# **POLITECNICO DI TORINO**

# Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



Funzionalità dei parchi urbani: quantificazione dei Servizi Ecosistemici offerti dal parco "Le Vallere" (Moncalieri) mediante il software *i-Tree* 

Relatore Candidato

Prof. Roberto Revelli Ilaria Tinivella

#### Correlatori

Francesco Busca

Manuela Genesio

Anno Accademico 2019/2020

"La scienza non potrà mai dirci cosa fare, ma può fornirci gli strumenti per leggere un mondo in costante cambiamento, in cui ogni elemento, compreso quello umano, è strettamente connesso a tutti gli altri. Se c'è una divulgazione scientifica di cui oggi abbiamo un disperato bisogno è quella in grado di spiegare in maniera chiara e coinvolgente che cultura e natura, uomo e ambiente, crisi climatica e diritti umani sono in realtà due facce di uno stesso, unico sistema. Che la resilienza del bosco è, anche, la nostra resilienza. Forse non è un caso che la parola "umano" derivi dal latino homo, dalla stessa radice di humus. Terra."

Giorgio Vacchiano, "La resilienza del bosco", 2019

#### Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia gratitudine al Professor Roberto Revelli, prima come persona e successivamente come docente, per avermi avvicinato a temi di estrema attualità che confermano la trasversalità degli studi condotti e l'interesse verso le tematiche affrontate durante il percorso universitario.

Ringrazio l'"Ente di gestione delle aree protette del Po torinese", nelle persone di Manuela Genesio e Roberto Damilano, per aver accettato la collaborazione a questo progetto, apportando informazioni e materiale fondamentali per la riuscita del lavoro, e ARPA Piemonte, nella persona di Manuela Bassi, per la condivisione di dati indispensabili allo svolgimento delle simulazioni condotte.

Un ringraziamento particolare ai correlatori del presente lavoro, il Dottorando Francesco Busca e la referente del suddetto Ente, Manuela Genesio, per il supporto, non solo tecnico, ma anche morale, l'estrema professionalità e la costante disponibilità mostrata nell'accompagnarmi durante questo percorso.

Un immenso ringraziamento è rivolto a mia mamma per gli innumerevoli sacrifici fatti senza mai nulla chiedere in cambio, e ai miei fratelli, da sempre grandi sostenitori del raggiungimento di questo traguardo.

Desidero ringraziare Flavio, per avermi aspettato in questi anni, incoraggiato e sostenuto nei momenti più difficili, Piki e Sabrina, legata a loro da un forte e particolare affetto.

Un ringraziamento ad Alice, complice di follie ma soprattutto punto di riferimento, e a Simone, compagno di inappropriate risate durante le lezioni, entrambe preziose amicizie strette a inizio percorso universitario che hanno portato alla conoscenza di un meraviglioso gruppo di persone, i *PugliesiPiemontesi*, a cui mi sento particolarmente legata.

Desidero ringraziare Giulia e Valerio, Irene e Fabrizio, Roberto e Mary, Bongio, Irina e Viorel per le avventure, le risate, i momenti di svago e spensieratezza regalati ma, soprattutto, per aver compreso e mai giudicato le mie assenze.

Sono grata alla famiglia Febbraro e alla famiglia Massoni per il rapporto instaurato nel tempo e per avermi accolto nelle loro case come una seconda figlia.

Ringrazio chiunque altro di mia conoscenza stia leggendo queste righe perché interessato al mondo che mi ha tenuta occupata in questi anni.

A te, va poi un ringraziamento speciale, per avermi donato a modo tuo la forza per credere in me stessa e portare a termine questo percorso universitario, lungo ma estremamente formativo sotto molteplici punti di vista.

#### **Abstract**

Negli ultimi decenni sono stati messi in atto approcci di salvaguardia e iniziative di gestione ambientale volti ad un uso sostenibile delle risorse naturali e ad un loro ripristino con lo scopo di affrontare le sfide lanciate dall'attuale periodo storico (tra cui cambiamento climatico, incremento della popolazione urbana e tutela della salute umana).

Le aree verdi presenti all'interno delle metropoli si inseriscono in questo contesto identificandosi come i polmoni delle città e dei cittadini stessi, figurando come possibili nuove tipologie di investimento delle politiche nazionali e internazionali e rappresentando valide strategie per il recupero della biodiversità e delle funzionalità ecologiche.

Il presente lavoro ha come obiettivo l'analisi e la quantificazione dei Servizi Ecosistemici offerti dalla vegetazione alle città attraverso l'utilizzo di *i-Tree*, una suite di programmi nata negli Stati Uniti e in rapida espansione in tutto il resto del mondo. L'applicabilità di tale strumento è testata nel contesto italiano sul parco "Le Vallere", sito nel comune di Moncalieri (Torino), in collaborazione con l'*Ente di gestione delle Aree Protette del Po Torinese*. Nello specifico, lo studio vede l'impiego di due dei software che compongono la suite, ovvero *Eco* e *Hydro*, pensati rispettivamente per esaminare gli effetti ambientali ed economici della popolazione arborea presente e per stimare quantità e qualità dei deflussi generati dalle precipitazioni meteoriche.

Questo elaborato ha lo scopo di approfondire i modelli matematici implementati in *i-Tree* analizzando le relazioni che intercorrono tra input e output, la sensibilità dello strumento alla loro variazione, punti di forza e punti di debolezza, identificandolo comunque come utile strumento di supporto alla pianificazione territoriale.

In recent decades, safeguarding approaches and environmental management plans have been implemented in order to support a sustainable use of natural resources and their restoration for facing actual challenges (such as climate change, increase in urban population and protection of human health).

The role of urban greenspaces falls within this context as they can be considered the lungs of cities and of citizens themselves, appearing as new possible forms of investment by national and international policies and representing a valid strategy for the recovery of biodiversity and ecological functions.

The aim of this work is to analyze and quantify the Ecosystem Services provided by vegetation to cities by using *i-Tree* suite. This software was born in the United States and it is currently spreading around the world. In the Italian framework the applicability of this tool has been tested on "Le Vallere" park, located in Moncalieri (Turin) with the partnership of *Ente di gestione delle Aree Protette del Po Torinese*. In particular, *i-Tree Eco* and *i-Tree Hydro* has been used to explore environmental and economic benefits provided by trees and to estimate streamflow and water quality produced by rainfalls, respectively.

This paper aims to deepen mathematical models implemented in *i-Tree* by analyzing relationships between inputs and outputs, the sensitivity to their variation, its strengths and weaknesses, identifying it as a useful territorial planning support tool.

# Sommario

1.	IN	TROD	UZIONE	1
	1.1	Incr	emento demografico e sovrasfruttamento delle risorse	1
	1.2	II co	ntesto urbano	5
	1.3	II ve	rde in città	7
2.	SE	RVIZI	ECOSISTEMICI	10
2	2.1	Defi	inizione	10
2	2.2	Clas	sificazione	11
	2.2	2.1	S.E. Ambientali	13
	2.2	2.2	S.E. Socio – Culturali	15
	2.2	2.3	S.E. Economici	16
2	2.3	Valu	ıtazione monetaria	17
2	2.4	Poli	tiche a tutela	19
		4.1 genda	Il contesto internazionale: Piano Strategico della Convenzione sulla Diversità Biologica 2030	
	2.4	4.2	Il contesto italiano: normativa in materia di verde urbano	22
2	2.5	Obi	ettivi della tesi	25
3.	I-T	REE		26
3	3.1	Gen	eralità sul software	26
3	3.2	Una	suite di programmi	27
4.	I-T	REE E	CO	32
4	4.1	i-Tre	ee Database	32
4	1.2	Mod	dello matematico di i-Tree Eco	35
4	4.3	Con	figurazione di un progetto i-Tree Eco	46
	4.3	3.1	Configurazione del progetto: plot – based sample inventory o complete inventory	46
	4.3	3.2	Dati di input	49
	4.3	3.3	Analisi degli output	51
	4.3	3.4	Servizi supplementari	52
4	1.4	Rep	erimento dati di campo	54
5.	I-T	REE H	IYDRO	60
į	5.1	i-Tre	ee Canopy	61
į	5.2	Mod	dello matematico di i-Tree Hydro	64
	5.2	2.1	Struttura del modello	64
	5.2	2.2	Calcolo dei deflussi	66
	5.2	2.3	Calcolo del carico di inquinanti	71

5.	3 C	onfigurazione di un progetto i-Tree Hydro72	
5.3.1 Co		Configurazione del progetto: Watershed o non – Watershed	
	5.3.2	Dati di input	
5.3.3		Analisi degli output	
6. APPLICAZIONE DI I-TREE AD UN CASO STUDIO		CAZIONE DI I-TREE AD UN CASO STUDIO	
6.	1 Ir	nformazioni generali sul parco urbano "Le Vallere", Moncalieri	
6.	2 A	pplicazione di i-Tree Eco	
	6.2.1	Definizione dati di input	
	6.2.2	Discussione dei risultati	
	6.2.3	Quadro d'insieme e considerazioni finali	
6.	3 A	pplicazione di i-Tree Hydro109	
	6.3.1	Definizione dati di input	
	6.3.2	Impermeabilizzazione del suolo	
	6.3.3	Scenari futuri	
	6.3.4	Azioni di mitigazione	
	6.3.5	Quadro d'insieme e considerazioni finali	
7.	CONC	CLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	
8.	BIBLIOGRAFIA147		
9.	SITOGRAFIA		

## 1. INTRODUZIONE

#### 1.1 Incremento demografico e sovrasfruttamento delle risorse

Lo sviluppo della società umana è contraddistinto da un susseguirsi di cambiamenti che coinvolgono il complesso sistema di sfere costituenti il nostro pianeta, messi in atto dalla necessità di sostenere una popolazione in continua crescita e sistemi di vita sempre più confortevoli.

Nelle civiltà primitive la transizione verso strutture sociali e politiche complesse era strettamente legata a grandi progetti che architettavano questi sistemi a vantaggio dell'uomo, come ad esempio l'abbattimento di foreste per dare spazio all'agricoltura o la derivazione di corsi d'acqua per irrigare le colture. Nel corso dei millenni, aree incontaminate in tutto il pianeta furono adattate per permettere alle comunità che vi si erano stanziate di ottenere approvvigionamenti sicuri di cibo, acqua, energia e materiali.

Il processo di industrializzazione, la cui manifestazione viene convenzionalmente identificata con il XIX secolo, ha determinato un'accelerazione di questi cambiamenti supportati da nuove tecnologie e progressi in campo medico che hanno reso possibile il sostentamento e la sopravvivenza di nuclei urbani sempre più popolosi (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Dal dopoguerra ad oggi, infatti, il territorio ha subito una rapida trasformazione, specialmente in termini di uso del suolo, determinata da una richiesta sempre maggiore di superfici destinate all'agricoltura e alla realizzazione di abitazioni, fabbricati ad uso produttivo e infrastrutture viarie. Nello specifico, la conversione del suolo ad uso agricolo, oltre a degradarne le caratteristiche chimico-fisiche e a causare il 75% delle estinzioni mondiali di animali e piante, ha provocato un enorme incremento nell'utilizzo di fertilizzanti artificiali. L'utilizzo massivo di questi nutrienti, indirizzati in prima istanza alle colture e, successivamente, alla natura stessa in quanto dilavati nei torrenti, fiumi e oceani, ha determinato in molti corpi idrici ricettori una eccessiva crescita di piante e una conseguente riduzione della probabilità di sopravvivenza di molte altre forme di vita acquatica. Anche l'aspetto apparentemente immutato dell'oceano nasconde in realtà uno stravolgimento radicale dei sistemi di vita che lo popolano dovuto soprattutto ad un maggiore sfruttamento delle risorse ittiche e alle nuove e più efficienti tecnologie di pesca.

Un altro cambiamento riscontrabile nell'era attuale è la "globalizzazione della natura", ovvero l'introduzione di specie vegetali e animali in parti del mondo dove non erano mai esistite in precedenza, fenomeno che può modificare il sistema locale, i servizi da esso forniti e concorrere con le specie autoctone.

Oltre a queste mutazioni, il cambiamento che ha più probabilità di alterare le infrastrutture naturali della Terra è rappresentato dalle reazioni chimiche che l'uomo da ormai un secolo e mezzo produce ed immette in atmosfera. Infatti, le attività umane, basate sostanzialmente sull'utilizzo di carbone, petrolio e gas naturale come fonti di energia, contribuiscono all'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> ed altri gas serra che provocano perturbazioni nel ciclo radiativo e concorrono al cambiamento climatico in atto e alla formazione di eventi meteorologici sempre più estremi e frequenti.

È facile intuire che l'attuale epoca geologica, definita "Antropocene", è caratterizzata da un'influenza drastica dell'operato umano sulle componenti chimiche, fisiche e biologiche della Terra, su larga e piccola scala (S1). La significativa impronta che questa epoca sta lasciando sul pianeta è stata persino documentata nel film *Anthropocene*, in cui Edward Burtynsky, Jennifer Baichwal e Nicholas de Pencier indagano la portata della specie umana sull'equilibrio del pianeta.

Attualmente la popolazione mondiale si attesta intorno ai 7.7 miliardi; le stime prevedono un incremento fino a 8 miliardi entro il 2025 e di 10 miliardi al giungere del 2050 (Figura 1.1) (World Population Prospects, 2019). Il numero di abitanti sul nostro pianeta continua dunque a crescere, sebbene ad un ritmo più lento rispetto alla metà del '900, periodo in cui il tasso di crescita ha raggiunto il valore di picco pari al 2.1% annuo. Le proiezioni di crescita della popolazione, valutate per ciascun paese o area tramite metodi demografici e statistici, sono caratterizzate da un'incertezza intrinseca dipendente da tendenze future in termini di fertilità, mortalità e migrazione internazionale. L'analisi riportata nel Rapporto "World Population Prospects" attesta una certezza di queste stime pari al 95%.

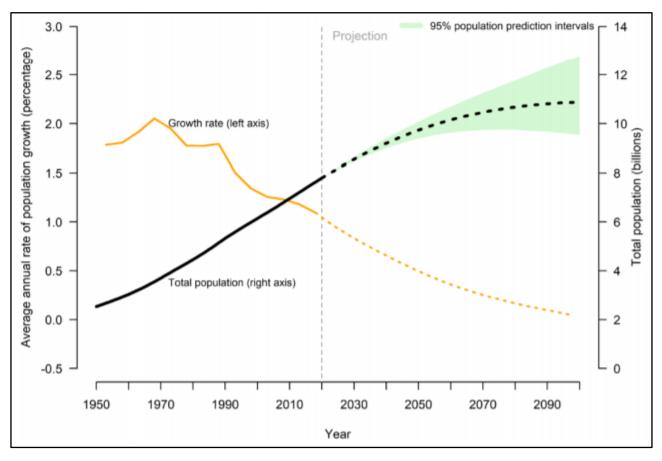


Figura 1.1 Andamento di crescita della popolazione, tasso di crescita annuo mondiale (stime 1950 - 2020) e proiezione delle stime di crescita della popolazione globale con intervalli di predizione del 95% (stime 2020 - 2100) [Fonte: World Population Prospects, 2019]

L'aumento della popolazione comporta un incremento nell'uso antropico del suolo che va ad intaccare le risorse disponibili del pianeta. Poiché queste diminuiscono senza dar tempo alla Terra di rigenerarle, gli effetti diventano visibili non solamente dal punto di vista ambientale ma anche a livello sociale determinando un aumento disuniforme della povertà. Non a caso, infatti, oltre due miliardi di persone vivono in zone aride del pianeta e soffrono di problemi come la malnutrizione, la mortalità infantile e le malattie connesse alla mancanza di acqua potabile (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

La povertà e la degradazione della natura sono dunque due fattori che, se combinati insieme, possono creare una situazione che precipita verso il basso. Le comunità povere, infatti, hanno spesso minori possibilità di scelta per la conservazione delle proprie risorse naturali, senza considerare che, in molti casi, il loro depauperamento, la conseguente perdita di servizi e i costi ambientali e sociali che ne derivano sono a carico di soggetti o comunità non direttamente coinvolti nello sfruttamento della risorsa (Costanza, 2008).

Ne consegue che le popolazioni a cui mancano standard minimi di benessere umano, sono generalmente quelle i cui sistemi naturali sono più vulnerabili al deterioramento, mentre i Paesi sviluppati, sebbene non siano totalmente in grado di proteggersi da catastrofi naturali, risultano comunque avere maggiori capacità nel trovare soluzioni alternative alle risorse naturali, trasferendo le conseguenze del danno in altre regioni o lasciandolo in eredità alle generazioni future.

È proprio volgendo lo sguardo alle generazioni future che ormai da qualche decennio è stato sviluppato un indicatore, definito "Earth Overshoot Day" ovvero "Giorno del Superamento", che segna la giornata in cui la richiesta di risorse e servizi ecologici da parte dell'umanità supera quella che la Terra è in grado di rigenerare nell'anno in corso.

Il "Earth Overshoot Day" è stato concepito per la prima volta da Andrew Simms nel 2006 ed è calcolato dalla Global Footprint Network, un'organizzazione di ricerca internazionale che sviluppa strumenti per promuovere la sostenibilità ambientale. La data del "Earth Overshoot Day" si determina facendo riferimento al numero di giorni di un anno in cui la biocapacit๠della Terra è sufficiente per fornire l'impronta ecologica² dell'umanità; l'utilizzo di risorse naturali nella restante parte di giorni dell'anno costituisce il debito ecologico attraverso il sovrasfruttamento delle risorse (S2). Una regione in deficit ecologico soddisfa la domanda importando biocapacità attraverso il commercio e/o emettendo anidride carbonica nell'atmosfera.

Si riporta in Figura 1.2 una mappa che evidenzia i Paesi creditori e quelli debitori nei confronti della biocapacità del pianeta; si evince come gli Stati maggiormente industrializzati siano caratterizzati da un'impronta ecologica superiore del 150% rispetto alla biocapacità della Terra.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> La biocapacità della Terra è definita come la quantità di risorse ecologiche che il pianeta è in grado di generare in un determinato anno.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> L'impronta ecologica misura la domanda da parte di una popolazione di prodotti alimentari e fibre vegetali, prodotti di allevamento e pesce, legname e altri prodotti forestali, sequestro di carbonio e superfici per le infrastrutture. Sia la biocapacità che l'impronta ecologica sono espresse in ettari globali (gha), unità di misura che rappresenta la superficie di pianeta biologicamente produttiva che servirebbe ad un individuo per generare tutte le risorse che consuma e assorbire i rifiuti e/o le emissioni che genera.

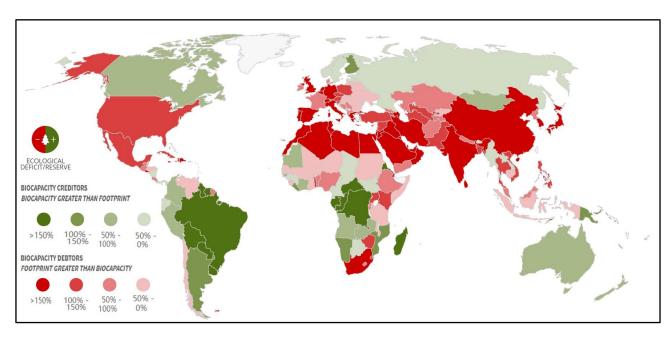


Figura 1.2 Mappa rappresentante i Paesi debitori e i Paesi creditori nei confronti della biocapacità della Terra [Fonte: Global Footprint Network National Footprint Accounts 2019] (S3)

Per l'anno 2019 il Global Footprint Network ha definito il "Giorno del Superamento" della Terra il 29 luglio, giornata in cui l'umanità ha esaurito il budget di risorse naturali che il nostro pianeta ha messo a disposizione per l'intero anno. Come si evince dal grafico riportato in Figura 1.3, la sua data si è spostata in avanti di due mesi negli ultimi 20 anni raggiungendo nel 2019, la data più anticipata in assoluto. Questo dato porta ad un'ulteriore constatazione, ovvero al fatto che l'umanità sta utilizzando la natura 1.75 volte più velocemente di quanto gli ecosistemi del nostro pianeta siano in grado di rigenerare e, quindi, è come se stessimo utilizzando le risorse di 1.75 pianeti Terra.

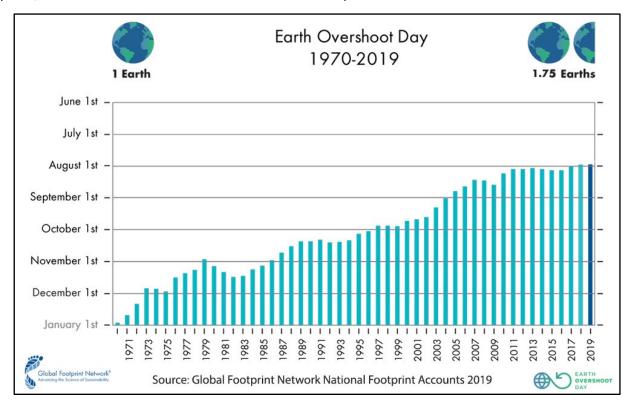


Figura 1.3 Andamento dell'indicatore "Earth Overshoot Day" [Fonte: Global Footprint Network National Footprint Accounts 2019] (S2)

La fondatrice e presidente del Cloud Institute for Sustainability Education a New York City, Jaimie Cloud, durante un'intervista per la Global Footprint Network (2018) sostiene

"Earth Overshoot Day is a great opportunity to run some algebra and learn about what that hard-stop date means [...] Everybody knows that taking anything faster than it is being put back doesn't work. Although obvious with regard to personal finances, this equation is not on most people's minds when it comes to managing our natural capital. So, everyone needs to learn how to do the math"

Quest'anno il "Earth Overshoot Day" è arrivato il 22 agosto, tre settimane dopo rispetto l'anno scorso. Nel 2020, la pandemia di COVID-19 ha causato una contrazione del 10% dell'impronta ecologica dell'umanità, dimostrando che è possibile spostare le tendenze del consumo di risorse in un breve lasso temporale.

Il valore attribuito al "Earth Overshoot Day" offre dunque un'opportunità per riflettere sulla possibilità di creare un futuro in armonia con i limiti ecologici del nostro Pianeta, considerando il fatto che la vera sostenibilità che consente a tutti noi di prosperare sulla Terra deve essere raggiunta tramite l'attuazione di piani strategici e non con il disastro.

Dalla attuale esperienza collettiva della pandemia, è possibile trarre alcune importanti considerazioni, tra cui il fatto che i governi sono in grado di prendere decisioni straordinariamente rapide e audaci sia in termini di regolamentazione che di spesa quando mettono la vita umana al di sopra di ogni altra cosa, gli individui allo stesso modo possono allinearsi e collaborare in modo efficace nel perseguimento di un obiettivo condiviso quando le persone riconoscono che la propria vita e quella delle persone che amano possono essere a rischio, e che le azioni richieste per proteggere gli altri sono le stesse necessarie per proteggere loro stessi, le loro famiglie e le loro comunità.

La rete di connessioni umane e la consapevolezza che le decisioni del singolo individuo hanno conseguenze per tutta la comunità costituisce una realtà che spesso è sfuggita all'uomo nella lotta ai cambiamenti climatici. Spostare la data del "Earth Overshoot Day" di 5 giorni all'anno consentirebbe all'umanità di raggiungere l'equilibrio con le risorse prodotte annualmente dal nostro Pianeta prima del 2050 (S2).

#### 1.2 Il contesto urbano

Il quadro appena delineato è strettamente correlato al contesto urbano: la città attualmente rappresenta la tipologia di insediamento umano che più caratterizza il presente periodo storico inquadrandosi come centro nevralgico di attività umane e di alterazione degli equilibri ambientali (Terzo Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale, 2019). I centri urbani, infatti, occupano solo il 3% della superficie del Pianeta, ma consumano il 75% delle risorse naturali siano esse acqua, cibo, suolo, materiali (S4).

La revisione del "World Urbanization Prospect" del 2018 rileva che, con oltre la metà della popolazione mondiale che vive in aree urbane (55% rispetto al 30% del 1950), l'urbanizzazione determina la distribuzione spaziale della popolazione globale ed è una delle quattro mega-tendenze demografiche oltre alla crescita globale, l'invecchiamento e la migrazione internazionale (World Urbanization Prospects, 2018).

Le proiezioni mostrano che questo fenomeno, combinato con la crescita complessiva della popolazione, determinerà un aumento crescente del numero di abitanti nelle città arrivando al 68% entro il 2050. Tali stime indicano, inoltre, che il processo di urbanizzazione, a differenza della crescita demografica, riguarderà tutte le regioni geografiche seppure con intensità differenti; si prospetta, infatti, che gran parte della crescita urbana avrà luogo nei Paesi in via di sviluppo, soprattutto in Africa (Figura 1.4).

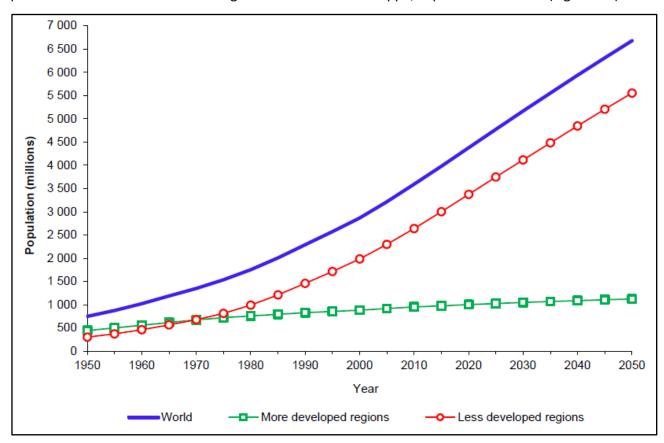


Figura 1.4 Stima della crescita urbana nel mondo, nei paesi sviluppati e in quelli in via di sviluppo (1950 – 2050) (S5)

L'urbanizzazione viene in genere definita in relazione a due categorie interpretative: da un lato quella demografica, legata alla crescita della popolazione che risiede in aree urbane, dall'altro quella territoriale, basata sull'espansione fisica del tessuto urbano a carico delle periferie. Tale fenomeno è noto come dispersione urbana, o *urban sprawl*, e indica la tendenza delle aree rurali ad essere inglobate o trasformate in estese aree metropolitane, con la conversione di aree agricole, pascoli e foreste in terreni impermeabili (Terzo Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale, 2019).

Come si evince dal grafico riportato in Figura 1.4 le curve che stimano questa crescita non tendono a diminuire nel tempo. Questo fenomeno è attribuibile a diversi aspetti, meglio comprensibili se si indaga il motivo per cui un numero sempre più elevato di persone desidera vivere in città. Gli aspetti alla base della migrazione verso i centri urbani, e dei quali è necessario tenere in conto per prospettare città future, sono sicuramente rappresentati dal fatto che le città offrono maggiori opportunità lavorative, sono i centri del potere politico, economico, culturale e sociale e dispongono di servizi migliori (sanitari, di istruzione, ecc.) (Città efficienti, vivibili e resilienti, 2020).

D'altra parte, però, una così rapida espansione urbana comporta una riduzione delle funzioni e della qualità del suolo, conduce ad una frammentazione e degradazione ambientale, provoca spesso alterazioni delle caratteristiche ecologiche del paesaggio, del grado di biodiversità, dei cicli

biogeochimici, del clima locale e globale. Sostanzialmente le città alterano le risorse naturali e ne comportano il sovrasfruttamento, producono grandi quantità di rifiuti, sono responsabili del 70% delle emissioni di gas serra mondiali e necessitano dell'85% della richiesta energetica globale.

A fronte di questa realtà urbana e alle stime sulla sua espansione, è utile analizzare se i modelli delle città esistenti sono quelli verso cui si vuole convergere oppure se è opportuno ipotizzare scenari alternativi. Esistono infatti soluzioni interessanti alla realtà attuale e a quella che si prospetta per il futuro, quali ad esempio la deurbanizzazione e il pendolarismo, che richiedono però l'accortezza di non trasferire altrove i problemi attualmente presenti negli agglomerati urbani.

Nel caso in cui, invece, si prospetti una futura espansione urbana come preannunciato dalle stime, risulta necessario gestire al meglio le risorse e le tecnologie disponibili, e trovare nuovi modelli di governo per fronteggiare le ineguaglianze che inevitabilmente produrranno le città del futuro. In sostanza, è necessario pensare a città più efficienti che risulterebbero essere certamente più vivibili e più resilienti, ovvero in grado di adattarsi alle condizioni che cambiano sia per cause naturali che antropiche ("Città efficienti, vivibili e resilienti", 2020).

Alla luce di quanto esposto, la situazione attuale evidenzia che gli agglomerati urbani sono soggetti ad una serie di criticità quali l'elevata densità abitativa che implica alti volumi di traffico e congestione, elevati livelli di rumore ambientale, produzione di grandi volumi di rifiuti, di acque reflue e scarsa qualità dell'aria (Gestione ecosistemica delle aree verdi urbane: analisi e proposte, 2009). La rapidità con cui il suolo viene convertito in aree residenziali e industriali, inoltre, implica un aumento di superfici impermeabili con conseguente incremento dei deflussi superficiali. Tutti questi aspetti sottopongono il nucleo cittadino a continui cambiamenti e alla necessità di adattamento alle variazioni delle condizioni ambientali locali.

Il quadro descritto evidenzia come la gestione delle città sia diventata una delle sfide planetarie del XXI secolo, specialmente se queste vengono considerate come ecosistemi complessi che consumano, trasformano, riciclano e scambiano energia e materia con l'ambiente e che, come tali, è opportuno conservarne le funzioni ecosistemiche.

#### 1.3 Il verde in città

Nell'ambito di una visione del territorio come ecosistema di cui l'uomo è una componente importante e in prospezione di città future, si inserisce il verde urbano che non può più essere considerato solo come elemento estetico ed ecologico delle città, ma come un vero e proprio servizio al cittadino.

Solo a partire dagli anni Novanta si è iniziato a comprendere che l'ambiente non è una risorsa al servizio dell'uomo, ma è un sistema complesso all'interno del quale è l'uomo a dover trovare un proprio equilibrio. Per questo motivo si è iniziato a parlare di *compensazione ecologica preventiva*. Questo termine nasce dal concetto che ogni trasformazione, anche se indispensabile, consuma la risorsa suolo creando un impatto sul territorio e sulle sue componenti in quantità e forme diverse. In questo contesto la pratica della compensazione contempla che ad ogni processo di sottrazione del valore ambientale corrisponda un'azione equa di riequilibrio del sistema. L'aggettivo "preventivo", invece, sta ad indicare che la tempistica dell'azione deve aver luogo prima che venga realizzata l'opera di trasformazione (Trucco, 2017).

Da queste considerazioni emerge l'attenzione sempre maggiore da parte di ecologi e urbanisti alla presenza di vegetazione all'intero del contesto cittadino. Questo aspetto ha assunto nel tempo accezioni diverse: si è, infatti, parlato di verde urbano, foresta urbana, infrastrutture verdi, tutti termini che, seppur aventi significati diversi, hanno come unico obiettivo quello di identificare il ruolo della vegetazione come indicatore di sviluppo urbano sostenibile, non solo sul piano ambientale, ma anche sociale ed economico.

Con il termine "verde urbano" si intendono le porzioni del tessuto cittadino dominate dalla natura. Questa definizione include sia il verde pubblico, quindi parchi urbani, aiuole, viali alberati e aeree spartitraffico piantumate, sia quello privato.

Per quanto riguarda il termine "foresta urbana", dall'inglese *urban forestry*, questo fa riferimento ad un concetto sorto nel secolo scorso negli Stati Uniti, dove i problemi e i contrasti legati al rapporto tra vegetazione e insediamenti umani sono stati particolarmente acuti proprio per le dimensioni degli agglomerati urbani (S6). Si tratta di un termine che più che per identificare uno spazio verde, è appropriato per rappresentare una disciplina, ovvero un ramo delle scienze forestali che si interessa della coltivazione e della gestione degli spazi verdi all'interno delle città e che valuta il loro contributo al benessere fisiologico, sociologico ed economico della società.

Infine, il termine "infrastrutture verdi" connota un concetto di pianificazione che si estende oltre la dimensione urbana, coinvolgendo porzioni di territorio maggiori. Si tratta di reti di aree verdi urbane e peri-urbane che collegano le città con le campagne circostanti rivestendo il ruolo di corridoi ecologici.

Le potenziali componenti di un'infrastruttura verde sono:

- le aree protette come i siti Natura 2000<sup>3</sup>;
- ecosistemi sani e aree di alto valore naturalistico non identificate come aree protette (ad esempio pianure alluvionali, zone umide, aree costiere, foreste naturali);
- elementi del paesaggio naturale tra cui piccoli corsi d'acqua, macchie boscate, siepi, che possono fungere da corridoi verdi o aree d'appoggio per la fauna selvatica;
- elementi artificiali come gli ecodotti o gli ecoponti, che servono a favorire i trasferimenti delle specie tra barriere di paesaggio insormontabili;
- elementi urbani come parchi, giardini e ville storiche, pareti e tetti verdi, che ospitano la biodiversità e permettono agli ecosistemi di funzionare ed erogare i propri servizi creando collegamenti tra zone urbane, periurbane e rurali;
- elementi che facilitano l'adattamento ai cambiamenti climatici e la riduzione del fenomeno stesso, come paludi, foreste alluvionali e torbiere acide (per la prevenzione delle inondazioni,

\_

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Natura 2000 è il principale strumento della politica dell'Unione Europea per la conservazione della biodiversità. Si tratta di una rete ecologica diffusa su tutto il territorio dell'Unione, istituita ai sensi della Direttiva 92/43/CEE "Habitat" per garantire il mantenimento a lungo termine degli habitat naturali e delle specie di flora e fauna minacciati o rari a livello comunitario. È costituita dai Siti di Interesse Comunitario (SIC) e dalle Zone di Protezione Speciale (ZPS). Le aree che compongono la rete Natura 2000 non sono riserve rigidamente protette dove le attività umane sono escluse, bensì la Direttiva Habitat intende garantirne la protezione tenendo comunque "conto delle esigenze economiche, sociali e culturali, nonché delle particolarità regionali e locali" (Direttiva "Habitat" 92/43/CEE, Art. 2) (S7).

l'immagazzinamento di acqua e l'assorbimento di anidride carbonica), che offrono alle specie uno spazio per reagire alle variazioni delle condizioni climatiche.

Parlare di infrastrutture verdi significa dunque realizzare una rete strategicamente pianificata di aree naturali, nodi e collegamenti capaci sia di migliorare la funzionalità dei sistemi naturali che di garantirne la valorizzazione anche in termini economici ed occupazionali.

Uno degli obiettivi fondamentali della creazione di infrastrutture verdi è proprio la riduzione della frammentazione degli habitat con lo scopo di garantire una prosperità ed un flusso di specie animali e vegetali diverse (Infrastruttura verde, 2010). È stato constatato che ecosistemi composti da una varietà di specie presentano maggiori probabilità di rimanere stabili in caso di perdite o danni, prerequisito fondamentale se si considera che il sistema su cui si fonda la vita sul nostro pianeta è formato da ecosistemi sani e che la biodiversità è un valore indispensabile per la salute e la stabilità degli stessi.

Il verde urbano, con il suo insieme di spazi permeabili, contribuisce a dare attuazione, a scala metropolitana, al concetto di infrastruttura verde e a creare un network di spazi aperti e paesaggi periurbani con le realtà cittadine circostanti.

Emerge dunque una nuova concezione di questo spazio, non più inteso come "tassello urbanistico", ma come componente fondamentale della qualità della vita e della *sostenibilità urbana*, termine con cui si vuole indicare un modello di sviluppo che soddisfa i principi dell'efficienza economica, l'equità sociale e l'integrità ambientale.

Il perseguimento di questo concetto rappresenta un nodo strategico per gli obiettivi di uno sviluppo sostenibile e si pone come una delle sfide principali per i governi delle città se si considera che è proprio all'interno di queste che si concentrano maggiormente, e si concentreranno nel futuro, le attività umane e, di conseguenza, le pressioni sull'ambiente e sulla qualità della vita (Gestione ecosistemica delle aree verdi urbane: analisi e proposte, 2009).

### 2. SERVIZI ECOSISTEMICI

#### 2.1 Definizione

È ormai ampiamente condiviso, anche sul piano scientifico, che la presenza di spazi verdi nelle aree metropolitane, oltre alle note funzioni estetiche e ricreative, è una risorsa fondamentale per preservare l'integrità degli ecosistemi naturali e i servizi da questi resi. Il verde urbano, infatti, può fornire diversi benefici sia in termini tematici che quantitativi.

Questo fa delle città un luogo centrale per la tutela del *Capitale Naturale*, concetto strumentalmente mutuato dal settore economico per indicare il valore in termini fisici, monetari e di benessere offerto dalla biodiversità al genere umano (S8).

Il legame indissolubile tra sviluppo umano e risorse naturali fu evidenziato per la prima volta da George Perkins Marsh, una delle maggiori figure intellettuali degli Stati Uniti nel XIX secolo considerato da molti il primo ecologista americano. La sua preoccupazione primaria fu quella di sottolineare la scarsità delle risorse naturali utili allo sviluppo umano ed il delicato equilibrio che permette alla natura di sostenere le funzioni centrali della vita umana (S9).

Nonostante la sua idea fosse estremamente lungimirante, solo a partire dagli anni Quaranta del secolo scorso si incominciò a parlare di "servizi ambientali", "servizi della natura", "servizi pubblici dell'ecosistema globale", "Servizi Ecosistemici" per descrivere un contesto che sintetizza e struttura la conoscenza biofisica dei processi ecosistemici in termini di benessere umano.

Le prime ricerche sulla valutazione dei servizi offerti dalla natura agli esseri umani risalgono agli anni Sessanta (Figura 2.1) ma incominciano suscitare interesse е la attenzioni con pubblicazione di Costanza et al. nel 1997 che definisce i beni e i servizi degli ecosistemi come "un flusso di materia, energia informazioni erogati dagli stock del capitale naturale che produce benefici per l'uomo".

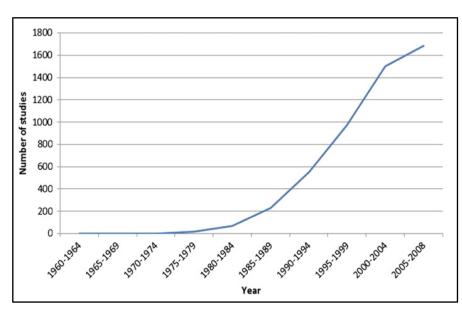


Figura 2.1 Curva cumulativa degli studi effettuati sui Servizi Ecosistemici dal 1960 al 2008 [Fonte: de Groot et al., 2012]

Da allora si è manifestata una crescita costante nel numero di articoli e report inerenti a questo tema (Figura 2.1) e comprendenti una grande varietà di ecosistemi, tipologie di paesaggio, scale spaziali e temporali, metodi di valutazione e definizioni (de Groot et al., 2012).

#### 2.2 Classificazione

In merito alla valutazione dei Servizi Ecosistemici, nel 2001 con il supporto delle Nazioni Unite, è stato lanciato un progetto di ricerca definito MEA (*Millennium Ecosystem Assessment*) che indica i Servizi Ecosistemici, per semplicità abbreviati in SE, come "i benefici multipli forniti dagli ecosistemi al genere umano". Il MEA ne fornisce, inoltre, una classificazione suddividendoli in 4 categorie principali:

- <u>servizi di approvvigionamento</u>: comprendono tutti i servizi di fornitura di materie prime ed energia che gli ecosistemi naturali e semi-naturali producono, quali per esempio ossigeno, acqua per uso civile e industriale, cibo, fibre, ecc. Si tratta sostanzialmente di beni per un uso umano diretto;
- servizi di regolazione: contribuiscono al mantenimento della salute e del funzionamento degli ecosistemi, quindi degli habitat e della biodiversità e producono benefici diretti e indiretti per l'uomo, come la stabilizzazione del clima, il riciclo dei rifiuti, l'impollinazione delle colture, il controllo dell'erosione del suolo e molti altri, solitamente non riconosciuti fino al momento in cui non vengono persi o degradati;
- <u>servizi culturali</u>: provvedono al mantenimento della salute umana attraverso la fornitura di opportunità di riflessione, arricchimento spirituale, sviluppo cognitivo, esperienze ricreative ed estetiche. Più in generale, questa tipologia di servizi include i benefici immateriali che l'uomo ottiene dal contatto con gli ecosistemi;
- <u>servizi di supporto alla vita</u>: rappresentano i processi ecosistemici che producono i servizi diretti sopra descritti. Essi sono dei servizi intermediari essenziali che contribuiscono alla conservazione (in situ) della diversità biologica e genetica e dei processi evolutivi. Ne sono un esempio il ciclo dei nutrienti, la formazione del suolo e il processo di fotosintesi clorofilliana. Riconoscere tali servizi è fondamentale per gestire e conservare gli ecosistemi e i loro prodotti.

Negli ultimi anni, queste quattro categorie, pur rimanendo di attualità, sono state modificate in modo sostanziale dall'Agenzia Europea per l'Ambiente<sup>4</sup> all'interno della "Classificazione Internazionale dei Servizi degli Ecosistemi" giunta alla quinta versione (CICES V5.1).

Questa classificazione definisce i Servizi Ecosistemici come "i contributi che gli ecosistemi apportano al benessere umano e distinti dai beni e dai benefici che le persone successivamente traggono da essi". Questi contributi sono inquadrati in termini di "cosa fanno gli ecosistemi" per le persone e, pertanto, la definizione di ciascun servizio identifica gli scopi o gli usi che le persone ne fanno e gli specifici attributi o comportamenti dell'ecosistema che li supportano (Terzo Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale, 2019).

La struttura di CICES è progettata intorno all'idea di una gerarchia di tipo strutturale in cui le 'Sezioni' sono tre delle quattro categorie utilizzate nel MEA, ovvero *Approvvigionamento*; *Regolazione e* 

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> L'Agenzia Europea dell'Ambiente è un'organizzazione dell'Unione Europea il cui compito è quello di fornire informazioni indipendenti e qualificate sull'ambiente. Essa opera con l'obiettivo di favorire lo sviluppo sostenibile e contribuire al conseguimento di miglioramenti significativi e misurabili dell'ambiente in Europa, fornendo ai responsabili delle decisioni politiche e al pubblico informazioni tempestive, mirate, pertinenti e attendibili (S10).

Mantenimento; Culturali, da cui si diramano una serie di "Divisioni", "Gruppi" e "Classi" che tengono conto del fatto che gli effetti nell'uso dei SE si sviluppano su scale tematiche e spaziali diverse.

Anche l'IPBES<sup>5</sup> ha sviluppato una propria organizzazione dei Servizi Ecosistemici che definisce nuove caratteristiche rispetto al MEA, ma che è in gran parte coerente con CICES e con l'importanza delle funzioni di base degli ecosistemi alle diverse scale. Attualmente, questo rapporto costituisce la più aggiornata documentazione sullo stato di salute della biodiversità e dei servizi che gli ecosistemi offrono quotidianamente e gratuitamente al genere umano (Terzo Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale, 2019).

L'IPBES definisce tutti i contributi della natura alla qualità della vita degli esseri umani come *Nature's Contributions to People* (NCP) e su questi basa la classificazione dei SE distinguendoli in tre ampi gruppi:

- contributi di regolazione: comprendono gli aspetti funzionali e strutturali di organismi ed ecosistemi che modificano le condizioni ambientali in cui vivono le persone e/o sostengono e/o regolano la generazione di benefici materiali e immateriali quali, ad esempio, la depurazione delle acque, la regolazione del clima, la regolazione dell'erosione del suolo, ecc. I S.E. di regolazione definiti nel MEA e nel CICES rientrano ampiamente in questa categoria;
- contributi materiali: comprendono le sostanze, gli oggetti o altri elementi materiali della natura che sostengono l'esistenza fisica delle persone e delle infrastrutture necessarie per il funzionamento di una società o di un'impresa. Normalmente vengono "consumati" fisicamente durante il processo di utilizzo, ad esempio quando piante o animali vengono trasformati in cibo, energia o materiali vari. Questa categoria comprende i S.E. di approvvigionamento definiti nel MEA e nel CICES;
- contributi immateriali identificano il contributo della natura alla qualità soggettiva della vita culturale delle persone, sia individualmente che collettivamente. Le risorse o funzioni che forniscono questa tipologia di contributi possono essere fisicamente consumate durante il processo (ad esempio emozioni date dalla pesca ricreativa o dalla caccia) oppure conservate quali fonte di ispirazione, di equilibrio emotivo. Molti S.E. culturali del MEA rientrano in questa categoria.

Per quanto riguarda i servizi di supporto definiti nel MEA, l'IPBES li identifica come proprietà di un ecosistema e sono quindi inclusi nel quadro concettuale come parte dell'elemento "natura" e non come categoria di NCP.

Lo sviluppo di molteplici forme di analisi e classificazioni dei Servizi Ecosistemici, riflette un'evoluzione concettuale basata su più di un decennio di pensiero interdisciplinare, caratterizzata da un crescente coinvolgimento delle scienze sociali e umane. Nelle varie accezioni di questo concetto risulta evidente una trasversalità dei temi trattati e una forte interdipendenza tra le funzioni e i benefici che essi forniscono; per questo motivo, non è possibile asserire l'esistenza di una loro classificazione arbitraria.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> L'IPBES, *Intergovernmental Science Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, è un'organizzazione intergovernativa indipendente istituita nella città di Panama nel 2012 e costituita da 94 governi con lo scopo di rafforzare i rapporti tra politica scienza in materia di biodiversità e servizi ecosistemici, e di conservare e garantire un utilizzo sostenibile di questi valori e il benessere umano a lungo termine (S11).

Ai fini del presente lavoro si è preferito adottare una classificazione che consente di associare i vari servizi alle tre macro-aree di riferimento, con lo scopo di agevolare l'identificazione delle relazioni tra funzioni del verde e campi della sostenibilità urbana. La classificazione così impostata prevede una divisione dei Servizi Ecosistemici in ambientali, socio-culturali ed economici; ai primi verrà dedicata una maggiore attenzione in quanto rappresentano un aspetto fondamentale per lo sviluppo del presente lavoro.

#### 2.2.1 S.F. Ambientali

I benefici apportati dal verde urbano alla sostenibilità ambientale assumono un significato particolarmente attuale se si considerano i cambiamenti che negli ultimi anni hanno ampiamente influenzato la vivibilità delle metropoli. Dal punto di vista ambientale, infatti, le aree verdi contribuiscono a mitigare l'inquinamento delle matrici aria, acqua e suolo ristabilendone un certo grado di qualità.

Per quanto riguarda la **matrice aria**, la vegetazione urbana può fungere da elemento filtrante per polveri e gas antropici e da rilevatore passivo della loro presenza. Diversi studi condotti sugli effetti fitotossici degli inquinanti atmosferici hanno, infatti, messo in evidenza come le specie vegetali reagiscono in maniera differente nei confronti di un certo tipo di inquinante. Esse possono presentare una risposta che varia da molto suscettibile (riportando danni anche a seguito di brevi esposizioni e basse concentrazioni) a notevolmente resistente. Sulla base di questi aspetti, le specie più sensibili possono fungere da strumento di monitoraggio dei livelli di inquinamento, mentre quelle più resistenti possono costituire degli elementi attivi nella riduzione delle concentrazioni di contaminanti (Bellomo, 1997).

Gli inquinanti considerati nocivi per la salute dell'uomo, degli animali e di alcune specie di piante sono il particolato (PM2.5 e PM10), l'ozono troposferico, il biossido di azoto e il biossido di zolfo (Strategia nazionale del verde urbano, 2018).

Il processo di rimozione degli inquinanti da parte delle popolazioni arboree può avvenire attraverso vari meccanismi, ovvero tramite assorbimento e successiva metabolizzazione oppure tramite deposizione secca. Il primo metodo riguarda i composti più reattivi, quale ad esempio l'ozono, che interagiscono con le superfici fogliari, oppure quelli più stabili che penetrano le camere stomatiche. In questo caso la rimozione avviene nei tessuti vegetali attraverso la disattivazione del gas per assorbimento dei composti tossici, inattivazione degli stessi all'interno dei tessuti cellulari, per precipitazione ed immagazzinamento, e, infine, per utilizzazione dei medesimi attraverso la metabolizzazione ossidativa delle piante (Bellomo, 1997). Il processo di deposizione secca, invece, è un metodo di rimozione degli inquinanti che, senza coinvolgere l'acqua presente in atmosfera, determina un flusso di sostanze verso il basso, dall'atmosfera all'apparato fogliare degli alberi e degli arbusti. Tale fenomeno interessa soprattutto l'inquinamento da particolato e risulta essere più efficace su foglie poco mobili e tomentose, cioè dotate di peli superficiali.

La presenza di spazi verdi all'interno di un contesto urbano, specialmente di alberature, rappresenta una delle possibili strategie per contrastare l'effetto serra tramite la fondamentale funzione di sequestro e stoccaggio di anidride carbonica svolta dalle piante. Nello specifico, lo stoccaggio di carbonio consiste nel processo di fissazione di questo elemento nei tessuti vegetali durante il processo di crescita dell'individuo arboreo, mentre il sequestro di carbonio è la rimozione dell'anidride carbonica dall'atmosfera attraverso la fotosintesi clorofilliana. Entrambi questi meccanismi sono proporzionali all'aumento della biomassa fogliare e influenzati dal processo di crescita delle piante, quindi dal loro

tasso di crescita e di mortalità, funzione, a loro volta, della specie, dell'età, della struttura e del grado di salute degli individui.

La matrice aria giova della presenza di vegetazione anche in termini di riduzione dell'inquinamento rumoroso e luminoso, e di termoregolazione mitigando il fenomeno delle isole di calore, interrompendo l'azione del vento e contenendo gli stress climatici.

Le isole di calore rappresentano porzioni di territorio urbano in cui la temperatura è significativamente più elevata rispetto all'ambiente naturale e rurale circostante, specialmente nelle ore notturne<sup>6</sup>. Il disagio climatico degli ambienti urbani deriva dal surriscaldamento dell'aria dovuto al calore, alle polveri, agli inquinanti prodotti dalle attività cittadine, dalle caratteristiche fisiche dei materiali che compongono le infrastrutture grigie e dalla conformazione del tessuto della città, ovvero dalla dimensione e dalla dislocazione degli edifici all'interno del contesto urbano.

Nel centro delle città, la grande concentrazione di aree edificate e pavimentazioni stradali, unite alla elevata conducibilità termica di alcuni materiali, quale il cemento armato, determinano un assorbimento del 10% in più di energia solare rispetto ad una corrispondente area coperta da vegetazione (Figura 2.2) (Bellomo, 1997). Si tratta di una realtà

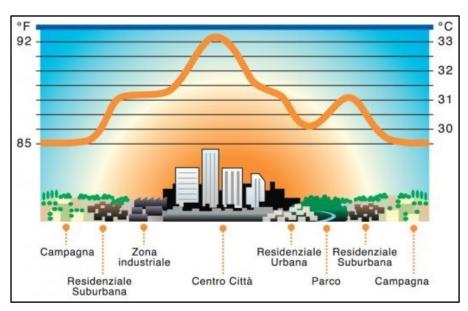


Figura 2.2 Fenomeno dell'isola di calore tipico dei centri urbani (S12)

riscontrata in tutte le più grandi città del mondo, indipendentemente dalla loro estensione e posizione geografica la cui entità varia tra i 4°C ad Atene e Sidney fino a 12°C nella metropoli di Tokyo (Terzo Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale, 2019).

In tale contesto la presenza di alberi risulta essere una valida azione di mitigazione del fenomeno in quanto assorbono parte della radiazione visibile, la più calda, e la trasformano in energia biochimica attraverso il processo fotosintetico, meccanismo che determina una riduzione della radiazione solare incidente sugli edifici. Inoltre, poiché un manto verde emette meno radiazioni nell'infrarosso rispetto ai

temperatura tra città e campagna qualche ora dopo il tramonto e la differenza minima nelle prime ore del pomeriggio (Bellomo, 1997).

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Il fenomeno delle isole di calore si manifesta in maniera più accentuata durante le ore notturne in quanto l'irraggiamento infrarosso del calore accumulato durante il giorno viene intercettato dagli edifici che si fronteggiano, anziché disperdersi nello spazio. Inoltre, i sistemi di condizionamento dell'aria degli ambienti confinati e il traffico autoveicolare aggravano la situazione generando calore artificiale. Questi fenomeni motivano la differenza massima di

materiali artificiali, la presenza di alberi modifica gli scambi radiativi ad onde lunghe tra le superfici e l'ambiente regolando le variazioni di temperatura.

Un ultimo importante beneficio apportato dalle popolazioni arboree alle realtà urbane è la regolazione del microclima cittadino nella misura in cui le piante per poter assumere l'anidride carbonica dell'atmosfera perdono acqua sotto forma di vapore. Si tratta del processo di evapotraspirazione legato alla fotosintesi clorofilliana che comporta un assorbimento di energia termica.

Tutti questi aspetti hanno un ulteriore risvolto positivo, ovvero implicano una minore necessità di ricorrere al condizionamento artificiale degli edifici e, di conseguenza, hanno un impatto positivo indiretto sui consumi energetici, sulla qualità dell'aria e sul surriscaldamento globale.

I Servizi Ecosistemici offerti dalla vegetazione alle **matrici suolo e acqua** si esplicano attraverso diversi processi tra cui il mantenimento della biodiversità. La creazione di habitat, anche di piccole dimensioni, favorisce il mantenimento della variabilità genetica all'interno delle popolazioni biologiche consentendo a molte specie vegetali e animali di affrontare e superare vicissitudini ecologiche quali i cambiamenti climatici, la comparsa di nuovi parassiti, predatori e competitori, e sviluppando in esse maggiori capacità di adattamento e di sopravvivenza. Risulta dunque necessario mantenere un adeguato livello di biodiversità tramite la presenza di elementi di connessione e continuità fisica e funzionale tra le aree urbane e peri-urbane.

Un'altra importante funzione svolta dalle aree verdi è la protezione del territorio. L'aumento della ricorrenza di eventi meteorologici di intensità tale da innescare fenomeni di instabilità e dissesto rende sempre più evidente come foreste urbane possano svolgere importanti funzioni anche dal punto di vista della pubblica sicurezza. Nello specifico, la presenza di aree permeabili comporta un aumento dei tempi di corrivazione del bacino, favorisce i processi di infiltrazione e ricarica delle acque sotterranee, rallenta il deflusso verso le reti di smaltimento e verso i corsi d'acqua ricettori, riduce il potere erosivo delle piogge, determina un effetto di depurazione idrica e contiene i danni derivanti dal dissesto idrogeologico (Strategia nazionale del verde urbano, 2018).

#### 2.2.2 S.E. Socio – Culturali

I benefici immateriali generati dalla presenza di Capitale Naturale nelle aree metropolitane riguardano la disponibilità di spazi ricreativi che favoriscono opportunità di aggregazione e integrazione sociale, incoraggiano le attività sportive e conservano i valori storico-sociali ed ambientali e ne promuovono lo sviluppo.

Il verde urbano, inoltre, introduce colori e odori mutevoli durante l'anno consentendo alla città di rimanere connessa ai ritmi naturali e di svolgere un ruolo di stimolo "sensoriale". Le aree verdi, infatti, offrono ai cittadini la possibilità di sperimentare il contatto diretto con i cicli naturali e gli elementi della flora e della fauna locale, contribuendo in questo modo all'educazione ambientale di giovani e adulti, alla ricerca scientifica nonché alla formazione di una cultura di conoscenza e rispetto della natura in generale (Linee guida per la gestione del verde urbano e prime indicazioni per una pianificazione sostenibile, 2017).

Infine, numerosi studi hanno constatato che la presenza di vegetazione all'interno del contesto urbano fornisce ampi benefici per la salute dei cittadini grazie alla riduzione della mortalità per malattie cardiovascolari e delle vie respiratorie, alla diminuzione dei livelli di stress e dei problemi di salute legati

al calore. Essa, inoltre, ha un impatto positivo sulla salute mentale, sul benessere psicologico e, in ambito sanitario, favorisce la convalescenza dei degenti.

Risvolti positivi sulla salute umana prodotti dalla presenza di alberi sono anche determinati dall'attenuazione dell'inquinamento acustico e dal controllo dell'abbagliamento urbano, effetti che contribuiscono al rilassamento e alla riduzione dei livelli di stress (Urban Watershed Forestry Manual, 2005).

#### 2.2.3 S.E. Economici

Si definiscono Servizi Ecosistemici economici quei benefici che influenzano direttamente o indirettamente il mercato o specifiche attività economiche e produttive, generando ricchezza in termini di flussi monetari.

Tra i settori economici che più direttamente beneficiano dalla presenza di aree verdi c'è sicuramente quello turistico, che vede nella componente naturale paesaggistica uno dei fattori portanti per la qualità, l'attrattività e l'immagine dei servizi offerti. Anche il mercato immobiliare risente positivamente della presenza di aree verdi che, oltre a migliorare la qualità estetica dei quartieri, determinano un incremento del valore commerciale degli immobili (Gestione ecosistemica delle aree verdi urbane: analisi e proposte, 2009).

Considerando, invece, le funzioni di mitigazione della temperatura e dell'inquinamento dell'aria, i S.E. economici possono essere tradotti in costi evitati dalle amministrazioni e, quindi, in risparmi per la collettività. Per quanto riguarda la mitigazione della temperatura, infatti, un'attenta progettazione e gestione delle aree verdi può favorire una riduzione del fabbisogno di energia in termini di raffrescamento e di riscaldamento degli edifici. Dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico, invece, la presenza di vegetazione produrrebbe una riduzione della spesa sanitaria grazie al miglioramento della qualità dell'aria e, conseguentemente, delle condizioni di salute dei cittadini (il nostro Paese risulta essere lo Stato membro UE più colpito in termini di mortalità connessa al particolato, con più di 66.000 decessi prematuri all'anno) (Strategia nazionale del verde urbano, 2018).

Anche il beneficio apportato degli alberi urbani in termini di protezione del territorio ha un risvolto economico, soprattutto se si considerano le significative spese necessarie per interventi di ripristino dei danni causati da eventi alluvionali.

