala urbana e territoriale e dall'urgenza dell'indagine delle conseguenze delle azioni antropiche sull'ambiente, si è sviluppato il filone di ricerca dedicato allo Urban Metabolism (UM), che accoglie studi in campo ecologico, economico, sociale e territoriale, con un coinvolgimento sinora marginale dell'architettura e del progetto urbano. L'obiettivo di questo contributo è dunque quello di esplorare la letteratura disponibile sul tema dello UM, qui inteso come:

- concetto, le cui radici teoriche fondano sugli approcci tipici delle varie discipline coinvolte;
- modello, cui si demanda la descrizione delle dinamiche di varia natura che connotano i processi in atto nei sistemi urbani;
- strumento, per evidenziare, infine, le potenzialità di tale approccio anche per le discipline dell'architettura e della progettazione ambientale, indicando (possibili) analogie esistenti tra UM ed esperienze condotte in questo ambito.

Keywords: Urban Metabolism; Smart Urban Metabolism; Interdisciplinarity; Transdisciplinarity; Environmental Design.

Introduction

With the end of the Holocene and the Anthropocene advent (Crutzen, 2002), the human impact on the natural ecosystem is tangible and quantifiable in terms of change of the Earth's physical and biological equilibrium. In this new geological era, forces of human origin – industrialization and urbanization – mobilize people, goods, and information at an unprecedented pace (Dijst *et al.*, 2018), with significant repercussions on distribution patterns and the characters of flows of matter and energy in urban areas. To mitigate the causes of climate change, the paradigm of "complexity" of the urban systems and the systemic nature of the current ecological crisis lead us to consider the

city and the territory in their role as a "theater" where interconnected transformation processes and accumulation of matter and energy occur. To this end, understanding the dynamics that originate the increasingly large presence of energy and matter flows and stocks in urban systems becomes central and determines the equilibrium relationships between this and the peripheral natural ecosystems (Castán Broto *et al.*, 2012).

Understanding these processes calls into question the approaches of ecology, physics, biology, natural sciences, social and economic disciplines, involving the architectural and urban project as prefigurations of the physical space within which these processes take place, in the changed relationship of strength between nature and the artificial world. Therefore, new knowledge and scientific development pose

Urban Metabolism come concetto

L'espressione "metabolismo urbano" si riferisce ad un insieme di complessi processi di trasformazione della materia e dell'energia che attraversano un sistema insediativo (o una città, o una regione) in una data dimensione spazio-temporale. Il riferimento metaforico ad un processo biologico per descrivere dinamiche di natura sociale, economica e culturale rappresenta un potente mezzo per concettualizzare la città come un organismo (Kennedy *et al.*, 2011), in cui le diverse componenti intrattengono strette relazioni tra di loro e con l'ambiente, espresse in termini di crescita, produzione di energia ed eliminazione dei rifiuti (Kennedy *et al.*, 2007). L'"organismo urbano" esercita dunque sull'ambiente una pressione continua, in funzione del numero dei propri abitanti, dei loro consumi e stili di vita, della sua posizione geografica e del contesto socio-economico e normativo all'interno del quale si colloca (Trane, 2020).

Questa visione affonda le proprie radici nell'economia classica e nella rivisitazione dello stesso pensiero marxiano, che introduce il concetto di *Stoffwechsel* (letteralmente "metabolismo") nel definire le complesse relazioni alla base del rapporto antagonista tra uomo-natura/città-campagna (Foster, 2011). Nel pensiero di Marx, la dimensione ecologica viene posta in stretta relazione con quella sociale, adottando un approccio olistico che guarda alle relazioni e alle interazioni tra le parti, cercando soluzioni integrative piuttosto che meramente riduzioniste (Newman and Jennings, 2008). Secondo un filone di studi parallelo, la città è intesa invece come "Ecosistema" complesso, in cui i processi di scambio di materia ed energia avvengono a scale anche molto diverse (da quella comunitaria a quella globale), tutte poten-

zialmente riconducibili ad un'unica, grande rete estremamente complessa (De Duve, 1995). Lo UM è dunque un concetto abilitante la comprensione della città come ecosistema prodotto dall'interazione e dalla somma di diversi metabolismi (Golubiewski, 2012), quantificabili mediante la definizione dei flussi di materia e di energia all'interno dei suoi confini. Da un punto di vista concettuale, esso fornisce un framework metaforico (Princetl *et al.*, 2012) per una valutazione delle interazioni esistenti tra natura, sistema urbano, attività di natura antropica, dinamiche di natura sociale, tecnica ed economica, all'interno del quale si colloca l'azione progettuale.

Urban Metabolism come modello interdisciplinare

Un primordiale modello metabolico veniva elaborato, nel 1965, da Abel Wolman, un ingegnere civile statunitense, che, adattando i dati statistici disponibili a livello nazionale, quantificava il metabolismo di una città immaginaria di un milione di abitanti, ponendo particolare attenzione sulle risorse necessarie al loro sostentamento e alla conseguente produzione di rifiuti e di inquinanti in aria e acqua (Wolman, 1965). Pochi anni dopo, analisi sui primi casi studio reali venivano condotte da chimici, ecologisti e ingegneri. Tra questi, assunsero particolare rilievo gli studi di Odum, un ecologo statunitense, che, nel tentativo di creare un modello metabolico universalmente valido, enfatizzò la dipendenza dal Sole di tutte le attività presenti sulla Terra. A tal fine, elaborò il concetto di eMergia, ovvero la quantità di energia solare equivalente necessaria alla creazione di un prodotto o di un servizio (Princetl *et al.*, 2012). Seppur non esenti da criticità – tra tutte, la difficoltà di esprimere processi e flussi di natura profonda-

renewed challenges to the city project and architecture, its material expression and applied rationality (Maldonado, 1992). Quoting Manfredo Nicoletti (1985), the project's perspective is more and more that of the Urban Ecosystem. The research dedicated to Urban Metabolism (UM) has developed from the awareness of the systemic nature of phenomena on an urban and territorial scale, as well as from the urgency of investigating the consequences of anthropogenic actions on the environment. These researches include studies in the ecological, economic, social, and territorial fields, with hitherto minor involvement of architecture and urban design. Therefore, the goal of this paper is to explore the literature available on UM, here intended:

- as a concept whose theoretical roots are based on the typical approaches of the various disciplines involved;

- as a model which is required to describe the various kinds of dynamics that characterize the processes in progress in urban systems;
- finally, as a tool to highlight the potential of this approach also for the disciplines of architecture and environmental design, indicating (possible) analogies between UM and experiences in this field.

Urban Metabolism as a concept

The expression "Urban Metabolism" refers to a set of complex processes of transformation of matter and energy that cross a settlement (or a city, or a region) in a given space-time dimension. The metaphor of the biological process to describe dynamics of a social, economic, and cultural nature represents a powerful means to conceptualize the city as an organism (Kennedy *et al.*, 2011), in which the

different components maintain close relationships with each other and with the environment, «expressed in terms of growth, energy production and waste disposal» (Kennedy *et al.*, 2007). Therefore, the "urban organism" exerts continuous pressure on the environment, depending on the number of its inhabitants and their consumption and lifestyles, its geographical position, and the socio-economic and regulatory context within which it is located (Trane, 2020).

This vision has its roots in classical economics and in the reinterpretation of Marxian thought, which introduces the concept of *Stoffwechsel* (literally "metabolism") to define the complexity which regulates the antagonistic relationships between man-nature/city-countryside (Foster, 2011). According to Marxian theories, the ecological sphere is closely related to the

social one «in a holistic way [...], looking at the relationships and interactions between parts, seeking to devise solutions that are integrative rather than merely reductionist» (Newman and Jennings, 2008). Then, according to a second line of studies, the city is understood as a complex Ecosystem, in which the processes of exchange of matter and energy occur at very different scales (from the community to the global one), all «eventually closing into a single, gigantic web of formidable complexity potentially attributable to a single, extremely complex network» (De Duve, 1995). Therefore, the UM is a concept enabling the understanding of the city as an ecosystem produced by the interaction and sum of different metabolisms (Golubiewski, 2012). These are quantifiable by defining the energy and matter flows within its borders. From a conceptual point of view,

mente eterogenea con una stessa unità di misura (Zhang *et al.*, 2015) – questi modelli hanno dato vita ad un filone di ricerca ad oggi consolidato.

