

ECOLOPES, OLTRE L'INVERDIMENTO

Un approccio multi-specie per lo spazio urbano

ECOLOPES, BEYOND GREENING

A multi-species approach for urban design

Maria Canepa, Francesca Mosca, Shany Barath, Alexandre Changenet, Thomas E. Hauck, Ferdinand Ludwig, Marta Pianta, Enrica Roccotiello, Surayyn Uthaya Selvan, Verena Vogler, Katia Perini

ABSTRACT

Il fenomeno dell'urbanizzazione spesso impatta negativamente sugli ecosistemi, causando la perdita della biodiversità, incidendo negativamente sul cambiamento climatico e di conseguenza sulla salute e sul benessere dell'uomo. Per ridurre l'impatto ambientale degli edifici le attuali strategie di progettazione, sia a scala urbana che a quella dell'edificio, mirano all'integrazione di sistemi 'verdi', concentrandosi principalmente sui potenziali benefici per l'uomo. Altre specie, come gli animali e i microorganismi, o altri fattori, come lo sviluppo autonomo e dinamico delle comunità vegetali, non sono generalmente presi in considerazione nel processo di pianificazione, sebbene possano svolgere un ruolo centrale nell'aumento della biodiversità. Questo articolo descrive come il progetto ECOLOPES supera questa visione strettamente antropocentrica, sviluppando un approccio progettuale sistemico, in una prospettiva multi-specie per creare ecosistemi urbani rigenerativi.

Urbanisation, due to its contribution to climate change and loss of biodiversity, damages ecosystems, thereby affecting human health and well-being. Current urban and architectural design approaches, that aim to reduce the environmental impact of buildings, include, among other strategies, the integration of greening systems but focusing primarily on the potential benefits for humans. Other organisms such as animals and microbiota and the self-dynamic development of plant communities, which could play a central role in increasing biodiversity, are not considered in the planning process. This paper describes how the ECOLOPES project overcomes this strictly anthropocentric view, developing a systematic design approach for architecture in a multi-species perspective to create regenerative urban ecosystems.

KEYWORDS

design multi-specie, approccio multicriteria, convivenza, approccio progettuale sistemico, ecosistema

multi-species design, multi-criteria approach, co-habitation, systematic design approach, design for ecosystems

Maria Canepa, Assistant Professor, University of Genoa (Italy).

Francesca Mosca, PhD Candidate, University of Genoa (Italy).

Shany Barath, Assistant Professor, Technion Israel Institute of Technology (Israel).

Alexandre Changenet, Researcher Fellow, University of Genoa (Italy).

Thomas E. Hauck, Professor, Technical University of Vienna (Austria).

Ferdinand Ludwig, Professor, Technical University of Munich (Germany).

Enrica Roccotiello, Assistant Professor, University of Genoa (Italy).

Marta Pianta, PhD Candidate, University of Genoa (Italy).

Surayyn Uthaya Selvan, PhD Candidate, Technion-Israel Institute of Technology (Israel).

Verena Vogler, Researcher at R&D McNeel Europe (Spain).

Katia Perini, Assistant Professor, University of Genoa (Italy).

L'aumento della densità urbana e delle emissioni di gas climalteranti di natura antropica stanno impattando negativamente e in modo significativo sulla qualità ambientale delle città (IPCC, 2022) che sono aree densamente popolate, caratterizzate da un'elevata pressione antropica, con spazi verdi limitati e che presentano una frammentazione degli habitat spesso con uno scarso livello di connettività, e conseguente perdita di biodiversità locale (Aronson et alii, 2017; Lepczyk et alii, 2017). La varietà dei servizi ecosistemici (cioè i benefici che le persone traggono dagli ecosistemi) in una città dipende dalla dimensione, dal numero e dalla qualità dei suoi spazi verdi urbani (McPhearson et alii, 2015), i quali svolgono anche un ruolo fondamentale per la salute e il benessere dell'uomo (Barton and Pretty 2010). Svariate ricerche hanno dimostrato che le attuali strategie di pianificazione (e governance) urbane raramente prendono in considerazione gli ecosistemi urbani e il loro valore nel supportare la biodiversità locale in termini di qualità, quantità e densità (McPhearson et alii, 2015; Fineschi and Loreto, 2020). Inoltre la maggior parte delle aree urbane deve affrontare importanti minacce in relazione alla scarsa qualità dell'aria (EEA, 2020), all'effetto isola di calore (Singh, Singh and Mall, 2020) e, in generale, al deterioramento delle risorse idriche e degli ecosistemi (Rees, 1997). Per limitare questi problemi negli ultimi decenni è stato introdotto il concetto di 'infrastruttura verde', che gradualmente cresce e reintroduce la vegetazione nell'ambiente costruito. Questa strategia progettuale ha come obiettivo quello di porre il 'verde' sul 'grigio', combinando la vegetazione con l'ambiente costruito, e di mitigare gli effetti dell'urbanizzazione (Naylor et alii, 2017; Ambasz in Pisani, 2006).

Diversi approcci, che possono comprendere anche l'introduzione di soluzioni basate sulla natura (IUCN, 2016), si concentrano principalmente sull'espletamento delle funzioni ottimali per gli esseri umani (ad esempio, comfort termico, benessere psicologico, ecc.), ignorando le funzioni ecologiche (intese come un insieme di ruoli ecologici svolti da ciascuna specie nel proprio ecosistema) delle altre componenti biotiche (Fineschi and Loreto, 2010), limitandosi così a seguire un approccio progettuale esclusivamente antropocentrico. È quindi improbabile che offrano soluzioni innovative che rispondano ai bisogni delle specie non umane che vivono negli ambienti urbani (Fig. 1). Il presente paper ha l'obiettivo di delineare come il Progetto Horizon 2020 FET (Future and Emerging Technologies) Open project ECOLOPES (Ecological building envelope LOPES) miri a sviluppare un approccio innovativo per la progettazione di un involucro edilizio avanzato in grado di supportare una rigenerazione urbana inclusiva, attraverso una modellazione dell'ambiente urbano e nuove informazioni disponibili per la progettazione, al fine di superare l'attuale approccio antropocentrico che si focalizza principalmente solo sul ruolo svolto dalla vegetazione. Per raggiungere gli obiettivi del progetto, il Partenariato di ECOLOPES¹ è rappresentato da ricercatori ed esperti in diversi campi: architettura, ecologia e informatica (Fig. 2).

Stato dell'arte | L'uso del verde negli spazi urbani ha sempre avuto molteplici funzioni: simbolica, estetica, oppure di fornitura di servizi ecosistemici; ad esempio, attraverso il suo impiego si può re-

golare il microclima o fornire spazi produttivi come orti e frutteti (Canepa, 2018). Il verde urbano rappresenta inoltre un'opportunità per immagazzinare anidride carbonica, ma allo stesso tempo la piantumazione richiede uno spazio che non è sempre disponibile in un tessuto urbano quasi completamente saturo. Le attuali strategie di inverdimento degli edifici si concentrano principalmente su soluzioni che migliorano le prestazioni e il comfort per l'uomo, utilizzando quantità relativamente piccole di suolo e una selezione limitata di specie vegetali (Fernández-Cañero, Pérez Urrestarazu and Perini, 2018; Pérez and Coma, 2018), molto spesso senza considerare la presenza di altri organismi viventi, come gli animali. Inoltre, nell'approccio progettuale non viene considerata la presenza di comunità biotiche non umane, che co-evolvono e crescono con l'involucro edilizio: vengono così impediti o fortemente limitati il susseguirsi delle specie vegetali e il relativo sviluppo di altre comunità biotiche mentre il verde viene mantenuto in condizioni statiche innaturali che richiedono elevati costi di manutenzione e contrastano lo sviluppo della biodiversità locale (Schrieke et alii, 2021).