Sulla base di quanto esposto, si evince che investire nella realizzazione di aree verdi permette di conservare per lunghi periodi il Capitale Naturale e le sue potenzialità, aspetto che risulta essere di gran lunga più vantaggioso rispetto a dover sostituire i servizi perduti mediante soluzioni tecnologiche e artificiali, che nella maggior parte dei casi si rivelano essere decisamente più costose.

L'analisi di queste tre categorie di Servizi Ecosistemici pone in evidenza il carattere multifunzionale della natura urbana, la gamma dei suoi molteplici servizi e degli impatti positivi che essa può fornire facendo emergere in maniera evidente l'aspetto interdisciplinare di questa tematica.

#### 2.3 Valutazione monetaria

La concezione dei Servizi Ecosistemici vista con prospettiva del Capitale Naturale comporta due conseguenze logiche, ovvero che la produzione di Servizi Ecosistemici ha due terminali, l'umanità e la natura stessa, e che esiste un ambito della natura che non è direttamente rivolto a noi, non è risorsa, non è servizio, non è uso e consumo e, per certi versi, non è neanche Capitale ma bensì è un super-Capitale (Terzo Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale, 2019).

Questa visione consente di articolare il concetto di natura su tre livelli:

- il primo (Capitale Naturale) è la natura intesa come risorsa disponibile, se pure con giudizio e sostenibilità;
- il secondo (Capitale Naturale) è la natura intesa come patrimonio indisponibile, ovvero sono le riserve di natura che fanno sì che non si generi debito ecologico e potenzialmente la catastrofe;
- il terzo (super-Capitale Naturale) è la natura intangibile, il cui valore di patrimonio speciale è il valore intrinseco.

Considerato che oggi tutti gli ecosistemi della Terra sono stati modificati dall'uomo (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) e che il degrado dei servizi da essi forniti rappresenta una vera e propria perdita di Capitale Naturale, si rende necessario integrare il concetto di Servizi Ecosistemici nelle decisioni di gestione e pianificazione territoriale, nonché all'interno delle valutazioni economiche.

De Groot et al., nel 2012, hanno presentato i risultati di un'analisi condotta sul valore monetario dei Servizi Ecosistemici forniti da 10 biomi<sup>7</sup> dai quali emerge che la maggior parte dei valori degli ecosistemi non sono di mercato poiché derivano intrinsecamente delle risorse naturali, apparentemente mantenute integre e, pertanto, risultano essere benefici pubblici non negoziabili. Per questo motivo, nella maggior parte delle società, un notevole numero di servizi naturali sono considerati gratuiti o con nessun riflesso nel loro costo del valore reale del loro utilizzo, e, conseguentemente, coloro che ne beneficiano non sono tenuti a sostenere alcuna spesa per il loro godimento.

La valutazione dei benefici che il verde genera per la società risulta, dunque, un'operazione complessa soprattutto poiché molti di questi non sono completamente inclusi nel mercato e, pertanto, non sono quantificati adeguatamente in termini comparabili con i servizi economici e il capitale manifatturiero. Ad esempio, l'unico "valore di mercato" che è possibile attribuire ad una foresta è quello che si può ottenere dalla commercializzazione del legname, anche se in realtà la foresta intatta può assumere un valore molto maggiore per il suo contributo al controllo idrico, alla regolazione climatica ed al turismo.

In realtà, l'aspetto che bisognerebbe veramente considerare è che le economie del mondo subirebbero una forte frenata senza il supporto vitale dei Servizi Ecosistemici. In tal senso, il loro valore economico dovrebbe essere infinito o, comunque, una loro valutazione in termini monetari potrebbe fornire una

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Si definisce bioma un'ampia porzione di biosfera individuata e classificata in base al tipo di vegetazione dominante, se terrestre, o alla fauna prevalente, se acquatica. Poiché la vegetazione influenza la presenza di specie animali, in un bioma sono presenti popolazioni e comunità di esseri viventi (pluricellulari e unicellulari, anche microscopici) che interagiscono fra loro (S13).

stima dei benefici ambientali, sociali e culturali che andrebbero persi nel caso in cui questi fossero distrutti o, guadagnati, se venissero ristabiliti (de Groot et al., 2012).

Conoscere il valore economico totale delle risorse e dei beni ambientali è quindi importante per aumentare la consapevolezza e trasmettere l'importanza degli ecosistemi e della biodiversità alla popolazione, per compiere scelte di sviluppo più razionali, per dare un valore alle politiche di tutela dell'ambiente e individuare le regioni più fragili dove il cambiamento è più probabile.

Numerosi sforzi sono stati compiuti per giungere ad una valutazione monetaria dei S.E. che sia quanto più universale possibile. Tuttavia, questa rimane fortemente vincolata ad una serie di variabili quali le condizioni climatiche locali, i consumi, i fattori demografici, politici ed economici, le tecnologie e la cultura. Ne consegue che le stime del Capitale Naturale, sono generalmente riferite a scale locali con lo scopo di motivare lo sviluppo sostenibile urbano, indirizzare le scelte verso una politica ambientale e localizzare le aree che più necessitano di interventi di riqualificazione.

Anche a livello locale, però, il valore economico fornito da un servizio varia significativamente a seconda dei livelli di reddito della popolazione, della distanza tra il beneficiario e il servizio, dell'accessibilità allo stesso e della presenza di servizi sostitutivi e/o complementari al servizio monetizzato (de Groot et al., 2012). In questa direzione, la percezione del valore di alcuni S.E. varia anche in funzione della scala temporale e spaziale che si considera; ad esempio se si esamina il valore offerto dal turismo e dalle attività ricreative, questo non deriva necessariamente dalla comunità locale, bensì sono i visitatori non locali o internazionali che beneficiano del servizio, così come la mitigazione del cambiamento climatico messa in atto dal sequestro di carbonio a livello locale produce benefici risentiti a livello globale.

Sulla base di quanto esposto, risultano evidenti le difficoltà nella quantificazione monetaria dei S.E. offerti dalla vegetazione al contesto urbano, così come, allo stesso modo, risulta però fondamentale il perseguimento di tale obiettivo.

Con la legge n. 221 del 2015 "Disposizioni in materia ambientale per promuovere misure di green economy e per il contenimento dell'uso eccessivo di risorse naturali", noto anche come "Collegato Ambientale", il tema della quantificazione della valutazione economica dei Servizi Ecosistemici diventa di fatto norma di legge. Nello specifico, questa legge introduce una nuova forma di remunerazione dei S.E., i PES (*Payment for Ecosystem Services*), finalizzata al recupero e alla salvaguardia dei sistemi ecologici e dei servizi da essi forniti.

Più che di un pagamento, si tratta di uno scambio: il termine PES indica, infatti, una transazione volontaria in cui uno specifico Servizio Ecosistemico (o un tipo di uso del suolo che ne assicuri la fornitura) è venduto da almeno un venditore ad almeno un compratore se e solo se il fornitore del suddetto servizio ne garantisce l'erogazione. Nell'uso corrente, PES è una denominazione che comprende tutta una serie di incentivi e meccanismi di mercato volti a tradurre valori ambientali non di mercato in reali incentivi finanziari per gli attori locali affinché con certificazioni volontarie, buone pratiche e comunicazione ambientale, promuovano e supportino il mantenimento delle molteplici funzioni ecologiche offerte dalla biodiversità e dal capitale naturale (S14).

Un esempio concreto di PES è l'accordo liberamente sottoscritto tra l'azienda fornitrice dei servizi idrici della città di New York e i proprietari forestali del bacino di captazione. In base a tale accordo i proprietari si sono impegnati a gestire i propri boschi secondo uno specifico programma di gestione forestale

compatibile con il mantenimento di un deflusso idrico a valle di qualità e quantità costanti nel tempo. La compensazione per il mantenimento di tale servizio, definito acqua potabile, viene corrisposta dagli utenti finali attraverso un'addizionale sulla tariffa idrica, garantendo ai proprietari forestali un flusso annuo e costante di reddito. Nonostante il pagamento di questa cifra addizionale, il programma ha permesso un risparmio parziale di spesa di circa 6-9 miliardi di dollari che sarebbero stati necessari per la realizzazione impianti di depurazione, spesa che, comunque, sarebbe gravata sui cittadini (S14).

Per aver un'idea dello spessore economico dei Servizi Ecosistemici, è sufficiente pensare che il Comitato per il Capitale Naturale, istituito dalla legge n. 221/2015 e presieduto dal Ministro dell'Ambiente, ha stimato che nel 2015 il valore complessivo dei Servizi Ecosistemici italiani è stato pari a 338 miliardi di euro (Strategia nazionale del verde urbano, 2018).

#### 2.4 Politiche a tutela

Politiche governative nazionali e internazionali promuovono e realizzano strumenti e iniziative sia per la valorizzazione del Capitale Naturale sia per l'impostazione di una contabilità ambientale, favorendo l'integrazione della biodiversità negli strumenti di programmazione, nell'attuazione delle misure e nella pianificazione territoriale.

Nei due sottoparagrafi successivi si analizzano alcuni degli innumerevoli strumenti messi in atto per il raggiungimento di tali obiettivi e quindi, più nel dettaglio, per la valorizzazione degli spazi verdi, sia a livello internazionale che nazionale.

# 2.4.1 Il contesto internazionale: Piano Strategico della Convenzione sulla Diversità Biologica e Agenda 2030

L'importanza di effettuare quantificazioni biofisiche e stime monetarie per misurare da un lato i costi ambientali associati allo sfruttamento della biodiversità, dall'altro i servizi offerti per il benessere umano, è stata riconosciuta nell'ambito delle Nazioni Unite, attraverso la definizione degli "Obiettivi di Sviluppo Sostenibile" dell'Agenda 2030 (*Sustainable Development Goals*, SDGs) e dal Piano Strategico 2011-2020 della "Convenzione sulla Diversità Biologica" (*Convention on Biological Diversity*, CBD).

La **Convenzione sulla Diversità Biologica** è un trattato internazionale adottato nel 1992 a Nairobi, stipulato attualmente tra 196 Paesi, definiti anche Parti, che ha lo scopo di tutelare la diversità biologica, l'utilizzazione durevole dei suoi elementi e la giusta ripartizione dei vantaggi derivanti dallo sfruttamento delle risorse genetiche.

Alla decima Conferenza delle Parti della CBD, a Nagoya in Giappone (2010), è stato concordato il "Piano Strategico per la Biodiversità 2011-2020" e i relativi 20 obiettivi chiamati *Aichi Targets* (S15). In questa occasione, il concetto di biodiversità definito nel nuovo Piano prevede "un mondo che viva in armonia con la natura dove la biodiversità sia valutata, preservata, ripristinata e saggiamente utilizzata, mantenendo i Servizi Ecosistemici, sostenendo un Pianeta sano e fornendo a tutti i benefici essenziali". La missione del Piano Strategico è dunque quella di avviare azioni urgenti ed efficaci al fine di arrestare la perdita di biodiversità in modo tale da assicurare che gli ecosistemi abbiano capacità di recupero e continuino a fornire i servizi essenziali assicurando la varietà di vita sul pianeta e contribuendo al benessere umano.

L'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, invece, è un programma adottato da tutti gli Stati membri delle Nazioni Unite nel 2015, che fornisce un modello condiviso di pace e prosperità per le persone e il pianeta. Il fulcro tematico di questa iniziativa sono i 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (Figura 2.3) che rappresentano un invito urgente all'azione da parte tutti i Paesi, sviluppati e in via di sviluppo. Questi, tramite il perseguimento degli SDGs, riconoscono che l'annullamento della povertà e delle altre privazioni devono andare di pari passo con le strategie che migliorano la salute e l'istruzione, riducono le disuguaglianze e stimolano la crescita economica, tutto questo affrontando i cambiamenti climatici e operando per preservare gli ecosistemi (S16).



Figura 2.3 Obiettivi di sviluppo sostenibile previsti dall'Agenda 2030 (S16)

I 17 obiettivi dell'Agenda 2030 perseguono, inoltre, il principio di sostenibilità secondo cui questa generazione deve essere certa di lasciare alla prossima uno stock di capitale naturale non inferiore a quello che possiede ora o, comunque, una quantità di risorse sufficiente e di buona qualità che costituisca il presupposto per il raggiungimento di un certo livello di benessere. Si tratta di una sfida ambiziosa indirizzata a tutta l'umanità con lo scopo di integrare e bilanciare le tre dimensioni dello sviluppo sostenibile (economico, sociale e ambientale).

Questi concetti sono rafforzati da una versione gerarchica degli obiettivi (Figura 2.4) basata su una delle figure iconiche del "Stockholm Resilience Centre", ovvero "la torta nuziale" sviluppata da Johan Rockström e da Pavan Sukhdev (Terzo Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale, 2019).

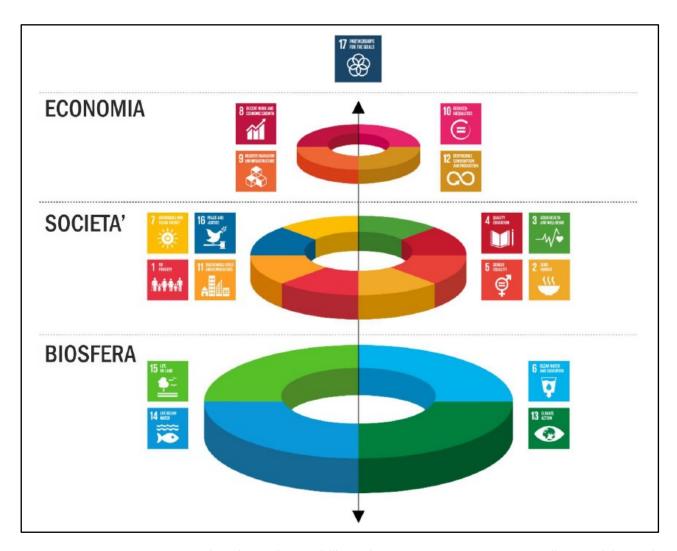


Figura 2.4 Rappresentazione gerarchica dei 17 obiettivi dell'Agenda 2030 [Fonte: Terzo Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale, 2019]

Questa rappresentazione sottolinea come le economie e le società sono parti incorporate e dipendenti dalla biosfera e dalle sue risorse. Infatti, l'anello di base che supporta la società e l'economia è caratterizzato proprio dagli obiettivi di funzionalità degli ecosistemi terrestri e acquatici e dagli obiettivi di qualità attraverso azioni di adattamento al cambiamento climatico. Da questa visione emerge un ribaltamento del punto di vista odierno che non concepisce più l'economia come struttura portante della società, ma bensì come una sovrastruttura di relazioni tra gli uomini. Al contrario, la base della "torta" è costituita dalla biosfera e ha lo scopo di sottolineare come l'ambiente sia un elemento di sostegno per la vita.

È evidente che questa visione prevede una ricentralizzazione della natura nelle scelte di sviluppo future e l'individuazione di soluzioni alternative che siano al tempo stesso efficienti ed economicamente convenienti secondo un approccio pluridisciplinare ed integrato.

Sulla base di quanto esposto nei paragrafi precedenti e in funzione di quanto appena descritto, la ricerca di modelli di "resilienza urbana" è dunque un tema di estrema attualità e soddisfa alcuni degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030, tra cui l'Obiettivo 11 (*Città e Comunità sostenibili*) e l'Obiettivo 13 (*Lotta contro il cambiamento climatico*). Proprio l'Obiettivo 11, tra le cui possibilità di realizzazione vi è l'inserimento di spazi verdi all'interno dei contesti urbani, promuove come conseguenza diretta il miglioramento della salute e del benessere dei cittadini e, dunque, risponde ad un ulteriore Obiettivo di

Sviluppo Sostenibile, ovvero il SDGs 3 (*Garantire una vita sana e promuovere il benessere di tutti e tutte le età*).

Anche la protezione del territorio, perseguita seguendo l'idea di creare città più sostenibili nelle quali la presenza di aree verdi assume sempre più importanza, rientra in un obiettivo dell'Agenda 2030, ovvero nel SDGs 15 (*Proteggere, ripristinare, favorire un uso sostenibile dell'ecosistema terrestre, gestire sostenibilmente le foreste, contrastare la desertificazione, arrestare e far retrocedere il degrado del terreno e fermare la perdita di diversità biologica*).

#### 2.4.2 Il contesto italiano: normativa in materia di verde urbano

La tutela degli ecosistemi e della biodiversità a livello nazionale è perseguita tramite una serie di leggi, trattati e accordi promossi da governi e associazioni.

Ne è un esempio la **Strategia Nazionale per la Biodiversità** di cui l'Italia si è dotata all'interno del contesto internazionale della Conferenza per la Difesa della Biodiversità. Si tratta di uno strumento di fondamentale importanza per garantire una reale integrazione fra gli obiettivi di sviluppo del Paese e la tutela di questo patrimonio. Nello specifico, tale strumento prevede l'elaborazione, con cadenza biennale, di un rapporto sull'attuazione e l'efficacia della Strategia stessa; a tal fine, è stato predisposto un set preliminare di 10 indicatori che mirano a rappresentare e valutare lo stato della biodiversità italiana, e 30 indicatori di valutazione atti a stabilire l'efficacia delle azioni svolte dal Paese nel raggiungimento di tali obiettivi (S17).

In tema di conservazione della biodiversità e dei Servizi Ecosistemici nelle politiche economiche e di settore, il Ministero ha introdotto la legge n. 221 del 2015, "Disposizioni in materia ambientale per promuovere misure di green economy e per il contenimento dell'uso eccessivo di risorse naturali", noto anche come "Collegato Ambientale". Questo strumento istituisce il "Comitato per il Capitale Naturale" (CNN) tra le cui attività vi è la redazione annuale del "Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale in Italia" presieduto dal Ministro dell'Ambiente, della Tutela del Territorio e del Mare (Strategia nazionale del verde urbano, 2018).

Questo documento, giunto nel 2019 alla sua terza edizione, ha il compito di evidenziare ai *policy makers* il fondamentale ruolo ricoperto dal Capitale Naturale italiano rispetto al sistema socio-economico del Paese, elaborando schemi concettuali, migliorando la conoscenza della risorsa e affinando i modelli di misurazione della stessa e degli impatti delle politiche su di essa (S18).

All'interno di queste tematiche di tutela della biodiversità e dei S.E., si pone il verde urbano, la cui presenza nelle aree metropolitane fornisce una serie di benefici ormai ampiamente riconosciuti tanto dalla letteratura scientifica quanto dalle agende politiche. Per la sua natura di bene pubblico e risorsa comune, il verde urbano deve essere considerato oggetto di specifiche politiche pubbliche (Gestione ecosistemica delle aree verdi urbane: analisi e proposte, 2019).

In questa direzione si colloca la **legge n.10 del 2013, "Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani**" che promuove lo sviluppo sostenibile dei contesti urbani e riconosce l'importante ruolo che gli alberi e le aree verdi rivestono nel controllo delle emissioni gassose, nella protezione del suolo, nel miglioramento della qualità dell'aria, del microclima e della vivibilità delle città.

Questa legge promuove, oltre ad una serie di misure di incremento delle aree verdi (artt. 3 e 6), di tutela degli alberi monumentali (art. 7) e di misure di supporto all'azione politica, anche attività locali di

sensibilizzazione pubblica (artt. 1 e 2) tra cui la piantumazione di un albero per ogni bambino nato o adottato nei comuni sopra ai 15.000 abitanti, la necessità per questi Comuni di dotarsi di un catasto degli alberi e l'obbligo da parte degli amministratori di produrre un bilancio del verde a fine mandato che dimostri l'impatto delle loro attività di pianificazione e gestione del verde pubblico.

Vi è poi una serie di provvedimenti, programmi, piani o progetti attuati dalle pubbliche amministrazioni che interessano l'ambiente urbano tra cui il "Piano del Verde" e il "Regolamento del Verde".

Il **Piano del verde urbano** è uno strumento di pianificazione integrativo del Piano Regolatore Generale<sup>8</sup> (PRG) che interessa la scala comunale, il cui elemento centrale è la determinazione del punto compensativo di equilibrio, cioè la dotazione di verde che compensa le emissioni di gas e il consumo di prodotti agroforestali necessari all'interno dell'area urbana (Strumenti di pianificazione del verde urbano in Italia, 2008). Si tratta dunque di un piano strategico per la realizzazione di una struttura verde che ha il fine di mitigare l'impatto ambientale dell'attività cittadina sul territorio garantendo un uso più razionale delle risorse ambientali.

Anche il **Regolamento del verde urbano** costituisce uno strumento di pianificazione comunale integrativo del PRG che permette un'organica gestione del verde cittadino. Il Regolamento ha carattere prevalentemente prescrittivo e, nella quasi totalità dei casi, contiene norme sulla progettazione, l'attuazione e la manutenzione del verde pubblico e privato. Esso suggerisce dunque le specie arboree e la disposizione spaziale degli alberi in funzione dello scopo previsto dal progetto, contiene disposizioni relative alle modalità di abbattimento, potatura, scavi e danneggiamenti, aree di cantiere, individuando sanzioni e norme finanziarie in caso di inadempienze.

L'obiettivo di tutela del verde e l'incentivo alla creazione di spazi aperti permeabili come strumento di sostenibilità urbana, non sono solo perseguiti attraverso la normativa nazionale e internazionale, bensì su questo tema sono state organizzate numerose conferenze, forum e convegni. Si riportano, a titolo esemplificativo, due eventi che hanno coinvolto in maniera attiva il territorio italiano e che hanno rappresentato uno stimolo conoscitivo all'applicazione finale del presente lavoro.

Il primo appuntamento internazionale sull'urbanizzazione verde inaugurato a Mantova nel 2018 è il **World Forum on Urban Forests**. Si tratta di un evento che ha visto il coinvolgimento di esperti provenienti da 50 Paesi del mondo, promosso dalla FAO (*Food and Agriculture Organization of United Nations*) e dedicato ad individuare strategie per un'urbanizzazione sostenibile (S19).

Il forum rappresenta un'opportunità per riunire stakeholders provenienti da Paesi diversi con cui scambiare esperienze di pianificazione, progettazione e gestione forestale urbana, e per consolidare gli impegni dei partecipanti a sfruttare sostenibilmente i benefici apportati dal verde urbano.

Ne è un esempio l'intervento tenuto dal vicesindaco Andi Seferi della città di Tirana (Albania) che, in occasione del secondo "World Forum on Urban Forests", ha esposto la realizzazione del Masterplan progettato da Stefano Boeri Architetti insieme a SON-Group per il centro cittadino della capitale albanese situato lungo il confine settentrionale del fiume Tirana (Figura 2.5) (S20).

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Il Piano Regolatore Generale è uno strumento urbanistico che considera la totalità del territorio comunale e che essenzialmente deve indicare la rete principale delle infrastrutture, la zonizzazione del territorio comunale, indicare gli spazi destinati ad uso pubblico e le aree destinate a fabbricati pubblici.



Figura 2.5 Esempio di riqualificazione urbana, Città di Tirana (Albania) (S20)

Si tratta di un ampio progetto di rigenerazione urbana che favorisce un'unione di aspetti funzionali e sociali all'interno di un distretto autosufficiente dal punto di vista dell'energia pulita, dell'acqua, del cibo e di tutti i servizi pubblici urbani. Tirana Riverside è, infatti, un progetto territoriale pensato per ospitare in egual numero alberi e abitanti con un totale di 12 mila piante appartenenti a diverse specie autoctone.

Il secondo incentivo internazionale alla divulgazione dei benefici apportati dagli spazi verdi all'interno del contesto urbano è il programma **Tree Cities of the World** (S21). Si tratta di un'iniziativa internazionale promossa da "Arbor Day Foundation" e dalla FAO, che ha lo scopo di riconoscere l'impegno da parte delle città di garantire un'adeguata manutenzione, gestione e celebrazione delle foreste urbane. L'obiettivo di questo programma è dunque quello di collegare le città di tutto il mondo in una nuova rete dedicata alla condivisione e all'adozione di approcci di maggior successo nella gestione delle comunità arboree.

Per essere riconosciuta "Città Albero", una comunità deve soddisfare cinque standard fondamentali che dimostrano l'impegno da parte della città nell'adozione di azioni volte alla cura del verde:

- STANDARD 1 Definire le responsabilità: la città deve possedere un ente dedicato alla gestione degli alberi;
- STANDARD 2 Individuare le regole: la città deve prevedere una normativa che regola la gestione delle alberature; nello specifico questa deve descrive le migliori pratiche o gli standard del settore per la cura degli alberi e la sicurezza dei lavoratori, e indicare i casi in cui applicare le sanzioni per non conformità;
- STANDARD 3 Conoscere il patrimonio: la città deve disporre di un inventario aggiornato della risorsa arborea locale in modo tale da poter stabilire un piano di gestione efficace nel lungo termine;
- STANDARD 4 Dedicare delle risorse: la città deve impiegare annualmente una quota parte delle risorse economiche per il piano di gestione e manutenzione della popolazione arborea;

 STANDARD 5 – Celebrare i risultati raggiunti: la città organizza annualmente eventi di sensibilizzazione dei cittadini sul tema degli alberi urbani.

L'iniziativa Tree City of the World fornisce un programma di silvicoltura urbana sano e sostenibile che conferma e incrementa i molteplici e sostanziali benefici apportati dal verde urbano e aiuta i residenti a sentirsi parte integrante del luogo in cui vivono consolidando in essi la consapevolezza che da questa risorsa, se gestita secondo i principi della sostenibilità, è possibile trarre benefici.

#### 2.5 Obiettivi della tesi

Sulla base di quanto esposto nel capitolo introduttivo e in quello relativo ai Servizi Ecosistemici, emerge che il verde urbano rappresenta un'importante risorsa da tutelare e gestire in quanto è in grado di fornire preziosi benefici ambientali e sociali dai quali è possibile trarre anche significativi vantaggi economici per la comunità.

La valutazione di tali benefici e dei relativi ricavi monetari è al centro dell'interesse di numerosi ricercatori che, grazie alle nuove tecnologie, hanno a disposizione software sempre più aggiornati capaci di creare modelli e ottenere una quantificazione di questi servizi.

La finalità del presente lavoro di tesi è quella di applicare uno di questi software, nello specifico la suite di software *i-Tree*, al caso del parco "Le Vallere" di Moncalieri (TO). Poiché si tratta di uno strumento nato negli Stati Uniti e in rapida espansione verso i Paesi esteri, se ne vuole verificare l'adattabilità applicandolo a porzioni di territorio di dimensioni sempre maggiori e verificandone l'attendibilità dei risultati. L'attività di ricerca svolta dal Politecnico di Torino in questo settore ha, infatti, precedentemente sperimentato l'applicazione di tale programma su aree di dimensioni modeste (piccoli parchi, giardini pubblici e/o privati) e in tale direzione intende procedere elaborando analisi su superfici di estensione maggiore fino a raggiungere la dimensione urbana, in modo particolare quella torinese.

Nei capitoli seguenti si procede con un'analisi generica delle caratteristiche della suite (Capitolo 3) e con una descrizione più dettagliata delle peculiarità, delle funzionalità e dei modelli di calcolo implementati nei software di due applicativi, *i-Tree Eco* (Capitolo 4) e *i-Tree Hydro* (Capitolo 5), impiegati per valutare e quantificare i Servizi Ecosistemici forniti dal parco oggetto di studio. Nello specifico, si è cercato di analizzare le relazioni tra input e output e le leggi fisiche ed empiriche su cui si basano gli algoritmi e i parametri che entrano in gioco in modo tale che il lettore possa riconoscere, da una parte, i dati necessari per ottenere le prestazioni e il livello di dettaglio desiderati, dall'altra apprendere con quali modelli matematici vengono analizzati i dati introdotti all'interno del sistema.

Segue il Capitolo 6 contenente il resoconto e l'interpretazione dei risultati ottenuti dall'applicazione dei programmi al caso del parco "Le Vallere" di Moncalieri e un ultimo capitolo (Capitolo 7) in cui vengono riportate le conclusioni con le opportune considerazioni.

### 3. I-TREE

#### 3.1 Generalità sul software

*i-Tree* è una suite di software finalizzata, come mostrato dal logo in Figura 3.1, all'analisi del verde urbano. In particolare, si tratta di una raccolta di strumenti di analisi che, attraverso modelli di calcolo, fornisce una valutazione ed una quantificazione dei Servizi Ecosistemici offerti dalla vegetazione alla città.

Questo pacchetto di programmi è stato sviluppato nel 2006 da una partnership tra diverse associazioni statunitensi (*US Department of Agriculture, Davey Tree Expert Company, National Arbor Day Foundation, Society of Municipal Arborists, International Society of Arboroculture a Casey Trees*) con lo scopo di rafforzare la gestione responsabile delle risorse naturali a livello globale; attualmente è gestito dal Servizio Forestale del Dipartimento di Agricoltura degli Stati Uniti<sup>9</sup> (*USDA Forest Service*) (S22).



Figura 3.1 Logo della suite i-Tree (S22)

*i-Tree* offre diverse applicazioni, alcune con interfaccia desktop altre basate sul web, ognuna delle quali è pensata per esaminare un aspetto differente dell'ecosistema quantificando su scale diverse i benefici derivanti dalle popolazioni arboree e assegnando a ciascuno di questi un valore economico. In funzione delle analisi condotte e dei risultati forniti all'utenza, questi applicativi possono risultare utili per un miglioramento dell'attività di pianificazione territoriale strategica, della gestione e del coordinamento del servizio di manutenzione delle aree verdi.

*i-Tree Tools* è un pacchetto di programmi open-source fruibile da organizzazioni, consulenti, volontari e studenti in tutto il mondo. Nonostante lo sviluppo e l'ampliamento della gamma del pacchetto sia avvenuto all'interno degli USA, nel tempo questa suite di software è stata adattata e resa accessibile a numerosi Paesi esteri quali il Canada, l'Australia, il Regno Unito, il Messico, la Corea del Sud, la Colombia e la maggior parte dei Paesi europei (Figura 3.2). Questi hanno stabilito un accordo di sviluppo cooperativo con il team di *i-Tree* diventando Paesi partner internazionali nei quali il software funziona in maniera analoga a come opera per gli utenti negli Stati Uniti. Questa cooperazione ha permesso di superare numerosi problemi legati all'inaccessibilità di alcuni programmi, alle imprecisioni delle analisi e alle limitazioni di numerose funzionalità che solitamente si presentavano in contesti che esulavano da quelli prettamente statunitensi.

\_\_\_

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Il Servizio Forestale è un'agenzia del Dipartimento di Agricoltura degli USA che opera nel settore della ricerca e dello sviluppo degli ecosistemi forestali e, nello specifico, garantisce un continuo aggiornamento della suite attraverso il potenziamento delle funzionalità e il miglioramento della precisione dei risultati (S23).



Figura 3.2 Distribuzione degli utenti della suite i-Tree nel mondo (ultimo aggiornamento agosto 2020) (S22)

Come anticipato in precedenza, la suite *i-Tree* include svariati strumenti di analisi e programmi di utilità di cui ne viene fornita una breve descrizione nel paragrafo che segue.

#### 3.2 Una suite di programmi

Lo sviluppo della suite di *i-Tree* negli Stati Uniti implica per le analisi condotte un riferimento alle condizioni climatiche, ambientali e sociali proprie di questo territorio per il quale è possibile sfruttare le massime potenzialità dei *tools*. Il crescente interesse verso questi applicativi maturato dai centri di ricerca universitari, dalle amministrazioni pubbliche e da svariate organizzazioni, ha prodotto una rapida diffusione del programma in tutto il mondo determinando l'inserimento in esso di dati inerenti i Paesi nei quali è stato applicato e rendendo sempre maggiori funzionalità disponibili al di fuori dei confini statunitensi.

Per tali motivi, l'esposizione dei vari programmi non viene effettuata sottolineando la distinzione tra quelli disponibili esclusivamente negli USA e quelli utilizzabili anche nei Paesi partner internazionali, bensì si preferisce accorparli in funzione delle tematiche ambientali che permettono di analizzare.

Per quanto riguarda la valutazione dei benefici apportati dalla popolazione arborea in termini di riduzione dell'inquinamento atmosferico e quindi di miglioramento della **qualità dell'aria**, è possibile utilizzare *i-Tree County*, *i-Tree Harvest Carbon Calculator*, *i-Tree Eco*, *i-Tree Database* e *i-Tree Streets*.

<u>i-Tree County</u> è un applicativo online che consente di valutare i numerosi benefici prodotti da un'area verde presente all'interno di una contea. Nello specifico, permette agli utenti di accedere ai dati di sequestro di carbonio, rimozione annuale di inquinamento atmosferico, al loro valore economico e ai corrispettivi danni evitati alla salute umana grazie al miglioramento della qualità dell'aria.

<u>i-Tree Harvest Carbon Calculator</u>, invece, stima il quantitativo di carbonio immagazzinato all'interno dei prodotti derivati dalla raccolta del legname generato da una coltura arborea. Si basa sul ciclo di questo elemento rappresentato in Figura 3.3 e fornisce risultati in funzione del volume del raccolto, della tipologia di legno e della regione geografica in cui viene effettuata l'analisi.

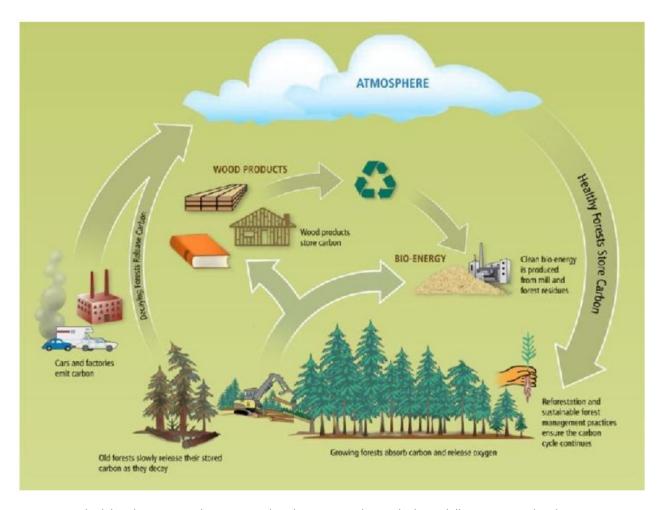


Figura 3.3 Ciclo del carbonio su cui è impostato il tool Harvest Carbon Calculator della suite i-Tree (S24)

Attualmente questi primi due *tools* sono disponibili solo nei territori statunitensi.

Un altro programma adatto all'analisi dei Servizi Ecosistemici forniti da foreste o gruppi di alberi è <u>i-Tree</u> <u>Eco</u>. Si tratta di un applicativo con interfaccia desktop che analizza la distribuzione e le caratteristiche della foresta urbana e i benefici da essa forniti sia in termini di riduzione dei quantitativi di inquinanti che di carbonio stoccato e sequestrato in funzione di dati raccolti in sito, di serie temporali delle precipitazioni meteoriche e delle concentrazioni degli inquinanti. Il programma, inoltre, ha carattere previsionale in termini di evoluzione dell'area verde oggetto di studio.

*i-Tree Eco* è dotato di uno strumento accessorio basato sul web ad integrazione del *tool* principale. Si tratta di *i-Tree Database*, ovvero di un applicativo al servizio degli utenti interessati a realizzare un progetto locato al di fuori degli Stati Uniti e dei Paesi partner internazionali per i quali i dati necessari all'utilizzo di *i-Tree Eco* sono già inglobati all'interno del programma. Gli utenti esteri, tramite questo pacchetto, hanno la possibilità di trasmettere al Servizio Forestale degli Stati Uniti i dati relativi ad una nuova località il quale li elabora, li convalida e li formattazione secondo una corretta impaginazione elettronica; infine, li importa all'interno di *i-Tree Eco* e li rende disponibili a tutti gli utenti per l'applicazione del modello. All'interno del *Database* è, inoltre, disponibile una sezione contenente una cospicua raccolta di specie vegetali a cui gli utenti possono accedere e inserire nuovi elementi. Questo sistema apre la suite ad un utilizzo mondiale di questi due programmi, sebbene le tempistiche della fase di approvazione dei dati possano risultare piuttosto prolungate.

L'ultimo strumento della suite predisposto per l'analisi di questi aspetti ambientali, è <u>i-Tree Streets</u>. Nello specifico, questo applicativo esamina le popolazioni arboree presenti lungo strade urbane definendo i Servizi Ecosistemici forniti delle piante sia in termini ambientali che culturali ed economici. Il programma richiede come dati di input informazioni inerenti gli individui arborei, quali il diametro del tronco e la specie cui essi appartengono, il numero di abitanti e il valore di alcuni beni, quali ad esempio il prezzo dell'elettricità. Questi ultimi consentono di stimare il valore monetario annuale delle prestazioni da fornite dalla popolazione arborea, dei costi maturati e di quelli necessari per le esigenze gestionali (piantagione, potatura, rimozione) restituendo alle amministrazioni locali il tornaconto economico dalla presenza di vegetazione.

In termini di **protezione del territorio**, invece, i Servizi Ecosistemici ambientali forniti dalla presenza di verde urbano possono essere esaminati attraverso gli applicativi *i-Tree Hydro*, *i-Tree Canopy* e *i-Tree Storm*. Tutti questi strumenti risultano disponibili non solo per i territori statunitensi ma anche per quelli esteri.

<u>i-Tree Hydro</u> è un applicativo con interfaccia desktop che determina l'andamento dei deflussi e la qualità delle acque all'interno della zona in esame in funzione delle diverse coperture del suolo. Si tratta di un modello idrologico specifico per la vegetazione il cui parametro fondamentale è la permeabilità superficiale del suolo in funzione della quella il ciclo idrologico del bacino può subire variazioni. Lo strumento è dotato di funzioni di autocalibrazione che contribuiscono a confrontare le stime del modello con i flussi orari rilevati da una stazione di misura.

Così come *i-Tree Eco* dispone di un programma ad esso subordinato, anche le analisi effettuate con *i-Tree Hydro* possono essere precedute dall'utilizzo di un altro pacchetto della suite, ovvero *i-Tree Canopy*. Si tratta di un applicativo che stima da un punto di vista statistico le varie tipologie di copertura del suolo mediante il campionamento di un numero di punti identificati casualmente sull'area di studio visualizzata mediante immagini aeree ("Google Maps") o shapefile in GIS (*Geographic Information System*).

Anche <u>i-Tree Storm</u> è un programma i cui risultati possono essere utili dal punto di vista della protezione del territorio. Nello specifico, questo tool quantifica i danni prodotti ad una alberatura conseguenti ad una tempesta o ad un evento meteorologico eccezionale stimandone i costi e le tempistiche necessarie per la mitigazione e il ripristino.

Esistono poi una serie di programmi predisposti per la progettazione di nuove aree verdi o per la **configurazione di scenari futuri** dell'area oggetto di studio. Questi pacchetti sono *i-Tree Design, i-Tree Planting Calculator, i-Tree Vue* e *i-Tree Species*.

Il primo, <u>i-Tree Design</u>, è un programma online che esamina i benefici energetici apportati dall'ecosistema agli edifici, in particolare a quelli residenziali. Nello specifico, mediante un collegamento a "Google Maps", consente di localizzare l'edificio oggetto di analisi definendo le specie arboree, la dimensione e la posizione degli alberi che forniscono la migliore soluzione. Questo applicativo permette dunque di valutare i benefici forniti dall'area verde sia nel presente che nel futuro ipotizzando la messa a dimora di nuovi alberi e/o modificando la posizione di quelli esistenti. L'utilizzo del *tool* è limitato a USA e Canada.

Così come *i-Tree Design*, anche *i-Tree Planting Calculator* è un applicativo utilizzabile online e disponibile solo per gli utenti statunitensi. Esso consente di stimare nel lungo periodo i benefici derivanti da un

nuovo progetto di piantumazione specialmente in termini di risparmio energetico e di riduzione di emissioni di gas ad effetto serra. I dati richiesti come input dal programma sono le caratteristiche della vegetazione nelle vicinanze di un edificio quali la specie, il numero di alberi, la distanza dal fabbricato, il tasso di crescita e di mortalità, e le aspettative di vita degli individui arborei piantumati.

<u>i-Tree Vue</u>, invece, consente agli utenti di accedere gratuitamente alle immagini satellitari del *National Land Cover Database* (NLCD) alle quali sono associate informazioni riguardanti il tipo di copertura del suolo, distinguendo le superfici vegetate da quelle impermeabili. Si tratta di un applicativo con interfaccia desktop che fornisce la possibilità di modellare scenari futuri di piantumazione in funzione dei servizi forniti. Questo programma appartiene agli strumenti meno recenti in fase di sostituzione o accorpamento con altri più attuali e aggiornati quali *Landscape* e *Canopy*.

La progettazione di nuove aree verdi può, infine, essere realizzata mediante l'applicativo online <u>i-Tree Species</u> disponibile anche per progetti locati al di fuori degli Stati Uniti. Nello specifico, questo pacchetto, identifica per l'area verde oggetto di studio la specie arborea più appropriata in funzione dell'importanza che l'utente attribuisce ai diversi Servizi Ecosistemici (riduzione dell'inquinamento atmosferico, abbassamento della temperatura dell'aria, stoccaggio di carbonio, controllo delle acque superficiali, ecc.). Quest'ultima viene definita assegnando a ciascun beneficio un punteggio variabile tra 0 e 10 che permette, combinando i risultati, di individuare la specie che una volta raggiunta la maturità soddisfa maggiormente le esigenze del progettista e che risulta essere compatibile con le condizioni climatiche della località oggetto di studio.

La suite *i-Tree* comprende poi una serie di *tools* che fungono da **raccolta dati** e che consentono nell'immediato di avere accesso ad una serie di informazioni riguardanti l'area individuata. Nello specifico si tratta dei programmi *i-Tree Landscape, i-Tree My Tree* e *i-Tree Projects* fruibili solo in USA e Canada.

<u>i-Tree Landscape</u> è un'applicazione online che permette di ispezionare il territorio. In particolare, rende possibile la consultazione di dati relativi ad una specifica area territoriale tra cui le caratteristiche demografiche, la copertura del suolo, la disposizione delle aree verdi e i benefici da essa derivanti, e i livelli di rischio che questa presenta quali ad esempio la presenza di insetti e malattie, il potenziale di incendi, l'esposizione all'inquinamento atmosferico, le zone calde, gli agenti patogeni, ecc. Questa raccolta di dati consente di individuare le zone a cui dare priorità per gli interventi di piantumazione o manutenzione degli alberi al fine di migliorarne la salute e la sostenibilità.

<u>i-Tree My Tree</u>, invece, è un'applicazione accessibile da dispositivo mobile abilitato alla geolocalizzazione che riconosce la posizione dell'utente. Essa quantifica i benefici derivanti dalla presenza di individui arborei situati nei pressi del fruitore dell'applicazione previa definizione della specie arborea, del diametro del tronco, della distanza dell'individuo arboreo da un ipotetico edificio, dell'orientamento rispetto ad esso e dell'esposizione alla luce solare.

Infine, <u>i-Tree Projects</u> è un'applicazione online in via di sviluppo che permette la condivisione dei dati relativi ai campionamenti delle popolazioni arboree, dei loro benefici e dei risultati derivanti dalle analisi effettuate con *i-Tree Eco*. Gli utenti possono visualizzare i dati, scaricarli per ulteriori analisi e confrontarli con quelli provenienti da altre zone.

L'ultimo applicativo costituente la suite di *i-Tree* è *i-Tree Pest Detection*. Si tratta di un programma integrativo incorporato all'interno di *i-Tree Eco* ed *i-Tree Streets* che offre un protocollo sistematico per

il rilevamento e il monitoraggio dei parassiti urbani. Questo *tool* consente agli utenti di immettere parametri sulla salute e sui sintomi degli alberi al fine di ottenere indicazioni sulla potenziale presenza di parassiti, sulle malattie e sulle minacce cui questi possono essere soggetti. Tale programma consente quindi di migliorare il controllo delle invasioni di questi organismi contenendoli entro determinati confini geografici e, nel lungo periodo, di ridurre i costi di gestione, rimozione e sostituzione di alberi malati.

Tutti i programmi che fanno parte della suite di *i-Tree* sono corredati di manuali e video propedeutici al loro utilizzo, progetti di esempio e articoli scientifici disponibili sul sito web (S22). È inoltre presente un forum al quale gli utenti possono rivolgersi per chiedere consigli e delucidazioni in merito all'utilizzo dei vari applicativi.

Si riporta in Figura 3.4 uno schema illustrativo dei programmi costituenti la suite *i-Tree* distinguendoli in funzione delle tematiche ambientali che consentono di analizzare.

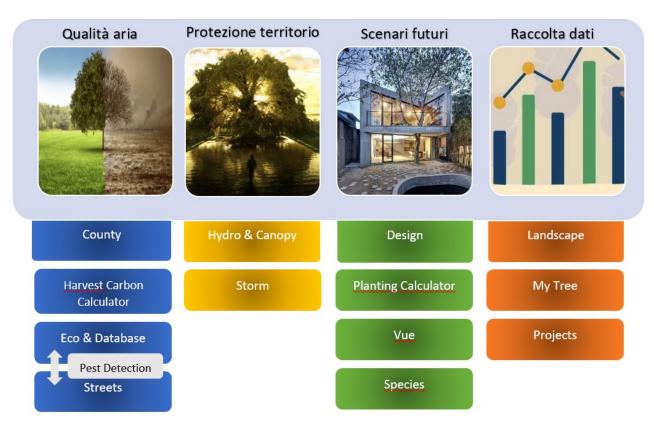


Figura 3.4 Schema riassuntivo dei Tools costituenti la suite i-Tree in funzione delle tematiche ambientali per l'analisi delle quali possono essere utilizzati

Nel presente lavoro di tesi vengono approfondite nel dettaglio alcune delle applicazioni disponibili nei Paesi partner internazionali. Nello specifico, si descrivono nei Capitoli 4 e 5 le caratteristiche dei software *Eco* e *Hydro*, i dati richiesti in input e i risultati restituiti in output dai programmi e i modelli matematici su cui si basano. Inoltre, si esaminano le applicazioni ausiliarie *Database* (Paragrafo 4.1) e *Canopy* (Paragrafo 5.1) per delineare come queste intervengono rispettivamente nelle analisi dei due strumenti.

# 4. I-TREE ECO

*i-Tree Eco* è un programma in grado di quantificare i benefici ambientali ed economici offerti da una popolazione arborea sulla base di dati raccolti durante campagne di misura, di serie temporali delle precipitazioni meteoriche e delle concentrazioni degli inquinanti. Il programma, inoltre, è dotato di strumenti previsionali in grado di stimare sia la crescita della foresta urbana (numero di alberi, copertura fogliare), che l'evoluzione della biodiversità e dei Servizi Ecosistemici.

Questo programma risulta essere il *tool* maggiormente sviluppato della suite di *i-Tree* per cui sono presenti, oltre al manuale e al forum utenti, molti articoli scientifici ed una vasta gamma di esempi applicativi. Il software è in continuo aggiornamento e la versione più recente è *Eco v6*.

Il modello non vincola i casi studio ad aree di specifiche dimensioni, bensì consente di analizzare svariate scale spaziali, dalla metropoli ai giardini delle abitazioni risultando particolarmente utile in fase di pianificazione urbanistica agevolando le amministrazioni e gli enti responsabili delle aree verdi nella scelta della messa a dimora di determinate colture in funzione dei Servizi Ecosistemici che queste offrono al contesto urbano.

*i-Tree Eco*, come riportato in precedenza, necessita di uno strumento integrativo per i progetti locati al di fuori degli Stati Uniti e dei Paesi partner internazionali, ovvero di *i-Tree Database* alla cui descrizione si dedica il prossimo paragrafo.

#### 4.1 i-Tree Database

*i-Tree Database* è un'applicazione online utilizzabile dagli utenti che intendono realizzare un'analisi al di fuori di quei Paesi per i quali i dati sono stati già inseriti all'interno di *i-Tree Eco*. Nello specifico, gli utilizzatori possono reperire all'interno del *Database* tutte le informazioni relative alle specie arboree, ai dati sull'inquinamento e sulle precipitazioni opportunamente formattati per l'area di studio del progetto.

Nel caso in cui gli utenti elaborino progetti inerenti ad aree non supportate da questo programma, è possibile trasmettere al Servizio Forestale degli Stati Uniti i dati relativi alla nuova località o alla nuova specie arborea. Questi vengono inseriti tramite l'applicazione online, formattati e convalidati dal Servizio Forestale, incorporati all'interno del *Database* e resi disponibili in una nuova versione di *i-Tree Eco* a tutti gli utenti per qualsiasi progetto.

Tali caratteristiche rendono questo applicativo fruibile per numerosi progetti elaborati al di fuori degli Stati Uniti figurandolo come il software più all'avanguardia, in tal senso, del pacchetto *i-Tree*.

Il *Database* si articola in due sezioni, una relativa alle specie arboree e l'altra alle località. La prima consiste in una ingente raccolta di specie vegetali (più di 7.000 tra alberi e arbusti) (S25) arricchita di numerose informazioni quali la classificazione botanica (nome scientifico e nome comune, genere, famiglia, classe), la densità fogliare, il tasso di crescita e le caratteristiche delle foglie (forma, dimensione, periodo di caduta). La seconda sezione, invece, include tutte le località già presenti nel *Database* comprese anche quelle nuove, registrate nella *New City List*, per cui gli utenti hanno inserito i dati.

La procedura di inserimento di una nuova località nel *Database* prevede di specificarne latitudine, longitudine e altitudine e richiede l'identificazione di una regione negli USA (Figura 4.1) che presenta caratteristiche climatiche il più possibile simili alla nuova località.

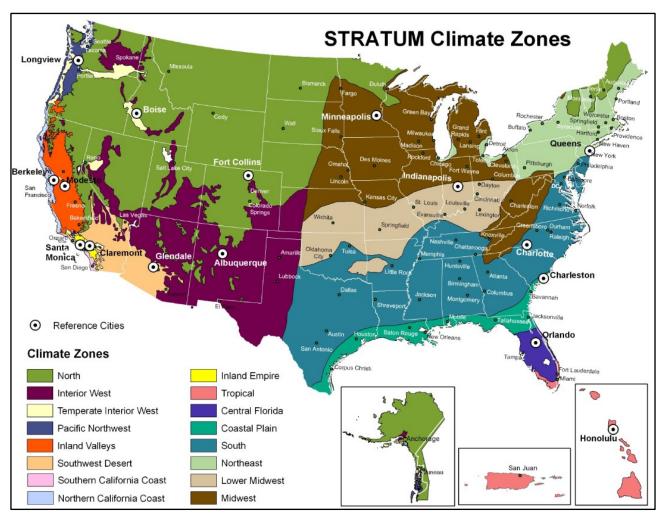


Figura 4.1 Regioni climatiche individuate negli USA, i-Tree (S22)

Per individuare la "città di riferimento" si prendono in considerazione tre parametri e, nello specifico, la composizione delle specie arboree, due indicatori relativi alle temperature dell'aria e le precipitazioni annuali. Questi fattori sono stati selezionati in quanto i loro valori sono generalmente ampiamente disponibili e poiché risultano essere molto rilevanti per la stima dei benefici forniti dagli alberi (McPherson, 2010).

Per stabilire quale città di riferimento è più rappresentativa della località oggetto di studio, è necessario calcolare l'errore quadratico medio RMSE (Root Mean Squared Error) definito come

$$RMSE = \sqrt{a \cdot (HDD_{SC} - HDD_{RC})^2 + b \cdot (CDD_{SC} - CDD_{RC})^2 + c \cdot (AP_{SC} - AP_{RC})^2 + d \cdot TM_{RC}^2}$$

#### Dove

 $HDD_{SC}$  e  $HDD_{RC}$  sono gli *Heating Degree Days* rispettivamente della città oggetto di analisi e della città statunitense di riferimento. Questo indicatore rappresenta un dato riassuntivo delle oscillazioni delle temperature dell'aria in funzione del riscaldamento degli edifici (S26);

- $CDD_{SC}$  e  $CDD_{RC}$  sono i *Cooling Degree Days* rispettivamente della città oggetto di analisi e della città statunitense di riferimento. Anche in questo caso si fornisce un'indicazione delle temperature esterne in base al raffreddamento di un edificio (S26);
- $AP_{SC}$  e  $AP_{RC}$ , Annual Precipitation, sono le altezze di pioggia annue rispettivamente della località oggetto di studio e di quella statunitense;
- *TM*, ovvero *Tree Match*, è un fattore che risulta dalla comparazione tra 22 principali specie vegetali appartenenti alle due località; esso assume valore tanto più vicino allo zero quanto più gli ecosistemi sono simili;
- *a, b, c* sono fattori di ponderazione per stabilire l'importanza assegnata ai quattro diversi parametri per i quali vengono moltiplicati; essi sono influenzati dalla precisione con cui questi sono ricavati.

La località di riferimento che determina il valore di RMSE minore, fornisce la migliore corrispondenza con la città oggetto di studio (McPherson, 2010).

Questo procedimento viene utilizzato per stimare l'influenza che gli alberi hanno sulla zona in esame e, sebbene, possa risultare oneroso e complesso, porta a risultati precisi.

Successivamente il programma esegue in automatico il calcolo dell'albedo<sup>10</sup> medio della superficie della località in funzione dei dati di temperatura massima estiva, altezza di pioggia e di neve annua, percentuale di copertura vegetativa. Di questi parametri l'applicativo non richiede specifici valori ma se risultano essere superiori o inferiori a valori prefissati: per esempio, nel campo relativo alle piogge abbondanti è possibile selezionare "Si" nel caso in cui le precipitazioni cumulate in un anno sono maggiori di 1000 mm.

Per completare l'inserimento di una nuova località all'interno del *Database*, viene infine richiesto di identificare uno Stato caratterizzato da uno strato di ozono con spessore paragonabile a quello della località di interesse e avente, allo stesso tempo, latitudine affine. Lo spessore dello strato di ozono è un dato che può essere reperito sul portale "Giovanni" della NASA (S28).

Sono presenti, poi, alcuni campi facoltativi relativi alla temperatura minima, al numero di giorni di presenza e di assenza di foglie, il fuso orario e i chilogrammi di CO<sub>2</sub> emessi per ogni chilowattora di energia elettrica consumato.

Oltre ai parametri appena descritti, al fine di poter utilizzare i dati inseriti nel *Database* per eseguire analisi con *i-Tree Eco*, è necessario specificare le altezze di pioggia e le concentrazioni di inquinanti, ovvero di polveri sottili (PM2.5), monossido di carbonio (CO), ozono (O<sub>3</sub>), biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) e biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>) cui è soggetta la località. Ciascuno di questi dati deve essere misurato con frequenza oraria per la durata di almeno un anno solare, dal 1° gennaio al 31 dicembre, e il loro l'upload

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> L'albedo di una superficie è la frazione di luce o, più in generale, di radiazione solare incidente riflessa in tutte le direzioni; essa ne indica dunque il potere riflettente. L'esatto valore della frazione dipende, per lo stesso materiale, dalla lunghezza d'onda della radiazione considerata: l'albedo massima è 1 quando tutta la luce incidente viene riflessa, l'albedo minima è 0 quando nessuna frazione della luce viene riflessa. La maggiore o minore radiazione incidente, e il conseguente minore o maggiore assorbimento, possono influenzare la temperatura di un corpo. Le strutture urbane hanno valori di albedo molto diversi poiché costituite da strutture artificiali che spesso assorbono la luce prima che essa possa raggiungere il suolo (S27).

deve essere predisposto secondo fogli di calcolo che seguono una precisa formattazione (il manuale utente fornisce tutti i dettagli necessari sul formato da utilizzare). Anche per questi valori è prevista la fase di controllo e di approvazione da parte di *US Forest Service*, in seguito alla quale la nuova località può essere incorporata all'interno del *tool* e i cui dati possono essere consultati e utilizzati da tutti gli utenti, previo aggiornamento del software.

Nel caso in cui non si disponga dei valori relativi alle precipitazioni e/o ai composti inquinanti, *Eco* non effettua la valutazione dei deflussi idrici correlati alla presenza di vegetazione e/o dei quantitativi di inquinanti rimossi ma analizza esclusivamente la struttura e le caratteristiche della foresta urbana.

Terminato l'inserimento nel *Database* dei dati relativi alla nuova località, è possibile tornare alla piattaforma di *Eco*.

Nei prossimi paragrafi si procede con la descrizione dei meccanismi di elaborazione dei dati, ovvero gli algoritmi e le equazioni scientifiche sottoposte a revisione paritaria<sup>11</sup>, sulla base dei quali il programma analizza i dati inseriti dall'utente (Paragrafo 4.2). Segue la descrizione delle fasi di progettazione da seguire per la realizzazione di un progetto *i-Tree Eco* (Paragrafo 4.3) e delle modalità di reperimento dei dati di input sulla base di protocolli standardizzati (Paragrafo 4.4).

# 4.2 Modello matematico di i-Tree Eco

*i-Tree Eco* è frutto della collaborazione tra i padri ideatori del modello UFORE (*Urban Forest Effects*) (Nowak e Crane del US Forest Service Northern Research Station e McHale del SUNY College of Environmental Science and Forestry) e il Dipartimento di Agricoltura degli Stati Uniti (USDA) (S30).

Il modello matematico UFORE, elaborato agli inizi degli anni Novanta, contiene equazioni convalidate *peer review*, implementate in metodi di stima solidi e avvalorati da migliaia di casi pratici. Esso combina i dati strutturali della vegetazione con dati locali meteorologici e di qualità dell'aria mediante algoritmi basati su meccanismi di intercettazione e incorporazione degli inquinanti atmosferici da parte degli individui arborei tramite assorbimento e deposizione secca sui tessuti fogliari (Nowak et al., 2000).

UFORE è dunque il fulcro centrale di *i-Tree Eco* ed è strutturato in cinque componenti, ciascuna delle quali è inerente ad un aspetto differente della vegetazione.

#### ■ UFORE – A: Anatomia della foresta urbana

Questo modello si basa principalmente su parametri reperiti durante campagne di misura e fornisce dati quantitativi, con errore standard noto, sulla composizione e sulla struttura della foresta urbana, sul suo stato di salute, l'area e la biomassa fogliare.