L'Ecologia Industriale (EI) è, in definitiva, la disciplina che maggiormente ha contribuito alla costruzione di modelli per la definizione dei flussi di materia ed energia. L'analogia, in questo caso, è tra la città e i processi di simbiosi industriale (Barles, 2009), in cui gli scarti dei cicli produttivi diventano input per altri, garantendo benefici in termini ambientali ed economici (Dunn and Steinemann, 1998). I modelli metabolici basati sulla Material Flow Analysis (MFA) sono, pertanto, i più diffusi. Questi, infatti, consentono di analizzare il metabolismo attraverso una definizione di flussi e stock all'interno di un sistema definito, connettendo risorse, trend di consumo e presenza di stock di materia (Castán Broto *et al.*, 2012). Modelli metabolici basati sulla SFA (Substance Flow Analysis) si configurano come una declinazione della MFA: in questo caso, viene quantificata la presenza di flussi di sostanze (carbonio, nitrogeno e fosforo, principalmente) all'interno dei processi considerati (Perrotti, 2020). Crescente è, infine, l'adozione di modelli basati sulla EFA (Energy Flow Analysis) (Haberl, 2001).

Benché la loro importanza risieda principalmente nell'aver evidenziato la natura fortemente lineare dei modelli economici correnti (Girardet, 1992), gli studi inizialmente prodotti nell'ambito dell'EI si dimostravano scarsamente interessati alle dinamiche, di varia natura, interne alle città stesse (Barles, 2009). Da diversi anni, si assiste al tentativo di superare questa semplificazione, frutto di una visione del sistema urbano come una *black box*, ovvero un modello che analizza le risposte (output) a determinate

sollecitazioni in entrata (input), ma che ignora le specificità del sistema stesso (Zhang *et al.*, 2015). Al fine di scardinare questa eccessiva semplificazione, è stato proposto di adottare serie temporali dei flussi di materia e di energia per definirne una “spazializzazione”, mediante l'adozione di modelli basati su sistemi informativi territoriali (GIS) (Athanassiadis *et al.*, 2015), come base per la creazione di modelli metabolici dinamici, più adatti a cogliere le complessità interne del sistema urbano considerato. In questa sua versione “estesa” o 2.0 (Princetl *et al.*, 2012), lo UM si colloca in uno spazio fisico e diacronico.

Dopo i primi anni 2000, la tendenza a spazializzare i flussi attivi in ambito urbano portava alla nascita della disciplina dell'Ecologia Territoriale (o Urbana) (Barles, 2009), una sorta di EI posta in un contesto spaziale, che considera gli stakeholders e i driver di natura sociale ed economica (endogeni o esogeni). Questi ultimi, a loro volta, attraverso le attività, producono flussi e stock e determinano il contesto dei bisogni di individui e comunità (Dijst *et al.*, 2018). Princetl (2012) individua nelle discipline dell'Ecologia Politica e dell'Economia Politica Urbana gli strumenti per la comprensione delle complesse relazioni che sono alla base dell'origine di flussi e stock, del consumo di risorse e dell'individuazione dei driver di natura politica. Newell e Cousin, infine, introducono il campo disciplinare dell'Ecologia Politico-Industriale, il cui approccio tende alla comprensione dei meccanismi di natura storica, politica, sociale, tecnologica ed economica che modellano le relazioni che esistono tra un prodotto, una merce o un processo materiale, i suoi input primari e output e le sue implicazioni rilevanti da un punto di vista sociale ed ecologico (Newell *et al.*, 2017) (Tab. 1).

it provides a metaphorical framework (Princetl *et al.*, 2012) to evaluate the interactions existing between nature, urban system, anthropogenic activities, social, technical, and economic dynamics, within which the project acts.

Urban Metabolism as an interdisciplinary model

In 1965 Abel Wolman, an American civil engineer, developed a primordial metabolic model adapting the statistical data available at the national level. He quantified the metabolism of an imaginary city of one million inhabitants, paying particular attention to the resources necessary for their sustenance and evaluating the consequent production of waste and pollutants in the air and water (Wolman, 1965). A few years later, chemists, ecologists, and civil engineers quantified the first

real case studies' metabolism. Among these scholars, Odum's researches assumed particular importance. He was an American ecologist who emphasized the dependence on the Sun of all activities occurring on the Earth, in order to create a universally valid metabolic model. Therefore, he introduced the concept of eMergy, or the amount of equivalent solar energy needed to create a product or service (Princetl *et al.*, 2012). Although not exempt from critical issues – among all, the difficulty of expressing processes and flows of a deeply heterogeneous nature with the same unit of measurement (Zhang *et al.*, 2015) – these models have given rise to a research line that is now consolidated.

Industrial Ecology (IE) is the discipline that has mostly contributed to constructing models to define the flows of matter and energy. In this case, the

analogy is between the city and the industrial symbiosis processes (Barles, 2009), in which waste from production cycles becomes the input for others, guaranteeing benefits in environmental and economic terms (Dunn and Steinemann, 1998). Therefore, metabolic models based on Material Flow Analysis (MFA) are still the most widespread. In fact, these make it possible to analyze metabolism through a definition of flows and stocks within a defined system, connecting resources, consumption trends, and the presence of material stocks (Castán Broto *et al.*, 2012). Metabolic models based on SFA (Substance Flow Analysis) are a declination of MFA: in this case, one quantifies the presence of substance flows (mainly carbon, nitrogen, and phosphorus) within certain processes (Perrotti, 2020). Finally, models based on EFA (Energy Flow Analysis) are in-

creasing (Haberl, 2001).

Although their importance mainly lies in highlighting the strongly linear nature of current economic models (Girardet, 1992), the studies initially produced by industrial ecologists showed little interest in defining various kinds of dynamics within the cities themselves (Barles, 2009). We have been witnessing an attempt to overcome this simplification for several years, which is the result of the vision of the urban system as a “black box”. It is a model that analyzes the responses (output) to certain solicitations (input) but ignores the specificities of the system itself (Zhang *et al.*, 2015). The adoption of time-series of material and energy flows has been proposed to “spatialize” them (Athanassiadis *et al.*, 2015), avoiding this oversimplification. By adopting models based on territorial information systems (GIS), we can de-

**Urban Metabolism
 come strumento
 transdisciplinare
 per la progettazione
 architettonica e ambientale**

La qualità dell'azione progettuale deriva oggi dalla sua caratteristica di aprirsi a contaminazioni esterne, rendendo cruciale il lavoro sulle frontiere della conoscenza e l'ibridazione dei sa-

peri. In tal senso, in una società in perenne e rapida evoluzione, il progetto ambientale diviene necessariamente momento di sintesi tra le istanze e gli approcci delle discipline che forniscono il loro contributo alla definizione del metabolismo di un sistema urbano. Tale momento è destinato ad avere risvolti tangibili sull'ambiente antropizzato mediante un'analisi dei nessi (anche intangibili) esistenti tra fattori spaziali/materici e microclimatici dell'ambiente, tra stili di vita dell'abitante, qualità ambientale in senso ampio e determinanti di salute, nonché sulla contrazione e sull'ottimizzazione degli stessi flussi in ottica della mitigazione delle cause del cambiamento climatico.