Gli attuali approcci alla pianificazione, alla progettazione urbana e all'architettura raramente considerano l'equilibrio ecologico, la vegetazione spontanea e la fauna selvatica e, anche se lo fanno, li limitano e ne regolano lo sviluppo. Questo è facilmente comprensibile dopo uno sguardo alla moderna pianificazione urbana che nasce per definire razionalmente la città moderna sulla base delle conoscenze scientifiche e del progresso tecnologico. L'obiettivo è sempre stato quello di creare spazi civili di dominio umano sulla natura, dominando le forze e dalle contingenze naturali. L'idea tradizionale di una dicotomia tra natura e città, così come tra natura selvaggia e civiltà, porta a differenziazioni conflittuali tra gli spazi (Philo and Wilbert, 2000; Urbanik, 2012) quando, ad esempio, gli spazi che gli animali occupano e utilizzano (beastly places)² sono esclusivamente spazi concessi dall'uomo (animal spaces).

Un tipico esempio di processo progettuale in ambito architettonico è rappresentato nella Figura 3. Il committente, in quanto rappresentante della specie umana (ad esempio l'utente futuro) formula le richieste progettuali dalla sua prospettiva antropocentrica, definendo, ad esempio, le superfici, le funzioni, ecc. Successivamente l'architetto sintetizza gli obiettivi progettuali e formula le prime bozze da proporre al committente; solo nelle ulteriori fasi di progettazione le consulenze, tipicamente legate agli aspetti strutturali o impiantistici, vengono integrate nel progetto. Quando necessario, la proposta progettuale viene modificata in base alle consulenze ricevute.

Se facciamo riferimento alle infrastrutture verdi applicate al progetto architettonico, questa è la fase in cui entrano in gioco i consulenti esperti del verde; nel caso della valorizzazione della biodiversità occorrerà consultare anche degli ecologi. Tuttavia, nel processo di progettazione 'tradizionale' presentato, gli aspetti riguardanti l'inverdimento e la biodiversità sono spesso un'aggiunta secondaria alla progettazione esistente, piuttosto che una parte intrinseca del processo. Pertanto, per progettare efficacemente degli ecosistemi urbani rigenerativi, è necessario considerare tutte le specie viventi: un tale approccio progettuale multi-specie (l'approccio di ECOLOPES) è quindi in

contrasto con la tradizionale prospettiva antropocentrica che si può osservare oggi nella progettazione sia a scala urbana che edilizia.

Obiettivi | ECOLOPES propone un cambiamento radicale per la progettazione della città e degli edifici: invece di ridurre l'impatto negativo dell'urbanizzazione sulla natura, l'approccio viene ribaltato, applicando all'urbanizzazione i principi regolativi che esistono in natura. L'obiettivo è quello di concentrarsi in egual misura su esseri umani, piante, animali e organismi microbici. L'approccio di ECOLOPES si concentra sull'involucro dell'edificio, elemento strutturale che separa l'interno dall'esterno, che può svilupparsi sia in orizzontale che verticale, per riformulare e superare l'idea di tetto verde o di facciata verde, e le loro relative tecnologie. Inoltre, progettare un involucro ecologico è più completo che progettare tetti o facciate verdi, perché un involucro ecologico è inteso come uno spazio tridimensionale, caratterizzato da una maggiore quantità di suolo, in grado di ospitare molte più specie viventi rispetto ai tradizionali sistemi di inverdimento (Figg. 4-8).

Gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile 11, 13 e 15 delle Nazioni Unite si concentrano sulle città sostenibili, sulla lotta ai cambiamenti climatici e sul ripristino degli ecosistemi, evidenziando l'importanza dell'integrazione e della conservazione della componente biotica nell'ambiente urbano (UN, 2015; Fig. 9). In questo contesto gli involucri edilizi offrono un approccio efficace alla rigenerazione degli ecosistemi urbani, anche in un ambiente urbano molto denso, per questo motivo un 'ecolope'³ è un involucro edilizio pensato e progettato come uno spazio abitativo per specie viventi. Prevedendo un approccio olistico il concetto va oltre la mera fornitura di servizi ecosistemici (Figg. 10, 11) che sono raggruppabili in quattro categorie principali: approvvigionamento, regolazione, valori culturali e servizi a supporto degli esseri umani (MEA 2005), mentre l'approccio ECOLOPES include in questa prospettiva animali, specie vegetali e microbiche, apportando benefici a tutti i suoi stakeholders.

Metodologia | Per raggiungere l'approccio progettuale non antropocentrico descritto, il progetto è stato strutturato in cinque fasi di lavoro principali che prevedono, in periodo di quattro anni, lo sviluppo del nuovo processo progettuale, supportato da uno strumento di progettazione dedicato. Al momento il progetto è al termine del primo anno di attività di ricerca e i primi risultati sono in fase di validazione. Le fasi della ricerca sono le seguenti: architettura della piattaforma ECOLOPES, acquisizione dati e modellazione delle informazioni, modello voxel e computazionale ECOLOPES, simulazioni e analisi computazionali, validazione generale (Fig. 12). Per affrontare l'approccio ECOLOPES, è stato definito un nuovo workflow per rappresentare l'approccio non antropocentrico e multi-specie durante tutte le fasi di progettazione che a differenza di quello 'tradizionale' prevede il coinvolgimento di tutti gli stakeholders, anche quelli non umani (piante, animali e microbiota; Fig. 13).

Gli stakeholders non umani e i loro bisogni sono rappresentati dagli ecologi per sigillarne adeguatamente il ruolo paritario rispetto alle parti umane interessate e considerare anch'essi 'clienti' di Ecologes: questo per esprimere come i biso-

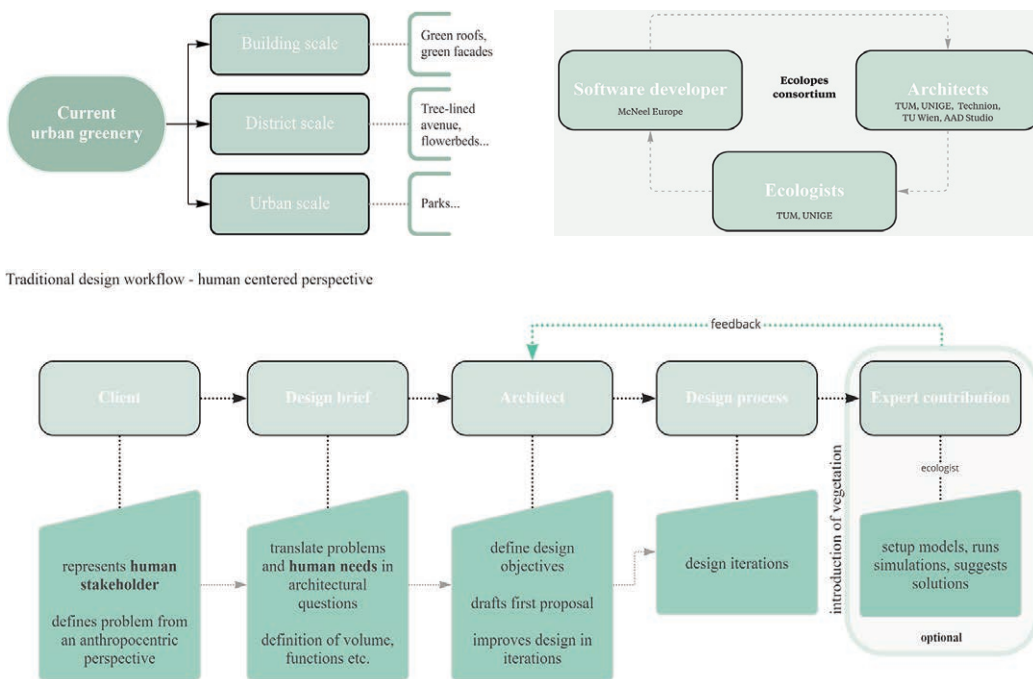


Fig. 1 | Current urban greenery (credit: F. Mosca and M. Canepa, 2022).