Prima di procedere con la definizione del modello si preferisce evidenziare la distinzione che la suite *i-Tree* fa tra alberi e arbusti. Nello specifico, definisce alberi le specie arboree caratterizzate da un DBH (*Diameter at Breast Height*), ovvero da un diametro misurato ad un'altezza di circa 1.35 m (4.5 ft) dal piano campagna, maggiore o uguale a 2.54 cm, mentre gli arbusti sono identificati da un valore di DBH

\_

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Nell'ambito della ricerca scientifica si definisce revisione paritaria, meglio nota con il termine inglese di *peer review*, la valutazione tra pari e indica la procedura di selezione degli articoli o dei progetti di ricerca proposti da membri della comunità scientifica. Essa viene effettuata attraverso una valutazione di specialisti del settore che ne verificano l'idoneità alla pubblicazione scientifica su riviste specializzate o, nel caso dei progetti, al finanziamento degli stessi, evitando errori, distorsioni, bias, plagi, falsità, o truffe scientifiche (S29).

minore di 2.54 cm. Le piante legnose aventi altezza inferiore a 30.5 cm sono considerate copertura erbacea.

Il parametro che maggiormente influenza i Servizi Ecosistemici esaminati da questo modello è l'area fogliare (*Leaf Area*, LA). Questa misura può essere intesa come la somma delle superfici delle foglie che intercettano la luce solare ed è proporzionale alla capacità dell'albero di catturare la CO<sub>2</sub>, produrre ossigeno e abbattere gli inquinanti atmosferici.

Per questo motivo, il programma fa riferimento all'indicatore CLE (*Crown Light Exposure*), ovvero esposizione alla luce solare della chioma, per il calcolo della superficie fogliare. Si tratta di un indice empirico che riflette il numero di lati di una pianta che ricevono la luce solare diretta; è sostanzialmente un indicatore della competizione tra alberi. Sulla base dei valori assunti da questo parametro, è possibile definire la condizione di crescita di un albero e quindi la predisposizione allo sviluppo della superficie fogliare (Pace et al., 2018).

La valutazione del CLE prevede la suddivisione della chioma in quattro direzioni cardinali e una superficie aggiuntiva sulla parte sommitale (Figura 4.2).

I valori che può assumere questo indicatore variano tra zero, che caratterizza un albero completamente soppresso e chiuso nella chioma ricevente solo luce diffusa, e cinque, che identifica un albero solitario non ombreggiato da alberi circostanti o da altri ostacoli.

La condizione di crescita di una pianta può quindi essere classificata in tre categorie sulla base dei valori assunti dal CLE:

- CLE = 4 5, condizione di crescita degli alberi aperta;
- CLE = 2 3, condizione di crescita degli alberi in un parco;
- CLE = 0 1, condizione di crescita degli alberi in una foresta, chiusa.

Figura 4.2 Classificazione dell'indice empirico CLE (Crown Light Exposure) [Pace et al., 2018]

L'area fogliare per alberi in condizioni di coltivazione aperta è calcolata sulla base delle equazioni di regressione definite da Nowak che risultano essere il metodo di analisi in grado di elaborare stime maggiormente attendibili, fornendo risultati prossimi a quelli reperibili in campo (Nowak, 1996). Tali equazioni sono funzione esclusivamente del DBH, oppure, se disponibili, dell'altezza (H) e della larghezza (D) della chioma

$$ln(LA) = b_0 - b_1 DBH + b_2 S$$
(4.1)

$$\ln(LA) = b_0 - b_1 H + b_2 D + b_3 S + b_4 C \tag{4.2}$$

Il parametro S è un fattore di ombreggiatura specifico della specie, definito come percentuale di intensità luminosa intercettata dalla chioma degli alberi fogliati, e C è la superficie esterna della chioma degli alberi calcolata in funzione di D e H come

$$C = \pi D(h+D)/2 \tag{4.3}$$

Il fattore di ombreggiatura è un coefficiente correttivo che assume valori diversi a seconda che la specie sia caducifoglie oppure sempreverde. Nel caso di alberi caducifoglie, se il fattore di ombreggiatura non è definito per le singole specie, si adotta un valore medio derivante dal genere o dalla famiglia, mentre

per le conifere il modello applica un fattore di ombreggiatura di 0.91 per tutte le specie, ad eccezione dei pini (0.83).

Questo parametro interviene nella definizione di un'ulteriore variabile fondamentale per le simulazioni condotte con *Eco*, ovvero l'indice di area fogliare (*Leaf Area Index*, LAI). Si tratta di una variabile che rappresenta la misura della superficie fogliare (m²) per unità di superficie di suolo (m²) ed è definito da un'equazione basata sulla legge di Beer-Lambert (Nowak, 1996)

$$LAI = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{-k} \tag{4.4}$$

dove I è l'intensità della luce sotto la chioma,  $I_0$  è l'intensità della luce sopra la chioma e k è il coefficiente di estinzione della luce che vale 0.52 per le conifere e 0.65 per i legni duri. In questi termini il fattore di ombreggiatura interviene come rapporto tra I e  $I_0$ .

Le equazioni di regressione per la stima dell'area fogliare sono state formulate sulla base di un archivio di dati relativo ad individui arborei in condizioni di crescita aperta, di buona salute fogliare e di dimensioni caratterizzate da un rapporto tra altezza e ampiezza della chioma variabile tra 0.5 e 2, DBH compresi tra 11 e 53 cm e un fattore di ombreggiatura che assume valore tra 0.67 e 0.88. Ne consegue che tali espressioni devono essere rivisitate se applicate ad alberi in condizioni di crescita ravvicinate (CLE = 0-1) e di dimensioni tali per cui DBH, altezza e ampiezza della chioma risultano essere troppo elevati per poter essere implementati all'interno delle equazioni di Nowak.

L'area fogliare per tali individui arborei viene estrapolato dal LAI desunto dalle equazioni di regressione in cui vengono implementati rapporti altezza – larghezza calcolati ridimensionando i valori di queste due variabili al fine di ottenere un rapporto massimo pari a 2, oppure minimo pari a 0.5. Il valore di superficie fogliare si deduce riferendo il LAI calcolato all'area occupata dall'albero, definita come proiezione della sua chioma, e scalando il valore in funzione delle dimensioni originali della chioma dell'albero (Nowak et al., 2000).

Gli alberi in condizioni di crescita all'interno di parchi, caratterizzati da valori di CLE compresi tra 2 e 3, assumono un valore di LA medio tra quello determinato dalle equazioni di regressione di Nowak valide per le chiome aperte e quello derivante dalle equazioni valide per le condizioni di crescita chiuse. Gli arbusti, invece, possono assumere un valore massimo di LAI pari a 18 a causa di limitazioni nella stima del volume della chioma.

La biomassa totale, invece, sia legnosa che fogliare, è la sostanza organica contenuta negli alberi e viene calcolata effettuando una conversione, attraverso misure specifiche per ogni specie arborea, dei metri quadri di area fogliare in grammi di fogliame secco. Per gli arbusti questo parametro è dato dal prodotto tra il volume della chioma occupata dalle foglie (m³) e fattori di biomassa fogliare definiti per ogni specie (g·m⁻³).

Sia i valori di biomassa fogliare che di area fogliare vengono adeguati in funzione dello stato di salute della pianta che varia da eccellente con meno dell'1% di secco, a morto con il 100% di secco (quest'ultima percentuale è una approssimazione, non totalmente accurata, del reale stato di salute della pianta) (Nowak et al., 2008).

#### ■ UFORE – B: Emissioni di VOC Biogenici

Questo modulo stima l'entità dei composti organici volatili  $^{12}$  (VOC) prodotti dalle piante e, nello specifico, le emissioni di isoprene ( $C_5H_8$ ) e monoterpene ( $C_{10}H_6$ ). Si tratta di composti emessi dalla vegetazione costituiti da un insieme eterogeneo di molecole chimiche che svolgono una vasta gamma di funzioni per le piante e, di conseguenza, per l'ecosistema e l'ambiente.

Numerosi studi e ricerche scientifiche (Fares et al., 2008) hanno illustrato che minime emissioni fogliari di composti organici di origine biogenica (*Biogenic Volatile Organic Compounds*, BVOCs) possono repellere insetti dannosi all'individuo arboreo e, allo stesso tempo, attrarre parassitoidi o predatori carnivori che lo liberano dagli ospiti indesiderati. Inoltre, alcuni BVOCs della famiglia dei terpeni, per l'appunto l'isoprene e i monoterpeni, risultano essere potenti antiossidanti che proteggono le piante da stress abiotici quali, ad esempio, alte temperature e siccità. Ne risulta dunque che gli individui che emettono alte quantità di questi composti potrebbero adattarsi meglio ai cambiamenti climatici e al reiterarsi di questa tipologia di stress.

Tuttavia, i BVOCs influiscono significativamente anche sulla chimica atmosferica e sul clima. Nel caso specifico di una popolazione arborea è proprio l'emissione di isoprene e di monoterpene che rappresenta una possibile fonte di inquinamento atmosferico attraverso la formazione di ozono, monossido di carbonio e altri aerosol troposferici.

L'emissione dei VOC di origine vegetale dipende principalmente dalla specie dell'albero, dalla biomassa fogliare, dalla temperatura dell'aria e dall'irraggiamento solare (Nowak et al., 2008). Ne consegue dunque che l'emissione di questi composti non è costante in quanto fortemente dipendente sia dallo stato fisiologico che dalla fenologia della pianta.

Per stimare la quantità di  $O_3$  derivante dalle emissioni di VOC, *i-Tree Eco* fa riferimento a scale di incremento di reattività dell'ozono i cui valori sono moltiplicati per le emissione di VOC rilevate durante ore diurne. Queste scale sono caratterizzate da un elevato grado di incertezza nelle stagioni fredde; tuttavia, durante questi periodi dell'anno la vegetazione ha tassi di emissione relativamente bassi quindi il contributo degli alberi alla formazione di  $O_3$  è minimo.

Poiché anche il monossido di carbonio derivante dalle emissioni di VOC rappresenta un precursore dell'ozono troposferico, le scale di incremento di reattività dell'ozono vengono utilizzate anche per la conversione di CO in O<sub>3</sub>. Il potenziale di formazione di monossido di carbonio COFP (g) viene stimato come il prodotto tra le emissioni di VOC espresse con il simbolo E (gC) e il rapporto R tra il peso atomico di CO e di C, considerando un fattore di conversione pari al 10%

$$COFP = 0.1 \cdot E \cdot R \tag{4.5}$$

Le scale di reattività dell'ozono e le stime sulla formazione di monossido di carbonio sono ragionevoli ma rappresentano un approccio semplificato di stima delle multiple e complesse reazioni chimiche che si esplicano verosimilmente in natura e che portano alla formazione di questi due composti. Per questo motivo, e per l'elevato grado di incertezza negli approcci di stima delle emissioni di VOC, il modello non

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Si definisce composto organico volatile (*Volatile Organic Compound*, VOC) qualsiasi composto organico che abbia a 293.15 K una pressione di vapore di 0,01 kPa o superiore, oppure che abbia una volatilità corrispondente in condizioni particolari di uso (D.Lgs. n.152 del 2006, "Norme in materia ambientale", Art. 268).

ha come obiettivo la quantificazione dell'inquinamento derivante dalle varie specie arboree quanto, piuttosto, una valutazione del bilancio dell'incidenza degli alberi sulla formazione di ozono. Tali dati possono essere utilizzati per creare un indice delle specie arboree più significative dal punto di vista delle emissione di VOC e, quindi, per confrontare l'impatto relativo delle specie sulla formazione di ozono troposferico (S31).

#### ■ UFORE – C: Sequestro e stoccaggio di carbonio

Questi due processi rappresentano una delle capacità delle piante di rimuovere i gas serra presenti in atmosfera e rappresenta, pertanto, una delle possibili strategie per contrastare i cambiamenti climatici.

Lo stoccaggio del carbonio consiste nel processo di fissazione di questo elemento nei tessuti vegetali durante il processo di crescita dell'individuo arboreo. Tale fenomeno è, infatti, proporzionale all'aumento della biomassa, parametro che maggiormente influenza questo Servizio Ecosistemico, e tende progressivamente a diminuire al raggiungimento della maturità della pianta. Esso interessa sia la parte epigea (rami, foglie, tronco, corteccia) che ipogea (radici) dell'albero.

Per il calcolo di questa variabile il modello matematico prende in considerazione una vasta casistica di individui arborei e delle condizioni di crescita in cui questi si trovano. Ad esempio, per gli alberi decidui, considerato che questi sono soggetti alla perdita annuale di foglie, il modulo calcola solo la quantità di carbonio immagazzinato all'interno della biomassa legnosa, mentre nel caso di alberi in condizioni di crescita aperte (CLE = 4-5), poiché questi tendono ad avere meno biomassa fuori terra rispetto a quanto previsto dalle equazioni derivate per alberi in condizioni di crescita chiusa aventi medesimo DBH, i valori della biomassa sono moltiplicati per un fattore correttivo di 0,8 (Nowak et al., 2008).

Il modello, inoltre, stima la quantità netta di carbonio immagazzinato nelle alberature conteggiando anche la quota parte di elemento che viene rilasciata alla morte degli individui durante la fase di decomposizione o durante i processi di rimozione, quali la conversione in concime o la combustione.

La quantificazione di questo S.E. si basa sulla combinazione di equazioni allometriche che producono risultati contenuti entro il 2% delle stime originali (Nowak et al., 2008); tale procedimento matematico genera equazioni predittive per un numero limitato di diametri per ogni specie arborea ed evita di avere stime disgiunte a causa dell'eterogeneità.

Il sequestro di carbonio, invece, è la rimozione dell'anidride carbonica dall'atmosfera operata da parte della vegetazione. Questo processo avviene attraverso la fotosintesi clorofilliana ed è influenzato sia dalla quantità di biomassa fogliare che dal processo di crescita delle piante, quindi dal loro tasso di crescita e di mortalità funzione, a loro volta, della specie, dell'età, della struttura e del grado di salute degli individui. Ne consegue che la quantità di carbonio sequestrata aumenta con le dimensioni e la salute degli alberi.

Considerate le numerose variabili che entrano in gioco nella definizione del tasso di crescita di una pianta, il modello fa riferimento a stime standardizzate dello sviluppo degli alberi definite sulla base dei tassi di crescita del Minnesota, Stato che prevede un numero di giorni senza freddo intenso pari a 153, secondo la relazione che segue

Crescita standardizzata (SG) = crescita misurata 
$$\cdot \frac{153}{\text{numero di giorni senza freddo intenso}}$$
 (4.6)

I valori attribuiti ai tassi di crescita standardizzati medi sono successivamente ridotti di un fattore che esprime l'esposizione della chioma alla luce solare. Ne consegue che le equazioni di crescita standardizzate sono pari a:

- per CLE = 
$$0-1$$
 (condizioni di crescita in una foresta)  $Base\ growth = \frac{SG}{2.29}$  (4.7)

- per CLE = 2 – 3 (condizioni di crescita in un parco) 
$$Base\ growth = \frac{SG}{1.78}$$
 (4.8)

- per CLE = 
$$4-5$$
 (condizioni di crescita all'aperto)  $Base\ growth = SG$  (4.9)

dove 
$$SG = 0.83 \left[ \frac{cm}{anno} \right] \cdot \frac{numero\ di\ giorni\ senza\ freddo\ intenso}{153}$$
 (4.10)

Dal momento che la quantità di carbonio sequestrato dipende anche dalla mortalità della pianta, i valori dei tassi di crescita vengono ulteriormente corretti in funzione dello stato di salute della pianta. Per alberi caratterizzati da condizioni discrete/eccellenti, i tassi di crescita sono moltiplicati per 1 che rappresenta nessuna correzione, mentre per gli alberi le cui condizioni di salute sono definite povere, i tassi di crescita si moltiplicano per 0.76, per gli alberi in condizioni critiche per 0.42, per gli alberi morenti per 0.15 e, infine, per gli alberi morti i tassi di crescita sono moltiplicati per un valore nullo (Nowak et al., 2001).

Anche questo beneficio viene valutato sia in termini totali che al netto della quota parte liberata dalla pianta durante l'esercizio delle funzioni vitali. Nello specifico, la quantità lorda di carbonio sequestrato annualmente viene stimata come differenza tra quella valutata per l'anno successivo e quella stabilita nell'anno precedente. La quantità netta, invece, è data in termini di anidride carbonica ed è pari alla differenza tra le riduzioni di CO<sub>2</sub>, intese come quantità sequestrate ed emissioni di CO<sub>2</sub> evitate, e le emissioni del composto rilasciate dalla pianta (Nowak et al., 2001).

Il modello "UFORE – C" consente, infine, di stimare il valore monetario associato ai processi di sequestro e stoccaggio di carbonio operati dalla vegetazione. I valori di output ottenuti dall'analisi devono essere quindi moltiplicati per il costo sociale delle emissioni di CO₂ previste per la località oggetto di studio (€·t⁻¹).

#### UFORE – D: Rimozione degli inquinanti

Uno degli aspetti più interessanti prodotti da *i-Tree Eco* è la quantificazione degli inquinanti atmosferici rimossi in un anno da una popolazione arborea e il conseguente miglioramento della qualità dell'aria. Nello specifico, il modulo quantifica le deposizioni secche dei contaminanti, meccanismo con cui alberi e arbusti riducono l'inquinamento atmosferico durante i periodi di assenza di precipitazioni.

I composti inquinanti richiesti in input e di cui si valuta la rimozione sono l'ozono O<sub>3</sub>, il biossido di zolfo SO<sub>2</sub>, il biossido di azoto NO<sub>2</sub>, il monossido di carbonio CO e le polveri sottili aventi diametro inferiore ai 2,5 micron. Il particolato inferiore a 10 micron (PM10) è un altro inquinante atmosferico significativo; tuttavia, il programma analizza il PM2.5, sottoinsieme di PM10, poiché risulta essere più rilevante ai fini della quantificazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla salute umana.

I risultati delle stime sono funzione del tipo di copertura del suolo, della specie arborea, della temperatura dell'aria, della densità fogliare delle piante, delle precipitazioni orarie e della velocità del vento. In mancanza di alcuni dati orari, il modello calcola delle stime medie mensili relative all'ora

d'interesse, oppure, in assenza di dati relativi ad un intero mese, interpola i valori relativi ai mesi a cavallo.

Il parametro di base su cui si fonda "UFORE – D" è il flusso di inquinanti atmosferici rimossi F (g·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) calcolato come prodotto tra la velocità di deposizione  $V_d$  (m·s<sup>-1</sup>) e la concentrazione dell'inquinante in aria C (g·m<sup>-3</sup>)

$$F = V_d \cdot C \tag{4.11}$$

La **velocità di deposizione per CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, e O<sub>3</sub>** è calcolata come il reciproco della somma di tre resistenze (s·m<sup>-1</sup>): aerodinamica ( $R_a$ ), dello strato quasi laminare ( $R_b$ ), e della chioma ( $R_c$ )

$$V_d = \frac{1}{R_d + R_b + R_c} \tag{4.12}$$

La resistenza aerodinamica è la resistenza opposta dall'aria al passaggio delle molecole degli inquinanti; è calcolata sulla base dei dati meteorologici e pertanto è indipendente dal tipo di inquinante. Nello specifico,  $R_a$  è funzione della velocità del vento ad una certa quota u(z) (m·s<sup>-1</sup>) e della velocità di attrito  $u_*$  (m·s<sup>-1</sup>)

$$R_a = \frac{u(z)}{u^2} \tag{4.13}$$

Il calcolo della velocità di attrito prevede l'utilizzo di formule diverse a seconda delle condizioni di stabilità dell'atmosfera (neutrale, stabile o instabile). Quest'ultima è determinata in funzione della lunghezza di stabilità di Monin - Obukhov $^{13}$  che può essere stimata empiricamente sulla base delle classi di stabilità di Pasquill (A – F). A titolo esemplificativo si riporta una delle formule, nello specifico quella relativa alla classe A

$$\frac{1}{t} = -0.0875 \cdot z_0^{-0.1029} \tag{4.14}$$

dove L è la lunghezza di stabilità di Monin – Obukhov e  $z_0$  è l'ampiezza delle asperità, funzione dell'altezza e della distanza tra gli elementi che generano la turbolenza. A seconda del valore assunto da L, dove L=0 indica un'atmosfera neura, L<0 indica un'atmosfera instabile e L>0 indica un'atmosfera stabile, la velocità di attrito viene calcolata mediante precise formule (Hirabayashi et al., 2015).

Per quanto riguarda la resistenza dello strato quasi laminare  $R_b$ , ovvero la resistenza incontrata dalle particelle alla superficie di interfaccia aria-foglie, questa è calcolata sulla base dell'espressione che segue

$$R_b = 2(Sc)^{\frac{2}{3}}(Pr)^{-\frac{2}{3}}(ku_*)^{-1}$$
(4.15)

dove Sc è il numero di Schmidt pari ad 1 per l'ozono, 0.76 per il monossido di carbonio, 0.98 per il biossido di azoto e 1.15 per il biossido di zolfo, Pr è il numero di Prandtl pari a 0.72 e k è la costante di von – Karman pari a 0.41.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> La lunghezza di Obukhov è usata per descrivere gli effetti della galleggiabilità sui flussi turbolenti, in particolare nel decimo strato inferiore dello strato limite dell'atmosfera. Fu definita per la prima volta da Alexander Obukhov nel 1946 ed è anche conosciuta come la lunghezza di Monin – Obukhov per l'importante ruolo nella teoria della somiglianza sviluppata da Monin e Obukhov (S32).

Infine, la resistenza della chioma  $R_c$ , ovvero la resistenza opposta dai tessuti vegetali e dalle aperture stomali, varia a seconda del periodo vegetativo considerato e dipende dal tipo di inquinante.

Per quanto riguarda CO, la capacità di sequestro da parte della vegetazione non dipende direttamente dalla traspirazione  $^{14}$  e quindi i valori di  $R_c$  sono costanti e pari a

$$R_c con foglie = 5 \cdot 10^4 \, s \cdot m^{-1}$$

$$R_c$$
 senza foglie =  $10^6 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 

Per NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e SO<sub>2</sub> la resistenza della chioma nei periodi vegetativi viene calcolata come

$$\frac{1}{R_{c,InLeaf}} = \frac{1}{r_s + r_m} + \frac{1}{r_{soil}} + \frac{1}{r_t}$$
 (4.16)

dove

 $r_{\rm S}$  è la resistenza stomatica (s·m·¹), parametro funzione della fotosintesi fogliare. Il calcolo del quantitativo di fotosintesi che avviene a livello della chioma a partire da quello che avviene a livello fogliare richiede la suddivisione della chioma in N strati nei quali il valore del LAI, derivante dal modulo "UFORE – A", in ciascun strato  $\Delta F$  viene scelto tra 0.1 e 0.2. Tuttavia, è preferibile calcolare la resistenza stomatica sulla base dell'irradianza  $^{15}$  sia delle foglie illuminate che di quelle ombreggiate e, successivamente, pesare le resistenze sulla base delle frazioni di area fogliare soleggiata o ombreggiata. Nello specifico, si procede suddividendo la radiazione solare sopra la chioma nelle porzioni del visibile (PAR $^{16}$ ) e infrarosso vicino e ripartendo il valore di PAR in radiazione diretta e diffusa. Successivamente, si suddivide la chioma in N strati e si calcolano le aree di luce e di ombra presenti in ciascuno di essi e per ognuno di questi si determina la densità di flusso del PAR intercettata dalle foglie illuminate e ombreggiate; di queste si calcola poi la conduttanza stomatica per ciascun livello della chioma. A questo parametro viene infine attribuito un peso sulla base della frazione di superficie fogliare situata al sole o all'ombra e si sommano i valori delle foglie illuminate e di quelle in ombra di tutti gli strati per ricavarne il valore complessivo.

 $\cdot$   $r_m$  è la resistenza del mesofillo 17 che vale  $r_m=100~s\cdot m^{-1}$  per NO<sub>2</sub>,  $r_m=10~s\cdot m^{-1}$  per O<sub>3</sub>,  $r_m=0~s\cdot m^{-1}$  per SO<sub>2</sub>;

·  $r_{soil}$  è la resistenza del suolo che vale  $r_{soil} = 2941 \, s \cdot m^{-1}$  in stagione vegetativa,  $r_{soil} = 2000 \, s \cdot m^{-1}$  in altra stagione;

<sup>14</sup> La traspirazione è la fuoriuscita di vapore acqueo dalle piante che ne controllano il flusso attraverso meccanismi di resistenza fogliare. Il processo comprende una fase di evaporazione dell'acqua dalle pareti cellulari e una successiva di diffusione all'esterno attraverso gli stomi (Kramer, 1983).

<sup>15</sup> L'irradianza, o illuminanza, è il flusso di radiazione elettromagnetica, ovvero la densità di corrente termica trasmessa per irraggiamento (S33).

<sup>16</sup> La radiazione fotosinteticamente attiva (*Photosynthetically Active Radiation*, PAR) è una misura dell'energia della radiazione solare intercettata dalla clorofilla a e b nelle piante (tipologie di clorofilla presenti negli eucarioti che assorbono rispettivamente la luce blu-violetta e rossa, e blu ed arancione.). Si tratta, in pratica, di una misura dell'energia effettivamente disponibile per la fotosintesi, che risulta essere minore dell'energia totale proveniente dal Sole, poiché lo spettro di assorbimento della clorofilla è poco esteso (S34).

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Si definisce mesofillo l'insieme dei tessuti che compongono la foglia, esclusa l'epidermide (S35).

·  $r_t$  è la resistenza cuticolare<sup>18</sup> che vale  $r_t=20000~s\cdot m^{-1}$  per NO<sub>2</sub>,  $r_t=10000~s\cdot m^{-1}$  per O<sub>3</sub>,  $r_t=8000~s\cdot m^{-1}$  per SO<sub>2</sub>.

Nei periodi non vegetativi, invece, il valore della resistenza della chioma  $R_{c,OutLeaf}$  per NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e SO<sub>2</sub> può essere ricavato dall'interpolazione lineare basata sul LAI della vegetazione sempreverde attribuendo a questo parametro dei valori di default.

A fronte di quanto esposto, emerge che la velocità di deposizione  $V_d$  assume due valori diversi a seconda del periodo temporale considerato. Inoltre, essendo questo parametro dipendente dalla radiazione attiva PAR, oltre alla valutazione dei singoli parametri che compiano nelle formule di calcolo, sono stati stimati per questa misura dei valori massimi e minimi per il giorno e la notte (Hirabayashi et al., 2015). Si riportano i valori relativi alle ore diurne in Tabella 4.1, mentre i valori notturni di  $V_d$  si assumono pari a  $V_d = V_{d,MIN} = V_{d,MAX}$ .

Tabella 4.1 Stima della velocità di deposizione massima e minima per il giorno in funzione della radiazione attiva e del tipo di inquinante [Fonte: Hirabayashi et al., 2015]

Inquinante	V <sub>d,MIN</sub> (m·s⁻¹)	$V_{d,MAX}$ (m·s <sup>-1</sup> )
NO <sub>2</sub>	0.001	0.005
Оз	0.001	0.008
SO <sub>2</sub>	0.002	0.01

L'ultima tipologia di inquinante che rimane da analizzare sono **le polveri sottili**. Nello specifico, per il particolato PM10 la velocità di deposizione nei periodi vegetativi è funzione della superficie fogliare ed è calcolata in termini medi, minimi e massimi.

La formula seguente relativa alla  $V_{d,MEDIA}$  viene utilizzata anche per calcolare  $V_{d,MIN}$  e  $V_{d,MAX}$  sostituendo alla velocità di deposizione media del particolato PM10 assunta pari a 0.64 m·s<sup>-1</sup>, rispettivamente i valori  $V_{d,PM,MIN}=0.25~m\cdot s^{-1}$  e  $V_{d,PM,MAX}=1.00~m\cdot s^{-1}$ 

$$V_{d,MEDIA} = V_{d,PM,MEDIA} \cdot \frac{BAI + LAI}{BAI + LAI_{PM10}}$$
(4.17)

I termini che compaiono nella formula sono definiti come: indice di superficie della corteccia (*Bark Area Index*, BAI) che rappresentare la capacità di stoccaggio della precipitazione da parte del tronco e dei rami (è assunto costante per tutte le stagioni per uno stesso anno di crescita), indice di superficie fogliare (*Leaf Area Index*, LAI) e indice di superficie fogliare per deposizioni di particelle (LAI<sub>PM10</sub>) assunto pari a 6 (Hirabayashi et al., 2015).

Nel periodo non vegetativo, il calcolo della velocità media, massima e minima viene condotto sulla base della medesima formula mantenendo inalterati i valori attribuiti a tutti i parametri, ad eccezione del LAI che viene considerato solo per le specie sempreverdi.

8 Ci dofinio

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Si definisce cuticola lo strato idrofobico composto da cere depositato esclusivamente sulla parte esterna delle cellule dell'epidermide con funzione protettiva. Conferisce impermeabilità all'acqua e, in minor misura, ai gas atmosferici. La funzione della cuticola non è principalmente quella di rendere impermeabile la foglia, bensì quella di evitare la perdita d'acqua da parte della foglia stessa. La cellula, infatti, essendo coperta di cuticola solo sulla faccia esterna, può ricevere acqua e nutrimento dalle cellule vicine e quindi rimanere vitale. Lo spessore della cuticola varia a seconda dei climi in cui vive la pianta (S36).

Per quanto riguarda il particolato PM2.5, invece, la velocità di deposizione sugli alberi dipende dalla velocità del vento e dall'indice di area fogliare. Per ogni velocità del vento ipotizzata (1, 3, 6, 8, 9, 10 m·s<sup>-1</sup>), la velocità di deposizione del particolato  $V_{d,PM2.5}$  viene determinata come media delle deposizioni misurate per quella velocità del vento (Hirabayashi et al., 2015)

$$V_d = V_{d,PM2.5} \cdot LAI \tag{4.18}$$

Durante i periodi caratterizzati da assenza di precipitazioni, il particolato PM2.5 cumulato sulle foglie degli alberi può tornare in sospensione nell'atmosfera in base alla velocità locale del vento. Il flusso di PM2.5 al momento t può essere calcolato come

$$f_t = V_{d,PM2.5.t} \cdot C_t \tag{4.19}$$

dove  $V_{d,PM2.5,t}$  è la velocità di deposizione del particolato PM2.5 al tempo t e  $C_t$  è la concentrazione delle polveri sottili al tempo t.

La quantità di particolato rimessa in sospensione può essere calcolata come

$$R_t = (A_{t-1} + f_t) \cdot \frac{rr_t}{100} \tag{4.20}$$

dove  $R_t$  è il flusso di particelle di PM2.5 risospese in atmosfera (g·m-²·s-¹),  $A_{t-1}$  è la quantità di PM2.5 accumulato sulle foglie (g·m-²·s-¹) e  $rr_t$  è il tasso di risospensione del PM2.5 al tempo t (%).

In seguito al ritorno in atmosfera del particolato, la quantità di PM2.5 accumulata sulle foglie al tempo t è pari a

$$A_t = (A_{t-1} + f_t) - R_t (4.21)$$

e il flusso netto di PM2.5 risulta dato da

$$F_t = f_t - R_t \tag{4.22}$$

Durante gli eventi piovosi, si presume che il particolato accumulato sulla superficie fogliare sia dilavato a seconda della quantità di precipitazione intercettata e immagazzinata dalle foglie, e del deflusso che si genera nel momento in cui le foglie hanno raggiunto la capacità massima di accumulo, assunta pari a  $0.2 \cdot LAI$ . Fino al raggiungimento di questo valore, nessun particolato viene dilavato dalle foglie; il superamento di tale soglia implica la generazione di deflusso e quindi annullamento del flusso depositato e di quello risospeso (Hirabayashi et al., 2015).

L'output finale che il modello restituisce all'utente è la quantità totale di inquinanti intercettata dagli alberi nell'unità di tempo Q e il miglioramento della qualità dell'aria  $I_{tot}$ . Il primo risultato si ottiene moltiplicando il valore del flusso per la superficie fogliare LA e per l'unità di tempo t fornisce la quantità totale di inquinanti

$$Q = F \cdot LA \cdot t \tag{4.23}$$

mentre il secondo si esprime come

$$I_{tot} = I_{unit} \cdot \frac{T_c}{100} \tag{4.24}$$

dove  $T_c$  è la copertura arborea (%) e  $I_{unit}$  è l'unità di miglioramento (%). Quest'ultimo parametro rappresenta il valore orario del miglioramento dell'aria, dovuto alle deposizioni secche degli inquinanti atmosferici per unità di copertura ed è dato dalla relazione che segue

$$I_{unit} = \frac{F}{F + M_{tot}} \cdot 100 \tag{4.25}$$

con F (g·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) flusso di inquinante e  $M_{tot}$  massa di inquinante per unità di copertura arborea (g·m<sup>-2</sup>) calcolata come prodotto tra la concentrazione di inquinante C (g·m<sup>-3</sup>) e l'altezza dello strato di miscelazione urbana<sup>19</sup> ( $urban\ mixing\ height$ ) (m).

Così come per gli altri moduli, anche "UFORE – D" consente di stimare il valore monetario associato alla rimozione di ogni singolo inquinante, vale a dire quanto la comunità cittadina dovrebbe spendere per ottenere un analogo miglioramento della qualità dell'aria e una riduzione della CO<sub>2</sub> in atmosfera.

#### ■ UFORE – E: Effetti energetici sugli edifici

Questo modulo stima gli effetti degli alberi sul risparmio nell'utilizzo di energia in quartieri residenziali, quindi a scala locale, per i processi di condizionamento e di riscaldamento e, di conseguenza, sulle emissioni di carbonio derivanti dagli impianti di produzione energetica. La quantità di carbonio evitata è definita come quantità di MWh di raffreddamento e di riscaldamento non utilizzati.

Per questo modello sono necessarie informazioni sulla distanza e sulla posizione degli alberi; in particolare, il programma considera influenti sul bilancio energetico tutti gli alberi che rientrano nel raggio di 18 m dall'edificio e aventi altezza almeno pari a 6 metri (Nowak et al., 2008).

Per quanto riguarda l'effetto di ombreggiatura prodotto dagli alberi, i valori assegnati sono predefiniti e sono applicati a tutte le piante presenti nell'area di studio. Dal momento che questi valori di default sono indicati per una sola tipologia di edifici (costruiti dopo il 1980), a questo parametro si applicano dei fattori di correzione al fine di ottenere i valori per tutte le altre categorie edilizie (Nowak et al., 2008).

L'effetto frangivento, invece, riguarda solo le specie sempreverdi e, pertanto, i valori sono assegnati solo a questa categoria di alberi.

Un altro beneficio apportato dalla presenza di alberi è quello di tipo climatico per il quale si precisa che l'effetto prodotto da un singolo albero diminuisce all'aumentare dell'area considerata. Il modello quantifica gli effetti climatici in funzione di valori prestabiliti assegnati a porzioni di territorio con copertura arborea del 10, 30 e 60%. Per determinare gli effetti prodotti da una generica percentuale di copertura arborea si fa ricorso alle formule di interpolazione, ovvero per aree con copertura inferiore al 10%, si utilizzano i valori dell'intervallo 10-30%, mentre per percentuali superiori al 60% si utilizzano i valori dell'intervallo 30-60% considerando un valore minimo pari ad un terzo dell'effetto prodotto da una copertura al 60% al fine di evitare di generare valori negativi (Nowak et al., 2008).

Tutti i servizi offerti dalle piante in termini energetici sono quantificati mediante valori di default e corretti in funzione delle condizioni di salute delle piante sulla base della relazione adimensionale che segue

Correzione energetica = 
$$0.5 + [0.5 \cdot (1 - \% \ albero \ morto)]$$
 (4.26)

-

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Lo strato di miscelazione è un'evoluzione tipica dello strato limite atmosferico (zona della troposfera più prossima alla superficie terrestre, dove si risente della variazione di temperatura tra notte e giorno). Il processo di rimescolamento che caratterizza questo strato è imputabile alla convezione che rappresenta la causa principale della turbolenza. La presenza della turbolenza in tale strato porta a rimescolare con la quota le grandezze termodinamiche quali la temperatura e l'umidità che tendono ad assumere profili verticali sostanzialmente costanti.

Questa correzione è applicata a tutti gli individui arborei nel caso in cui si tratti di processi di condizionamento, mentre per i processi di riscaldamento è prevista solo per le specie sempreverdi, in quanto le specie decidue non presentano foglie nelle stagioni in cui è previsto il riscaldamento degli edifici.

Considerando che gli effetti sull'energia utilizzata per il condizionamento sono determinati sulla base di fattori predefiniti di emissione dell'elettricità delle regioni climatiche, è necessario convertire il loro valore per lo Stato in esame, moltiplicandoli per il rapporto tra il fattore di emissione di elettricità specifico per il Paese in cui viene redatto il progetto e il fattore di emissione di elettricità della regione climatica corrispondente.

Per ogni area analizzata, gli effetti totali di ombreggiatura, frangivento e climatici sono calcolati sommando gli effetti prodotti da ogni singolo albero per un particolare uso di energia e in funzione della classe energetica dell'edificio. Gli effetti totali generati da ogni sotto area esaminata vengono successivamente combinati per determinare il risparmio di energia totale (Nowak et al., 2008).

Anche "UFORE – E", come i moduli precedenti, consente di valutare l'impatto economico derivante dai cambiamenti apportati dalla presenza di alberi nell'utilizzo di energia all'interno di un edificio facendo riferimento ai prezzi statali medi della risorsa.

# 4.3 Configurazione di un progetto i-Tree Eco

La realizzazione di un progetto con il *tool Eco* della suite *i-Tree* si articola in varie fasi. Nello specifico, è prevista una prima fase di configurazione del progetto in cui se ne definiscono le caratteristiche generali e, in particolare, la scala. Una seconda fase prevede la definizione dei dati di input che si articolano in set di parametri implementati in *i-Tree Database*, ovvero dati relativi alla localizzazione dell'area oggetto di studio, alle specie arboree, serie orarie delle altezze pluviometriche e delle concentrazioni di inquinanti, e dati derivanti da campagne di misura in sito.

La fase 3 presuppone per l'appunto il reperimento dei dati sul campo secondo modalità standardizzate, riportate nel Paragrafo 4.4, mentre la fase 4 si basa sull'utilizzo vero e proprio del programma, quindi prevede l'inserimento e l'elaborazione dei dati. Infine, l'ultima fase consiste nell'analisi dei risultati e nella scelta della loro visualizzazione.

Nei sottoparagrafi successivi (Sottoparagrafo 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3) si analizzano le suddette fasi principali e se ne dedica uno (Sottoparagrafo 4.3.4) all'esposizione dei servizi supplementari forniti dal programma che consentono all'utente di sviluppare analisi sulla popolazione arborea nel lungo periodo e forniscono informazioni utili sulla sua gestione e manutenzione.

# 4.3.1 Configurazione del progetto: plot – based sample inventory o complete inventory

Come accennato nella parte introduttiva, il primo parametro che è necessario definire è l'estensione dell'area di interesse e, in funzione di questa, l'approccio che si intende adottare (*plot-based sample inventory*).

Nel caso in cui si considerino superfici delle dimensioni di grandi parchi, di un quartiere o di una città si opta per un approccio *plot – based sample inventory*; al contrario, invece, se si analizzano aree di grandezza modesta si può ricorrere ad una modalità di analisi *complete inventory*.

Durante la configurazione iniziale del progetto è necessario comunicare al programma l'opzione che si intende seguire per analizzare l'area poiché da questa dipendono diversi aspetti. La differenza sostanziale tra i due approcci consiste nella quantità di informazioni da specificare.

#### Plot – based sample inventory

Questo approccio si adotta per progetti in cui non è pratico creare un inventario per ogni tipo di albero presente nell'area di studio poiché caratterizzata da un'elevata densità arborea; ne consegue un netto risparmio in termini di tempo e denaro.

Piuttosto che reperire dati per ogni albero presente, questo modello prevede la generazione di aree di campionamento (plot) all'interno dell'area di studio, assumendo che le condizioni presenti all'interno di esse rispecchino quelle dell'intero territorio analizzato. Si tratta di plot circolari generalmente di circa 400 m² disposti casualmente sull'area di progetto mediante la localizzazione in coordinate GPS dei loro centri (Figura 4.3).

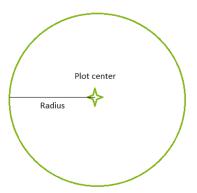


Figura 4.3 Rappresentazione schematica di un plot caratterizzato da raggio standard e da un centro che ne identifica la posizione fisica sull'area di studio

La configurazione *plot-based sample inventory* si ramifica ulteriormente posizione fisica sull'area di studio in due strade:

- Stratification: si tratta della suddivisione dell'area di studio in sotto unità, ad esempio la stratificazione di un città in quartieri può consentire il confronto tra essi in funzione dei diversi tipi di uso del suolo. La suddivisione può essere fatta prima di raccogliere i dati, in questo caso si parla di *pre-stratification*, oppure dopo, *post-stratification*.
  - Nel caso di pre-stratificazione, le sotto unità vengono definite prima dei plot e questi vengono distribuiti in base agli obiettivi del progetto e alla variabilità delle sotto unità (parchi e giardini avranno maggior rilievo nel modello). I risultati forniti da Eco sono stimati sia per l'intera area di studio che per gli strati individuati. Nel caso in cui si scelga di improntare il progetto secondo questa modalità, la revisione delle aree per un progetto futuro (a seguito per esempio di variazioni nell'uso del suolo) risulta essere complicata.
  - Nel caso di post-stratificazione, invece, i plot sono localizzati casualmente e le sotto unità vengono definite in seguito all'acquisizione dei dati di campo. Questo processo consente di analizzare i cambiamenti nel tempo dell'uso del suolo modificando i confini degli strati senza dover ripetere le misurazioni in campo. Sebbene la post-stratificazione consenta una maggiore flessibilità, uno svantaggio del metodo deriva dal fatto che le stime potrebbero non essere accurate come quelle derivanti da un progetto pre-stratificato in cui la quantità di plot è predeterminata in base ai tipi di terreno esistenti e agli obiettivi desiderati.

I manuali consigliano di non eccedere con il numero delle sotto unità, in quanto potrebbero presentarsi problemi di sovrapposizione dei plot.

- No statification: questo approccio non prevede l'identificazione di sotto-unità ma si basa esclusivamente sulla disposizione delle aree di campionamento sull'area di interesse; i risultati

forniti da *Eco* sono dunque stimati per l'intera porzione di territorio analizzato senza essere distinti in funzione degli strati in cui può essere suddiviso il contesto di studio.

Il numero e la disposizione dei plot dipendono sia dagli obiettivi sia dalla precisione richiesta dalle stime che dalla disponibilità di dati.

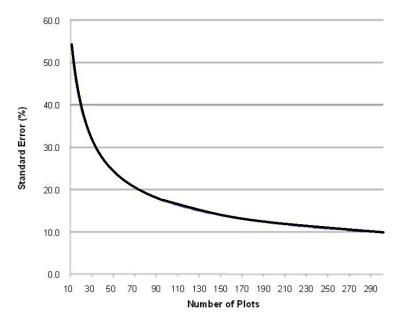
Per quanto riguarda la disposizione dei plot sull'area di studio, l'interfaccia di *Eco* richiede di specificarne il tipo sulla base di tre opzioni:

- Random, ovvero, in maniera totalmente casuale entro i confini dell'area di studio (per un campione pre-stratificato, le aree di campionamento vengono disposte casualmente entro i confini di ogni singolo strato predeterminato);
- Fixed Grid, ovvero, seguendo una griglia che dispone i plot a distanze fisse;
- Randomized Grid, ovvero, attraverso una distribuzione casuale dei plot all'interno di celle costituenti una griglia prefissata. I punti vengono selezionati casualmente all'interno di ciascuna cella consentendone una distribuzione più uniforme su tutta l'area di studio con un grado di casualità maggiore rispetto all'utilizzo di una griglia fissa.

L'accuratezza delle analisi, invece, è direttamente proporzionale al numero delle aree di campionamento. In Figura 4.4 viene rappresentata l'imprecisione della stima del numero totale di alberi presenti nel territorio analizzato tramite l'errore standard in funzione del numero dei plot.

Generalmente si definiscono circa 200 plot per un'area stratificata e suddivisa con campionamenti random, considerando che questi devono essere presenti in numero maggiore o uguale a venti per ogni partizione di terreno. Si ritiene comunque conveniente incrementare del 5 - 10% il numero di plot stabilito in fase di configurazione del progetto in modo tale da prevenire possibili zone inaccessibili durante la fase di rilievo.

Dal grafico si evince che la definizione di circa 200 plot permette di mantenere l'errore standard intorno al 10%. Si stima che questa quantità di aree di campionamento possa essere indagata



che questa quantità di aree di totale di alberi [Fonte: i-Tree Eco User's Manual v6.0]

da un equipaggio costituito da due persone durante una stagione estiva, considerando un tasso medio di raccolta dati di tre plot al giorno (Nowak et al., 2008). Ovviamente, aumentando il numero di plot, aumenta la precisione dei risultati ma anche i tempi e i costi di campionamento ed elaborazione dati.

#### Complete inventory

Questo approccio si adatta all'analisi di aree di discrete dimensioni per le quali si può prevedere la stesura di un inventario per ogni albero presente in esse. L'acquisizione dei dati può risultare un'attività onerosa ma permette di conseguire risultati molto più precisi rispetto all'approccio plot – based sample inventory dal momento che tutta la superficie di interesse viene rilevata. Nel caso in cui sia già disponibile per l'area oggetto di studio un inventario completo, è possibile importarlo direttamente in *Eco* utilizzando un foglio di calcolo (Excel), un database Access o un file in formato CSV.

La condizione secondo cui questa opzione è preferibile per superfici ridotte deriva dall'esigenza di limitare le tempistiche della campagna di misura. Nel caso in cui si disponga abbondantemente di risorse, questo approccio può essere applicato anche ad aree di estensione maggiore, migliorando indubbiamente la precisione dell'analisi.

Anche la configurazione *complete inventory* prevede la possibilità di suddividere l'area di progetto in sotto unità. Le caratteristiche di questa funzione sono le medesime di quelle viste per il *plot – based sample inventory* e, anche in questo caso, il programma fornisce risultati sia per l'intera area che per gli strati individuati.

## 4.3.2 Dati di input

I processi biochimici di assorbimento e deposizione fogliare sui quali si basa *Eco* sono strettamente dipendenti dalla tipologia della pianta e dalle condizioni chimico – ambientali. Per questo motivo il software richiede in ingresso dati dettagliati sulla vegetazione, sulla qualità dell'aria e dati meteorologici.

Per quanto riguarda i primi, la versione 6 di *i-Tree Eco* ha subito delle modifiche rispetto alle precedenti, riducendo a due il numero dei dati indispensabili al funzionamento del programma, ovvero alla specie arborea e al DBH (*Diameter at Breast Height*).

Questa semplificazione riduce notevolmente le tempistiche di reperimento dei dati in campo, tuttavia influisce sull'attendibilità dei risultati in quanto i dati non misurati vengono stimati o sostituiti con valori di default. Pertanto, si consiglia fortemente l'acquisizione dei seguenti ulteriori parametri: altezza totale dell'albero, dimensione della chioma (altezza della base della chioma, altezza massima della parte viva, ampiezza della chioma, percentuale di chioma mancante rispetto alla silhouette standard della specie), salute del fogliame ed esposizione all'irraggiamento solare della chioma. Questi parametri consentono di determinare l'indice di area fogliare LAI (*Leaf Area Index*), indicatore principale per la quantificazione dei Servizi Ecosistemici prodotti dalla pianta.

Nel caso in cui si scelga di improntare il progetto secondo la modalità *plot – based sample inventory,* il programma richiede di indicare per ogni plot ulteriori dati di input quali la percentuale di area accessibile e misurabile, la percentuale di superficie ricoperta dalla chioma degli alberi e/o da arbusti e le percentuali di uso e copertura del suolo.

La seconda tipologia di dati che è necessario fornire al programma è inerente alla qualità dell'aria del territorio analizzato. Questi dati costituiscono il punto di partenza per effettuare il bilancio degli inquinanti sottratti ed emessi dalla vegetazione in termini di precursori alla formazione di ozono troposferico.

Infine, l'ultimo dataset di cui è necessario disporre è quello relativo ai dati meteoclimatici. Qualità dell'aria e condizioni meteo sono, infatti, fortemente legati tra loro ed entrambi influiscono in modo determinante sui processi biochimici delle piante.

Questi due ultimi dataset, entrambi disponibili nel *Database* di *i-Tree* purché la località sia stata precedentemente inserita all'interno di esso, richiedono valori medi su base oraria: per la qualità dell'aria sono richieste le concentrazione dei principali inquinanti, ovvero PM2.5, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> SO<sub>2</sub> e CO, mentre per i parametri meteorologici è necessario fornire la temperatura, l'umidità, le precipitazioni, la direzione e la velocità del vento.

La suite *i-Tree* ha prodotto per il *tool Eco* delle estensioni del programma (*Energy, Avian, Shrubs e Plantable*) in grado di fornire e quantificare servizi aggiuntivi previo inserimento di ulteriori dati specifici. In particolare, è possibile inserire l'appartenenza di un albero ad un suolo privato piuttosto che pubblico, le coordinate GPS individuanti la posizione di una pianta sull'area di studio, definirne l'interazione con gli edifici circostanti nonché la distanza e l'orientamento rispetto ad essi. Tutti questi dati sono definiti "opzionali" e differiscono a seconda dell'approccio che l'utente sceglie di seguire per sviluppare la propria analisi, *complete inventory* o *plot – based sample inventory*.

Infine, l'utente ha la possibilità di modificare i dati di costo di impostati di default dal programma, in funzione di quelli in vigore nel Paese in cui realizza l'analisi; nello specifico, si tratta dei valori relativi al costo dell'elettricità, del riscaldamento, del carbonio e dei deflussi evitati.

Si riporta in Tabella 4.2 una schematizzazione dei dati di input necessari per avviare un progetto con l'applicativo *Eco* evidenziando quelli fondamentali, fortemente consigliati e opzionali.

Tabella 4.2 Dati di input necessari per elaborare un progetto con i-Tree Eco classificati come fondamentali, fortemente consigliati e opzionali in funzione dell'approccio scelto per condurre l'analisi (complete inventory, plot - based sample inventory)

Dati di input		Fondamentali	Fortemente consigliati	Opzionali	
Complete Inventory		Specie, DBH	Altezza totale, Dimensione della chioma, Salute del fogliame, Esposizione solare della chioma e uso del suolo	Albero privato/pubblico, Coordinate GPS della posizione dell'albero, interazione con edifici, etc.	
Plot - Based Sample Inventory	Dati di vegetazione	Specie, DBH	Altezza totale, Dimensione della chioma, Salute del fogliame, Esposizione solare della chioma e uso del suolo	Albero privato/pubblico, distanza dal centro del plot, interazione con edifici, etc.	
	Dati di plot	% superficie misurabile, % superficie coperta dalla chioma	Uso del suolo e copertura del suolo (11 tipi di copertura del terreno sono presenti di default, è possibile aggiungerne altri)	Coordinate GPS della posizione del centro del plot, % di arbusti, spazio adatto alla piantumazione etc.	
Dati di input opzionali comuni ai tre approcci: costo elettricità (€·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ), costo riscaldamento (€·therm <sup>-1</sup> ) <sup>20</sup> , costo carbonio (€·t <sup>-1</sup> ), costo deflusso evitato (€·m <sup>-3</sup> )					

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Il therm è un'unità di misura anglosassone della quantità di calore corrispondente a 105,5 MJ (S37)

## 4.3.3 Analisi degli output

La configurazione del progetto e i dati introdotti vengono inviati al Server di *i-Tree* che esegue la simulazione. Mediante un'elaborazione automatizzata, il programma effettua delle stime dei Servizi Ecosistemici forniti dell'area verde al contesto urbano, sulla base di equazioni e algoritmi scientifici *peer reviewed*. I risultati dell'analisi possono essere riportati in termini di:

- aspetti strutturali della foresta urbana, ovvero specie costituenti la popolazione arborea, dimensione e condizioni di salute della popolazione arborea, area e biomassa fogliare;
- riduzione dell'inquinamento atmosferico, ovvero quantità oraria di inquinanti rimossi dal verde urbano e relativo miglioramento percentuale della qualità dell'aria. A questi benefici consegue un impatto sulla salute pubblica e, in particolare, una riduzione del numero di incidenti avversi alla salute determinata proprio dalla variazione dei livelli di concentrazione degli inquinanti nell'aria;
- sequestro e stoccaggio di carbonio, ovvero quantità totale e netta di C immagazzinato e sequestrato dalla popolazione arborea;
- bio emissioni, ovvero emissioni di VOC e relativo impatto sulla formazione di O<sub>3</sub>;
- produzione di O;
- riduzione dei deflussi idrici, ovvero diminuzione delle portate superficiali attribuita alla presenza del verde urbano e, in particolare, ai processi di traspirazione, evaporazione e intercettazione;
- effetti sui raggi UV.

Le estensioni del programma *i-Tree Eco*, anticipate nel paragrafo precedente, analizzano servizi aggiuntivi e producono risultati in termini di:

- riduzione dei consumi energetici dal punto di vista del riscaldamento e del condizionamento (*Energy*), e conseguente riduzione delle emissioni di biossido di carbonio dalle centrali elettriche, in funzione delle caratteristiche strutturali, delle modalità costruttive e dei consumi energetici degli edifici (si precisa che gli effetti energetici sono calcolati solo per edifici residenziali, costituiti al massimo da tre piani e situati a 18 metri dagli alberi);
- sostenibilità dell'area di studio nei confronti dell'avifauna, nello specifico di nove specie di volatili sulla base delle caratteristiche dei loro habitat naturali (*Avian Habitat*) (questa estensione è disponibile solo per inventari di campioni basati sui plot);
- benefici offerti dagli arbusti valutati in maniera analoga a quella con cui si analizzano quelli derivanti dalle popolazioni arboree (Shrubs);
- spazio disponibile per la piantumazione di nuovi alberi nel territorio analizzato (*Plantable Space*) facilmente deducibile considerando la percentuale del plot occupato da alberi e arbusti.

La possibilità di usufruire di una o più di queste funzionalità implica un maggiore impiego di tempo e risorse ma conduce inevitabilmente ad un'analisi più completa.

A ciascuno dei Servizi Ecosistemici analizzati, espressi in unità funzionali, *i-Tree Eco* associa un valore monetario ottenendo una valutazione dell'area verde in termini di costi – benefici.

## 4.3.4 Servizi supplementari

*i-Tree Eco* include due strumenti supplementari che risultano essere utili nelle attività di gestione e manutenzione del verde urbano. I modelli su cui si basano producono stime molto dettagliate a cui corrisponde però una richiesta di dati di input molto specifica. Questi due pacchetti opzionali sono *Forecast* e *Pests*.

#### Forecast

È una componente aggiuntiva di *Eco* in grado di generare una previsione della foresta urbana nel futuro in funzione dei tassi di crescita, di mortalità e delle condizioni attuali degli individui arborei presenti nell'area analizzata.

È possibile ipotizzare scenari futuri mediante l'introduzione di eventi sfavorevoli all'ecosistema, quali tempeste o epidemie parassitarie, dei quali il *tool* valuta i danni, oppure prevedere piantumazioni o variazioni dell'attuale vegetazione. Il suo utilizzo prescinde dall'inserimento di ulteriori dati, in quanto il sistema è in grado di eseguire una simulazione utilizzando i risultati ottenuti dal progetto precedentemente realizzato con *Eco*.

Per personalizzare i risultati della previsione è possibile scegliere di modificare uno, tutti o nessuno dei valori predefiniti attribuiti alle seguenti variabili (tra parentesi sono indicati i valori di default):

- numero di anni della previsione (30), che equivale al numero di previsioni calcolate dal programma. Ad esempio, se si sceglie di utilizzare il valore predefinito di 30 anni, *Forecast* stima la struttura e la funzione della foresta urbana esaminata ogni anno per i prossimi 30 anni;
- numero di giorni di non gelo, ovvero numero di giorni all'anno con temperatura maggiore di 0°C, (150) da cui dipendono le stime sulla crescita degli alberi, in particolar modo del diametro;
- tasso di mortalità annua, espresso in percentuale, che di default varia tra 3 e 50% in funzione dello stato di salute degli alberi. *i-Tree Eco* presuppone che la mortalità sia calcolata su base annua ma può essere modificata considerando un tasso di mortalità sulla popolazione iniziale.

Gli eventi analizzati da *Forecast* cui può essere soggetto un ecosistema nel corso degli anni sono utilizzabili in contemporanea per uno stesso progetto e sono di seguito analizzati:

- piantumazione di nuovi individui arborei (disponibile per inventari di campioni basati sui plot): il programma richiede il numero di alberi che si intende introdurre ogni anno, il loro diametro, l'anno di inizio e l'anno di fine della messa a dimora delle nuove piante (la specie dei nuovi alberi deve corrispondere a quella presente attualmente sul territorio, questo parametro non è modificabile);
- eventi meteorologici estremi: è necessario specificare il tipo di evento (tempeste, siccità, ecc.),
   l'anno in cui questo si verifica e il tasso di mortalità della popolazione arborea previsto a seguito dell'evento sfavorevole (i tassi di mortalità, predefiniti e forniti per ciascun evento meteorologico, derivano da varie fonti e sono valutati in funzione dell'impatto che eventi meteorologici passati hanno avuto sugli alberi);
- epidemia parassitaria: per questa analisi si devono inserire dati relativi alle specie nocive, quindi il nome dell'organismo oppure della malattia che causa l'epidemia, l'anno in cui si verifica l'evento sfavorevole, la sua durata e il tasso di mortalità risultante (i tassi di mortalità, predefiniti

per ciascun parassita, sono ricavati dal rapporto sulla valutazione del rischio forestale per insetti e malattie del 2012).

Sulla base di quanto esposto emerge che l'applicazione *Forecast* lascia ampia libertà di scelta all'utente su come personalizzare il proprio progetto, garantendo, in ogni circostanza, l'ottenimento di risultati finali.

#### Pests

Questo strumento esamina il danno prodotto da una potenziale epidemia parassitaria ad una foresta urbana in funzione della suscettibilità delle specie presenti sul territorio analizzato.