Da un'approfondita analisi della letteratura, emerge come il me-

rito maggiore dell'approccio metabolico risieda nell'aver attribuito il paradigma della "complessità" propria di un sistema al contesto urbano. Emerge, tuttavia, anche la necessità di correlare la prospettiva sistemica e scientifica propria dello UM con la progettazione alle varie scale, per comprendere meglio i processi di origine naturale ed antropica alla base delle trasformazioni temporali e spaziali dell'ambiente (Galan and Perrotti, 2019). In tal senso, in analogia con l'ambito di ricerche sullo *Smart Urban District* (Tucci *et al.*, 2018), sulle *Smart City* e sulla *Self Sufficient City* (Guallart, 2013), è stato introdotto il filone di ricerca dedicato allo Smart Urban Metabolism (SUM) (Shahrokni *et al.*, 2013). Lo SUM viene proposto come strumento per la conoscenza dei pattern di consumo e di utilizzo delle risorse, attraverso la costruzione di modelli dinamici basati su reti di sensori capillari e sulle raccolta/gestione di dati ad alta risoluzione spazio-temporale. L'attributo "Smart", infatti, introduce «[...] il tema del "dato" e della sua gestione nelle città, non solo come elemento conoscitivo per la progettazione urbana, ma come diffusa e ac-

Ambiti disciplinari	Ambito di studi	Approccio allo UM
Ecologia industriale (EI)	Confronto tra sistemi industriali e organismi viventi come "processazione" di rifiuti ed energia	Modelli basati su: Material Flow Analysis (MFA); Substance Flow Analysis (SFA); Energy Flow Analysis (EFA); eMergia; Life Cycle Assessment (LCA)
Economia ecologica (EE)	Studio del legame tra economia e le sue basi materiali, da una critica alle analisi economiche tradizionali, al fine di considerare la dipendenza della disciplina economica dall'ambiente naturale	Evidenziazione dei pattern di consumo delle risorse e di natura socio-ambientale generati dall'accumulo e dalla distribuzione ineguale delle risorse nelle aree urbane
Ecologia politica (EP)	Interazioni tra uomo e ambiente dal punto di vista della distribuzione delle disuguaglianze economiche, in relazione ai cambiamenti ambientali (politizzazione delle questioni ambientali)	Comprensione di come flussi di natura socio-ambientale modellino le aree urbane. I modelli metabolici consolidati, basati sull'analisi dei flussi di materia e di energia, anche estesi a istanze sociali ed economiche, non sono giudicati sufficienti per spiegare le complesse relazioni che modellano la città
Ecologia politica-industriale (EPI)	Studio dei meccanismi di natura storica, politica, sociale, tecnologica ed economica che modellano le relazioni che esistono tra un prodotto, una merce o un processo materiale, i suoi input primari e output e le sue implicazioni rilevanti da un punto di vista sociale ed ecologico (Newell <i>et al.</i> , 2017)	Vengono approfonditi i fattori politici, sociali, geografici e istituzionali che modellano i sistemi urbani
Ecologia Urbana / Ecologia Territoriale (EU)	A partire dalle teorie di Odum dell'ecologia scientifica e degli ecosistemi, si amplia il campo di ricerca con studi affini all'ecologia industriale, alla pianificazione urbana, all'ingegneria urbana, alla biogeochimica urbana e all'Economia Ecologica	Caratterizzazione economica dei flussi di materia e di energia, considerando la dimensione spaziale e la presenza di stakeholder (o di attori)
Ecologia politica urbana (EPU)	A partire dalla concezione socio-ecologista marxista dello UM, le barriere al raggiungimento di città sostenibili sono di natura politica che possono essere superate attraverso l'analisi delle condizioni politiche, sociali, economiche, dei fattori culturali e ambientali che producono il paesaggio urbano nonché attraverso l'esame della struttura e dell'organizzazione dei rapporti di potere e di espressione sociale e istituzionale di queste relazioni (Domene Gomez, 2006)	Approccio qualitativo che esplora, da un lato, il modo in cui la natura viene trasformata e inserita in politiche socio-economiche che plasmano la forma urbana e come i flussi attivi originino un metabolismo di natura socio-ambientale, dall'altro a evidenziare il <i>metabolic rift</i> (frattura metabolica) tra campagna e città, conseguenza del modo di produzione

| Tab. 01

cessibile informazione su elementi, infrastrutture e luoghi della città stessa» (Losasso, 2015). Lo SUM è, dunque, una sorta di Urban Metabolism *ICT-enabled*; una sua prima applicazione è tuttora in corso di sperimentazione in un distretto urbano a Stoccolma, il Royal Seaport (Shahrokni et al., 2015). In definitiva, la dimensione dell'uso dello spazio, e quindi dei caratteri prestazionali della prassi progettuale, emerge e può trovare nello UM – e in particolare nella sua declinazione Smart – una prospettiva progettuale innovativa. L'esigenza di fornire un supporto alla gestione e alla progettazione sostenibile della città attraverso l'uso di approcci e visioni proprie dello UM può consentire alla *Smart City* e a proposte quali la *Self Sufficient City* di sperimentare una concreta attuazione.

L'implementazione delle infrastrutture ICT nell'ambito dello UM introduce elementi rilevanti di potenziale supporto al progetto urbano e architettonico. Viene consentita, in prospettiva, la possibilità di attuare un monitoraggio delle performance ambientali ed energetiche di edifici e spazi pubblici, con il coinvolgimento dei livelli istituzionali/specialistici (dai fornitori energetici al governo locale) e dei saperi eterogenei dei cittadini, attori della scena urbana e delle visioni partecipative sul futuro delle città (Ratti, 2013). In questa prospettiva, le tematiche ambientali, al pari di quelle socioeconomiche, entrano con forza nell'azione progettuale a scala micro-urbana, territoriale ed architettonica. Come evidenziato da molti studi, le analisi e quantificazioni dei flussi sono state condotte perlopiù a scala urbana o regionale, non consentendo una specifica valutazione di politiche e progetti per la scala micro-urbana, principale ambito d'azione della progettazione ambientale. Benché siano presenti notevoli criticità per la quantificazione dei flussi, principalmente legate alla

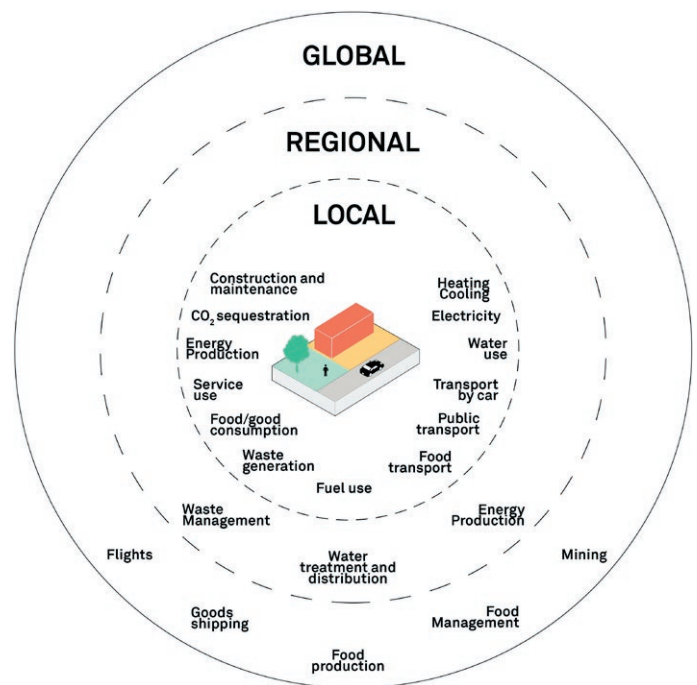
fine a basis for creating dynamic metabolic models, which are more suitable for grasping the intrinsic complexities of the urban system. In this "extended" or 2.0 version (Princetl et al., 2012), the UM is then placed in a physical and diachronic space.

After the early 2000s, the tendency to spatialize the active flows in the urban environment led to the birth of the discipline of Territorial (or Urban) Ecology (Barles, 2009), a sort of IE placed in a spatial context, which considers stakeholders and drivers of a social and economic nature (endogenous or exogenous ones). The latter, in turn, through activities, produce flows and stocks and determine the context of the needs of individuals and communities (Dijst et al., 2018). Princetl (2012) identifies in the disciplines of Political Ecology and Urban Political Economy the tools for understanding

the complex relationships underlying the origin of flows and stocks, the consumption of resources, and political drivers' identification. Finally, Newell and Cousin introduce the disciplinary field of Political-Industrial Ecology, whose approach tends to understand the mechanisms of a historical, political, social, technological, and economic nature that shape the relationships that exist between a product, a commodity, or a material process, its primary inputs and outputs and its relevant implications from a social and ecological point of view (Newell et al., 2017) (Tab. 1).

