

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

TESI DI LAUREA

in

Valorizzazione delle risorse primarie e secondarie

**VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA AMBIENTALE DEI TETTI VERDI
A LIVELLO GLOBALE: CONFRONTO TRA CASI DI STUDIO**

CANDIDATO

Grazia Maria Cappucci

RELATORE:

Chiar.ma Prof. Alessandra Bonoli

Anno Accademico 2014/2015

Sessione I

Sommario

Introduzione	1
1. Infrastrutture Verdi	3
1.1 Pareti Verdi	4
1.1.1 Classificazione dei sistemi di inverdimento verticale per l'architettura urbana	5
1.1.2 Specie Arboree impiegate	7
1.1.3 Benefici ambientali	8
1.2 Aree Verdi d'Infiltrazione.....	9
1.2.1 Struttura.....	9
1.2.2 Specie arboree impiegate	10
1.2.3 Benefici ambientali	10
1.3 Pavimentazioni permeabili	11
1.3.1 Tipologie	12
1.4 Tetti Verdi	13
1.4.1 Excursus storico	13
1.4.2 Normativa.....	16
1.4.3 Stratigrafia del tetto verde.....	19
1.4.4 Tipologie di tetti verdi.....	22
1.4.5 Benefici apportati dai tetti verdi.....	26
2 Casi di studio.....	45
2.1 Toronto, Canada	47
2.1.1 Geografia.....	47
2.1.2 Clima.....	48
2.1.3 Problemi ambientali	49
2.1.4 Azioni intraprese dalla città di Toronto e benefici attesi.....	54
2.2 Buenos Aires, Argentina.....	65
2.2.1 Geografia.....	65
2.2.2 Clima.....	66

2.2.3	Problemi ambientali	66
2.2.4	Azioni intraprese dalla città di Buenos Aires e benefici attesi.....	73
2.3	Chicago, Illinois	77
2.3.1	Geografia.....	77
2.3.2	Clima.....	78
2.3.3	Problemi ambientali	79
2.3.4	Azioni intraprese dalla città di Chicago e benefici attesi.....	84
2.4	Singapore.....	90
2.4.1	Geografia.....	90
2.4.2	Clima.....	91
2.4.3	Problemi ambientali	93
2.4.4	Azioni intraprese dalla città-stato di Singapore e benefici attesi	97
2.5	Londra, Regno Unito	102
2.5.1	Geografia.....	102
2.5.2	Clima.....	102
2.5.3	Problemi ambientali	104
2.5.4	Azioni intraprese dalla città di Londra e benefici attesi.....	107
2.6	Confronto tra i casi di studio	110
2.6.1	Riduzione del runoff	110
2.6.2	Risparmio energetico e mitigazione della Urban Heat Island.....	114
2.6.3	Miglioramento della qualità dell'aria.....	121
	Conclusione.....	131
	Bibliografia	131
	Indice delle immagini.....	135
	Indice delle tabelle	138

Introduzione

Le coperture a verde sono oggetto di studio e interesse crescente negli ultimi decenni, da parte di ricercatori che ne indagano i benefici nei laboratori, ma anche da parte dei governi delle città di tutto il mondo.

È infatti mutata la considerazione generale per le green technologies, passando dall'essere apprezzate per la sola utilità estetica all'essere integrate nella costruzione di edifici, pubblici e privati, fin dalla progettazione. Sono dunque diventate elemento imprescindibile dell'architettura eco-sostenibile.

Il loro largo impiego trova le radici in una stringente necessità: rendere più vivibili le nostre città.

Non servono infatti prove di laboratorio o elaborazioni con software per toccare con mano i problemi dovuti all'intensa e soffocante urbanizzazione, in qualsiasi parte del mondo: la città è tremendamente calda, la sua aria è irrespirabile e dannosa, i suoi profili di cemento impermeabile la rendono un bacino di accumulo delle acque piovane. Questi fenomeni non incidono solo sulla qualità della vita dei cittadini, ma sulla loro stessa esistenza, basti tenere presente i morti causati dalle inondazioni durante le sempre più brevi e scroscianti piogge degli ultimi anni, i malori delle persone più deboli a ogni ondata di calore estiva e l'insorgenza delle malattie respiratorie per gli alti livelli di inquinamento atmosferico.

Con questo lavoro di tesi ho voluto quantificare con la maggior precisione possibile i benefici che i tetti verdi sono in grado di apportare per ognuna delle tre problematiche sopra esposte ed evidenziare l'influenza che il clima ha su di loro, mediante un confronto tra diversi contesti climatici.

Inoltre è stata valutata la loro efficacia anche in ottica di futura massima espansione dei tetti verdi, come previsto dalle città oggetto di studio.

La ricerca dei dati si è basata soprattutto sulle stime raccolte in report redatti dalle città e, in assenza di questi, sono stati calcolati mediante consultazione di pubblicazioni scientifiche delle università di tutto il mondo.

1. Infrastrutture Verdi

Una definizione di “Infrastrutture Verdi” è stata fornita dalla Commissione Europea che ha emesso un documento a Giugno 2010 dal titolo “Green Infrastructures”: “Le infrastrutture verdi sono un insieme di soluzioni progettuali di “verde tecnologico” che hanno una serie di benefici ambientali per la gestione delle risorse e la mitigazione dei cambiamenti climatici.” (Europea, 2010)

Esse contribuiscono a:

- Favorire una migliore qualità della vita e il benessere dell'uomo, fornendo un ambiente salubre in cui vivere e lavorare.
- Promuovere la biodiversità, riconnettendo aree naturali isolate.
- Proteggerci dal cambiamento climatico e altri disastri ambientali, mitigando le alluvioni, immagazzinando la CO₂ e prevenendo l'erosione del suolo.
- Incoraggiare una politica per lo sviluppo più intelligente e integrata che garantisca che le limitate aree dell'Europa sono utilizzate nel modo più efficiente e coerente possibile.

Una delle attrattive chiave delle Green Infrastructures è la capacità di svolgere molteplici funzioni nella medesima area.

A differenza delle infrastrutture “grigie”, che hanno un unico obiettivo, le Green Infrastructures sono multifunzionali, il che significa che possono promuovere soluzioni vantaggiose per tutti o abbinare grandi guadagni a piccole perdite che forniscono benefici a un ampio range di stakeholders.

In più possono agire come un catalizzatore per la crescita economica attirando investimenti e generando lavoro, riducendo i costi ambientali. I “green jobs” rappresentano già il 5% del mercato del lavoro.

Le principali tecnologie adoperate nelle Infrastrutture Verdi sono:

- Tetti Verdi
- Pareti Verdi
- Aree Verdi d'Infiltrazione
- Asfalti Permeabili

Rimandiamo a un secondo momento l'analisi approfondita sui Tetti Verdi per fornire prima qualche cenno alle altre green technologies.

1.1 Pareti Verdi

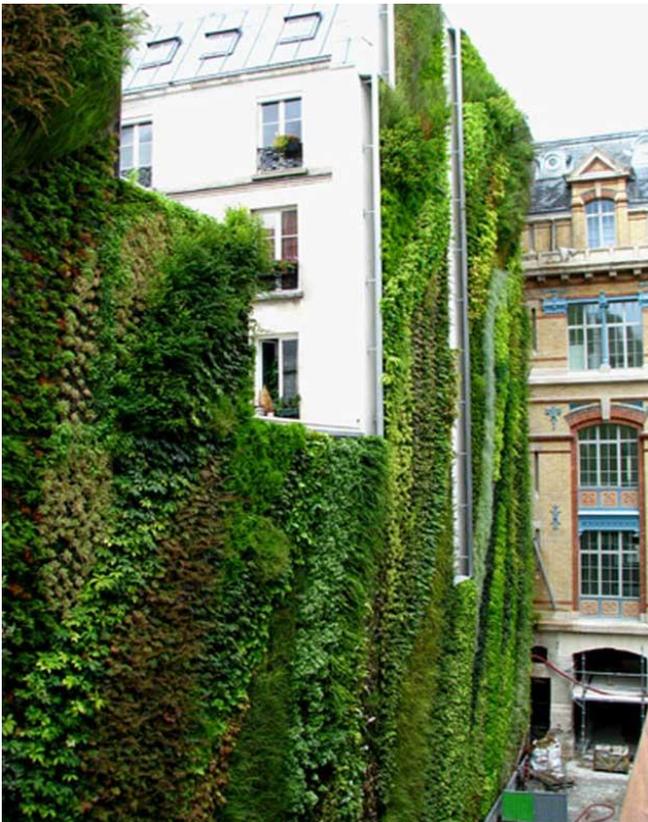


Figura 2 Una parete verde su Rue d'Alsace a Parigi *Figura 1* Giardino verticale a Barcellona

Le Pareti Verdi sono pareti ricoperte in modo parziale o completo dalla vegetazione che include anche un mezzo per la crescita come il terreno.

Le pareti verdi possono essere esterne o interne, autoportanti o appoggiate una parete

esistente.

La più grande parete verde ricopre una superficie di 2700 m² ed è situata al Los Cabos International Convention Center, un edificio progettato dall'architetto messicano Fernando Romero per il G-20 del 2012.

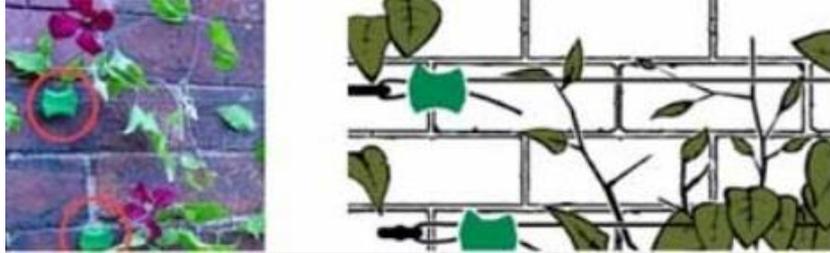
1.1.1 Classificazione dei sistemi di inverdimento verticale per l'architettura urbana

È necessario distinguere le pareti verdi a seconda che il sistema di copertura sia integrato nell'involucro architettonico o che venga sovrapposto ad esso. (Luca Siragusa).

In quest'ultimo caso il terriccio è posto alla base, la vegetazione è di tipo rampicante e richiede opportuni sostegni per svilupparsi in verticale garantendo totale copertura.

Nel primo caso invece il terriccio è disposto in moduli ripetitivi che rivestono l'intera parete e al di sopra del quale cresce la vegetazione.

Nella tabella sono riportate nel dettaglio le tecniche di inverdimento descritte:

Sistemi di copertura verde accostati alla parete	Reti in acciaio inossidabile che vengono ancorate alla facciata attraverso particolari distanziatori	
	Struttura tesata realizzata con morsetti verdi in nylon rinforzato con fibra di vetro e fili di nylon	
	Traliccio a maglie estensibili in PVC Fissato con tasselli cilindrici	

Sistemi con copertura verde integrati nell'involucro architettonico	Pannello di colore nero in HDPE suddiviso in celle nelle quali è posto il substrato	
	Gabbia modulare in acciaio al cui interno è posto il materassino: feltro con un nucleo di torba e perlite	
	Pannello modulare con geostuoia tridimensionale in PP	

Tabella 1 Principali tipologie di pareti verdi

Esiste infine un'ultima categoria di pareti verdi applicata ai **muri di contenimento** per la stabilizzazione dei pendii sottostrada e soprastrada, vallo paramassi, sostegno di pista ciclabile che hanno la funzione di mascherare i muri di sostegno riducendone l'impatto visivo.

A tal fine vengono adoperati blocchi in calcestruzzo vibrocompresso, dotati di cavità interne da riempirsi con terra vegetale per la coltivazione di varie specie di piante e di arbusti. I blocchi di facciata del muro hanno funzione sia statica che estetica, mentre quelli posteriori hanno valenza solo strutturale.

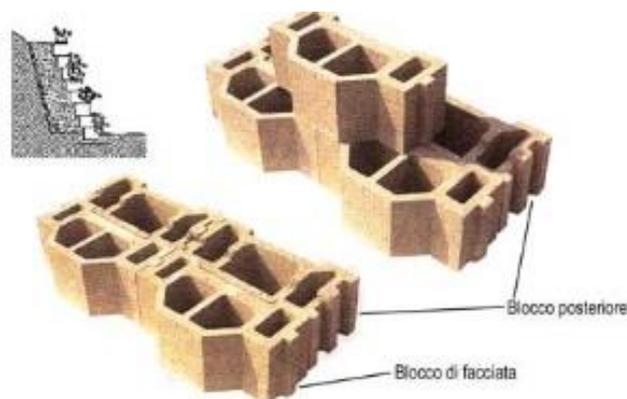


Figura 3 Blocco in calcestruzzo per pendii

In alternativa possono essere predisposti muri cellulare rivestiti di essenze vegetali per il sostegno in profondità di pendii e di scarpate instabili soggette con facilità a frane ed a fenomeni di erosione. Sono caratterizzati da un'ossatura a gabbia per contenere al loro interno materiale incoerente o terra scavata sul posto.

Costruiti in questa maniera i muri cellulari sono, oltre che elementi di sostegno, anche pareti drenanti, poiché consentono lo smaltimento delle acque grazie al materiale incoerente che contengono.



Figura 4 Muro verde

1.1.2 Specie Arboree impiegate

In base ai fattori ambientali si possono suddividere le specie arboree più adatte in due macro categorie:

- Specie microterme: particolarmente indicate per temperature comprese tra 15 e 25 °C, con minor tolleranza al caldo, siccità e salinità, con maggior crescita in autunno e primavera. Appartengono a questo gruppo le specie:
 - Festuca arundinacea
 - Lolium perenne
 - Poa pratensis
 - Festuca rubra

- Specie macroterme: indicate per climi più caldi e per questo poco adatte a quelli dove le temperature possono scendere al di sotto dei 0°. In questo caso perdono il colore verde e vanno in riposo vegetativo. La temperatura ottimale di crescita è compresa tra i 25 e i 35 °C. Appartengono a questo gruppo le specie:
 - *Cynodon dactylon*
 - *Paspalum vaginatum*
 - *Stenotaphrum secundatum*
 - *Zoysie*

1.1.3 Benefici ambientali

La trattazione dei vantaggi apportati dalle pareti verdi è qui riportata brevemente. Per una trattazione approfondita si rimanda alla sezione dedicata ai Tetti Verdi.

Oltre ad essere elemento distintivo dell'architettura verde, la realizzazione di una parete verde porta con sé alcuni vantaggi, andando a costituire una “seconda pelle” degli edifici:

- Miglioramento dell'isolamento termico degli edifici, evitando l'irraggiamento diretto dei raggi solari sulla parete, che non si scalda e non irradia il calore all'interno, favorendo inoltre l'evapotraspirazione.
- Miglioramento dell'impatto estetico dell'edificio, anche nel confronto con gli edifici circostanti.
- Contribuisce a catturare le polveri sottili (PM10) in ambiente urbano.

1.2 Aree Verdi d'Infiltrazione



Figura 5 Rain Garden a Bologna

I Rain Gardens sono costituiti da aiuole depresse che permettono di intercettare acqua piovana proveniente da tetti, suolo stradale, aree parcheggio che generalmente si accumula durante gli eventi atmosferici

1.2.1 Struttura

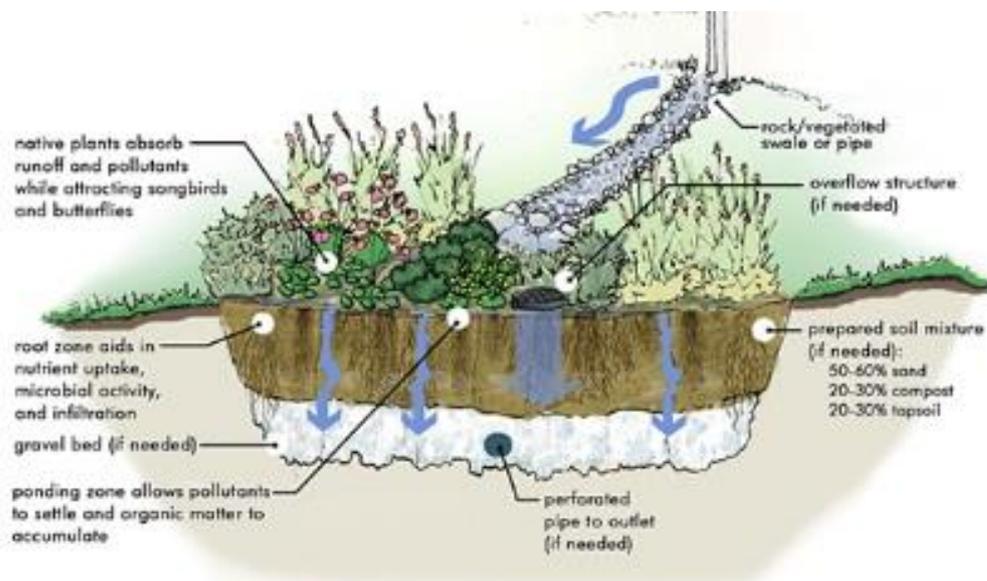


Figura 6 Struttura del Rain Garden

Sotto un strato superficiale di terra è posto uno strato di sabbia che ha la funzione di filtrare l'acqua depurandola da sostanze inquinanti che la pioggia, cadendo sulle superfici dure come i marciapiedi, porta con sé.

Un sistema di tubi drenanti, posto nell'ultimo strato sabbioso, provvede a convogliare l'acqua filtrata verso apposite cisterne o direttamente nell'impianto fognario. In questo modo le condotte fognarie saranno gravate in misura più costante dal flusso di acqua piovana che sarà a sua volta più pulita, limitando così l'inquinamento dei fiumi: non dimentichiamo poi che in questo modo è possibile diminuire la possibilità di allagamenti stradali. (Leone, 2014)

1.2.2 Specie arboree impiegate

Le piante autoctone sono generalmente consigliate per i rain garden perché solitamente non richiedono fertilizzanti e sono più resistenti agli attacchi dell'ambiente esterno (animali, insetti, malattie, rusticità in termini di suolo...).

Possiamo scegliere erbacee annuali o perenni secondo il grado di manutenzione che dobbiamo raggiungere, arbusti e alberi di piccola e media grandezza. È preferibile scegliere delle alberature poco ingombranti perché lo spazio a disposizione all'interno della vasca non sarà così ampio e quindi è meglio prevenire il problema legato allo sviluppo dell'apparato radicale.

1.2.3 Benefici ambientali

La funzione principale di questo "sistema-giardino" è di ridurre l'effetto "runoff" (erosione superficiale) filtrando più lentamente le acque di pioggia che vengono intercettate all'interno dell'aiuola.

L'acqua dovrà attraversare diversi strati: il substrato di coltivazione e diversi strati drenanti che hanno la funzione di rallentare il flusso idrico e in questo modo viene ridotta la possibilità di fenomeni di allagamento.

Con questo sistema, l'acqua, raggiunge l'impianto fognario più lentamente e in maniera costante senza intasarlo. L'impianto fognario intasato, unito al consumo del suolo (all'aumento quindi della superficie impermeabile) provoca, soprattutto in Italia, continui allagamenti e danni in città.

1.3 Pavimentazioni permeabili

Le pavimentazioni convenzionali progettate per essere usate dal traffico veicolare tipicamente consistono di un sottofondo, uno o più strati sovrapposti di materiale compattato e la superficie di copertura.

Questa solitamente deve evitare l'entrata dell'acqua al fine di proteggere l'integrità delle parti sottostanti. (Conte, 2012)



Figura 7 Esempio di pavimentazione permeabile



Figura 8 Funzionamento di un blocco di calcestruzzo drenante

Al contrario, le pavimentazioni permeabili hanno obiettivi e requisiti di progettazione abbastanza differenti.

Gli spazi di giunzione superficiali adiacenti tra una unità ed un'altra non vengono chiusi ma anzi hanno lo scopo di far filtrare l'acqua verso gli strati sottostanti.

Essa passa attraverso i vuoti presenti nella ghiaia e viene drenata verso il basso.

La pavimentazione perciò compie la doppia funzione di supportare il carico veicolare e drenare.

1.3.1 Tipologie

Analizziamo schematicamente le principali tipologie di pavimentazioni permeabili

Masselli porosi con macroporosità controllata	
Masselli permeabili con fughe inerbite	
Griglie di plastica modulari, con celle aperte di forma alveolare	
Calcestruzzo drenante (aggregato grossolano lavato, cemento idraulico, acqua, additivi aggiuntivi opzionali)	

Tabella 2 Tipologie di pavimentazioni permeabili

1.4 Tetti Verdi

Una definizione di verde pensile può essere: “Un impianto vegetale su uno strato di supporto strutturale impermeabile, come ad esempio solette di calcestruzzo, solai, coperture in legno, coperture metalliche e in tutti quei casi in cui non vi sia continuità ecologica tra il verde ed il sottosuolo fino alla roccia madre.