I dati relativi alla popolazione arborea richiesti in input dal programma sono la specie e del diametro delle piante, mentre come possibili cause di infestazione, è possibile identificare l'inadeguata manutenzione, l'utilizzo di concimi, trattamenti chimici non idonei, il ristagno d'acqua, l'esposizione eccessiva alla luce solare e, più in generale, le condizioni climatiche avverse al tipo di vegetazione.

A proposito dell'argomento trattato, si precisa che la suite *i-Tree* dispone anche di un protocollo, *i-Tree Pest Detection (IPED)*, incorporato all'interno di *Eco* che fornisce un resoconto sulla salute degli alberi in funzione di segni, sintomi di parassiti e malattie reperiti durante campagne di misura.

Il protocollo di rilevamento dei parassiti è indipendente dal progetto *Pests* che, invece, indaga la suscettibilità delle piante a questi ultimi. L'applicativo *Pests*, infatti, non riflette i dati raccolti sul campo sui rischi e sui danni effettivi, ma, piuttosto, valuta gli effetti che potrebbe produrre una potenziale epidemia sulla base della diversità di specie costituenti la popolazione arborea. Pertanto, nel caso in cui si decida di non rilevare dati supplementari sui parassiti durante le campagne di misure, lo strumento *Pests* continua comunque ad essere pienamente funzionale.

L'accuratezza con cui vengono effettuati i sopraluoghi per esaminare la salute degli alberi definisce la precisione dei risultati che possono variare da un semplice elenco di parassiti/malattie visionati in sito ad un quadro più dettagliato se si specificano i sintomi che presentano le piante contagiate e le cause che li hanno provocati.

L'obiettivo di questo applicativo è dunque quello di fornire uno strumento di conoscenza e di prevenzione delle epidemie parassitarie, istituendo un sistema di controllo e di intervento tempestivo con lo scopo di ridurre i costi per le cure o, eventualmente, per la sostituzione degli alberi che hanno subito danni irreversibili.

# 4.4 Reperimento dati di campo

Tra i vari manuali, *i-Tree Eco* fornisce anche i protocolli di campionamento e raccolta dati (i-Tree Eco Field Manual, 2020) fondamentali per lo svolgimento dei sopralluoghi durante le campagne di misura in sito.

Queste sono condotte secondo due diverse modalità a seconda che l'utente abbia scelto di seguire un approccio *complete inventory* piuttosto che *plot – based sample inventory*. Nel primo caso è necessario rilevare i dati per ogni singolo albero presente nell'area di studio, mentre nel secondo si effettuano campionamenti su un numero limitato di piante ottenendo una stima della popolazione arborea.

Il tool Eco mette a disposizione dell'utente una serie di opzioni di registrazione dei dati; in particolare, è possibile annotare i dati reperiti in campo mediante il sistema Mobile Data Collector, ovvero tramite un dispositivo mobile in grado di connettersi alla rete internet, oppure mediante i Paper Forms, ovvero tabelle cartacee compilative i cui dati devono successivamente essere inseriti manualmente nel programma.

In riferimento al Sottoparagrafo 4.3.2 (Dati di input), si delineano le modalità di rilevamento di ciascun dato richiesto in ingresso dal software per lo sviluppo di un progetto con *i-Tree Eco*.

La **specie arborea** è definita in funzione delle conoscenze possedute dall'utente in materia agroforestale o mediante l'utilizzo di applicazioni disponibili per i sistemi operativi dei vari dispositivi mobili. La specie così identificata durante il sopralluogo deve poi essere ricercata tra quelle elencate nel *Database* e nel caso in cui non sia presente nell'inventario è necessario aggiungerla fornendo le informazioni descritte nel Paragrafo 4.1 (i-Tree Database).

Il diametro del fusto (DBH) viene misurato mediante una bindella metrica o un cavalletto dendrometrico ad un'altezza di circa 1.35 m (4.5 ft) dal piano campagna nel caso in cui l'albero sia monocormico. Poiché in natura sono osservabili varie tipologie di tronchi, in funzione delle quali la misura del DBH può subire variazioni, il manuale fornito da *i-Tree* sulle modalità di campionamento dati riporta una serie di esempi di rilevamento di questo parametro.

Nello specifico, nel caso in cui il fusto sia suddiviso in più tronchi (policormico) (Figura 4.5) e il punto di unione dei rami si trovi fuori terra, si misurano i diversi diametri all'altezza di 1.35 m (il programma riserva fino a sei campi per ogni albero per l'inserimento dei valori di questo parametro). Se l'albero ha più di sei steli con DBH maggiore di 2.54 cm (1 inch) si riduce l'altezza di misurazione a 0.30 m (1 ft) dal suolo e si registra il diametro di un massimo di sei steli selezionando quelli di dimensioni maggiori, i rami con diametro minore di 2.54 cm (1 inch) possono essere trascurati. Se l'unione dei rami è sottoterra, ogni fusto è considerato un albero a sé stante.

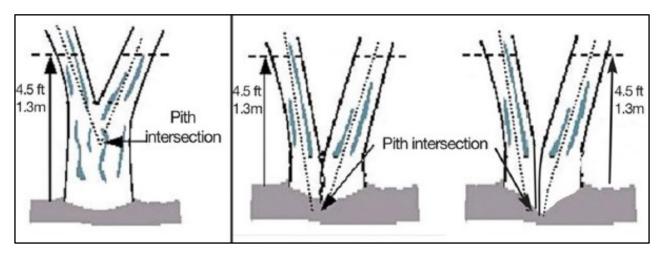


Figura 4.5 Misura del DBH in alberi caratterizzati da fusti ramificati [Fonte: i-Tree Eco Field Manual, 2020]

In Figura 4.6 si riportano altri casi di anomalie del tronco per le quali la misura del DBH deve essere effettuata con particolari attenzioni. Nello specifico, se l'albero presenta dei rigonfiamenti al piede che si estendono per più di circa 1 m (3 ft), la misura del diametro viene effettuata a 0.50 m (1.5 ft) al di sopra del rigonfiamento (a), mentre se il fusto presenta un'irregolarità nella forma, ipotizzata pseudocilindrica, come gonfiori, protuberanze, depressioni o rami, la misura del diametro si effettua immediatamente al di sopra dell'irregolarità nel punto in cui cessa di influenzare la normale forma del fusto (b, c).

Nel caso in cui il piano campagna sia in pendenza, si rileva il diametro a 1.35 m (4.5 ft) in direzione di monte (d), mentre se l'albero risulta inclinato rispetto al suolo, la misura viene effettuata alla stessa altezza del tronco ponendosi dal lato verso cui pende l'albero (e). Anche gli alberi abbattuti devono essere registrati misurandone il diametro a 1.35 m dal termine delle radici.

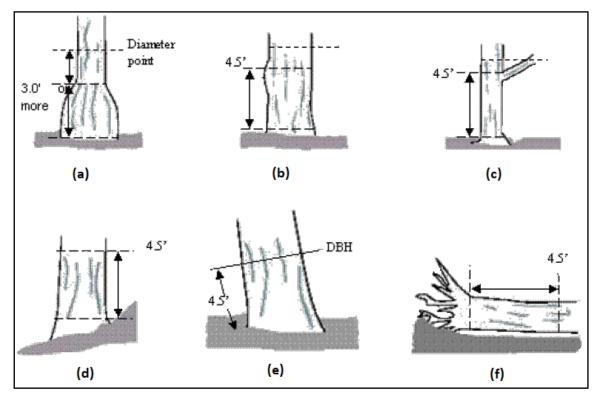


Figura 4.6 Indicazioni per la misura del diametro del tronco in alberi presentanti irregolarità [Fonte: i-Tree Eco Field Manual, 2020]

L'altezza totale dell'albero è la misura dell'individuo arboreo dal piano campagna fino alla cima. Questo dato può essere rilevato mediate l'ausilio di applicazioni installabili sui dispositivi mobili oppure mediante una stima ad occhio. Quest'ultimo metodo di misura è subordinato alla soggettività dell'operatore e alla sua esperienza maturata in questo settore.

Per quanto riguarda le dimensioni della chioma, questo dato comprende la misura dell'altezza della base della chioma, l'altezza massima della parte viva, la sua ampiezza e la percentuale di chioma mancante rispetto alla silhouette standard della specie.

Con il termine altezza della base della chioma si fa riferimento all'altezza misurata a partire dal piano campagna fino alla base della chioma viva, individuata dal punto ottenuto proiettando sul tronco principale l'estremità inferiore del fogliame non appassito che si trova sul ramo meno elevato di essa. Questo parametro non è dunque identificato come il punto di intersezione tra il ramo inferiore e il fusto principale. Tale dato può essere rilevato mediante l'utilizzo della bindella metrica oppure, in caso di valori elevati, mediante una stima ad occhio.

L'altezza della chioma viva differisce invece dall'altezza totale nel caso in cui l'albero abbia la parte superiore della chioma appassita e, di conseguenza, il suo valore è sempre minore o uguale dell'altezza totale dell'albero. Generalmente questo parametro si ottiene come differenza tra l'altezza totale dell'albero e l'altezza della base della chioma.

Il parametro **ampiezza della chioma** definisce la larghezza della chioma misurata nelle due direzioni perpendicolari nord – sud ed est – ovest o il più vicino possibile a queste qualora ostacoli fisici, o altri motivi, ne impediscano la misura. Una volta individuati i punti più esterni della chioma e identificate le proiezioni della chioma al suolo, si procede misurando la distanza tra i due punti estremi utilizzando la bindella metrica (Figura 4.7).

Infine, la **percentuale di chioma mancante** corrisponde alla percentuale di volume della chioma non occupato da rami o foglie. Tale percentuale indica la porzione di chioma mancante a causa di potature, defogliazione, appassimento o malattia. Nella stima della percentuale di fogliame assente sono esclusi i normali vuoti interni della chioma dovuti all'ombreggiatura delle foglie o alla natura stessa della specie. L'acquisizione di questo dato deve essere effettuata da due persone disposte in modo tale che l'angolo sotteso tra essi e il fusto dell'albero sia

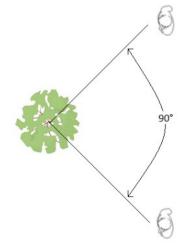


Figura 4.7 Indicazioni per la misura dell'ampiezza della chioma

retto (metodo analogo alla determinazione dell'ampiezza della chioma) (Figura 4.7). In questa posizione le due persone devono delineare una sagoma ideale della chioma ottenuta specchiando, rispetto alla mezzeria delle fronde dell'albero supposto sano e in ottime condizioni, una linea che ne definisce la silhouette sulla base della larghezza e altezza della chioma viva e dell'altezza totale dell'albero.

Si precisa che forma di tale sagoma varia a seconda della specie considerata, come rappresentato in Figura 4.8.

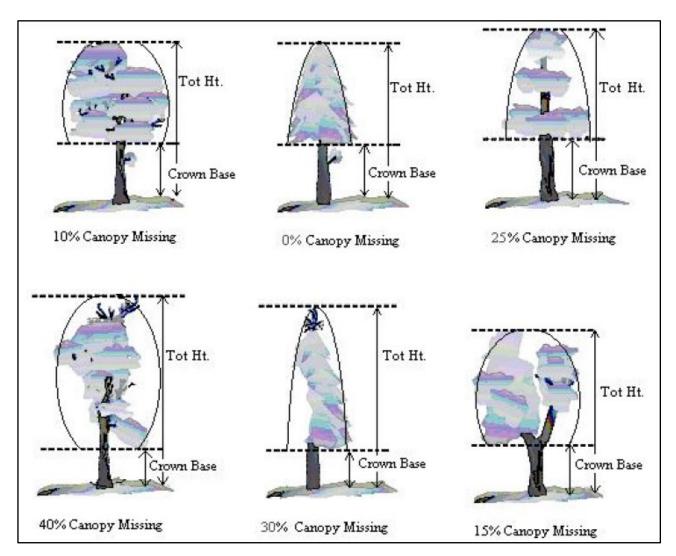


Figura 4.8 Illustrazione sulla forma naturale della chioma al variare della specie, sulla modalità di misura della percentuale di chioma mancante e dell'altezza della base della chioma [Fonte: i-Tree Eco Field Manual, 2020]

La percentuale di chioma assente viene registrata con valori espressi ad intervalli del 5%.

Gli ultimi due parametri richiesti come dati di input dal software sono la **salute del fogliame** e l'esposizione all'irraggiamento solare della pianta.

Il primo si basa su una valutazione visiva, espressa in percentuale, della quantità di chioma morta. Questa condizione viene dichiarata come *condition*, ovvero condizione di buona salute, oppure *dieback*, condizione in cui un albero inizia a perire dalle estremità, ossia dalle foglie o radici, al tronco, a causa di una malattia o di un ambiente sfavorevole. Un albero secco viene registrato come *condition* 0% oppure *dieback* 100%; il primo è il complemento a uno del secondo.

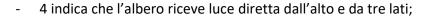
Nella creazione di un nuovo progetto, il programma *Eco* fornisce delle classi di default sulla salute della chioma per favorire una più precisa raccolta dei dati in campo e una standardizzazione delle osservazioni. Le classi predefinite sono caratterizzate da valori percentuali indicati con punti intermedi del 5%.

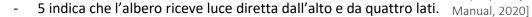
L'esposizione all'irraggiamento solare viene valutata come numero di lati della chioma che ricevono luce solare dall'alto o di lato. Il conteggio dei lati è svolto considerando che un lato è costituito dalla cima dell'albero e gli altri quattro sono ottenuti dividendo verticalmente la chioma in quattro quadranti attorno allo stelo.

Inoltre, per la determinazione di questo parametro, si assume che il sole sia sulla verticale della pianta e si ipotizza di osservare la chioma dall'alto. Per essere conteggiata, ciascuna parte deve essere illuminata per almeno un terzo. La distinzione dei lati è illustrata in Figura 4.9.

L'esposizione alla luce solare viene espresso come indice di esposizione della chioma alla luce (*Crown Light Exposure*, CLE) e varia tra zero e cinque dove:

- 0 indica che l'albero non riceve luce diretta poiché oggetti o altra vegetazione ostacolano l'esposizione ai raggi solari;
- 1 indica che l'albero riceve luce diretta solo dall'alto o da un lato;
- 2 indica che l'albero riceve luce diretta solo dall'alto e da un lato oppure solo da due lati;
- 3 indica che l'albero riceve luce diretta dall'alto e da due lati oppure da tre lati;





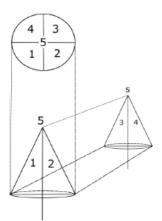


Figura 4.9 Esempio schematico della suddivisione della chioma in cinque parti [Fonte: i-Tree Eco Field Manual 2020]

Le variabili fino ad ora descritte definiscono le modalità di rilevamento dei parametri relativi agli individui arborei; nel seguito si riportano le caratteristiche del plot da esaminare nel caso in cui si imposti il progetto secondo l'approccio plot – based sample inventory.

La percentuale di superficie accessibile e misurabile individua la porzione di area di campionamento accessibile agli operatori incaricati di eseguire i rilievi per la realizzazione del progetto. Questo parametro indica che i dati reperiti fanno riferimento ad una porzione del plot e non all'intera area oggetto di analisi, in quanto la presenza di ostacoli, come alte recinzioni oppure edifici, rende inaccessibile l'area o impedisce un'adeguata visuale, ostruendo le operazioni di misura.

Nel caso in cui si scelga di improntare il progetto sulla modalità *plot – based sample inventory* è inoltre necessario definire la **percentuale di superficie coperta dalla chioma degli alberi e/o da arbusti**. La determinazione di questo dato, espresso in percentuale con punti intermedi del 5%, può essere semplificata immaginando tale porzione di territorio come la quota percentuale di area ombreggiata dagli alberi quando il sole è in posizione verticale. La superficie può anche essere oscurata da piante che non appartengono al plot, di conseguenza le aree di campionamento prive di alberi possono avere ugualmente una percentuale di superficie ricoperta dalla chioma di alberi diversa da 0%.

Per quanto riguarda la definizione della **categoria di uso del suolo**, questa indica come viene utilizzato il suolo su cui è posizionato ogni albero. All'interno del programma sono implementati di default tredici classi d'uso del suolo: "Agricoltura", "Cimitero", "Commerciale/Industriale", "Campi da golf", "Istituzionale" (scuole, ospedali, edifici religiosi, ecc.), "Residenziale", "Parco", "Popolare" (si differenzia dal residenziale poiché sono presenti più di quattro unità abitative), "Trasporti", "Utilità" (centrali elettriche, impianti di depurazione delle acque reflue, casse di espansione, ecc.), "Libero" (suolo senza uno specifico utilizzo), "Acqua" (superfici a pelo libero di fiumi e laghi, naturali o artificiali) e "Altro" (ciò che non rientra nelle categorie precedenti). L'utente ha la possibilità di aggiungere altre classi d'uso direttamente dal software.

La definizione della **composizione del suolo**, invece, non prevede una classificazione dei terreni in base alla granulometria né in funzione delle proprietà meccaniche dei sedimenti, ma distingue le varie coperture del terreno. Dal rilievo in sito o da analisi pregresse si stimano le percentuali per ogni classe di copertura, approssimando ai multipli di 5%. *Eco* dispone di undici classi di default di questo parametro e, in particolare, si distinguono "Terra nuda", "Edifici", "Superfici cementate", "Superfici bituminose", "Roccia permeabile" (inteso come materiale granulare grossolano o elementi lapidei posati senza malta), "Materiale organico sciolto", "Erba coltivata", "Erba non coltivata", "Specie erbacee" (altre colture agricole), "Altre superfici impermeabili" (massi ciclopici, pietre tombali, erba sintetica, piscine artificiali), "Acqua" (corpi idrici naturali).

# 5. I-TREE HYDRO

*i-Tree Hydro* rappresenta il primo modello di idrologia urbana specifico per la vegetazione ed è strutturato come combinazione di due moduli (S38). Il primo è progettato per simulare le variazioni orarie dei flussi in funzione delle caratteristiche degli alberi e delle coperture del suolo stimando le portate che giungono alle reti di drenaggio urbano, i quantitativi di acqua accumulata sulle superfici impermeabili del bacino, i volumi trattenuti dalle piante attraverso l'intercettazione della copertura fogliare e i processi di infiltrazione ed evapotraspirazione. Il secondo modulo, invece, è inerente alla qualità delle acque di deflusso. Queste, infatti, risultano particolarmente alterate sia dal processo di urbanizzazione che dalle attività antropiche, entrambi fenomeni che producono un forte incremento delle emissioni di inquinanti. Le concentrazioni di questi contaminanti sono trasportate dal deflusso superficiale e raggiungono i corsi d'acqua e le reti di drenaggio urbano creando nei primi problemi di inquinamento e incrementandone nei secondi il carico nocivo.

I risultati forniti dalle analisi effettuate con questo applicativo pongono in evidenza come la presenza di un ecosistema sviluppato sul suolo cittadino permetta di ricostruire un ciclo idrologico naturale che in numerose realtà urbane è fortemente condizionato dall'antropizzazione. In Figura 5.1 si riporta un confronto tra tre scenari differenti che evidenziano proprio questo concetto, ovvero come nel periodo preindustriale la presenza di suolo permeabile consentisse i naturali processi idrologici, come l'urbanizzazione ha comportato un'impermeabilizzazione del suolo riducendo drasticamente tutti i processi legati all'infiltrazione delle acque meteoriche nel suolo e al loro ruscellamento su superfici permeabili e, infine, come un reinserimento degli spazi verdi all'interno del contesto urbano possa ripristinare quelle componenti del ciclo idrologico trascurate durante la pianificazione territoriale dei centri urbani.

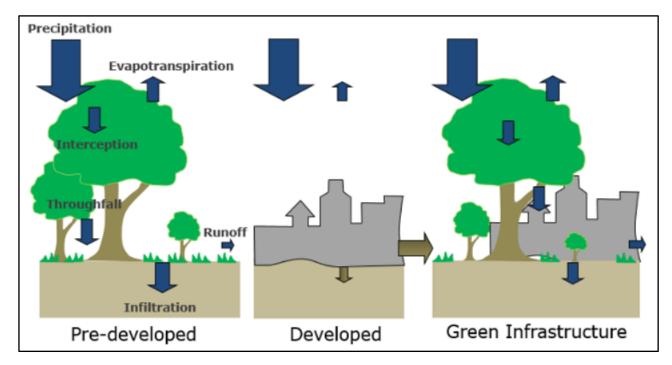


Figura 5.1 Confronto tra tre scenari differenti che evidenziano l'influenza nell'uso del suolo sul ciclo idrologico (S38)

A fronte di quanto esposto, il *tool Hydro* si pone come efficace strumento di pianificazione territoriale e urbanistica, offrendo spunti per una migliore gestione delle acque meteoriche. L'obiettivo è dunque

quello di creare un'opportuna integrazione tra il contesto urbano e gli spazi verdi, sfruttando questi ultimi come risorsa per laminare i picchi di piena generati da precipitazioni intense e, di conseguenza, ridurre il rischio alluvione cui può essere soggetta la popolazione (S38).

Così come il programma *Eco*, anche *i-Tree Hydro* lascia ampia scelta all'utente sulla scala spaziale dell'analisi; nello specifico, le aree oggetto di studio possono comprendere sia un intero bacino idrografico che una piccola parte di esso come agglomerati e parchi urbani.

L'utilizzo di *Hydro* è vincolato alla definizione delle diverse coperture del terreno che possono essere determinate mediante l'utilizzo dell'applicativo *Canopy* oppure derivare da un rilievo in sito o, ancora, essere contenute in un file di archivio. Ne consegue che, a differenza di *i-Tree Eco*, fortemente dipendente da *i-Tree Database*, *Hydro* si rende indipendente da *Canopy* e dalle tutte le altre componenti della suite.

Considerata comunque la possibile interazione tra questi due applicativi, si dedica il paragrafo successivo alla descrizione del funzionamento di *i-Tree Canopy*.

# 5.1 i-Tree Canopy

*i-Tree Canopy* è un'applicazione online che permette agli utenti di definire le diverse tipologie di copertura del suolo del territorio analizzato attraverso immagini satellitari o mappe georeferenziate (*ESRI GIS* shapefile). Questo strumento permette di conoscere la distribuzione delle superfici permeabili e impermeabili, la ripartizione delle coperture vegetate e, più in generale, catalogare porzioni di superficie in funzione degli obiettivi di progetto quali, ad esempio, identificare spazi dove è possibile inserire nuovi individui arborei.

I risultati forniti dal programma sono dati in termini di percentuali di copertura del terreno valutate attraverso un'analisi statistica che ne definisce l'errore standard. In funzione delle coperture individuate, il *tool* può quantificare gli inquinanti da esse rimossi ottenendo risultati simili a quelli che derivano da un'analisi effettuata con *Eco* le cui stime risultano però essere più accurate e dettagliate.

Il funzionamento di Canopy è piuttosto semplice e si articola nei seguenti passaggi (S39):

- a. definizione dell'area di progetto tramite tracciamento dei confini su un'immagine aerea tratta da "Google Maps" o mediante uno shapefile georeferenziato raffigurante la zona di interesse;
- b. elencazione delle coperture presenti sull'area oggetto di studio: il programma fornisce una prima distinzione tra *Tree* e *Non-Tree*, ma consente inserire ulteriori classi relative, ad esempio, alla copertura erbacea, alla presenza di terreno nudo piuttosto che distinguere le superfici permeabili da quelle impermeabili. In previsione di un utilizzo degli output forniti da *Canopy* in *Hydro*, è consigliato far coincidere queste categorie con quelle richieste in input dal programma;
- c. definizione delle caratteristiche della località (urbana o rurale) e inserimento della valuta vigente in essa in modo tale che il programma quantifichi dal punto di vista economico i benefici derivanti dalla presenza di vegetazione;
- d. attribuzione a ciascun punto generato casualmente da *Canopy* all'interno dell'area delimitata nel punto a) una delle coperture elencate al punto b). L'accuratezza dell'analisi dipende dalla capacità dell'utente di riconoscere il tipo di copertura dalle immagini aeree, ne consegue che la scelta delle classi deve essere tale da poterne consentire il riconoscimento da un'immagine

fotogrammetrica. Il numero di punti campionati viene scelto arbitrariamente dall'utente, tenendo conto che la precisione dell'analisi cresce con esso; per tale motivo, si consiglia di definire almeno 800 punti di campionamento al fine di ottenere una tolleranza accettabile sull'errore;

e. esportazione del report che contiene, in forma grafica e tabulata, il numero di punti relativi ad ogni classe di copertura e il corrispondente valore percentuale o in metri quadrati, l'errore della stima e i contributi economici derivanti dalla rimozione degli inquinanti definiti al punto c).

Il programma determina le proporzioni fra le **coperture del terreno** definite mediante un'analisi statistica che definisce l'incertezza delle stime, assumendo che la classificazione dei punti campionati rispecchi la condizione di tutta la superficie di progetto. Nello specifico, l'appartenenza di un punto alla i-esima tipologia di copertura rappresenta una variabile aleatoria di Bernoulli, per la quale sono previsti due soli risultati: esito positivo o esito negativo (Maione et al., 1993). Considerando N prove bernoulliane, cioè il numero di punti campionati indipendenti fra loro, si hanno  $n_i \in [0,N]$  successi (ad esempio punti classificati come Tree). L'aleatorietà del prelievo dei punti e l'indipendenza tra le diverse coperture del terreno consentono dunque di fare affidamento ad una distribuzione di probabilità discreta che, nel caso specifico, risulta essere la Binomiale (S39). Tale distribuzione ha una media campionaria pari alla frequenza di successo data da

$$p_i = \frac{n_i}{N} \tag{5.1}$$

mentre la frequenza di insuccesso è pari a

$$q_i = \frac{N - n_i}{N} = 1 - p_i \tag{5.2}$$

La variabilità dei risultati rispetto al valor medio si calcola attraverso la varianza

$$\sigma^2 = N \cdot p_i \cdot q_i \tag{5.3}$$

e la precisione dello stimatore mediante l'errore standard

$$SE = \frac{\sigma}{N} = \sqrt{\frac{p_i \cdot q_i}{N}} \tag{5.4}$$

L'errore standard può essere considerato come indicatore dell'imprecisione delle analisi condotte da *Canopy* in quanto il suo valore si riduce all'aumentare del numero di punti campionati.

Se il numero di successi  $n_i$  è molto piccolo rispetto al numero di punti campionati N ( $n_i < 10$ ), la funzione binomiale non risulta essere più adatta ad analizzare il campione e, pertanto, è necessario, far riferimento alla distribuzione di Poisson secondo cui la varianza e l'errore standard sono dati rispettivamente dalle seguenti formule (S39)

$$\sigma^2 = N \cdot p_i \tag{5.5}$$

$$SE = \frac{\sigma}{N} = \frac{\sqrt{N \cdot \frac{n_i}{N}}}{N} = \frac{\sqrt{n_i}}{N} \tag{5.6}$$

Sulla base di quanto esposto, emerge che gli output forniti dal programma, ovvero le percentuali delle varie coperture del terreno, sono espresse come

$$\%_i = p_i \pm SE \tag{5.7}$$

Questo significa che l'errore standard identifica l'intervallo di confidenza della variabile. Nel caso in cui si voglia riportare il risultato in metri quadri di superficie, è sufficiente moltiplicare le percentuali per l'area totale della zona in esame misurata dal programma.

Nella parte introduttiva di questo paragrafo si è accennato ad un secondo output fornito da *i-Tree Canopy,* ovvero alla stima della quantità annuale di **inquinanti atmosferici** rimossi dalle percentuali di copertura corrispondenti alla classe *Tree* e i relativi valori monetari.

Gli inquinanti atmosferici stimati sono sei e sono stabiliti sulla base di criteri definiti dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente degli Stati Uniti<sup>21</sup> (*US Environmental Protection Agency*, USEPA): monossido di carbonio (CO), biossido di azoto (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), anidride solforosa (SO<sub>2</sub>) e particolato, che comprende il particolato PM2.5 e il particolato PM10, quest'ultimo ottenuto sottraendo la concentrazione del particolato PM2.5 da quella di PM10 (Hirabayashi, 2014).

I valori annuali di rimozione dei contaminanti, espressi come tasso di rimozione degli inquinanti (g·m<sup>-2</sup>·anno<sup>-1</sup>), e il loro corrispettivo economico (\$·m<sup>-2</sup>·anno<sup>-1</sup>), sono incrementati da moltiplicatori predefiniti dal modello. I valori di questi moltiplicatori sono stati calcolati negli Stati Uniti nel 2010 sulla base del rapporto tra il quantitativo totale di inquinanti rimossi e l'area totale di copertura arborea definito per ogni area rurale e urbana. A livello di contea, il loro valore è stato derivato aggregando i dati ottenuti per le aree urbane e per quelle rurali (Hirabayashi, 2014).

Analogo procedimento è stato effettuato per determinare i fattori dei corrispettivi economici.

Per quanto riguarda l'incidenza del miglioramento della qualità dell'aria sulla salute umana, *Canopy* fa riferimento ad un programma di mappatura e analisi dei benefici ambientali (BenMAP, *Environmental Benefits Mapping and Analysis Program*). Si tratta di un programma open source creato dalla USEPA, che quantifica le concentrazioni di inquinanti e il loro valore economico in funzione della qualità dell'aria.

Discorso simile a quello effettuato per *Eco*, si ripropone per i calcoli condotti dalla BenMAP che in alcune circostanze possono fornire valori negativi dei moltiplicatori dell'inquinante PM2.5. Come spiegato in precedenza nel modello "UFORE – D" (Capitolo 4.2), questo è dovuto al fatto che in particolari situazioni gli alberi contribuiscono ad un decremento della qualità dell'aria, aumentando gli effetti negativi sulla salute. Nella fattispecie, questo fenomeno è spiegabile analizzando il processo di deposizione a secco del particolato sulle fronde degli alberi e l'eventualità che questo possa facilmente essere risospeso nell'atmosfera circostante a causa di un vento di normale entità oppure con la caduta fogliare.

In tutti gli altri casi i moltiplicatori assumono valori positivi e i valori monetari sono stimati mediante equazioni lineari di regressione del tipo

$$y = mx + q \tag{5.8}$$

dove la variabile y rappresenta i dollari per tonnellata metrica di inquinante rimosso, mentre x la densità di popolazione (Hirabayashi, 2014).

63

-

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> L'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente, in inglese *United States Environmental Protection Agency* in acronimo EPA, è un'agenzia del governo federale degli Stati Uniti d'America, incaricata della protezione ambientale e della protezione della salute umana, perseguite attraverso una puntuale applicazione delle leggi approvate dal congresso degli Stati Uniti d'America (S40).

I risultati forniti da questo applicativo possono essere utilizzati nella fase di definizione dei dati di input di un progetto sviluppato con il *tool Hydro* in cui le percentuali appena determinate possono essere utilizzate nella sezione "Copertura del terreno".

# 5.2 Modello matematico di i-Tree Hydro

*i-Tree Hydro*, così come il modulo *Eco*, è frutto della collaborazione tra i padri ideatori del modello UFORE e il Dipartimento di Agricoltura degli Stati Uniti.

Il modello "UFORE – Hydro" è uno strumento di elaborazione dati che realizza stime sugli effetti indotti dalle variazioni della copertura del suolo sulla quantità e sulla qualità dei deflussi urbani. Nello specifico, combinando i dati di input relativi ai dati meteorologici, alla copertura del suolo e ai parametri idrologici, simula i processi di precipitazione, intercettazione, evapotraspirazione, infiltrazione e deflusso (Yang et al., 2011). Gli output restituiti dal programma all'utente sono frutto di un'analisi realizzata con algoritmi implementati nel software basati su equazioni scientifiche sottoposte a revisione paritaria.

I risultati delle analisi sono riconducibili ai due modelli enunciati nella parte introduttiva al software: il primo, "UFORE – Hydro", determina i deflussi che descrivono l'idrologia della vegetazione e del suolo, mentre il secondo, prendendo come riferimento le portate calcolate con il precedente, individua i carichi di inquinanti contenuti nelle acque superficiali.

Si dedicano i sottoparagrafi successivi alla descrizione di questi due modelli e degli algoritmi su cui si basano le sub-routine del *tool Hydro*.

#### 5.2.1 Struttura del modello

"UFORE-Hydro" è un modello topograficamente basato, sviluppato attraverso la struttura OBJTOP (OBJect oriented TOPographic). Si tratta di un modello idrologico che deriva da una metodologia di progettazione che articola il sistema analizzato in varie categorie. Nello specifico, quello su cui si basa Hydro articola il sistema bacino in oggetti, definiti anche classi. Ogni classe contiene al suo interno un insieme di parametri e di funzioni necessarie ad elaborare i dati in ingresso. Ad esempio, la classe suolo (Soil) può contenere come parametro la trasmissività e come funzione una legge adatta a simulare l'umidità del suolo.

La struttura OBJTOP considera il bacino idrografico (*Watershed*) la classe di livello massimo composta da cinque sottoclassi: "Precipitazione" (*Precipitation*), "Evapotraspirazione" (*Evapotranspiration*), "Vegetazione" (*Vegetation*), "Suolo" (*Soil*) e "Corsi d'acqua" (*Channel*). Queste, a loro volta, sono ulteriormente suddivise in altre sottoclassi; ad esempio, la classe "Suolo" è suddivisa in quattro sottocategorie quali "Strato superficiale" (*Surface*), "Strato contenente l'apparato radicale degli alberi" (*Root Zone*), "Zona insatura" (*Unsaturated Zone*) e "Zona satura" (*Saturated Zone*), così come la classe "Precipitazione" è suddivisa in "Pioggia" (*Rainfall*) e "Scioglimento nivale" (*Snowmelt*) (Wang et al., 2004).

Le classi sono disposte su più livelli e sono descritte usando il concetto di "assegnazione" (*Inheritance*), mentre le interazioni tra di esse sono descritte utilizzando il concetto di "aggregazione" (*Aggregation*) (Wang et al., 2004). Si riporta in Figura 5.2 uno schema raffigurante l'articolazione del sistema bacino in classi.

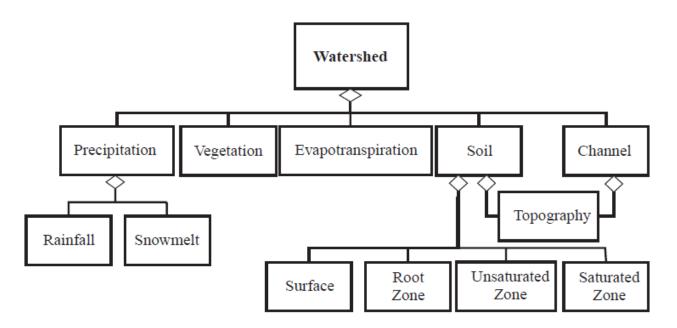


Figura 5.2 Modello OBJTOP per un bacino imbrifero; il simbolo romboidale evidenzia le interazioni tra le classi [Fonte: Wang et al., 2004]

Come detto in precedenza, "UFORE-Hydro" è un modello topograficamente basato, ovvero costruito sul presupposto che la topografia esercita un ruolo dominante sul controllo del deflusso delle acque all'interno di un bacino imbrifero. Ne consegue che il modello OBJTOP fa riferimento anche ai concetti del modello TOPMODEL.

La prima versione di *Hydro*, da cui hanno preso spunto i successivi aggiornamenti, si basa proprio su questi due schemi che descrivono un prototipo urbano che prevede scambi tra terreno, vegetazione e atmosfera, ambienti riprodotti da layer verticali, in cui le superfici sono riconosciute come permeabili o impermeabili.

L'elaborazione dei dati di input avviene mediante il modello appena descritto che prevede un'iterazione delle funzioni per cui, ad ogni step, sulla base dei dati atmosferici, il software aggiorna il quantitativo di acqua presente al suolo e sulla vegetazione che influisce, a sua volta, sul livello della falda idrica modificandolo in funzione dei dati topografici mediante gli algoritmi di TOPMODEL.

Sulla base di questi principi, "UFORE-Hydro" richiede come dati di input i dati di elevazione della superficie (NED, *National Elevation Data* o DTM) e la copertura del suolo dai quali ricava rispettivamente l'indice topografico (TI) e una stima della copertura impermeabile (IC) e di quella relativa alla chioma degli alberi (TC).

L'indice topografico viene calcolato come quoziente tra il prodotto dell'area contributiva e il perimetro, e la tangente alla pendenza del pixel locale secondo la formula

$$TI = \ln\left(\frac{A}{tg\beta}\right) \tag{5.9}$$

I valori di IC e TC, invece, vengono definiti per ogni blocco di TI, ovvero per gruppi di pixel con uguale indice topografico (Wang et al., 2008). Si riporta in Figura 5.3 una schematizzazione della struttura del modello appena descritto.

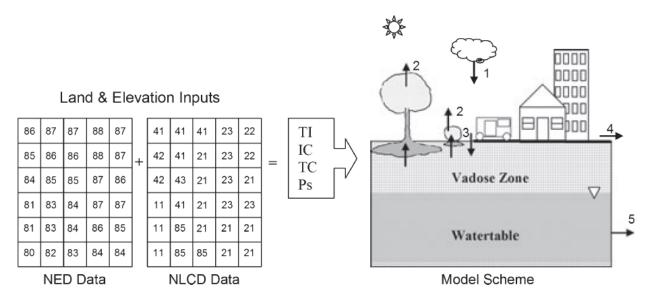


Figura 5.3 Illustrazione degli input richiesti da UFORE-Hydro utilizzati per ricavare i valori dell'indice topografico (TI), la quota parte di copertura impermeabile (IC), la copertura generata dalla chioma degli alberi (TC) e altri parametri (Ps). Gli output del modello sono la precipitazione (1), l'evaporazione (2), l'infiltrazione (3), il deflusso superficiale (4) e il flusso di base (5) [Fonte: Wang et al., 2008]

Si riserva il Sottoparagrafo 5.2.2 e il Sottoparagrafo 5.2.3 alla descrizione dei modelli matematici su cui si basa il programma per meglio comprendere i meccanismi di elaborazione dei dati inseriti dall'utente.

#### 5.2.2 Calcolo dei deflussi

L'applicativo *Hydro* ha lo scopo di rappresentare gli effetti della vegetazione e del suolo sul ciclo idrologico urbano (Wang et al., 2008), ossia di distinguere le componenti in cui si scompongono le acque piovane quando giungono a contatto con un suolo cittadino vegetato. Per ciascuna di queste il modello dispone di una specifica sub-routine capace di quantificarne i volumi in funzione dell'intensità di pioggia.

#### Intercettazione

L'intercettazione è un processo secondo cui una quota parte di precipitazione che raggiunge la superficie terrestre, viene captata dalla vegetazione arborea o arbustiva. Il quantitativo di acqua intercettato dipende sia dalle caratteristiche di durata e intensità dell'evento meteorico sia da quelle di area fogliare e capacità di immagazzinamento dell'individuo arboreo.

Lo sviluppo della routine ha come fine la quantificazione di questi volumi intercettati sia dalle chiome degli alberi che dai rami e dal tronco.

L'algoritmo utilizzato da "UFORE-Hydro" è di tipo deterministico e considera una versione modificata del modello teorizzato da Rutter; in particolare, all'interno del software è implementata una versione proposta da Valente applicabile ad una vegetazione sparsa. La variazione rispetto al modello originale consente di introdurre l'indice di area fogliare (LAI) in modo tale da contemplare nei calcoli la variabilità stagionale degli alberi che influisce su altri parametri quali, ad esempio, la perdita di acqua intercettata dalla chioma funzione della capacità massima di immagazzinamento.

Il bilancio idrico è espresso dalla seguente equazione

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = P - R - E \tag{5.10}$$

dove C è l'altezza di pioggia al tempo t (m), P è la precipitazione che ricade sulla vegetazione (m·s<sup>-1</sup>), R è la quantità d'acqua che raggiunge il suolo nell'unità di tempo (m·s<sup>-1</sup>) ed E è l'evaporazione (m·s<sup>-1</sup>) (tutte le grandezze sono espresse per unità di superficie).

Nell'intervallo di tempo  $\Delta t$ , durata della simulazione, il modello considera che solo una piccola parte della precipitazione ( $P_f$ ) raggiunge il terreno senza entrare in contatto con la chioma degli alberi e prima che la capacità di accumulo del fogliame (S) raggiunga quella massima ( $C_{max}$ ). In questo caso, ovvero quando il fenomeno dell'intercettazione è attivo,  $P_f$  coincide con R. Al raggiungimento della capacità massima di immagazzinamento  $C_{max}$ , l'acqua non è più accumulabile sulla chioma degli alberi e quella che raggiunge la pianta cade a terra. Quando la precipitazione atmosferica si interrompe, ha inizio il processo dell'evaporazione; quest'ultimo in realtà è contemplato dal modello anche durante l'evento meteorico. Si origina in questo modo un modello dinamico che permette il ripristino della memoria di intercettazione (Wang et al., 2008).

Sulla base delle teorie sviluppate da van Dijk e Bruijnzeel (2001), il valore di  $P_f$  è funzione delle precipitazioni P e della frazione di copertura fogliare c secondo l'equazione

$$P_f = P(1 - c) (5.11)$$

Il parametro c è correlato all'indice di area fogliare LAI secondo la relazione

$$c = 1 - e^{-k \cdot LAI} \tag{5.12}$$

dove k è il coefficiente di estinzione assunto pari a 0.7 per le foreste e 0.3 per una vegetazione più contenuta (Wang et al., 2008).

Per quanto riguarda la capacità di accumulo del fogliame, questa è definita dall'equazione lineare

$$S = S_L \cdot LAI \tag{5.13}$$

dove  $S_L$  (m) rappresenta la capacità massima di immagazzinamento specifica delle foglie, ovvero il livello massimo di acqua che può essere trattenuto dalle foglie di una specie arborea per unità di area fogliare (il modello assume tale valore di default pari a  $S_L = 2 \cdot 10^{-4} \ m$ ).

Il valore del LAI, invece, varia in funzione delle specie a seconda che queste siano sempreverdi oppure decidue. Nel caso di alberi decidui questo parametro dipende dal periodo stagionale considerato e, nello specifico, durante il periodo di perdita delle foglie, si fa riferimento all'indice di area del tronco (*Bark Area Index*, BAI) che rappresenta l'unico elemento di intercettazione della pioggia. L'equazione sopra citata rimane pertanto valida ma il modello considera una combinazione di LAI e di BAI, che nel complesso costituiscono l'indice di area dell'albero (*Tree Area Index*, TAI). Quest'ultimo è definito secondo la relazione

$$TAI = LAI \cdot F_{leaf} + BAI \tag{5.14}$$

dove il termine  $F_{leaf}$  indica la frazione di copertura della chioma degli alberi (TC) nella stagione di crescita e vegetativa.

Il parametro  $F_{leaf}$  assume valore massimo in estate, influenzando il valore del TAI che diventa  $TAI_{max}$ , e minimo al termine del periodo di perdita delle foglie, ovvero in inverno a cui corrisponde un  $TAI_{min}$ . Per quanto riguarda le stagioni primaverili e autunnali, il valore del TAI varia giornalmente al variare della percentuale di verde secondo la relazione

$$TAI_{daily} = \frac{(TAI_{max} - TAI_{min})}{1 + e^{-0.37(day_a - day_b)}} + TAI_{min}$$
 (5.15)

dove con  $day_a$ , in primavera, si intente il giorno Giuliano della simulazione e, in autunno, il giorno che rappresenta la transizione tra la crescita e la caduta fogliare, mentre il  $day_b$  in primavera diventa il giorno di transizione tra la caduta e la crescita fogliare e in autunno il giorno della simulazione (Wang et al., 2008).

#### Ristagni in depressioni impermeabili

Questa sub-routine valuta la quota parte di precipitazione stoccata all'interno di depressioni impermeabili presenti sul territorio, quali ad esempio buche stradali.

Essa si basa sull'algoritmo sviluppato dal modello SWMM (*Storm Water Management Model*) ideato dall'Agenzia di Protezione dell'Ambiente degli Stati Uniti (USEPA). Questo strumento paragona la superficie impermeabile ad un serbatoio di altezza costante e avente volume pari a quello delle depressioni ipotizzate. L'altezza del serbatoio rappresenta l'unico parametro da cui dipende questa subroutine e può assumere valori compresi fra 1 e 4 mm sulla base di quanto scelto dall'utente (il valore di default impostato dal programma è pari a 1.5 mm). Superata la massima capacità di invaso, ha luogo il deflusso superficiale.

Nella quantificazione dei volumi di acqua accumulati nelle depressioni impermeabili il modello prende in considerazione anche il processo di evaporazione in quanto influente sulla profondità di stoccaggio disponibile.

#### Evaporazione e traspirazione

L'evaporazione è il processo attraverso il quale l'acqua liquida passa allo stato di vapore ed è allontanata dalla superficie sulla quale è avvenuto il passaggio di stato. L'energia necessaria per compiere il passaggio di stato è fornita per la maggior parte dalla radiazione solare con un contributo derivante dalla temperatura dell'aria circostante. Man mano che il fenomeno dell'evaporazione procede, l'aria diventa gradualmente satura fino a quando, se questa non viene allontanata dalla superficie di evaporazione per azione del vento, il processo si arresta. Ne consegue che i parametri climatici fondamentali in questo processo sono la radiazione solare, la temperatura dell'aria, l'umidità e la velocità del vento.

Nel contesto analizzato da *i-Tree Hydro*, l'evaporazione è quantificabile tramite la legge di Noilhan e Planton (1989)

$$E = \left(\frac{c}{s}\right)^{\frac{2}{3}} E_p \tag{5.16}$$

dove E è il flusso di evaporazione (m·s<sup>-1</sup>), C è l'altezza di pioggia al tempo t (m), S è la capacità di accumulo del fogliame sostituibile per le superfici impermeabili con il volume contenuto nella depressione di accumulo, e  $E_p$  è l'evaporazione potenziale (m·s<sup>-1</sup>).

L'evaporazione potenziale  $E_p$  coinvolge tre elementi ambientali, ovvero le chiome degli alberi e degli arbusti, le superfici impermeabili e la quota parte di suolo permeabile. Per ognuno di questi elementi il modello stima il quantitativo di  $E_p$  e per il suolo determina anche il valore di evapotraspirazione potenziale  $ET_p$ . Nello specifico, il quantitativo di acqua che passa in atmosfera tramite quest'ultimo

meccanismo è dato dalla somma dell'evaporazione diretta e della traspirazione<sup>22</sup> generata dagli apparati radicali.

Sia l'evaporazione potenziale  $E_p$  che l'evapotraspirazione potenziale  $ET_p$  sono calcolate sulla base dell'equazione rivisitata di Penman – Monteith (Hirabayashi et al., 2016). Si tratta di una variazione dell'equazione di Penman che richiede come dati di input la temperatura media giornaliera, la velocità del vento, la pressione dell'aria e la radiazione solare e che, rispetto alla relazione formulata da Penman, tiene conto del complesso meccanismo che regola il passaggio del vapore acqueo dal mesofillo attraverso gli stomi fino all'atmosfera. La determinazione di  $E_p$  fa riferimento alla resistenza stomatica, mentre il calcolo di  $ET_p$  coinvolge sia la resistenza stomatica che la resistenza aerodinamica (Hirabayashi et al., 2016).

Il modello, inoltre, focalizza l'attenzione sull'evapotraspirazione potenziale dell'acqua dal suolo attraverso la vegetazione. La determinazione di questa particolare  $ET_p$ , indicata come  $ET_a$ , richiede la modifica di alcuni parametri utilizzati nell'equazione di Penman – Monteith in funzione della resistenza all'umidità del terreno sviluppata nella zona radicale e di quella della chioma degli alberi. L'equazione che permette di quantificare  $ET_a$  è fornita da Beven secondo cui

$$ET_a = ET_p \left( 1 - \frac{s_r}{s_{max}} \right) \tag{5.17}$$

dove  $S_r$  è il deficit di stoccaggio della zona radicale (m),  $S_{max}$  è il deficit massimo a disposizione (m) e  $ET_p$  è l'evapotraspirazione potenziale (m·s<sup>-1</sup>) (Wang et al., 2008).

#### Infiltrazione

Le precipitazioni che non vengono intercettate dalla chioma degli alberi e ricadono su una superficie permeabile danno inizio al processo di infiltrazione.

Gli algoritmi su cui si basa questa sub-routine fanno riferimento alla teoria sui processi di infiltrazione di Green-Ampt ampliata con la formulazione delle leggi di saturazione del terreno proposte nel TOPMODEL da Beven (Beven, 1984).

Il tasso di infiltrazione i proposto da questo approccio risulta pari a

$$i = \frac{dI}{dt} = \frac{\Delta \Psi + z}{\int_0^z \frac{dz}{K_z}} \tag{5.18}$$

dove I è l'infiltrazione cumulata alla profondità del suolo z (m) al tempo t,  $\Delta\Psi$  è la variazione del fronte saturo (m) e  $K_z$  è la conducibilità idraulica del terreno (m·s<sup>-1</sup>). Quest'ultima decade esponenzialmente con la profondità sulla base della relazione proposta da Wang (Wang et al., 2006)

$$K_z = K_0 (1 - f \cdot z)^n \tag{5.19}$$

dove f è un parametro funzione del contenuto volumetrico di acqua all'interno del suolo e n è un coefficiente sperimentale frutto di misurazioni in sito.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> La traspirazione è il processo mediante il quale le piante assorbono l'acqua dal terreno attraverso il loro apparato radicale e rilasciano umidità sottoforma di vapore acquea dalle foglie. Questo meccanismo, insieme all'evaporazione, concorre al processo di evapotraspirazione.

L'utente, selezionando la frazione di terreno permeabile, permette al modello di identificare la porzione di area che può incorporare le precipitazioni che giungono al suolo fino a quando il livello della tavola d'acqua non raggiunge la superficie. Nel caso in cui la pioggia giunga su un suolo saturo, il modello converte questo dato in deflusso superficiale.

Questa funzione risulta particolarmente utile nella modellazione del processo di infiltrazione nelle aree urbane dove la conducibilità idraulica presenta valori tipici dei terreni compatti; il modello, tenendo conto del livello della falda, raggiunta la saturazione del terreno, trasforma la pioggia in deflusso superficiale o in acqua ferma sul piano di calpestio. Sulla base della teoria TOPMODEL, l'aumento del livello della falda è funzione dell'indice topografico e, pertanto, varia a seconda dei valori di TI assunti dalle varie celle.

A fronte di quanto esposto, la sub-routine "Infiltrazione" consente dunque di determinare l'andamento del volume di acqua infiltrato, la profondità della falda e, una volta raggiunta la saturazione del terreno, l'entità dei deflussi superficiali.

#### Deflussi

Le analisi condotte con le sub-routine precedentemente analizzate portano alla quantificazione dei deflussi idrici distinti in superficiali su terreni permeabili ( $q_{overland}$ ) e su terreni impermeabili ( $q_{impervious}$ ), e sub-superficiali ( $q_{subsurface}$ ).

Il deflusso stimato per l'area oggetto di analisi ( $q_{total}$ ) risulta pari alla sommatoria di questi tre termini secondo l'espressione

$$q_{total} = q_{subsurface} + q_{overland} + q_{impervious}$$
 (5.20)

Il deflusso  $q_{overland}$  indica le portate derivanti dal volume di acqua che ricade sulle superfici permeabili del territorio e che si origina nel momento in cui l'intensità di pioggia supera la velocità di filtrazione e/o quando il terreno è saturo. Questa quantità può essere determinata mediante la teoria TOPMODEL secondo la relazione che segue in cui compare il rapporto tra l'area satura e la superficie totale analizzata moltiplicato per l'intensità di pioggia  $(P_w)$ , quest'ultima assume valori differenti a seconda che la superficie sia a cielo libero oppure si trovi al di sotto della chioma di un albero

$$q_{overland} = \frac{A_{sat}}{A} P_w \tag{5.21}$$

L'impervious flow, ovvero il deflusso generato da superfici impermeabili, ha origine nel momento in cui l'altezza di pioggia eccede il livello massimo che possono contenere queste superfici in seguito al quale le precipitazioni si trasformano totalmente in deflusso superficiale. Si sottolinea l'importanza dell'orografia del terreno, presa in considerazione grazie al DEM ricevuto come dato di input, e la disposizione delle aree ad alta e bassa conducibilità idraulica. L'impervious flow, infatti, può sfociare nelle aree permeabili adiacenti incrementandone il volume infiltrato.

I moti di filtrazione alimentano il base flow ( $q_{subsurface}$ ) conducendo l'acqua in un canale ricettore attraverso le porosità del terreno. La teoria su cui si basa questo fenomeno è nuovamente il TOPMODEL e le equazioni inserite all'interno di "UFORE-Hydro" sono funzione della trasmissività del suolo, della pendenza media del territorio definita tramite il DEM e del contenuto d'acqua nel caso in cui il suolo non sia saturo. Nello specifico, i rapporti tra profondità e trasmissività del suolo sono rappresentati da una legge di potenza (Wang et al., 2006).

Le sub-routine analizzate richiedono in ingresso parametri che sono in parte stimati dal programma interpretando i dati introdotti dall'utente, in parte fanno riferimento ai dati di input che, nel caso in cui non siano facilmente definibili, possono essere assunti pari a quelli di default proposti dal modello.

## 5.2.3 Calcolo del carico di inquinanti

La descrizione di questo modello è riportata nel manuale di *i-Tree Hydro* (i-Tree Hydro User's Manual, 2020).

La stima del contenuto di inquinanti presenti nei deflussi superficiali si basa sulla determinazione della concentrazione media degli eventi (*Event Mean Concentration*, EMC). Si tratta di un parametro statistico utilizzato per rappresentare la concentrazione media di un determinato inquinante contenuto nel deflusso delle acque piovane proveniente da un particolare tipo di uso del suolo o dall'intero bacino idrografico.

Il valore di EMC è definito dal rapporto tra la massa totale di sostanza inquinante registrata durante un evento di pioggia e il volume totale dei deflussi generati dalla precipitazione. La massa totale si ottiene dall'integrazione nel tempo del prodotto tra la concentrazione (C(t)) e la portata (Q(t)) istantanea, mentre il volume totale è dato dall'integrazione della portata nel tempo.

Il reperimento di dati in campo comportano un calcolo a tempo discreto in cui gli integrali possono essere sostituiti con sommatorie e l'intervallo di integrazione non è più infinitesimo ma pari all'intervallo di campionamento. Tali considerazioni si traducono nell'espressione che segue

$$EMC = \bar{C} = \frac{M}{V} = \frac{\int C(t)Q(t)dt}{Q(t)dt} \approx \frac{\sum C(t)Q(t)\Delta t}{\sum Q(t)\Delta t}$$
 (5.22)

Concretamente il valore di EMC è la media della concentrazione di un inquinante rispetto al volume totale d'acqua che scorre in superficie durante un evento di pioggia (Figura 5.4). Le grandezze vengono integrate su un intervallo temporale pari alla durata dell'evento di pioggia, ciò significa che per una medesima area sono presenti un numero di valori di EMC pari al numero di eventi monitorati dei quali si prende in considerazione il valore medio.

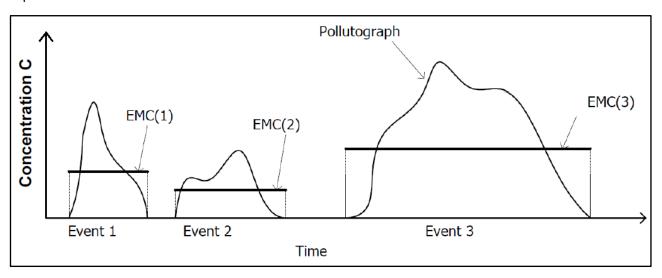


Figura 5.4 Confronto tra la concentrazione media degli eventi EMC(i) e l'andamento nel tempo della concentrazione per diversi eventi di pioggia [Fonte: i-Tree Hydro User's Manual, 2020]

Per quanto riguarda il carico di inquinante L, questo è dato dal prodotto tra la concentrazione media e la portata, calcolata in funzione dell'altezza del deflusso e dell'area della superficie considerata

$$L = EMC \cdot Q = EMC \cdot d_{y} \cdot A \tag{5.23}$$

Il calcolo della concentrazione media degli eventi e del carico di inquinanti viene effettuato considerando le portate del pervious e impervious flow, cioè quelle superficiali; si esclude dal calcolo l'aliquota di deflusso relativa al base flow.

# 5.3 Configurazione di un progetto i-Tree Hydro

La realizzazione di un progetto con l'applicativo *Hydro* della suite *i-Tree* si articola in varie fasi analizzate nei sottoparagrafi seguenti. Come visto in precedenza per il programma *Eco*, anche questo applicativo prevede una prima fase di configurazione del progetto in cui si definiscono le informazioni relative all'area oggetto di studio, una seconda fase di inserimento dei dati di input e un'ultima fase di visualizzazione e analisi degli output.

# 5.3.1 Configurazione del progetto: Watershed o non – Watershed

Hydro richiede una prima e importante distinzione nell'analisi in base alla finalità del progetto. Nello specifico, il programma richiede di definire se il territorio analizzato comprende il bacino di un fiume rispetto ad una sezione di chiusura, oppure se la modellazione interessa un'area le cui acque non confluiscono in un unico corpo idrico. Nella prima situazione si rientra nel caso Watershed che letteralmente significa "bacino imbrifero", mentre nel secondo si ricade nella modalità non – Watershed.

Si evidenzia che la differenza tra i due approcci non è tanto legata alle dimensioni della superficie considerata, quanto alla presenza o meno di un corpo idrico ricettore in cui confluiscono le acque che scorrono sulla porzione di territorio analizzato (Figura 5.5). Nel caso in cui si scelga di effettuare entrambe le simulazioni, i risultati devono essere in qualche modo correlati in quanto un progetto *non-Watershed* rientra sicuramente all'interno della superficie di un bacino idrografico.