Urban Metabolism as a transdisciplinary tool for architecture and environmental design

The design quality derives from its characteristic of opening up to an external contamination, making work



manca di dati a scala urbana o locale (Rosado et al., 2014), alla scala micro-urbana è possibile individuare con maggiore precisione la relazione che esiste tra spazio, abitante e architettura, valutandone infine le ricadute sui principali parametri ambientali ed energetici (Codoban and Kennedy, 2008).

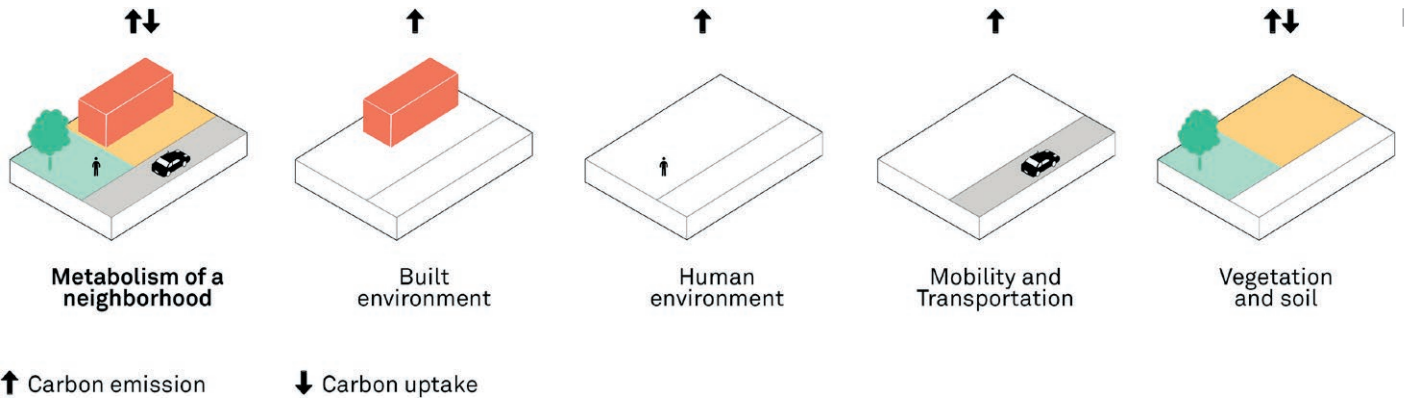
Riprendendo dalla letteratura una classificazione dei flussi e degli stock di materia e di energia in flussi globali, regionali e locali (Shahrokni et al., 2013) (Fig. 1) e la loro manifestazione nei "settori" che costituiscono il sistema urbano (Mobilità e Trasporti, Ambiente costruito, Ambiente umano, Ambiente vegetale e suolo, Produzione e Gestione) (Kellett et al., 2013) (Trane, 2020) (Fig. 2) è possibile delineare un campo d'azione del progetto di architettura in cui questo si configura non più (solo) come il progetto di un edificio, bensì come sintesi materiale e tangibile nello spazio urbano di istanze derivanti dalle differenti discipline

on the frontiers of knowledge and the hybridization of knowledge, crucial. In this sense, in a society in perennial and rapid evolution, the environmental design necessarily becomes a moment of synthesis between the requests and approaches of the disciplines that contribute to the definition of an urban system's metabolism. This moment has tangible implications on the anthropized environment through an analysis of the links (also intangible) existing between spatial/material and microclimatic factors of the environment, between the lifestyles of the inhabitant, environmental quality in a broad sense, and determinants of health, as well as on the contraction and optimization of the same flows to mitigate the causes of climate change. From an in-depth analysis of the literature, it emerges that the main merit of the metabolic approach lies in having

introduced the paradigm of "complexity" typical of a system in the urban context. However, the need to correlate the UM's systemic and scientific perspective with the design at various scales emerges to better understand the processes of natural and anthropogenic origin underlying the environment's temporal and spatial transformations (Galan and Perrotti, 2019). In this sense, in analogy with the field of research on Smart Urban District (Tucci et al., 2018), Smart Cities and Self Sufficient City (Gualart, 2013), a first attempt was made by introducing the line of research dedicated to Smart Urban Metabolism (SUM) (Shahrokni et al., 2013). The SUM is proposed as a tool for understanding the patterns of resource consumption and use by constructing dynamic models based on networks of capillary sensors and the collection/management of high-res-

02 | Contributo, per settore, al metabolismo di un quartiere in termini di emissione/prelievo di CO₂ (elaborazione degli autori sulla base di Kellett *et al.*, 2013;Trane, 2020)
*Contribution, by sector, to the neighborhood metabolism in terms of CO₂ emission/uptake (elaboration of the authors based on Kellett *et al.*, 2013;Trane, 2020)*

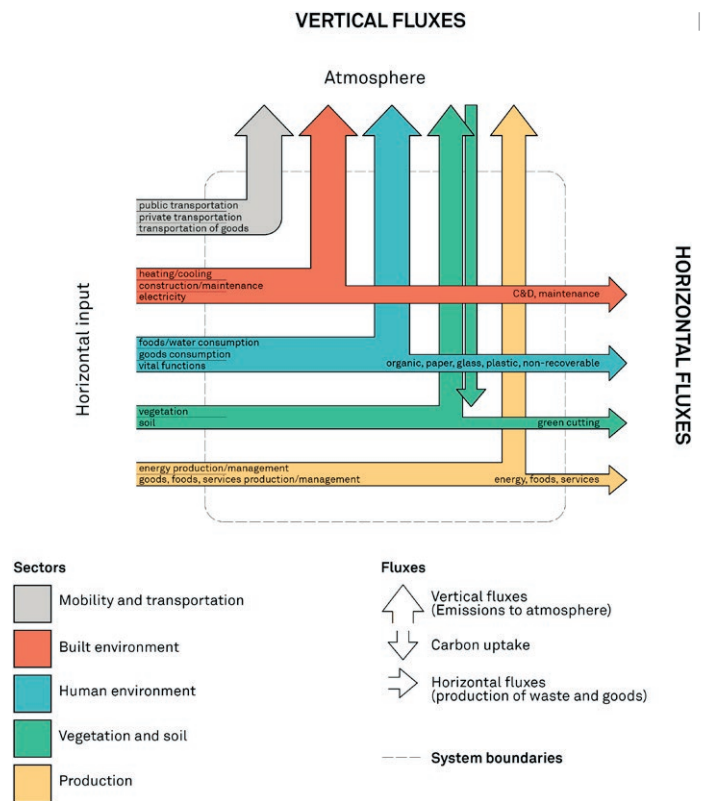
03 | Classificazione dei flussi in orizzontali (produzione di rifiuti e beni) e verticali (emissione/prelievo di inquinanti in/dall'atmosfera) in risposta a input orizzontali per settore
Classification of the fluxes in horizontal (waste and goods production) and vertical (emission/uptake of pollutants into/from the atmosphere) based on horizontal input and by sector



coinvolte. Da questo quadro emerge come il campo del progetto riguardi, alle varie scale, molti degli ambiti all'interno dei quali sono attivi flussi di materia e di energia (e i loro stock), catalogabili in flussi verticali (emissione di inquinanti in atmosfera) ed orizzontali (produzione di rifiuti e beni), prodotti a partire da input orizzontali, cioè riferiti a processi antropogenici che richiedono consumo di carbonio (Kellett *et al.*, 2013) (Fig. 3). Ai fini di una maggiore integrazione tra gli studi metabolici e la prassi progettuale architettonica, nel framework applicativo qui proposto una prima valutazione conoscitiva del metabolismo di un sistema urbano si rivela necessaria ai fini della quantificazione dei flussi e degli stock originati dalle attività antropogeniche (Fig. 4). All'interno del framework, ogni livello superiore si intende come "abilitato" dal livello immediatamente inferiore. Questa valutazione può essere effettuata seguendo le schematizzazioni