Caratteristica delle coperture a verde, quindi, è quella di mantenere tutto il contenuto tecnologico e costruttivo tipico di una copertura tradizionale riproducendo, in più, le prestazioni tipiche di un suolo naturale ricoperto di vegetazione, in misura completa o in parte limitata. Può essere quindi considerato uno strumento di compensazione e mitigazione degli impatti generati dall’inserimento di nuove opere nel territorio, adeguato ad innescare la formazione di ecosistemi prossimo-naturali in aree densamente edificate.” (ISPRA).

Le coperture a verde si differenziano da tutte le altre tipologie di copertura perché il materiale di “finitura” a vista, anziché essere costituito da materiali inerti, è costituito da organismi viventi, rappresentati da individui di diverse specie vegetali.

1.4.1 Excursus storico

L'esempio principale, quando si pensa ai giardini pensili nella storia, è senza alcun dubbio quello relativo ai giardini pensili costruiti intorno al 590 a.C. dal re Nabucodonosor II, nella città di **Babilonia**.

La leggenda vuole che una regina trovasse nei giardini rose fresche ogni giorno, pur nel clima arido che caratterizzava la città. (Wikipedia, Giardini pensili di Babilonia)



Figura 9 Giardini pensili di Babilonia

Il sistema di irrigazione adottato era quello della *noira*: alla base della scalinata dei giardini vi erano due grandi bacini che ricevevano acqua dall'Eufrate a mezzo di condutture sotterranee.

Ai bacini erano connesse delle ruote di legno o vasi d'argilla.

Quando le ruote venivano azionate dalla forza umana, questi ultimi si riempivano per poi lasciar ricadere l'acqua in un collettore sito al piano superiore, dove avveniva lo stesso procedimento, fino a raggiungere il livello più alto.

Qui si trovava una cisterna da cui l'acqua poteva facilmente essere ridistribuita, attraverso condotti a caduta, a tutta la superficie dei giardini, sia a scopi irrigui che con funzione ornamentale.

Altri esempi nella storia, relativi ai giardini pensili, sono quelli che si possono ricondurre alle tombe risalenti al periodo degli **Etruschi** (XI secolo a.C. In poi). Il terreno che veniva asportato per ricavare una tomba sotto terra, era poi utilizzato per coprire la parte superiore con vegetazione.



Figura 10 Giardino pensile del Mausoleo di Augusto

Oltre agli Etruschi, esempi di giardini

pensili, si ebbero nel **periodo romano** con il **Mausoleo di Augusto** (I sec. a.C.).

Il sepolcro del primo imperatore di Roma, era un immenso monumento ricoperto da giardini pensili e circondato da un'area verde offerta al popolo romano con tanto di custode che ne manteneva l'ordine e la pulizia.

In **epoca rinascimentale**, nel 1500 i giardini pensili furono fortemente voluti da Federico da Montefeltro nell'architettura del **Palazzo Ducale a Urbino**, il cui progetto fu affidato all'architetto senese Francesco di Giorgio Martini.



Figura 11 Giardino pensile del Palazzo Ducale a Urbino

Il cortile d'onore e gli ambienti interni con i camini originali, è di nobile eleganza rinascimentale. Oggi è sede di mostre. Il giardino pensile, sottostante al palazzo, è un fazzoletto di verde e di quiete incastonato su un terrazzo a precipizio sui vicoli più segreti di Gubbio.

Infine in epoca moderna **Le Corbusier** pubblica nel 1923 *Verso un'architettura*, l'opera teorica più importante della prima metà del XX secolo.

In essa, Le Corbusier espone i suoi celebri cinque punti alla base del nuovo modo di concepire lo spazio architettonico e di costruire



Figura 12 Tetto-terrazza a Villa Savoye-Poissy

un'abitazione con cemento armato. Espressione di questi canoni è la **Villa Savoye-Poissy**, nei dintorni di Parigi.

Tra questi teorizza il “**Tetto-giardino** (tetto a terrazza) che restituisce all'uomo il verde, che non è solo sotto l'edificio ma anche e soprattutto sopra.

Tra i giunti delle lastre di copertura viene messo il terreno e seminati erba e piante, che hanno una funzione coibente nei confronti dei piani inferiori e rendono lussureggiante

e vivibile il tetto, dove si può realizzare anche una piscina.

Il tetto giardino è un concetto realizzabile anche grazie all'uso del calcestruzzo armato: questo materiale rende infatti possibile la costruzione di solai particolarmente resistenti in quanto resiste alla cosiddetta trazione, generata dalla flessione delle strutture (gravate del peso proprio e di quanto vi viene appoggiato), molto meglio dei precedenti sistemi volti a realizzare piani orizzontali.”

Infine uno dei primi esempi di architettura moderna in Italia è rappresentato dal verde pensile realizzato da Pietro Porcinai negli **anni 50** per gli uffici della SNAM a **Milano** utilizzando tecniche che erano poco conosciute nell'Italia dell'epoca.

Gli esempi sopra forniti rappresentano tipologie di tetti verdi ancora molto lontani dalla tecnica attuale, seppur molto avanzati per il loro tempo.

Erano stati infatti intuiti i benefici ambientali che i tetti verdi sono in grado di fornire e l'interesse per la componente ambientale, che andò via via ritagliandosi uno spazio nel contesto cittadino, opponendosi alla cementificazione spregiudicata a cui siamo soggetti anche ai giorni nostri.

Al presente però esiste una nuova concezione di tetto verde, la cui tecnica migliorata ha consentito di introdurre nuovi vantaggi ambientali.

1.4.2 Normativa

Con la nuova norma UNI 11235:2007 "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde" viene regolata la procedura per la realizzazione dei giardini pensili, sia nella stratigrafia complessiva sia nelle caratteristiche degli elementi che la compongono, per i requisiti di capacità agronomica, drenante, di aerazione, accumulo idrico e resistenza agli attacchi biologici. (Geoplast)

La norma considera il verde pensile un “sistema tetto” in tutta la sua completezza: vengono presi in considerazione tutti gli elementi che possono comporre una stratigrafia e ne vengono definiti i requisiti minimi. Tra questi elementi i seguenti, definiti primari, devono sempre essere presenti:

- Elemento portante
- Elemento di tenuta all’acqua
- Elemento di protezione all’azione delle radici (integrato o meno)
- Elemento di protezione meccanica
- Elemento di accumulo idrico
- Elemento drenante
- Elemento filtrante
- Strato colturale
- Strato di vegetazione

Per ognuno di questi elementi vengono descritte le tipologie comunemente diffuse allo stato dell’arte e le prestazioni che devono soddisfare. Il valore di ogni caratteristica viene espresso in funzione di una norma di riferimento, che a sua volta definisce le procedure per la determinazione della caratteristica stessa.

Un elemento può svolgere più di una funzione, ad esempio un manto impermeabile idoneo può svolgere sia la funzione di tenuta all’acqua che quella di barriera alla penetrazione delle radici. (ISPRA)

Nella parte iniziale della norma vengono definiti i criteri progettuali di cui nel seguito si riporta una sintesi.

1. **Generalità. Obiettivi e funzioni di una copertura a verde:** Si deve prendere in considerazione il tipo di attività ed i carichi agenti sulla vegetazione, in funzione anche degli oneri manutentivi; influenza sulle prestazioni interne dell’edificio, con particolare attenzione all’isolamento termico; influenza sulle prestazioni esterne dell’edificio: mitigare l’isola di calore, regimare le acque

piovane ed assorbire polveri sottili etc.

2. **Analisi del contesto:** Il contesto è analizzato dal punto di vista climatico e territoriale, in relazione alla definizione dello schema funzionale della copertura e della tipologia vegetativa; la scelta della vegetazione deve tener conto del contesto climatico e delle caratteristiche del sito, per un periodo di ritorno di almeno 20 anni.
3. **Agenti e requisiti.** Gli agenti interferenti sul sistema copertura a verde di cui il progettista deve tenere maggiormente conto sono idrici, biologici, chimici etc.; i requisiti comprendono la capacità agronomica, capacità drenante, resistenza agli attacchi chimici etc.
4. **Elementi, strati ed impianti componenti il sistema:** elementi primari, elementi secondari ed impianti complementari, elementi accessori.
5. **Progettazione degli elementi o strati:** progettazione dell'elemento portante, progettazione dello strato termoisolante, progettazione dello strato colturale, progettazione dello strato di vegetazione, progettazione dell'impianto di irrigazione etc.

1.4.3 Stratigrafia del tetto verde

Considerando tutto il “pacchetto verde”, ovvero l’insieme degli elementi costitutivi del tetto verde, un tetto verde è strutturato in questo modo:

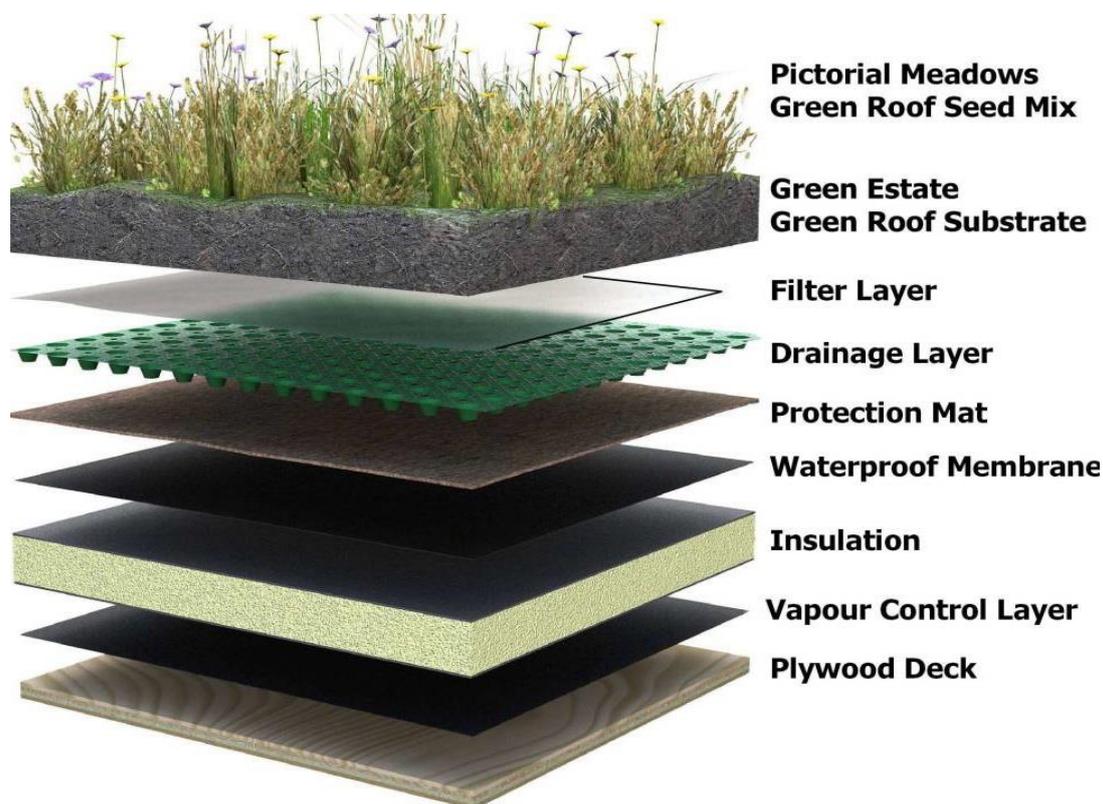


Figura 13 Stratigrafia del tetto verde

Strato di vegetazione

La vegetazione varia a seconda della fascia climatica poiché dipende fortemente dalle temperature, piovosità e altri fattori climatici.

Inoltre a seconda del tipo di copertura che si vuole realizzare, Intensiva o Estensiva, ovvero a seconda della destinazione d’uso, possono essere preferite alcune specie vegetali ad altre.

Substrato colturale

Comprende lo strato dove le piante verranno messe a dimora e dove radicheranno.

È preferibile utilizzare terricci alleggeriti con argilla espansa, pomice, lapillo vulcanico ecc., che oltre a ridurre il peso complessivo dello strato fertile aiutano una maggior radicazione e un maggior deflusso idrico.

La norma UNI 11235:2007 definisce lo spessore minimo raccomandato dello strato colturale in funzione della struttura della vegetazione da impiegare come da tabella seguente:

Vegetazione	Spessore strato colturale (cm)
Sedum	8
Erbacee perenni a piccolo sviluppo	10
Grandi erbacee perenni e piccoli arbusti tappezzanti	15
Tappeti erbosi	15
Arbusti di grande taglia e piccoli alberi	30
Alberi di III grandezza (piccola dimensione)	50
Alberi di II grandezza (media dimensione)	80
Alberi di I grandezza (grandi dimensioni)	100

Tabella 3 Spessore del substrato per tipo di vegetazione

Elemento filtrante

Lo strato filtrante è composto da un filtro che impedisce alle particelle fini di terreno di insinuarsi negli spazi vuoti dello strato drenante, col rischio di intasare e rallentare lo scolo dell'acqua.

Sono richieste bassa degradabilità, resistenza per sopportare il peso della terra e la forza delle radici e flessibilità.

I materiali utilizzati come strato filtrante sono generalmente teli di materiale sintetico o tessuto non tessuto in geotessile.

Elemento drenante

Va scelto un sistema drenante appropriato che permetta all'acqua, che supera certi livelli, di defluire facilmente. Esso è composto principalmente da materiali di origine minerale e strati drenanti in plastica preformati in piastre o rotoli. Tra i materiali di origine minerali troviamo argilla espansa, pomice, ghiaia.

Per quanto riguarda invece i materiali prefabbricati in materiale plastico, sono strutturati in modo che si creino dei vuoti dove l'acqua possa defluire senza problemi.

Elemento di protezione meccanica

È costituito da una stuoia protettiva che garantisce protezione meccanica mediante una membrana impermeabile. Serve ad attutire i colpi dovuti a sollecitazioni meccaniche che avvengono sugli strati superiori, evitando così danni all'impermeabilizzazione.

Elemento di protezione dall'azione delle radici

Per evitare fessurazioni dovuti all'azione scavatrice della radici si predispone una guaina antiradice, prodotta con sostanze sintetiche come PVC e polietilene.

È caratterizzata da una consistenza morbida che le permette di adattarsi ai vari andamenti del piano orizzontale sottostante.

Elemento di tenuta (impermeabilizzazione)

Per una corretta impermeabilizzazione della soletta in cemento, sono predisposte membrane realizzate con bitumi distillati e resine ed elastomeri che ne garantiscono

una maggiore elasticità.

La superficie di appoggio dovrà essere livellata per non creare danni alla membrana, tali da comprometterne l'aderenza.

Possono essere previsti eventualmente anche un elemento per l'isolamento termico e una barriera al vapore.

1.4.4 Tipologie di tetti verdi

La normativa UNI 11235-2007 individua e regola la realizzazione delle due principali tipologie di tetti verdi: Estensivo ed Intensivo.

I **tetti verdi estensivi** sono caratterizzati da uno strato vegetativo simile alla spontaneità della natura e dalla bassa manutenzione. Per questa ragione si devono utilizzare piante che si adattino facilmente alle condizioni climatiche e che siano autorigenerative per poter resistere alle condizioni più estreme presenti sui tetti. Tra i muschi, le succulente e le erbacee vi sono molteplici specie che rispondono a tali requisiti e che hanno un elevato effetto coprente.

Non svolgono la funzione di vero e proprio giardino bensì di solito si comprendono coperture piane o inclinate di elevate dimensioni, prevalentemente di zone industriali o di edifici pubblici o commerciali. Il substrato arriva fino ai 15 cm di spessore.

Un inverdimento estensivo assume quindi la funzione di uno strato protettivo ecologicamente ed economicamente efficace, ad esempio al posto di una protezione in ghiaia. (ISPRA)

Le coltivazioni maggiormente adoperate sono:

- il *sedum*, un inverdimento basso, che viene utilizzato qualora, oltre a un minor peso, fossero richiesti dei costi di manutenzione contenuti. Le specie di *sedum* provate garantiscono, in combinazione con la struttura sistematica corretta, un inverdimento durevole con una cura minima.



Figura 14 Esempio di coltura a *sedum*

Hanno il loro periodo di massima fioritura all'inizio dell'estate. I colori dominanti sono il giallo e il rosso/bianco.

- *prato naturale*, ottenuto per semina a spaglio di una grande varietà di specie erbacee autoctone. In clima sub-mediterraneo soddisfa ottimamente i requisiti energetici idraulici e di biodiversità, con costi di manutenzione molto bassi. Risulta dunque una soluzione ideale per le coperture estensive in tutto il nord e centro della penisola italiana.



Figura 15 *Prato naturale*

- *tappeto di erbacee perenni*, consiste in una soluzione estensiva ottenuta per posa di piante in vaso o in alveolo. Vi sono in Italia molti esempi di tappeti a perenni, soprattutto nella fascia centrale. E' una soluzione di tipo estensivo tecnicamente raccomandabile soprattutto per le zone climatiche più aride, perché possono essere selezionate specie che resistono bene alla siccità. L'impiego di piante in vaso rende questa soluzione piuttosto costosa ma permette anche di gestire in modo efficace l'impatto scenico, avendo il pieno controllo sulla disposizione di ogni singola specie vegetale.



Figura 16 Tappeto di erbacee perenni

Il tipo **intensivo** invece rappresenta il giardino vero e proprio, “classico”, provvisto di prati, cespugli, alberi ed elementi di arredo come a terra.

E' un sistema che richiede sempre regolare manutenzione (sfalci, irrigazione, diserbi, concimazioni). Si impiega un'ampia gamma di specie e associazioni vegetali: tappeti erbosi, cespugli, alberi. Lo spessore del substrato è superiore ai 15 cm e normalmente non supera i 40-50 cm pur potendo, in casi particolari, raggiungere anche i 100, 150 cm o più.

È utilizzato soprattutto su residenze private, anche con tetti con discrete pendenze e prevede le seguenti coltivazioni:

- *prato fruibile*, è l'applicazione più comune nei giardini privati in cui il giardino viene impiegato come spazio ludico. Richiede una continua e costante manutenzione per impedire l'ingresso di piante infestanti, per mantenere alto il valore estetico. Il consumo di acqua per



Figura 17 Prato fruibile

l'irrigazione è elevato soprattutto nei periodi primaverile ed estivo. Lo spessore di substrato relativamente elevato rende le sue prestazioni termodinamiche generalmente buone.

- *orto*, rappresenta un interessantissimo strumento di sostenibilità e viene spesso utilizzato anche per il forte e positivo impatto che può avere sul tessuto sociale, se non altro dal punto di vista psicologico. Richiede un impianto tecnico molto diverso dalle altre tipologie per garantire una



Figura 18 Orto

maggiore resistenza dell'elemento di impermeabilizzazione che altrimenti rischierebbe di venir danneggiato durante le lavorazioni. Lo spessore di substrato è variabile soprattutto in funzione del tipo di ortaggi che si prevede di coltivare.

- *alberi e siepi*, queste piante richiedono in genere spessori di substrato consistenti e un grado di manutenzione elevato. Sono quindi essenzialmente legate alle coperture intensive. In questo caso si raccomanda al progettista di valutare con attenzione i costi di impianto in modo da ridurre, per quanto



Figura 19 Alberi e siepi

possibile, gli spessori di substrato. E' inoltre opportuno utilizzare sempre piante giovani per farle adattare al meglio alle condizioni locali.

1.4.5 Benefici apportati dai tetti verdi

1.4.5.1 Mitigazione dell'effetto isola di calore

L'effetto isola di calore è quel fenomeno che determina un aumento della temperatura nelle aree urbane cittadine rispetto alle zone limitrofe e rurali, e che si manifesta soprattutto di notte.

Il maggior accumulo di calore è determinato da una serie di concause, in interazione tra loro, tra le quali sono da annoverare la diffusa cementificazione, le superfici asfaltate che prevalgono nettamente rispetto alle aree verdi, le emissioni degli autoveicoli, degli impianti industriali e dei sistemi di riscaldamento e di aria condizionata ad uso domestico.

Al contempo, le mura perimetrali degli edifici cittadini impediscono al vento di soffiare con la medesima intensità che viene registrata nelle aree aperte fuori della città: gli effetti eolici possono essere inferiori fino al 30% rispetto alle aree rurali limitrofe, limitando così il ricircolo di aria al suolo e il relativo effetto refrigerante durante la stagione estiva. (Wikipedia, Isola di calore)

Nelle zone urbane, inoltre, il rapporto tra superfici orizzontali e superfici verticali è più basso, ciò inibisce la dispersione di calore tramite irraggiamento termico.