Figura 5.5 Esempi di configurazione di un progetto i-Tree Hydro: a sinistra un caso non-Watershed rappresentato dal giardino di Via Revello (Torino) [Fonte: Vigliocco, 2019], a destra un possibile approccio Watershed raffigurato dal comune di Auronzo di Cadore (Belluno) attraversato dal torrente Ansei (S41)

La modalità con cui l'utente decide di effettuare l'analisi, influisce sulla scelta dei dati di input da fornire al programma, sulla possibilità o meno di inserire dati di portata e sulla funzione di calibrazione. Quest'ultima è uno strumento che *i-Tree Hydro* mette a disposizione degli utenti e che consente di modellare quantitativamente i deflussi allineando i valori di default attribuiti ai parametri idrologici a valori che meglio simulano le condizioni idrologiche e di suolo presenti in loco. Tale funzione non è disponibile per i progetti *non-Watershed* in quanto realizzati per aree i cui deflussi non convergono in un unico punto di raccolta in cui è possibile misurarne la portata ma, bensì, vengono scaricati in più punti del territorio.

## 5.3.2 Dati di input

L'inserimento dei dati di input per sviluppare un progetto con *i-Tree Hydro* non avviene tramite il *Database*, come invece visto per *Eco*, ma si effettua all'inizio di ogni progetto direttamente dall'interfaccia del programma.

Hydro prevede tre step di inserimento dati: il primo riguarda le informazioni inerenti l'area di progetto, il secondo prevede la parametrizzazione delle variabili del suolo, nello specifico dei dati relativi alla copertura del territorio, e, infine, il terzo vede l'inserimento dei parametri idrologici.

#### Step 1: Informazioni sull'area di progetto

Il primo passaggio che l'applicativo richiede all'utente è l'inserimento dei dati relativi alla località oggetto di analisi ponendo attenzione al fatto che i bacini idrografici non sono identificati da confini politici o amministrativi e, pertanto, è importante definire lo stato o la città che ne comprende la maggior parte.

Hydro lavora identificando una zona all'interno del territorio statunitense, tuttavia questo aspetto non rappresenta un limite per l'utilizzo del programma al di fuori degli USA in quanto è sufficiente identificare una zona degli Stati Uniti che abbia latitudine, altitudine e caratteristiche climatiche simili alla zona di interesse. Questo passaggio comunica al modello le informazioni relative al ciclo di crescita delle piante e alle condizioni atmosferiche associate alla località oggetto di studio. La metodologia per individuare tale luogo di riferimento è la medesima descritta nel Paragrafo 4.1 (i-Tree Database).

Successivamente, il programma richiede di definire il periodo e la durata temporale della simulazione relativamente ai dati meteorologici e, nel caso di progetto *Watershed*, di portata.

L'inserimento dei dati meteorologici avviene alla voce "Weather Station Data" e può essere condotto secondo tre modalità: la prima consente di selezionare una stazione meteorologica identificandola tra quelle presenti su "Google Maps" per la città di riferimento statunitense selezionata nel primo passaggio, la seconda prevede l'inserimento di un file.dat contenente i dati meteorologici precedentemente scaricato dal database della *National Climatic Data Center* (NCDC) (S42) in cui sono presenti tutte le stazioni di misura validate dal Servizio Forestale del Dipartimento di Agricoltura degli Stati Uniti, e, infine, l'ultima modalità permette di eseguire l'upload dei dati rilevati da una stazione scelta dall'utente. In questo ultimo caso è necessario assicurarsi che la data della simulazione impostata coincida con il periodo temporale del dataset meteorologico e, nel caso di progetto *Watershed*, anche delle portate.

La necessità di far riferimento alle stazioni meteorologiche proposte da *i-Tree* deriva dal fatto che queste rilevano parametri peculiari, solitamente non misurati da tutte le stazioni ma fondamentali per effettuare simulazioni con *Hydro*.

I dati meteorologici richiesti in input sono la direzione e la velocità del vento, la copertura del cielo, la temperatura dell'aria e del punto di rugiada<sup>23</sup>, la pressione atmosferica e i dati pluviometrici, settati secondo un preciso formato richiesto in input dal programma. Anche in questo caso, come per *Eco*, il programma richiede serie di valori di durata pari ad almeno un anno solare con frequenza oraria.

Questa prima fase prevede, infine, l'inserimento dei dati topografici relativi alla porzione di territorio analizzata. Anche per questa tipologia di input, *i-Tree Hydro* consente di caricare i dati presenti nel suo database (disponibili esclusivamente per il territorio statunitense) oppure di inserirli manualmente come DEM o dati TI (questi ultimi descrivono il logaritmo naturale del rapporto tra la superficie della cella e la sua pendenza locale). L'inserimento di queste informazioni comporta una discretizzazione del territorio in maglie a cui ad ogni nodo sono associate le relative quote altimetriche. Si precisa che il file DEM deve essere georeferenziato in GIS e convertito da formato Raster ad ASCII, salvandolo come file di testo (.dat).

#### Step 2: Dati sulla copertura del suolo

I differenti scenari di copertura del suolo sono il fulcro del modello del *tool Hydro* in quanto consentono il confronto tra gli effetti che le diverse tipologie di suolo possono avere sul ciclo idrologico del contesto urbano di interesse.

L'intera area deve dunque essere classificata con opportune categorie di copertura del suolo distinguendo, nello specifico, le superfici arboree da quelle arbustive ed erbacee e ponendo particolare attenzione alla permeabilità delle diverse zone che costituiscono l'area oggetto di studio. Inoltre, se sono presenti, è necessario specificare quali superfici sono ricoperte da terra nuda e quali sono a pelo libero. L'identificazione delle varie tipologie di copertura del suolo può essere eseguita facendo ricorso all'applicativo online *Canopy* analizzato nel Paragrafo 5.1.

L'importanza che viene attribuita alla permeabilità del terreno è evidenziata dalla distinzione del tipo di superficie cui appartiene la chioma degli alberi in permeabile o impermeabile. Questo evidenzia il fatto che se un albero viene piantumato in un parcheggio, l'area a cui appartiene la sua chioma viene convertita in percentuale di copertura impermeabile (*Impervious under Tree Canopy*), mentre se l'albero viene posizionato su un manto erboso, allora l'area a cui appartiene la chioma viene classificata come permeabile (*Pervious under Tree Canopy*).

In questo passaggio, è possibile inserire fino a quattro scenari di copertura del suolo di cui il primo riflette la condizione attuale descritta dall'utente mediante i dati inseriti in precedenza (*Base Case*), mentre gli altri possono essere introdotti per mostrare come variazioni della permeabilità e della copertura del suolo possono influire sull'idrologia dell'area di studio (*Alternative Case*). È possibile per esempio considerare la costruzione di una pavimentazione cementizia, e quindi impermeabile, su un terreno precedentemente erboso, la piantumazione di nuovi alberi, l'inserimento di arbusti nel centro di una rotatoria ed altro ancora.

maggiore) il sistema è bifase, cioè costituito da un liquido in equilibrio con il suo vapore (S43).

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> L'espressione punto di rugiada, in inglese *dew point*, indica un particolare stato termodinamico, rappresentato dalla temperatura e dalla pressione, in corrispondenza del quale una miscela bifase multicomponente liquidovapore diviene satura di vapore. In altre parole, oltre il punto di rugiada (cioè a temperatura maggiore e/o a pressione minore) si ha la presenza solo di vapore, mentre sotto il punto di rugiada (cioè a temperatura minore e/o a pressione

Gli utenti impostano i nuovi scenari nel programma variando le percentuali delle tipologie di copertura del terreno; tali valori possono essere modificati in qualunque momento, eseguendo una simulazione ogni volta che vengono apportate delle correzioni.

L'inserimento dei casi alternativi è un processo facoltativo; il programma consente, infatti, di analizzare esclusivamente il caso base, ottenendo, comunque, importanti risultati in termini di deflussi generati da un evento di precipitazione.

Un ulteriore parametro richiesto in input dal programma è la DCIA (*Directly Connected Impervious Area*) definita come "la porzione di area impermeabile con collegamento idraulico diretto al sistema di drenaggio urbano o ad un corso d'acqua tramite superfici pavimentate continue, grondaie, tubi di scarico o altre strutture di trasporto e detenzione che non riducono il volume di deflusso" (S44). La definizione di DCIA esclude, quindi, le superfici impermeabili isolate senza connessione diretta al sistema fognario, ad un fiume o ad un altro corpo idrico.

Questo parametro condiziona significativamente i deflussi su superficie impermeabili in quanto direziona i flussi di precipitazione caduti su tali coperture all'interno dell'area di progetto.

Esistono vari metodi per determinare la DCIA: nel caso in cui non si disponga di informazioni più appropriate, il primo valore che si può attribuire a questo parametro è quello proposto di default dal programma; in alternativa è possibile effettuare delle stime approssimative in funzione della conoscenza del sito e della copertura impermeabile. Infine, la determinazione del valore di DCIA può basarsi su un metodo empirico (equazioni di Sutherland) che stima tale parametro in percentuale in funzione della superficie impermeabile totale e rispetto alla superficie totale dell'area oggetto di studio. Su piccole aree l'attribuzione di un valore a tale parametro può essere raffinata per esempio suddividendo le aree impermeabili in sottocategorie (strade collegate/non collegate, tetti collegati/non collegati, ecc.) e analizzandole con l'applicativo *Canopy*. Per una stima ancora più accurata, invece, è possibile far ricorso al software *ArcGIS* in cui è possibile importare una mappa della rete fognaria, delle coperture impermeabili e di elevazione del terreno.

In merito alle equazioni di Sutherland (2000) raccomandate dall'EPA (S45), queste forniscono il valore di DCIA in funzione del tipo di uso del suolo e delle stime sulla copertura di terreno impermeabile secondo quanto riportato in Tabella 5.1.

Tabella 5.1 Equazioni proposte da Sutherland per la determinazione della DCIA in funzione del tipo di uso del suolo e delle caratteristiche dell'area analizzata [Fonte: i-Tree Hydro User's Manual, 2020]

Criteri di selezione dei bacini idrografici	Uso del suolo	Equazione ( $IA\ (\%) \geq 1$ )
Mediamente concentrato: territorio caratterizzato principalmente acque piovane di tempesta provenienti da cordoli e grondaie, assenza di pozzi e/o infiltrazioni, tetti residenziali non direttamente collegati	Commerciale, industriale, istituzionale, terreno aperto, residenziale con media densità abitativa	$DCIA = 0.1(IA)^{1.5}$
Altamente concentrato: come sopra, ma i tetti degli edifici sono collegati	Residenziale con alta densità abitativa	$DCIA = 0.4(IA)^{1.2}$
Totalmente connesso: il 100% delle acque piovane di tempesta provengono da tutte le IA	-	DCIA = IA

collegate e raggiungono il sistema di drenaggio urbano		
Parzialmente connesso: il 50% delle acque piovane di tempesta non raggiungono il sistema di drenaggio urbano ma interessano strade a sezione aperta, depressioni erbose, tetti residenziali non collegati e in parte si infiltrano	Residenziale con bassa densità abitativa	$DCIA = 0.04(IA)^{1.7}$
Per lo più disconnesso: una piccola percentuale di acque piovane di tempesta interessa il sistema di drenaggio urbano, il 70% o più di acqua viene infiltrata	Agricoltura, Foresta	$DCIA = 0.01(IA)^2$

A conclusione dell'inserimento dei parametri relativi a questo secondo step, il software richiede dati inerenti la chioma di alberi e arbusti. In particolare, i valori dei parametri di cui il software necessita sono l'indice di area fogliare di alberi, arbusti e copertura erbacea, e la percentuale di copertura arborea e arbustiva sempreverde.

#### Step 3: Parametri idrologici

I parametri idrologici sono definiti in funzione del tipo di terreno e delle proprietà della vegetazione ai quali il programma associa valori di default che derivano da studi effettuati sui bacini statunitensi.

Dal momento che tali valori possono essere incoerenti con le condizioni climatiche e le caratteristiche geologiche dei terreni in cui viene condotta l'analisi, è possibile correggerli sostituendoli manualmente, se si dispone di dati specifici, oppure attraverso il servizio di auto-calibrazione implementato all'interno di *i-Tree Hydro*. Questo strumento è in grado di estrapolare i parametri idrologici di cui necessita il modello a partire dalla serie temporale delle portate misurate nello stesso anno in cui si esegue la simulazione. Si precisa che il programma non utilizza il flusso osservato per determinare questo set di parametri, bensì ne fa uso come fine secondo per la calibrazione del modello. Nello specifico, infatti, la funzione di auto-calibrazione allinea l'idrogramma misurato con quello ideale derivante dalla simulazione modificando iterativamente il set di parametri fino ad arrivare al minimo scarto fra i due flussi.

Il vantaggio di questo strumento, oltre a quello di visualizzare istantaneamente i valori auto-calibrati dei parametri, è quello di fornire degli indicatori della corrispondenza tra i due risultati. Questi indicatori fanno riferimento all'efficienza volumetrica, all'adattamento del flusso di picco, del flusso di base e del flusso bilanciato. I valori assunti da questi parametri possono variare tra da meno infinito ed uno, dove il valore di 1.0 indica una perfetta corrispondenza tra il flusso totale previsto e quello osservato, un valore nullo indica che le previsioni non corrispondono al meglio alle osservazioni e, nello specifico, al valor medio del deflusso e, infine, i valori negativi indicano che le previsioni sono peggiori rispetto al valor medio del flusso osservato. Una buona calibrazione dei dati fornisce dei valori degli indicatori che variano tra 0.3 e 0.7.

Al fine di poter utilizzare il servizio di auto-calibrazione, i deflussi devono essere misurati con frequenza oraria per la durata di almeno un anno solare, dal 1° gennaio al 31 dicembre, devono presentare una specifica formattazione e devono essere riportati in un file di testo come portate specifiche, ovvero come quantità di flusso per unità di area del bacino.

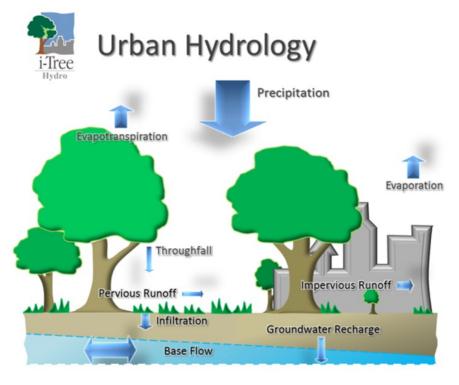
La funzione di auto-calibrazione è disponibile, come già segnalato, esclusivamente per i progetti Watershed nei quali favorisce un confronto quantitativo tra gli scenari ipotizzati. Il programma, tuttavia, funziona ugualmente anche in assenza della serie di portate fornendo ugualmente risultati interessanti per confronti qualitativi tra i casi analizzati. *i-Tree Hydro*, infatti, è stato progettato per valutare gli effetti che cambiamenti nella vegetazione e nella copertura del suolo hanno su flussi e qualità delle acque e, pertanto, anche se dispone del servizio di auto-calibrazione, non è adatto per previsioni di flusso estremamente accurate. Non è, infatti, appropriato aspettarsi che Hydro preveda quantitativamente i metri cubi di acqua che potrebbero raggiungere un corso d'acqua se uno scenario ipotizzato divenisse reale, bensì, è più opportuno pensare che questo strumento preveda quantitativamente come uno scenario progettato potrebbe variare i metri cubi di acqua che giungono al corso d'acqua.

L'intento dei programmatori di questo applicativo è infatti quello di rendere *Hydro* un modello relativamente agevole da utilizzare, semplificando alcune complessità dell'idrologia mediante l'attribuzione di valori di default alla maggior parte dei parametri idrologici. Sulla base di queste premesse, l'utilizzo del programma è consentito ad un'ampia e diversificata gamma di utenti lasciando in ogni caso la possibilità ai più tecnici di mettere a punto il modello adattandolo alle proprie esigenze.

Si evidenzia la possibilità di utilizzare la calibrazione indiretta per alcune aree configurate come *non-Watershed*. Nello specifico, se la porzione di territorio analizzato presenta parametri idrologici molto simili a quelli del bacino idrografico all'interno del quale ricade (ad esempio un contesto urbano compreso in gran parte all'interno di un bacino idrografico), la calibrazione può essere eseguita sui dati del bacino idrografico e il set di parametri idrologici calibrati può essere esportato ed applicato al progetto *non-Watershed*.

Nel seguito si esplicitano i parametri idrologici necessari al funzionamento del programma e rappresentativi dei processi idrologici analizzati a scala locale.

Si definiscono processi idrologici quei meccanismi che regolano gli scambi idrici fra l'atmosfera. suolo. sottosuolo, la rete idrografica e gli specchi d'acqua. Tra i più significativi, riportati in Figura 5.6. si ricordano precipitazione, che origina scambi idrici tra l'atmosfera ed il sistema terrestre, l'intercettazione della precipitazione da parte della copertura del suolo, l'evaporazione dalle superfici bagnate, la traspirazione ad opera della vegetazione, l'infiltrazione dell'acqua nel



suolo e nel sottosuolo e la Figura 5.6 Rappresentazione del ciclo idrologico (S38)

conseguente percolazione negli strati profondi che alimenta il deflusso di base e la ricarica della falda idrica, e, infine, la propagazione del deflusso superficiale e del deflusso ipodermico.

Sulla base di quanto sopra esposto, *Hydro* richiede i seguenti parametri in ingresso:

- *flusso medio annuo dell'area di progetto* (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>), proposto di default come prodotto tra un'intensità di pioggia costante (1.6·10<sup>-5</sup> m·h<sup>-1</sup>) e la superficie del bacino per le aree *non-Watershed*, oppure pari al valore della portata media annua misurata nella sezione di chiusura per i progetti *Watershed*; risulta essere un dato essenziale per il calcolo del *base flow*;
- tipo di suolo, è possibile selezionare una tipologia di suolo tra "Sabbia", "Sabbia argillosa",
   "Argilla sabbiosa", "Argilla", "Limo", "Limo sabbioso", "Limo argilloso", "Argilla limosa", "Terreno sabbioso", "Terreno argilloso", "Terreno limoso", "Tessitura mista";
- fronte di umidificazione (m), definito come la profondità in cui termina la zona satura e ha inizio quella insatura nel modello di Green-Ampt (Beven, 1984); permette di caratterizzare la velocità con cui l'acqua piovana penetra nel terreno;
- *umidità del suolo*, data dalla differenza tra il contenuto di acqua al di sopra del fronte di umidificazione (zona satura) e il contenuto d'acqua nelle condizioni iniziali del terreno; influisce sul tasso di filtrazione nel modello di Green-Ampt (Beven, 1984);
- conducibilità idraulica superficiale (cm·h<sup>-1</sup>), corrisponde al valore iniziale dell'andamento della conducibilità idraulica del terreno stimato con una legge di decadenza esponenziale (Wang et al., 2006); è funzione della tessitura del terreno ed è proporzionale al tasso di filtrazione;
  - (questi ultimi tre parametri possono essere modificati solo se si seleziona *Tessitura mista* come tipo di terreno, negli altri casi i valori sono definiti dal programma)
- *profondità dello strato superficiale* (m), definito dal programma come lo spessore di terreno in cui avvengono i processi di infiltrazione ed evapotraspirazione; il valore attribuito identifica una profondità media valida per l'intera area di progetto;
- saturazione iniziale del suolo (%), ovvero contenuto di acqua nel terreno all'inizio della simulazione.

Il programma consente, inoltre, di personalizzare numerosi altri parametri che rientrano nella categoria "Advanced Settings" quali:

- periodo di transizione del fogliame (giorni), ovvero durata del periodo di transizione dal LAI minimo degli alberi decidui (senza foglie, in inverno) al LAI massimo (chioma completa, in estate);
- giorno di inizio del periodo di transizione, espresso come il numero di giorni dal primo gennaio in cui si completa la transizione del fogliame;
- giorno di inizio del periodo di transizione inverso, ovvero durata del periodo di transizione dal valore massimo di LAI al valore minimo;
- LAI minimo, espresso come indice dell'area della corteccia di alberi e arbusti;
- altezza d'acqua trattenuta da una singola foglia (mm), si assume un valore medio;
- *profondità delle depressioni permeabili* (mm), ovvero valore medio delle zone con superficie permeabile caratterizzate da una quota inferiore al piano campagna;

- profondità delle depressioni impermeabili (mm), come sopra ma con superficie impermeabile;
- trasmissività della zona satura (m²·h⁻¹), definita come l'integrale della conducibilità idraulica sullo spessore saturo;
- tempo di ritardo della zona insatura (h), ovvero tempo impiegato dall'acqua per passare dal limite superiore della zona insatura alla falda;
- percentuale di macropori nel suolo (%), cioè percentuale di volume del terreno occupato dai macropori;
- area di progetto in cui l'intensità di pioggia può superare il tasso di filtrazione (%).

Per fare chiarezza sulle variabili esposte, si riporta in Figura 5.7 la rappresentazione del terreno proposto dal modello di Hydro.

Questa sezione relativa all'inserimento dei dati idrologici prevede, infine, la definizione dei coefficienti necessari per il calcolo del carico di inquinanti cui è soggetta l'area oggetto di studio. Nello specifico, si tratta dei valori di concentrazione media degli eventi (EMC) definiti nel Sottoparagrafo 5.2.3 che moltiplicati per i deflussi superficiali permettono stimare la massa di inquinanti che raggiunge un corpo idrico o il sistema di drenaggio urbano.

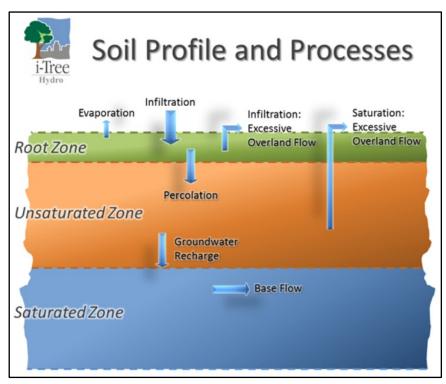


Figura 5.7 Modello idrogeologico del terreno (la Upper Soil Zone è qui indicata come Root Zone) (\$38)

# 5.3.3 Analisi degli output

Dopo aver inserito all'interno di *Hydro* i dati ed i parametri di cui necessita il modello, si procede con l'esecuzione del programma.

I risultati dell'analisi sono tanto più dettagliati e precisi quanto più lo sono stati i dati in ingresso. Essi esaminano la risposta idrologica dell'area oggetto di studio al variare dell'utilizzo del suolo e fornisco utili considerazioni per una migliore gestione delle risorse naturali, soprattutto dal punto di vista della mitigazione del rischio inondazioni. La valutazione della qualità dell'acqua, invece, fornisce la possibilità di controllo diretto sulle concentrazioni delle sostanze inquinanti che circolano nel contesto urbano analizzato, o a livello di bacino idrografico, e permette di individuare eventuali picchi che potrebbero eccedere i limiti imposti dal D.Lgs. n.152 del 2006, "Norme in materia ambientale".

I dati forniti in output dal modello sono organizzati in termini di *Water Quantity, Water Quality* e *Advanced Output* e sono disponibili in forma tabulare o grafica. La modalità di esposizione dei risultati di *Hydro* permette un confronto rapido tra gli output forniti dal modello e, nel caso in cui l'utente abbia

ipotizzato scenari alternativi, evidenzia le differenze tra questi e il caso base permettendo di esplorare l'effetto dei cambiamenti nei parametri di copertura del suolo.

Si riporta nel seguito una descrizione degli elaborati restituiti in uscita da Hydro.

#### Executive Summary

Uno degli output forniti da *Hydro* è il "Riepilogo Esecutivo", ovvero un report in cui vengono riassunte le peculiarità del progetto. Nella parte iniziale, infatti, sono riportati i parametri di ingresso utilizzati dal modello per eseguire l'analisi, quindi la dimensione dell'area di studio, i dati pluviometrici e di portata (se inseriti) registrati dalle stazioni di misura e la descrizione della copertura del suolo. Nel caso in cui l'utente scelga di eseguire l'analisi per due scenari diversi, il programma restituisce un primo confronto tra questi dati di input.

La modalità di rappresentazione dei risultati distingue i deflussi in tre componenti:

- *pervious flow*, ovvero portate derivanti dai quantitativi di acqua che ricadono sulle superfici permeabili del territorio a cui vengono sottratti la quota parte relativa all'evaporazione e i volumi trattenuti nelle zone di accumulo impermeabili;
- *impervious flow*, ovvero deflussi generati dalle superfici impermeabili depurati anch'essi dei quantitativi relativi all'evaporazione e ai volumi raccolti nelle depressioni impermeabili;
- base flow, ovvero flusso generato dal moto di filtrazione della falda incrementato dall'apporto di acqua piovana.

Per ciascuna di queste quantità il programma fornisce i valori in forma tabulare e ne rappresenta l'andamento in funzione del tempo in forma grafica mediante istogrammi.

Ulteriori risultati inclusi nell'*Executive Summary* sono inerenti al carico di inquinanti presente nei deflussi superficiali. In particolare, il programma descrive il carico di dieci inquinanti presenti all'interno delle acque che confluiscono in un corpo idrico ricettore o nella rete di drenaggio urbana confrontando, se presente, il caso base con il caso alternativo ipotizzato.

#### Water Quantity

Questa tipologia di output quantifica il deflusso totale e le sue tre componenti (*pervious flow*, *impervious flow* e *base flow*) i cui andamenti sono presentati mediante istogrammi, serie temporali e tabelle.

I primi permettono un confronto tra i deflussi misurati (se presenti) con quelli ottenuti dalla simulazione calcolati con i parametri idrologici inseriti o derivati dall'auto-calibrazione. Il confronto tra i vari scenari può anche essere esplicitato in funzione di scale temporali diverse, dall'intero anno ad intervalli settimanali.

Per quanto riguarda le serie temporali, queste riportano i pluviogrammi e gli idrogrammi rimarcando, ove presente, l'accostamento tra eventi di pioggia intensa e innalzamento delle portate. I valori delle precipitazioni, inseriti come dati di input, fanno riferimento alle misurazioni registrate dalla stazione meteorologica selezionata nello Step 1.

Infine, il formato tabulare accosta alle rappresentazioni grafiche i relativi valori numerici. Anche in questo caso è possibile osservare gli output in funzione di scale temporali diverse, variandone la

visualizzazione da una frequenza oraria a giornaliera, settimanale, mensile fino ad avere un solo valore per l'intero anno.

#### Water Quality

L'output Water Quality riporta il carico di dieci inquinanti, espresso in chilogrammi di massa su unità di tempo, presenti all'interno delle acque che scorrono sulle superfici costituenti l'area analizzata.

Nello specifico, gli inquinanti ricercati e quantificati all'interno dei deflussi superficiali sono i TSS (*Total Suspended Solid*) ovvero i solidi sospesi trasportati da una portata liquida, il BOD (*Biochemical Oxigen Demand*) cioè la quantità di ossigeno necessaria per decomporre le sostanze organiche presenti in una soluzione acquosa (S46), il COD (*Chemical Oxigen Demand*), parametro con caratteristiche simili al BOD, il fosforo totale dato dalla somma di tutti i suoi composti presenti in natura, il fosforo solubile in acqua, il TKN (*Total Kjeldahl Nitrogen*) indicatore della quantità di azoto presente nel terreno (S47), i nitrati e i nitriti, il rame, il piombo e lo zinco.

Le tipologie di rappresentazione di questi risultati sono analoghe a quelle viste per i deflussi, ovvero istogrammi, serie temporali e tabelle. Quanto detto per personalizzare, modificare ed esportare gli elaborati rimane valido anche in questo campo.

#### Advanced Output

Questa tipologia di output deriva dall'esecuzione delle sub-routine che compongono il modello di *Hydro* (Sottoparagrafo 5.2.2).

Come si evince dal nome, questi report evidenziano caratteristiche più specifiche dell'analisi e si suddividono in "Idrologia della vegetazione" e "Idrologia del terreno".

Per quanto riguarda "Idrologia della vegetazione", si considera il bilancio idrico a livello di albero (Figura 5.8) che vede in ingresso la quantità di precipitazione (1) e in uscita l'evapotraspirazione prodotta dall'apparato fogliare della pianta (2), il deposito dell'acqua sul fogliame costituente la chioma dell'albero (3), l'immagazzinamento dell'acqua attraverso foglie e corteccia (4) e la caduta dell'acqua in eccesso sul terreno (5). Quest'ultima quantità crea un sotto bilancio in cui essa viene equilibrata dal processo di evapotraspirazione del suolo (6) e dall'acqua infiltrata nel terreno posto direttamente sotto la chioma dell'albero (7), di cui una parte viene sottratta dall'apparato radicale della pianta (8).

Questo sotto-bilancio fa riferimento all'output definito "Idrologia del terreno" che analizza, per l'appunto, i processi che si verificano nella porzione di terreno presente sotto la chioma dell'albero.

In entrambe le tipologie degli *Advanced Output*, i volumi sono diagrammati in funzione del tempo e associati alle intensità pluviometriche.

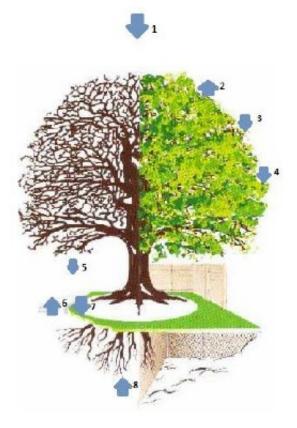


Figura 5.8 Bilancio idrico a scala di albero

I diagrammi possono essere personalizzati esteticamente secondo le modalità descritte in *Water Quantity* e *Water Quality*, scegliendo quali voci inserire nel grafico.

#### Calibration Comparison

Come detto in precedenza, *i-Tree Hydro* dispone della funzione di auto-calibrazione che permette agli utenti di individuare automaticamente i parametri che meglio adattano l'idrogramma di progetto a quello misurato in campo.

Questa funzione fornisce come output le portate totali in funzione del tempo e consente di apprezzare il discostamento tra i valori stimati e quelli misurati. Poiché il processo di auto-calibrazione può essere eseguito rispetto ai dati mensili, settimanali, giornalieri o orari andando ad infittire la maglia dei nodi che si cerca di avvicinare, il confronto tra i risultati che si ottengono può essere effettuato su scale temporali diverse.

# 6. APPLICAZIONE DI I-TREE AD UN CASO STUDIO

# 6.1 Informazioni generali sul parco urbano "Le Vallere", Moncalieri

Il parco urbano individuato come caso studio per l'applicazione del software *i-Tree* è il parco "Le Vallere" situato alla confluenza tra il torrente Sangone e il fiume Po, nei territori comunali di Moncalieri e, in misura minore, di Torino.

Si tratta di un vasto parco semi-urbano a carattere estensivo che interessa una superficie di circa 130 ettari (Figura 6.1) e che, in seguito all'emanazione della legge regionale n. 19 del 29 giugno 2009, è stato tutelato dalla Regione Piemonte come Riserva Naturale; attualmente è aperto al pubblico e fruibile con regolamentazione (S48).

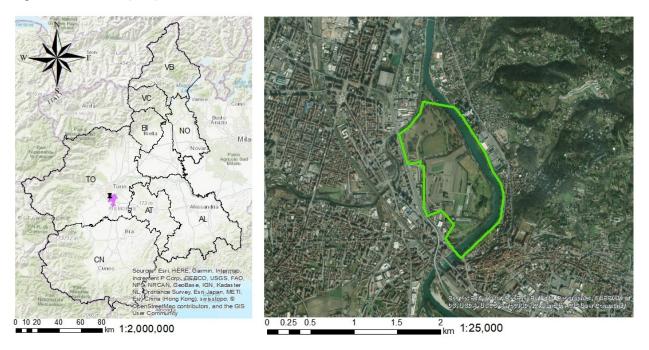


Figura 6.1 Inquadramento geografico del Comune di Moncalieri raffigurato in viola all'interno della Regione Piemonte (sinistra) e inquadramento territoriale del parco "Le Vallere" all'interno del comune di Moncalieri (destra)

Il nome "Le Vallere" deriva dal termine che i francesi diedero ai terrapieni costruiti nel 1541 al tempo della prima occupazione francese del Piemonte. La zona infatti è citata per la prima volta con il nome "Les Valleres" in una carta montana redatta nel Seicento. Successivamente, quest'area è stata parzialmente salvata dalla cementificazione degli anni Sessanta che ha portato alla costruzione del vasto Corso Trieste e del quartiere residenziale che sorge ad ovest della grande arteria. In seguito, l'area è divenuta di proprietà della Regione Piemonte che nel 1990 ha destinato la Cascina, costruita alla fine del Settecento e ancora oggi presente a poche decine di metri dall'ingresso stradale del parco, a diventare la sede del nuovo Ente di gestione delle aree protette del Po torinese.

La destinazione d'uso dei terreni costituenti il parco ha visto la transizione da un utilizzo prettamente agricolo ad un'alternanza odierna di coltivazioni intensive di foraggio a radure e boschetti; questa compresenza di paesaggio agricolo e di parco pubblico differenzia la "Riserva Le Vallere" dalle altre aree verdi presenti nel contesto urbano circostante.

Il presente lavoro si è sviluppato sulla porzione di parco amministrato dall'"Ente di gestione delle aree protette del Po torinese", che ricopre una superficie di circa 34 ettari (Figura 6.2), e con il quale è stata stretta una collaborazione che ha apportato informazioni e materiale fondamentali per la riuscita del progetto, tra cui il reperimento dei dati sulla popolazione arborea costituente il parco.

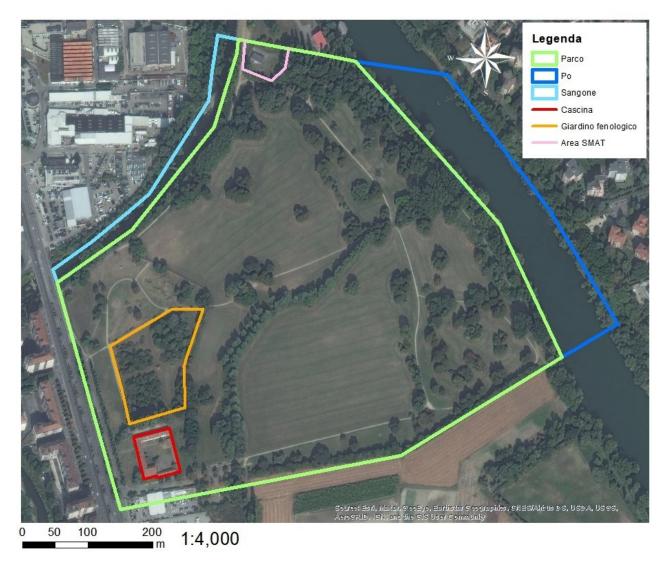


Figura 6.2 Porzione del parco "Le Vallere" amministrata dall'Ente di gestione delle aree protette del Po torinese e assunta come area oggetto di studio

Come si evince dall'immagine riportata in Figura 6.2, gli elementi che contraddistinguono quest'area verde sono in primo luogo la presenza di due corsi d'acqua, il fiume Po e il torrente Sangone, che delimitano buona parte del territorio esaminato, e la presenza di un giardino fenologico realizzato tra il 2000 ed il 2002 dall'Ente. Esso rappresenta il primo giardino fenologico del Piemonte intitolato a Carlo Allioni, botanico e medico piemontese di fama mondiale, che ha lo scopo di registrare le fasi di sviluppo delle specie guida previste per le regioni a clima continentale. In generale, l'obiettivo dei giardini

fenologici è quello di valutare l'impatto che le anomalie termiche, la presenza di parassiti e l'inquinamento dell'aria e del suolo manifestano su queste specie guida (S49).

Inoltre, la "Riserva Le Vallere" è dotata anche di un'area gioco per bambini, due recinti adibiti ai cani, punti di sosta e percorsi ciclabili. I due edifici collocati al suo interno sono la Cascina settecentesca e uno stabile gestito dalla SMAT.

Lo studio condotto su questa porzione di territorio ha visto l'utilizzo di due dei programmi principali che costituiscono la suite *i-Tree*, ovvero *Eco* e *Hydro* con i rispettivi applicativi accessori *i-Tree Database* e *i-Tree Canopy*, dei quali si è descritto il funzionamento e i modelli matematici su cui si basano nei capitoli precedenti (Capitolo 4, Capitolo 5). L'applicativo *Eco* è stato impiegato per valutare i benefici prodotti dagli individui arborei popolanti il parco in termini di riduzione delle concentrazioni di inquinanti in atmosfera e di sequestro e stoccaggio di carbonio nella biomassa vegetale, mentre *Hydro* è stato adoperato per quantificare i servizi apportati dal parco in termini di riduzione dei deflussi idrici urbani e per valutarne la sensibilità alla variazione dei dati di input, ipotizzando scenari futuri che contemplano i cambiamenti climatici in atto. In questa circostanza è stato applicato uno dei due strumenti supplementari offerti dal *tool Eco* e, nello specifico, *Forecast*, con lo scopo di prevedere una ipotetica configurazione futura del parco assumendo di incrementare la numerosità degli individui arborei come azione di mitigazione nei confronti dei cambiamenti climatici.

# 6.2 Applicazione di i-Tree Eco

Sulla base di quanto riportato nella descrizione teorica del pacchetto *Eco* (Capitolo 4), l'estensione areale della porzione di territorio esaminato è il parametro fondamentale su cui si basa l'intera analisi.

Data una superficie del parco "Le Vallere" pari a circa 340000 m², si è optato per condurre lo studio secondo un approccio *plot – based sample inventory*, ovvero basato su aree di campionamento che si assume rispecchino le condizioni dell'intero territorio analizzato.

L'impostazione con cui si sceglie di avviare l'analisi rappresenta il primo passo fondamentale per lo svolgimento di un progetto con l'applicativo *Eco*; seguono nei sottoparagrafi successivi i vari passaggi che hanno articolato lo sviluppo dell'analisi (Sottoparagrafo 6.2.1) e l'esposizione dei risultati ottenuti (Sottoparagrafo 6.2.2).

# 6.2.1 Definizione dati di input

La configurazione iniziale del progetto richiede di indicarne il titolo, la località oggetto di studio (Moncalieri – area urbana), il numero di abitanti (57528) (S50) e l'anno di riferimento per i dati meteorologici e di inquinamento dell'aria (2015).

Questi ultimi due dataset derivano dalla stazione meteorologica più vicina al sito di interesse selezionabile tra quelle proposte dal software, che per l'area di studio è risultata essere la stazione "Bric della Croce" (ID 160610 -99999) situata a Torino (45°02' N 07°44' E) a 710 m s.l.m. e di competenza dell'Aeronautica Militare (Figura 6.3) (S51).

Ne consegue che, sebbene all'interno del parco, nella porzione di territorio gestita dalla SMAT, sia presente la stazione meteorologica "Torino Vallere" (ID 249), le cui serie storiche di dati sono reperibili sul sito dell'ARPA Piemonte nella sezione "Banca dati meteorologica", il software non ne



Figura 6.3 Stazione meteorologica "Bric della Croce" (ID 160610-99999)

permette la selezione. Le restrizioni sulla scelta delle stazioni di misura sono dettate dalle procedure di validazione della stazione stessa e delle serie di dati da essa fornite da parte del Servizio Forestale degli Stati Uniti, che richiedono lunghe tempistiche e portano la banca dati di *i-Tree* a far riferimento a circa uno o due anni indietro rispetto all'anno corrente. Pertanto, nonostante si disponesse di dati più recenti e maggiormente rappresentativi delle condizioni climatiche dell'area in esame, è stato necessario far riferimento ai valori presenti nel *Database* di *i-Tree*. Moncalieri, infatti, rientra tra le città presenti in questo archivio che fornisce serie temporali delle precipitazioni dal 2005 al 2018 e serie di concentrazioni degli inquinanti solo per gli anni 2013, 2014 e 2015. Poiché uno degli obietti di questo lavoro è valutare la riduzione dei contaminati operata dalla vegetazione arborea del parco, si è optato per scegliere come anno di riferimento il 2015 per il quale sono presenti entrambi i dataset.

Oltre ai dati meteoclimatici e di inquinamento, un altro set di parametri richiesti in input dal programma è quello relativo ai dati sulla vegetazione, il reperimento dei quali è stato oggetto di un lavoro preparatorio ai sopralluoghi al parco e del quale ne vengono spiegate le fasi nei punti successivi.

#### Generazione dei plot

Un progetto basato sull'approccio *plot-based sample inventory* richiede la suddivisione del sito in esame in aree di campionamento di superficie limitata.

*i-Tree Eco* dispone di tre metodi per la creazione dei plot:

 il primo prevede la definizione delle aree mediante strumenti esterni al programma (ad esempio tramite ESRI ArcGIS) e il successivo caricamento del file grafico e del corrispettivo elenco dei plot su Eco;

- il secondo prevede la generazione casuale delle aree campione tramite l'applicativo Eco mediante una funzione basata su "Google Maps" (questo metodo richiede la definizione dei confini dell'area di studio che possono essere disegnati dall'utente o forniti come shapefile ESRI ArcGIS);
- infine, il terzo metodo consiste nella definizione manuale da parte dell'utente delle dimensioni e del numero di aree.

La suddivisione del parco "Le Vallere" in plot è stata eseguita secondo il primo metodo utilizzando il software *ArcGIS* e seguendo le indicazioni riportate in "i-Tree Eco Guide to Unstratified Samples" (2020).

Le fasi fondamentali di questo approccio consistono nella preparazione dell'area di progetto, quindi nell'identificazione dei confini del parco, nella generazione dei plot e nella creazione di un file di output leggibile dal sistema operativo di *i-Tree Eco*.

Per quanto riguarda la generazione delle aree campione, sono state ipotizzate tre condizioni di distribuzione dei centri dei plot (Figura 6.4):

- random points (200 punti), ipotizzando una distanza minima tra i punti di 12,62 m (raggio della circonferenza che consente di ottenere un'area di 500 m²);
- random points (150 punti), ipotizzando una distanza minima tra i punti di 25,24 m al fine di minimizzare le sovrapposizioni tra i plot;
- fixed grid, ipotizzando una maglia di punti con interasse 42 m.

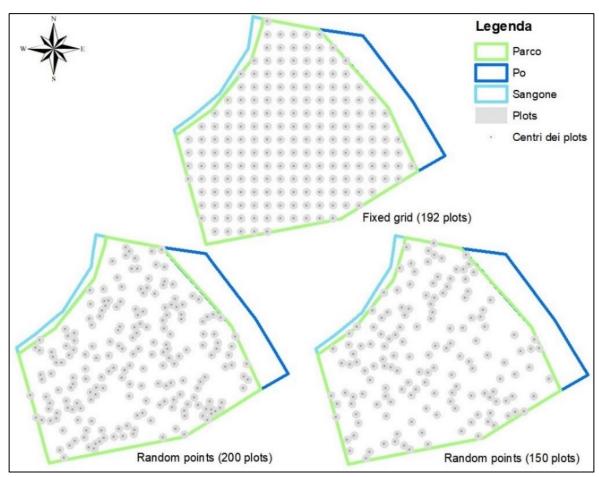


Figura 6.4 Opzioni di distribuzione delle aree di campionamento (plot)

Considerata la distribuzione non omogenea di alberi sul territorio, si è optato per una configurazione dei plot a maglia regolare (*fixed grid*) in modo tale da non incrementare ulteriormente la complessità del sistema. Questa configurazione individua sul parco 192 aree di campionamento mantenendo l'errore standard di stima del numero di alberi intorno al 10%.

Ogni punto della griglia è stato identificato mediante coordinate geografiche nel sistema WGS84, UTM Zona 32N. Questo passaggio, unitamente all'utilizzo dell'applicazione *Coordinates* disponibile gratuitamente per i sistemi iOS, ha reso possibile la localizzazione dei centri dei plot durante la campagna di misura.

Mediante lo strumento *Buffer* presente in *ArcToolbox* è stato possibile definire l'ampiezza delle aree di campionamento che, sulla base delle opzioni riportate su "i-Tree Eco Guide to Unstratified Samples" (2020), è stata scelta pari a 1/20 di ettaro, ovvero 500 m², corrispondente ad un raggio di 12.62 m.

#### Analisi delle schede VTA

Nota la distribuzione dei plot sul parco "Le Vallere", si è proceduto all'importazione delle piante catalogate dall'Ente sul progetto sviluppato in *ArcGIS*.

Parte della popolazione arborea costituente il parco risulta, infatti, georiferita e sottoposta a specifiche analisi che rientrano all'interno di un programma di valorizzazione e tutela delle risorse naturali del parco e, al tempo stesso, di promozione ad una fruizione sicura e sostenibile. Nello specifico, l'"Ente di gestione delle aree protette del Po Torinese" programma con cadenza annuale analisi fitostatiche sugli alberi presenti in zone dove l'incolumità delle persone è maggiormente a rischio; ne sono un esempio le piante situate lungo le piste ciclabili che si snodano all'interno del parco, le aree adibite ai cani e le aree attrezzate.

L'indagine fitostatica delle alberature viene condotta sulla base di quanto previsto dal protocollo di analisi VTA (*Visual Tree Assessment*), definito in modo ufficiale dagli organismi preposti in materia. Si tratta di un metodo di valutazione che mira ad esaminare le caratteristiche morfologiche e strutturali degli alberi con lo scopo di individuare gli esemplari a rischio statico mediante il rilevamento di sintomi caratteristici che la pianta stessa manifesta in seguito a traumi (eventi atmosferici, danni meccanici, interventi colturali non corretti) o attacchi patogeni.

La valutazione della stabilità dell'albero viene eseguita secondo due modalità di analisi, una visiva ed una strumentale. La prima verifica il comportamento accrescitivo della pianta, i difetti strutturali, la presenza di patologie e malformazioni, ovvero tutte quelle criticità che potrebbero rappresentare un potenziale pericolo in termini di cedimento, rottura o schianto della pianta. In questa fase viene analizzata ogni porzione visibile dell'albero (radici, colletto, fusto, castello e chioma) e si rilevano le misure dell'altezza della pianta, la circonferenza del tronco e, talvolta, l'ampiezza della chioma. Gli attrezzi impiegati per questa tipologia di indagine sono il martello in gomma, le sgorbie, le aste graduate e il binocolo.

Se necessario, si procede con un'analisi di tipo strumentale che conferma e dimensiona le anomalie riscontrate durante l'analisi visiva, permettendo di indagare l'interno della pianta e di approfondire la diagnosi specificando gli interventi più opportuni per la sua messa in sicurezza. In questo caso si fa ricorso all'utilizzo di attrezzature scientifiche atte a valutare lo stato di salute del legno quali ad esempio il *Resistograph*, il martello ad impulsi, il tomografo sonico ecc. Tra questi lo strumento più utilizzato è il *Resistograph* costituito da un ago sottile in acciaio di diametro massimo pari a 1.5 mm, che avanza a

velocità costante, regolabile in funzione delle caratteristiche di densità del legno da esaminare, all'interno del legno. Tale strumento viene generalmente utilizzato per indagare il colletto o il fusto della pianta e permette di visualizzare graficamente il consumo di energia durante la perforazione attraverso un apposito display.

Lo strumento è in grado di fornire un grafico caratterizzato da due curve che rappresentano la forza necessaria allo strumento per avanzare nel legno e la resistenza opposta dal materiale alla perforazione (e quindi alla rotazione della sonda). L'analisi di entrambe le curve consente di ottenere informazioni più dettagliate sulle caratteristiche del legno; nello specifico, il profilo di densità prodotto dallo strumento permette di misurare le variazioni di densità tra aree di legno estivo ed aree di legno primaverile, consentendo conte anulari ed analisi di curve di crescita. Anche il grado di degenerazione del legno causato da funghi o da altri agenti viene evidenziato da questi profili che, in questo caso, mostrano un andamento decrescente dovuto ad una riduzione della resistenza meccanica alla perforazione.

Il parametro che si ricava da questa indagine è lo spessore della parete residua di legno sano (t), valore che deve essere rapportato al raggio (r) della sezione esaminata. Se il rapporto (t/r) è maggiore o uguale ad 1/3 l'albero può essere considerato stabile.

La VTA ha come fine l'attribuzione di una "Classe di Propensione al Cedimento" (CPC) all'individuo arboreo esaminato secondo quanto previsto dal protocollo ufficiale messo a punto dalla SIA (Società Italiana di Arboricoltura) (S52):

- Classe A <u>Trascurabile</u>: gli alberi appartenenti a questa classe, al momento dell'indagine, non manifestano segni, sintomi o difetti significativi riscontrabili con il controllo visivo tali da far ritenere che il fattore di sicurezza naturale dell'albero si sia ridotto. Per questi soggetti è opportuno un controllo visivo periodico con cadenza stabilita dal tecnico incaricato, comunque non superiore a cinque anni.
- Classe B <u>Bassa</u>: gli alberi appartenenti a questa classe, al momento dell'indagine, manifestano segni, sintomi o difetti lievi riscontrabili con il controllo visivo ed a giudizio del tecnico con indagini strumentali tali da far ritenere che il fattore di sicurezza naturale dell'albero non si sia sensibilmente ridotto. Per questi soggetti è opportuno un controllo visivo periodico con cadenza stabilita dal tecnico incaricato, comunque non superiore a tre anni. L'eventuale approfondimento diagnostico di tipo strumentale e la sua periodicità sono a discrezione del tecnico.
- Classe C Moderata: gli alberi appartenenti a questa classe, al momento dell'indagine, manifestano segni, sintomi o difetti significativi riscontrabili con il controllo visivo e di norma con indagini strumentali. Le anomalie evidenziate sono tali da far ritenere che il fattore di sicurezza naturale dell'albero si sia sensibilmente ridotto. Per questi soggetti è opportuno un controllo visivo periodico con cadenza stabilita dal tecnico incaricato, comunque non superiore a due anni. L'eventuale approfondimento diagnostico di tipo strumentale e la sua periodicità sono a discrezione del tecnico il quale può, tra l'altro, progettare un insieme di interventi colturali finalizzati alla riduzione del livello di pericolosità e qualora realizzati potrà modificare la classe di pericolosità dell'albero.
- Classe CD <u>Elevata</u>: gli alberi appartenenti a questa classe, al momento dell'indagine, manifestano segni, sintomi o difetti significativi riscontrabili con il controllo visivo e di norma con

indagini strumentali. Le anomalie riscontrate sono tali da far ritenere che il fattore di sicurezza naturale dell'albero si sia drasticamente ridotto. Per questi soggetti, il tecnico incaricato deve assolutamente indicare dettagliatamente un insieme di interventi colturali finalizzati alla riduzione del livello di pericolosità e compatibili con le buone pratiche arboricolturali. Qualora realizzati, il tecnico valuterà la possibilità di modificare la classe di pericolosità dell'albero. Nell'impossibilità di effettuare i suddetti interventi l'albero è da collocare tra i soggetti di classe D.

Classe D – Estrema: gli alberi appartenenti a questa classe, al momento dell'indagine, manifestano segni, sintomi o difetti gravi riscontrabili con il controllo visivo e di norma con indagini strumentali. Le anomalie riscontrate sono tali da far ritenere che il fattore di sicurezza naturale dell'albero si sia ormai esaurito. Per questi soggetti, le cui prospettive future sono gravemente compromesse, ogni intervento di riduzione del livello di pericolosità risulterebbe insufficiente o realizzabile con tecniche contrarie alla buona pratica dell'arboricoltura. Le piante appartenenti a questa classe devono essere abbattute.

Il risultato finale di una VTA è una scheda di rilievo in cui sono contenute diverse voci indicanti i sintomi potenzialmente riscontrabili su un albero esaminato nelle sue componenti anatomiche fondamentali (radici, colletto, fusto e chioma). A ciascun sintomo evidenziato viene assegnato un valore da 1 a 4 in funzione della sua gravità (lieve, moderato, accentuato, grave). Questo sistema consente di osservare variazioni, positive o negative, della stabilità dell'albero mediante successivi monitoraggi e comprenderne gli sviluppi futuri.

Nella scheda vengono riportati anche i dati dendrologici della pianta (DBH, altezza, specie di appartenenza ed eventuale numero identificativo), informazioni sulla localizzazione, sul grado di frequentazione del sito (mediante indicazione della zonizzazione) e sui potenziali bersagli. È inoltre presente una sezione dedicata agli insetti, nel caso in cui ne fosse rilevata la presenza durante l'indagine, e alle proposte di gestione, manutenzione e messa in sicurezza della pianta in esame (rimonda del secco, contenimento della chioma, alleggerimento o accorciamento delle branche, inserimento di tiranti in chioma, ecc.).

In riferimento all'indagine strumentale con *Resistograph*, sulla scheda sono riportate informazioni inerenti la zona di indagine (C: colletto; F: fusto), l'eventuale altezza alla quale è stata effettuata l'analisi, il diametro corrispondente del fusto, l'esposizione cardinale di ingresso del *Resistograph* e la sua inclinazione, la presenza di legno di compressione o tensione (LC o LT), il numero della perforazione e la data di esecuzione della prova.

Come detto in precedenza, le indagini fitostatiche, commissionate dall'Ente a studi privati, hanno come obiettivo la valutazione del rischio corso da persone e cose che si trovano in prossimità dell'individuo arboreo esaminato. Il rischio è dato dalla probabilità che un cedimento (totale o parziale) interessi un bersaglio con ripercussioni da scarse a gravi. Questo può essere differente a seconda dell'area e dell'obbiettivo oggetto del possibile schianto; proprio in funzione di questo aspetto le piante in classe CD o D vengono abbattute o ridotte a totem a seconda che si trovino in zone fruibili del parco o meno. Nel primo caso la pianta necessariamente viene rimossa, mentre nel secondo viene ridotta a totem e lasciata in loco per la biodiversità del parco.

In seguito alla definizione delle aree di campionamento, l'attività di tesi è proseguita con la consultazione di queste schede di cui l'Ente ha memoria dall'anno 2002. Nello specifico, sono state analizzate le schede più recenti degli individui arborei ricadenti all'interno dei plot in modo tale da organizzare un piano di campionamento ad hoc alleggerendo il reperimento dei dati durante la campagna di misure. La maggior parte delle piante esaminate sono georiferite e contenute all'interno di uno shapefile *ESRI ArcGIS*, pertanto, è stato semplice individuarle importando il file all'interno del progetto sviluppato per la generazione delle aree di campionamento (Figura 6.5).

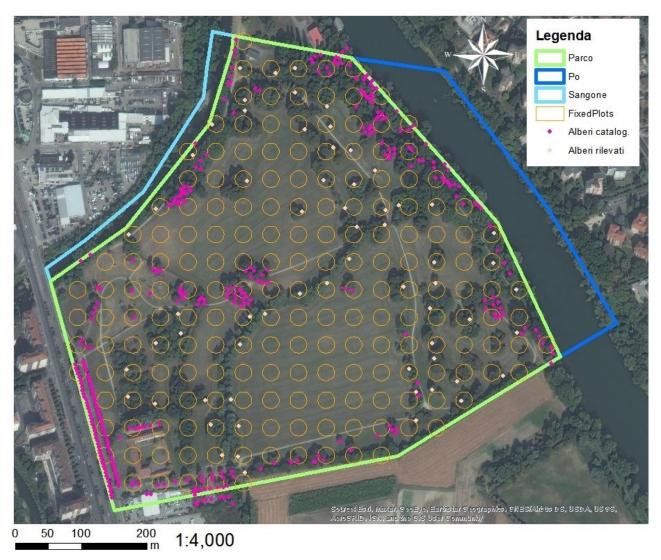


Figura 6.5 Distribuzione degli individui arborei catalogati dall'Ente e rilevati durante la campagna di misura

#### Campagna di misura

L'attività di reperimento dati sulla popolazione arborea del parco "Le Vallere" è stata svolta nel mese di luglio 2020, seguendo i protocolli di campionamento e raccolta dati forniti in "i-Tree Eco Field Manual" (2020), ovvero mettendo in pratica quanto riportato nel Paragrafo 4.4 (Reperimento dati di campo). Nello specifico, sono stati predisposti dei Paper Forms, tabelle cartacee compilative necessarie per la registrazione dei dati.

La configurazione *plot-based sample inventory* scelta per il parco "Le Vallere" richiede campionamenti su un numero limitato di piante ottenendo una stima dell'intera popolazione arborea presente. Data

l'estensione areale del territorio esaminato e le tempistiche ridotte, si è optato per campionare un individuo arboreo per ogni plot, considerando che nella maggior parte dei casi le piante ricadenti all'interno di essi presentavano caratteristiche dimensionali simili. In totale sono stati analizzati 102 alberi di cui 64 non presentavano una scheda VTA associata.

La campagna di raccolta dati si è articolata in più fasi di seguito elencate:

- localizzazione del centro del plot analizzato mediante l'utilizzo dell'App Coordinates;
- reperimento di informazioni sul plot, ovvero percentuale di superficie del plot accessibile e misurabile, percentuale di superficie del plot ricoperta dalla chioma degli alberi e/o da arbusti e percentuali di uso e copertura del suolo;
- individuazione delle piante ricadenti all'interno del plot e scelta di una di queste come elemento campione rappresentativo dell'insieme individuato;
- verifica della presenza di una scheda VTA associata all'individuo arboreo identificato;
- reperimento dei dati non presenti sulla scheda e/o rilevamento ex-novo dei parametri richiesti in input dal programma *Eco* (Sottoparagrafo 4.3.2).

In riferimento alla percentuale di superficie del plot accessibile e misurabile, si precisa che una parte di plot sono risultati essere in parte o totalmente non accessibili, ma interamente visibili, a causa di lavori previsti nell'ambito della progettazione "Difese spondali e ricalibratura del fiume Po dal comune di Paesana al comune di Moncalieri" (10 plot), per la presenza della recinzione di confine del parco (2 plot) e della recinzione che delimita l'area gestita dalla SMAT (4 plot), per la presenza della cascina (1 plot) o perché ricadenti lungo le sponde del fiume Po (1 plot). Per quanto riguarda invece, la definizione delle categorie di uso del suolo, la classe "Altro" è stata attribuita ai plot situati in corrispondenza dell'argine.



