

## An Integrated Modeling Framework to Guide Performance-Based Urban Forestry Under Climate Stress

Rapid urbanization and climate change have positioned urban greening as a key nature-based solution, yet the technical tools required to quantify its ecological assets remain methodologically limited. While international frameworks like the System of Environmental-Economic Accounting – Ecosystem Accounting emphasize the dependency of ecosystem services on ecosystem condition, current assessments frequently rely on a time-constant modeling paradigms that ignore temporal dynamism and physiological stress. Here these limitations are addressed through a multi-stage approach, beginning with a systematic literature review that identifies a pervasive lack of mechanistic depth in existing studies. To resolve these gaps, a novel individual-based model, named DynaTree, was developed to simulate tree growth and service provision. Being mechanistic and dynamical, the model is inherently sensitive to climate change, allowing for the simulation of physiological responses to non-stationary environmental forcing. Initial applications of DynaTree enabled the quantification of three core ecosystem services (carbon sequestration, air filtration, and local climate regulation), revealing species-specific performance across different age classes and scenarios. The model was subsequently coupled with a high-resolution hydrological framework to bridge the gap between biological growth and urban flash-hydrology, facilitating the assessment of a fourth service: water flow regulation. Results demonstrate that traditional models suffer from an optimistic bias by overlooking sub-daily physiological throttling, such as short and intense precipitation, which significantly reduces long-term growth projections. Furthermore, the identified gap in dense urban sealed streets suggests that the success of new plantings is strictly bounded by hydrological carrying capacity. These findings advocate for a paradigm shift in urban forestry policy, moving from quantity-based targets to performance-based planning. By emphasizing the irreplaceable value of mature tree assets and site-specific engineering, this work aims to provide a framework for supporting resilient climate adaptation and robust ecosystem accounting.

La rapida urbanizzazione e il cambiamento climatico hanno reso il verde urbano una risorsa fondamentale, eppure gli strumenti tecnici necessari per quantificare il suo valore ecologico rimangono metodologicamente limitati. Sebbene i framework internazionali, come il System of Environmental-Economic Accounting – Ecosystem Accounting, sottolineino la dipendenza dei servizi ecosistemici dalla qualità dell'ecosistema, le valutazioni attuali si basano spesso su paradigmi di modellazione statici nel tempo che ignorano le dinamiche temporali e lo stress fisiologico. In questo lavoro, tali limitazioni vengono affrontate attraverso un approccio a più fasi, a partire da una revisione sistematica della letteratura che identifica una mancanza di descrizione meccanicistica negli studi esistenti. Per colmare queste lacune, è stato sviluppato un nuovo modello individual-based, denominato DynaTree, per simulare la crescita degli alberi e la fornitura di servizi ecosistemici. Essendo meccanicistico e dinamico, il modello è intrinsecamente sensibile al cambiamento climatico, consentendo la simulazione delle risposte fisiologiche a forzanti ambientali non stazionarie. Le prime applicazioni di DynaTree hanno permesso la quantificazione tre servizi ecosistemici principali (sequestro del carbonio, filtrazione dell'aria e regolazione del clima), rivelando prestazioni specifiche per specie tra diverse classi di età e scenari. Il modello è stato successivamente accoppiato a un framework idrologico ad alta risoluzione per colmare il divario tra la crescita biologica e l'idrologia urbana degli eventi estremi, facilitando la valutazione di un quarto servizio: la regolazione dei flussi idrici. I risultati dimostrano che i modelli tradizionali soffrono di un bias ottimistico trascurando risposte sub-giornaliere, come in caso di precipitazioni brevi e intense, che riducono significativamente le proiezioni di crescita a lungo termine. Inoltre, il divario identificato, specialmente nelle aree densamente urbanizzate e impermeabilizzate suggerisce che il successo delle nuove piantumazioni è strettamente limitato dalla loro capacità idrologica. Questi risultati promuovono un cambio di paradigma nelle politiche di forestazione urbana, passando da obiettivi basati sulla quantità a una pianificazione basata sulle prestazioni. Sottolineando il valore insostituibile degli alberi maturi e della pianificazione specifica per il sito, questo lavoro mira a fornire un quadro di riferimento per supportare un adattamento climatico resiliente e una solida contabilità ecosistemica.