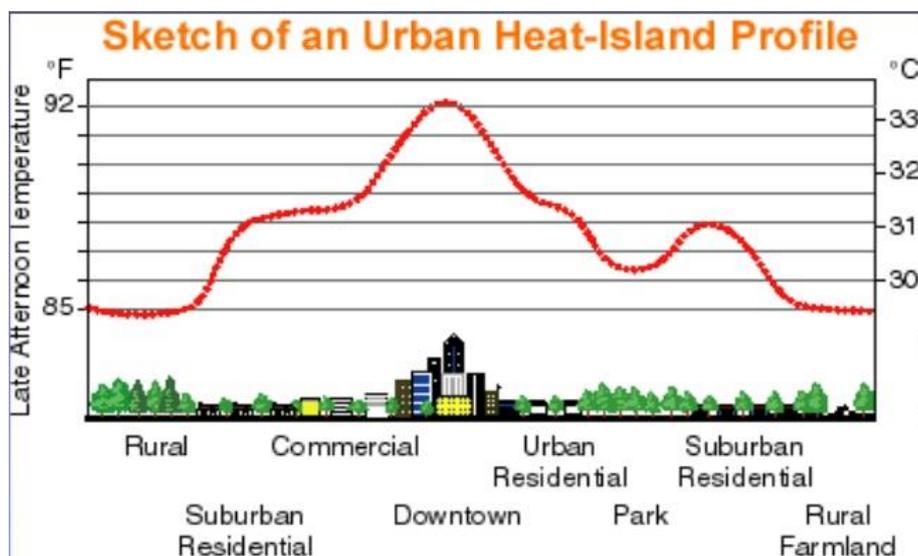


Figura 20 Andamento dello Urban heat island

Tale fenomeno è stato studiato per decenni (Oke, 1982; Arnfield, 2003) e, in seguito alla crescente espansione delle città, le implicazioni ambientali, energetiche e sulla salute dell'effetto isola di calore (Grimm et al., 2008) stanno ricevendo sempre più maggiori attenzioni dagli scienziati, urbanisti e politici.

Sono state proposte diverse strategie di mitigazione dell'effetto isola di calore come l'utilizzo dei *tetti verdi*. Le strategie puntano a ridurre il calore sensibile trasmesso agli edifici e all'aria, con precisi meccanismi.

Un tetto verde aumenta l'*evapotraspirazione* nelle aree urbane, ovvero la quantità d'acqua (riferita all'unità di tempo) che dal terreno passa nell'aria allo stato di vapore per effetto congiunto della traspirazione attraverso le piante e dell'evaporazione, direttamente dal terreno.

Per *traspirazione* si intende la perdita di acqua sotto forma di vapore da parte di un tessuto biologico a contatto con l'ambiente esterno. Negli animali avviene a livello della cute e dei polmoni, mentre nelle piante si ha prevalentemente a livello delle foglie. L'*evaporazione* è il passaggio di stato dal liquido a quello aeriforme (gas o vapore) che coinvolge la sola superficie del liquido.

Fattori che influenzano l'evapotraspirazione sono:

- Temperatura. Sia la traspirazione sia l'evaporazione sono processi che assorbono calore dall'ambiente, pertanto l'evapotraspirazione è più intensa con temperature dell'aria elevate.
- Umidità atmosferica. Il potere evaporante dell'atmosfera cresce all'abbassarsi dell'umidità relativa, perciò l'intensità dell'evapotraspirazione è maggiore in caso di aria secca.
- Sviluppo e portamento della vegetazione. Questo fattore ha un ruolo fondamentale: la superficie degli organi erbacei (foglie e germogli in particolare) è concettualmente una moltiplicazione dell'estensione dell'interfaccia atmosfera-terreno, perciò un notevole sviluppo dell'apparato vegetativo tende a intensificare l'evapotraspirazione. La grandezza di maggiore importanza sotto questo aspetto è l'*indice di area fogliare* (LAI, leaf area index): potenzialmente

l'evapotraspirazione è più intensa nelle piante con LAI elevato. Il LAI dipende da molteplici fattori quali lo sviluppo in altezza della pianta, la direzione delle ramificazioni, la fillotassi, il numero, la dimensione e la forma delle foglie

- Irrigazione. L'irrigazione umettante mantiene il terreno in condizioni d'umidità favorevoli sia alla traspirazione sia all'evaporazione, pertanto intensifica l'evapotraspirazione. Gli effetti variano in relazione al sistema d'irrigazione adottato e alla natura del terreno.

L'evapotraspirazione è un fenomeno che consuma calore e pertanto rinfresca l'aria a contatto con la vegetazione; l'energia necessaria al passaggio di stato è fornita per la maggior parte dalla radiazione solare.

In assenza di questa, l'evaporazione può comunque avvenire utilizzando calore sottratto al suolo o alla massa d'acqua.

È quindi un utile strumento per ridurre la temperatura dell'aria e mitigare l'effetto isola di calore.

In definitiva l'evapotraspirazione è più intensa durante il giorno, nei mesi più caldi e in giornate asciutte e ventose, mentre diminuisce d'intensità durante la notte, nei mesi più freddi, nelle giornate umide, con cielo coperto e in assenza di vento.

Inoltre riduce il *flusso di calore* che dal sole giunge all'interno dell'edificio, isolandolo termicamente.

La trasmissione di calore tra due sistemi a diverse temperature infatti è regolata dalla seguente legge:

$$q_1 = \frac{1}{R_0} \Delta T$$

dove

q_1 = il flusso di calore trasmesso per conduzione attraverso uno strato, W/m²

R_0 = la resistenza termica dello strato, m²K/W

$\Delta T = T_1 - T_2$, la differenza di temperatura alle due facce dello strato, K

Ricoprendo il tetto con la vegetazione, si aumenta la resistenza termica e quindi si riduce il flusso di calore che giunge all'interno dell'edificio, come si può vedere nell'immagine (Wong e. a., 2003)

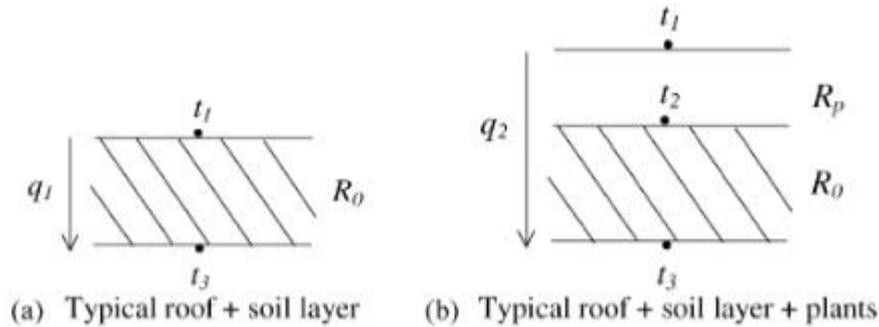


Figura 21 Aumento della resistenza

E quindi l'equazione per il calcolo del calore trasmesso diventa:

$$q_2 = \frac{1}{R_0 + R_p} (T_1 - T_3)$$

dove

R_p = la resistenza termica dovuta alla presenza della vegetazione, m^2K/W

T_1 = la temperatura sullo strato di vegetazione, K

Coibentando in questo modo l'edificio, si ridurrà il consumo energetico, sia nei periodi estivi, riducendo il carico di energia per il condizionamento, ma anche nei periodi invernali, impedendo al calore di dissiparsi all'esterno.

Inoltre si deve tenere conto dell'ombreggiatura fornita dalla vegetazione che riduce il surriscaldamento del substrato sottostante, limitando gli sbalzi termici che si avrebbero in assenza di copertura verde e riducendo la *temperatura superficiale* (Wong e. a., 2003)

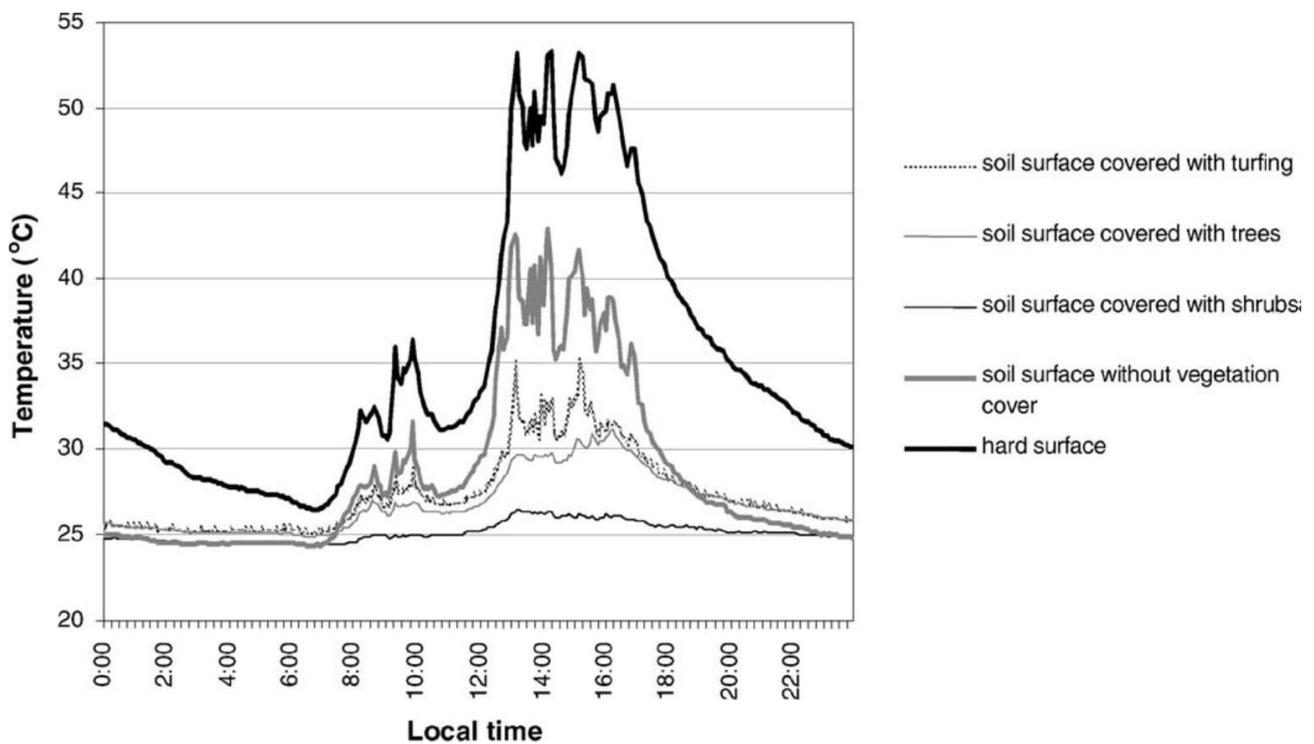


Figura 22 Andamenti della temperatura per diversi tetti, Wong et al., 2003

La riduzione della temperatura superficiale può essere spiegata meglio grazie all'azione di schermatura dei raggi del sole da parte della vegetazione, che rifletteranno una parte della radiazione (grazie a un albedo di 0,26, maggiore rispetto alle superfici in cemento di 0,22 o di 0,13 nel caso di tetti in bitume e pietrisco).

Questi meccanismi possono essere illustrati riferendoci al bilancio di energia monodimensionale alla superficie terrestre, in questo modo:

$$R_n = H + \lambda E + G$$

dove

$R_n = R_g (1 - \alpha) - RL_1 + RL_2$, rappresenta la radiazione netta, ovvero la differenza tra la radiazione globale (diretta e diffusa) e la frazione riflessa dovuta all'albedo e quella riemessa nell'infrarosso più la radiazione a onda lunga uscente intercettata dai costituenti atmosferici a effetto serra e re-irraggiata verso il suolo (radiazione

del cielo), e rappresenta il flusso di energia incidente alla superficie, W/m^2

H = il flusso di calore sensibile ceduto all'aria, W/m^2

λE = il flusso di calore latente nell'atmosfera, risultante dell'evaporazione dal suolo e della traspirazione dalla vegetazione, W/m^2

λ = il calore latente di vaporizzazione, J/kg

E = il flusso di vapore conseguente alla conversione dell'energia radiante direttamente ricevuta dalla massa d'acqua, mm/g

G = il flusso di calore ceduto al suolo, W/m^2

Quando $R_n > 0$, il flusso di radiazione che raggiunge la superficie è maggiore rispetto a quello che lascia la superficie, che pertanto avrà un ingresso netto di energia radiante che sarà ripartita dai tre termini al lato destro dell'equazione.

Tali flussi hanno valori diversi tra il giorno e la notte, variano inoltre a seconda della stagione, delle condizioni meteorologiche, del contenuto d'acqua nel terreno e del tipo di suolo.

Durante il periodo diurno l'energia solare genera una radiazione netta entrante ($R_n > 0$); il surplus energetico risultante viene dissipato per conduzione con il suolo, per convezione sensibile e latente tramite evaporazione.

Durante la notte la direzione dei flussi energetici si inverte ($R_n < 0$, poiché viene a mancare l'energia solare): le radiazioni infrarosse emesse (la terra ha il suo picco di emissione nella banda dell'infrarosso, a causa dell'enorme differenza di temperatura col sole, che emette nel visibile) sono controbilanciate da un apporto di calore sensibile dal suolo, dall'aria e di calore latente tramite formazione di rugiada o brina (il flusso di vapore si inverte: il vapore acqueo contenuto nell'aria a contatto con superfici che si raffreddano condensa in goccioline di rugiada).

Al fine di esaminare la distribuzione di energia tra i flussi, possiamo considerare un terreno coperto da bassa vegetazione, che consideriamo rappresentativo delle aree rurali nell'immagine sottostante (Oke, 1987):

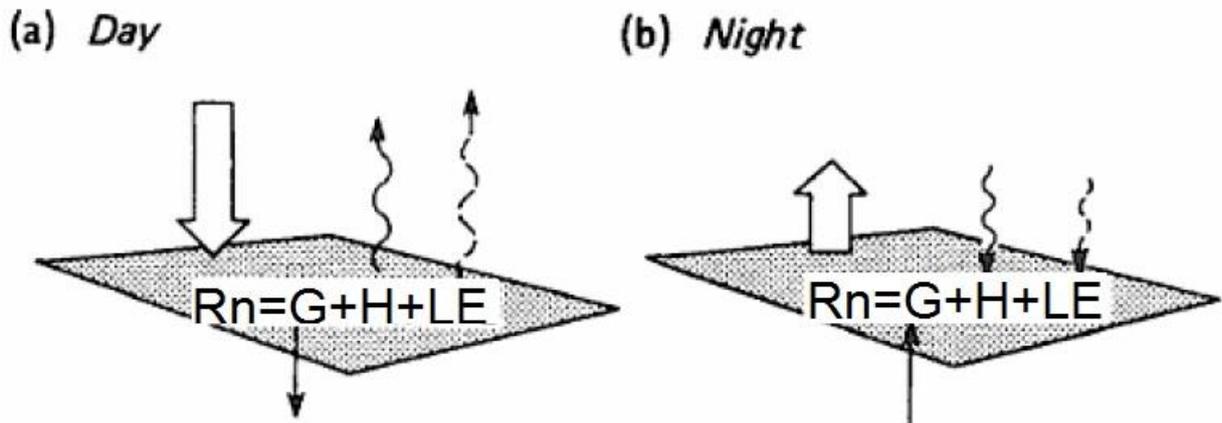


Figura 23 Radiazione netta al suolo, Oke 1987

Il comportamento dei materiali artificiali è però differente da quello di un terreno ricoperto dalla vegetazione, poiché hanno proprietà termiche (inerzia termica, capacità di accumulare calore e conducibilità termica) e radiative (riflessività e emissività) differenti dalla vegetazione.

Secondo Oke (1982) tra le caratteristiche che maggiormente influenzano il comportamento dei materiali vi sono lo stato di umidità (la capacità di accumulo idrico e l'umidità superficiale):

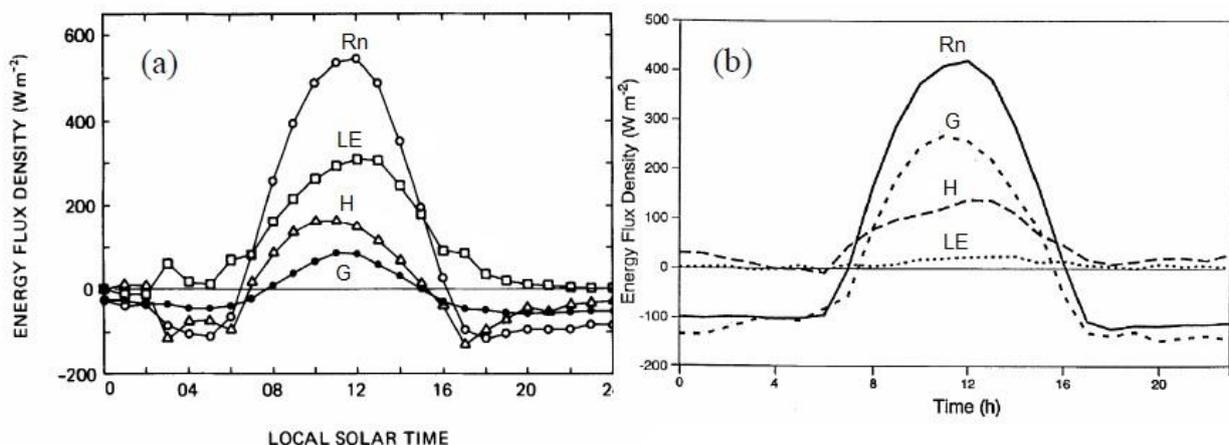


Figura 24 Differenza di flussi termici nel caso campagna (a) e nel caso città (b), Oke 1987

Come è possibile notare, la ridotta presenza della vegetazione nell'area urbana annulla quasi del tutto l'evapotraspirazione λE e massimizza invece il flusso di calore accumulato G , con un conseguente aumento del flusso radiante netto R_n nel caso del contesto urbano di oltre 100 W/m^2 rispetto all'area rurale.

La strategia del tetto verde è quella di aumentare il flusso di calore latente λE relativo al flusso di calore sensibile H per una data radiazione netta R_n .

Inoltre riduce il flusso di calore accumulato dagli edifici G , isolandolo termicamente. Quest'ultimo termine infatti incide soprattutto di notte, quando viene rilasciato il calore accumulato dall'edificio durante il giorno.

1.4.5.2 Miglioramento della qualità dell'aria

Le città contengono spesso alti livelli di inquinanti atmosferici che sono pericolosi per la salute umana.

La American Lung Association (ALA, 2007) ha riportato che oltre 3700 morti annuali premature negli Stati Uniti sono attribuibili a un aumento di 10 ppb dei livelli di O_3 .

A livello globale, la World Health Organization (WHO, 2002) ha stimato che più di un milione di morti annuali premature possono essere attribuite all'inquinamento atmosferico urbano nei paesi in via di sviluppo.

La United Nations Population Fund (UNFPA, 2007) ha previsto a livello globale nelle città la popolazione crescerà dagli attuali 3,3 miliardi a 5 miliardi nel 2030, con la conseguenza che un maggior numero di individui più vulnerabili come bambini e giovani saranno esposti a questi pericolosi livelli di inquinamento.

L'organizzazione mondiale per la sanità ha pubblicato nel 2005 le linee guida per lo standard di qualità dell'aria relativamente a NO_2 , O_3 , SO_2 , PM_{10} .

	NO₂	O₃	SO₂	PM₁₀
WHO Air Quality Guidelines	40 µg/m ³ (anno)	100 µg/m ³ (8 ore)	20 µg/m ³ (24 ore)	20 µg/m ³ (anno)

Tabella 4 Standard di qualità dell'aria per WHO

PM₁₀

Il PM₁₀ è emesso dagli autoveicoli, dagli impianti di riscaldamento civile e dall'industria; a queste fonti si associa una quota di origine naturale o, quanto meno, legata al risollevarimento di polveri provenienti dagli strati superficiali del suolo. Questo ultimo contributo è in parte legato alle attività agricole. Esiste inoltre una componente secondaria che si sviluppa da processi di condensazione di composti presenti nell'aria.

O₃

L'ozono è un gas incolore e inodore, fortemente instabile, composto da tre atomi di ossigeno. E' un inquinante secondario, non viene cioè emesso direttamente da una qualche attività umana ma è il prodotto della reazione tra diversi altri inquinanti responsabili della produzione di smog fotochimico, come gli ossidi di azoto (NO_x) e i composti organici volatili (COV).

Le sorgenti di ossidi di azoto sono concentrate soprattutto nelle aree industrializzate e densamente popolate dove la presenza di agglomerati urbani e di fabbriche incide fortemente sullo stato di inquinamento dell'aria. La fonte di maggior emissione è rappresentata dal traffico veicolare, in particolar modo nei centri urbani, mentre nelle periferie risulta dominante la produzione industriale, in particolare quella delle centrali energetiche a combustione fossile, di una certa entità sono anche i contributi dati dagli impianti di riscaldamento.