Figura 6.6 Porzione di parco non accessibile per lavori previsti nell'ambito della progettazione "Difese spondali e ricalibratura del fiume Po dal comune di Paesana al comune di Moncalieri"

In merito al reperimento dati inerenti la vegetazione, la specie arborea e il diametro sono stati rilevati solo nel caso in cui l'individuo arboreo scelto come elemento rappresentativo degli alberi ricadenti all'interno del plot non disponesse di una scheda VTA associata. In tal caso, la definizione della specie è stata effettuata sulla base delle nozioni fornitemi dalla referente aziendale, nonché correlatore, del presente lavoro, Manuela Genesio, mentre la misura del diametro del fusto è stata effettuata utilizzando il cavalletto dendrometrico (Figura 6.7). Si tratta di uno strumento graduato con unità di misura in cm disponibile in varie grandezze (generalmente da 30 a 100 cm) che consente per l'appunto di rilevare la misura del diametro del fusto di un albero ottenuta mediando i valori delle dimensioni prese nelle due direzioni nord-sud ed est-ovest.

Per quanto riguarda l'altezza degli alberi, questa è stata rilevata mediante l'ausilio dell'App *Arboreal* disponibile gratuitamente per i sistemi iOS. Si tratta di un'applicazione che utilizza la tecnologia AR<sup>24</sup> presente nel cellulare per misurare l'altezza degli alberi in funzione della distanza da essi. La misura consiste nell'inquadrare con la fotocamera del cellulare il fusto dell'albero e allontanarsi dall'individuo per una distanza pari all'altezza dell'albero cercando di mantenere la fotocamera in posizione verticale.



Figura 6.7 Attività di sopralluogo al parco "Le Vallere" per il reperimento dati sulla vegetazione arborea: rilevamento del diametro del fusto di un albero mediante utilizzo del cavalletto dendrometrico (Luglio 2020)

Infine, le dimensioni della chioma, specialmente la sua ampiezza, sono state rilevate mediante l'ausilio di una bindella metrica, mentre la salute del fogliame è stata valutata in termini di *dieback*, ovvero analizzando la condizione dell'individuo arboreo in termini di perimento.

Come accennato nel paragrafo dedicato alla definizione dei dati di input (Sottoparagrafo 4.3.2), *i-Tree Eco* dà la possibilità di inserire ulteriori dati definiti opzionali al fine di quantificare Servizi Ecosistemici aggiuntivi. Nel caso in esame si è optato per il reperimento dei seguenti ulteriori dati durante la campagna di misura:

- percentuale di plot piantumabile;
- distanza e direzione dell'individuo arboreo analizzato rispetto al centro del plot;
- collocazione degli alberi su strada o in aree verdi (per tutti gli alberi analizzati è stata scelta l'opzione non-street tree);
- appartenenza di un albero ad un suolo pubblico o privato (per tutti gli alberi analizzati è stata scelta l'opzione *public*);
- copertura del suolo sotto la chioma degli alberi definita come percentuale di superficie impermeabile o percentuale di arbusti.

<sup>24</sup> La tecnologia AR, acronimo di Realtà Aumentata, integra informazioni digitali in tempo reale con l'ambiente in cui si trova l'utente.

Terminata l'attività sul campo, si è proceduto con l'inserimento manuale dei dati rilevati su i-Tree Eco.

Al fine di quantificare dal punto di vista economico i benefici offerti dalla popolazione arborea al contesto urbano, il *tool* fornisce all'utente la possibilità di inserire nella sezione "Benefit Prices" i valori commerciali di alcune risorse trattate dal programma quali il costo medio nazionale dell'elettricità  $(\text{€}\cdot\text{kWh}^{-1})$ , del riscaldamento  $(\text{€}\cdot\text{therm}^{-1})$ , del carbonio  $(\text{€}\cdot\text{t}^{-1})$  e dei deflussi evitati  $(\text{€}\cdot\text{m}^{-3})$ .

Tali importi di default sono relativi alle condizioni statunitensi e aggiornati al momento in cui si scarica il software; tuttavia, è possibile modificarli inserendo valori pertinenti al Paese in cui si effettua l'analisi che per il progetto corrente sono stati reperiti dal web e si rivelano assolutamente indicativi, pari a:

- energia elettrica: 0.17 €·kWh<sup>-1</sup> (III Trimestre 2020) (S53);
- riscaldamento: 2.87 €·therm<sup>-1</sup> (0.0985 €·kWh<sup>-1</sup>) (S54);
- carbonio: 91.92 €·t<sup>-1</sup> (il cui valore si ottiene modificando il costo più facilmente reperibile della CO<sub>2</sub> assunto pari a 28.24 €) (S55);
- deflussi evitati: 1.902 €·m<sup>-3</sup> mantenuto di default.

Per gli utenti internazionali che svolgono un progetto al di fuori degli Stati Uniti, il programma richiede infine di inserire il tasso di cambio di valuta che può essere definito dall'utente oppure impostato dal programma cliccando sulla voce "Get today's rate". Si è optato per inserire un valore di cambio monetario €/\$ pari a 0.841 consultato il 15 settembre 2020.

Una volta inseriti tutti i parametri richiesti in ingresso dal programma, la procedura di upload dei dati permette di verificare eventuali non conformità dei valori inseriti e di bloccare il caricamento fino a quando non vengono risolte tutte le anomalie. Se il caricamento dei dati va a buon fine, è possibile inviarli al Server di *i-Tree* che esegue la simulazione.

#### 6.2.2 Discussione dei risultati

Gli output restituiti dal programma all'utente sono numerosi e possono essere presentati sia sottoforma di report generale che sottoforma di tabelle e grafici singoli per ogni voce analizzata. Di seguito si esaminano quelli ritenuti più significativi per la valutazione e quantificazione dei Servizi Ecosistemici forniti dal parco "Le Vallere". Si precisa, infatti, che l'applicativo *Eco* fornisce una serie di altri risultati di carattere idrologico (evaporazione, evapotraspirazione potenziale, traspirazione, intercettazione dei flussi da parte delle coperture vegetate e deflussi evitati) volutamente non esaminati in quanto valutati successivamente mediante l'utilizzo del *tool Hydro*.

La quantificazione di tali componenti differisce tra i due applicativi per una serie di aspetti: entrambi riconoscono, ad esempio, la distinzione tra superfici permeabili e impermeabili ma *Eco* presuppone che tutte le precipitazioni che giungono su suolo permeabile siano soggette a processi di infiltrazione, escludendo la possibilità di generazione di deflusso superficiale (considerata invece da *Hydro*), mentre tutte quelle che giungono su coperture impermeabili contribuiscono interamente alla generazione di quest'ultimo (*Hydro* le differenzia in funzione del valore attribuito alla DCIA). Sostanzialmente, l'applicativo *Hydro* si basa su un modello idrologico più complesso in cui, per esempio, il livello della falda viene aggiornato ad ogni intervallo temporale analizzato, le superfici impermeabili possono essere considerate collegate direttamente al sistema di drenaggio urbano comportando dunque una riduzione del deflusso superficiale, la routine relativa ai processi di infiltrazione tiene conto della progressiva

saturazione del suolo, ecc. Il pacchetto *Hydro* è dunque basato su un modello più robusto che consente una maggiore precisione nel calcolo dei deflussi e nei processi idrologici specifici delle piante (S56).

#### Composizione e struttura

La porzione di territorio analizzato è popolata da una varietà di 25 specie arboree, quattro delle quali contano più di 200 individui su un totale stimato di 487 (±29). La totalità di individui arborei appartenenti alle specie individuate coprono circa il 31% del suolo totale.

Le specie più comuni risultano essere il Tiglio europeo (*Tilia x europaea*) e il Tiglio selvatico (*Tilia cordata*), genere che popola solitamente i boschetti, il Salice bianco (*Salix alba*), specie maggiormente presente lungo un doppio filare che separa le due maggiori radure, e il Pioppo nero (*Populus nigra*), detto anche Pioppo cipressino, i cui individui si snodano sul confine orientale della Riserva creando una sorta di diaframma visivo e sonoro che separa l'area "Le Vallere" dalla presenza di edifici e infrastrutture urbane (Figura 6.8).

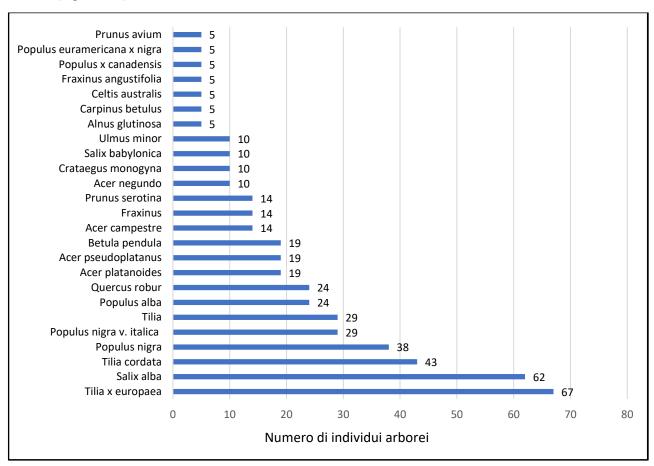


Figura 6.8 Stima della numerosità di individui arborei per tipologia di specie

Le specie rilevate durante la campagna di misura evidenziano il fatto che il parco urbano in esame è popolato per una buona percentuale da specie autoctone e tipiche della vegetazione di ripa.

Sulla base dei risultati forniti da *i-Tree Eco* emerge, infatti, che circa il 36% delle specie ha origine europea, mentre il 45% ha provenienza mista europea e asiatica. Il totale di queste due percentuali evidenzia che più della metà degli individui arborei possono essere considerati autoctoni rispetto al restante 20% che proviene dal Nord America, dall'Asia e da altri continenti.

La presenza di una grande varietà di specie arboree nell'area oggetto di analisi può avere un duplice risvolto: da una parte riduce al minimo l'impatto e/o il potere distruttivo di insetti o malattie specifiche di un determinato genere, dall'altra un'elevata numerosità può rappresentare un rischio per le piante autoctone nel caso in cui specie esotiche si rivelino essere piante invasive. Queste, infatti, essendo generalmente caratterizzate da una maggiore capacità riproduttiva e di adattamento, e dall'assenza di nemici naturali, potrebbero potenzialmente superare la concorrenza e soppiantare le specie autoctone.

Un ulteriore risultato fornito dall'applicativo *Eco* relativo alla struttura del parco è la distribuzione percentuale dei diametri dei fusti degli alberi. Questo output è particolarmente importante se si considera che la dimensione degli individui arborei, strettamente correlata all'area fogliare, contribuisce in modo significativo ai servizi ecosistemici.

La distribuzione dei valori relativi a questo parametro è riportata nel grafico in Figura 6.9 che evidenzia una concentrazione di specie il cui DBH si presenta eterogeneo, compreso per la maggior parte di queste nell'intervallo 15.2 – 30.5 cm e 76.2 – 91.4 cm. Fanno eccezione il Pioppo nero (*Populus nigra*) i cui individui arborei presentano un diametro appartenente alle classi più elevate (il 37.5% di piante appartenenti a questa specie rientra nella classe diametrica 106.7 – 121.9 cm e il 12% supera il valore estremo superiore) e, per contro, l'Acero montano (*Acer pseudoplatanus*) e la variante italica del Pioppo nero (*Populus nigra v. italica*) i cui diametri appartengono alla classe bassa 7.6 – 15.2 cm rispettivamente per il 25% e il 16%.

Si precisa che il grafico riporta soltanto le specie che contano il maggior numero di alberi.

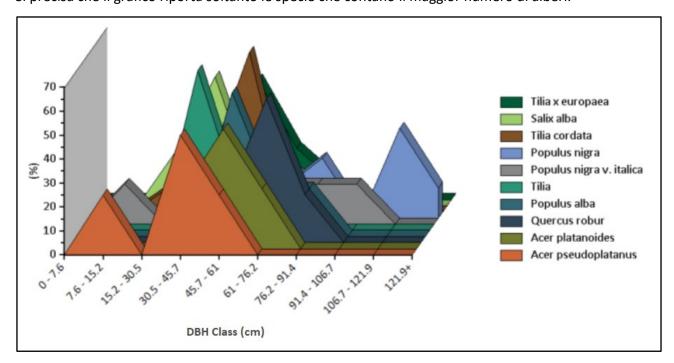


Figura 6.9 Distribuzione percentuale dei DBH delle specie arboree che contano il maggior numero di individui

#### Superficie e biomassa fogliare

Questi due parametri sono quantificati dal modello "UFORE – A" (Paragrafo 4.2) e sono, come già anticipato, particolarmente significativi per le analisi condotte con *i-Tree Eco* in quanto il modello matematico utilizzato per le elaborazioni dei dati si basa essenzialmente sui meccanismi chimico – fisici che interessano queste variabili.

La superficie fogliare è data dalla somma delle superfici delle foglie che intercettano la luce solare ed è proporzionale alla capacità dell'albero di catturare la CO<sub>2</sub>, produrre ossigeno e abbattere gli inquinanti atmosferici.

Si riportano in Figura 6.10 le specie che, singolarmente, contribuiscono per almeno il 2% alla superficie fogliare complessiva, stimata per l'area di studio pari a 21.3 ettari (±1.9) tra le quali spiccano *Tilia x europaea* e *Populus nigra*. Entrambe presentano valori di superficie fogliare particolarmente elevati, prevedibile considerando l'appartenenza di un numero elevato di individui di medie-grandi dimensioni ad esse.

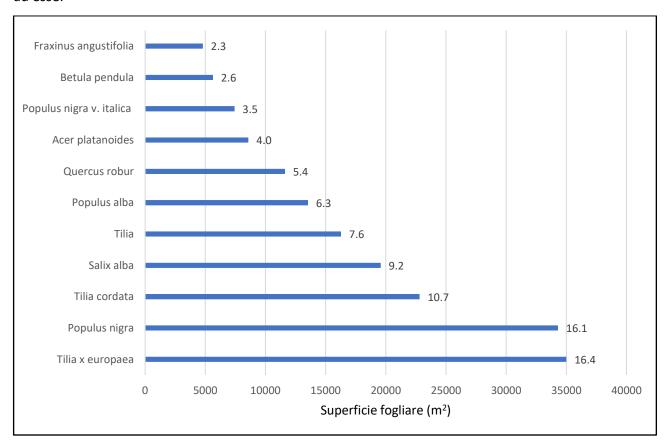


Figura 6.10 Superficie fogliare delle specie più significative

La biomassa totale, invece, sia legnosa che fogliare, è definita come la sostanza organica contenuta negli alberi e viene utilizzata per il calcolo dell'assorbimento e fissazione del carbonio.

Il valore più elevato assunto da questa variabile appartiene al *Populus nigra* che riporta un quantitativo di biomassa pari a 2.5 kg corrispondente al 17.7% del totale stimato pari a 14 kg (±1.3). Il Tiglio europeo, invece, si posiziona al terzo posto evidenziando il fatto che queste due specie, pur presentando valori simili di superficie fogliare, mostrano valori di biomassa sensibilmente diversi.

#### Stoccaggio e sequestro di carbonio

I meccanismi che conducono alla quantificazione di questi due processi sono analizzati dal modello "UFORE – C" (Paragrafo 4.2). Per entrambe le variabili il modello stima, oltre al quantitativo totale, anche il valore netto di elemento stoccato e sequestrato conteggiando rispettivamente la quota parte rilasciata alla morte degli individui durante la fase di decomposizione o di rimozione, e quella liberata dalla pianta durante l'esercizio delle funzioni vitali. Il programma, inoltre, fornisce per questi due benefici il

quantitativo di anidride carbonica equivalente (CO<sub>2</sub> equivalente), una misura che esprime l'impatto sul riscaldamento globale derivante dall'emissione di una certa quantità di gas serra rispetto alla stessa quantità di anidride carbonica.

Lo **stoccaggio di carbonio** consiste nel processo di fissazione di questo elemento nei tessuti vegetali durante il processo di crescita dell'individuo arboreo ed è, pertanto, proporzionale all'aumento della biomassa. Tra le specie più performanti si evidenzia il *Populus nigra* che contribuisce per il 26.5% a questo meccanismo confermando il primato della specie ponendola, per i parametri fino ad ora analizzati, tra quelle che riportano i risultati maggiori nonostante il numero di individui che conta sia inferiore di circa la metà rispetto alla specie *Tilia x europaea*. Tali esiti possono essere spiegati considerando gli elevati valori di diametro che presentano i pioppi neri e la grande quantità di biomassa fogliare che li caratterizza, entrambi parametri significativamente influenti sul processo di stoccaggio di carbonio. In questi termini, gli output forniti da *Eco* evidenziano un contributo positivo offerto dalla Farnia (*Quercus robur*) che, pur presentando una numerosità stimata di soli 24 individui, contribuisce per il 10.3% del totale a questo Servizio Ecosistemico.

La quantificazione dello stoccaggio di carbonio dal punto di vista economico è valutata assumendo un prezzo del carbonio pari a 91.92 €·t<sup>-1</sup> per cui il valore monetario stimato risulta pari a 40135 euro per 437 t (± 50) totali di elemento stoccato.

Il **sequestro di carbonio**, invece, consiste nella rimozione di anidride carbonica dall'atmosfera da parte della vegetazione, meccanismo che avviene attraverso la fotosintesi clorofilliana e risulta influenzato sia dalla quantità di biomassa fogliare che dal processo di crescita e dalla salute delle piante. Il contributo a questo beneficio apportato dalle alberate popolanti il parco "Le Vallere" viene evidenziato in Figura 6.11 in cui si riportano le specie che contribuiscono singolarmente per almeno il 2% al sequestro complessivo annuo di carbonio.

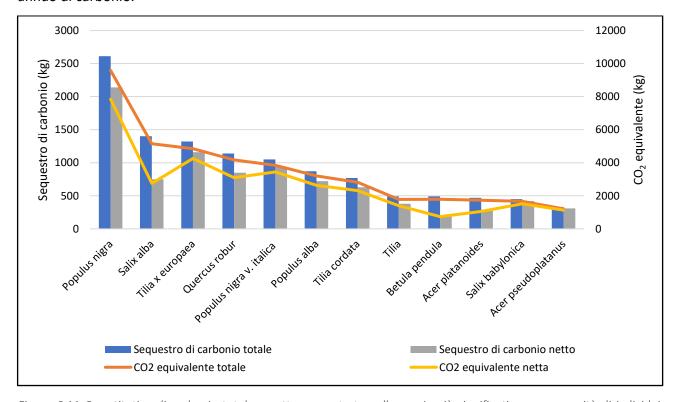


Figura 6.11 Quantitativo di carbonio totale e netto sequestrato nelle specie più significative e numerosità di individui arborei stimati per ciascuna specie

L'istogramma in Figura 6.11 mostra il *Populus nigra* come specie che raggiunge i risultati più significativi per questo Servizio Ecosistemico. In termini di sequestro netto di carbonio, invece, non si riscontra una proporzionalità diretta tra quest'ultimo e i valori totali. Ne sono un esempio le specie *Salix alba* e *Tilia x europaea* le quali, pur presentando quantitativi totali confrontabili, non evidenziano la medesima corrispondenza in termini netti (osservazioni analoghe per il genere *Tilia* e le specie *Betula pendula*, *Acer platanoides* e *Salix babylonica*). Il grafico lineare, invece, riporta gli andamenti della CO<sub>2</sub> equivalente in termini totali e netti i quali evidenziano anche per questa variabile la non proporzionalità tra i due quantitativi.

La valutazione di questo beneficio offerto dal parco ha quantificato un sequestro di carbonio totale pari a 13.2 t (±1.2) e netto pari a 10 t·anno<sup>-1</sup>, a cui è stato associato un valore economico pari a 1218 €·anno<sup>-1</sup>.

#### Inquinanti atmosferici rimossi ed emessi

Uno degli aspetti più interessanti prodotti da *i-Tree Eco* è la quantificazione degli inquinanti atmosferici rimossi in un anno dalla popolazione arborea e il conseguente miglioramento della qualità dell'aria.

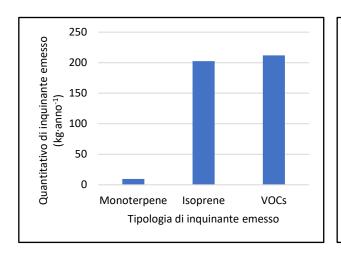
I composti richiesti in input e di cui si valuta la rimozione sono l'ozono O<sub>3</sub>, il biossido di zolfo SO<sub>2</sub>, il biossido di azoto NO<sub>2</sub>, il monossido di carbonio CO e le polveri sottili aventi diametro inferiore ai 2.5 micron. Sebbene il particolato inferiore a 10 micron (PM10) sia un altro inquinante atmosferico significativo, il programma analizza il PM2.5, sottoinsieme di PM10, poiché risulta essere più rilevante ai fini della quantificazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla salute umana.

I meccanismi con cui *Hydro* stima la rimozione dei composti inquinanti in atmosfera sono elaborati dalla componente D del modello UFORE analizzata nel Paragrafo 4.2. Affinché l'analisi condotta quantifichi correttamente questo Servizio Ecosistemico, è necessario prendere in considerazione anche le emissioni dei composti organici volatili biogenici (BVOCs) prodotti dalle piante. Questi sono stimati dal modulo C del modello matematico UFORE e rappresentano probabilmente l'unico disservizio prodotto dalla vegetazione arborea al contesto urbano.

I BVOCs, infatti, se da una parte sono elementi fondamentali per la salute delle piante, dall'altra influiscono significativamente sulla chimica atmosferica e sul clima. Nello specifico, l'emissione di isoprene e di monoterpene rappresenta una possibile fonte di inquinamento atmosferico attraverso la formazione di ozono, monossido di carbonio e altri aerosol troposferici.

Per tali ragioni, risulta doveroso tenere conto di questi composti nel bilancio complessivo di rimozione degli inquinanti operato da una popolazione arborea.

Si riporta in Figura 6.12 il quantitativo annuo di inquinanti emessi e rimossi dalle alberate costituenti il parco "Le Vallere".



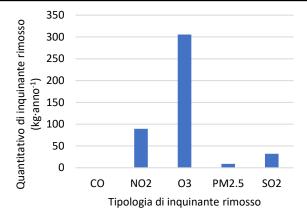


Figura 6.12 Quantitativi annui di inquinanti rimossi (destra) ed emessi (sinistra) dalla popolazione arborea costituente il parco "Le Vallere"

#### Emissione di BVOCs

Il grafico a sinistra in Figura 6.12 mostra i quantitativi annui di composti organici volatili emessi dalle piante costituenti il parco "Le Vallere" tra cui si evidenzia la netta preponderanza di isoprene rispetto al monoterpene.

Il comportamento emissivo delle piante prevalente in termini di isoprene può essere spiegato prendendo in considerazione una serie di fattori che influiscono sui BVOCs. In primo luogo, questi dipendono dalla specie dell'albero e dalla biomassa fogliare e, contemporaneamente, anche dalle condizioni climatiche, in modo particolare dalla temperatura dell'aria e dall'irraggiamento solare (Nowak et al., 2008). Ne consegue dunque che l'emissione di questi composti non è costante durante l'anno in quanto fortemente dipendente sia dallo stato fisiologico che dalla fenologia della pianta.

In funzione di quanto esposto, la risposta al picco di isoprene viene cercata analizzando la variabilità stagionale delle emissioni di isoprene prodotte dal territorio in esame (Figura 6.13). L'andamento evidenzia un incremento della produzione del composto attivo nella tarda primavera e nel periodo estivo sottolineando come questa avvenga nella parte aerea della pianta soprattutto nelle foglie, nei fiori, nei frutti e, in misura minore, nei rami, nella corteccia, nel fusto e nelle radici.

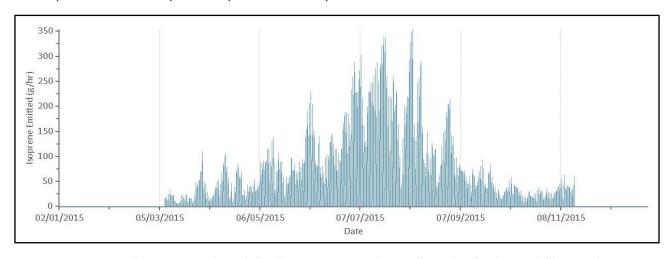


Figura 6.13 Emissioni di isoprene prodotte dalle alberate presenti nel parco "Le Vallere" nel corso dell'anno solare 2015

Un altro fattore interessante da considerare è il livello di sviluppo delle foglie: da Sharkey e Loreto (1993) evidenziano come l'emissione di isoprene sia molto bassa nelle foglie in crescita. Se si considera la popolazione arborea costituente il parco "Le Vallere" caratterizzata da individui adulti il cui sistema fogliare è pressoché sviluppato, si trova ulteriore spiegazione al picco emissivo di isoprene.

#### o Rimozione di inquinanti

Per quanto riguarda la rimozione di inquinanti, il grafico a destra in Figura 6.12 evidenzia un miglioramento della qualità dell'aria dato principalmente dalla rimozione di ozono troposferico e, in misura inferiore, di biossido di azoto. Il sequestro di biossido di zolfo risulta, invece, di entità nettamente inferiore rispetto ai due precedenti, mentre trascurabile in termini quantitativi risulta essere il contributo apportato dalle polveri sottili e nullo quello del monossido di carbonio. Un valore nullo, come ad esempio quello del carbonio, indica che alcuni dati (inquinamento, condizioni meteorologiche, energia, ecc.) non sono disponibili per la località oggetto di studio oppure che i valori ottenuti dall'elaborazione sono irrisori e pertanto non necessari da evidenziare.

I risultati forniti dal programma *Eco* in termini di riduzione degli inquinanti non sono stimati in funzione della specie bensì il programma riporta il quantitativo mensile di rimozione operato dalla loro totalità. Questo output, a differenza di quelli forniti per i benefici precedentemente analizzati, non consente dunque di valutare quali specie e in quale misura queste contribuiscono alla rimozione dei contaminanti.

Eco, tuttavia, fornisce per ogni albero campionato durante i sopralluoghi effettuati al parco il quantitativo di inquinanti da esso rimossi. Poiché uno degli obiettivi del presente lavoro è comprendere quali specie popolanti l'area oggetto di studio contribuiscono in maniera più significativa a questo benefico, si è proseguito elaborando i dati di inquinanti sottratti da ogni singola pianta campionata, aggregandoli in funzione della specie di appartenenza ed estendendo la stima al numero di individui arborei previsti dal programma appartenenti a ciascuna specie

$$g \; rimossi \; da \; specie \; i_{esima} = \sum g \; rimossi \; da \; piante \; campionate \; \in \; specie \; i_{esima} \; \cdot \; \frac{n \; individui \; stimato \; per \; specie \; i_{esima}}{n \; alberi \; campionati \; \in \; specie \; i_{esima}}$$

Ne consegue che le considerazioni proposte nel seguito non sono frutto del programma ma sono state dedotte elaborando i risultati forniti per ogni albero campionato sulla base del metodo appena esposto.

Per quanto riguarda il **biossido di azoto**, il meccanismo di rimozione dall'atmosfera avviene, come per gli altri inquinanti gassosi, tramite assorbimento. Il processo ha luogo sulla superficie fogliare grazie all'azione degli stomi che regolano i flussi di gas e vapore acqueo tra l'ambiente interno ed esterno alla pianta. Gli output forniti da *Eco* evidenziano per NO<sub>2</sub> i contributi significativi del Tiglio europeo e del Pioppo nero spiegabili per il primo con la numerosità di individui ad esso appartenenti (67), mentre per il secondo con l'elevato valore di superficie fogliare a fronte di numero di individui inferiore rispetto al Tiglio europeo (38). Il quantitativo medio annuo di biossido di azoto sottratto all'atmosfera è stimato pari a 89.3 kg a cui equivale un valore monetario di 2041 euro.

L'ozono troposferico è un inquinante secondario che si forma attraverso processi fotochimici in presenza di inquinanti primari quali gli ossidi d'azoto ( $NO_x$ ) e i composti organici volatili (VOC) le cui fonti principali di emissione in ambito urbano sono il trasporto su strada e il riscaldamento civile. Esso è identificato come il principale rappresentante della complessa miscela di sostanze denominata "smog fotochimico" che si forma negli strati bassi dell'atmosfera a seguito dei processi sopramenzionati. Nelle

aree urbane l'ozono si forma e si trasforma con grande rapidità e con un comportamento molto complesso e diverso da quello osservato per gli altri inquinanti.

L'istogramma riportato in Figura 6.14 mostra in ordine decrescente la quantità di O₃ rimosso dalle specie presenti nel parco "Le Vallere", mentre il grafico lineare evidenzia la numerosità di individui arborei stimata per ognuna di esse. Anche per questo inquinante emerge il contributo significativo delle specie *Tilia x europaea, Populus nigra* e, in misura minore ma comunque rilevante, di *Tilia cordata*.

L'analisi stima una rimozione media annua di ozono troposferico pari a 305.6 kg corrispondenti in termini economici a 46747 euro.

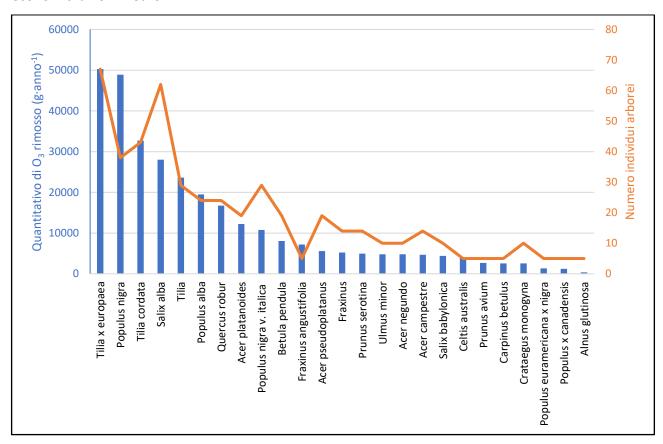


Figura 6.14 Quantitativo di ozono troposferico rimosso dalle specie (istogramma) e numerosità degli individui appartenenti a ciascuna specie (grafico lineare)

A fronte di quanto precedentemente esposto sull'emissione di BVOCs, risulta evidente la necessità di confrontare i quantitativi di  $O_3$  rimosso e quelli di BVOC rilasciati dalle diverse specie arboree presenti nell'area oggetto di studio. Questa considerazione risulta particolarmente utile nel caso in cui si intenda indirizzare l'analisi ad individuare quali specie arboree risultino essere più significative nella mitigazione dell'inquinamento atmosferico rispetto ad altre.

L'istogramma in Figura 6.15 mostra le sei specie che concorrono maggiormente alla produzione di BVOCs, mentre la voce "Altre specie" comprende le rimanenti 19 dall'apporto poco significativo; il grafico lineare, invece, rappresenta il quantitativo di O<sub>3</sub> rimosso dalle specie considerate.

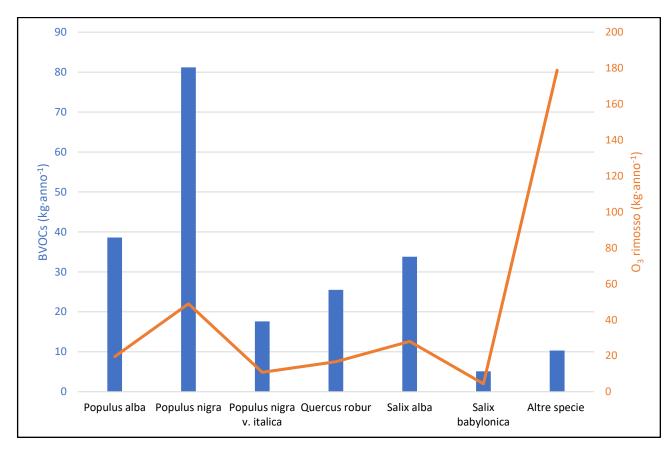


Figura 6.15 Quantità di BVOCs emessi dalle specie arboree più significative (istogramma) e quantità di ozono troposferico rimosso dalle stesse (grafico lineare)

Si evidenzia il notevole contributo emissivo della specie *Populus nigra*, seguito da *Populus alba* e *Salix alba* (il 56% delle emissioni di BVOCs proviene dal genere *Populus*) per le quali la produzione di composti organici volati risulta essere circa il doppio del quantitativo di ozono troposferico rimosso. Per contro, si osserva un valore significativo di rimozione di O<sub>3</sub> operato dal gruppo delle 19 specie a fronte di emissioni di BVOCs contenute. Un importante apporto fornito a questo insieme è dato dal genere *Tilia* il cui contributo emissivo è praticamente nullo, mentre rilevante risulta essere il quantitativo di O<sub>3</sub> sottratto all'atmosfera (il genere *Tilia* sequestra un quantitativo di O<sub>3</sub> pari a 106.6 kg·anno<sup>-1</sup> sul totale "Altre specie" di 178.8 kg·anno<sup>-1</sup>).

Sulla base dei dati forniti in input al programma, il modello ha stimato emissioni di composti organici volatili per il parco "Le Vallere" pari a 212 kg·anno<sup>-1</sup>. Il corrispettivo economico, valutato in questo caso come costo a discapito dell'ambiente, non è dato come output dal programma in quanto il modello elabora automaticamente un bilancio tra i benefici economici apportati dalla rimozione di ozono e i disservizi legati alla produzione di BVOCs.

L'ultima tipologia di inquinante analizzata sono le **polveri sottili** la cui rimozione operata dagli alberi avviene mediante deposizione secca sulla superficie fogliare e risulta tanto maggiore quanto più le foglie sono tomentose, cioè dotate di peli superficiali.

Il modello "UFORE – D" (Paragrafo 4.2) evidenzia per questo inquinante la possibilità di risospensione in atmosfera o di dilavamento durante eventi di pioggia del quantitativo depositato sulla chioma degli alberi. Questa combinazione di eventi può portare ad un valore di rimozione del PM2.5 positivo o negativo a seconda dei fattori atmosferici che intervengono. Ne sono un esempio i mesi di novembre e

dicembre del 2015, anno di riferimento della simulazione, in cui i valori di PM2.5 risultano essere negativi (Tabella 6.1).

Tabella 6.1 Valori mensili di rimozione del particolato PM2.5 stimati dal programma Eco per l'anno 2015

Inquinante	Mese	Valore medio (kg)	Valore massimo (kg)	Valore minimo (kg)
PM2.5	1	0.000	0.001	0.000
	2	0.018	0.035	0.002
	3	2.823	6.618	0.394
	4	0.892	1.125	0.081
	5	0.680	1.435	0.085
	6	1.049	2.213	0.149
	7	0.493	0.964	0.064
	8	0.880	1.973	0.115
	9	0.466	0.918	0.062
	10	1.942	3.717	0.270
	11	-0.294	-0.506	-0.045
	12	-0.016	-0.03	-0.002
	Totale annuo	8.935	18.463	1.176

La motivazione di tali valori può essere cercata osservando il grafico delle precipitazioni (Figura 6.16) in cui si evidenzia che i mesi appena citati sono caratterizzati da un'assenza di eventi di pioggia, ragion per cui gli alberi risospendono più particelle di quante ne rimuovano determinando un delta di variazione della concentrazione di PM2.5 a svantaggio dell'ambiente.

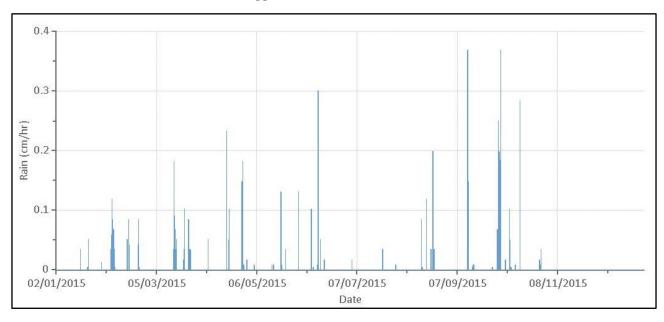


Figura 6.16 Intensità di precipitazione registrata nell'anno 2015 dalla stazione meteorologica "Bric della Croce"

L'analisi dei valori di PM2.5 deve, inoltre, considerare il fatto che i quantitativi rimossi sono funzione, oltre che delle condizioni climatiche, anche della concentrazione in atmosfera del particolato. Infatti, è possibile che si verifichino casi in cui gli alberi rimuovono un certo quantitativo di PM2.5 ma l'incremento di concentrazione è tale da determinare un delta di rimozione negativo. Questo aspetto è messo in evidenza in Figura 6.17 dove si riporta la deposizione secca oraria di PM2.5 per unità di copertura arborea in funzione della concentrazione di inquinante in atmosfera.

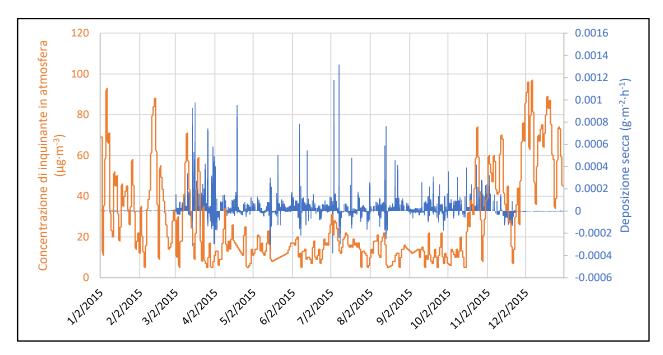


Figura 6.17 Confronto tra la concentrazione di PM2.5 in atmosfera e il flusso di inquinante depositato sulla superficie fogliare

Analogamente ai risultati mostrati per gli inquinanti precedentemente analizzati, le specie più significative nel sequestro atmosferico di polveri sottili risultano essere il genere *Tilia* e la specie *Populus alba*.

L'analisi conduce ad una stima della rimozione di PM2.5 pari a 8.9 kg·anno<sup>-1</sup> equivalenti a 47433 euro.

Il corrispettivo economico di questo Servizio Ecosistemico risulta particolarmente significativo se paragonato a quello del biossido di azoto e dell'ozono troposferico. Infatti, a fronte di un quantitativo di polveri sottili rimosso nettamente inferiore rispetto agli altri due inquinanti, il valore economico associato a questo beneficio risulta significativamente maggiore (Figura 6.18).

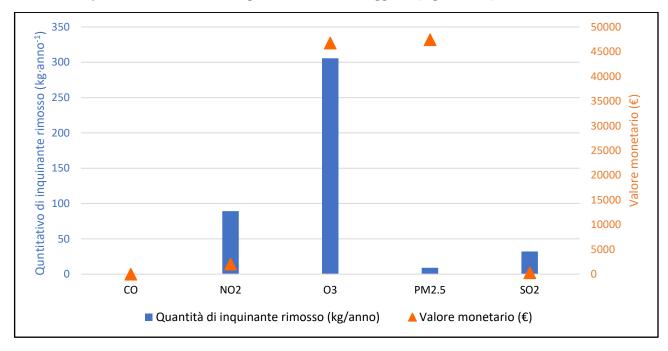


Figura 6.18 Quantitativo annuo di inquinante rimosso (istogramma) dalla popolazione arborea costituente il parco "Le Vallere" e corrispettivo valore monetario (punti)

A fronte di quanto esposto in merito alla riduzione delle concentrazioni di inquinanti operata dalle principali specie arboree presenti nel parco "Le Vallere", si desidera riepilogare tali dati nel grafico riportato in Figura 6.19 in cui gli istogrammi mostrano il contributo delle specie più significative nella rimozione di ozono, biossido di azoto e PM2.5, mentre il diagramma lineare indica la numerosità di individui arborei stimati per ciascuna di esse. I quantitativi relativi al biossido di zolfo e al monossido di carbonio, trattandosi di entità trascurabili sia in termini quantitativi che economici, non sono stati esplicitati.

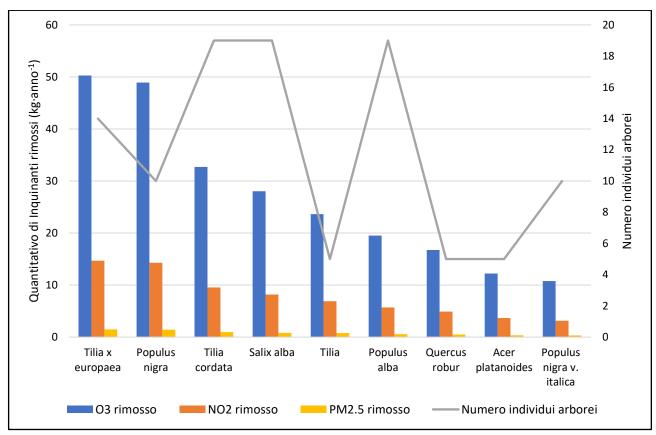


Figura 6.19 Confronto tra il contributo delle specie più significative nella rimozione di biossido di azoto, ozono troposferico e polveri sottili (istogrammi) e la numerosità degli individui appartenenti a ciascuna specie (grafico lineare)

Il grafico conferma quanto emerso dall'analisi dei precedenti, ovvero che non necessariamete un numero più elevato di individui implica maggiore rimozione di inquinanti, e viceversa. Ne sono un esempio le specie *Tilia x europaea*, *Populus nigra* e il genere *Tilia* per cui a fronte di un numero minore di individui rispetto ad altre specie, quali *Tilia cordata*, *Salix alba* e *Populus alba*, la quantità di inquinanti rimossi risulta essere maggiore.

Tale fenomeno, infatti, non dipende esclusivamente dalla numerosità di alberi appartenenti ad una determinata specie, bensì è funzione anche delle loro caratteristiche intrinseche, della dimensione degli individui presenti e del loro ciclo vegetativo.

Al fine di verificare questa multipla dipendenza si confrontano i quantitativi di inquinanti sequestrati e la superficie fogliare delle varie specie. Considerando due o più specie aventi valori di superficie fogliare simili è possibile effettuare delle considerazioni di tipo comparativo sulle loro performance.

Dal grafico riportato in Figura 6.20 si osserva, per esempio, che le specie *Tilia x europaea* e *Populus nigra* sono quelle che presentano i valori più elevati di superficie fogliare e, nello specifico, che a parità di

questo indicatore, i valori di rimozione degli inquinanti sono tra i più elevati ma pressoché identici. Questo dipende dal fatto che entrambe le specie sono caducifoglie e pertanto esercitano i loro processi biochimici a livello fogliare soltanto durante il periodo primaverile ed estivo. Nel caso in cui una delle due specie fosse stata sempreverde, probabilmente, a parità di superficie fogliare, il quantitativo di inquinanti rimossi sarebbe stato maggiore.

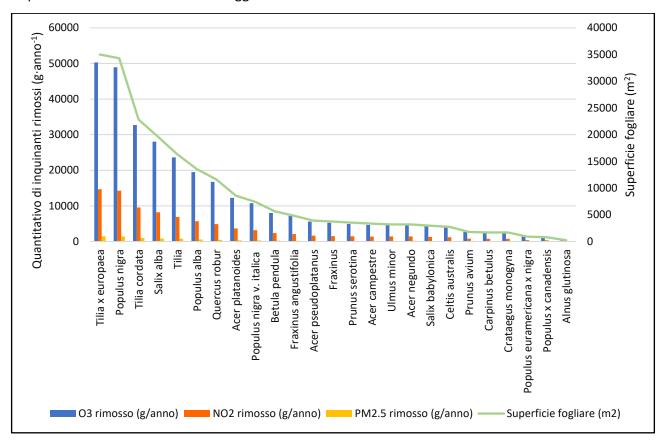


Figura 6.20 Confronto tra superficie fogliare e quantità di  $O_3$ ,  $NO_2$  e PM2.5 rimossa dalle specie arboree popolanti il parco "Le Vallere"

### 6.2.3 Quadro d'insieme e considerazioni finali

Si precisa che le considerazioni effettuate sui risultati forniti dal programma *Eco* sono riferite al contesto oggetto di studio e soggette alla stima della numerosità del campione.

L'analisi condotta sul parco "Le Vallere" evidenzia come specie più comuni popolanti il territorio esaminato il *Tilia x europaea*, il *Salix alba*, il *Tilia cordata* e il *Populus nigra* che rappresentano più del 40% della copertura arborea totale. Queste, insieme alla variante italica del *Populus nigra* e al genere *Tilia*, sono le specie che contano il maggior numero di individui arborei nelle classi diametriche medioalte, ad eccezione del *Populus nigra* che presenta il 37.5% di alberi nella classe alta (106.7 – 121.9 cm).

La numerosità e le dimensioni degli individui portano queste specie ad essere tra quelle caratterizzate da una biomassa e una superficie fogliare maggiormente estesa e, di conseguenza, quelle più performanti nello stoccaggio e sequestro di carbonio e nell'azione di rimozione degli inquinanti.

Considerata la complessità dei fattori in gioco, la scelta delle specie da inserire in un contesto urbano non è semplice e richiede scelte oculate che tengano conto sia dei servizi che dei disservizi da queste offerti. Poiché al momento non è disponibile un metodo di calcolo per stabilire se, ed in quale misura, la

rimozione di ozono e di inquinanti fotochimici controbilancia la loro produzione, ci si limita a fornire indicazioni di carattere generale basate sui risultati ottenuti dal software *i-Tree Eco* e sulle informazioni disponibili in rete.

Oltre alle specie sopra citate, il cui contributo è risultato positivo per la totalità dei servizi analizzati, si vuole dedicare particolare attenzione a quelle specie il cui contributo è risultato particolarmente significativo pur comprendendo un numero di individui medio-basso. Ne sono un esempio il Frassino ossifillo (*Fraxinus angustifolia*) e il Bagolaro (*Celtis australis*) ai quali appartengono un numero stimato di 5 piante ciascuno sul totale della popolazione arborea e una superficie fogliare rispettivamente del 2.3% e 1.3% (percentuali analoghe sono attribuite alla biomassa fogliare). Queste due specie possiedono caratteristiche fisiologiche tali che, nonostante l'esiguo numero di piante ad esse appartenenti, sono in grado di contribuire positivamente al miglioramento della qualità dell'aria.

In funzione di queste osservazioni, è possibile suggerire quali specie sono da preferire per piantumazioni future o per sostituzione di piante malate o pericolose per la fruizione in sicurezza del parco. Le specie sempreverdi, ad esempio, sono in grado di svolgere la loro funzione di filtro atmosferico anche durante la stagione fredda, mentre le caducifoglie perdono la loro efficacia durante il periodo invernale. Specie a crescita rapida, quale il Pioppo (*Populus nigra*, la sua variante italica e *Populus alba*), massimizzano lo stoccaggio e il sequestro di carbonio, e la rimozione degli inquinanti ma solamente nel periodo in cui le foglie sono presenti. Tuttavia, proprio in questo periodo stagionale, il genere *Populus* presenta le massime emissioni di composti organici volatili, specialmente di isoprene, determinando un incrementano dello smog fotochimico. Piante come il Tiglio, il Frassino e il Bagolaro, invece, risultano ideali per minimizzare la produzione dei precursori di ozono troposferico in quanto non emettono praticamente composti organici volatili.

I risultati forniti da *i-Tree Eco* trovano conferma negli studi compiuti dall'Ibimet, l'Istituto di biometeorologia del CNR di Bologna, sulla mitigazione del clima urbano attraverso l'utilizzo delle alberature in città (S57). Secondo una classifica stilata da questo istituto, il Bagolaro (*Celtis australis*) si presenta come specie che presenta le migliori prestazioni contro le polveri sottili, mentre il Tiglio selvatico (*Tilia cordata*), il Biancospino (*Crataegus monogyna*) e il Frassino (*Fraxinus*) risultano contribuire significativamente all'assorbimento della CO<sub>2</sub>. Queste specie, inoltre, presentano preziose virtù quali ad esempio un'ampia chioma ombrosa per il Tiglio, bacche rosse per il biancospino ed una resistenza alle condizioni avverse per il Frassino. Infine, tra le specie potenzialmente utili nella mitigazione del clima e dell'inquinamento è possibile annoverare anche l'Acero campestre, l'Acero platanoide e l'Acero di monte (*Acer Pseudoplatanus*), in quanto si prospettano come le migliori in grado di resistere alle ingenti concentrazioni di inquinamento urbano perché autoctone e appartenenti alla flora locale.

In termini quantitativi, i benefici apportati dalla popolazione arborea costituente il parco "Le Vallere" stimati da *i-tree Eco* sono pari a 437 tonnellate di carbonio stoccato per un valore monetario di circa 40 mila euro, 13 tonnellate annue di carbonio sequestrato equivalenti a circa 1200 euro e 436 chilogrammi annui di inquinanti rimossi corrispondenti a circa 96.5 mila euro (Tabella 6.2).

Tabella 6.2 Quantificazione dei Servizi Ecosistemici offerti dal parco "Le Vallere" e corrispettivo economico

Tipologia di SE		Quantitativo (kg·anno <sup>-1</sup> )		Valore economico (€)	
Stoccaggio di carbonio		437·10³		40000	
Sequestro di carbonio		13·10³		1200	
Rimozione di inquinanti	Biossido di azoto NO <sub>2</sub> )	436	89.3	96489	2041
	Ozono troposferico (O₃)		305.6		46747
	Polveri sottili (PM2.5)		8.9		47433
	Biossido di zolfo (SO <sub>2</sub> )		32.2		268
Emissione di BVOCs (disservizio)			212		-

Al fine di stimare il valore relativo di tali benefici, si è confrontato il loro quantitativo con le stime delle emissioni medie delle autovetture e con quelle domestiche. Nello specifico, il software riporta che lo stoccaggio di carbonio risulta equivalente alle emissioni annuali di carbonio di 341 automobili e di 140 case unifamiliari, mentre la rimozione del biossido di azoto è equivalente alle emissioni annuali di NO<sub>2</sub> di 14 automobili e di 6 case unifamiliari.

# 6.3 Applicazione di i-Tree Hydro

L'applicazione dello strumento *Hydro* al parco "Le Vallere" ha come fine quello di osservare come i Servizi Ecosistemici idrici sono profondamente influenzati dai cambiamenti apportati nell'uso del suolo dall'operato umano e come quest'ultimo, essendo ritenuto la causa globale del cambiamento climatico possa influire su di essi anche in un futuro.

Durante il processo di urbanizzazione, il sistema di drenaggio urbano è stato progettato in modo tale da allontanare il più rapidamente possibile le acque di pioggia dalle aree urbane senza prendere in considerazione i principi dell'invarianza idraulica <sup>25</sup> (Figura 6.21). Questo fenomeno, unitamente alla variazione delle coperture del suolo in termini di impermeabilizzazione, comporta un'alterazione del naturale ciclo idrologico in quanto provoca una forte riduzione dell'infiltrazione superficiale, limita la ricarica delle falde acquifere e diminuisce l'evapotraspirazione.

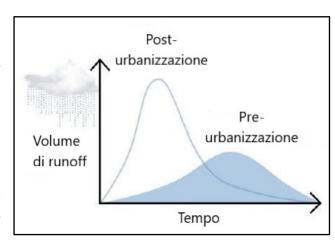


Figura 6.21 Rappresentazione qualitativa dei volumi di runoff scaricati nei fiumi prima e dopo il processo di urbanizzazione

A scala di bacino, l'insieme di tali processi comporta una riduzione del tempo di corrivazione con conseguente generazione di abbondanti deflussi superficiali che alimentano le portate che giungono alle reti di drenaggio urbano e ai corpi idrici ricettori. Gli idrogrammi di questi ultimi sono, infatti, caratterizzati da picchi di piena molto più accentuati rispetto a quelli che si avrebbero in un territorio non colpito dalla rapida espansione urbana (Figura 6.21).

\_

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Il principio dell'invarianza idraulica sancisce che la portata al colmo di piena risultante dal drenaggio di un'area debba rimanere invariata prima e dopo la trasformazione dell'uso del suolo in quell'area.

Le conseguenze delle attività umane sull'ambiente si riflettono non solo sulla quantità ma anche sulla qualità delle cosiddette acque di *runoff*, ovvero le acque di ruscellamento, specialmente quelle di dilavamento delle pavimentazioni stradali, che contribuiscono ad incrementare il carico di inquinanti nei corpi idrici ricettori o nelle reti di drenaggio urbano.

È facile intuire che i servizi offerti dall'acqua rientrano nella maggior parte delle categorie in cui i S.E. sono classificati. La risorsa idrica, per esempio, può essere identificata come <u>servizio di approvvigionamento</u> per la sua caratteristica di poter essere estratta dalle falde acquifere o prelevata dai corsi d'acqua e resa disponibile per usi umani, agricoli, commerciali, industriali e idroelettrici (Brauman et al., 2007). Allo stesso tempo, i benefici offerti da questa risorsa risultano essere <u>servizi di regolazione</u> se si considera che sono responsabili dei processi idrologici, delle interazioni con il clima, influenzano le velocità e i quantitativi di piena e concorrono alla mitigazione dei danni prodotti da eventi meteorologici eccezionali. In termini di Servizi Ecosistemici <u>culturali</u>, l'uso dell'acqua può essere ricondotto ad un suo impiego spirituale, ad una valenza estetica e al turismo, mentre come <u>servizio di supporto</u> ha la sua manifestazione più chiara in termini di fonte di vita per uomini, animali, piante e, nello specifico, come habitat per gli organismi acquatici.

La trasversalità dei benefici offerti dalla matrice acqua evidenzia l'interconnessione della risorsa con gli ecosistemi che ne modificano i flussi influenzandone le caratteristiche (Brauman, 2015). Tra questi, la vegetazione assume un importante ruolo negli effetti che gli ecosistemi stessi hanno sulla risorsa idrica. Le aree verdi, infatti, hanno un grande impatto sul bilancio idrologico delle città: l'intercettazione della pioggia da parte delle foglie e l'infiltrazione nel suolo non impermeabilizzato contribuiscono a ridurre lo scorrimento superficiale dell'acqua piovana rappresentando un efficace strumento di mitigazione del rischio idrogeologico, specialmente a fronte di fenomeni meteorologici estremi di sempre maggiore intensità e frequenza. Al tempo stesso, il miglioramento della connessione tra aree verdi garantisce ecosistemi più funzionali, resilienti alle pressioni esterne e fornitori stabili di Servizi Ecosistemici (S58).

L'applicazione di *Hydro* al parco "Le Vallere" ha l'obiettivo di evidenziare l'importante ruolo di questa area, intesa come territorio permeabile, sottolineando come un cambiamento dell'ecosistema (variazione della copertura del suolo, uso o gestione) o del clima (variazione delle temperature, incremento dell'intensità delle precipitazioni, ecc.) può influenzare i flussi di acqua che lo attraversano.

In termini di confronto tra diversi usi del suolo, *Hydro* raggiunge la sua massima potenzialità quantificando in funzione di questi le variazioni nei flussi di acqua. Per quanto riguarda invece l'incidenza del clima sui flussi generati da un'area urbana, sia essa caratterizzata da vegetazione che da superfici impermeabili, l'analisi è stata condotta con l'obiettivo di testare la sensibilità del software alla variazione dei dati di input indagando in quali componenti del ciclo idrologico urbano tali variazioni risultano maggiormente apprezzabili.

In merito a quest'ultima tematica, risulta doveroso accennare come le attività antropiche sono state, e continuano tutt'oggi, ad essere responsabili del riscaldamento globale e, più in generale dei cambiamenti climatici, compresi gli eventi estremi. Questi determinano impatti diffusi sia sui sistemi naturali ma, allo stesso tempo, anche su quelli antropici evidenziando l'estrema suscettibilità di entrambi e della società umana al clima e alla sua evoluzione (Città di Torino, Assessment climatico e scenario futuro, 2018).

I cambiamenti climatici rappresentano una delle sfide più rilevanti su scala globale al punto tale che nel 1988 è stato istituito un organismo internazionale per la valutazione di questi fenomeni, l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), con lo scopo di fornire al mondo una visione chiara e scientificamente fondata sullo stato attuale delle conoscenze su di essi e sui loro potenziali impatti ambientali e socio-economici (S59).

L'attività principale dell'IPCC consiste nel produrre periodicamente Rapporti di Valutazione scientifica (Assessment Reports), l'ultimo dei quali evidenzia l'Europa meridionale e l'area mediterranea come i territori che probabilmente dovranno fronteggiare nei prossimi decenni gli impatti più significativi di tali cambiamenti. Gli indicatori di impatto più rilevanti identificati per queste aree geografiche sono l'innalzamento delle temperature, l'aumento della frequenza degli eventi estremi (siccità, ondate di calore, precipitazioni intense) e la riduzione delle precipitazioni annuali (Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, 2017).

Per far fronte a questa problematica, le politiche climatiche internazionali hanno sottolineato la necessità di promuovere, a vari livelli e scale, l'assunzione di misure di mitigazione e adattamento; nello specifico, nell'aprile 2013, l'Unione Europea ha formalmente adottato la "Strategia di Adattamento ai Cambiamenti Climatici", che definisce principi, linee-guida e obiettivi della politica comunitaria.

A livello nazionale il primo passo verso la definizione di tali strategie è stato compiuto con la pubblicazione della "Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici" (SNAC) la cui attuazione è stata avviata nel 2016 mediante l'elaborazione del "Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici" (PNACC) da parte del Ministero dell'Ambiente. Tale Piano prevede l'adozione di un metodo di lavoro che consiste nella suddivisione del territorio nazionale in sei macroregioni omogenee potenzialmente esposte a variazioni climatiche simili, in funzione delle quali sono state analizzate proiezioni climatiche future. L'analisi focalizza l'attenzione su orizzonti temporali diversi (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) e valuta sia i valori medi che gli indici rappresentativi degli estremi di temperatura e precipitazione, particolarmente rilevanti nella definizione delle strategie di adattamento ai cambiamenti climatici.

A livello regionale, anche il Piemonte osserva cambiamenti nel clima locale evidenziandone una maggiore variabilità caratterizzata da frequenti e intensi eventi "fuori stagione" e da una rapida alternanza degli estremi. L'incremento delle temperature, in particolare della massima estiva e autunnale, è risentito in maniera particolare nelle aree urbane dove gli effetti delle ondate di calore incidono significativamente sulla salute umana e sulla natura stessa, determinando, nel primo caso, un incremento della mortalità e, nel secondo, un prolungato e anticipato periodo di pollinazione, impatti sulla gestione del verde urbano e sulla disponibilità idrica. Allo stesso tempo l'intensificarsi degli eventi meteorici si pone come una sfida tra l'utilizzo del suolo e le dinamiche fluviali.