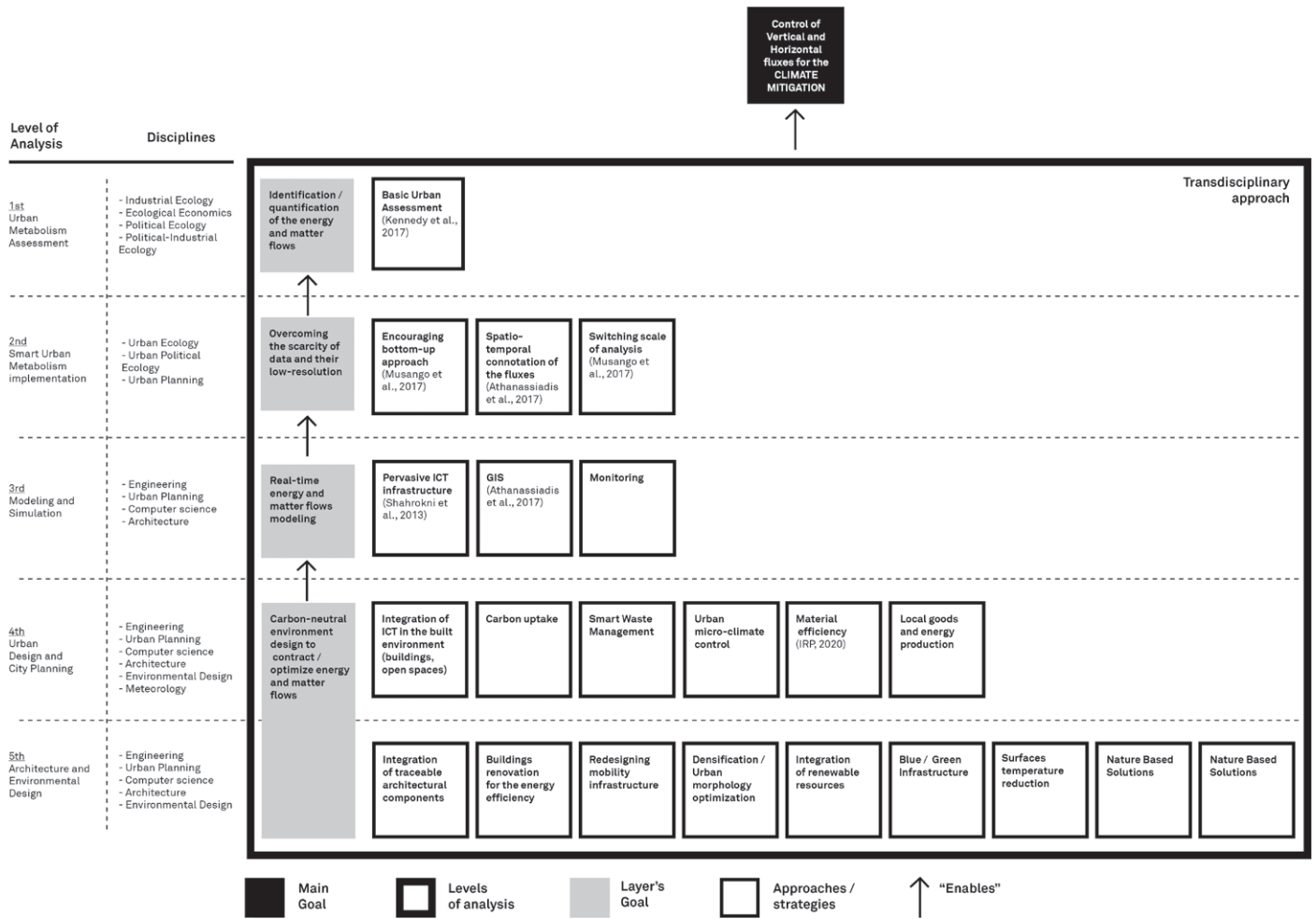
olution space-time data. The "Smart" attribute, in fact, introduces the theme of data and its management in cities, not only as a cognitive element for urban planning but as widespread and accessible information on elements, infrastructures, and places of the city itself (Losasso, 2015). Therefore, the SUM is a sort of ICT-enabled Urban Metabolism; its first application is still being tested in a Stockholm's urban district, the Royal Seaport (Shahrokni *et al.*, 2015). Ultimately, the dimension of the use of space and the performance characteristics of design practice emerge and find in the UM – and in its Smart declination – an innovative design perspective. The need to provide support for sustainable city management and planning through UM approaches and visions can allow the Smart City and proposals such as the Self-Sufficient City to experience a

concrete implementation. Implementing ICT infrastructures within the UM introduces relevant elements of potential support to the urban and architectural project. In perspective, the possibility of monitoring the environmental and energy performance of buildings and public spaces is allowed, with the involvement of institutional/specialist levels (from energy suppliers to local government) and the heterogeneous knowledge of citizens, which are actors of the urban scene and the participatory visions on the future of cities (Ratti, 2013). In this perspective, environmental issues, like socio-economic ones, forcefully enter the design action on a micro-urban, territorial, and architectural scale. As evidenced by many studies, the analyses and quantifications of flows were mostly conducted on an urban or regional scale, not allowing a specific



assessment of policies and projects for the micro-urban scale, the main environmental design area. Although there are significant criticalities for the quantification of flows, mainly related to the lack of data at an urban or local scale (Rosado *et al.*, 2014), at the micro-urban scale, it is possible to identify more precisely the relationship that exists between space, inhabitant, and architecture, finally evaluating

the effects on the main environmental and energy parameters (Codoban and Kennedy, 2008). Taking from the literature a classification of the flows and stocks of matter and energy in global, regional, and local flows (Shahrokni *et al.*, 2013) (Fig. 1) and their manifestation in the "sectors" that make up the urban system (Mobility and Transportation, Built Environment, Human Environment,



Plant and Soil Environment, Production and Management) (Kellett *et al.*, 2013; Trane, 2020) (Fig. 2) it is possible to outline a field of action of the architectural project in which this is no longer configured (only) as the design of a building, but as a material and tangible synthesis, in the urban space, of instances deriving from different disciplines. From here, it emerges that the field of the project concerns, at various scales, many of the areas within which there are active flows of matter and energy (and their stocks), categorized in vertical flows (emission of pollutants into the atmosphere) and horizontal (production of waste and goods), produced starting from horizontal inputs, i.e., referring to anthropogenic processes that require carbon consumption (Kellett *et al.*, 2013) (Fig. 3). For greater integration between metabolic studies and architectural design prac-

tice, in the application framework proposed here, a preliminary urban system's metabolism assessment is necessary to quantify the flows and stocks originating from anthropogenic activities (Fig. 4). In the proposed framework, each higher layer must be intended as "enabled by" the upcoming one. This evaluation can be carried out following the schematizations already proposed in the literature, in compliance with the methodologies of the disciplines involved and the models developed by them (Kennedy *et al.*, 2014; Musango *et al.*, 2017) (Tab. 2). In the second level of analysis, dedicated to the implementation of the SUM, necessary to allow the spatialization of the flows and the "opening" of the black box by acquiring high-resolution data, it is necessary to promote a bottom-up approach, in which the knowledge of behavior dynamics is central to

the interpretation of flows in a given context and a space-time dimension. Finally, the transition from a linear to a circular metabolism will require a continuous switch between the different scales in the analysis of the UM and, therefore, in spatial design (Musango *et al.*, 2017). In this sense, the analysis must be carried out to allow this switch between the scales of the metabolism: macro-scale (nations, regions, provinces, large urban agglomerations); meso-scale (cities); micro-scale (neighborhoods) (Huang *et al.*, 2015). In fact, the global nature of the environmental and social impact of human activities implies that cities have to be considered on multiple scales of impact, each of which must necessarily be taken into consideration in assessing the contribution of the urban system to the sustainable development (Musango *et al.*, 2017). The third level of

analysis, called "Modeling and Simulation", allows the possibility of locating flows and stocks through GIS software and setting up a widespread and capillary ICT infrastructure, to promote the construction of dynamic models of the flows. The fourth ("Urban Design and City Planning") and the fifth level of analysis ("Architecture and Environmental Design") involve more directly the urban and architectural project at different scales for the regulation/optimization of the flows and, therefore, to reach the target of the carbon neutrality of the built environment. Architecture can directly impact flows when designing buildings, infrastructures, and urban green areas explicitly aim to construct and manage a carbon-neutral anthropized environment (European Commission, 2014) that can be effectively monitored. Think, of the micro-urban scale, of