L'aumento della concentrazione di ozono costituisce un problema di sanità pubblica in particolare per i gruppi di popolazione maggiormente sensibili quali i bambini, gli anziani, le donne in gravidanza, i soggetti affetti da patologie respiratorie e cardiovascolari. E' il principale inquinante ad azione fitotossica.

NO₂

Il biossido di azoto è un gas tossico dall'odore pungente e con grande potere irritante. E' un composto ossidante e molto reattivo. Il colore rossastro dei fumi di alcune industrie è dato dalla presenza di NO₂ come pure il colore giallognolo delle foschie che ricoprono le città ad elevato traffico.

Rappresenta un inquinante secondario dato che deriva, per lo più, dall'ossidazione in atmosfera del monossido di azoto emesso dalle combustioni ad alta temperatura, come quelle che avvengono nei motori degli autoveicoli o nelle attività di produzione energetica. Il biossido di azoto svolge un ruolo fondamentale nella formazione dello smog fotochimico, miscela di composti inquinanti tipica delle aree inquinate nel corso della stagione calda; gli ossidi di azoto contribuiscono per il 30% alla formazione delle piogge acide.

SO₂

Il biossido di zolfo o anidride solforosa è un gas incolore, irritante, non infiammabile, molto solubile in acqua e dall'odore pungente.

Dato che è più pesante dell'aria tende a stratificarsi nelle zone più basse. Deriva dalla ossidazione dello zolfo nel corso dei processi di combustione delle sostanze che contengono questo elemento sia come impurezza (come i combustibili fossili) che come costituente fondamentale.

Allo stato attuale delle conoscenze, secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità non è possibile fissare una soglia di esposizione al di sotto della quale certamente non si verificano nella popolazione degli effetti avversi sulla salute. Per questo motivo, l'OMS non fornisce un valore guida di riferimento per le particelle, ma indica delle "funzioni di rischio" per i diversi effetti sulla salute.

Tali funzioni quantificano l'eccesso di effetto avverso per la salute che ci si deve aspettare per ogni incremento unitario delle concentrazioni di PM₁₀ o di PM_{2,5}.

In tabella è riportato l'incremento % della frequenza degli effetti sulla salute per un aumento di 10 µg/m³ di PM₁₀; questi dati sono basati sulla letteratura epidemiologica

attualmente disponibile. (ARPA)

EFFETTI SULLA SALUTE	Incremento % della frequenza degli effetti sulla salute per un aumento di 10 µg/m ³ di PM10	Intervalli di confidenza
Effetti a breve termine (acuti)		
Uso di bronco dilatatori	3	2 - 4
Tosse	3	3 - 5
Sintomi delle basse vie respiratorie	3	1,8 - 4,6
Diminuzione della funzione polmonare negli adulti rispetto alla media (picco espiratorio)	- 13	- 0,17 a 0,09
Aumento dei ricoveri ospedalieri per malattie respiratorie	0,8	0,5 - 1,1
Aumento della mortalità giornaliera totale (escluse morti accidentali)	0,7	0,6 - 0,9
Effetti a lungo termine (cronici)		
Aumento complessivo della mortalità (escluse morti accidentali)	10	3 - 18
Bronchiti	29	1 - 83
Diminuzione della funzione polmonare nei bambini rispetto alla media (picco espiratorio)	- 1,2	-2,3 a 0,1
Diminuzione della funzione polmonare negli adulti rispetto alla media (picco espiratorio)	- 1	non valutabile

Figura 25 Effetti sulla salute dei PM10

La vegetazione nelle aree urbane può migliorare la qualità dell'aria attraverso due azioni distinte che esercita sugli inquinanti gassosi e sul particolato:

- Azione diretta, mediante assorbimento (attraverso gli stomi, che accumulano e metabolizzano gli inquinanti) e adsorbimento (attraverso le cuticole) si ha l'effettiva rimozione degli inquinanti.
- Azione indiretta, semplicemente agendo come entità fisica (ostacolo) e modificando la velocità del vento e la turbolenza, influenzando quindi sulla concentrazione locale degli inquinanti atmosferici.

Maggiore è la densità stomatica, lo spessore della cuticola, il LAI e complessità della chioma, maggiore risulterà la quantità di inquinanti rimossi.

Ricerche (Dunnett & Kingsbury, 2004) dimostrano che i tetti verdi possono assorbire il 95% del cadmio, rame e il 16% di zinco. Inoltre 1 m² di erba può rimuovere 0.2 kg di particolato all'anno.

I benefici per la qualità dell'aria saranno evidenti in una specifica zona geografica solo

se è presente un inverdimento massiccio dei tetti. Inoltre i tetti verdi di tipo intensivo, con alberi e ampi cespugli caratterizzati da larghe foglie hanno maggiore effetto sulla rimozione degli inquinanti rispetto ai tetti verdi estensivi che generalmente presentano un fogliame piatto e sottile.

L'inquinamento atmosferico è rimosso dall'aria attraverso tre meccanismi principali: deposizione umida, reazioni chimiche e deposizione secca.

Si ha deposizione umida quando l'inquinante viene inglobato e trascinato dalle precipitazioni. (Oke, 1987)

Le reazioni chimiche tra gas possono creare nell'atmosfera aerosol che sono rimossi con deposizione secca o umida oppure possono subire ossidazioni e dare origine a composti ossidati come la CO_2 .

La deposizione secca è invece quel meccanismo di trasporto senza precipitazioni mediante il quale gli inquinanti gassosi e il particolato si depositano sulle superfici.

Una volta depositato sulla foglia, l'inquinante viene assorbito mediante gli stomi che mettono in comunicazione l'esterno della foglia con gli spazi tra una cellula e l'altra del mesofillo, il tessuto che forma la parte interna della foglia.

L'aria che entra attraverso gli stomi permette la diffusione dell'anidride carbonica in tutte le cellule del mesofillo (Palmieri, 2011).

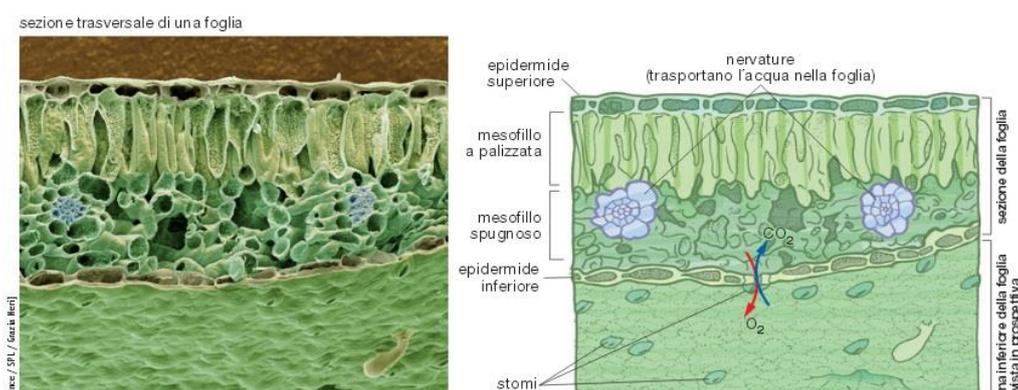


Figura 26 Funzionamento degli stomi, Zanichelli

Gli stomi non servono esclusivamente agli scambi gassosi di anidride carbonica e ossigeno. Una parte dell'acqua che è assorbita dalle radici percorre il fusto ed esce attraverso essi, in forma di vapore acqueo. Questo processo, chiamato

evapotraspirazione, provoca una perdita d'acqua nelle calde giornate estive o quando il suolo è particolarmente secco.

Proprio durante questo processo, quando le foglie traspirano e assorbono CO₂, vengono adsorbiti anche gli inquinanti gassosi e, una volta nella foglia, vengono diffusi negli spazi intracellulari e metabolizzati.

È stato utilizzato un modello di assorbimento a foglia larga per quantificare la deposizione secca degli inquinanti atmosferici.

La rimozione di un particolare inquinante in un certo periodo è calcolato come segue (Nowak, 1994):

$$Q = F \times L \times T$$

dove

Q = quantità di un particolare inquinante atmosferico rimosso da una certa area di tetto verde in un certo periodo (g)

F = flusso di inquinante (g m⁻² s⁻¹)

L = l'area totale del tetto verde (m²)

T = periodo di tempo (s)

Il flusso di inquinante F (deposizione di inquinante sulle superfici fogliari) è calcolato secondo la seguente equazione:

$$F = V_d \times C \times 10^{-8}$$

dove

V_d = velocità di deposizione secca di un certo inquinante atmosferico (cm s⁻¹)

C = concentrazione di quell'inquinante nell'aria (mg m⁻³)

La superficie fogliare rappresenta il parametro chiave per la valutazione dei fenomeni di intercettazione e incorporazione degli inquinanti dell'aria e sulla base di questa è possibile ottenere diverse V_d , a seconda del tipo di inquinante e del tipo di vegetazione. Il valore di V_d è tabulato sulla base di dati di letteratura a seconda del tipo di vegetazione (Yang, 2008):

Pollutants	Vegetation (h_0 in m)	V_d Value (cm s^{-1})	References
SO ₂	Short grass (0.1)	$0.2 \pm 0.1 - 0.4 \pm 0.2$	Sorimachi et al. (2003)
	Grass (0.3)	0.6–0.8	Feliciano et al. (2001)
	Heathland	0.8 ± 0.4	Erismann et al. (1993)
	Grassland	1.2 ± 0.3	Erismann et al. (1993)
	Grassland (0.1–0.8)	0.4–0.7	Pio and Feliciano (1996)
	Deciduous forest	0.48 ± 0.45	Zhang et al. (2002)
	Deciduous forest (22)	0.30–1.04	Finkelstein (2001)
NO ₂	Heathland	0.10–0.35	Coe and Gallagher (1992)
	Grass (0.15)	0.27 ± 0.017	Watt et al. (2004)
	Wheat	0–0.35	Pilegaard et al. (1998)
	Grassland	0.11–0.24	Hesterberg et al. (1996)
	Orchard (2.1)	0.2–0.6	Walton et al. (1997)
	Coniferous forest	0.4	Rondón et al. (1993)
O ₃	Short grass (0.1)	$0.2 \pm 0.2 - 0.4 \pm 0.3$	Sorimachi et al. (2003)
	Grassland (0.22)	0.22–0.36	Stocker et al. (1993)
	Grass (0.1–0.8)	0.1–0.5	Pio et al. (2000)
	Mooreland	0.2–0.7	Fowler et al. (2001)
	Deciduous trees (33)	0.2–1.0	Padro (1996)
	Deciduous forest (22)	0.10–0.75	Finkelstein (2001)
PM ₁₀	Grass (0.06)	0.16–0.12 ($d_p = 5$)	Chamberlain (1967)
	Nature grass (0.3–0.5)	0.22 ± 0.06	Wesely et al. (1985)
	Rye grass (0.75–1)	0.16 ± 0.072 (NGMD = 0.52)	Vong et al. (2004)
	Urban grass (0.1–0.25)	$0.33 - 0.38$ ($d_p = 0.6 - 0.8$)	Fowler et al. (2004)
	Urban woods (25)	$0.7 - 1.07$ ($d_p = 0.6 - 0.8$)	
	Deciduous trees (22)	0.1 ($d_p < 2$)	Hicks et al. (1989)
	Beach (24–25)	0.45 (NGMD ^a = 0.02–0.03)	Pryor (2006)
		0.15 (NGMD ^a = 0.06–0.07)	

^a NGMD is the number geometrical mean diameter (μm).

Figura 27 Valori di V_d per inquinante e vegetazione

1.4.5.3 Riduzione del runoff

Numerosi studi hanno dimostrato quantitativamente che un tetto verde correttamente installato e mantenuto assorbe l'acqua e la rilascia lentamente in un periodo di tempo, al contrario di un tetto convenzionale dove l'acqua piovana viene immediatamente scaricata.

A seconda dello spessore del substrato, un tipico tetto estensivo può trattenere dal 60% al 100% dell'acqua piovana nei mesi estivi (supponendo che questi siano più secchi) e dal 40% al 50% nei mesi invernali (se più umidi).

Naturalmente queste cifre variano a seconda di numerosi fattori: come detto, lo spessore e il livello di saturazione del substrato, il volume e l'intensità delle precipitazioni, la durata del periodo che ha preceduto l'ultimo evento di pioggia (Monterusso, 2003). A dimostrazione di questo, una ricerca condotta da Jennings et al. (2003) nel North Carolina mostra come possa variare la percentuale di acqua trattenuta aumentando la frequenza degli eventi di pioggia, passando dal 75% al 32% (Toronto, 2005):

April 2003 hydrologic retention for the WCC green roof in Goldsboro, NC [after Jennings et al. (2003)]

Storm Event	Rainfall (in)	Green roof Runoff (in)	Retained (in)	% Retained
7 April 2003	0.89	0.22	0.67	75
8-9 April 2003	1.02	0.57	0.45	44
9-11 April 2003	1.63	1.11	0.52	32

Figura 28 Riduzione dell'assorbimento dell'acqua piovana, Jennings et al., 2003

Il runoff può essere modellato nel seguente modo:

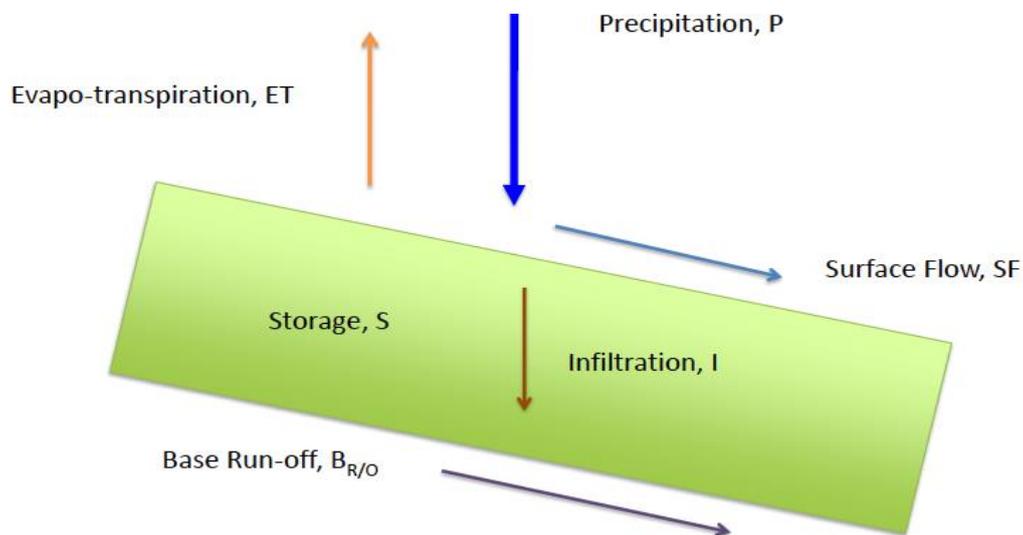


Figura 29 Bilancio idrico dovuto alla precipitazione

$$P = SF + ET + S + B_{R/O}$$

dove

P = volume della precipitazione, mm

SF = flusso superficiale, ciò che non permea nel substrato, mm/(m²*s)

ET = frazione di precipitazione che viene ceduta all'aria mediante evapotraspirazione, mm/m²

S = frazione di precipitazione che, mediante infiltrazione, viene assorbita dal terreno, mm/m²

B_{R/O} = frazione di infiltrazione non assorbita e che quindi defluisce al di sotto del substrato, mm/(m²*s)

Il runoff è quindi dato dalla somma:

$$Runoff = SF + B_{R/O}$$

ovvero la frazione di precipitazione che non viene assorbita dal terreno e che scorre al di sopra o al di sotto dello stesso.

Inoltre, come accennato in precedenza, i tetti verdi agiscono anche sui picchi di runoff, laminandoli e restituendoli nel tempo, oltre che sulla riduzione del volume d'acqua non assorbito, come mostra infatti l'immagine sottostante relativa alle prestazioni del tetto verde della Facoltà di Ingegneria di Bologna, in uno studio del 2014 condotto dall'Ing. Stojkov, Ing. Conte, Prof. Ing. Bonoli e Prof. Ing. Maglionico:

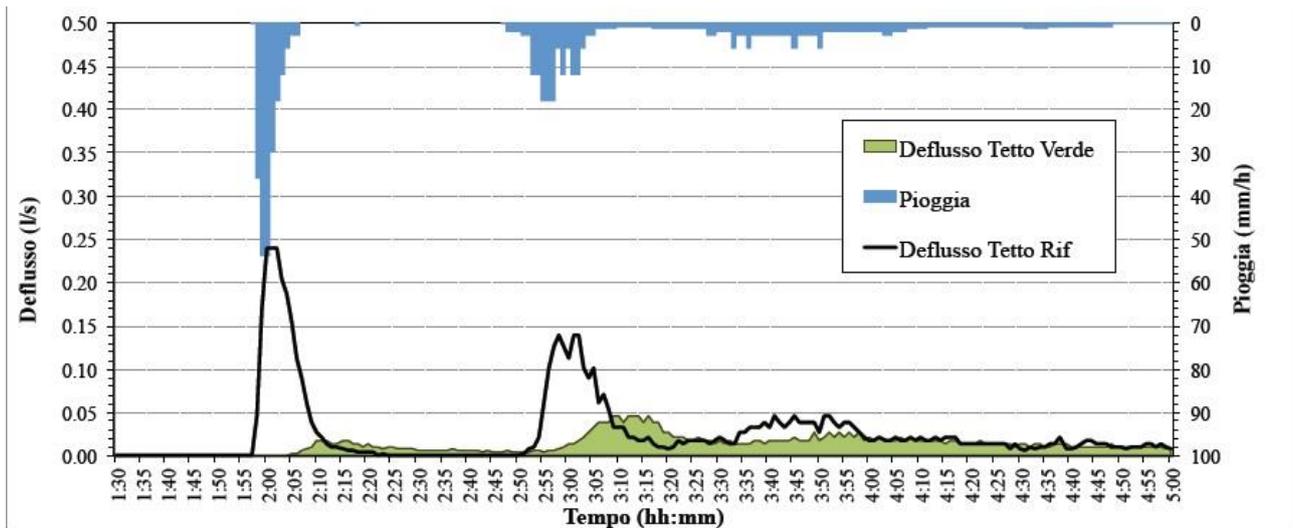


Figura 30 Idrogramma 20/08/2013, Stojkov et al., 2013

L'evento di studio è quello del 20/08/2013 e l'idrogramma mostra la precipitazione misurata (blu) e i deflussi rilevati dalle due aree del tetto attrezzato UNIBO, quella nuda (nero) e quella verde a Sedum.

Si vede come, in particolare per il primo scroscio, la precipitazione è sostanzialmente trattenuta dall'area verde; il successivo evento è ancora ritardato e laminato in misura evidente, sebbene in maniera inferiore rispetto al caso precedente a causa dell'aumento di saturazione del terreno dovuto al primo scroscio (Stojkov, 2012)

Le coperture a verde pensile riducono i picchi di deflusso dalle coperture durante gli eventi piovosi, dilazionando nel tempo le acque di scorrimento grazie ad un effetto di detenzione.

Questa caratteristica è descritta dal *coefficiente di deflusso* ψ .

Il coefficiente di deflusso viene comunemente utilizzato per calcolare la quantità massima di acqua scaricata da una copertura. Per superfici relativamente modeste e sottoposte ad una precipitazione omogenea, si può utilizzare l'equazione razionale

$$Q = I \times \psi \times cr \times A$$

dove

Q = portata d'acqua massima da smaltire per l'intera copertura, m^3

I = intensità di pioggia critica della durata di un'ora con tempo di ritorno di 10 o 30 anni. Tale dato dovrebbe riferirsi ai dati climatici propri dell'area interessata dal progetto, mm/h

ψ = coefficiente di deflusso del sistema a verde pensile utilizzato. Tale valore deve essere certificato da istituti indipendenti.

cr = coefficiente di rischio. Normalmente si considera un valore pari a 2, che può essere elevato a 3 in edifici di pregio.

A = proiezione in pianta della superficie che intercetta la precipitazione, m^2

Il coefficiente di deflusso presenta valori elevati (~ 1) per superfici impermeabili come gli asfalti o i tetti tradizionali, mentre invece è basso ($\sim 0,1$) per prati su suolo profondo. Il coefficiente di deflusso per tetti verdi sarà sicuramente maggiore a causa dello spessore limitato del substrato; generalmente si assumono valori pari a 0,3 per il verde estensivo e 0,5 per il verde intensivo.