A fronte di un cambiamento difficilmente arrestabile in breve periodo, e in coerenza con il PNACC, la città di Torino si è dotata di un "Piano di Adattamento" basato sulle caratteristiche climatiche della zona e sulla loro possibile evoluzione futura. Le simulazioni sono state condotte dal Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici mediante l'impiego del modello climatico COSMO-CLM (Bucchignani et al., 2016) e si basano sugli scenari di emissione RCP4.5 e RCP8.5 che corrispondono a due dei quattro *Representative Concentration Pathways* (RCP) che la comunità scientifica internazionale ha selezionato per rappresentare nel futuro l'evoluzione delle concentrazioni dei gas ad effetto serra sul nostro pianeta (Città di Torino, Assessment climatico e scenario futuro, 2018). Gli scenari selezionati

sono i due più comunemente utilizzati in quanto rappresentano rispettivamente livelli di emissioni intermedi ed alti:

- lo scenario RCP4.5 elabora modelli considerando la messa in atto di azioni di mitigazione significative e contemplando una stabilizzazione della concentrazione della CO<sub>2</sub> in atmosfera dopo la metà del secolo;
- lo scenario RCP8.5 non prevede l'attuazione di alcuna strategia mitigativa nei confronti del cambiamento climatico (Città di Torino, Assessment climatico e scenario futuro, 2018).

In questo contesto si inserisce l'applicazione del pacchetto *Hydro* al parco "Le Vallere" con l'obiettivo di ipotizzare i deflussi idrici generati da questa porzione di territorio a seguito di variazioni di temperatura e di precipitazione, e come questi cambiamenti potrebbero essere mitigati incrementando il numero di individui arborei popolanti l'area oggetto di studio.

Sulla base di quanto riportato nel paragrafo dedicato all'analisi del modello matematico "UFORE-HYDRO" (Paragrafo 5.2) e degli input e degli output forniti da questo programma (Sottoparagrafo 5.3.2, Sottoparagrafo5.3.3), si dedicano i sotto-paragrafi successivi alla descrizione dei passaggi che hanno articolato lo sviluppo di questo progetto e all'analisi degli ipotetici scenari di confronto rispetto al caso attuale.

## 6.3.1 Definizione dati di input

La prima impostazione che è necessario definire per iniziare a lavorare con l'applicativo *Hydro*, è identificare se il territorio oggetto di studio può essere analizzato come area *Watershed* oppure *non-Watershed*.

L'approccio utilizzato per modellare i flussi di acqua meteorici che interessano il parco "Le Vallere" segue il modello *non-Watershed*. Tale scelta è determinata dal fatto che, sebbene il parco si trovi alla confluenza tra due corsi d'acqua (il torrente Sangone e il fiume Po), l'area presenta più di un punto in cui i flussi generati da eventi di pioggia possono defluire. L'area dunque non confluisce le acque in un unico punto di raccolta, aspetto che implica che una singola stazione idrometrica non è in grado di rilevarne la totalità dei volumi.

I progetti non-Watershed non possono usufruire dello strumento di auto-calibrazione di cui dispone Hydro e, pertanto i parametri idrologici inseriti in input non possono essere calibrati in funzione dei dati rilevati da una ipotetica stazione di misura presente lungo i due corsi d'acqua. Si ricorda, tuttavia, che la calibrazione del modello non è un elemento fondamentale che preclude l'utilizzo del programma o inficia l'attendibilità dei risultati. i-Tree Hydro, infatti, è stato progettato per effettuare considerazioni comparative tra un caso base e casi alternativi, e non per prevedere i quantitativi assoluti di acqua che fluiscono in un corpo idrico ricettore o nella rete di drenaggio urbano.

### Step 1: Informazioni sull'area di progetto

L'applicativo lavora identificando una zona all'interno del territorio statunitense che abbia latitudine, altitudine e caratteristiche climatiche simili alla area di interesse. Nel caso in esame è stata identificata la città di Minneapolis, in Minnesota, capoluogo della contea di Hennepin, come luogo di riferimento per la città di Moncalieri.

L'anno assunto per la simulazione è il 2019 con periodo temporale dal 01/01/2019 al 31/12/2019; tale arco temporale deve coincidere con quello delle serie temporali dei dati meteorologici inseriti successivamente in input.

Questo primo step di inserimento dati richiede l'introduzione del DEM relativo all'area oggetto di studio ottenuto secondo la procedura che segue:

- download del modello digitale del terreno (DTM) con passo 10 m, derivato da CTRN 1:10.000 reperito sul Geoportale della Regione Piemonte nella sezione Catalogo (S60). Il file contiene cinque DTM relativi alla suddivisione del Piemonte in una zona nord, centro-orientale, centro-occidentale, sud- orientale e sud-occidentale; di questi si è preso in considerazione solamente quello relativo al Piemonte centro-occidentale considerata la posizione del comune di Moncalieri all'interno della Regione;
- caricamento del file DTM sul software ArcGIS;
- creazione di uno shapefile contenente la delimitazione del parco e avente medesimo sistema UTM del DTM (WGS\_1984\_UTM\_Zone\_32N) (il contorno del parco è stato assunto pari a quello definito per il progetto *Eco*);
- utilizzo del comando Clip (presente in ArcToolbox → Data Management Tools → Raster → Raster
   Processing) per tagliare il DEM secondo il poligono appena creato;
- utilizzo dello strumento Raster To ASCII (reperibile in ArcToolbox → Conversion Tools → From Raster → Raste to ASCII) per convertire il DTM appena creato e salvataggio del file in formato .txt;
- conversione del file.txt in file.dat mediante utilizzo dell'App *Blocco Note* disponibile per i sistemi operativi Microsoft Windows.

Si precisa che *Hydro* lavora secondo una precisa impostazione del pc, pertanto, prima di avviare un progetto, si consiglia di settare il pc secondo il formato americano di data e ora, e di impostare come separatore decimale il punto e non la virgola. Nello specifico, per quanto riguarda la creazione del file DEM, si consiglia di verificare che il file.dat creato non contenga valori mancanti. È possibile reperire ulteriori informazioni a riguardo nel forum utenti di *Hydro* al sito (S61).

L'ultimo passaggio previsto da questo primo step richiede l'inserimento dei dati meteorologici, che per il caso in esame è avvenuto selezionando l'opzione "Select raw NCDC weather file". Questa procedura si articola in una serie di passaggi di seguito riportati

- Reperimento dei dati nell'archivio *Integrated Surface Database* (ISD) della *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (S62). Questa sezione contiene stazioni meteorologiche, statunitensi e non, consultabili e utilizzabili da tutti gli utenti. Per il caso studio l'unica stazione selezionabile è la stazione meteorologica "Bric della Croce", già utilizzata per il progetto *Eco*, ritrovata all'interno del database mediante il suo codice identificativo (ID 160610-99999).
- Download dei dati appartenenti a questa stazione e decompressione del file.gz mediante l'utilizzo del programma 7-Zip.
- Conversione di questo file in formato testo (.txt) mediante l'utilizzo del preprocessore meteo *i-Tree Research Suite* scaricabile dal sito (S63). Tramite il Prompt dei comandi di Windows si

raggiunge la *directory* nella quale è contenuto sia il file da convertire che il preprocessore e mediante la digitalizzazione di una serie di comandi si ottiene il file.txt di output. Maggiori informazioni riguardo tale procedura sono reperibili nel forum di *i-Tree Hydro* (S64).

- Inserimento del file.txt ottenuto all'interno di *Hydro* previo controllo della corrispondenza tra il periodo temporale impostato e quello della serie temporale meteorologica.

La necessità di far riferimento alle stazioni meteorologiche proposte dal programma deriva dal fatto che il Servizio Forestale degli USA verifica che queste rilevino i parametri peculiari necessari per effettuare le simulazioni, solitamente non misurati da tutte le stazioni.

Completando lo Step 1 e 2 il modello conclude l'elaborazione di questi primi dati inseriti, definiti dal programma  $raw\ data$ , ovvero dati grezzi. A differenza del  $tool\ Eco$ , Hydro fornisce all'utente la possibilità di personalizzare le serie di dati temporali esportando quelli pre-processati, per il caso in esame relativi alla stazione "Bric della Croce" (l'esportazione dei file meteorologici elaborati si effettua da  $File \rightarrow Save$   $Weather\ and\ Gage\ Data \rightarrow Save\ Processed\ Weather\ Data$ ).

In questo modo, nell'ipotesi di disporre di una stazione meteorologica maggiormente rappresentativa delle condizioni climatiche dell'area di studio rispetto a quelle presenti nell'archivio ISD del NOOA, l'utente può sostituire totalmente o in parte i dati temporali processati. Queste serie, a differenza di quelle grezze, fanno riferimento a parametri comunemente rilevati dalle stazioni di misura, ovvero alla temperatura dell'aria (F) e del punto di rugiada (F), alla radiazione solare netta (W·m<sup>-2</sup>), alla velocità del vento (m·s<sup>-1</sup>), alle precipitazioni (m·s<sup>-1</sup>) e alla neve (m·s<sup>-1</sup>). La stazione di misura individuata deve registrare tali parametri con frequenza oraria per un anno solare.

A Moncalieri e, più in particolare, proprio all'interno del parco "Le Vallere", nella porzione di territorio gestita dalla SMAT, è presente una stazione meteorologica denominata "Torino Vallere" (ID 249) (Figura 6.22) le cui serie orarie di temperatura dell'aria, radiazione solare e precipitazione sono state richieste ad ARPA Piemonte (Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali).

I dati forniti da ARPA Piemonte corrispondono ai valori campionati alla scadenza dell'ora ad eccezione delle precipitazioni il cui dato fa riferimento al valore cumulato orario. Accanto a tali dati è presente un flag di validazione automatica pari a 0 se il dato è considerato buono



Figura 6.22 Stazione meteorologica "Torino Vallere" (ID 249)

ed uguale ad 1 se il dato non è considerato attendibile oppure è mancante; con il valore -999.9, presente solo per le precipitazioni, vengono evidenziati i dati mancanti.

Per quanto riguarda, invece, i dati di velocità del vento, la stazione "Torino Vallere" non dispone di anemometro, pertanto questi sono stati richiesti all'Osservatorio del Collegio Carlo Alberto di Moncalieri, Società Metrologica italiana (SMI) distante circa 2 chilometri in linea d'aria dal parco. I valori di temperatura del punto di rugiada e delle precipitazioni nevose sono stati mantenuti inalterati.

La sostituzione dei dati processati segue una precisa metodologia di seguito esposta:

- importazione del file.dat contenente i dati processati in un foglio di calcolo (Microsoft Excel);
- utilizzo dello strumento Testo in Colonne disponibile nella sezione Dati di Excel per convertire i dati in formato testo in tabella;
- copia e incolla delle serie di dati che si desidera sostituire assicurandosi che le unità di misura siano corrette e che non vi siano valori mancanti, in tal caso si è proceduto al calcolo della media tra il valore orario precedente e quello successivo il dato mancante;
- verifica del formato dei dati, ovvero personalizzazione del formato della colonna "Hr:Min:Sec" in "hh:mm:ss" e selezione di otto cifre decimali per tutti i dati a destra delle colonne "aaaammgg" e "Hr: Min: Sec";
- esportazione dei dati personalizzati come file.csv e, successivamente, conversione in file.dat.

I dati così modificati possono essere caricati su *Hydro* nello Step 1 alla voce "Select processed weather files".

#### Step 2: Copertura del suolo (Canopy)

Il secondo step di un progetto condotto con il *tool Hydro* della suite *i-Tree* prevede la definizione delle percentuali di copertura del suolo rispetto alla superficie totale dell'area di progetto distinte in:

- Copertura arborea (*Tree Canopy*) suddivisa in copertura arborea su suolo permeabile (*Pervious under Tree Canopy*) e copertura arborea su suolo impermeabile (*Impervious under Tree Canopy*);
- Copertura arbustiva (Shrub Canopy);
- Copertura erbacea (Herbaceous);
- Acqua (Water);
- Copertura impermeabile (Impervious);
- Suolo Nudo (Bare soil).

La determinazione dei valori percentuali da attribuire a tali categorie viene effettuata mediante l'utilizzo dell'applicativo online *i-Tree Canopy* il cui modello è stato descritto nel Paragrafo 5.1. Sulla base di quanto riportato in merito all'utilizzo di questo applicativo, si procede importando lo shapefile realizzato con il software *ArcGIS* contenente la delimitazione dei confini del parco.

Successivamente si imposta una località di riferimento nel territorio statunitense rappresentativa della città metropolitana di Moncalieri che, analogamente al progetto *Hydro*, viene scelta pari a Minneapolis, nella contea di Hennepin, in Minnesota. Si procede selezionando le caratteristiche della località scegliendo l'opzione "All" rappresentativa di un'area sia urbana che rurale. Tale scelta è stata condotta considerando l'area oggetto di studio un parco estensivo situato all'interno di un contesto urbano.

Infine, si seleziona come valuta per la quantificazione economica dei benefici offerti dall'area verde quella ufficiale dei paesi della zona euro.

Il passaggio successivo richiesto da *Canopy* all'utente è la definizione delle classi di copertura del suolo in cui catalogare il territorio assunte pari a quelle richieste in input da *Hydro*.

Per il caso in esame sono stati identificati 1300 punti sul territorio attribuendo a ciascuno di essi ad una delle categorie di suolo sopra elencate. La scelta del numero di punti è arbitraria; si considera 1300 un numero di punti adeguato alle dimensioni dell'area e tale da fornire risultati di precisione accettabile, mantenendo l'errore standard inferiore al 3%. Si riportano in Tabella 6.3 i risultati forniti dal programma in termini areali e di percentuali di copertura del terreno.

Tabella 6.3 Report fornito da Canopy riportante il numero di punti classificati in ogni categoria di suolo individuata, le percentuali di copertura del suolo e i corrispettivi valori areali affiancati entrambi dall'errore standard

Abbreviazione	Classe di copertura	Punti	% di copertura ± SE	Superficie (ha) ± SE
Н	Grass /Herbaceous	743	57.15±1.37	19.62±0.47
IB	Impervious Ground	49	3.77±0.53	1.29±0.18
IR	Tree - Impervious	21	1.62±0.35	0.55±0.12
S	Soil/Bare Ground	46	3.54±0.51	1.21±0.18
Т	Tree - Pervious	441	33.92±1.31	11.65±0.45
W	Water	0	0.00±0.00	0.00±0.00
Totale		1300	100.00	34.33

I valori riportati in Tabella 6.3, avvalorati dal grafico presentato in Figura 6.23, evidenziano la netta preponderanza della copertura erbacea ed arborea rispetto alle altre tipologie di suolo. Il totale di queste due coperture fornisce una percentuale di superficie permeabile pari a circa il 93%, valori coerenti con quella che risulta essere la destinazione d'uso del terreno su cui sorge il parco.

Tali percentuali vengono trasferite nel progetto avviato con Hydro che, moltiplicate per la superficie totale del parco, forniscono i metri quadrati di copertura appartenente a ciascuna categoria. Si precisa che i valori attribuiti a queste classi di copertura del suolo vengono presi come riferimento per definizione degli scenari alternativi esaminati nel Sottoparagrafo 6.3.2.

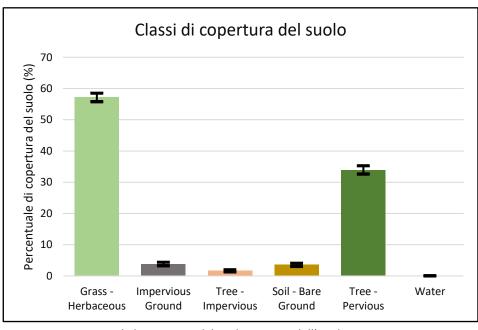


Figura 6.23 Percentuali di copertura del suolo ricavate dall'applicativo i-Tree Canopy

Si procede con l'inserimento di ulteriori dati di input previsti nello Step 2. Nello specifico, lo strumento chiede all'utente di inserire il valore di DCIA (*Directly Connected Imervious Area*), ovvero di quella della porzione di terreno impermeabile che direziona i flussi meteorici, via terra o attraverso la rete fognaria, direttamente al più vicino corso d'acqua o canale di scolo.

Tale valore è suggerito di default dal programma in funzione delle percentuali attribuite alla coperture del terreno, tuttavia si desidera calibralo manualmente sulla base delle equazioni di Sutherland (Sottoparagrafo 5.3.2, Tabella 5.1). Nello specifico, per il parco "Le Vallere" si è scelto di applicare l'equazione valida per aree parzialmente connesse, ovvero per aree in cui il 50% delle acque piovane

non raggiunge il sistema di drenaggio urbano ma interessa strade a sezione aperta, depressioni erbose, tetti residenziali non collegati e parzialmente si infiltra nel terreno

$$DCIA_{Sutherland} = 0.04(\%IA)^{1.7} = 0.04(3.77)^{1.7} = 0.382$$
 (6.1)

dove IA è la percentuale di area impermeabile totale. Poiché il programma richiede che questo parametro sia espresso come frazione della sola superficie impermeabile, il valore di DCIA da inserire in Hydro è pari a

$$DCIA_{Hydro} = \frac{DCIA_{Sutherland}}{\%IA} \cdot 100 = 10.13\%$$
(6.2)

A conclusione dell'inserimento dei parametri relativi a questo secondo step, il software richiede dati inerenti la chioma di alberi e arbusti. In particolare, l'utente ha la possibilità di assumere i valori di default attribuiti dal programma oppure modificarli manualmente, quest'ultima scelta è stata adottata per il caso in esame.

I valori dei parametri di cui il software necessita sono il LAI di alberi, arbusti e copertura erbacea, e la percentuale di copertura arborea e arbustiva sempreverde.

Per quanto riguarda il primo, questo è definito come il rapporto tra la superficie fogliare e l'area occupata dalla chioma della vegetazione (alberi, arbusti ed erba). Per il caso studio trattato il valore della superficie fogliare è stato ricavato dai risultati ottenuti con *i-Tree Eco*, mentre il valore di copertura arborea è stato assunto pari al valore fornito dalle analisi condotte con l'applicativo *Canopy* 

$$LAI = \frac{Superficie\ fogliare\ (Eco)\ (m^2)}{Copertura\ arborea\ (Canopy)\ (m^2)} = \frac{213300}{121957} \simeq 1.74 \tag{6.3}$$

Tale indice è stato calcolato solo per la vegetazione arborea in quanto nell'analisi condotta con *Eco* non è stata presa in considerazione la presenza di arbusti, poiché scarsamente presenti, mentre la quantificazione dei benefici apportati dalla copertura erbacea non risulta essere disponibile per questa tipologia di progetto o località. Sulla base di queste considerazioni, il valore attribuito a *Shrub Leaf Area* è stato assunto pari a zero, mentre per *Herbaceous Leaf Area* è stato mantenuto pari a quello di default impostato dal programma (1.6).

In merito alla percentuale di copertura arborea e arbustiva sempreverde, *Evergreen Tree Canopy* e *Evergreen Shrub Canopy*, non disponendo di valori caratteristici, si è optato per mantenere il primo pari al valore di default (10%), mentre il secondo è stato considerato nullo coerentemente con quanto detto sulla scarsa copertura arbustiva presente nel parco.

Tali ultimi due valori assumono rilevanza in termini di copertura arborea totale in quanto rappresentano la percentuale di vegetazione che non subisce una perdita stagionale di foglie e, pertanto, il valore di LAI ad essa associato rimane costante per tutto l'anno. Per una stima più accurata, è possibile far ricorso a strumenti esterni ad *Hydro* quali *i-Tree Canopy*, *ArcGIS* oppure riferirsi ai dati riportati nel *Database* della *National Land Cover*, quest'ultimo disponibile esclusivamente per gli Stati Uniti.

#### Step 3: Parametri idrologici

I parametri idrologici consentono di personalizzare dettagliatamente il progetto in modo tale che rispecchi le condizioni idrologiche dell'area di studio. Come anticipato in precedenza, lo strumento di auto-calibrazione non è disponibile in quanto l'area analizzata ricade nel caso non-Watershed. Ne consegue la possibilità di mantenere i valori di default suggeriti dal programma basati su medie nazionali statunitensi oppure modificarli manualmente.

Il primo parametro idrologico che si è optato di modificare è l'Annual Average Flow of Project Area, ovvero il quantitativo medio annuo di acqua che fluisce dalla porzione di territorio esaminato. Il valore di questo parametro, inserito in metri cubi al secondo, viene convertito dalle routine di calcolo in portata specifica (m·h<sup>-1</sup>), salvato come parametro iniziale  $q_0$  e utilizzato successivamente dagli algoritmi del modello.

Il valore attribuito all'Annual Average Flow of Project Area viene utilizzato per calcolare alcuni termini che descrivono il deficit di umidità del suolo<sup>26</sup> particolarmente influente sul calcolo di tutti i flussi sotterranei e quantificato sulla base di specifici parametri presenti all'interno del modello di Hydro. Per esempio, se il sottosuolo non è completamente saturo, un incremento di qo comporta una riduzione del deficit di umidità del suolo e, di conseguenza, un incremento del deflusso sotterraneo. Maggiori informazioni riguardo questo parametro e per spiegazioni più dettagliate sulle relazioni che intercorrono tra esso e le altre variabili sono reperibili nell'articolo sviluppato da Wang et al. (2006) in cui sono enunciate le equazioni implementate nelle routines che modellano i processi di infiltrazione e del flusso di base.

Nei progetti non-Watershed questo parametro è dato dal prodotto tra un'intensità predefinita dal programma pari a 1.6·10<sup>-5</sup> (m·h<sup>-1</sup>) e l'area della zona analizzata (m<sup>2</sup>). Per l'analisi condotta sul parco "Le Vallere" si è optato per modificare il valore di default attribuito all'intensità di precipitazione sostituendolo con il valor medio calcolato sui dati orari di pioggia relativi all'anno 2019. Tale valore risulta pari a 1.05·10<sup>-4</sup> (m·h<sup>-1</sup>) che moltiplicato per l'area del parco pari a 34.3·10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> fornisce un valore di portata uscente dal parco pari a 9.986·10<sup>-3</sup> (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>). Tale valore è stato mantenuto costante per tutte le simulazioni condotte.

Un ulteriore parametro richiesto in input dal programma è la tipologia di terreno che caratterizza l'area di studio, variabile che influisce sulla modellazione dei processi di infiltrazione. Per il parco "Le Vallere" si è scelta l'opzione "Sandy Loam", ovvero terreno sabbioso, considerando il fatto che il substrato è costituito per lo più da depositi sabbiosi – limosi e che la frazione granulometrica più grossolana è quasi del tutto assente.

In funzione del tipo di terreno selezionato, e quindi delle proprietà fisiche del suolo, Hydro attribuisce valori di default non modificabili ai seguenti parametri:

- wetting front suction, ovvero "fronte di umidificazione" (m), assunto di default pari a 0.11 m;
- effective porosity, ovvero "umidità del suolo", impostato di default pari a 0.412;

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Si definisce deficit di umidità del suolo la differenza tra la quantità di acqua immagazzinata in un dato volume di terreno e il quantitativo massimo che il suolo può contenere.

- surface hydraulic conductivity, ovvero "conducibilità idraulica superficiale", proposto dal programma pari a 1.09 cm·h<sup>-1</sup>.

Infine, per quanto concerne la definizione dei parametri idrologici che caratterizzano la parte più superficiale del terreno, il tool Hydro chiede all'utente di definire, o accettare di default, i valori attribuiti a Max Depth of Water in Upper Soil Zone e a Initial Soil Saturation.

Il primo rappresenta la porzione di terreno adibita all'"immagazzinamento" di acqua da cui l'apparato radicale della vegetazione attinge acqua per i processi di evapotraspirazione e sostanze nutritive. Il range di variabilità di questo parametro è 0.001 - 1.0 metri e, sebbene le radici di alcuni alberi possano raggiungere profondità superiori al metro, la maggior parte di queste attinge acqua ed elementi in questo primo metro di profondità. Il valore attribuito alla *Max Depth of Water in Upper Soil Zone* è una media calcolata sia in funzione dell'area di progetto che delle diverse tipologie di vegetazione presenti in essa (S65), ragion per cui, considerata l'alternanza di coltivazioni intensive di foraggio a radure e boschetti caratterizzanti il parco "Le Vallere", si è optato per conservare questo valore pari a quello di default proposto dal programma (0.05 m).

Per quanto riguarda, invece, il valore iniziale di saturazione del suolo (*Initial Soil Saturation*) questo rappresenta il quantitativo di acqua immagazzinata nel terreno all'inizio della simulazione. Un valore pari a 0% rappresenta un suolo assolutamente asciutto, mentre un valore pari al 100% evidenzia un suolo completamente saturo; per il caso studio si è optato di mantenere il valore di default proposto dal programma pari a 50%, considerando una media tra le due condizioni estreme di saturazione.

I parametri idrologici appena descritti sono quelli calibrabili manualmente in funzione delle nozioni idrogeologiche acquisibili sull'area oggetto di studio, sui dati meteorologici disponibili e sulle caratteristiche degli individui arborei popolanti il territorio.

È poi presente una serie di parametri definiti "Advanced Settings", descritti nel Sottoparagrafo 5.3.2, molto tecnici e difficilmente modificabili manualmente. Per tale motivo il software offre un set di valori predefinito che risulta essere funzionale quando si utilizza il modello per valutazioni comparative, scopo principale per cui l'applicativo *Hydro* è stato progettato. Tra questi, si sottolineano le variabili i cui valori potrebbero essere modificati, ovvero l'accumulo di acqua nelle depressioni permeabili (quali depressioni in giardini o causate dalla presenza di alberi, aree di terreno compattato ecc.) e impermeabili (quali buche, cordoli stradali bloccati da detriti, ecc.). Il modello assume che tali profondità siano riempite prima che inizi la generazione di deflusso e il loro range di variazione è pari a 0.1-7.5mm. Nel caso in esame si mantengono i valori di default impostati dal programma pari a 1.0 mm.

L'ultimo set di parametri definibile nello Step 3 comprende i valori attribuiti ai coefficienti di concentrazione degli inquinanti impiegati nella stima della qualità delle acque superficiali (Sottoparagrafo 5.2.3). Tali valori sono impostati di default dal programma e fanno riferimento ai valori di concentrazione media di eventi (EMC) definiti per il territorio statunitense che, moltiplicati per il quantitativo di deflusso superficiale stimato dal programma, forniscono il carico di inquinanti trasportato dalle acque di ruscellamento che raggiunge i corsi d'acqua e le reti di drenaggio urbano. Anche in questo caso i parametri possono essere mantenuti di default oppure modificati dall'utente; per il caso studio analizzato, non disponendo di valori specifici, si è optato per mantenere i valori di default suggeriti dal programma riportati in Tabella 6.4.

Tabella 6.4 Valori di concentrazione media di eventi attribuiti ai dieci inquinanti di cui Hydro valuta il carico nelle acque superficiali

Tipologia di inquinante	Mediana	Media
Solidi sospesi totali (TSS)	54.500	78.400
Domanda biochimica di ossigneo (BOD)	11.500	14.100
Domanda chimica di ossigeno (COD)	44.700	52.800
Fosforo totale	0.259	0.315
Fosforo solubile	0.103	0.129
Total Kjeldhal Nitrogen (TKN)	1.470	1.730
Nitriti e nitrati	0.533	0.658
Rame	0.011	0.014
Piombo	0.051	0.068
Zinco	0.129	0.162

I paragrafi successivi sono dedicati all'analisi di scenari alternativi rispetto alla condizione attuale del parco e al commento dei risultati che emergono da tali confronti. Nello specifico, questa parte di lavoro ha un duplice obiettivo: in primo luogo quello di porre evidenza le potenzialità dell'applicativo nel confrontare diversi scenari di copertura del suolo quantificando in funzione di questi le variazioni apportate nei deflussi idrici, e, secondariamente, quello di testare la sensibilità del software alla variazione dei dati climatici di input esaminando le modifiche che si generano negli output.

### 6.3.2 Impermeabilizzazione del suolo

In merito all'utilizzo di *i-Tree Hydro* come strumento per valutare l'incidenza delle coperture impermeabili sui deflussi, sono stati ipotizzati tre scenari alternativi che prendono in considerazione una progressiva trasformazione dell'area permeabile, attualmente costituente il parco, in copertura impermeabile. Questa analisi ha l'obiettivo di sottolineare l'importante scelta effettuata dalla Regione Piemonte nel 1984 nel sottrarre questa porzione di territorio ai processi di cementificazione e di edificazione degli anni Settanta conservandola come area verde.

I tre scenari di confronto rispetto alla situazione attuale, identificata nell'analisi come Caso Base, sono i seguenti:

- S1: incremento del 25% della copertura impermeabile;
- S2: incremento del 50% della copertura impermeabile;
- S3: incremento del 75% della copertura impermeabile.

Il 25% di tali percentuali è stato sottratto alla copertura arborea su suolo permeabile (*Pervious under Tree Cover*), mentre la restante parte dalla classe erbacea (*Herbaceous*) ipotizzando che la rimozione di suolo permeabile comporti anche una rimozione di parte della vegetazione arborea presente su di esso. Le percentuali di copertura arborea su suolo impermeabile (*Impervious under Tree Cover*) e la classe suolo nudo (*Bare soil*) sono state mantenute invariate, mentre le percentuali di copertura relative agli arbusti (*Shrub*) e alle superfici a pelo libero (*Water*) sono state conservate nulle.

L'incremento di superficie impermeabile comporta una variazione della DCIA, mentre l'indice di area fogliare (LAI) rimane costante in quanto diminuisce proporzionalmente sia il valore di superficie fogliare che quello di copertura arborea. Il valore di DCIA è stato ricalcolato per i tre nuovi scenari assumendo la medesime equazioni utilizzate per il Caso Base.

Si riportano in Tabella 6.5 le nuove percentuali di copertura del suolo inserite nello Step 2 per i tre scenari analizzati e i relativi valori di DCIA e LAI.

Tabella 6.5 Distribuzione delle coperture del terreno per i tre casi alternativi ipotizzati e rispettivi valori di DCIA e LAI

	Caso base	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Tree Canopy (%)	35.54	29.29	23.04	16.79
Pervious under TC (%)	33.92	27.67	21.42	15.17
Impervious under TC (%)	1.62	1.62	1.62	1.62
Shrub Canopy (%)	0.00	0.00	0.00	0.00
Herbaceous (%)	57.15	38.40	19.65	0.90
Water (%)	0.00	0.00	0.00	0.00
Impervious (%)	3.77	28.77	53.77	78.77
Bare soil (%)	3.54	3.54	3.54	3.54
DCIA (%)	10.13	42.00	65.08	85.02
Tree Leaf Area	1.74	1.74	1.74	1.74

La discussione dei risultati prodotti da questi confronti viene articolata in funzione della classificazione che l'applicativo effettua di questi ultimi, ovvero in termini di quantitativi di acqua prodotti dal territorio oggetto di analisi (*Water quality*), di idrologia della vegetazione e del terreno, questi ultimi catalogati come "*Advanced Output*", e di qualità delle acque superficiali (*Water quality*).

#### Water quantity

In termini di quantitativi di deflussi originati dal parco "Le Vallere" si riporta un primo istogramma di confronto tra il Caso Base, rappresentato dalla configurazione attuale del parco, e i tre scenari alternativi ipotizzati (S1, S2, e S3) (Figura 6.24).

Il grafico evidenzia i flussi totali (*Total flow*) generati dalle precipitazioni cadute durante l'anno 2019, suddivisi in flusso di base (*Base flow*), ovvero quantitativi di acqua che alimentano la falda idrica, e flussi superficiali distinti in flussi su suolo permeabile (*Pervious flow*) e impermeabile (*Impervious flow*).

In prima analisi si evincono quantitativi relativi al *Base flow* nettamente inferiori rispetto ai deflussi superficiali spiegabili considerando la caratteristica che contraddistingue il flusso di base di risposta lenta del bacino. Essi decrescono di circa 225 m<sup>3</sup>·anno<sup>-1</sup> al crescere della copertura impermeabile.

Per quanto riguarda invece i deflussi superficiali nella componente *pervious*, questi evidentemente si riducono

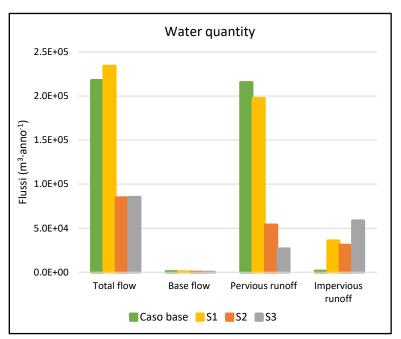


Figura 6.24 Istogrammi di confronto tra il Caso Base e gli scenari alternativi ipotizzati (S1, S2, S3) relativi ai quantitativi totali di deflussi generati dal parco "Le Vallere" (Total flow), al flusso di base (Base flow) e ai deflussi superficiali su suolo permeabile (Pervious runoff) e impermeabile (Impervious runoff)

all'aumentare dell'impermeabilizzazione del suolo e, viceversa, incrementano nella componente Impervious. In questi termini si vuole sottolineare l'importanza del parco "Le Vallere" come area permeabile evidenziando come, nel caso attuale, i quantitativi dei deflussi idrici prodotti dalle superfici impermeabili (3.8%) siano praticamente trascurabili (1517 m³-anno-¹), mentre incrementano di circa 127 volte nel caso limite di copertura impermeabile del parco aumentata del 75%.

Tale aspetto è evidenziabile prendendo in considerazione l'evento meteorico più critico registrato nel 2019, manifestato tra il 15 e il 17 luglio. In questo arco temporale, le precipitazioni hanno prodotto una caduta al suolo di 103 mm di acqua comportando un brusco innalzamento dei picchi di portata generati dal parco (Figura 6.25). Il flusso che si discosta dagli altri in maniera più evidente è l'*impervious runoff* che risulta sostanzialmente nullo nel Caso Base (10 m³·h¹-1), mentre raggiunge il picco di 1300 m³·h¹-1 nel caso di suolo impermeabilizzato al 75%.

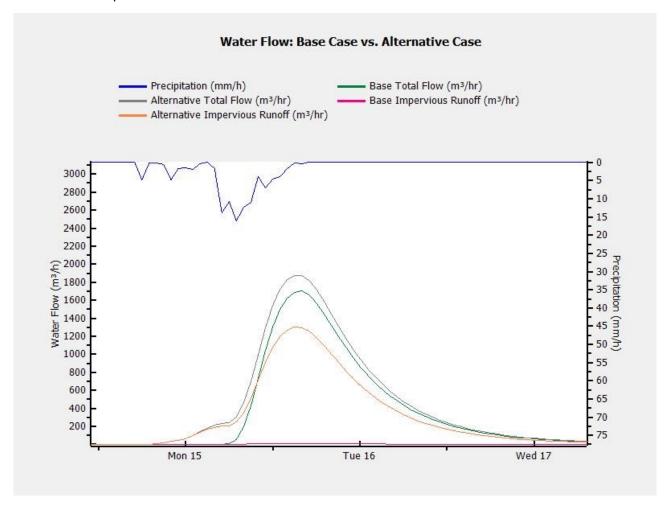


Figura 6.25 Picco di portata generato dal parco "Le Vallere" inerente l'evento meteorico avvenuto tra il 15 e il 17 luglio 2019

L'esempio sottolinea l'importante ruolo del parco in termini di area permeabile, specialmente se si considera la sua rilevanza in termini di area golenale. La presenza di superficie permeabile riduce, infatti, di circa  $50\cdot10^3$  m<sup>3</sup>·anno<sup>-1</sup> i deflussi totali generati dall'area rispetto allo scenario S3, valori che, seppur minimi rispetto alle portate di piena cui è soggetto il territorio per esondazione del fiume Po, non vanno a gravare su questi ultimi.

#### Advanced output: Idrologia della vegetazione e del territorio

Queste due categorie di risultati sono frutto di un bilancio idrico eseguito dalle sub-routine che compongono il modello di *Hydro* (Sottoparagrafo 5.3.3) a livello di albero e di terreno presente sotto la chioma della pianta.

L'idrologia della vegetazione contempla tutti quei processi che impediscono la formazione di deflusso superficiale all'inizio dell'evento meteorico, ovvero l'intercettazione e l'accumulo da parte della copertura fogliare, identificati nel software rispettivamente come "Interception by Vegetation" e "Storage on Vegetation Surface", l'evaporazione dall'apparato fogliare della pianta (Evaporation from Vegetation) e la caduta dell'acqua sul terreno una volta raggiunta la capacità massima di immagazzinamento della chioma (Throughfall from Vegetation).

Al fine di focalizzare l'attenzione sulle relazioni che intercorrono tra queste variabili e le precipitazioni e all'interno delle variabili stesse, si espongono in un primo momento i risultati relativi al Caso Base e, successivamente, si effettuano considerazioni sui confronti tra questo e gli scenari alternativi ipotizzati.

Gli istogrammi riportati nelle figure sottostanti (Figura 6.26, Figura 6.27, Figura 6.28, Figura 6.29) mostrano l'andamento dei deflussi mensili nelle variabili considerate, rapportati ai quantitativi di precipitazione cumulati su base mensile per il Caso Base (grafico lineare).

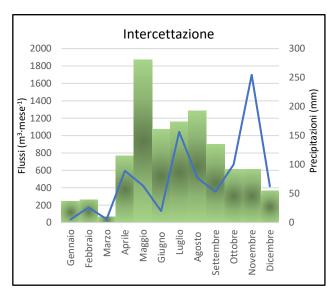


Figura 6.26 Andamento dei quantitativi di acqua intercettati dalla vegetazione (istogramma) e precipitazioni cumulate su base mensile (grafico lineare) relative al Caso Base e all'anno 2019

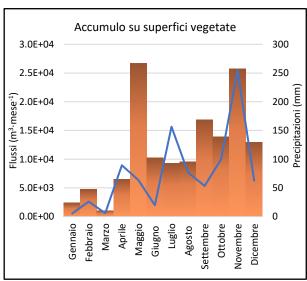
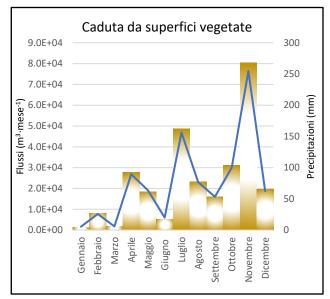


Figura 6.27 Andamento dei quantitativi di acqua accumulati sulle superfici vegetate (istogramma) e precipitazioni cumulate su base mensile (grafico lineare) relative al Caso Base e all'anno 2019



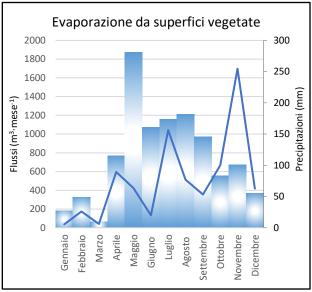


Figura 6.28 Andamento dei quantitativi di acqua caduti Figura 6.29 Andamento dei quantitativi di acqua evaporati dalle superfici vegetate (istogramma) e precipitazioni dalle superfici vegetate (istogramma) e precipitazioni cumulate su base mensile (grafico lineare) relative al Caso cumulate su base mensile (grafico lineare) relative al Caso Base e all'anno 2019

Base e all'anno 2019

Per quanto riguarda l'andamento dei flussi intercettati dalla copertura fogliare (Figura 6.26) si esaminano i mesi di ottobre e di novembre i quali mostrano valori di flussi simili a fronte di valori di precipitazioni doppi. Questo fenomeno può essere spiegato analizzando delle la distribuzione precipitazioni nei due mesi considerati (Figura 6.30) in cui si osserva che il mese di ottobre presenta esclusivamente due eventi meteorici significativi, mentre il mese di novembre è contraddistinto da un numero di giorni di pioggia più elevato e da eventi di intensità e durata maggiore.

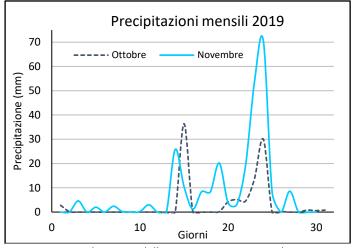


Figura 6.30 Andamento delle precipitazioni giornaliere registrate nei mesi di ottobre e novembre (2019) dalla stazione meteorologica di "Torino Vallere"

Tale diversità di distribuzione di precipitazione all'interno dei due mesi considerati può spiegare l'apparente assenza di relazioni tra il flusso di intercettazione e i valori di precipitazione cumulata mensile.

Le caratteristiche delle precipitazioni di novembre determinano per questo mese un raggiungimento della capacità di accumulo da parte della copertura fogliare precoce rispetto al mese di ottobre (Figura 6.27) con conseguente caduta al suolo di un maggior quantitativo di acqua (Figura 6.28). I processi di evaporazione che interessano le superfici vegetate (Figura 6.29) influiscono sui quantitativi analizzati; questi, infatti, dipendendo dalle condizioni climatiche, risultano limitati nei mesi autunnali e per tale motivo apportano un contributo poco significativo nella non formazione di deflussi superficiali.

Per contro, i mesi di febbraio e di giugno sono caratterizzati da valori di precipitazioni confrontabili, rispettivamente di 26 mm e 20 mm, mentre i flussi intercettati mostrano differenze significative (264 m³·mese¹ il primo e 1075 m³·mese¹ il secondo) (Figura 6.26). Tali risultati possono essere spiegati considerando il periodo vegetativo degli individui arborei e, nella fattispecie, riprendendo la percentuale di specie sempreverdi inserita come input nello step relativo ai dati di copertura del suolo, assunta pari al 10%. Risulta evidente che la presenza di piante caducifoglie implica una minore intercettazione di precipitazione nei mesi invernali a fronte di quantitativi superiori registrati nei mesi estivi; ne sono un esempio il mese di giugno, ma anche il mese di maggio il cui picco può trovare per l'appunto spiegazione nei cicli vegetativi delle piante.

Questi due mesi vengono presi in considerazione per osservare anche la relazione che intercorre tra i quantitativi di acqua caduti al suolo (Figura 6.28) e l'evaporazione dalle superfici fogliari (Figura 6.29). I primi risultano simili benché si evidenzi che i quantitativi accumulati sulla superficie fogliare sono differenti; la congruenza tra i valori può allora essere motivata analizzando il grafico relativo all'evaporazione dalle superfici vegetate che per il mese di giugno risulta essere nettamente superiore rispetto al mese di febbraio. Questo è dovuto molto probabilmente alle diverse condizioni climatiche caratterizzanti i due mesi e, nello specifico, a temperature dell'aria e a valori di radiazione solare superiori nel primo rispetto al secondo.

A fronte di quanto esposto, si evidenzia una forte correlazione sia tra le variabili stesse che tra queste e gli eventi di precipitazione.

Le considerazioni effettuate sul Caso Base possono essere estese agli scenari alternativi in quanto i risultati forniti da *Hydro* relativi all'idrologia della vegetazione evidenziano per questi una riduzione dei flussi proporzionale alla riduzione di superficie permeabile, analogamente a quanto riportato nel *Water Quantity*.

In termini di **idrologia del terreno**, il programma fa riferimento ai quantitativi che giungono al suolo per superamento della capacità massima di accumulo della copertura fogliare; di questi una quota parte infiltra nel terreno costituendo il deflusso sub-superficiale (*Infiltration into Subsurface Zones*) e una parte evapo-traspira dall'apparato radicale delle piante (*Evapotranspiration from Root Zone*).

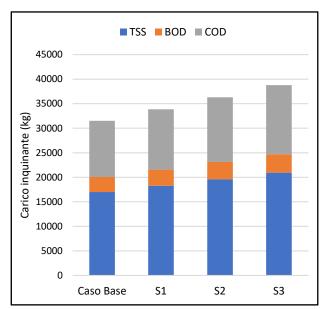
Il confronto condotto tra il Caso Base e gli scenari alternativi (S1, S2 e S3), che contemplano un incremento progressivo della copertura impermeabile (25%, 50% e 75%), riporta una diminuzione sia dei quantitativi che infiltrano nel terreno sia di quelli che evapo-traspirano a livello di apparato radicale. Entrambi decrescono in maniera costante al ridursi della copertura permeabile e, nello specifico, i primi diminuiscono di circa  $18\cdot10^3$  m³·anno¹, mente i secondi di  $16\cdot10^3$  m³·anno¹.

Le valutazioni fino ad ora condotte evidenziano per tutte le componenti dei flussi analizzate una riduzione proporzionale all'incremento di impermeabilizzazione del suolo e sottolineano come la presenza di aree verdi all'interno di un contesto urbano rappresenti un efficace strumento nella mitigazione dei rischi derivanti dal sovraccarico del sistema di drenaggio urbano e di incremento delle portate dei corpi idrici.

#### Water quality

Questa tipologia di output consente di valutare le concentrazioni degli inquinanti presenti nelle acque di deflusso generate dall'area oggetto di analisi. Tale aspetto è mostrato in Figura 6.31 e Figura 6.32 dove gli istogrammi di confronto tra il Caso Base e gli scenari alternativi evidenziano un incremento del carico inquinante proporzionale all'aumento di impermeabilizzazione del suolo (ad esempio, la variazione di TSS tra caso base e S3 è pari a 4000 kg).

Nello specifico, si osserva una presenza significativa di materiale solido sospeso (TSS) e di sostanze organiche (BOD e COD) (Figura 6.31), mentre le altre tipologie di inquinanti (Figura 6.32) risultano nettamente più diluite.



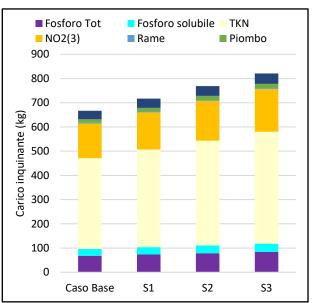


Figura 6.31 Concentrazione di TSS, BOD e COD per il Caso Figura 6.32 Concentrazione di fosforo totale e solubile, Base e gli scenari S1, S2 e S3

TKN, nitriti e nitrati (NO2(3)), rame, piombo e zinco per il Caso Base e per gli scenari S1, S2 e S3

Anche questa tipologia di output rimarca l'importanza del parco in termini di area permeabile, fondamentale nella mitigazione dei flussi superficiali e, di conseguenza, del carico di inquinanti trasportato verso i corsi d'acqua e le reti di drenaggio urbano.

#### 6.3.3 Scenari futuri

La sensibilità del software alla variazione dei dati meteorologici di input viene valutata ipotizzando uno scenario futuro in cui si contemplano i cambiamenti climatici in atto. Nello specifico, si focalizza l'attenzione su due degli indicatori evidenziati dall'IPCC come maggiormente significativi per le proiezioni future del clima nell'area mediterranea, ovvero l'innalzamento delle temperature e la riduzione delle precipitazioni annuali (Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, 2017).

L'obiettivo della presente analisi è dunque quello di simulare l'andamento delle temperature e delle precipitazioni di un ipotetico anno compreso nel trentennio 2071 – 2100, assunto come periodo temporale di riferimento delle simulazioni, secondo i due scenari di emissione RCP4.5 e RCP8.5.

Il lavoro è condotto assumendo come riferimento i dati riportati nel Rapporto ISPRA "Il clima futuro in Italia: analisi delle proiezioni dei modelli regionali" (2015) relativi al contesto nazionale e quelli presenti nel Rapporto sul clima elaborato da ARPA Piemonte "Città di Torino, Assessment climatico e scenari futuri" (2018) relativi al contesto torinese.

Si osserva che trattandosi di previsioni future lo studio dovrebbe contemplare i risultati forniti da più modelli climatici conducendo la trattazione da un punto di vista probabilistico. Tuttavia, poiché l'obiettivo non è quello di definire con precisione assoluta une serie di dati di temperatura e di precipitazione che presumibilmente si verificherà tra il 2071 e il 2100, bensì quello di testare la suscettibilità del software alla variazione dei dati di input e analizzare in termini qualitativi in quali componenti dei deflussi urbani tali variazioni sono più significative, si procede facendo riferimento alle informazioni riportate nei due Rapporti sopra citati.

#### Variazione delle temperature

Le proiezioni future sulla temperatura sono state valutate prendendo in considerazione gli incrementi di temperatura media stagionale (media nazionale) riferiti al periodo temporale 2071-2100 rispetto al trentennio 1971-2000 riportati nel Rapporto ISPRA (Il clima futuro in Italia: analisi delle proiezioni dei modelli regionali, 2015). Tali valori, di valenza nazionale, sono stati ricondotti al contesto torinese assumendo un incremento della temperatura media per il trentennio considerato pari a +3.3°C per lo scenario RCP4.5 e +6°C per lo scenario RCP8.5 (Città di Torino, Assessment climatico e scenari futuri, 2018).

Più nello specifico, in funzione dell'incremento delle temperature medie nazionali, stagionali e annue, previsto per il trentennio 2071 – 2100, si è calcolata la tendenza futura stagionale per la città di Torino nota la previsione sulla temperatura media annua.

Si riportano in Tabella 6.6 i valori di temperatura media nazionale previsti per il trentennio 2071 – 2100 a cui si è fatto riferimento per la stima delle medie stagionali future relative alla città di Torino.

Tabella 6.6 Incrementi di temperatura previsti per il trentennio 2071 - 2100 (riferiti al periodo 1971 – 2000) relativi al contesto nazionale e torinese

TEMPERATURA MEDIA STAGIONALE – RCP4.5					
	Contesto nazionale	Contesto torinese			
	Incremento previsto nel trentennio	Incremento previsto nel trentennio			
	2071 -2100	2071 - 2100			
Inverno	+2.20	+2.93			
Primavera	+2.10	+2.80			
Estate	+3.10	+4.13			
Autunno	+2.50	+3.33			
Media +2.47		+3.30			
	TEMPERATURA MEDIA STAGIONALE –	RCP8.5			
	Incremento previsto nel trentennio	Incremento previsto nel trentennio			
	2071 -2100	2071 -2100			
Inverno	+4.00	+5.39			
Primavera	+3.80	+5.12			
Estate	+5.60	+7.55			
Autunno	+4.40	+5.93			
Media	+4.45	+6.00			

I valori riportati in Tabella 6.6 evidenziano per la città di Torino una tendenza positiva della temperatura con un incremento più marcato nei mesi estivi e autunnali.

Sulla base di tali previsioni, è stato possibile creare una serie oraria delle temperature ipotizzata per il trentennio 2071 – 2100 e relativa al contesto oggetto di studio. Nello specifico, i valori orari della serie relativa al 2019, utilizzata come dato di input per le precedenti simulazioni, sono stati incrementati dei quantitativi ottenuti per i rispettivi periodi stagionali riferiti al contesto torinese. Accorpando i dati orari su base mensile (Tabella 6.7), è possibile confrontare l'andamento delle temperature registrate nel 2019 con quello ipotizzato per il periodo di riferimento futuro secondo i due scenari di emissione considerati (RCP4.5 e RCP8.5) (Figura 6.33).

Tabella 6.7 Confronto tra le medie mensili relative all'anno 2019 e quelle stimate per un ipotetico anno compreso nel trentennio 2071 – 2100 per gli scenari di emissione RCP4.5 e RCP8.5

TEMPERATURA MEDIA MENSILE						
Mese	2019	2100 - RCP 4.5	2100 - RCP 8.5			
Gennaio	1.74	4.67	7.13			
Febbraio	5.04	7.97	10.43			
Marzo	10.77	13.57	15.89			
Aprile	12.60	15.40	17.72			
Maggio	15.45	18.25	20.57			
Giugno	23.26	27.39	30.81			
Luglio	25.17	28.50	32.72			
Agosto	23.75	27.05	31.30			
Settembre	19.02	22.35	24.95			
Ottobre	14.79	18.12	20.72			
Novembre	8.09	11.43	14.03			
Dicembre	5.46	8.39	10.85			

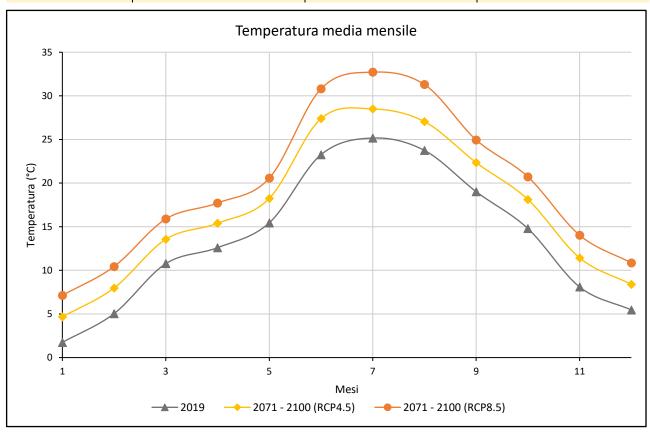


Figura 6.33 Confronto tra l'andamento della temperatura media registrata nel 2019 e il periodo temporale considerato (2071 - 2100) per gli scenari emissivi RCP4.5 e RCP8.5

#### Variazione delle precipitazioni

Le proiezioni future sulle precipitazioni per la città di Torino sono state effettuate considerando i valori totali annui e cumulati su base mensile previsti per il trentennio 2071 – 2100, riportati nel Rapporto sul clima redatto da ARPA Piemonte (Città di Torino, Assessment climatico e scenari futuri, 2018), relativi ad entrambi gli scenari RCP valutati.

La simulazione ha contemplato, oltre ad una riduzione delle precipitazioni totali annue, anche una diminuzione del numero di giorni di pioggia<sup>27</sup> le cui previsioni future sono anch'esse riportate nel Rapporto sul clima redatto da ARPA Piemonte (Città di Torino, Assessment climatico e scenari futuri, 2018).

Si sintetizzano in Tabella 6.8 i valori stimati di questi due parametri per il periodo temporale considerato a cui si è fatto riferimento per ricavare l'andamento delle precipitazioni future relative al contesto torinese.

Tabella 6.8 Valori di precipitazione e giorni di pioggia registrati dalla stazione meteorologica "Torino Vallere" per l'anno 2019 e previsti per il trentennio 2071 - 2100 secondo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 [Fonte: Città di Torino, Assessment climatico e scenari futuri, 2018]

Precipitazioni annue (mm)					
2019	2071 – 2100 (RCP4.5)	2071 - 2100 (RCP8.5)			
914.5	900	774			
	Giorni di pioggia				
2019	2071 – 2100 (RCP4.5)	2071 - 2100 (RCP8.5)			
79	-12	-26			

In funzione di queste due variabili si è proceduto secondo la seguente metodologia:

- si raggruppano su base giornaliera i dati delle precipitazioni orarie registrate dalla stazione meteorologica "Torino Vallere" per l'anno 2019;
- in funzione dei valori giornalieri, si riduce il numero di giorni di pioggia secondo quanto sintetizzato in Tabella 6.8. La scelta dei giorni da eliminare, il cui quantitativo di precipitazione è stato posto pari a zero, è stata casuale purché il quantitativo di pioggia per il giorno individuato risultasse minore di 5 mm ( $P \le 5$  mm). Il fatto di annullare giorni di pioggia caratterizzati da  $1 \le P \le 5$  mm prende in considerazione un ulteriore aspetto previsto dalle proiezioni future, ovvero la tendenza degli eventi meteorici ad incrementare di intensità;
- si procede sommando i valori di precipitazioni relativi al "nuovo anno 2019" caratterizzato da un numero di giorni di pioggia inferiore rispetto alla serie di dati registrata dalla stazione meteorologica;
- poiché il valore di precipitazione annua registrato per il 2019, pari a 914.5 mm, deve essere mantenuto invariato, si ripartiscono i quantitativi di pioggia sottratti sui giorni rimanenti incrementandone il valore di un indice pari a  $i_{2019} = \frac{P\ annue\ 2019\ (=914.5\ mm)}{P\ annue\ "nuovo\ 2019"}$ .

-

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Si definiscono convenzionalmente giorni di pioggia quei giorni in cui il pluviometro registra un valore di precipitazione maggiore di 1 mm nelle 24 ore.

Questi passaggi conducono ad una nuova serie di dati giornalieri relativa all'anno 2019 modificata rispetto a quella realmente registrata in funzione della riduzione del numero di pioggia previsti per il trentennio 2071 – 2100 e per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5.

A questo punto, sulla base dei valori mensili di precipitazione stimati per il trentennio 2071 – 2100, riportati sul Rapporto sul clima redatto da ARPA Piemonte (Città di Torino, Assessment climatico e scenari futuri, 2018) ed elencati in Tabella 6.9, si procede creando una serie di dati di precipitazione ipotetica per lo scenario futuro analizzato.

Tabella 6.9 Valori di precipitazione mensili registrati dalla stazione meteorologica "Torino Vallere" per l'anno 2019 e previsti per il trentennio 2071 - 2100 secondo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 [Fonte: Città di Torino, Assessment climatico e scenari futuri, 2018]

Precipitazioni mensili					
	2019	2071 – 2100 (RCP4.5)	2071 - 2100 (RCP8.5)		
Gennaio	5.40	44.00	58.00		
Febbraio	26.00	46.00	45.00		
Marzo	6.00	84.00	77.00		
Aprile	89.40	108.00	93.00		
Maggio	63.60	134.00	109.00		
Giugno	20.00	63.00	43.00		
Luglio	156.40	34.00	13.00		
Agosto	77.00	54.00	26.00		
Settembre	53.30	88.00	56.00		
Ottobre	100.00	101.00	106.00		
Novembre	254.80	101.00	87.00		
Dicembre	62.60	43.00	61.00		

In funzione di tali valori si procede come segue:

- si raggruppano su base mensile le precipitazioni giornaliere relative al "nuovo anno 2019";
- per ogni mese si crea di un nuovo indice con lo scopo di ridurre proporzionalmente le precipitazioni sulla base sia dei valori mensili relativi al "nuovo 2019" sia di quelli stimati per il futuro,  $i_{i\_esimo\ mese}(2071-2100) = \frac{P\ (i\_esimo\ mese)\ 2071-2100}{P\ (i\_esimo\ mese)\ "nuovo\ 2019"};$
- si moltiplicano gli indici i-esimi mensili per tutti i giorni di pioggia appartenenti al mese i-esimo.