Fig. 2 | ECOLOPES Consortium members (credit: F. Mosca and M. Canepa, 2022).

Fig. 3 | Traditional design workflow with a human-centred perspective (credit: F. Mosca and F. Ludwig, 2022).

gni degli stakeholder non umani siano considerati importanti tanto quanto quelli degli stakeholder umani. Come i bisogni umani quelli ecologici vengono tradotti in una commessa progettuale per consentire al progettista di definire gli obiettivi generali di progettazione implementando requisiti e caratteristiche delle parti interessate non umane all'interno del flusso di lavoro di progettazione: ecologi e pianificatori specializzati nel verde forniscono dati e li rendono disponibili in un processo di progettazione basato su di essi. Il nuovo processo progettuale per un approccio multi-specie offre maggiori possibilità di ottenere soluzioni multi-specie autentiche poiché i loro requisiti sono diventati una parte intrinseca del progetto (Fig. 14).

Tale approccio multi-specie è decisamente più complesso rispetto a quello tradizionale e comporta una varietà di compromessi e decisioni che non possono essere risolti con strumenti di pianificazione consolidati. Per gestire questo livello di complessità si sono rivelate efficaci le strategie decisionali multi-criteri, poiché grazie alla loro flessibilità metodologica permettono di considerare dati multidisciplinari e qualitativi oltre che quantitativi (Gnanasekaran and Venkatachalam, 2019; Mela, Tiainen and Heinisuo, 2012) provenienti dalle diverse parti interessate. Gli attuali sistemi tradizionali di supporto alle decisioni nel settore delle costruzioni incoraggiano il processo decisionale interdisciplinare (Tan et alii, 2021; Guarini, Battisti and Chiovitti, 2018) facilitando anche la selezione di materiali sostenibili o le strategie di progettazione, sebbene spesso sia rivolto solo a obiettivi di natura antropocentrica come le prestazioni dell'edificio in termini di consumo energetico o costo del ciclo di vita (Moghtadernejad, Chouinard and Mirza, 2020; Mathiyazhagan, Gnanavelbabu and Lokesh Prabburaj, 2019). Quando le comunità non umane sono considerate come parti interessate di pari importanza, il processo di progettazione viene ulteriormente arricchito, riducendo la propensio-

ne verso obiettivi esclusivamente incentrati sull'uomo, per supportare un processo decisionale più sostenibile.

Per raggiungere questo obiettivo, all'interno dell'approccio ECOLOPES, un ruolo centrale sarà svolto dalle simulazioni attraverso un Modello Informativo che integra le conoscenze ecologiche e architettoniche e le rende disponibili per la progettazione. Questo modello si basa in parte sull'accoppiamento di diversi modelli ecologici (suolo-microbiota, piante e animali), che confluiscono in un 'super' modello ecologico. Il modello computazionale simula la dinamica temporale e spaziale di animali, piante e sviluppo del suolo in funzione di condizioni abiotiche; tali condizioni possono riguardare i tipi di suolo (a seconda della profondità, del contenuto idrico) o la disponibilità di luce per le piante o di cibo per gli animali; le simulazioni prendono in considerazione anche le interazioni biotiche come la gestione umana, la predazione degli animali, la dispersione delle piante o l'approvvigionamento dell'habitat.

Il risultato del modello è una previsione del tipo di suolo, della quantità di piante e di aree 'residenziali' per gli animali nel tempo e nello spazio. Le interazioni con i parametri architettonici saranno ulteriormente accoppiate a questo 'super modello' attraverso le conoscenze acquisite da una serie di esperimenti computazionali e da una revisione della letteratura. Tali simulazioni e le informazioni che ne conseguono aiutano a identificare le relazioni tra architettura ed ecologia e il modo in cui si influenzano a vicenda, per ottenere una progettazione più efficace delle 'infrastrutture verdi' in ambito urbano, concretizzandosi in diverse configurazioni di 'ecolope' (come l'inclinazione di una facciata possa influire sulla connettività degli animali o il posizionamento di terreno per coltivare piante).

Pertanto, integrando queste informazioni in un sistema CAD (Computer-Aided Design), vi è la possibilità di costruire un adeguato sistema di racco-

mandazioni per la progettazione che consenta lo sviluppo iterativo della progettazione con strategie decisionali multi-criteri. Questo nuovo approccio arricchisce il workflow progettuale di ECOLOPES con informazioni, in modo da prendere decisioni più precise a favore di tutte le parti interessate (uomo, piante, animali, microbi) e per una progettazione più efficace delle 'infrastrutture verdi' negli ambienti urbani.

Il processo ECOLOPES MCDM (Multi-Criteria Decision Making) si basa sia sulla strategia MADM (Multi-attribute decision-making) che sulla MODM (Multi-Objective Decision-Making)⁴ per generare un flusso di lavoro che sia in grado di integrare informazioni di tipo multidisciplinare nel campo dell'ecologia e dell'architettura. A tal proposito i KPIs (Key Performance Indicators) rappresentano i criteri di valutazione degli obiettivi, i bisogni dei vari stakeholder e le performance ambientali degli edifici. Rispetto alle strategie di ottimizzazione (MOO – Multi-Objective Optimization), le alternative progettuali saranno valutate attraverso le soglie generate dai valori KPIs ottimizzati per garantire che i progetti rientrino nell'intervallo delle soluzioni accettabili. Inoltre, l'integrazione della MADM consentirà di assegnare dei pesi ai KPIs, derivati da conoscenze di esperti o dalla letteratura. Non solo questa strategia consentirà di ordinare e classificare le alternative di progettazione generate, ma fornirà anche l'opportunità di ridefinire le gerarchie e le priorità dei KPIs che sono derivate dagli obiettivi di progettazione, agevolando anche la valutazione dei KPIs su diversi insiemi di condizioni architettoniche ed ecologiche.

Per consentire un tale approccio, diversi dati, modelli e applicazioni devono essere concatenati in modo tale che solo i dati rilevanti siano resi disponibili all'utente (progettista, ecologista, urbanista che si interfaccia con un sistema CAD, ecc.), pertanto è necessario elaborare un flusso di lavoro che rifletta in primo luogo il modo in cui l'utente si interfaccerebbe con un tale sistema e, in secondo luogo, come i componenti principali del sistema (modello informativo e ambiente di simulazione computazionale) possano collaborare per fornire le informazioni richieste per lo sviluppo di un sistema di supporto decisionale multicriteri per il progetto.

Ulteriori risultati e coinvolgimento degli stakeholders | La ECOLOPES Design Platform integrerà tutte le componenti (Modello Informativo, Ambiente di Simulazione) e gli strumenti di progettazione accessibili e personalizzati (realizzati come plug-in in un'applicazione CAD standard in Rhino e Grasshopper) grazie ai quali architetti e progettisti potranno interfacciarsi con il nuovo approccio. Lo sviluppo di tale piattaforma includerà un'indagine per esplorare come i dati possano essere classificati, collegati e rappresentati, in primo luogo come un modello di dati combinato spazio-temporale e poi come un modello 3D di voxel in CAD. L'obiettivo principale di tale piattaforma computazionale è fornire supporto nel processo decisionale e coordinamento sistemico delle azioni di pianificazione in contesti multi-specie.