2 Casi di studio

Al fine di valutare l'efficienza globale dei tetti verdi, sono stati studiati i casi di alcune città note per l'impegno assunto nell'implementazione delle green technologies nel contesto urbano.

Se esistenti, sono stati studiati i report realizzati dai governi delle città, le cui informazioni relative alle azioni intraprese o previste, ai risultati ottenuti o attesi, alle limitazioni riscontrate sono state riportate in questo lavoro di tesi.

In mancanza, anche frequente, di dati, nel migliore dei casi si è cercato di reperire tali informazioni da pubblicazioni di ricercatori o contattando direttamente i responsabili per l'attuazione dei progetti.

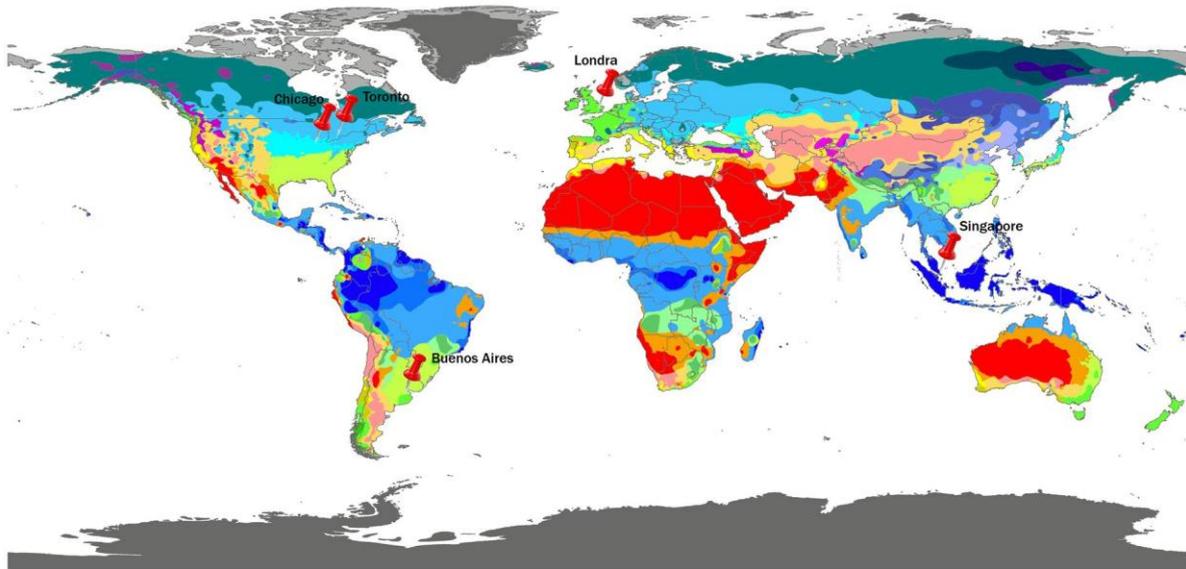
Quando nessuna di queste strade ha prodotto risultati, sono stati applicati i modelli matematici che descrivono i fenomeni relativi ai benefici dei tetti verdi.

Per agevolare la stima dei dati mancanti, sono state fatte ipotesi semplificative, ma che rendono del tutto plausibili i valori ottenuti.

Le città sono state selezionate diversificando le condizioni climatiche, i problemi ambientali, i contesti sociali e culturali, al fine di ottenere un quadro omogeneo, e sono le seguenti:

1. Toronto
2. Buenos Aires
3. Chicago
4. Singapore
5. Londra

Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Köppen–Geiger



Af	BWh	Csa	Cwa	Cfa	Dsa	Dwa	Dfa	ET
Am	BWk	Csb	Cwb	Cfb	Dsb	Dwb	Dfb	EF
Aw	BSh		Cwc	Cfc	Dsc	Dwc	Dfc	
	BSk				Dsd	Dwd	Dfd	

FONTE: Stazione dati GHCN v.2.0
Temperatura (N=4,844) e
Precipitazioni (N=12,396)

PERIODO RILEVAZIONE: tutti i disponibili

RILEVAZIONE MINIMA: 30 per ogni mese

RISOLUZIONE: 0.1 gradi lat/long

Contact : Murray C. Peel (mpeel@unimelb.edu.au) for further information

Figura 31 Mappa delle città per fascia climatica

Per ognuna sono state studiate le condizioni attuali e quelle future, legate alla massima implementazione dei tetti verdi nel contesto urbano, così come previsto dalle città stesse, assumendo l'impegno di fronte alla intera comunità internazionale.

2.1 Toronto, Canada

2.1.1 Geografia



Figura 32 Posizione geografica di Toronto

È una città dell'estremo Sud-Est del Canada, capoluogo della provincia dell'Ontario e centro più popoloso del Canada con i suoi 2.503.281 abitanti.

Toronto è divisa in due città: una a livello della strada, ed una sotterranea chiamata "The Path" (letteralmente: il percorso). I residenti considerano questi 27 km di strade sotterranee come parte della città stessa, come se la città iniziasse non dal suolo ma dal piano -3. Venne creata agli inizi degli anni sessanta perché in inverno, spazzata da venti nordici, Toronto è molto fredda in rapporto la latitudine, mentre sotto ci si può muovere in abiti primaverili, sulle strade superiori, durante straordinarie irruzioni gelide ci

possono addirittura essere temperature di $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ al primo mattino o di sera. Ovviamente il traffico automobilistico convenzionale è bandito nella città sotterranea, gli spostamenti sono previsti a piedi o con mezzi per disabili, ma il path ha numerosi punti di contatto con la viabilità esterna (parcheggi), o (molto più frequentemente) con una fitta rete di stazioni del trasporto pubblico di superficie, o sotterraneo ('subway'). (Wikipedia, Toronto)

Toronto è situata nella regione dei Grandi Laghi, dove vivono circa un quarto dei canadesi, e rispetto alle dimensioni del paese sicuramente non è distante dalla capitale canadese Ottawa che si trova orientata a Nord Est.

La metropoli si affaccia per circa 46 km sul Lago Ontario e copre un'area di 630 km^2 , arrivando a una distanza tra confine nord e confine sud di 21 km e tra est e ovest di 43 km.

I suoi confini sono delimitati dal lago stesso a sud, dalla Highway 427 e dall'Etobicoke Creek a ovest, dal Rouge River a est e dalla Steeles Avenue a nord.

2.1.2 Clima

Il clima di Toronto, data la fortissima continentalità tipica dell'America del Nord, è caratterizzato da inverni quasi rigidi anche se più miti del resto del Canada, con temperature che vanno dai -7°C a 0°C .

Le estati sono, considerata la latitudine, sicuramente miti e un po' variabili, talvolta è intuibile possano presentare periodi particolarmente caldi, con temperature che vanno dai 18°C ai $25\text{-}26^{\circ}\text{C}$.

La piovosità annuale si assesta attorno ai 710 mm di pioggia, ripartita in 450 mm per l'inverno e 260 mm per l'estate.

Le precipitazioni nevose ammontano ai 130 mm l'anno, i mesi in cui nevicata di più sono Gennaio (38 cm) e Dicembre (32 cm).

Riportiamo di seguito una tabella riassuntiva del clima di Toronto:

Clima di Toronto													
Temperature													
Mese	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Media
Massime record °C (°F)	16 (61)	14 (58)	27 (80)	32 (90)	34 (94)	37 (98)	41 (105)	39 (102)	38 (100)	30 (86)	24 (75)	20 (68)	
Massime medie °C (°F)	-1 (30)	-0.2 (32)	5 (40)	11 (52)	19 (65)	24 (74)	26 (80)	25 (78)	21 (69)	14 (57)	7 (45)	2 (35)	13 (55)
Media °C (°F)	-4 (24)	-3 (26)	1 (34)	8 (46)	14 (58)	19 (67)	22 (72)	21 (70)	17 (63)	11 (51)	5 (41)	-1 (30)	9 (49)
Medie minime °C (°F)	-7 (19)	-6 (21)	-2 (28)	4 (39)	10 (50)	15 (59)	18 (64)	17 (63)	13 (56)	7 (45)	2 (36)	-4 (25)	6 (42)
Record minime °C (°F)	-33 (-27)	-32 (-25)	-27 (-16)	-15 (5)	-4 (25)	-2 (28)	4 (39)	4 (40)	-2 (28)	-9 (16)	-21 (-5)	-30 (-22)	
Precipitazioni e ore di sole													
Mese	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Totale
Totale mm (in)	61 (2.4)	51 (2.0)	66 (2.6)	70 (2.7)	73 (2.9)	72 (2.8)	68 (2.7)	80 (3.1)	83 (3.3)	65 (2.6)	76 (3.0)	71 (2.8)	834 (32.8)
Pioggia mm (in)	29 (1.2)	26 (1.0)	42 (1.7)	63 (2.5)	73 (2.9)	72 (2.8)	68 (2.7)	80 (3.1)	83 (3.3)	65 (2.6)	67 (2.7)	42 (1.7)	710 (27.9)
Neve cm (in)	38 (15.0)	27 (10.5)	22 (8.7)	6 (2.4)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0.1 (0.04)	8 (3.2)	32 (12.7)	133 (52)
Ore di sole	88	110	156	185	229	256	276	241	188	148	84	75	2038

Dati registrati a The Annex. I dati sono registrati nell'arco di 30 anni, dal 1971 al 2000^[12].

Figura 33 Tabella climatica Toronto, Wikipedia

2.1.3 Problemi ambientali

I problemi ambientali principali che riguardano la città di Toronto sono lo Urban Heat Island e il Runoff. Naturalmente l'attenzione è posta anche sulla qualità dell'aria e sulla tutela della biodiversità, ma i principali obiettivi dell'applicazione dei tetti verdi nella città di Toronto riguardano la mitigazione dell'effetto isola di calore e la gestione delle acque meteoriche.

Analizziamo nel dettaglio le due problematiche esposte.

2.1.3.1 Urban Heat Island

La città di Toronto è al secondo posto, dopo Vancouver, per l'estensione della superficie e il tasso di crescita nel periodo compreso tra il 1985 e il 2005.

Assumendo come definizione di Urban Heat Island un aumento locale di temperatura di almeno 5°C rispetto alla temperature media della città, la superficie di Toronto era interessata per il 9,84% dall'effetto isola di calore, mentre nel 2005 questo fenomeno

era esteso al 12,86% della superficie totale, il che significa un tasso di crescita pari al 3,02 % in 20 anni.

L'espansione di tale fenomeno è visibile nell'immagine seguente:

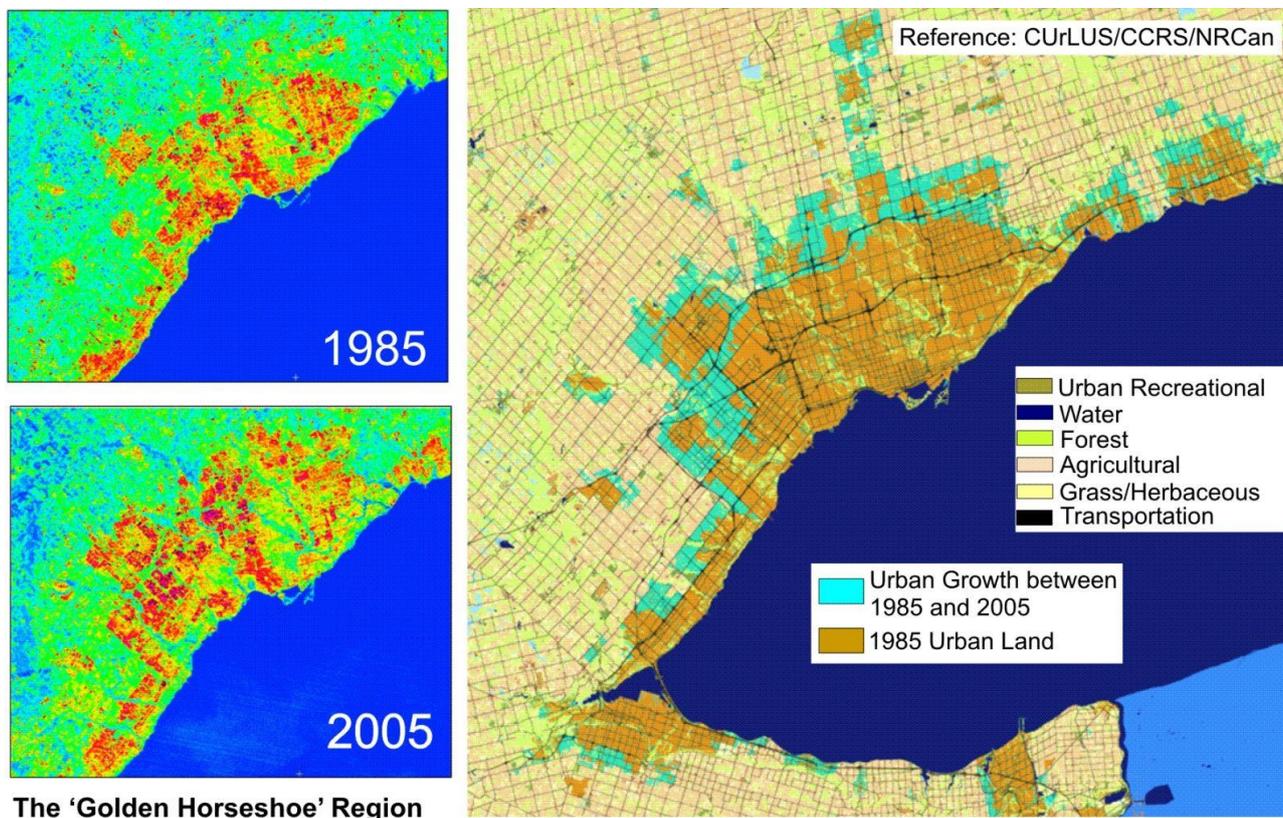


Figura 34 Urban Heat Island Toronto, 1985-2005

Nel 2008 inoltre è stata misurata la temperatura in diverse zone della città.

Lo studio condotto dal Department of Geography, Ryerson University mediante telerilevamento ha evidenziato i seguenti risultati: la temperatura media per le zone commerciali e industriali si assestavano su valori elevati simili ($29,1^{\circ}\text{C}$), mentre sulle zone ricreative come parchi la temperatura era di $25,1^{\circ}\text{C}$ e ancora più bassa sui corpi idrici ($23,1^{\circ}\text{C}$).

Le zone residenziali presentavano temperature medie di $27,5^{\circ}\text{C}$.

I diversi utilizzi del territorio sono stati ordinati secondo andamenti decrescenti di temperature come segue:

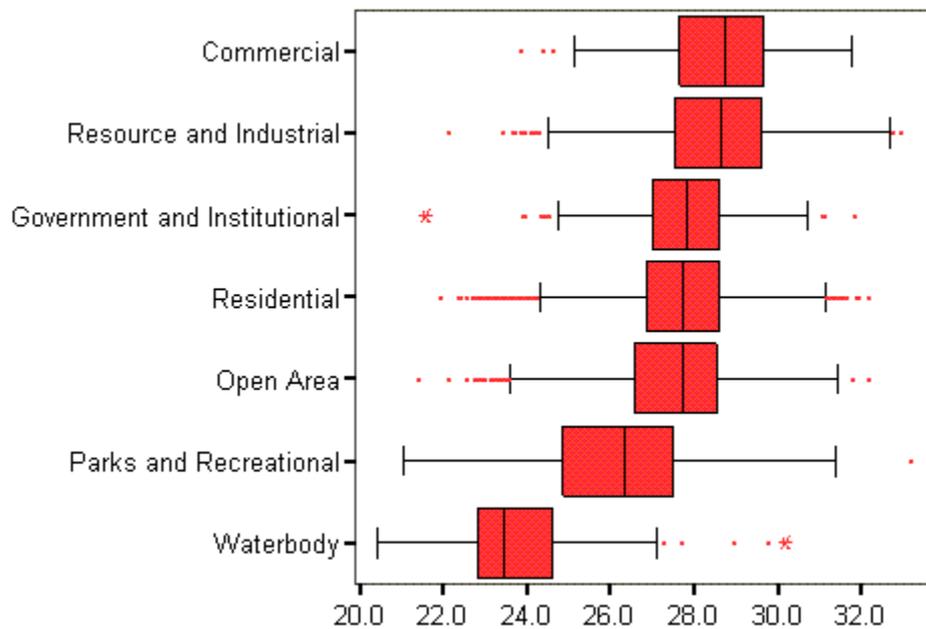


Figura 35 Tipi di occupazioni del suolo a Toronto

Inoltre a seconda dell'estensione dell'area verde, le temperature spaziano dai 25,2°C del Lithuania Park fino a raggiungere i 21,5°C di High Park. (Toronto, 2005)

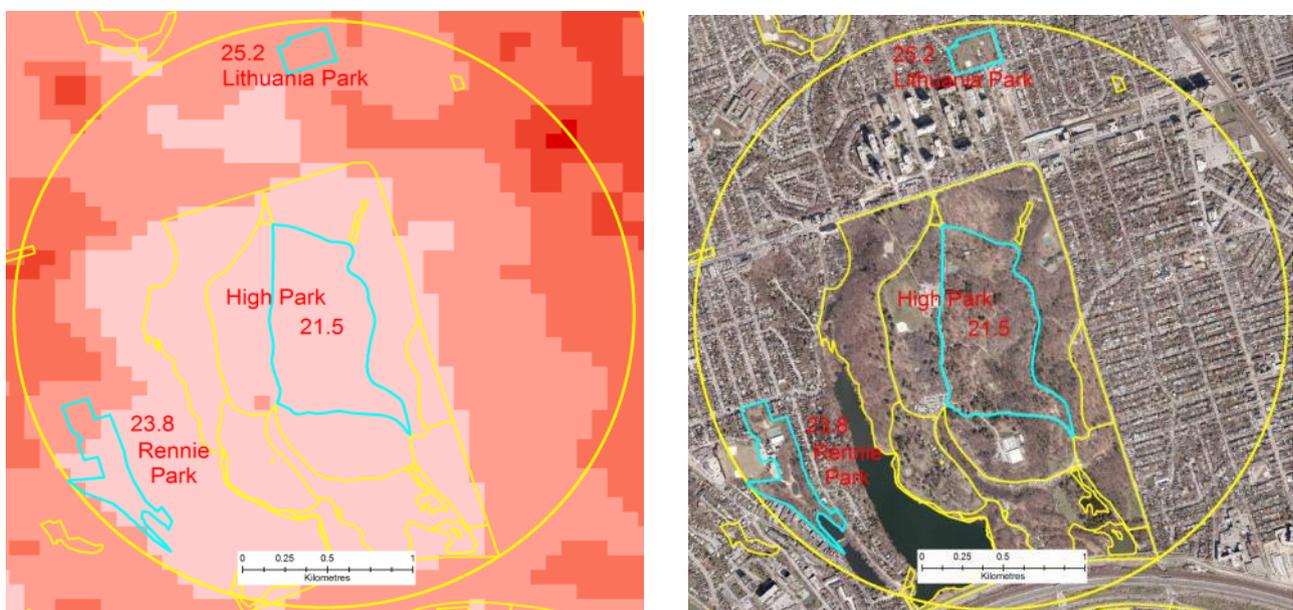


Figura 36 Immagine termica dei parchi di Toronto

Lo studio condotto sulla relazione tra utilizzo del territorio e temperature superficiale ha confermato l'esistenza di temperature più elevate nelle zone commerciali e

industriali rispetto alle zone verdi e rurali.

Tale differenza di temperatura è spiegabile con l'alto tasso di costruzione presente nelle zone industriali, caratterizzate da tetti di cemento, dai colori scuri, e con albedo compresi tra 0.1 e 0.35, bassa emissività e elevata capacità termica.

Inoltre l'assenza di vegetazione è un fattore determinante per l'incremento di temperatura.

2.1.3.2 Inondazioni

In generale le precipitazioni sono limitate nel mese di Febbraio (49.5 mm) e elevate nel mese di Agosto (79.9 mm).

Secondo il report sulla situazione e gestione delle acque, il Wet Weather Flow Master Plan, negli ultimi 20 anni la città di Toronto è stata vessata da 4 eventi principali di inondazioni. Il più significativo è avvenuto nell'Agosto del 2005, quando più di 150 mm d'acqua caddero in meno di 3 ore.

L'ultimo di questi è avvenuto l'8 Luglio 2013, quando sulla città caddero 100 mm d'acqua in poche ore, creando notevoli disagi alla popolazione che rimase senza corrente elettrica per molte ore e i treni della metropolitana rimasero intrappolati nei tunnel.



Figura 37 Inondazione del 08 luglio 2013 a Toronto

Il Wet Weather Study del 2003 ha introdotto il parametro **URF** (m³/ha) di un certo tipo di utilizzo del terreno, ovvero il *runoff annuale* da un ettaro di area drenante.