Tab.02 | Parametri per una valutazione preliminare del Metabolismo Urbano (Kennedy et al., 2014; Musango et al., 2017)
Parameters for a Basic Urban Metabolism assessment (Kennedy et al., 2014; Musango et al., 2017)

Layer	Descrizione
Layer 1: Contesto	Esame del contesto della città: confini spaziali; caratteristiche della città; popolazione; economia
Layer 2: Caratteristiche biofisiche	Esame delle caratteristiche biofisiche: superficie territoriale; area urbanizzata; clima; superficie lorda di pavimento
Layer 3: Parametri del metabolismo urbano energetico	[...] consumi di materiali, acqua, cibo, energia [...], produzione di rifiuti generati dai consumi
Layer 4: Ruolo delle utility	Numero e proprietà dei distributori e fornitori di risorse: acqua, energia (elettricità; gas naturale; accesso ai servizi basilari), cibo, rifiuti
Layer 5: Policy framework	Politiche esistenti che influenzano la direzione dei flussi di risorse

| Tab.02

già proposte in letteratura, in adesione alle metodologie proprie delle discipline coinvolte e ai modelli da queste sviluppati (Kennedy et al., 2014; Musango et al., 2017) (Tab. 2).

In un secondo livello di analisi, dedicato all'implementazione dello SUM che consentirebbe una maggiore acquisizione di dati ad alta risoluzione e l'“apertura” della *black box*, si rende necessaria la promozione di un approccio di tipo *bottom-up* (Musango et al., 2017), in cui la conoscenza delle dinamiche comportamentali sia centrale rispetto all'interpretazione dei flussi presenti in un dato contesto e in una dimensione spazio-temporale. Infine, il passaggio da un metabolismo di tipo lineare a uno circolare, richiederà una costante transizione tra le diverse scale di analisi del metabolismo urbano e, dunque, nella progettazione spaziale (Musango et al., 2017). In tal senso, si rende necessaria la possibilità di condurre l'analisi in modo da consentire il passaggio tra le diverse scale di definizione del metabolismo: macro-scala (nazione, regione, provincia, grandi agglomerati urbani); meso-scala (città); micro-scala (quartiere) (Huang et al., 2015). La natura globale dell'impatto ambientale e sociale delle attività umane implica, infatti, che le città siano considerate a più livelli di impatto, ciascuno dei quali deve necessariamente essere preso in considerazione nella valutazione del contributo dato dal sistema urbano in termini di sviluppo sostenibile (Musango et al., 2017). Un terzo livello di analisi, denominato “Modeling and

Simulation”, consentirebbe di localizzare flussi e stock attraverso software GIS e, contestualmente, la possibilità di predisporre un'infrastruttura ICT diffusa e capillare, ai fini della costruzione di modelli dinamici dei flussi. Il quarto (“Urban Design and City Planning”) e il quinto livello di analisi (“Architecture and Environmental Design”) coinvolgono in maniera più diretta il progetto architettonico alle diverse scale, ai fini della regolazione/ottimizzazione dei flussi e, dunque, del raggiungimento dell'obiettivo della neutralità climatica dell'ambiente costruito.

L'architettura può avere infatti un impatto diretto sulla gestione dei flussi, nel momento in cui il progetto degli edifici, delle infrastrutture e delle aree verdi urbane miri esplicitamente alla costruzione e alla gestione di un ambiente antropizzato *carbon neutral* (Commissione Europea, 2014) ed effettivamente monitorabile. Si pensi, alla scala micro-urbana, alla realizzazione di edifici a impatto zero o positivo, alla riqualificazione energetica del patrimonio esistente e alla possibilità di monitorarne i consumi attraverso un'infrastruttura digitale avanzata, in cui ogni edificio è nodo intermodale IoT, ovvero un data-center periferico distribuito (Rifkin, 2019) che consente di veicolare le informazioni, nell'ottica di una contrazione del fabbisogno energetico. Si pensi, ancora, alla necessità di promuovere pratiche per un corretto riutilizzo del *C&D waste*, a partire da componenti architettonici tracciabili e in grado di essere riutilizzati/ricicla-

the construction of buildings with zero or positive impact, of the energy requalification of the existing assets, and the possibility of monitoring their consumption through an advanced digital infrastructure, in which each building is an IoT intermodal node, that is a distributed peripheral data-center (Rifkin, 2019) that allows the transmission of information, to reduce energy needs. Think, again, of the need to promote practices for correct reuse of C&D waste, starting from traceable architectural components capable of being reused/recycled in upcycling processes in the context of Smart Waste Management (Dotoli and Epicoco, 2019), in order to reduce/annul the matter leaving the urban system. The impact of the architectural project on the contraction of flows is also indirect, promoting the seizure of pollutants from the atmosphere through the

preparation of a capillary green infrastructure, the redesign of road sections to encourage the use of soft mobility, and the promotion of practices linked to urban agriculture, together with the strategies to improve air quality through microclimate mitigation (Pollo et al., 2020). Consider, again, in the context of the built environment, the possibility of preparing, at a local level but with repercussions at the regional and global management level, spaces and equipment suitable for a correct management of municipal solid waste, including those from C&D, or, in the context of the built environment, the indirect consequences on the contraction of the consumption of resources deriving from the densification and optimization of urban morphology. Finally, «[...] Urban Metabolism studies can be used as tools in identifying environmental problems (and economic

costs) related to the growth of inputs (resources) and the management of outputs (primarily urban wastes) and in designing more efficient urban planning policies» (Niza et al., 2014).

Conclusions

The transdisciplinary approach of the technology of architecture constitutes both the basis for a reassessment of the building's material meaning and the re-configuration of the cultural processes that constitute its foundations (Faroldi, 2009). The attempt to overcome the specific boundaries of the individual investigation areas leads to questioning an approach that is still radically limited to the disciplinary sectors' specificities. In a context of correlation of knowledge, these specificities must come into play by integrating knowledge, which is configured as a complex collaborative condition (Losasso,

2013). This complexity, derived from the number and heterogeneity of the phenomena and languages that interact in a given process, confirms the impossibility of adopting a closed and monodisciplinary approach for solving a problem (Marzocca, 2014), in favor of a systemic one that integrates the requirements-performance aspects (Losasso, 2013). In this context, transdisciplinarity, i.e., overcoming artificial borders that separate disciplines are the key to a new approach aimed at implementing design strategies capable of responding in an increasingly targeted way to social and environmental challenges and economic issues posed by the sustainable project. The opening of this *limes* transforms the border's logic no longer into a place of exclusion but a threshold of fruitful opening to another knowledge (Leach, 1997). To overcome the barri-

ti in processi di *upcycling* nell'ambito dello *Smart Waste Management* (Dotoli and Epicoco, 2019), al fine di ridurre/annullare la materia in uscita dal sistema urbano. L'impatto del progetto architettonico sulla contrazione dei flussi è poi anche indiretto, promuovendo il sequestro di inquinanti dall'atmosfera attraverso la predisposizione di un'infrastruttura verde capillare, il ridisegno delle sezioni stradali per incentivare il ricorso alla mobilità dolce, la promozione delle pratiche legate all'agricoltura urbana, nonché degli interventi finalizzati al miglioramento della qualità dell'aria attraverso la mitigazione del microclima (Pollo *et al.*, 2020). Si pensi, ancora, nell'ambito dell'ambiente costruito, alla possibilità di predisporre, a livello locale, ma con riflessi a livello di gestione regionale e globale, spazi e attrezzature adeguati ad una corretta gestione dei rifiuti solidi urbani, compresi quelli da C&D, o, nell'ambito dell'ambiente costruito, alle conseguenze indirette sulla contrazione del consumo delle risorse derivanti dalla densificazione e dall'ottimizzazione della morfologia urbana. In definitiva, gli studi sullo UM possono essere intesi come strumento per identificare problemi ambientali (e costi economici) legati alla crescita degli input (risorse) e alla gestione degli output (rifiuti) e nella predisposizione di policy di urban planning più efficienti (Niza *et al.*, 2014).