I principali gruppi target in termini di applicazione pratica della tecnologia proposta per la progettazione (modello computazionale) saranno architetti, ingegneri e studenti, insieme alle loro organizzazioni professionali, agli studi di architettura e ingegneria e a tutti i professionisti del settore edi-

le. Gli architetti del paesaggio, gli urbanisti e gli ecologi, ma anche le Amministrazioni locali, saranno informati sulla potenziale applicazione dello strumento di progettazione ECOLOPES, per migliorare le strategie di governance; ECOLOPES sarà importante anche per gli ecologi e le ONG a tema ambientale. Infine, i risultati del progetto potrebbero essere diffusi tra i medici e i professionisti nel settore della salute, dato l'impatto previsto sul benessere degli abitanti degli edifici e sul miglioramento della salute umana.

Conclusioni | In sintesi l'approccio progettuale di ECOLOPES consente agli architetti di prendere potenzialmente in considerazione diverse parti interessate, tra cui flora e fauna, e definire le loro esigenze specifiche, senza tralasciare vincoli normativi e requisiti tecnici per la sua attuazione. Rispetto al tema del 'verde', l'avanzamento di ECOLOPES rispetto agli approcci attuali è l'introduzione delle competenze ecologiche (es. approccio ecosistemico, relazioni multi-trofiche) sin dalle prime fasi del progetto (es. definizione della commessa progettuale da un punto di vista non umano). Il progetto ECOLOPES mette in risalto l'importanza di un approccio interdisciplinare e della presenza degli ecologi nell'intero processo di progettazione, sfruttando le loro conoscenze specialistiche non solo in fasi specifiche (Fig. 15), ma durante tutte le fasi progettuali del processo.

Le informazioni acquisite dai modelli ecologici costituiranno una base di conoscenza disponibile per la progettazione in ambiente CAD, che costituirà l'ambiente di interfaccia gestito dal progettista. La selezione dei KPIs, attraverso la procedura di ottimizzazione precedentemente descritta, renderà il processo decisionale più efficace. Considerando l'attuale crisi ambientale e la sfida degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, la scelta di soluzioni mirate e multi-specie potrebbe permettere il superamento dell'attuale paradigma antropocentrico che guida la progettazione urbana. Tuttavia, in questa proposta si possono individuare alcuni limiti e alcune sfide: in primo luogo, l'approccio della ricerca è molto complesso a causa dei molteplici sotto-metodi e tecniche di simulazione che devono essere sviluppati e fusi in un unico sistema che possa potenzialmente soddisfare ciò che è stato promesso o immaginato in fase di stesura del progetto. Potrebbe non essere possibile rendere l'intero processo di modellazione e condivisione delle informazioni completamente automatizzato: parti di esso rimarranno probabilmente operazioni da svolgere in modalità manuale.

La seconda sfida della ricerca riguarda i processi computazionali all'interno del progetto. Considerando i possibili limiti in relazione alle simulazioni dei modelli, esse possono essere fortemente influenzate dal numero e dalle dimensioni dei vari dataset, dalla potenza di elaborazione richiesta per il calcolo dei modelli, dalla geometria, nonché dagli scopi di analisi e di simulazione. Tale sfida può essere affrontata unificando i gruppi di dati e i formati dei file, semplificandoli tramite il cloud computing che consente di usufruire, tramite un server remoto, di risorse software e hardware. La terza sfida è relativa all'utente finale: il designer che si interfacerà con la piattaforma ECOLOPES attraverso il software (o altri strumenti di front-end). Il progettista sarà quello che fornirà il riscontro più cruciale per convalidare l'approccio generale. Il suo

feedback sarà necessario per capire se il sistema immaginato soddisfa il suo scopo, supportando la progettazione di ambienti urbani che promuovano effettivamente ecosistemi rigenerativi all'interno delle nostre città future.

Nelle prossime fasi della ricerca (i primi risultati sono in fase di validazione), una serie di esperimenti computazionali semplificati contribuiranno a testare le diverse componenti di ECOLOPES e a costruire conoscenze in grado di fornire feedback al sistema (ad esempio, relazioni tra geometria dell'edificio e caratteristiche ecologiche). Infine il progetto avvierà anche un processo di validazione generale dell'approccio utilizzando prototipi pilota collocati nel mondo reale (building blocks) che dimostrerà l'efficacia dell'approccio progettuale multi-specie. Tali prototipi saranno collocati in quattro diverse città, in diversi Paesi, per determinare se alcune delle soluzioni progettuali selezionate rappresentano effettivamente un approccio multi-specie come simulato dai modelli o se l'approccio deve essere ulteriormente ottimizzato.

Densification and anthropogenic emission are significantly degrading urban environments and urban ecosystems (IPCC, 2022). Cities are densely populated areas, characterised by a high level of anthropic pressure, limited green spaces, habitat fragmentation with a poor level of connectivity and local biodiversity loss (Aronson et alii, 2017; Lepczyk et alii, 2017). The whole diversity of ecosystem services (i.e., the benefits people derive from ecosystems) in a city depends on the dimension, number, and quality of its urban green spaces (McPhearson et alii, 2015), which also play a pivotal role in human health and well-being (Barton and Pretty 2010). Research has shown that current urban planning (and governance) strategies rarely consider urban ecosystems and their value in supporting local biodiversity, in terms of quality, quantity and density (McPhearson et alii, 2015; Fineschi and Loreto, 2020). Additionally, most urban areas face important threats in relation to poor air quality (EEA, 2020), heat-island effect (Singh, Singh and Mall, 2020) and, overall, the deterioration of water resources and ecosystems (Rees, 1997). To limit these problems in recent decades, the concept of 'green infrastructure' has been introduced, gradually growing and reintroducing vegetation into the built environment. This design strategy attempts to put green over grey, combining vegetation with the built environment, trying to mitigate urbanization effects (Naylor et alii, 2017; Ambasz in Pisani, 2006).

Several approaches, which may include the introduction of nature-based solutions (IUCN, 2016), are primarily focused on fulfilling functions for humans (e.g., thermal comfort, psychological well-being, etc.), ignoring ecological functions (a set of ecological roles performed by each species in their ecosystem) of the other biotic components (Fineschi and Loreto, 2010), hence continuing to follow an anthropocentric design approach. They are therefore unlikely to offer breakthrough solutions that would address the needs of non-human species living in urban environments (Fig. 1). This paper outlines how the Horizon 2020 FET (Future and Emerging Technologies) Open project ECOLOPES (ECOLOGical building enveLOPES) aims to develop a pioneering design approach for an ar-

chitecture that supports an inclusive regeneration of urban ecosystems, including modelling the urban environment and making this information available for design, moving forward from current anthropocentric approaches which focus mainly on the role played by vegetation. To fulfil the project objectives, the ECOLOPES Consortium¹ is represented by researchers and experts from different fields: architecture, ecology, and computer science (Fig. 2).

State of the art | Greenery in urban spaces has multiple functions: symbolic, aesthetic, ecosystem services provision – e.g., for regulating the microclimate or providing productive space with vegetable gardens and orchards (Canepa, 2018). Urban greenery is an opportunity for storing carbon dioxide, but at the same time, planting requires a space that is not always available in an almost fully occupied urban fabric. The currently prevailing paradigm for green buildings focuses mainly on solutions that improve performance and comfort for humans, using relatively small amounts of soil and a limited selection of plant species (Fernández-Ca-

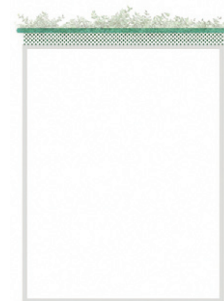


Fig. 4 | Green roof scheme (credit: F. Mosca and M. Canepa, 2022).

Fig. 5 | Ewha Woman's University in Seoul designed by Dominique Perrault (credit: A. Morin, 2008; source: archdaily.com).