Assumendo che il processo di runoff sia lineare, il runoff totale può essere calcolato moltiplicando l'area per il corrispondente URF.

È stato quindi calcolato il runoff annuale in volume per i diversi utilizzi del territorio.

Di seguito riportiamo i principali:

Tipo di impiego del territorio	Runoff (m³/ha)
Commerciale	6019
Industriale	5260
Residenziale	1897
Parchi	875

Tabella 5 Runoff per i vari tipi di utilizzo del suolo a Toronto

Le URF sono state stimate in due modi:

- adottando la URF generate nel caso studio Highland Creek se c'è una corrispondente categoria di utilizzo del territorio; o
- mediando le URF generate nel caso studio di Highland Creek se ci sono categorie di utilizzo del territorio simili.

È evidente come specialmente per le zone commerciali e industriali il runoff sia significativo e come invece le zone verdi svolgano la funzione di “spugna” per le acque meteoriche, riducendone sensibilmente lo scivolamento.

2.1.3.3 Inquinamento atmosferico

L'inquinamento atmosferico non è tra i principali problemi ambientali di Toronto, così come mi è stato confermato per email da Shayna Stott della City Planning Division di Toronto.

Le concentrazioni annuali dei principali inquinanti presenti sono comunque a disposizione sul sito del Government of Canada, di cui riportiamo i seguenti valori:

	NO₂	SO₂	O₃	PM₁₀
Concentrazione inquinante (µg/m³)	28,2	4,45	64	7

Tabella 6 Concentrazione degli inquinanti a Toronto

Toronto presenta una delle più alte concentrazioni di O₃ in Canada, seguita da Calgary, mentre molto basse sono le concentrazioni di SO₂.

2.1.4 Azioni intraprese dalla città di Toronto e benefici attesi

Dagli anni '90 l'interesse per i tetti verdi ha preso sempre più piede nella città di Toronto, a partire da un gruppo di volontari, il Rooftop Garden Resource Group (RGRG), e coinvolgendo in seguito associazioni no-profit e infine l'amministrazione comunale stessa.

Toronto è l'unica città del Nord America ad aver sviluppato e approvato nel maggio 2009 una **legge locale** per richiedere e controllare l'installazione di tetti verdi sugli edifici di nuova costruzione.

La legge si applica ai nuovi edifici residenziali, commerciali e istituzionali costruiti dopo il 31 Gennaio 2010 e verrà applicata ai nuovi edifici industriali costruiti dopo il 30 aprile 2012 che abbiano almeno una superficie di 2000 m², che dovrà essere ricoperta tra il 20-60%, a seconda della dimensione del tetto.

È inoltre previsto un programma di incentivi per incoraggiare la costruzione di tetti

verdi, **City's Eco-Roof Incentive Program**:

- I progetti idonei per tetti verdi riceveranno \$75/m² fino a un massimo di \$100,000.
- I progetti idonei per cool-roofs riceveranno \$2-5/m² fino a un massimo di \$50,000.

I tetti verdi dovranno seguire lo standard definito nel **Toronto Green Roof Construction Standard Supplementary Guidelines**, che fornisce le linee guida per la progettazione, costruzione e manutenzione dei tetti verdi ed impone, ad esempio, uno **spessore del substrato** di almeno 100 mm.

Il tipo di vegetazione più utilizzato è il **sedum**, in quanto la coltura deve richiedere bassa manutenzione ed essere tollerante anche a lunghi periodi di siccità al fine di minimizzare l'irrigazione.

Come conseguenza delle legge e degli incentivi, dal 1 Febbraio 2010 a 1 Marzo 2015 sono stati costruiti 260 tetti verdi per una superficie totale di 196000 m².

Ad oggi il conteggio totale dei tetti verdi nella città di Toronto è di 444, con una distribuzione visibile nell'immagine seguente:

Green Roofs in the City of Toronto

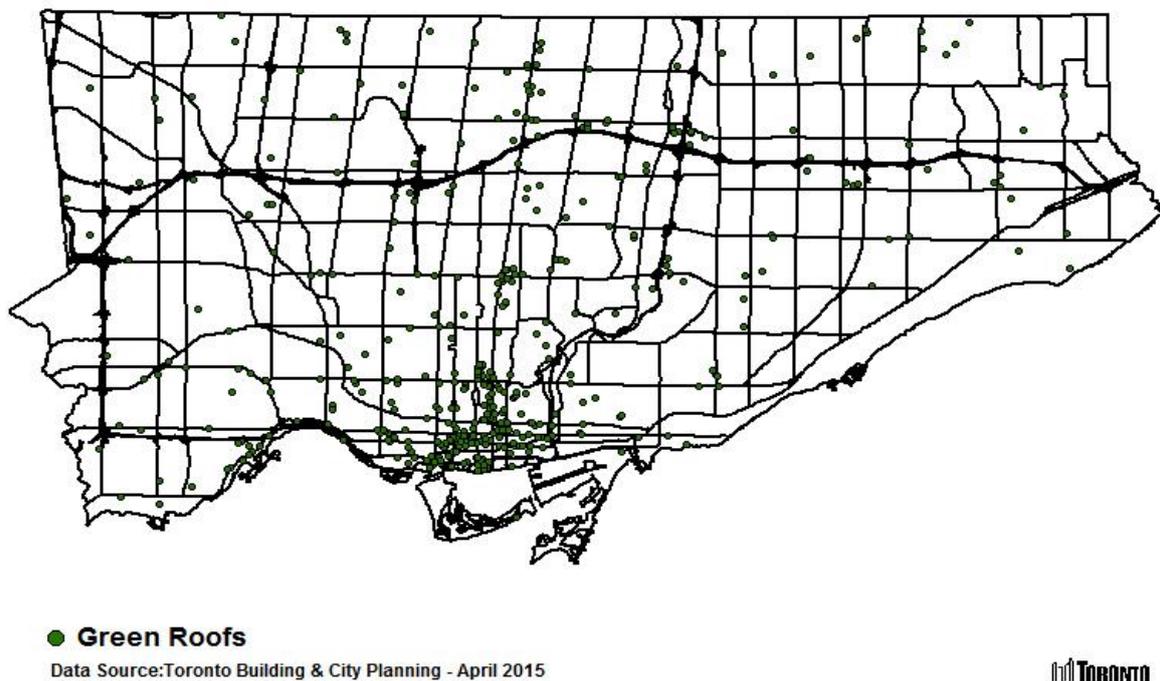


Figura 38 Distribuzione attuale dei tetti verdi a Toronto

Nel 2005 il team di ricercatori della Ryerson University della città di Toronto ha compiuto una meticolosa indagine per indagare quali siano i costi e i benefici derivanti dall'applicazione massiccia dei tetti verdi nella città di Toronto.

Il team della Ryerson ha inoltre sviluppato un metodo per quantificare da un punto di vista economico tali benefici.

Dei tanti benefici riportati nello studio, quelli più quantificabili riguardano: l'attenuazione del runoff in seguito alla precipitazione di acque meteoriche, riduzione dell'effetto isola di calore e quantificazione del conseguente risparmio energetico, miglioramento della qualità dell'aria.

Lo studio in cui si analizzavano i benefici apportati dai tetti verdi per la città di Toronto è stato condotto sotto le seguenti ipotesi:

1. Sono stati considerati tetti verdi “piatti”, ovvero caratterizzati da basse pendenze, meno del 2%. Questa scelta è stata dettata dal fatto che l’applicazione dei tetti verdi a superfici con elevate pendenze non è molto comune e inoltre è difficile applicare i risultati di un tetto piatto a un tetto con elevate pendenze.
2. I tetti verdi saranno installati su superfici di almeno 350 m², in quanto su edifici con tetti a basse pendenze sono spesso installate apparecchiature per il riscaldamento, raffrescamento e ventilazione e pertanto è stato stimato che in media tali coperture presentano una superficie di 350 m².
3. Sono stati esclusi dallo studio gli inverdimenti per i parcheggi sotterranei o spazi al livello stradale in quanto non è semplice identificare e misurare i benefici apportati dai tetti verdi in questione.
4. I tetti verdi installati devono occupare almeno il 75% dell’area al suolo del tetto.
5. I benefici analizzati sono stimati sull’uso di tetti verdi estensivi con l’utilizzo di *sedum*. L’uso dei tetti verdi intensivi producono effetti che sono strettamente dipendenti dal progetto e dal layout dello stesso. Questa assunzione comporta maggiori benefici sociali e ambientali a livello comunale.

L'area totale disponibile per l'inverdimento è mostrato in tabella:

Categoria	Area in ettari (% area totale della città)
Area totale della città di Toronto	63175
Area totale dei tetti	13478 (21%)
Area totale dei tetti disponibile per inverdimento (almeno 350 m ² e che copre il 75% dell'area al suolo)	4984 (8%)

Tabella 7 Percentuale dei tetti verdi rispetto l'area totale di Toronto

2.1.4.1 Mitigazione della Urban Heat Island e Risparmio energetico

La **riduzione della Urban Heat Island** della città è possibile solo grazie all'impiego massiccio e su larga scala dei tetti verdi. Un impiego sporadico non produrrà alcun effetto.

Per quantificare la riduzione della Urban Heat Island sono stati esaminati due studi: uno del Ministry of the Environment Climate Adaptation Group e lo studio del Lawrence Berkeley Laboratory.

Basandosi su questi studi, la Ryerson University ha calcolato che da un utilizzo su larga scala dei tetti verdi, ovvero il 100% dell'area disponibile dei tetti, deriva una riduzione locale di temperatura compresa tra 0,5°C e 2°C, a seconda del periodo dell'anno, riducendo, indirettamente, i consumi dell'energia di 2,37 kWh/m².

Calcolando invece la **riduzione di consumi** che deriva direttamente dall'impiego della vegetazione, ovvero grazie al suo effetto coibente, la Ryerson University ha stimato i seguenti valori:

Categoria di risparmio	Valore del risparmio
Risparmio di energia per m ² di area di tetto verde	4.15 kWh/m ² /anno
Risparmio di energia totale (100% area disponibile)	206836 MWh/anno

Tabella 8 Risparmio energetico a Toronto

2.1.4.2 Riduzione del Runoff

Modellare la riduzione del runoff ha richiesto uno studio esteso a tutti gli spartiacque della città di Toronto.

Nel 2004 la Toronto and Regions Conservation Authority (TRCA) ha commissionato a Marshall Macklin and Monaghan Ltd. e Aquafor Beech Ltd. di analizzare la riduzione del runoff dovuto all'impiego dei tetti verdi nello spartiacque di Highland Creek.

È stato utilizzato HSPF model basato sul parametro URF, utilizzato già nel Toronto Wet Weather Study del 2003. La URF di un certo tipo di utilizzo del terreno è il runoff annuale da un ettaro di area drenante.

Avendo assunto che il fenomeno del runoff sia lineare, il runoff totale è stato calcolato moltiplicando l'area con il corrispondente URF.

Le URF per gli altri spartiacque di Toronto sono state determinate separatamente usando HSPF, assumendo che la URF di Highland Creek possa essere usata per rappresentare l'intera città.

La figura sottostante mostra le categorie di utilizzo del terreno e il runoff annuale con e senza tetti verdi per i diversi utilizzi del territorio in uno spartiacque:

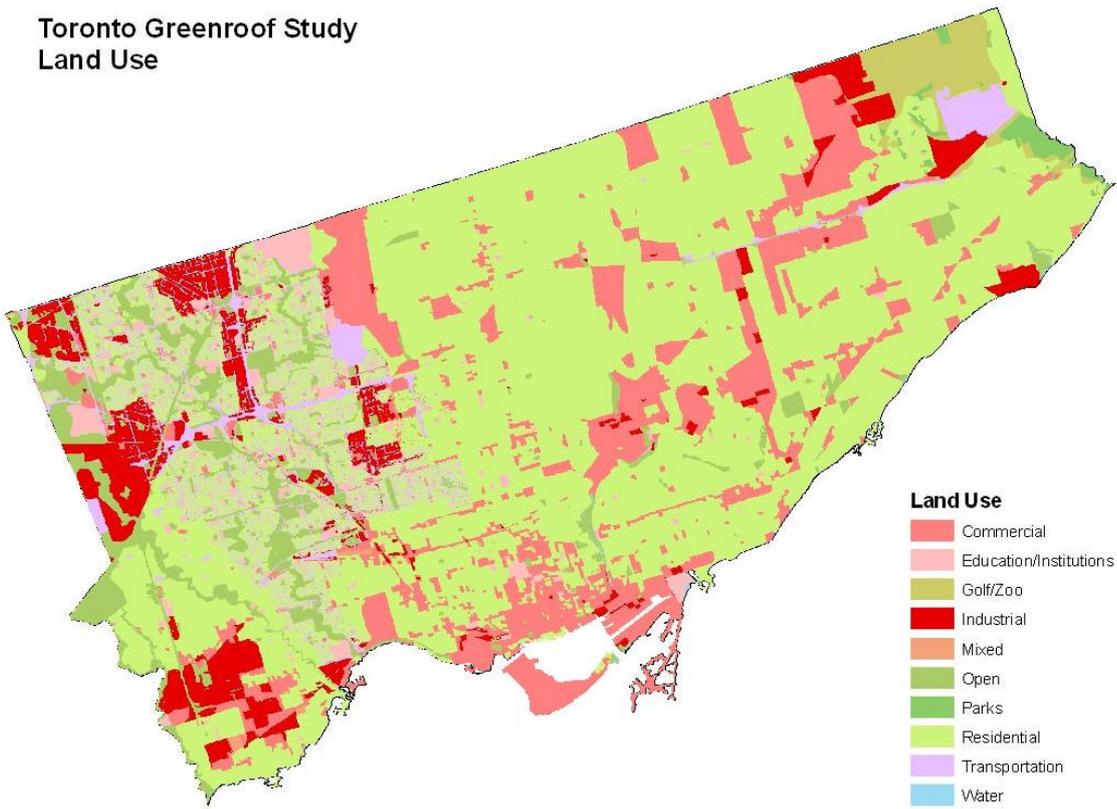
LANDUSE CODE	DESCRIPTION	RUNOFF-NO GREENROOF m ³ /ha	RUNOFF-WITH GREENROOF m ³ /ha
C	Commercial	6019	4913
CBB	Commercial Bigbox	6223	5067
CDT	Commercial Downtown	6019	4913
CI	Commercial-industrial	5742	4912
CR	Commercial-residential	4054	3480
CSM	Commercial Strip Mall	6210	5063
EIS	Educational/Institutional	2222	1827
GC	Golf Course	653	534
GS	Greenspace: parks	875	729
I	Industrial	5260	4757
IBB	Industrial Bigbox	5260	4757
IN	Resource-Industrial	4571	4070
IPR	Prestige Industrial	4571	4070
IR	Resource-Industrial	2723	2400
MIX		2222	1827
OGC	Open Space -golf	653	534
OHC	Open hydro corridor	875	729
OPL	Open Space/Park Land	875	729
OPL	Open TRCA land	430	339
OVL	Open Valley Lands	430	339
PK	Park	875	729
R	Residential	1897	1897
RES	Residential, open area	1254	1254
RHD	Residential High Density	2415	2415
RHR	Residential High Rise	3305	3060
RLD	Residential Low Density	1254	1254
RMD	Residential Medium Density	1897	1897
RS	Residential, open area	1254	1254
RT	Commercial	6019	4913
SC	Government-Institutional,	1254	1254
SPC	STP, Park, commercial-industrial	2501	2205
TA	Government-Institutional,	1254	1254
TAP	Downsview airport	1386	1313
THC	Highway Corridors	1078	1078
UNK	Roadways	1078	1078
W	Water	0	0

Figura 39 Riduzione del runoff per ogni tipo di edificio a Toronto

Queste URF sono state stimate:

- adottando la URF generata nel caso di studio di Highland Creek se c'è una corrispondenza nell'utilizzo del territorio; o
- mediando le URF generate nel caso di Highland Creek se ci sono utilizzi del territorio simili. (Toronto, 2005)

Toronto Greenroof Study
Land Use



Toronto Greenroof Study
Runoff Reduction due to
Greenroof Implementation,
by Watershed

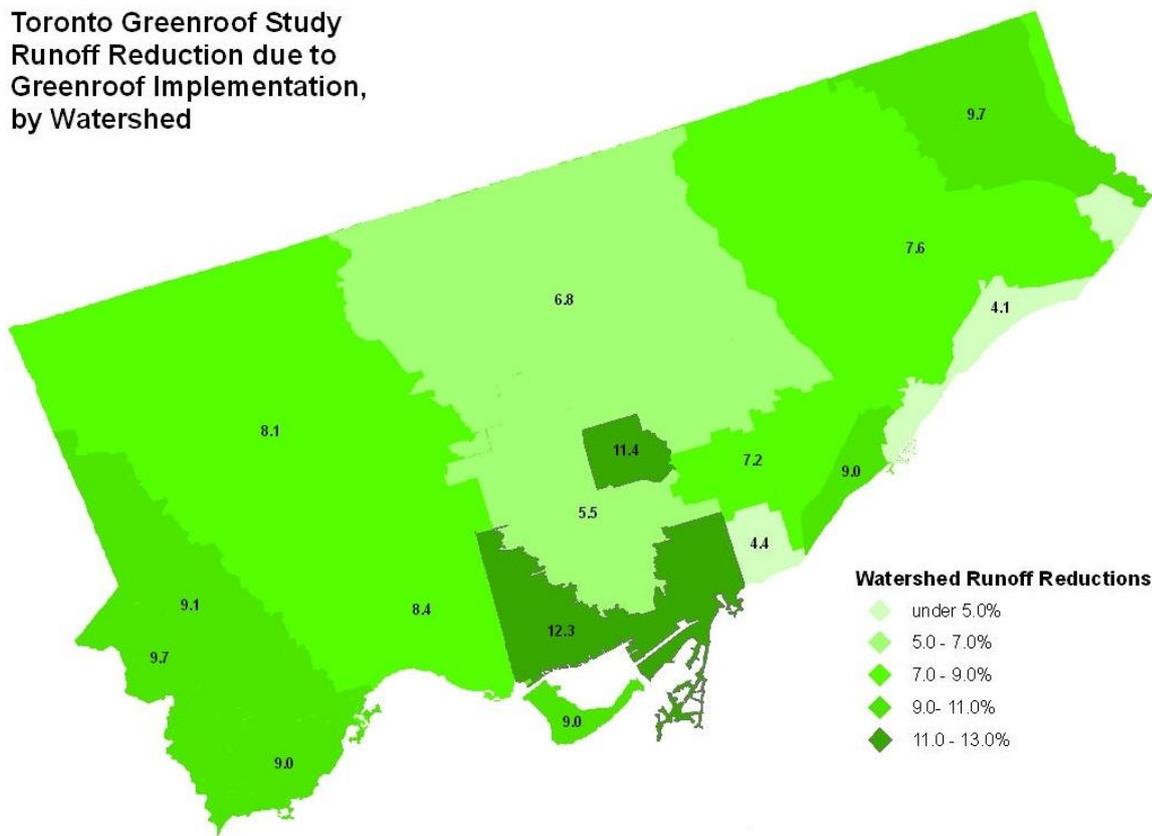


Figura 40 Riduzione del runoff per ogni bacino a seconda dell'utilizzo del suolo a Toronto

Dall'immagine è possibile notare i benefici nell'assorbimento delle acque meteoriche mediante l'utilizzo dei tetti verdi ipotizzato dalla città di Toronto.

Dal calcolo effettuato con HPSF è stata rimata una **riduzione del runoff annuale di 12680769 m³/anno**, ovvero una riduzione del **8%** del runoff totale dovuto alle piogge.

2.1.4.3 Miglioramento della qualità dell'aria

Il miglioramento della qualità dell'aria è stato calcolato sulla base dello studio condotto da Currie nel 2005.

In tale studio è stato impiegato il modello Urban Forest Effects Model (UFORE) che ha quantificato gli effetti della vegetazione sugli inquinanti presenti in aria (O₃, SO₂, NO₂, CO, PM₁₀) basandosi su dati raccolti in un anno dalle 3 stazioni meteo locali nella città di Toronto.

Mappando l'estensione della vegetazione apportata dai tetti verdi attraverso la città, questi risultati sono stati estrapolati per mostrare dove aspettarsi un abbattimento degli inquinanti e quanto significativo.