Questo metodo conduce ad una nuova serie di dati pluviometrici giornalieri relativa al periodo 2071 – 2100 la cui ripartizione su base oraria è stata eseguita mediante semplici proporzioni tra i valori orari registrati nel 2019, il loro valore cumulato su base giornaliera e il valore giornaliero previsto per il 2100. Noti i valori orari, è possibile visualizzare il pluviogramma di un ipotetico anno futuro compreso nel trentennio considerato relativo al territorio oggetto di analisi. A titolo esemplificativo si riporta in Figura 6.34 il confronto tra l'andamento delle precipitazioni registrate nel 2019 dalla stazione meteorologica "Torino Vallere" e quello ipotizzato per il trentennio 2071 – 2100 secondo lo scenario RCP8.5 dal quale emerge chiaramente la forte dipendenza tra i valori registrati nel 2019 e quelli ipotizzati per il 2071 – 2100 evidenziando il carattere estremamente probabilistico dell'analisi e sottolineando l'estrema dipendenza del pluviogramma futuro dal procedimento messo in atto, frutto di un lavoro approfondito di ricerca.

Si ribadisce, infatti, che l'obiettivo di queste simulazioni non tanto è la previsione di serie di dati di temperatura e precipitazione che ipoteticamente potrebbero verificarsi nel periodo temporale 2071 - 2100, quanto più quello di valutare la sensibilità dell'applicativo *Hydro* alla variazione dei dati di input e le correlazioni che sussistono tra gli output.

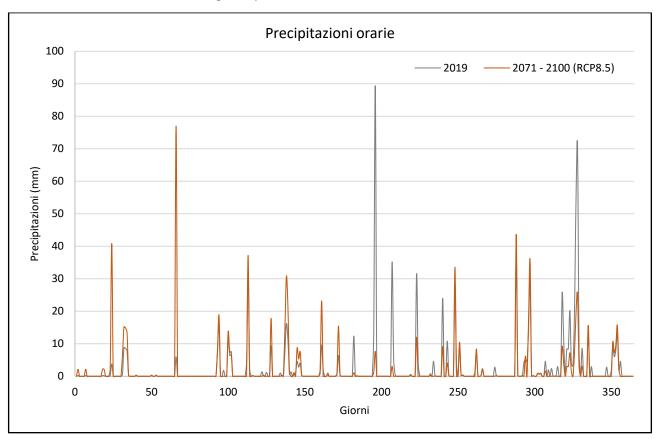


Figura 6.34 Confronto tra il pluviogramma relativo al 2019 e quello ricavato dalla elaborazione dei dati inerenti l'intervallo temporale 2071 – 2100 e previsti dallo scenario RCP8.5

Le due serie di dati di temperatura e di precipitazione ottenute dalle elaborazioni sopra esposte vengono inserite all'interno del software in maniera analoga a quanto visto nel Sottoparagrafo 6.3.1 relativamente all'inserimento di dati processati. I parametri richiesti in input allo Step 2, relativi alle coperture del suolo, vengono mantenuti inalterati in quanto lo scopo della presente analisi è la valutazione della sensibilità del software alle variazioni dei parametri climatici; nello Step 3 si sottolinea la variazione del valore attribuito alla portata media annua fluente dalla porzione di territorio esaminato  $(q_0)$  rispetto alla variazione dell'intensità di precipitazione nei due scenari RCP analizzati. Nello specifico, le simulazioni condotte per il trentennio 2071 – 2100 considerano un valore di  $q_0$  pari a 9.821·10<sup>-3</sup> m³·s<sup>-1</sup> e 8.446·10<sup>-3</sup> m³·s<sup>-1</sup> rispettivamente per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 a fronte di un valore pari a 9.986·10<sup>-3</sup> m³·s<sup>-1</sup> per il 2019.

La discussione dei risultati prende in considerazione una variazione contemporanea sia delle temperature che delle precipitazioni, assumendo che il cambiamento climatico nel futuro abbia conseguenze su entrambe. Si precisa, tuttavia, che l'analisi è anche stata condotta valutando separatamente le due variabili e ha riportato che le variazioni di temperatura previste per gli scenari futuri non producono cambiamenti sostanziali nei deflussi generati dall'area oggetto di studio, mentre più significativa risulta essere la loro variabilità in funzione delle precipitazioni.

Analogamente a quanto effettuato per l'analisi dei risultati relativi allo scenario precedente (Sottoparagrafo 6.3.2), la discussione degli output prodotti dalle simulazioni appena condotte viene articolata in funzione della classificazione che l'applicativo effettua di questi ultimi, ovvero in termini di *Water quality*, *Advanced Output* e *Water quality*.

#### Water quantity

Dal punto di vista dei quantitativi di deflussi originati dal parco "Le Vallere" stimati per lo scenario futuro 2071 – 2100, si riporta una tabella di confronto tra il Caso Base, rappresentante le condizioni meteorologiche che sussistono attualmente sul territorio oggetto di studio e gli scenari alternativi contemplanti l'incremento delle temperature e la riduzione sia del numero di giorni di pioggia che dei quantitativi totali annui di precipitazione (Tabella 6.10).

Tabella 6.10 Confronto tra i flussi generati dal parco "Le Vallere" nell'anno 2019 in termini totali (Total flow), relativi al flusso di base (Base flow) e ai deflussi superficiali su suolo permeabile (Pervious runoff) e impermeabile (Impervious runoff) e quelli stimati per il trentennio 2071 – 2100 secondo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5; variazione delle quantità ( $\Delta$ ) rispetto al Caso Base (2019)

Deflussi idrici						
	2019	2019 2071 – 2100 RCP4.5		2071 – 2100 RCP8.5		
	Totali annui Totali annui Δ Tota			Totali annui	Δ	
Precipitazioni (mm)	914.50	900.00	14.50	774.00	140.50	
Total flow (m <sup>3</sup> ·anno <sup>-1</sup> )	217763.21	210267.33	7495.88	183280.91	34482.30	
Base flow (m <sup>3</sup> ·anno <sup>-1</sup> )	852.46	852.47	0.00	852.46	0.00	
Pervious runoff (m <sup>3</sup> ·anno <sup>-1</sup> )	215357.41	207889.85	7467.56	181115.57	34241.84	
Impervious runoff (m <sup>3</sup> ·anno <sup>-1</sup> )	1517.40	1489.65	27.75	1282.47	234.93	

I risultati mostrati in Tabella 6.10 evidenziano una diminuzione dei quantitativi totali dei flussi al diminuire delle precipitazioni, con una riduzione più marcata per lo scenario RCP8.5 caratterizzato effettivamente da valori di precipitazione annui minori. Si osserva, inoltre, che tale riduzione avviene sostanzialmente nei deflussi su copertura permeabile in quanto la variazione del flusso di base è praticamente nulla e quella relativa ai deflussi su suolo impermeabile trascurabile. Questo aspetto trova spiegazione nelle percentuali di copertura del suolo che caratterizzano la configurazione attuale del parco, ovvero una elevata percentuale di copertura permeabile ( $\cong 93\%$ ) a fronte di un esiguo valore di suolo impermeabile/nudo ( $\cong 7\%$ ).

### Advanced output: Idrologia della vegetazione e del territorio

I risultati relativi alla sezione Idrologia della vegetazione ottenuti dalle simulazioni condotte con *Hydro* per i due scenari di emissione considerati, RCP4.5 e RCP8.5 sono riportati in Figura 6.35.

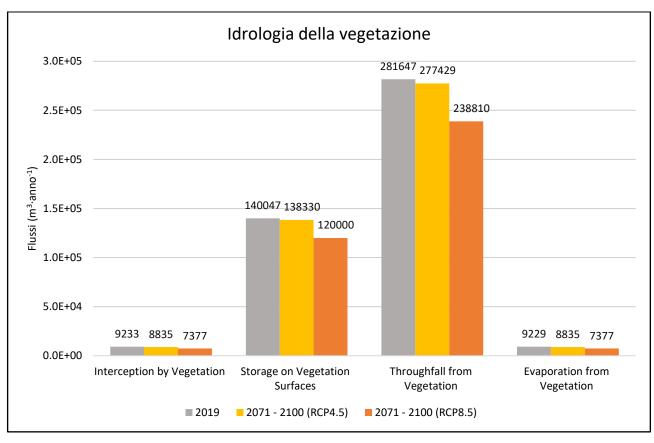


Figura 6.35 Andamento dei deflussi intercettati (Interception by vegetation), stoccati (Storage on vegetation surfaces), caduti (Throughtfall from vegetation) ed evaporati (Evaporation from vegetation) dalle superfici vegetate relativi al 2019 e agli scenari futuri analizzati (RCP4.5 e RCP8.5) per il trentennio 2071 – 2100

Analizzando gli istogrammi relativi allo scenario RCP4.5, si evidenzia un andamento dei quantitativi dei flussi circa pari a quello attuale ad eccezione della variabile relativa alla caduta di acqua dalle superfici vegetate che evidenzia una lieve riduzione rispetto al Caso Base.

Gli andamenti delle variabili pressoché costanti trovano spiegazione nei valori annui delle precipitazioni considerate, ovvero 914.5 mm registrati durante l'anno 2019 e 900 mm previsti per il trentennio 2071 – 2100. Questo aspetto mostra, da una parte, quanto le precipitazioni registrate dalla stazione meteorologica "Torino Vallere" nel 2019 siano attualmente già confrontabili con i valori previsti nel futuro, dall'altra, che essendo il delta di variazione relativamente piccolo, i cambiamenti apportati nei flussi sono altrettanto contenuti.

I quantitativi di acqua caduti dalle superfici vegetate, invece, subiscono una lieve riduzione interpretabile considerando il fatto che a parità di deflussi, una maggiore evaporazione implica il trasferimento di quota parte dell'acqua intercettata dalle chiome degli alberi in atmosfera e, quindi, minori quantitativi caduti dalla vegetazione.

Questo aspetto si ripercuote sul bilancio idrico a livello del terreno posto sotto la chioma degli alberi il cui andamento è riportato in Figura 6.36.

I minori quantitativi di acqua caduta dalle chiome degli alberi implicano un ritardo nella saturazione del suolo e, di conseguenza, consentono il manifestarsi processi di infiltrazione e di evaporazione dall'apparato radicale per un tempo più prolungato, determinando differenze positive rispetto al caso base. Questo aspetto motiva anche riduzione dei deflussi superficiali (Tabella 6.10) che risulta indotta sia da un minor quantitativo di pioggia totale prevista per il trentennio 2071 – 2100 sia da una maggiore infiltrazione evaporazione di acqua dal terreno.

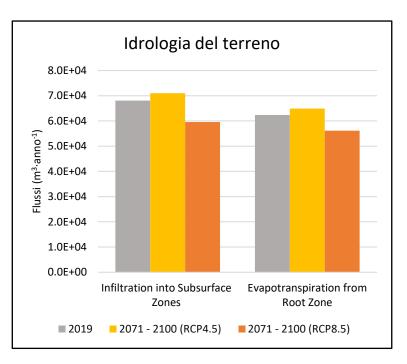


Figura 6.36 Andamento dei deflussi infiltrati nel sottosuolo (Infiltration into subsurface zones) ed evapo-traspirati dall'apparato radicale della vegetazione (Evapotranspiration from root zone) relativi al 2019 e agli scenari futuri analizzati (RCP4.5 e RCP8.5) per il trentennio 2071 – 2100

Lo scenario RCP8.5 evidenzia una sostanziale riduzione dei volumi di acqua in tutte le variabili relative all'idrologia della vegetazione (Figura 6.35) e a quella del terreno (Figura 6.36), ad eccezione dei quantitativi intercettati ed evaporati dalle superfici vegetate che presentano una minor riduzione.

Questi risultati possono essere spiegati considerando la significativa riduzione delle precipitazioni annue prevista per il periodo temporale analizzato (774 mm) e, più nel dettaglio, osservando l'andamento delle componenti del ciclo idrologico e quello delle precipitazioni. A titolo esemplificativo, si analizzano i flussi accumulati sulle superfici vegetate confrontando il caso base con quello ipotizzato per il trentennio 2071 – 2100 riferito allo scenario RCP8.5 (Figura 6.37).

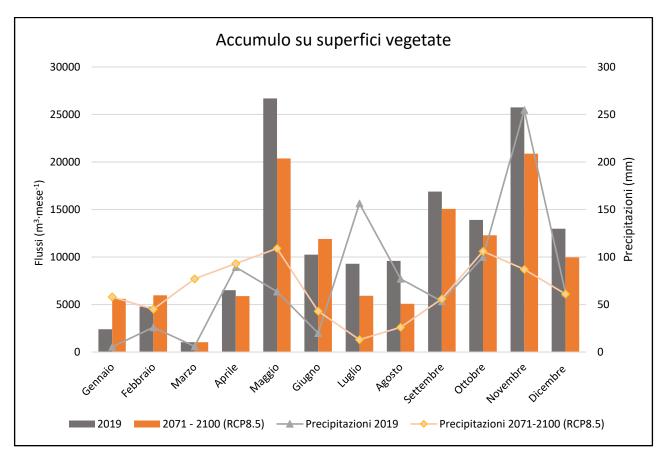


Figura 6.37 Andamento dei quantitativi di acqua accumulati sulle superfici vegetate (istogramma) e precipitazioni cumulate su base mensile (grafico lineare) relative al 2019 e allo scenario RCP4.5 valutato nel periodo 2071 – 2100

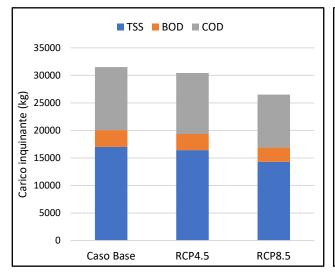
Il mese di novembre, ad esempio, a fronte di un valore di precipitazioni registrato nell'anno 2019 doppio (254.8 mm) rispetto a quello ipotizzato per un anno futuro (101 mm) mostra quantitativi accumulati sulle superfici fogliari 1.23 volte inferiori nel Caso Base rispetto allo scenario futuro. la non proporzionalità tra le due variabili citate trova spiegazione considerando la capacità massima di accumulo della chioma dell'albero, superata la quale, l'acqua che raggiunge la pianta cade al suolo.

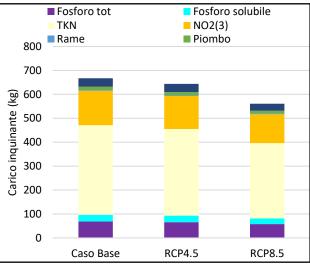
Per contro, il mese di settembre, così come ottobre e dicembre, riporta valori di precipitazione confrontabili tra la situazione attuale e quella futura (grafici lineari), pertanto, le differenze nei flussi accumulati tra il caso base e lo scenario RCP8.5 possono essere ricercate nelle relazioni che intercorrono tra questi parametri e le altre variabili che descrivono l'idrologia della vegetazione.

Le valutazioni fino ad ora condotte evidenziano per quasi la totalità dei flussi analizzati una diminuzione in funzione della riduzione delle precipitazioni prevista per il trentennio 2071 – 2100.

#### Water quality

I risultati forniti da Hydro relativi alle concentrazioni di inquinanti presenti nelle acque di scorrimento superficiale generate dal parco mostrano quantitativi più significativi per i solidi sospesi totali (TSS) e per le sostanze organiche (BOD e COD) (Figura 6.38), mentre gli altri composti risultano in concentrazioni minori (Figura 6.39).





e RCP8.5

Figura 6.38 Confronto tra le concentrazioni di TSS, BOD e Figura 6.39 Confronto tra le concentrazioni di fosforo totale COD relative al Caso Base e agli scenari di emissione RCP4.5 e solubile, TKN, nitriti e nitrati (NO2(3)), rame, piombo e zinco relative al Caso Base e agli scenari di emissione RCP4.5 e RCP8.5

L'andamento decrescente del carico inquinante osservabile per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 è motivabile considerando la riduzione dei deflussi superficiali indotta dalla diminuzione delle precipitazioni prevista per il trentennio di riferimento (2071 – 2100).

# 6.3.4 Azioni di mitigazione

A fronte delle ipotesi di cambiamento climatico precedentemente analizzate per il periodo temporale 2071 – 2100, si vuole constatare come la conservazione dell'attuale popolazione arborea presente nel parco "Le Vallere" e la messa a dimora di nuovi individui possa risultare una valida azione di mitigazione da contemplare tra quelle previste nello scenario di emissione RCP4.5. Contemporaneamente, si valuta come questo intervento possa avere riscontri positivi anche in termini di riduzione dei flussi superficiali generati dal parco, evitando di incrementare i volumi di acqua che periodicamente esondano dal fiume

La simulazione viene dunque condotta con lo scopo di confrontare la condizione attuale, uno scenario futuro basato sulle previsioni di temperatura e precipitazione preannunciate dal modello RCP4.5 e lo stesso scenario futuro in cui si contempla come strategia di mitigazione delle variazioni del clima un programma di piantumazione di individui arborei. L'analisi non prevede il confronto con lo scenario RCP8.5 che per definizione non contempla l'adozione di strategie di mitigazione del clima nel corso del secolo.

In termini di input, la simulazione comporta sostanzialmente una variazione dei parametri richiesti allo Step 2, ovvero un incremento della copertura arborea che implica una variazione dell'indice di superficie fogliare (LAI). Il valore di copertura arborea che si presume caratterizzi il parco nel trentennio 2071 – 2100 viene desunto facendo ricorso all'utilizzo di *Forecast*, strumento supplementare all'applicativo *Eco* che consente di effettuare previsioni future sia sulla composizione struttura di una foresta urbana sia sulla rimozione di inquinanti da essa operata.

Tale strumento richiede di attribuire un valore alle seguenti variabili:

- numero di anni della previsione;
- numero di giorni all'anno con temperatura maggiore di 0°C;
- tasso di mortalità annua delle piante definito in funzione dello stato di salute degli alberi.

Questi parametri sono impostati di default da *Forecast*; tuttavia possono essere modificati personalizzando l'analisi in funzione delle condizioni climatiche dell'area oggetto di studio e delle caratteristiche degli individui arborei che la popolano.

Nel caso specifico del parco "Le Vallere", si è assunto il numero di anni della previsione pari a 65 ipotizzando di considerare un anno futuro compreso tra il 2071 e il 2100 partendo dall'anno corrente. Il numero di giorni all'anno con temperatura maggiore di 0°C è stato ottenuto per differenza rispetto al numero di giorni di gelo verificati nell'anno 2015 (anno di riferimento della simulazione condotta con *Eco*) reperito sul Rapporto "Il clima in Piemonte" (2015) redatto da ARPA Piemonte e pari a 55. Infine, i tassi di mortalità delle piante, assunti di default pari a 3% per alberi sani (corrispondenti ad una condizione di *dieback* del 0-49%), 13.1% per alberi malati (50-74% *dieback*) e 50% per alberi morenti (75-99% *dieback*), sono stati calcolati sulla base delle informazioni fornitemi da Manuela Genesio, referente dell'"Ente di gestione delle aree protette del Po torinese" per il presente lavoro, e confermati da studi scientifici (Dobbertin M. et al, 2009). Nello specifico si è assunto un valore di 0.5% per gli alberi sani che determina una mortalità di individui annua pari a due sul totale stimato nell'analisi condotta con *Eco*, e un tasso pari a 10.3% per gli alberi malati che implica una mortalità annua di circa tre individui. Il tasso di mortalità associato agli alberi morenti è stato mantenuto invariato in quanto i risultati forniti dal *tool* non evidenziano alberi appartenenti a questa categoria.

In relazione al trentennio considerato si ipotizza il seguente programma di piantumazione (lo strumento non consente di specificare le specie delle piante inserite):

- 170 alberi di diametro pari a 2 cm piantumati a partire dal 2° anno della simulazione per la durata di un anno, a compensazione degli interventi di abbattimento delle piante situate all'interno dell'area di cantiere previste nell'ambito della progettazione esecutiva "Difese spondali e ricalibratura del fiume Po dal comune di Paesana al comune di Moncalieri";
- 33 piante di diametro pari a 2 cm messe a dimora a partire dal 3° anno della simulazione per la durata di un anno, a compensazione della perdita del percorso alberato prevista nell'ambito della progettazione esecutiva "Difese spondali e ricalibratura del fiume Po dal comune di Paesana al comune di Moncalieri";
- 20 alberi di diametro pari a 2 cm inseriti a partire dal 4° anno della simulazione per 61 anni (se la messa a dimora incomincia nel 2024, dopo 61 anni si sarà raggiunto il 2085, anno mediano del trentennio 2071 2100) con l'obiettivo di conservare nel tempo la struttura attuale del parco.

I risultati forniti da *Forecast* utili ai fini del presente lavoro sono relativi alla numerosità di alberi prevista per il periodo di riferimento considerato da cui è possibile ricavare la percentuale di copertura arborea e l'indice di area fogliare. Si precisa che il valore di questi ultimi due parametri viene fornito dallo strumento, tuttavia essendo *Eco* e *Hydro* basati su metodologie di calcolo diverse, specialmente per quanto riguarda la stima della copertura del suolo (*Eco* fa riferimento a proporzioni tra suolo permeabile e impermeabile medie, *Hydro* affina l'analisi mediante l'utilizzo di *Canopy* che fornisce percentuali specifiche dell'area in esame) e per coerenza con i valori implementati nelle precedenze analisi, le due variabili vengono derivate in funzione del numero di alberi stimato.

I valori di copertura arborea e di indice di area fogliare implementati in *Hydro* sono rispettivamente pari a 64.3% e 1.79. Tale incremento di percentuale deve necessariamente corrispondere ad una riduzione dei valori attribuiti alle altre categorie di copertura di suolo proposte da *Hydro* ("Erbacea", "Impermeabile", "Suolo nudo" e "Water"). Pertanto, si ipotizza di ridurre del 2% la copertura "Suolo nudo", essendo questa rappresentativa per la maggior parte del terreno costituente il rilevato e assumendo che nel futuro questo si inerbisca, e del 1% la copertura "Impermeabile" ipotizzando una variazione della configurazione del parco in termini di riduzione massima di suolo impermeabile. Quest'ultima variazione conduce ad un cambiamento del valore di DCIA, calcolato sulla base delle equazioni di Sutherland utilizzate per il Caso Base (Sottoparagrafo 6.3.1, Step 2). Si riportano in Tabella 6.11 le nuove percentuali di copertura del suolo implementate nello Step 2 e i relativi valori di DCIA e LAI a confronto con i valori assunti nel Caso Base e nello scenario RCP4.5 (si ricorda che la simulazione di quest'ultimo ha visto come unica modifica la variazione dei dati meteorologici attribuendo quindi ai di copertura del suolo valori analoghi a quelli del Caso Base).

Tabella 6.11 Distribuzione delle coperture del terreno per il Caso Base e lo scenario RCP4.5 comprendente azioni di mitigazione e rispettivi valori di DCIA e LAI

	Caso base e Scenario RCP4.5	Scenario RCP4.5 e Incremento di alberi
Tree Canopy (%)	35.54	65.92
Pervious under TC (%)	33.92	64.30
Impervious under TC (%)	1.62	1.62
Shrub Canopy (%)	0.00	0.00
Herbaceous (%)	57.15	29.80
Water (%)	0.00	0.00
Impervious (%)	3.77	2.77
Bare soil (%)	3.54	1.54
DCIA (%)	10.13	8.16
Tree Leaf Area	1.74	1.79

La discussione dei risultati prodotti dal software viene articolata in funzione della medesima classificazione che l'applicativo effettua di questi ultimi considerata per le simulazioni precedenti. Si precisa che lo scenario RCP4.5, contemplante la modifica dei soli parametri meteorologici di input, viene identificato nella simulazione come "2071 – 2100 (RCP4.5) No azioni di mitigazione", mentre il nuovo caso ipotizzato che prevede, oltre alla variazione dei dati climatici, anche un incremento del numero di individui arborei e una riduzione delle percentuali di terreno nudo e impermeabile, è definito come "2071 – 2100 (RCP4.5) Incremento di alberi".

### Water quantity

In termini di quantitativi di deflussi, il confronto tra i due scenari ipotizzati per il trentennio 2071 – 2100 non evidenzia significative variazioni nelle componenti costituenti il flusso totale, ad eccezione dei deflussi su superfici impermeabili che risultano subire una riduzione più marcata (Figura 6.40).

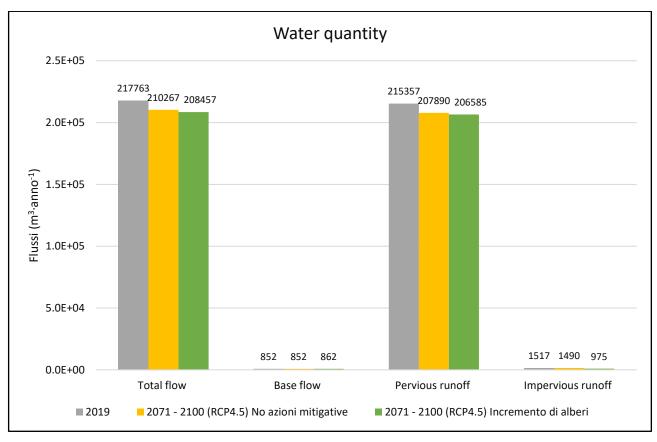


Figura 6.40 Istogrammi di confronto tra il Caso Base (2019) e gli scenari alternativi ipotizzati, relativi ai quantitativi totali di deflussi (Total flow) generati dal parco "Le Vallere", al flusso di base (Base flow) e ai deflussi superficiali su suolo permeabile (Pervious flow) e impermeabile (Impervious flow)

### Advanced output: Idrologia della vegetazione e del territorio

Gli output forniti dal software inerenti a queste due categorie, pur riferendosi al ciclo idrologico che si sviluppa a livello di albero, contemplano i flussi interessanti la totalità di individui arborei popolanti il parco. Questa considerazione motiva il lieve aumento dei quantitativi di acqua caduti dalle coperture arboree riportato nei risultati inerenti l'"Idrologia della vegetazione" (Figura 6.41), mentre l'incremento dei valori relativi agli altri processi idrologici è spiegabile considerando l'aumento di copertura arborea ipotizzato e la riduzione della percentuale di suolo impermeabile e terreno nudo.

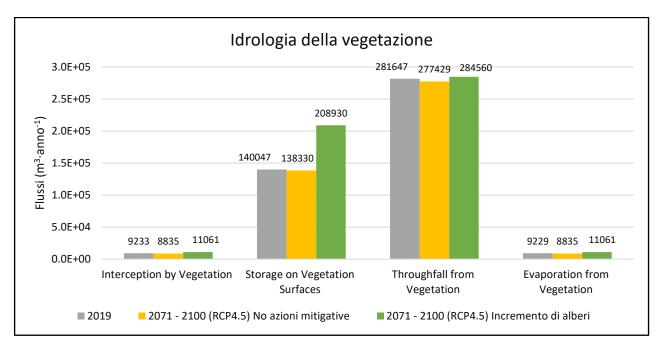


Figura 6.41 Andamento dei deflussi intercettati (Interception by vegetation), stoccati (Storage on vegetation surfaces), caduti (Throughtfall from vegetation) ed evaporati (Evaporation from vegetation) dalle superfici vegetate relativi al 2019 e agli scenari futuri ipotizzati per il trentennio 2071 – 2100

Per quanto concerne gli output relativi all'"Idrologia del terreno", gli istogrammi riportati in Figura 6.42 evidenziano un lieve incremento delle quantità infiltrate nel terreno ed evapo-traspirate dall'apparato radicale delle piante per lo scenario RCP4.5 inerente l'incremento del numero di alberi rispetto agli altri due casi analizzati. Particolare rilevanza assume il confronto tra questi tre scenari in termini di sensibilità del software alla variazione dei dati di input: si osserva, infatti, come la sola variazione degli input meteorologici ("2071 – 2100 (RCP4.5) No azioni di mitigazione") incida più marcatamente sui flussi che non un incremento della copertura arborea ("2071 – 2100 (RCP4.5) Incremento di alberi").

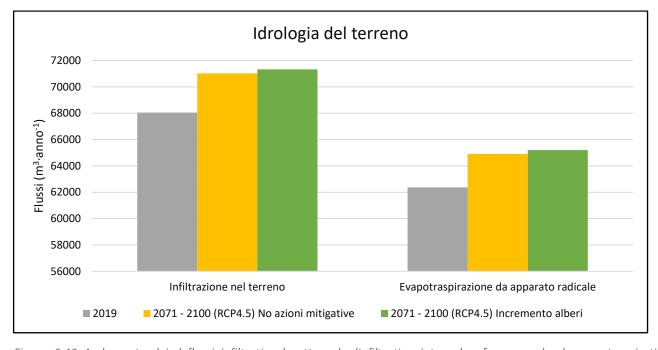


Figura 6.42 Andamento dei deflussi infiltrati nel sottosuolo (Infiltration into subsurface zones) ed evapo-traspirati dall'apparato radicale della vegetazione (Evapotranspiration from root zone) relativi al 2019 e agli scenari futuri ipotizzati per il trentennio 2071 – 2100

### Water quality

In termini di qualità delle acque, la variazione poco significativa dei flussi superficiali implica una minima riduzione del carico di inquinanti. Questo aspetto rimarca l'importanza attribuita dal software alla distinzione tra superfici permeabili, siano esse caratterizzate da una copertura arborea piuttosto che erbacea, e coperture impermeabili nella mitigazione dei flussi superficiali.

## 6.3.5 Quadro d'insieme e considerazioni finali

Si precisa che le considerazioni effettuate sui risultati forniti dal programma *Hydro* sono riferite al contesto oggetto di studio e, pertanto, soggette alle condizioni climatiche e idrologiche caratterizzanti la porzione di territorio esaminato.

L'analisi condotta sul parco "Le Vallere" evidenzia la varietà dei risultati che l'applicativo è in grado di fornire mostrando la sua potenzialità nel confrontare scenari alternativi e, nello specifico, l'incidenza che le superfici impermeabili hanno sul bilancio idrico. L'efficacia del programma risulta anche nella capacità di discretizzare gli output su intervalli temporali orari consentendo all'utente di cogliere i valori di picco dei flussi generati dalla porzione di territorio esaminata conseguenti alle piogge più intense. Tali aspetti sono stati posti in evidenza nella prima simulazione condotta (Sottoparagrafo 6.3.2) in cui si è ipotizzata una progressiva riduzione della permeabilità del terreno a fronte di un incremento della percentuale di suolo impermeabile, rispettivamente di 25%, 50% e 75%. L'analisi dei risultati riporta un incremento delle portate generate dal parco proporzionale all'aumento della copertura impermeabile, variazione nettamente più significativa per il terzo scenario (copertura impermeabile +75%) in cui i deflussi superficiali su suolo impermeabile incrementano di circa 127 volte rispetto al caso base. La variazione nelle coperture del suolo si ripercuote sulla qualità delle acque di scorrimento superficiale, valutata da *Hydro* sulla base di dieci inquinanti (Sottoparagrafo 5.3.2) e risultante, per questa simulazione, in un marcato deterioramento qualitativo al crescere della copertura impermeabile.

In merito alla simulazione condotta ipotizzando scenari futuri coinvolgenti i cambiamenti climatici in atto, l'obiettivo è stato quello di testare la sensibilità del software alla variazione dei dati meteorologici di input, conservando inalterate le altre variabili. Le considerazioni emerse dall'analisi dei risultati evidenziano come il software non risponda in maniera significativa alla variazione dei dati di temperatura, mentre produca sostanziali cambiamenti nei flussi in seguito alla modifica degli input di precipitazione. Questo aspetto è spiegabile considerando il modello matematico su cui si basa *Hydro*: le sub-routine che articolano l'elaborazione degli input sono impostate su modelli idrologici sviluppati per tener conto del ciclo idrologico a scala di albero. Tali considerazioni possono motivare la stretta correlazione che si è scoperto sussistere tra variazioni di precipitazioni in input e i cambiamenti dei flussi in output.

L'elaborazione dei risultati inerenti le previsioni future (Sottoparagrafo 6.3.3) sottolinea come una riduzione delle precipitazioni prevista per il trentennio 2071 – 2100 conduca ad una diminuzione dei flussi meno marcata per lo scenario RCP4.5 rispetto allo scenario RCP8.5. Questo aspetto è motivabile considerando la differenza tra i valori annui di precipitazione stimati per il periodo futuro di riferimento (900 mm per RCP4.5 e 774 mm per RCP8.5) e quelli registrati nell'anno 2019 dalla stazione meteorologica "Torino Vallere" (914.5 mm). Gli andamenti dei flussi analizzati nei due prospetti "Idrologia della vegetazione" e "Idrologia del terreno" evidenziano come la distribuzione delle precipitazioni all'interno dell'anno ipotizzato influisca sui processi che coinvolgono i vari quantitativi in

cui si scompongono le acque piovane quando giungono a contatto con un suolo cittadino vegetato. Nello specifico, è stato possibile osservare come i meccanismi di intercettazione dell'acqua, accumulo ed evaporazione da superfici vegetate, quantitativo caduto al suolo, infiltrazione nel terreno ed evapotraspirazione dall'apparato radicale siano strettamente correlati tra loro e dipendano significativamente dalla durata, dalla frequenza e dall'intensità delle precipitazioni.

Infine, l'ultima simulazione (Sottoparagrafo 6.3.4) ha come obiettivo l'analisi di uno scenario futuro contemplando la messa in opera di strategie di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici. A tal fine, si è ipotizzata l'adozione di azioni di gestione e manutenzione del parco "Le Vallere" con lo scopo conservarne le caratteristiche e la struttura attuale nel trentennio 2071 – 2100 e un piano di messa a dimora di nuovi individui che conduce ad un incremento del numero di piante nel periodo di riferimento. Il confronto è stato effettuato tra il Caso Base, rappresentato dalla situazione attuale, lo scenario RCP4.5, che per definizione suppone per l'appunto l'attuazione entro questo secolo di misure di mitigazione dei cambiamenti climatici, e lo stesso scenario futuro in cui viene implementata la percentuale di copertura arborea. L'analisi non contempla lo scenario RCP8.5 che per sua definizione non prevede l'adozione di strategie di mitigazione del clima. L'incremento di copertura arborea è stato bilanciato da una riduzione della copertura impermeabile e del terreno nudo, percentuali che, essendo minime sulla totalità del parco, non influiscono significativamente sui deflussi idrici. Le considerazioni effettuate sui risultati prodotti dall'analisi sottolineano come lo strumento *Hydro* sia nettamente più sensibile alla variazione dei dati meteorologici che non ad un incremento della popolazione arborea, rimarcando la sua caratteristica di modello idrologico.

Considerata la complessità dei fattori in gioco, la forte correlazione tra le variabili idrologiche, la maggiore sensibilità del software alla variazione di determinati dati di input piuttosto che altri e l'estrema aleatorietà delle previsioni future condotte, non è possibile fare assunzioni di carattere generale, quanto più evidenziare i punti di forza dello strumento nel confrontare i deflussi idrici prodotti dal parco al variare delle coperture del suolo e delle condizioni climatiche, e come queste si ripercuotono sulla qualità delle acque di scorrimento superficiale.

# 7. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il presente lavoro di tesi si è inserito all'interno dell'ampio e traversale tema dei Servizi Ecosistemici con l'obiettivo di indagarne i metodi di valutazione e i risvolti positivi che questi offrono all'ambiente e alla salute umana.

L'argomento, estremamente attuale e in continuo sviluppo, si è focalizzato su come le foreste urbane e gli spazi verdi possono contribuire a creare città più resilienti e sostenibili affrontando le sfide di una popolazione in continua crescita.

In questi termini, il percorso che ha portato alla stesura di questo elaborato ha trovato costanti conferme sull'importanza dei temi trattati sia a livello internazionale che nazionale, con particolare soddisfazione per le iniziative intraprese da enti e amministrazioni nel capoluogo piemontese. La città di Torino, infatti, è stata eletta nel 2019 *Tree City of the World*, ovvero "Città Albero del Mondo", rientrando nelle 60 città mondiali, di cui 23 negli Stati Uniti e tre in Italia (Mantova, Milano, Torino) ad avere ricevuto questo significativo attestato. Si tratta di un riconoscimento mondiale istituito dalla FAO e dalla *Arbor Day Foundation* per l'adozione di approcci di successo e per l'impegno mostrato nella gestione delle comunità arboree (Sottoparagrafo 2.4.2).

Le iniziative promosse dalla città in favore di uno sviluppo più sostenibile del contesto urbano sono numerose: si cita a titolo esemplificativo la partecipazione al "Climathon Turin 2020", la maratona mondiale di idee sul clima giunta alla quinta edizione che ha come obiettivo lo sviluppo di idee green a favore di progetti di riqualificazione di aree degradate. Ulteriori piani volti alla creazione di nuove aree verdi sul territorio sono, ad esempio, il programma di piantumazione partecipata "Mille alberi per Torino" avviato dall'Amministrazione comunale in occasione della Giornata Mondiale dell'Albero che ha visto la messa a dimora di un ingente numero di piante in aree estensive della città, e l'adesione al progetto "Urban Forestry", un'iniziativa di ricerca avviata a partire dal 2018 che ha intrapreso come primo progetto la riqualificazione del Parco Stura. Tali iniziative rappresentano un'importante esperienza dal punto di vista ambientale sia per il recupero delle aree degradate sia per l'interesse mostrato da enti pubblici e privati nell'intraprendere interventi di valenza ambientale con la possibilità di attivare meccanismi di *Pagamenti per i Servizi Ecosistemici* (PSE) (Paragrafo 2.3) (S66).

In questo contesto si inserisce lo studio condotto sulla suite *i-Tree*, sviluppata negli Stati Uniti ed in rapida espansione nel mondo proprio per la sua peculiarità nel valutare e quantificare i Servizi Ecosistemici offerti dal verde urbano all'ambiente e ai cittadini. Sebbene alcuni applicativi non siano ancora fruibili dagli utenti che desiderano sviluppare progetti al di fuori del contesto statunitense, l'utilizzo di quelli attualmente disponibili merita di essere approfondito al fine di comprendere in maniera più dettagliata i modelli matematici e gli algoritmi di calcolo alla base dei programmi e le relazioni che intercorrono tra i dati richiesti in ingresso e i risultati forniti in output.

I capitoli applicativi del presente lavoro prevedono l'utilizzo di due dei pacchetti costituenti la suite al parco "Le Vallere" situato nella città di Moncalieri (Torino) alla confluenza tra il Torrente Sangone e il fiume Po. Nello specifico, gli strumenti impiegati sono *i-Tree Eco* e *i-Tree Hydro*, per l'utilizzo dei quali ci si è avvalsi anche degli applicativi *i-Tree Database* e *i-Tree Canopy*, strumenti accessori ai due principali.

L'impiego di *Eco* consente, da una parte, la definizione della struttura del parco, dall'altra, la quantificazione dei Servizi Ecosistemici in termini riduzione delle concentrazioni di inquinanti atmosferici, sequestro e stoccaggio di carbonio ed emissioni di composti organici volati (VOC). Nello specifico, considerata l'estensione areale del parco (34 ettari) si è optato per una configurazione del progetto *plot-based sample inventory* che prevede l'identificazione di aree campione sulla porzione di territorio analizzato, ipotizzando che le condizioni presenti in esse siano rappresentative dell'intera area. I dati richiesti in input da questo applicativo sono relativi, oltre alle condizioni meteoclimatiche della zona, anche alle caratteristiche della vegetazione popolante il parco e del suolo su cui questa giace, parametri che hanno richiesto una prima fase di sopralluogo propedeutica al reperimento di tali dati.

Le considerazioni emerse dall'analisi dei risultati sottolineano l'eccezionale valore ambientale ed economico del parco "Le Vallere" per la località piemontese. Nello specifico, l'analisi mostra il contributo dell'area verde alla rimozione di inquinanti pari 440 kg annui quantificati economicamente in 96.5 mila euro, allo stoccaggio di carbonio per 436 tonnellate corrispondenti a circa 40 mila euro e ad un sequestro di 13 tonnellate annue di carbonio equivalenti a circa 1.200 euro. L'emissione di BVOCs raffigura probabilmente l'unico disservizio quantificabile che un parco urbano presenta, la cui quantificazione risulta comunque di essenziale importanza in previsione di nuove piantumazioni.

Si precisa che questi valori sono sottostimati rispetto ai reali benefici apportati dalla popolazione arborea in quanto il numero di piante stimato dal software, pari a 487 (± 29), non corrisponde effettivamente alla reale numerosità di individui. Tra gli innumerevoli punti di forza del programma, questo aspetto rappresenta una zona d'ombra motivabile considerando il campionamento di un solo albero per ogni plot analizzato. Questa metodologia di analisi ha probabilmente attribuito il valore di copertura arborea, definito per ogni singolo plot, al solo individuo valutato, riducendo significativamente la stima della numerosità di piante presenti nel parco e, di conseguenza, quella di tutti i parametri ad essa correlati. La presente constatazione può figurare come punto di partenza per una nuova ricerca volta all'impiego di strumenti alternativi e nuove tecnologie per la misura dei parametri dimensionali e funzionali della copertura arborea. Ne è un esempio il sistema LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) che, sulla base di rilievi aerei, ricostruisce i modelli digitali del terreno (epurati dagli elementi antropici) e della superficie (comprendente le altimetrie degli elementi del paesaggio, quindi anche la vegetazione). Un altro strumento di avanguardia in questo settore sono le immagini multispettrali rilevate dalle piattaforme satellitari che consentono di discriminare le risposte della vegetazione nei diversi intervalli dello spettro elettromagnetico, fornendo la possibilità di comporre bande per estrarre informazione sulle tipologie di vegetazione (conifere, caducifoglie) e sulle specie arboree presenti nell'area indagata. Un'ultima criticità riscontrata durante lo sviluppo del progetto è rappresentata dalla necessità di doversi riferire a dati meteorologici e di inquinanti rilevati dalle stazioni implementate all'interno del Database, senza possibilità di modifica, come invece permesso da Hydro. Considerata la rilevanza attribuita dal software a tali parametri e la loro estrema variabilità, si deduce che la possibilità di far riferimento a serie di dati maggiormente rappresentative dell'area oggetto di studio incrementerebbe le prestazioni e il livello di dettaglio dell'analisi.

L'applicazione del software *Hydro* al parco "Le Vallere" ha lo scopo di quantificare i benefici idrici che quest'area apporta alla città di Moncalieri. L'applicativo è, tra quelli studiati, indubbiamente quello che richiede dati in ingresso più specifici e non facilmente reperibili da tutti gli utenti. La sfida dell'analisi è stata proprio quella di approfondire le conoscenze e le relazioni che intercorrono tra questi parametri

con lo scopo di affinare l'interpretazione dei risultati proposti, presentati dal programma come deflussi totali, qualità delle acque di scorrimento superficiale e bilancio idrico a scala di albero.

A tal fine si sono condotte tre simulazioni con l'obiettivo di testare aspetti differenti del software: la prima, contempla una riduzione della permeabilità del suolo, la seconda prevede una variazione dei dati meteorologici di input ipotizzando uno scenario futuro che tiene conto dei cambiamenti climatici in atto e, infine, la terza, presume un incremento della copertura arborea come strategia di mitigazione alle variazioni climatiche che si prospettano per il futuro.

Il primo scenario è volto a sottolineare la potenzialità del software nel confrontare i flussi generati da un'area in funzione delle coperture del suolo. Nello specifico, la simulazione evidenzia come una diminuzione della permeabilità (ridotta progressivamente del 25%, 50% e 75%) comporta un regresso nella regimazione delle acque incrementando il carico di sostanze inquinanti nell'ambiente. La seconda analisi mira a valutare la sensibilità del software alla variazione delle serie di dati di temperatura e precipitazione. I due dataset implementati all'interno del software fanno riferimento ad un ipotetico anno futuro compreso nel trentennio 2071 – 2100 e sono ricavati in funzione delle previsioni sul cambiamento climatico supposte per il contesto torinese riportate nel Rapporto sul clima redatto da ARPA Piemonte, "Città di Torino, Assessment climatico e scenari futuri" (2018). La simulazione evidenzia come il software risulti poco sensibile ad un incremento delle temperature e fornisca, per contro, una risposta più marcata alla variazione delle precipitazioni. Questo risultato è motivabile analizzando il modello matematico alla base del software, di carattere prettamente idrologico e specifico per la vegetazione urbana. Ne consegue che gli algoritmi in esso implementati attribuiscano maggiore importanza alla variazione dei parametri idrologici piuttosto che a quella di altre grandezze climatiche.

L'impiego congiunto di *Eco* (tramite l'applicativo *Forecast*) e *Hydro*, infine, permette la descrizione di uno scenario futuro che contempla l'adozione di strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici. Tra queste si ipotizza la messa in opera di azioni di gestione e manutenzione del parco "Le Vallere" con lo scopo conservarne le caratteristiche e la struttura attuale nel trentennio 2071 – 2100 e un piano di messa a dimora di nuovi individui arborei con l'obiettivo di incrementarne il numero nello scenario futuro.

La funzione *Forecast* di *Eco* è impiegata per stimare il numero di alberi nel periodo di riferimento esaminato, mentre *Hydro* viene applicato per confrontare i flussi generati dal parco nella situazione attuale, caratterizzata da determinate condizioni climatiche e da una certa composizione arborea, con un ipotetico scenario futuro contraddistinto da temperature più elevate, precipitazioni annue inferiori e da una vegetazione arborea più consistente. Le considerazioni effettuate sui risultati prodotti dall'analisi sottolineano il carattere prettamente idrologico dello strumento da cui ne deriva una maggiore sensibilità alle variazioni dei parametri dipendenti dai valori di precipitazione e portata e delle variabili relative alla permeabilità del suolo.

Nelle metropoli urbane, infatti, una delle sfide più grandi è la regolazione dell'acqua piovana, specialmente in occasione di precipitazioni improvvise ed intense che possono causare esondazioni e saturare le reti di deflusso idrico urbano. In questi termini, gli strumenti applicati rappresentano un'importante risorsa al servizio di pianificatori territoriali in quanto offrono loro la possibilità di confrontare soluzioni diverse scegliendo tra queste quella più conforme alle loro necessità. Ad esempio, stimando le quantità medie di pioggia che alberi di diverse specie sono in grado di trattenere, è possibile progettare piantumazioni in specifiche zone della città dove l'acqua fluisce più faticosamente, rallentando il deflusso ed evitando i sovraccarichi alla rete idrica.

In sostanza, la suite *i-Tree*, nonostante presenti ancora dei limiti e necessiti di ulteriori studi per meglio comprenderne il funzionamento e le interazioni tra le parti, rappresenta un potenziale strumento nella pianificazione di aree verdi, sempre più spesso identificate come punti nevralgici di uno sviluppo sostenibile delle città in grado di soddisfare interessi e bisogni diversi, fornire Servizi Ecosistemici e migliorare la continuità tra spazi rurali e spazi urbani.

## 8. BIBLIOGRAFIA

Arpa Piemonte, Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali, "Il clima in Piemonte", 2015

Arpa Piemonte, Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali, "Città di Torino, Assessment climatico e scenari futuri", 2018

Bellomo A., "Il verde urbano come strumento di controllo ambientale degli spazi antropizzati", Italia, 1997

Beven K., "Infiltration into a Class of Vertically Non-Uniform Soils", United Kingdom, 1984

Brauman Kate A., Daily Gretchen C., Duarte T. Ka'eo, Mooney Harold A., "The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services", 2007

Brauman Kate A., "Hydrologic ecosystem services: linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management", 2015

Bucchignani E., Montesarchio M., Zollo A. L., Mercogliano P., "High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century", International Journal of Climatology, 2016, 36(2), 735-756.

Center for Watershed Protection, "Urban Watershed Forestry Manual", 2005

Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, "Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici", 2017

Comitato per il Capitale Naturale, "Terzo rapporto sullo stato del capitale naturale in Italia", 2019

Comitato per lo Sviluppo del Verde, "Linee guida per la gestione del verde urbano e prime indicazioni per una pianificazione sostenibile", MATTM, 2017

Comitato per lo Sviluppo del Verde, "Strategia Nazionale del Verde Urbano", MATTM, 2018

Commissione Europea, "Infrastruttura Verde", 2010

Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farberk S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Suttonkk P e van den Belt M., "The value of the world's ecosystem services and natural capital", 1997

Costanza R., "Ecosystem services: Multiple classification systems are needed", 2008

de Groot R., Brander L., van der Ploeg S., Costanza R., Bernard F., Braat L., Christie M., Crossman N., Ghermandi A., Hein L., Hussain S., Kumar P., McVittie A., Portela R., Rodriguez L. C., ten Brink P., van Beukering P., "Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units", 2012

Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152, "Norme in materia ambientale"

Department of Economic and Social Affairs, "World Urbanization Prospects, The 2018 Revision", 2018

Department of Economic and Social Affairs, "World Population Prospects 2019, Highlights", 2019

Direttiva 92/43/CEE ("Habitat") relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali e della flora e della fauna selvatiche, 21 maggio 1992

Dobbertin M., Hug Ch., Graf Pannatier E., Kräuchi N., Schaub M., Schmitt M., Schwyzer A., Thimonier A., Waldner P., "Jahre Sanasilva: Vom Waldsterben zur Waldökosystemforschung", 2009

Fares. S, Loreto F., Kleist E., Wildt I., "Stomatal uptake and stomatal deposition of ozone in isoprene and monoterpene emitting plants", 2008

Hirabayashi S., "i-Tree Canopy Air Pollutant Removal and Monetary Value Model Descriptions", United States, 2014

Hirabayashi S., Kroll C. N., Nowak D. J., "i-Tree Eco Dry Deposition Model Descriptions", USA, 2015

Hirabayashi S., Endreny T. A., "Surface and Upper Weather Pre-Processor for i-Tree Eco and Hydro", United States, 2016

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, "Gestione ecosistemica delle aree verdi urbane: analisi e proposte", 2009

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, "Strumenti di pianificazione del verde urbano in Italia", 2008

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, "Il clima futuro in Italia: analisi delle proiezioni dei modelli regionali", 2015

Kramer J.P, "Water Relations of Plants", Orlando, 1983

Legge 14 gennaio 2013, n.10, "Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani"

Loreto. F, Sharkey T. D., "Isoprene emission by plants is affected by transmissible wound signals", 1993

Maione U., Moisello U., "Elementi di Statistica per l'Idrologia", 1993

McPherson E. G., "Selecting Reference Cities for i-Tree Streets", 2010

Millennium Ecosystem Assessment, "Dichiarazione finale del Board, Vivere al di sopra dei nostri mezzi: patrimonio naturale e benessere umano", 2005

Nowak D. J., "Estimating Leaf Area and Leaf Biomass of Open-Grown Deciduous Urban Trees", 1996

Nowak D. J., and Crane D. E., "The Urban Forest Effects (UFORE) Model: Quantifying Urban Forest Structure and Functions" in "Integrated tools for natural resources inventory in the 21st century", 2000

Nowak D. J., and Crane D. E., "Carbon Storage and Sequestration by Urban Trees in the USA", USA, 2001

Nowak David J., Walton Jeffrey T., Stevens Jack C., Crane Daniel E., and Hoehn Robert E., "Effect of Plot and Sample Size on Timing and Precision of Urban Forest Assessments", Arboriculture & Urban Forestry, 2008 34(6):386–390

Nowak D. J., Crane D. E., Stevens J. C., Hoehn R. E., Walton J. T., and Bond J., "A Ground-Based Method of Assessing Urban Forest Structure and Ecosystem Services", 2008 34(6):347–358

Pace R., Biber P., Pretzsch H., Grote R., "Modeling Ecosystem Services for Park Trees: Sensitivity of i-Tree Eco Simulations to Light Exposure and Tree Species Classification", 2018

Revelli R., "Città efficienti, vivibili e resilienti", Politecnico di Torino, Italia, 3 giugno 2020

Trucco C., "Scenari di trasformazione territoriale lungo il Sangone", Italia, 2019

US Forest Service, Davey Tree Expert Company, Arbor Day Foundation, Society of Municipal Arborists, International Society of Arboriculture, Casey Trees, College of Environmental Science and Forestry, "i-Tree Eco Field Manual v6.o", 2020

US Forest Service, Davey Tree Expert Company, Arbor Day Foundation, Society of Municipal Arborists, International Society of Arboriculture, Casey Trees, College of Environmental Science and Forestry, "i-Tree Eco Guide to Unstratified Samples", 2020

US Forest Service, Davey Tree Expert Company, Arbor Day Foundation, Society of Municipal Arborists, International Society of Arboriculture, Casey Trees, College of Environmental Science and Forestry, "i-Tree Eco User's Manual v6.0", 2020

US Forest Service, Davey Tree Expert Company, Arbor Day Foundation, Society of Municipal Arborists, International Society of Arboriculture, Casey Trees, College of Environmental Science and Forestry, "i-Tree Hydro User's Manual", 2020

Vigliocco F., "Applicazione del software i-Tree per la determinazione degli Ecosystem Services in ambito urbano. Il caso del parco di Via Revello, Torino, Italia", 2019

Wang J., Hassett J. M., Endreny T. A., "An Object Oriented Approach to the Description and Simulation of Watershed Scale Hydrologic Processes", USA, 2004

Wang J., Endreny T. A., Hassett J. M., "Power Function Decay of Hydraulic Conductivity for a TOPMODEL-Based Infiltration Routine", USA, 2006

Wang J., Endreny T. A., Nowak D. J., "Mechanistic Simulation of Tree Effects in an Urban Water Balance Model", 2008

Yang Y., Endreny T. A., Nowak D. J., "i-Tree-Hydro: Snow Hydrology Update for the Urban Forest Hydrology Model", 2011

# 9. SITOGRAFIA

- S1. https://it.wikipedia.org/wiki/Antropocene
- S2. https://www.overshootday.org/
- S3. http://data.footprintnetwork.org/#/exploreData
- S4. http://www.fao.org/news/story/it/item/1172012/icode/
- S5. https://population.un.org/wup/Country-Profiles/
- S6. https://www.wearch.eu/forestazione-urbana-il-verde-estensivo-e-la-sua-evoluzione/
- S7. https://www.minambiente.it/pagina/rete-natura-2000
- S8. https://it.wikipedia.org/wiki/Capitale\_naturale
- S9. https://it.wikipedia.org/wiki/Servizi\_ecosistemici
- S10. https://www.eea.europa.eu/it/about-us
- S11. https://ipbes.net/about
- S12. http://www.meteoweb.eu/2015/08/clima-la-nasa-certifica-lisola-di-calore-delle-citta-lantidoto-e-la-vegetazione-urbana/490677/
- S13. https://it.wikipedia.org/wiki/Bioma
- S14. http://www.lifemgn-serviziecosistemici.eu/IT/progetto/Pages/pes.aspx
- S15. https://www.cbd.int/sp/targets/
- S16. https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs
- S17. https://www.minambiente.it/pagina/strategia-nazionale-la-biodiversita
- S18. https://www.minambiente.it/pagina/il-rapporto-sullo-stato-del-capitale-naturale-italia
- S19. http://www.fao.org/news/story/it/item/1172012/icode/
- S20. https://www.stefanoboeriarchitetti.net/project/tirana-riverside/
- S21. https://treecitiesoftheworld.org/about.cfm
- S22. https://www.itreetools.org/about
- S23. https://it.wikipedia.org/wiki/United\_States\_Forest\_Service
- S24. https://harvest.itreetools.org/
- S25. https://database.itreetools.org/
- S26. www.epa.gov/climate-indicators
- S27. https://it.wikipedia.org/wiki/Albedo

- S28. https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/
- S29. https://it.wikipedia.org/wiki/Revisione paritaria
- S30. https://www.nrs.fs.fed.us/tools/ufore/
- S31. https://www.itreetools.org/documents/53/UFORE%20Methods.pdf
- S32. https://en.wikipedia.org/wiki/Monin%E2%80%93Obukhov\_length
- S33. https://it.wikipedia.org/wiki/Irradianza
- S34. https://it.wikipedia.org/wiki/Radiazione\_fotosinteticamente\_attiva
- S35. https://it.wikipedia.org/wiki/Mesofillo
- S36. https://it.wikipedia.org/wiki/Cuticola\_(botanica)
- S37. http://www.treccani.it/enciclopedia/therm/
- S38. https://www.itreetools.org/tools/hydro
- S39. https://canopy.itreetools.org/
- S40. https://it.wikipedia.org/wiki/Agenzia\_per\_la\_protezione\_dell'ambiente
- S41. https://auronzomisurina.it/auronzo/)
- S42. https://www.ncdc.noaa.gov/data-access
- S43. https://it.wikipedia.org/wiki/Punto\_di\_rugiada
- S44. https://forums.itreetools.org/viewtopic.php?f=35&t=1233
- S45. https://www.epa.gov/npdes-permits/stormwater-tools-new-england
- S46. https://it.wikipedia.org/wiki/Domanda biochimica di ossigeno
- S47. https://it.wikipedia.org/wiki/Metodo\_Kjeldahl
- S48. http://www.areeprotettepotorinese.it/riserva-vallere.php
- S49. http://www.parks.it/parchi.po.collina/giardino.fenologico.html
- S50. https://www.amministrazionicomunali.it/piemonte/moncalieri#
- S51. https://it.wikipedia.org/wiki/Stazione\_meteorologica\_di\_Torino-Bric\_della\_Croce
- S52. https://www.gestireilverde.it/vta-valutazione-di-stabilita-degli-alberi/
- S53. https://www.arera.it/it/dati/eep35.htm#
- S54. http://www.gddenergy.it/cogenerazione-solare/21-energie-rinnovabili/costo-dell-energia-e-risparmi/75-calcolo-del-prezzo-di-un-kwh-termico-domestico
- S55. https://www.sendeco2.com/it/prezzi-co2
- S56. https://forums.itreetools.org/viewtopic.php?f=35&t=1256
- S57. https://www.simaonlus.it/?p=1894

- S58. https://giorgiovacchiano.com/le-foreste-urbane-possono-mitigare-gli-effetti-delle-piogge-intense/
- S59. https://www.ipcc.ch/
- S60. http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/
- S61.https://forums.itree tools.org/viewtopic.php?f=35&t=1278&sid=5f63213e5a9c2877a5d3b549a30dc2d8
- S62. ftp://ftp.ncei.noaa.gov/pub/data/noaa/
- S63. https://www.itreetools.org/documents/63 ... sor\_r2.zip
- S64. https://forums.itreetools.org/viewtopic.php?f=35&t=1248
- S65. https://forums.itreetools.org/viewtopic.php?f=35&t=1330
- S66. https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/green economy/urban-forestry