Fig. 6 | Green façade scheme (credit: F. Mosca and M. Canepa, 2022).

ñero, Pérez Urrestarazu and Perini, 2018; Pérez and Coma, 2018), very often without considering the presence of other organisms such as animals. In addition, the possibility of non-human biotic communities, co-evolving and growing with the building envelope, is not considered in the design approach. The succession of vegetation and the associated development of other biotic communities is thus prevented or severely restricted. The greenery is therefore maintained in unnatural static conditions which require high maintenance costs and counteracts the development of local biodiversity (Schrieke et alii, 2021).

Current approaches in urban planning, urban design, and architecture rarely consider ecological balance, spontaneous vegetation and wildlife and even if they do so, they limit and regulate them. This is easily understood after a look at the emergence of modern urban planning. The discipline was set up to rationally produce the modern city based on scientific knowledge and technological progress. The goal was to create civilised spaces of human mastery over nature, thereby gaining freedom from the forces and contingencies of nature. The traditional idea of a dichotomy between nature and city, as well as wilderness and civilisation, lead to conflictual differentiations between the spaces (Philo and Wilbert, 2000; Urbanik, 2012) where, for example, animals and the spaces that they occupy,

and use (beastly places)² are granted by humans (animal spaces).

An example of a workflow for the current design approach in architecture is shown in Figure 3. The client, as a representative of human stakeholders (i.e., the future user) formulates the design brief from a human perspective, for instance, by defining the necessary floor space, functions, etc. In the following steps, the architect derives the design objectives and sketches as initial design proposals for the client. In the further design process, expert knowledge from external consultants, typically structural or climate engineers, is incorporated into the design. If necessary, the design proposal is adjusted based on the feedback from the consultant.

In the case of green architecture, this is where very often green consultants such as experts in building greening come into play. In the case of e.g., biodiversity enhancement, ecologists are also consulted at this point. However, in the presented 'traditional' design workflow, aspects regarding greening and biodiversity are rather an addition to the existing design, than an intrinsic and equal part of the design process. Thus, for a successful design of regenerative urban ecosystems all species need to be considered. Such a multi-species design approach (the ECOLOPES approach) stands in contrast to the traditional anthropocentric perspective that can be observed in architecture and urban planning today.

Research Objectives | ECOLOPES proposes a radical change in city and building design: instead of minimizing the negative impact of urbanisation on nature, the approach is overturned, applying the regulatory principles that occur in nature to urbanisation. It focuses equally on humans, plants, animals, and associated organisms such as microbiota. The ECOLOPES approach refers to the envelope, a structural element that separates the indoor from the outdoor, and that is developed both in horizontal and vertical dimensions, to reformulate and overcome the idea of a green roof or a green façade, and their 'traditional' envelope technologies and performances. Furthermore, designing an ecological envelope is more comprehensive than designing green roofs or facades, because an ecological envelope is understood as a three-dimensional space, and characterised by an increased amount of soil that would host much more living species than in traditional greening systems (Figg. 4-8).

The United Nations SDGs (Sustainable Development Goals) 11, 13, and 15 focus on sustainable cities, climate change management and protection and restore ecosystems and highlight the importance of integration and conservation of biotic component in the urban environment (UN, 2015; Fig. 9). In this context, building envelopes offer an effective approach to the regeneration of urban ecosystems, even in a very dense urban environment. For this reason, an ecolope³ is a building envelope designed as a living space for multi-species. As a holistic approach, the concept goes beyond the provision of ecosystem services (Figg. 10, 11). Ecosystem services are initially divided into the four main categories: provisioning, regulating, cultural and support services for a human-centred perspective (MEA 2005), while the ECOLOPES approach also includes the animal, and plant-centred perspective, providing benefits for all stakeholders.

Methodology | To achieve the described non-anthropocentric design approach, the project has been structured into five main work packages which will provide, in four years, the development of the new design workflow supported by the dedicated design tool. At the moment, the project is at the end of the first year of research activity and initial results are under validation. The work packages are the following: ECOLOPES platform architecture; Data acquisition and information modelling; ECOLOPES voxel and computational model; Computational simulations and analysis, and Overall validation (Fig. 12). To tackle the ECOLOPES approach, a novel workflow is defined to represent the non-anthropocentric and multi-species approach throughout all design phases. The main difference from the traditional workflow is that the entire process is not initiated solely by the human stakeholders, but also by non-human stakeholders (plants, animals, and microbiota; Fig. 13).

Non-human stakeholders and their needs are represented by ecologists. To adequately represent their role as equivalent to human stakeholders they are referred to as Ecolopes clients. This is to express that the needs of non-human stakeholders are taken as seriously as those of human stakeholders. Like human requirements, the ecological needs are translated into a design brief to enable the designer to define the overall design objectives. Regarding the implementation of the requirements of non-human stakeholders within the design workflow, ecologists and green specialist planners provide expert data and make it available in a data-driven design process. The new workflow for a multi-species approach in urban design fosters higher possibilities of achieving genuine multi-species solutions as their requirements have become an intrinsic part of the design (Fig. 14).

This multi-species approach is far more complex, compared to the traditional approach, and involves a variety of trade-offs and decisions that cannot be resolved with established planning tools. To manage this level of complexity multi-criteria decision-making strategies have proven to be effective due to the methodological flexibility in considering data that is multi-disciplinary and qualitative as well as quantitative (Gnanasekaran and Venkatachalam, 2019; Mela, Tiainen and Heinisuo, 2012). This allows the requirements of multiple stakeholders to be considered in new design decision-making processes systematically and objectively. Current traditional decision support systems in AEC (Architecture, Engineering, and Construction) industry encourage cross-disciplinary decision-making mainly within the AEC discipline (Tan et alii, 2021; Guarini, Battisti and Chiovitti, 2018). The decision-making process also facilitates the selection of sustainable materials or design strategies but is often aimed only at human-centric objectives such as building performance in terms of energy consumption and life-cycle costs (Moghtadernejad, Chouinard and Mirza, 2020; Mathiyazhagan, Gnanavelbabu and Lokesh Prabhuraj, 2019). When non-human communities are considered and prioritised as key stakeholders, the design process is further enriched by reducing the bias towards human-centred objectives to support sustainable decision-making.

To achieve this goal within the ECOLOPES approach, a central role will be played by an Information Model that integrates ecological and ar-

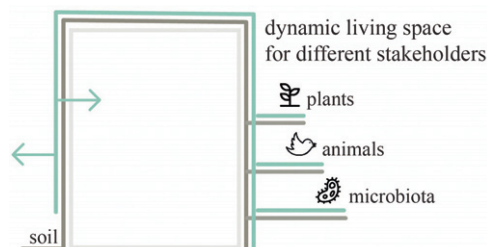


Fig. 7 | Indirect greening system in Dordrecht designed by EGM Architecten (credit: K. Perini, 2010).

Fig. 8 | Ecological building envelope as a dynamic living space for different species (credit: F. Mosca, M. Canepa, S. Barath, E. Roccotiello, K. Perini and F. Ludwig, 2022).

chitectural knowledge and makes it available for design. This model partly relies on the coupling of several ecological models (soils-microbiota, plants, and animals) resulting in a super ecological model. This spatially explicit model simulates the temporal and spatial dynamics of animals, plants, and soil development as a function of abiotic conditions such as soil types (depending on soil depth, and water content) or such as light availability for plants or food availability for animals, and according to biotic interactions such as human management, animal predation, plant dispersal or habitat provisioning.

The outcome of this model is a prediction of soil type, plant abundance, and animal home range in time and space. Interactions with architectural parameters will further be coupled to this super-model through knowledge gained from a series of computational experiments as well as from a literature review. They help to identify the relationships between architecture and ecology and how they could influence each other and for a more effective design of green infrastructures in urban environments resulting in different ecolopes (e.g., how the inclination of a façade affects the connectivity of animals, or placement of soil to grow plants).