Currie usò un'area di studio di 1215,4 ha. Di questa il 9% era in grado di ospitare un tetto verde (109,386 ha). La riduzione di inquinanti stimata con UFORE-D model è associata a tetti erbosi ed è mostrata in tabella:

	CO	NO₂	O₃	PM₁₀	SO₂
mg per 109,386 ha di area di tetto verde per anno	0,35	1,6	3,14	2,17	0,61

Tabella 9 Rimozione degli inquinanti per Currie, 2005

Per valutare la rimozione degli inquinanti da parte della vegetazione è stato applicato il modello matematico di Nowak, che riportiamo di seguito:

$$Q = F \times L \times T$$

dove

Q = quantità di un particolare inquinante atmosferico rimosso da una certa area di tetto verde in un certo periodo (g)

F = flusso di inquinante ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

L = l'area totale del tetto verde (m^2)

T = periodo di tempo (s)

Il flusso di inquinante F (deposizione di inquinante sulle superfici fogliari) è calcolato secondo la seguente equazione:

$$F = V_d \times C \times 10^{-8}$$

dove

V_d = velocità di deposizione secca di un certo inquinante atmosferico (cm s^{-1})

C = concentrazione di quell'inquinante nell'aria (mg m^{-3})

Il calcolo ha fornito i seguenti risultati:

Toronto (Area Tetti verdi 49840000 m²)				
	NO₂	SO₂	O₃	PM₁₀
Concentrazione inquinante ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	28,2	4,45	64	7
V_d (cm/s)	0,11	0,6	0,2	0,16
Portata inquinante rimossa (g/anno)	48755,82	41965,84	201184,5	17603,65

Tabella 10 Rimozione inquinanti a Toronto con Nowak

Per i valori di V_d è stato scelto in via conservativa e anche per mancanza di dati la vegetazione di tipo “Grass”, che a rigor di logica dovrebbe ricoprire in maniera prevalente i tetti rispetto alle altre tipologie di vegetazione.

Infine sono stati considerati i secondi in un anno ($T=31536000$ s) per ottenere la stima della portata rimossa in g/anno.

2.2 Buenos Aires, Argentina

Buenos Aires è la capitale e la maggiore città dell'Argentina con 2.891.082 abitanti (13 milioni nell'area metropolitana). È una delle più grandi metropoli sudamericane e sede di uno dei maggiori porti del continente. È la seconda città in Sudamerica per importanza economica dopo San Paolo del Brasile.

2.2.1 Geografia



Figura 41 Posizione geografica di Buenos Aires

La città di Buenos Aires sorge sulle sponde del rio de la Plata e del Riachuelo che confluisce nel rio de la Plata nel quartiere della Boca.

Buenos Aires non appartiene alla provincia omonima: questa circonda la città estendendosi per una superficie simile a quella dell'Italia, ed ha come capoluogo la città di La Plata. Il confine tra la capitale e la provincia è marcato dall'Avenida General Paz, un'autostrada che fa da circonvallazione alla città, e dal Riachuelo.

2.2.2 Clima

In quest'area a sud del Gran Chaco, che comprende l'estuario del Rio della Plata, il clima è sub-tropicale umido, con inverni miti (grazie alla vicinanza al mare) e più secchi ed estati umide e calde. Poiché è situato nell'emisfero australe, le stagioni sono invertite rispetto a come le conosciamo noi, infatti c'è caldo da Novembre a Febbraio e freddo nei mesi estivi.

A Buenos Aires le temperature medie estive (Novembre-Marzo) sono comprese tra massimi di 30°C (Gennaio) e minime di 20°C.

Il mese più freddo è Luglio, con massime di 14°C e minime di 7°C.

Nella capitale non nevica quasi mai: si registra neve con accumulo un paio di volte al secolo.

Le precipitazioni medie annue si assestano attorno ai 1200 mm, e i mesi più piovosi sono Marzo (155 mm) e Ottobre (140 mm), i periodi più secchi sono invece Giugno e Luglio con circa 50 mm di pioggia ciascuno.

Riportiamo di seguito una tabella riassuntiva:

Parametri climatici medi di Buenos Aires													
Mese	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Anno
Temperatura massima media (°C)	29	27	26	22	18	15	14	16	18	21	24	27	21
Temperatura minima media (°C)	17	17	15	11	8	5	5	6	7	10	12	16	11
Precipitazioni (cm)	10	10	10	8	7	5	5	6	10	9	8	16	97

Fonte: Weatherbase 2011

Figura 42 Tabella climatica di Buenos Aires, Wikipedia

2.2.3 Problemi ambientali

2.2.3.1 Inondazioni

Le inondazioni sono uno dei principali problemi ambientali nella città di Buenos Aires e la loro frequenza è aumentata nel corso degli ultimi 10 anni. Questa situazione è coerente con l'ipotesi di un possibile aumento della piovosità dovuto al cosiddetto

“cambiamento climatico”.

Le cause scatenanti delle inondazioni sono: abbondanti o eccessivamente prolungate precipitazioni (piogge convettive) e le “sudestadas”, fenomeno idro-metereologico associate alla presenza di venti dal quadrante sud-est che spinge le acque del Rio de la Plata verso le coste della città. Ciò produce una “spinta idraulica” che impedisce il normale drenaggio dei corsi d’acqua nel Rio de la Plata. Le odierne ipotesi legate al cambiamento climatico globale potrebbero amplificare questo pericolo.

La città di Buenos Aires è stata fondata sulla gola del Rio de la Plata, su un ampio terreno pianeggiante con bassa pendenza. L’area è stata drenata da una serie di piccolo ruscelli, tipici di una zona bassa: erano corti e con percorso tortuoso. Alcuni di loro scorrono ancora nelle vicinanze delle strade, altri sono spariti con l’urbanizzazione.



Figura 43 Posizione di Buenos Aires sul Rio de la Plata

All'inizio del XX secolo, il processo di espansione della città accelerò notevolmente e le caratteristiche geomorfologiche originali cominciarono a scomparire. Le aree più basse vennero riempite e la gola scoscesa del Rio de la Plata venne appianata. Inoltre, la linea costiera del Rio de la Plata cambiò, come conseguenza del continuo avanzamento della città verso il fiume.

Il naturale sistema di drenaggio della città, formato dai bacini dei ruscelli sopra menzionati, furono resi progressivamente impermeabili.

Pertanto in occorrenza delle piogge prolungate e abbondanti che si verificano nel periodo da Novembre a Marzo, l'acqua tende naturalmente a scorrere verso i bacini originali che esistono ancora al di fuori della città.

Il sistema di drenaggio artificiale, obsoleto e non mantenuto, non ha la capacità di drenaggio richiesta per condurre le acque meteoriche, provocando quindi allagamenti nelle zone più basse e nelle strade.

I due possibili impatti del cambiamento climatico a Buenos Aires sono l'innalzamento del livello del mare e l'incremento delle precipitazioni annuali. Entrambe darebbero come risultato un aumento della frequenza e dell'intensità delle inondazioni.

Dagli anni '60 e '70 c'è stato infatti un aumento delle precipitazioni nel centro e nell'est dell'Argentina, con un andamento riportato di seguito:

Decadic Mean Precipitation Buenos Aires 1901/2000

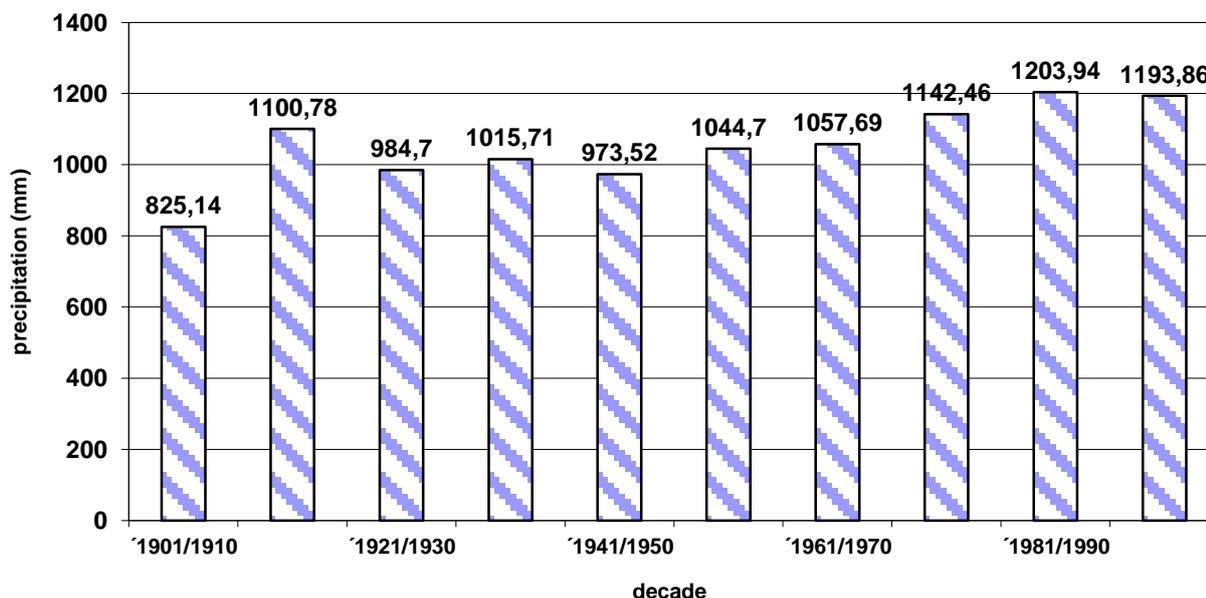


Figura 44 Andamento delle precipitazioni dal 1900 al 1990 a Buenos Aires

2.2.3.2 Urban heat island

Per valutare l'effetto isola di calore ci siamo basati sullo studio condotto da Patricia Figuerola e Nicolas A. Mazzeo del Department of Atmospheric Sciences, Faculty of Sciences, University of Buenos Aires, dal titolo "Urban-rural temperature differences in Buenos Aires".

Le differenze di temperatura tra la città di Buenos Aires (BACO- Buenos Aires Central Observatory) e la zona rurale di

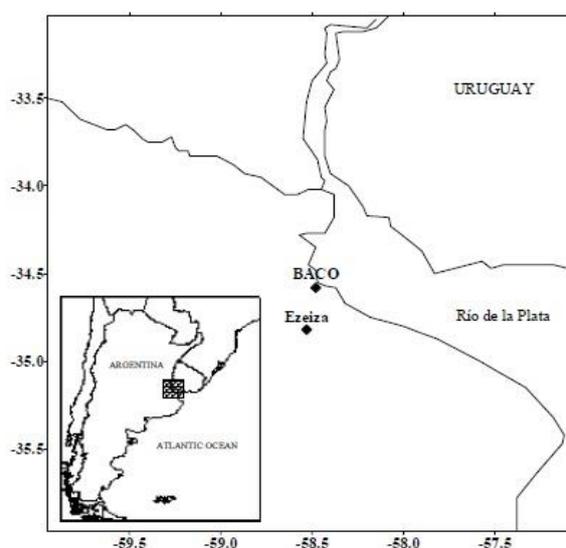


Figura 45 Stazioni per il monitoraggio dell'UHI

Ezeiza Airport sono state calcolate usando 3 anni di dati, tenendo conto di fattori quali la velocità del vento e la presenza di nuvole. (Figuerola, 2005)

Dai risultati è emerso che in inverno il valore medio dello urban heat island nei giorni ventosi e nuvolosi è 1°C inferiore rispetto ai giorni con vento debole e cielo poco coperto.

In estate il valore massimo della differenza di temperatura era pari a 4,1°C, mentre in inverno era di 4,6°C nei giorni poco ventosi e con cielo poco coperto.

Valori medi della differenza di temperatura si assestano attorno a 1,5°C-2°C.

È stata inoltre presa in considerazione l'influenza dell'attività antropica nella città: osservando infatti l'andamento del valore dello urban heat island nei diversi giorni della settimana è emerso come le temperature siano più basse alla domenica e al lunedì con andamento crescente nei giorni seguenti nei mesi più caldi (da Novembre a Marzo), mentre nei mesi più freddi (da Maggio Ottobre) è stato osservato un andamento decrescente di tale valore durante la settimana.

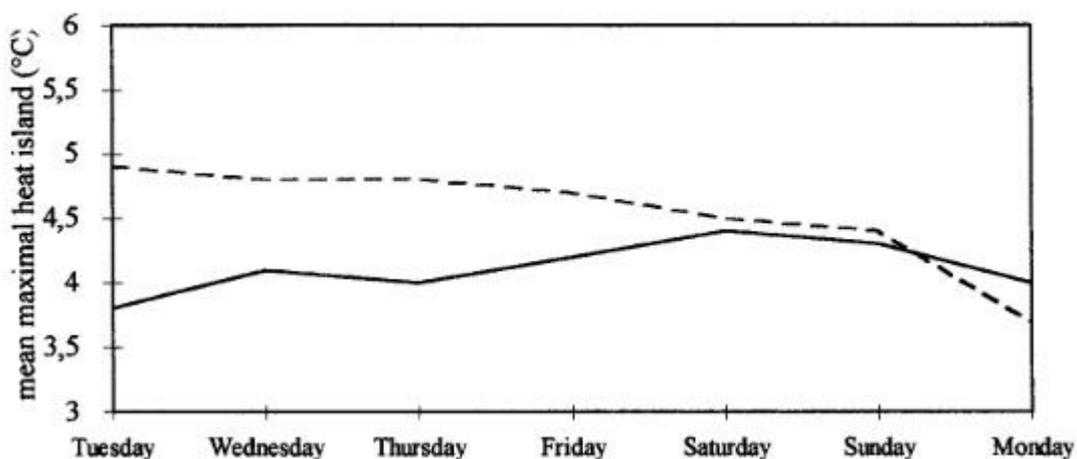


Figura 46 Andamento settimanale dell'UHI

In entrambi i casi, l'andamento decrescente del valore dello urban heat island è spiegabile con una ridotta presenza nei weekend dei veicoli, pubblici e privati.

In generale però il caso della città di Buenos Aires presenta un trend decrescente della differenza di temperatura tra le zone urbane e rurali nel corso degli ultimi 60 anni, come dimostrato da Mariana Barrucand, Inés Camilloni e Matilde Rusticucci del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Universidad de Buenos Aires:

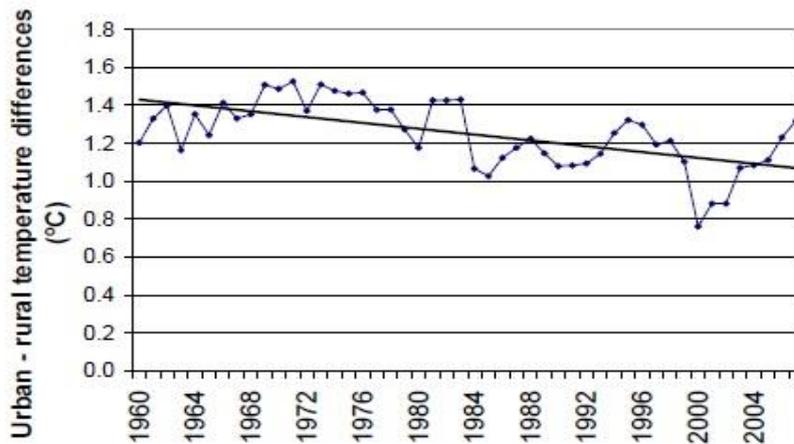


Figura 47 Andamento dell'UHI dal 1960 al 2004 a Buenos Aires

Inoltre tale comportamento è differenziato a seconda del momento della giornata, come è possibile vedere di seguito:

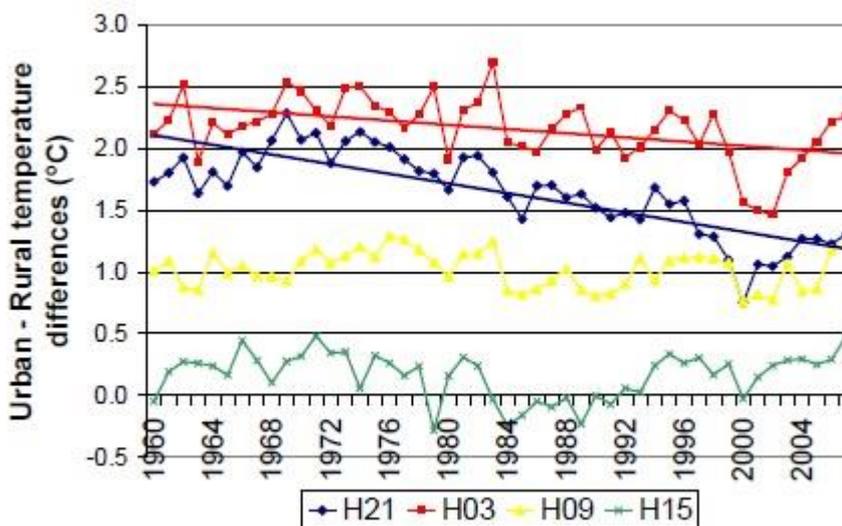


Figura 48 Influenza delle ore del giorno sull'UHI

Ciò che contribuisce al trend negativo è l'andamento dello urban heat island nelle ore serali (21.00) e notturne (03.00), mentre gli altri momenti della giornata presi in considerazione non influenzano il trend annuale negativo evidenziato.

Nelle due fasce orarie sopracitate è aumentata, nel corso degli anni, la frequenza con cui si manifesta vento proveniente da NE. Ciò indica che la zona rurale è più

frequentemente investita dal plume urbano a causa della sua posizione a 30 km sudest dalla città, producendo una riduzione dell'effetto isola di calore.

2.2.3.3 Inquinamento atmosferico

Lo studio "Evaluation of an Emission Inventory and Air Pollution in the Metropolitan Area of Buenos Aires" di Venegas, Mazzeo e Pineda Rojas presenta i risultati delle concentrazioni rilevate di **CO** e **NO₂** nella Metropolitan Area of Buenos Aires (MABA), composta dalla City of Buenos Aires (CBA) e dalla provincia (GBA).

Queste valutazioni includono le sorgenti mobile (automobile, taxi, bus, aircrafts) e sorgenti fisse (residenziali, commerciali, industriali). (Venegas)

Le prime incidono per un 99,4% sul CO e un 80,6% sugli NO_x nell'area del MABA.

I valori **medi** delle concentrazioni annuali sono misurati invece con relazione alla City of Buenos Aires (CBA):

	Concentrazioni annuali	Air quality standard per CBA
CO (ppm)	< 9	9
NO₂ (µg/m³)	52,6	60,7

Tabella 11 Concentrazione inquinanti a Buenos Aires

Secondo la World Health Organization, i livelli di **PM₁₀** nella città di Buenos Aires sono di circa 30 µg/m³ (WHO, 2014), con un valore limite annuale di 50 µg/m³.

I valori medi di **SO₂** sono di 40 µg/m³ e di **O₃** sono di 68 µg/m³ (Rojas, Venegas, 2012).

Come è possibile notare sono presenti elevati valori di concentrazione degli inquinanti a causa delle emissioni non in regola del traffico veicolare, soprattutto nelle ore di punta ad opera dei mezzi pubblici.

2.2.4 Azioni intraprese dalla città di Buenos Aires e benefici attesi

La Holcim Foundation ha istituito un concorso per “Sustainable Constructions” nel 2005 al fine di promuovere a livello internazionale approcci sostenibili da un punto di vista ambientale nel mondo dell’edilizia.

Il progetto vincitore “Green Roofs for Buenos Aires”, del team dell’architetto Hugo Gilardi, si è aggiudicato un premio di 100000 USD per portare avanti un’opera di inverdimento della città al fine di mitigare le inondazioni della città e ridurre l’effetto isola di calore grazie alla traspirazione della vegetazione.

Il progetto prevede di aumentare il verde urbano pro-capite dagli esistenti 4,3 m²/ab a 16,91 m²/ab, con una superficie urbana di 20000 ettari, grazie alla realizzazione di **3500 ettari di tetti verdi**, di cui 1400 solo sui tetti di scuole ed edifici governativi, su edifici esistenti entro il 2020, procedendo per distretti come evidenziato di seguito:



Project entry 2005 Latin America – Green roofs for Buenos Aires, Argentina

Figura 49 Green roofs for Buenos Aires

Il governo della città di Buenos Aires sta preparando una legge volta a incentivare la costruzione di tetti verdi su edifici residenziali.

2.2.4.1 Riduzione del runoff

Durante le abbondanti precipitazioni possono riversarsi nelle strade anche picchi di 280 m³/sec.

Il verde attuale è in grado di trattenerne solo 120 m³/sec, con il conseguente scenario di inondazione che affligge più di 350000 abitanti.

In base a quanto previsto dal progetto, dall'installazione dei 3500 ettari di verde sui tetti degli edifici è possibile aspettarsi una riduzione ulteriore del runoff del **15%**.

Pertanto la portata d'acqua meteorica captata dai tetti verdi durante le piogge intense è pari a

$$Q_{H2O} = \frac{(280 - 120) \frac{m^3}{sec} \times 15}{100} = 24 \frac{m^3}{sec}$$

Ovviamente questo dato è da rapportare alla frequenza, all'intensità e all'umidità del terreno.