Conclusioni

La lettura transdisciplinare della tecnologia, nel campo dell'architettura, costituisce sia la base per una rivalutazione dell'accezione materiale della costruzione, sia occasione di riconfigurazione dei processi culturali che ne costituiscono i fondamenti (Faroldi, 2009). Il tentativo di superare i confini specifici dei singoli ambiti di indagine porta quindi a mettere in discussione

ers between scientific research and the abductive character of architectural practice (Groat and Wang, 2013), UM can finally be understood as a border metaphor (Newell and Cousins, 2014) within which interaction between the scientific community, stakeholders, policymakers, designers is possible. We recall the reflection of Tomas Maldonado (1992), who stated that neither design nor innovation could ignore the medium of management, whereby management we mean the cognitive and operational behavior through which information is transformed into action. Therefore, it is here where UM and technology can play a role in facilitating elements of a vision of the city as a system with zero environmental impact, capable of regulating its flows smartly and circularly. The city as a system can only be designed through inter-scalar ap-

proaches, just as architecture cannot be thought of in separate episodes (the individual buildings), but as a continuous urban space, in which the presence of flows of matter, energy, and information they place the built environments in constant and direct contact with the public space. As Giancarlo De Carlo noted, the modern city project has ignored the space not occupied by buildings, as if to deny any value other than real estate (De Carlo, 2019). On the other hand, Jan Gehl emphasizes the importance of the space between buildings as a fundamental element of the city and its quality (Gehl, 2011). The interconnection between urban living spaces and dwellings, to which metabolic flows correspond, becomes a central theme for the project. UM's ecological vision poses to architecture the challenge of the need to adapt to the rapid and changing cycles of its

un approccio ancora radicalmente circoscritto alle specificità dei settori disciplinari. In un quadro di correlazione delle conoscenze, tali specificità devono entrare in gioco attraverso un'integrazione dei saperi, che si configura come una complessa condizione collaborativa (Losasso, 2013). Tale complessità, derivata dalla numerosità e dall'eterogeneità dei fenomeni e dei linguaggi che interagiscono in un determinato processo, conferma l'impossibilità di adottare un approccio chiuso e monodisciplinare per la risoluzione di un problema (Marzocca, 2014), a favore di uno sistemico che integri gli aspetti esigenziali-prestazionali (Losasso, 2013). In questo ambito, la transdisciplinarietà, ossia il superamento di frontiere, spesso artificiali, che separano le discipline, è la cifra di un approccio nuovo, volto all'attuazione di strategie progettuali in grado di rispondere in modo sempre più mirato alle sfide sociali, ambientali ed economiche poste dal progetto sostenibile. L'apertura di questo *limes* trasforma la logica del confine non più in un luogo di "esclusione", ma soglia di proficua apertura ad altre conoscenze (Leach, 1997).

Nell'ottica del superamento delle barriere tra ricerca scientifica e carattere essenzialmente abducente della prassi architettonica (Groat and Wang, 2013), lo UM può essere infine inteso come una metafora di confine (Newell and Cousins, 2014) all'interno della quale è possibile l'interazione tra comunità scientifica, stakeholder, policy maker, progettisti. Ricordiamo la riflessione di Tomas Maldonado (1992): «[...] né la progettazione né l'innovazione possono prescindere dal tramite della gestione [...], laddove per gestione si intende il comportamento conoscitivo ed operativo tramite il quale si trasforma l'informazione in azione». È qui, dunque, che lo UM e la tecnologia possono giocare un ruolo di elementi facilitatori di una visione della città come si-

metabolism, made governable by the spread of ICT on a local and global scale. The possible relationship between research on urban metabolism with urban design and architecture is placed in this perspective.

ACKNOWLEDGMENTS

The paper is the result of a common reflection of the authors. The paragraph "Introduction" is attributable to Riccardo Pollo; the paragraph "Urban Metabolism as a concept" to Matteo Giovanardi; the paragraph "Urban Metabolism as an interdisciplinary model" to Matteo Trane. The paragraphs "Urban Metabolism as a transdisciplinary tool for Architecture and Environmental Design" and "Conclusions" were written jointly.

NOTES

0. This article is part of the reflections developed by the R.U. of the Politecnico di Torino as part of the Research Project PRIN TECH-START key enabling TECHNOLOGIES and Smart environment in the Age of gReen economy, convergent innovations in the open space/building system for climate mitigation.

stema a impatto ambientale nullo, capace di regolare i suoi flussi in modo intelligente e circolare.

La città come sistema non può che essere progettata che attraverso approcci interscalari, così come l'architettura non può essere pensata per episodi separati (i singoli edifici), ma come spazio urbano continuo, in cui la presenza di flussi di materia, energia ed informazione pongono in costante e diretto contatto gli ambienti costruiti con lo spazio pubblico. Come notava Giancarlo De Carlo (2019), il progetto della città moderna ha ignorato lo spazio non occupato dagli edifici, quasi a negare qualsiasi valore che non sia quello immobiliare. Per altro verso, Jan Gehl (2011) sottolinea proprio l'importanza dello spazio tra gli edifici quale elemento fondamentale della città e della sua qualità. L'interconnessione tra gli spazi di vita urbani e di residenza, cui corrispondono flussi metabolici, diviene quindi un tema centrale per il progetto. La visione ecologica propria dello UM pone all'architettura la sfida della necessità di adattarsi ai cicli, rapidi e mutevoli del suo metabolismo, resi governabili dalla diffusione delle ICT a scala locale e globale. In questa prospettiva si colloca la possibile relazione delle ricerche sul metabolismo urbano con il progetto urbano e con l'architettura.

RICONOSCIMENTI

Il contributo è il risultato di una comune riflessione degli Autori. Il paragrafo "Introduzione" è da attribuire a Riccardo Pollo; il paragrafo "Urban Metabolism come concetto" a Matteo Giovanardi; il paragrafo "Urban Metabolism come modello interdisciplinare" a Matteo Trane. I paragrafi "Urban Metabolism come strumento transdisciplinare per la progettazione architettonica e ambientale" e "Conclusioni" sono stati scritti da tutti gli autori.

NOTE

0. Il presente contributo è parte delle riflessioni sviluppate dalla R.U. del Politecnico di Torino nell'ambito del Progetto di Ricerca PRIN TECH-START key enabling TECHNOLOGIES and Smart environment in the Age of green economy, convergent innovations in the open space/building system for climate mitigation.

REFERENCES

De Carlo, G. (2019), *La Città e il territorio*, Quodlibet Habitat, Macerata.
De Duve, C. (1995), *Vital Dust: Life as a Cosmic Imperative*, Basic Books, New York.
Faroldi, E. (2009), *Teoria e progetto: declinazioni e confronti tecnologici*, Altemandi, Torino.
Foster, B. (2011), *Marx Ecologiste*, Editions Amsterdam, Parigi.
Guallart, V. (2013), *The Self-Sufficient City: Internet has changed our lives, but it hasn't changed our cities, yet*, Actar, New York.