Therefore, by integrating this information into a CAD (Computer-Aided Design) system, there is a potential to build a proper design recommendation system that enables iterative design development with multi-criteria decision-making strategies. This new approach enriches the ECOLOPES design workflow with information for making more precise decisions in favour of all stakeholders (humans, plants, animals, microbiota), and for a more effective design of green infrastructures in urban environments.

The ECOLOPES MCDM (Multi-Criteria Decision Making) process utilizes both MADM (Multi-Attribute Decision-Making) and MODM (Multi-Objective Decision-Making) strategies⁴ to generate a workflow that can integrate multidisciplinary information in the field of ecology and architecture. With that regard, KPIs (Key Performance Indicators) will represent the criteria of the various stakeholders, including green building performance. Concerning MOO (Multi-Objective Optimization), the design alternatives will be evaluated through the thresholds generated by the optimised KPI values to ensure that the designs are within the acceptable range. In addition, the integration of MADM will enable weights to be assigned to the KPIs, derived either through expert knowledge or literature reviews. Not only this strategy will allow the generated design alternatives to be sorted and ranked, but it will also provide the opportunity to redefine hierarchies and priorities of the KPIs that are informed by design objectives. This also allows the KPIs to be evaluated on different sets of architectural and ecological conditions.

To enable such an approach diverse data, models, and applications must be chained in a way that only the relevant data is made available to the user (designer, ecologist, urban planner that interfaces with a CAD system, etc.) of the new design system. Thus, a workflow needs to be elaborated that first reflects how the user would engage with such a system and second, how the principal components of the system (Information Model, and the Computational Simulation Environment) can be working together to provide the required informa-

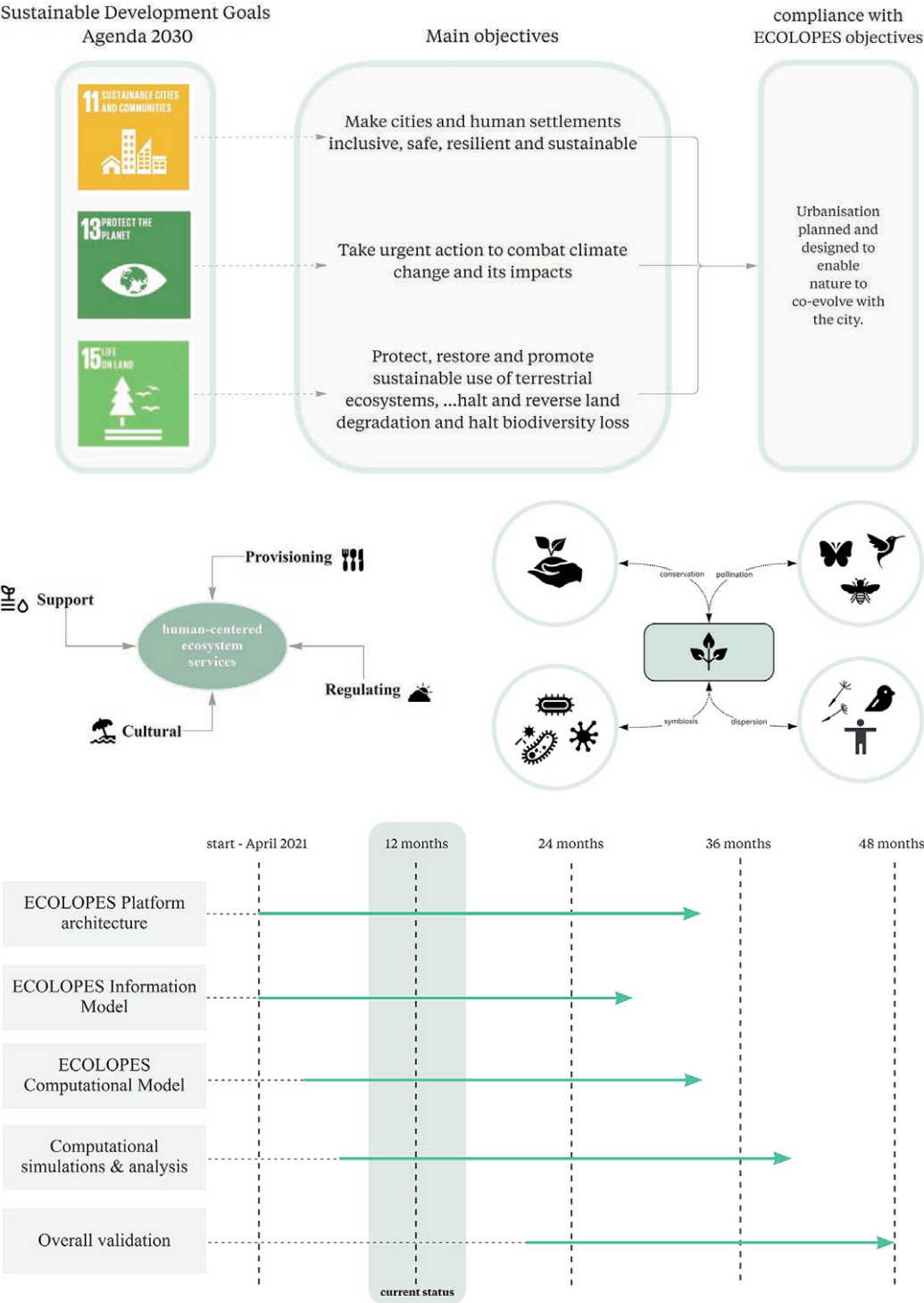


Fig. 9 | Selected Sustainable Development Goals objectives and compliance with ECOLOPES objectives (credit: F. Mosca and M. Canepa, 2022).

Fig. 10 | Human-centred ecosystem services (credit: F. Mosca and M. Pianta, 2022).

Fig. 11 | Example of plant-centred approach that provides mutual benefits for different living species, where each stakeholder supports the occurrence, abundance, and diversity of the others (credit: M. Pianta, F. Mosca, M. Canepa and E. Roccotiello, 2022).

Fig. 12 | ECOLOPES project phases (credit: F. Mosca and M. Pianta, 2022).

tion for the development of a multi-criteria decision-making support system.

Further results and stakeholder involvement |

The ECOLOPES design platform will integrate all components (Information Model, Simulation Environment). Furthermore, custom-developed front-end design tools (built as a plugin in a standard CAD application in Rhino and Grasshopper) will allow architects and planners to interface with the

new approach. The development of such a platform would include an investigation to explore how data can be classified, linked, and represented first, as a spatial-temporal combined data model, and second as a 3D voxel model in CAD. The main aim of such a computational platform is to provide support in the decision-making process and systemic coordination of planning actions in multi-species environments. Architects, engineers, and students will be the main target groups in terms of the prac-

tical application of our design technology (computational model), their professional organisations (chambers of architects, etc.) architectural and engineering firms, and building industry professionals. Landscape architects, urban planners and ecologists, local administrations and municipalities will be informed about the potential application of the ECOLOPES design tool, to improve governance strategies. ECOLOPES will be also relevant for ecologists and NGOs on green building councils. Finally, project results could be disseminated among environmental medical doctors and wellbeing advocates groups, given the expected impact on buildings inhabitants' well-being and health improvement.

Conclusions | In summary, the ECOLOPES design approach potentially allows architects to consider different stakeholders – including plants, animals and microbiota – and define their specific needs. In parallel, it considers normative constraints and technical requirements for its implementation (referring to humans as a client). Considering the topic of greenery, the step forward from the current approaches is the introduction of ecological knowledge (e.g., ecosystemic approach, multitrophic relationships) not only in the final steps of the design workflow but also in the first steps (i.e. the definition of the non-human design brief). Therefore, the ECOLOPES project underlines the importance of an interdisciplinary approach, highlighting the relevant role of the ecologists in the entire design process, not just exploiting their expert knowledge in specific stages of the design workflow (Fig. 15), but also their potential to actively design the new workflow.

ECOLOPES will allow acquiring precise knowledge from the ecological model outputs and make it directly available in CAD. The novel, non-anthropocentric KPIs relationships will make decision-making more effective. In times of crisis, more precise and multi-species solutions could overcome the paradigm in anthropocentric urban design. However, there are some limitations and challenges to this approach: firstly, the approach is very complex due to the multiple existing sub-methods and techniques that need to be developed and merged into a system that can potentially fulfil what has been promised or envisioned. There will be limitations to making the overall process an entirely automated process: parts of it will probably remain manual operations.

The second challenge is related to computational processes within the project. Also pondering the possible limits of the research, these are quite difficult considering the number and size of various datasets, the required processing power for computing the models, geometry as well as for analysis and simulation purposes. Such a challenge can be addressed by unifying datasets and file formats as well as through cloud computing. The third challenge is related to the end-user: the designer that will interface with the ECOLOPES platform through front-end tools. The designer will be the one that will provide the most crucial feedback for validating the overall approach. Their feedback will be necessary to understand if the envisioned system fulfils its purpose by designing urban environments that indeed foster regenerative ecosystems within our future cities.

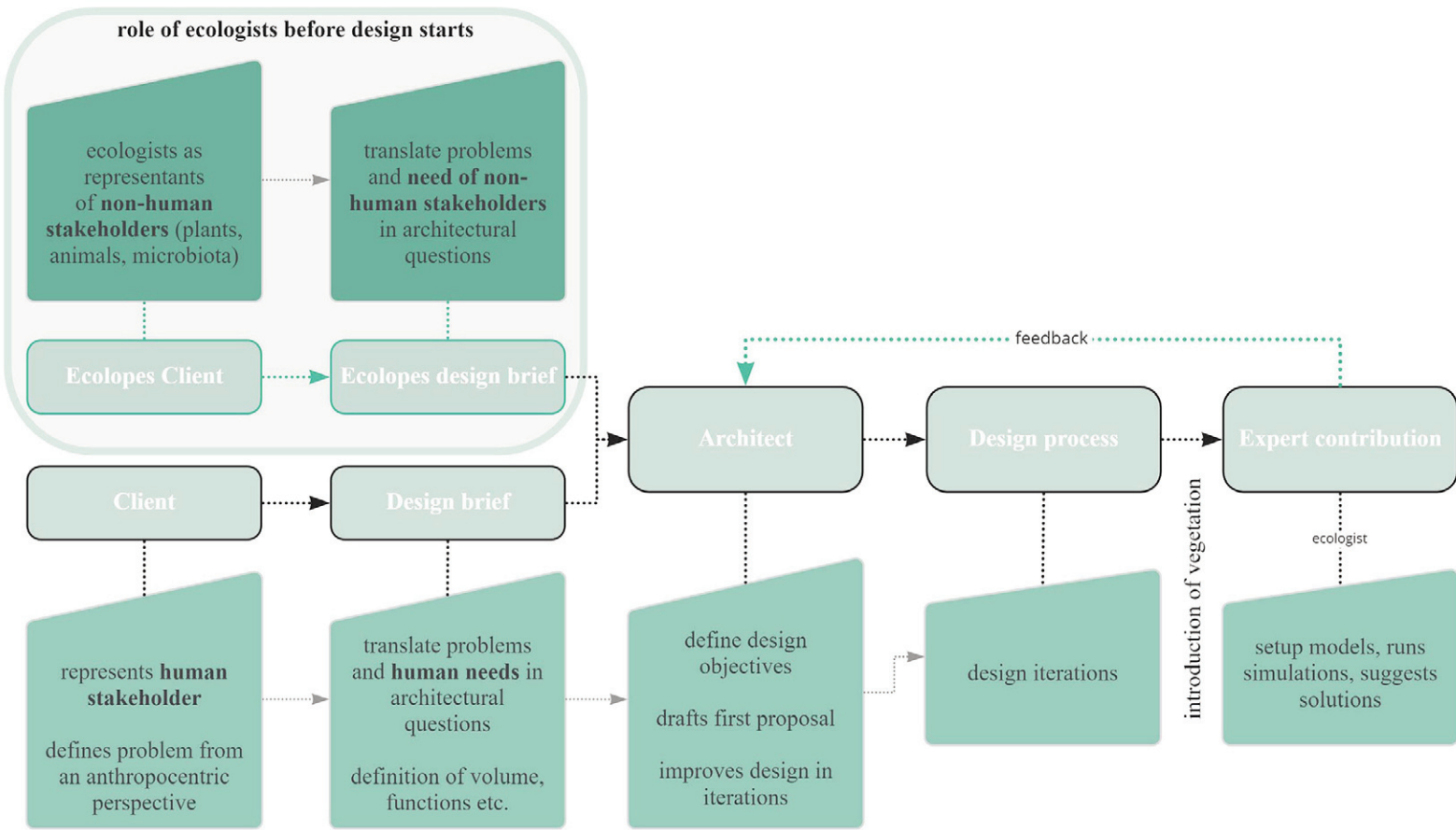
In future stages of the research (results in the phase of validation), a set of experiments will contribute to testing the different ECOLOPES components and build knowledge which will feedback to the system (e.g., relations between building geometry and ecological features). The project will also start an overall validation process that will demonstrate the effectiveness of the ECOLOPES multi-species design approach by taking real-world envelope prototypes (building blocks) located in four different cities/countries to determine whether the design solutions are representing multi-species or whether the approach needs to be optimised.



Fig. 13, 14 | Human-centred perspective approach; Non-human perspective approach (credits: F. Mosca and E. Roccotello, 2022).

Fig. 15 | ECOLOPES design approach (credit: F. Mosca and F. Ludwig, 2022).

Ecologies design workflow - non anthropocentric perspective



Acknowledgements

ECOLOPES project has received funding from the European Union Horizon 2020 research and innovation programme FET Open under grant agreement No. 964414.

Notes

1) ECOLOPES Consortium members: Technische Universität Munich, University of Genova, McNeel Europe, Technische Universität Wien, Technion Israel Institute of Technology, Animal Aided Design (AAD) Studio.

2) Humans have a fully formed environmental system belief, an environmental ideology, based on their own experience and connected to their specific actions. Therefore, the way people think of nature is directly connected to their personal experience with nature and the environment they live in. However, depending on that human perspective, human interactions are just one part of an ecosystem (Corbett, 2006).

3) Ecologies is a crisis of the words 'ecological' and 'envelope'.

4) In multi-criteria decision-making, strategies are adopted based on the problem typology that is dependent on the availability of alternatives and can be categorised into two approaches (Penadés-Plà et alii, 2016; Yazdani et alii, 2019). MADM is a strategy in which weights are assigned to criteria of pre-defined alternatives and based on the priority of the weights, the alternatives are ranked and sorted. In MODM, the alternatives are generated through a continuous set of solutions and support the basis for MOO. MOO in architecture utilizes algorithms that generate optimal design alternatives usually from conflicting criteria that need to be simultaneously calculated (Gunantara and Quingsong 2018; Hamdy, Nguyen and Hensen, 2016). The optimal solutions (a.k.a.: alternatives) generate the Pareto front and the criteria trade-offs are also computed.