Gehl, J. (2011), *Life Between Buildings. Using public space*, Island Press, Washington.
Girardet, H. (1992), *Cities: New Directions for Sustainable Urban Living*, Gaia Books, Londra.
Groat, L.N. and Wang, D. (2013), *Architectural Research Methods*, 2nd ed., Wiley, Hoboken.
Leach N. (1997), *Rethinking architecture. A reader in cultural theory*, Routledge, London.
Maldonado, T. (1992), *La speranza progettuale. Ambiente e società*, 3rd ed., Piccola Biblioteca Einaudi, Torino.
Newman, P. and Jennings, I. (2008), *Cities as sustainable Ecosystems: principles and practices*, Island Press, Washington.
Nicoletti, M. (1985), *Lecosistema urbano*, Dedalo libri, Bari.
Ratti, C. (2013), *Smart city, smart citizen. Meet the media guru*, Egea, Milano.
Rifkin, J. (2019), *Un green new deal globale. Il crollo della civiltà dei combustibili fossili entro il 2028 e l'audace piano economico per salvare la terra*, Mondadori, Milano.
Losasso, M. (2013), "Progettazione ambientale e caratteri della disciplina architettonica", in Rigillo, M. (Ed.), *Oltre la siepe. Scenari di ricerca per il progetto ambientale*, Editoriale Scientifica, Napoli, pp. 237-241.
Perrotti, D. (2020), "Urban metabolism: old challenges, new frontiers and the research agenda ahead", in Verma, P., Singh, P., Singh, R. and Raghubanshi, A. (Eds.) *Urban Ecology: Emerging Patterns and Social-Ecological Systems*, Elsevier, Cambridge (USA), pp. 17-32.
Shahrokni, H. and Brandt, N. (2013), "Making Sense of Smart City Sensors," in Ellul, C., Zlatanova, S., Rumor, M. and Laurini, R., (Eds.), *Urban and Regional Data Management*, UDMS Annual 2013, London, pp. 117-127.
Trane, M. (2020), "Metodologie e strumenti per una valutazione dei flussi di materia e di energia alla scala micro-urbana", in Perriccioli, M., Rigillo, M., Russo Ermolli, S. and Tucci, F. (Eds.), *Design in the Digital Age - Technology, Nature, Culture*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna (RN), pp. 77-79.
Barles, S. (2009), "Society, energy and materials: The contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues", *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 53, n. 4, pp. 439-455.
Castán Broto, V., Allen, A.E. and Rapoport, E.R. (2012), "Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism", *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 16, n. 6, pp. 851-861.
Codoban, N. and Kennedy, C.A. (2008), "Metabolism of Neighborhoods", *Journal of Urban Planning and Development*, pp. 21-31.
Crutzen, P.J. (2002), "The 'anthropocene'", *Journal de Physique IV*, Vol. 12, n. 10, pp. 1-5.
Dijst, M. (2013), "Space-time integration in a dynamic urbanizing world: current status and future prospects in geography and GIScience", *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 103, n. 5, pp. 1058-1061.
Dijst, M., Worrel, E., Böcker, L., Brunner, P.H., Davoudi S., Geertman S., Harmsen R., Helbich M., Holtslag A.A.M., Kwan M.P., Lenz B., Lyons G., Mokhtarian P.L., Newman P., Perrels A., Pocas Ribeiro A., Carreon J.R., Thomson G., Urge-Vorsatz D. and Zeyringer M. (2018), "Exploring urban

- metabolism. Towards an interdisciplinary perspective”, *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 132, pp. 190-03.
- Domene Gomez, E. (2006), “La ecología política urbana: una disciplina emergente para el análisis del cambio socioambiental en entornos ciudadanos”, *Documents d’anàlisi geogràfica*, Vol. 48, pp. 167-178
- Dunn, B.C. and Steinemann, A. (1998), “Industrial ecology for sustainable communities”, *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 41, n. 6, pp. 661-672.
- Galan, J. and Perrotti, D. (2019), “Incorporating metabolic thinking into regional planning: The case of the Sierra Calderona strategic plan”, *Urban Planning*, Vol. 4, n. 1, pp. 152-171.
- Golubiewski, N. (2012), “Is there a Metabolism of an urban Ecosystem? An ecological critique”, *AMBIO a Journal of the Human Environment*, Vol. 41, n. 7, pp. 751-764.
- Haberl, H. (2001), “The energetic Metabolism of cities. Part II: empirical examples”, *Journal of industrial ecology*, Vol. 5, n. 2, pp. 71-88.
- Kellett, R., Christen, A., Coops, N. C., van der Laan, M., Crawford, B., Tooke, T.R. and Olchovski, I. (2013), “A systems approach to carbon cycling and emissions modeling at an urban neighborhood scale”, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 110, n. 1, pp. 48-58.
- Kennedy, C., Cuddihy, J. and Engel-Yan, J. (2007), “The changing metabolism of cities”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 11, n. 2, pp. 43-59.
- Kennedy, C., Stewart, I.D., Ibrahim, N., Facchini, A. and Mele, R. (2014), “Developing a multi-layered indicator set for urban metabolism studies in megacities”, *Ecological Indicators*, Vol. 47, pp. 7-15.
- Kennedy, C., Princetl, S. and Bunje, P. (2011), “The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design”, *Environmental Pollution*, Vol. 159, n. 8-9, pp. 1965-1973.
- Losasso, M. (2015), “Rigenerazione urbana: prospettive di innovazione”, *Techne, Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 10, Firenze University Press, pp. 4-5.
- March, H. and Ribera-Fumaz, R. (2016), “Smart contradictions: The politics of making Barcelona a Self-sufficient city”, *European Urban and Regional Studies*, Vol. 23, n. 4, pp. 816-830.
- Newell, J.P., and Cousins, J.J. (2014), “The boundaries of urban metabolism: Towards a political-industrial ecology”, *Progress in Human Geography*, Vol. 39, n. 6, pp. 1-27.
- Newell, J.P., Cousins, J. and Baka, J. (2017), “Political-industrial ecology: an introduction”, *Geoforum*, Vol. 85, pp. 319-323.
- Niza, S., Rosado, L. and Ferrão, P. (2014). “A material flow accounting case study of the Lisbon Metropolitan area using the urban metabolism analyst model”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 18, Issue 1, pp. 84-101.
- Pollo, R., Biolchini, E., Squillacioti, G. and Bono, R. (2020), “Designing the Healthy City - An Interdisciplinary Approach”, *Sustainable Mediterranean Construction*, Vol. 12, pp. 150-155.
- Princetl, S., Bunje, P. and Holmes, T. (2012), “An expanded urban metabolism method: Toward a system approach for assessing urban energy processes and causes”, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 107, n. 3, pp. 193-202.
- Rosado, L., Niza, S. and Ferrão, P. (2014) “A Material Flow Accounting Case Study of the Lisbon Metropolitan Area using the Urban Metabolism Analyst Model”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 18, pp. 84-91.
- Shahrokni, H., Lazarevic, D. and Brandt, N. (2015), “Smart Urban Metabolism: Towards a Real-Time Understanding of the Energy and Material Flows of a City and Its Citizens”, *Journal of Urban Technology*, Vol. 22, n. 1, pp. 65-86.
- Tucci, F., Santucci, D., Endres, E. and Hausladen, G. (2018), “Smart Urban District: Dynamic Energy Systems for synergic interactions between Building and City”, *Techne, Journal of Technology for Architecture and Environment*, Special Issue n. 1, pp. 92-102.
- Wolman, A. (1965), “The metabolism of cities”, *Scientific American*, Vol. 213, pp. 179-190.
- Zhang, Y., Yang, Z. and Yu, X. (2015), “Urban Metabolism: A Review of Current Knowledge and Directions for Future Study”, *Environmental Science and Technology*, Vol. 49, n. 19, pp. 11247-11263.
- Baltran, M.J., Kotsila, P., Garcia Lopez, G., Velegrakis, G. and Velicu, I. (2016), “Political Ecology for Civil Society”, available at: <http://cdca.it/archives/15955> (accessed 10 September 2020).
- European Commission (2014), “2030 Framework for climate and energy #EU2030. Outcome of the October 2014 European Council”, available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en (accessed 18 April 2020).
- Marzocca, F. (2014), “Il nuovo approccio scientifico verso la Transdisciplinarità”, available at: https://ciret-transdisciplinarity.org/biblio/biblio_pdf/eBook_Transdisciplinarita.pdf (accessed 12 August 2020).
- Nicolescu B. (2006), “Transdisciplinarity, past, present and future”, available at: http://basarab-nicolescu.fr/Docs_articles/transdisciplinarity-past-present-and-future.pdf (accessed 28 August 2020).
- Athanassiadis, A., Crawford, R. H. and Bouillard, P. (2015), “Overcoming the ‘black box’ approach of urban metabolism”, *Living and Learning: Research for a Better Built Environment, Proceedings of 49th International Conference of the Architectural Science Association, Melbourne, December 2-4*, pp. 547-56.
- Dotoli, M. and Epicoco, N. (2019), “Emerging Issues in Control, Decision, and ICT Approaches for Smart Waste Management”, *Proceedings of the 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Paris, April 23-26*, pp. 446-451.
- IRP (2020), *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*, United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Musango, J.K., Currie, P. and Robinson, B. (2017), *Urban metabolism for resource efficient cities: from theory to implementation*, UN Environment, Parigi.