References

- Aronson, M. F. J., Lepczyk, C. A., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., MacIvor, J. S., Nilon, C. H. and Vargo, T. (2017), "Biodiversity in the City – Key Challenges for Urban Green Space Management", in *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 15, issue 4, pp. 189-196. [Online] Available at: doi.org/10.1002/fee.1480 [Accessed 20 March 2022].
- Barton, J. and Pretty, J. (2010), "What is the Best Dose of Nature and Green Exercise for Improving Mental Health? A Multi-Study Analysis", in *Environmental Science & Technology*, vol. 44, issue 10, pp. 3947-3955. [Online] Available at: doi.org/10.1021/es903183r [Accessed 20 March 2022].
- Canepa, M. (2018), *Riflessioni sullo sviluppo sostenibile in architettura – A trent'anni dal Rapporto Brundtland*, Mimesis, Milano.
- Corbett, J. B. (2006), *Communicating Nature – How We Create and Understand Environmental Messages*, Island Press, Washington DC.
- EEA – European Environment Agency (2020), *Air Quality in Europe – 2020 Report*. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2800/786656 [Accessed 20 March 2022].
- Fernández-Cañero, R., Pérez Urrestarazu, L. and Perini, K. (2018), "Vertical Greening Systems", in Pérez, G. and Perini, K. (eds), *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*, Elsevier, Amsterdam, pp. 45-54. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00004-5 [Accessed 20 March 2022].
- Fineschi, S. and Loreto, F. (2020), "A Survey of Multiple Interactions Between Plants and the Urban Environment", in *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 3, article 30, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3389/ffgc.2020.00030 [Accessed 20 March 2022].
- Gnanasekaran, S. and Venkatachalam, N. (2019), "A Review on Applications of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) For Solar Panel Selection", in *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, vol. 9, issue 2, pp. 11-20. [Online] Available at: doi.org/10.24247/ijmperdapr20192 [Accessed 20 March 2022].
- Guarini, M. R., Battisti, F. and Chiovitti, A. (2018), "A Methodology for the Selection of Multi-Criteria Decision Analysis Methods in Real Estate and Land Management Processes", in *Sustainability*, vol. 10, issue 2, article 507, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su10020507 [Accessed 20 March 2022].
- Gunantara, N. and Quingsong, A. (2018), "A review of multi-objective optimization – Methods and its applications", in *Cogent Engineering*, vol. 5, issue 1, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1080/23311916.2018.1502242 [Accessed 20 March 2022].
- Hamdy, M., Nguyen, A.-T., Hensen, J. L. M. (2016), "A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems", in *Energy and Buildings*, vol. 121, pp. 57-71. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.035 [Accessed 20 March 2022].
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2022), *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability – Summary for Policymakers*. [Online] Available at: ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_FullReport.pdf [Accessed 20 March 2022].
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2015), *Climate Change 2014 – Synthesis Report*. [Online] Available at: ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf [Accessed 20 March 2022].
- IUCN (2016), *International Union for Conservation of Nature Annual Report 2016*. [Online] Available at: portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2017-001-v.1-En.pdf [Accessed 20 March 2022].
- Lepczyk, C. A., Aronson, M. F. J., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B. and MacIvor, J. S. (2017), "Biodiversity in the City – Fundamental Questions for Understanding the Ecology of Urban Green Spaces for Biodiversity Conservation", in *BioScience*, vol. 67, issue 9, pp. 799-807. [Online] Available at: doi.org/10.1093/biosci/bix079 [Accessed 20 March 2022].
- Mathiyazhagan, K., Gnanavelbabu, A. and Lokesh Prabhuraj, B. (2019), "A Sustainable Assessment Model for Material Selection in Construction Industries Perspective Using Hybrid MCDM Approaches", in *Journal of Advances in Management Research*, vol. 16, issue 2, pp. 234-259. [Online] Available at: doi.org/10.1108/JAMR-09-2018-0085 [Accessed 20 March 2022].
- McPhearson, T., Andersson, E., Elmqvist, T. and Frantzeskaki, N. (2015), "Resilience of and through Urban Ecosystem Services", in *Ecosystem Services*, vol. 12, pp. 152-156. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.07.012 [Accessed 20 March 2022].
- MEA – Millennium Ecosystem Assessment, (2005), *Ecosystems and Human Well-being – Synthesis*, Island Press, Washington (DC). [Online] Available at: millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf [Accessed 20 March 2022].
- Mela, K., Tiainen, T. and Heinisuo, M. (2012), "Comparative Study of Multiple Criteria Decision Making Methods for Building Design", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 26, issue 4, pp. 716-726. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aei.2012.03.001 [Accessed 20 March 2022].
- Moghtadernejad, S., Chouinard, L. E. and Mirza, M. S. (2020), "Design Strategies Using Multi-Criteria Decision-Making Tools to Enhance the Performance of Building Façades", in *Journal of Building Engineering*, vol. 30, article 101274, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101274 [Accessed 20 March 2022].
- Naylor, L. A., Kippen, H., Coombes, M. A., Horton, B., MacArthur, M. and Jackson, N. (2017), *Greening the Grey – A Framework for Integrated Green Grey Infrastructure (IGGI)*, University of Glasgow, Glasgow. [Online] Available at: eprints.gla.ac.uk/150672/ [Accessed 20 March 2022].
- Penadés-Plà, V., García-Segura, T., Martí, J. V. and Yepes, V. (2016), "A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied to the Sustainable Bridge Design", in *Sustainability*, vol. 8, issue 12, article 1295, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su8121295 [Accessed 20 March 2022].
- Pérez, G. and Coma, J. (2018), "Green Roofs Classifications, Plant Species, Substrates", in Pérez, G. and Perini, K. (eds), *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*, Elsevier, Amsterdam, pp. 65-74. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00006-9 [Accessed 20 March 2022].
- Philo, C. and Wilbert, C. (2000), *Animal spaces, beastly places – New geographies of human-animal relations*, Routledge, London.
- Pisani, M. (2006), *Site*, EdilStampa, Roma.
- Rees, W. E. (1997), "Urban ecosystems – The human dimension", in *Urban Ecosystems – The human dimension*, vol. 1, pp. 63-75. [Online] Available at: doi.org/10.1023/A:1014380105620 [Accessed 20 March 2022].
- Schrieke, D., Lönnqvist, J., Blecken, G.-T., Williams, N. S. G. and Farrell, C. (2021), "Socio-Ecological Dimensions of Spontaneous Plants on Green Roofs", in *Frontiers in Sustainable Cities*, vol. 3, article 777128, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.3389/frsc.2021.777128 [Accessed 20 March 2022].
- Singh, N., Singh, S. and Mall, R. K. (2020), "Urban Ecology and Human Health – Implications of Urban Heat Island, Air Pollution and Climate Change Nexus", in Verma, P., Singh, P., Singh, S. and Raghubanshi, A. S. (eds), *Urban Ecology – Emerging Patterns and Social-Ecological Systems*, pp. 317-334. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-820730-7.00017-3 [Accessed 20 March 2022].
- Tan, T., Mills, G., Papadonikolaki, E. and Liu, Z. (2021), "Combining Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods with Building Information Modelling (BIM) – A Review", in *Automation in Construction*, vol. 121, article 103451, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103451 [Accessed 20 March 2022].
- UN – General Assembly (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=111&n r=8496&menu=35 [Accessed 20 March 2022].
- Urbanik, J. (2012), *Placing animals – An Introduction to the Geography of Human-Animal Relations*, Rowman & Littlefield, Lanham.
- Yazdani, M., Zarate, P., Kazimieras Zavadskas, E. and Turskis, Z. (2019), "A combined compromise solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems", in *Management Decision*, vol. 57, issue 9, pp. 2501-2519. [Online] Available at: doi.org/10.1108/MD-05-2017-0458 [Accessed 26 April 2022].