Quindi per una valutazione più precisa abbiamo fatto riferimento a uno studio effettuato a Porto Alegre in Brasile, che ha un clima simile a quello di Buenos Aires (sub-tropicale umido).

Lo studio, condotto da Tassi, Tassinari, Piccilli e Persch del 2014, mostra i dati raccolti dal 2010 al 2011 relativi all'assorbimento dell'acqua da parte di un pannello piantumato a verde estensivo di 6 m² sul tetto dell'università.

In un anno il pannello ha assorbito 73 l di acqua piovana, ovvero 0,73 m³.

Riferendo questo dato alla superficie di tetti verdi prevista per Buenos Aires, si ottiene un volume captato pari a **4.258.333 m³/anno**, ovvero 0,12 m³/m². (Tassi, 2013)

Questo dato rispetta sicuramente più del precedente l'andamento reale della riduzione del runoff; il dato fornito nella presentazione del progetto era forfettario, riportava infatti una stima decontestualizzata.

2.2.4.2 Mitigazione della Urban heat island e risparmio energetico

In base al documento “DEL GRIS AL VERDE - Promoción de cubiertas verdes en la Ciudad de Buenos Aires” della Agencia de Protección Ambiental della città di Buenos Aires, almeno 650 ettari di tetti verdi possono mitigare l'effetto **isola di calore** di **1-2°C**, dimezzando quindi tale fenomeno rispetto ai valori massimi riportati nello studio di Figuerola e Mazzeo.

Per stimare invece il risparmio energetico si è fatto riferimento a uno studio condotto su un edificio commerciale a Rio de Janeiro, che presenta un clima simile a quello di Buenos Aires (sub-tropicale).

Lo studio, condotto da Carvalho, Rovere e Gonçalves, del 2010, ha evidenziato che una riduzione del 0,83% dell'energia usata per climatizzare l'edificio è stata ottenuta coprendo con un tappeto erboso il tetto dell'edificio. (Carvalho, 2010)

L'edificio, che ha un'area di 6627 m², consumava ogni anno 75 kWh/m² per la climatizzazione.

Si ottiene quindi, per la superficie di tetti verdi ipotizzata per il 2020, che il risparmio energetico ammonti a **27816 MWh/anno**.

Questo dato è incredibilmente basso, poiché, come affermato dai ricercatori di Rio de Janeiro, l'edificio commerciale di riferimento si trova in condizioni particolari, poiché ombreggiato dagli edifici circostanti e presenta un colore chiaro che riduce l'assorbimento solare.

2.2.4.3 Miglioramento della qualità dell'aria

La riduzione della presenza degli inquinanti sospesi in questo caso è stata valutata mediante il modello matematico di Nowak, non avendo a disposizione dati empirici.

Il progetto dell'architetto Gilardi prevede un inverdimento di 3500 ettari mediante l'impiego di specie arboree autoctone come il *guaranà*, caratterizzata da larghe foglie e cespuglietti di fiori; l'*erba andropogon*, un tipo di erba comune nelle Americhe, pianta cespitosa con foglie lineari piatte, su steli eretti forma racemi di piccole spighe; *erba da prato*, che ricopre la maggior parte delle superfici.

Per ognuno degli inquinanti è stato stimato il quantitativo rimosso mediante la vegetazione (per semplicità è stato considerato come predominante il tappeto erboso, assunzione fondamentale per la scelta del valore di V_d):

Buenos Aires (Area Tetti verdi 35000000 m²)				
	NO₂	SO₂	PM₁₀	O₃
Concentrazione inquinante presente (µg/m³)	52,64	40	30	68
V_d (cm/s)	0,11	0,6	0,16	0,2
Portata di inquinante rimossa (g/anno)	63912	264902	52980	150111

Tabella 12 Rimozione inquinanti a Buenos Aires con Nowak

2.3 Chicago, Illinois

Chicago è la più grande città dell'Illinois, nonché la più grande metropoli dell'entroterra statunitense, e la terza per popolazione di tutti gli USA dopo New York e Los Angeles, con i suoi 2.718.782 abitanti. La sua area metropolitana (detta Chicagoland) conta 9.505.747 abitanti distribuiti in un'ampia area pianeggiante situata lungo le rive del lago Michigan.

Trasformatasi da cittadina in una importante metropoli, Chicago è stata definita come una delle 10 città più influenti al mondo.

Il centro città (Downtown o Loop) è dominato da imponenti grattacieli che arrivano anche ai 108 piani (per un'altezza di 442 m) della Willis Tower.

2.3.1 Geografia

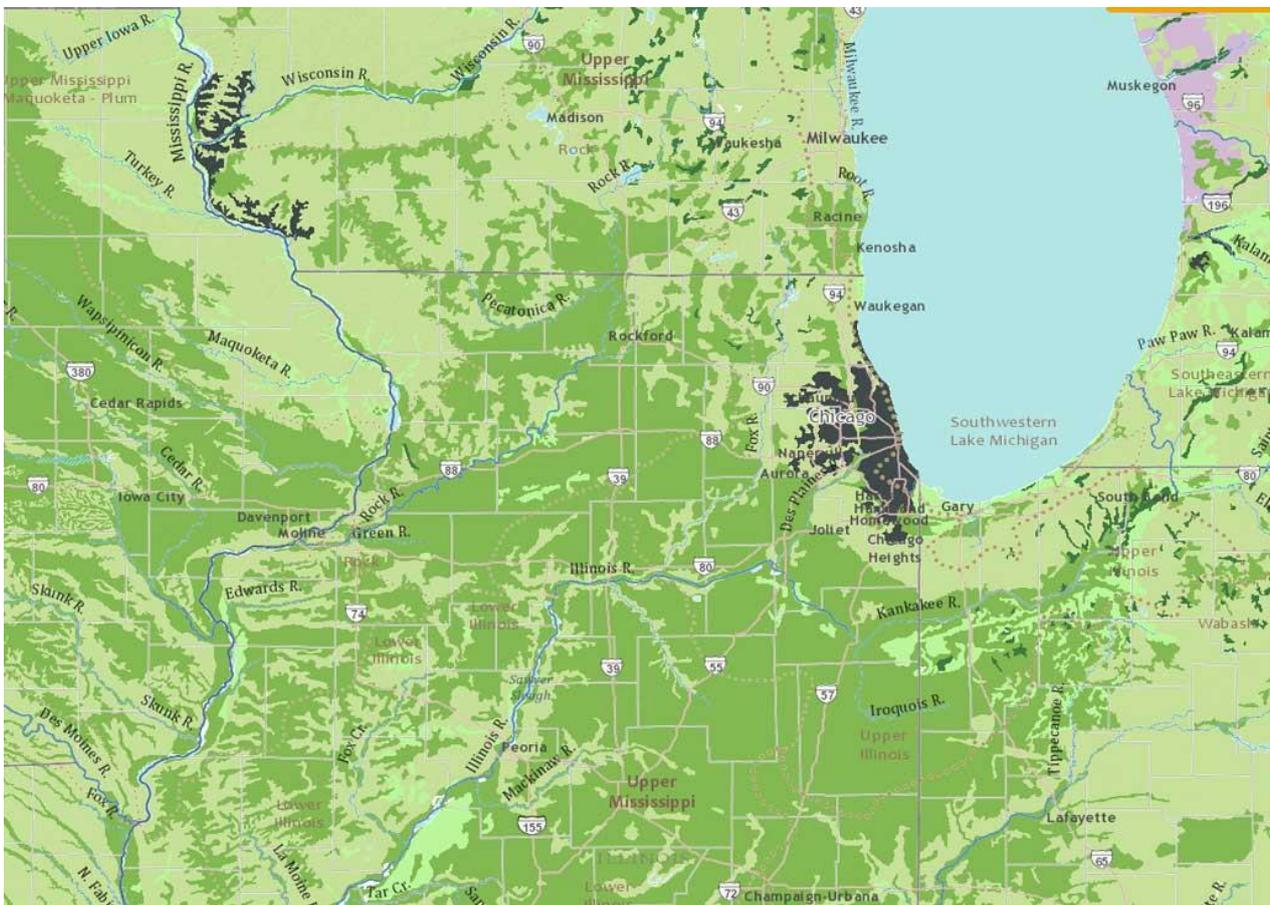


Figura 50 Posizione geografica di Chicago

La città di Chicago sorge lungo la riva sudoccidentale del lago Michigan, in una pianura attraversata dai fiumi Chicago e Calumet, entrambi collegati per mezzo di una rete di canali ai fiumi Illinois e Mississippi. Questi collegamenti rendono Chicago il punto di convergenza di una rete di comunicazioni fluviali e lacustri fra la valle del Mississippi e la grande via d'acqua chiamata Saint Lawrence Seaway.

2.3.2 Clima

La città si trova all'interno della zona umida a clima continentale (clima umido continentale), ha quattro stagioni ben distinte. Le estati sono calde e umide con temperature medie diurne elevate 27-29 °C. Normalmente le temperature estive superano i 32 °C per 17 giorni, con minime notturne di 16-19 °C.

Gli inverni sono freddi, nevosi e ventosi, con pochi giorni di sole e con temperature, in particolare di notte sotto lo zero (Gennaio ha in media -4°C). La temperatura, solitamente per 43 giorni all'anno rimane sotto lo zero per tutto il giorno.

Primavera e autunno sono stagioni miti con bassa umidità. Secondo il National Weather Service la più alta temperatura di Chicago, 43 °C, è stata registrata il 24 luglio 1934. La più bassa temperatura, -33 °C, è stata registrata il 20 gennaio 1985. La città può sperimentare ondate di freddo invernali estreme che possono perdurare per più giorni consecutivi.

Negli ultimi anni la piovosità media si è assestata sui 940 mm di pioggia all'anno e il periodo più piovoso è quello estivo (media di 100 mm al mese), mentre in inverno le precipitazioni si assestano su 40 mm al mese.

Riportiamo di seguito le informazioni climatiche riassuntive:

Chicago	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	
Min (°C)	-9	-7	-2	4	9	15	18	17	12	6	0	-6	
Max (°C)	-1	2	8	15	21	27	29	28	24	17	9	2	
Chicago	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
Prec. (mm)	45	45	65	85	95	90	95	125	80	80	80	55	935
Giorni	11	9	11	12	12	10	10	10	8	10	11	11	124

Figura 51 Tabella climatica di Chicago, climieviaggi.it

2.3.3 Problemi ambientali

2.3.3.1 Inondazioni

Chicago è una città d'acqua. Non solo perché si sviluppa sulle rive del lago Michigan, ma perché l'acqua è presente tutt'attorno la città: il fiume Chicago, il lago Calumet, il fiume Calumet, migliaia di acri di paludi, lagune, torrenti e canali.

Gestire le acque meteoriche nella città di Chicago è molto complesso e questa difficoltà ha radici nella storia dello sviluppo della città.

Negli ultimi 150 anni lo sviluppo della città ha convertito aree naturali permeabili in migliaia di acri di superfici impermeabili come tetti, strade, parcheggi.

Queste superfici non consentono all'acqua piovana di infiltrarsi nel terreno per drenare l'acqua meteorica nel minor tempo possibile.

In base a quanto riportato nel "Green stormwater infrastructure strategy" del 2014 negli ultimi anni la città di Chicago ha sperimentato numerosi eventi di piogge abbondanti che hanno provocato in tutta la città allagamenti e seri danni.

Nella regione di Chicago si sono verificate 4 tempeste negli ultimi 6 anni che hanno superato il quantitativo delle acque meteoriche definito per una tempesta con tempo di ritorno di 10 anni. Due di queste presentavano un quantitativo di pioggia di una tempesta con tempo di ritorno di 25 anni. (Chicago, 2011)

Sebbene non sia possibile attribuire una singola tempesta al cambiamento climatico, le numerose e violente precipitazioni che si sono abbattute sulla città di Chicago negli ultimi anni sono coerenti con le proiezioni del cambiamento climatico supportate dagli scienziati di tutto il mondo.

Di seguito riportiamo il trend delle piogge nella città di Chicago dal 1991 al 2011:

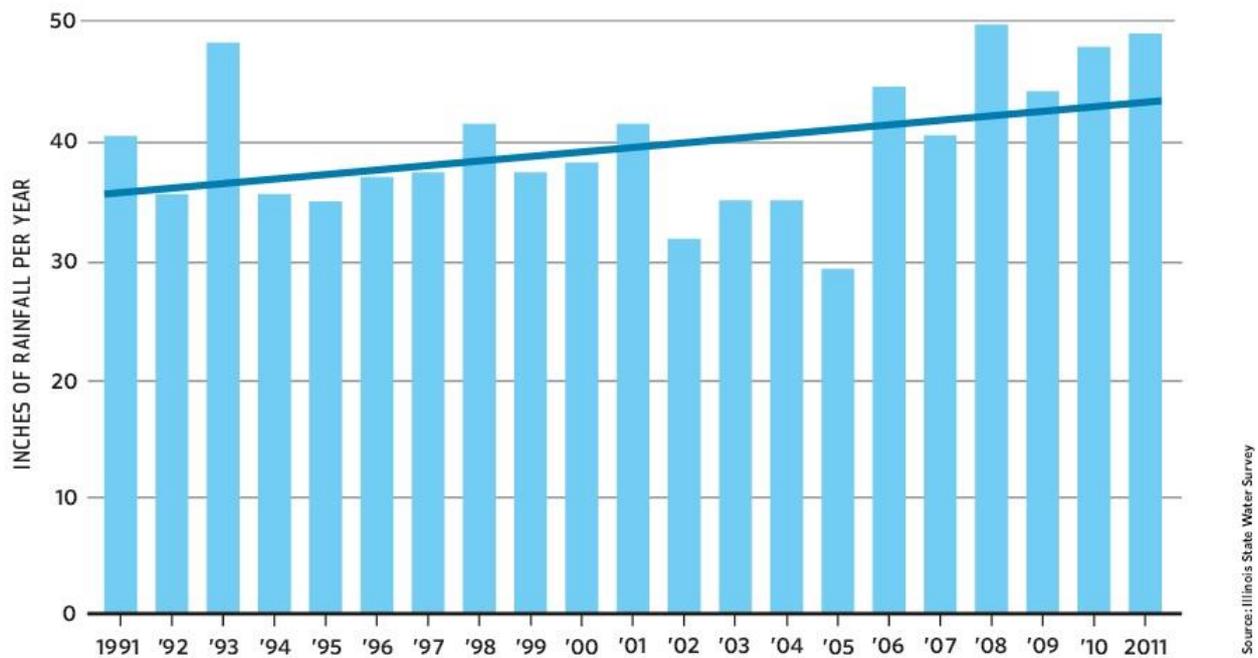


Figura 52 Trend delle precipitazioni dal 1991 al 2011

Tracciando la linea di tendenza è possibile notare come si stia verificando un aumento dell'intensità di pioggia nell'ultima decade e come sia lecito che aspettarsi che venga rispettato questo trend di crescita anche per i prossimi anni.

2.3.3.2 Urban heat island

Nel 1999 i ricercatori del Northwestern University usarono i dati del National Climatic Data Center (NCDC) per identificare le zone dove si manifestasse l'effetto isola di calore nella città di Chicago.

Hanno collezionato i dati dalle locations in Chicago che corrispondevano ai punti di monitoraggio dell'ozono a livello del suolo in modo da valutare la relazione esistente tra ozono e temperatura.

I ricercatori scoprirono che l'effetto isola di calore nella città di Chicago si manifestava nella periferia ovest della città e non nel centro città.

Questo è attribuibile alla presenza del lago Michigan, situate a nordest della città, che esercita un'importante influenza climatica sulla città.

Inoltre la periferia ovest si sta sviluppando molto rapidamente, come è possibile notare dall'immagine NASA sottostante, che mostra l'espansione della città, dal 1972 al 1997, dovuta per lo più all'accrescimento delle zone residenziali periferiche:

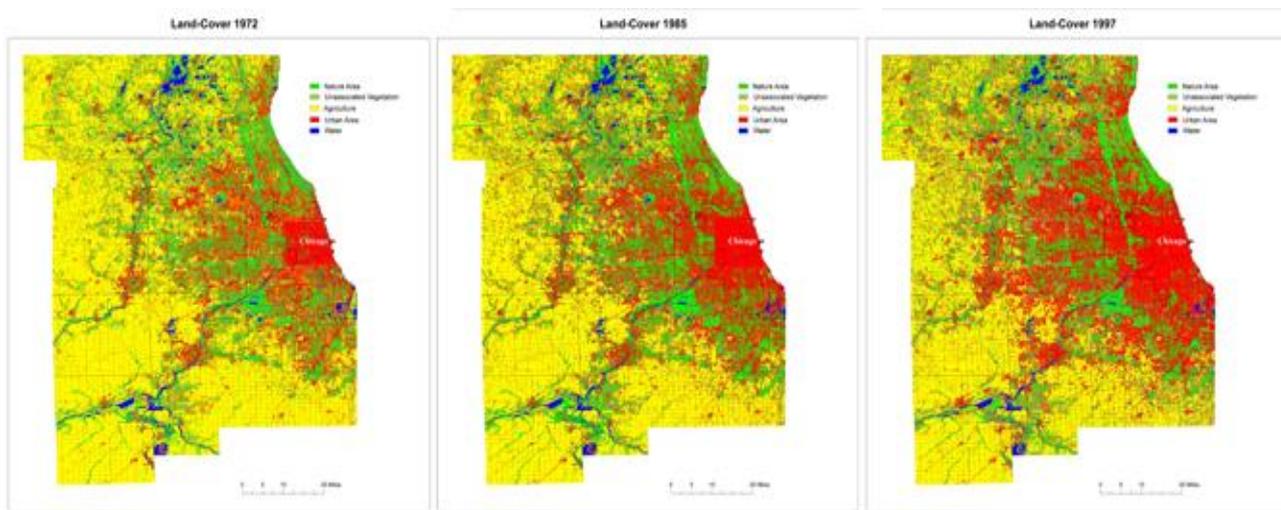


Figura 53 Urbanizzazione a Chicago dal 1972 al 1997

Il gradiente di temperatura tra le zone periferiche a ovest e il centro città è in media compreso tra 1,7-2,8°C e l'influenza del lago (gelido in inverno, fresco d'estate) è visibile nell'immagine sottostante (EPA), che evidenzia il particolare andamento della temperatura, crescente dal centro città alla periferia, dove raggiunge il suo picco nella zona commerciale:

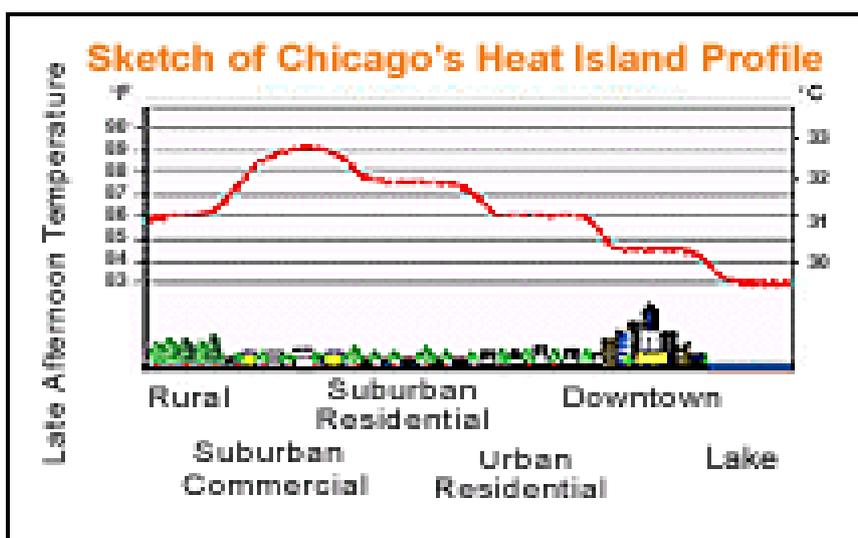


Figura 54 Andamento dell'UHI a Chicago

La zona periferica commerciale è caratterizzata da una marcata mancanza di vegetazione, che ammonta al 12% dell'area commerciale totale, contro il 45% dell'area urbana residenziale.

2.3.3.3 Inquinamento atmosferico

Chicago è la terza città più popolosa negli Stati Uniti con una popolazione di 2,9 milioni nel 2000 e secondo ALA (2007), oltre 2 milioni di persone a Chicago sono ad alto rischio per problemi di salute dovuti all'acuta esposizione a O₃ e particolato.

Chicago è stata classificata come una severa *nonattainment area* per l'ozono, che nella legislazione ambientale degli Stati Uniti rappresenta una zona con una qualità dell'aria peggiore dei National Ambient Air Quality Standards come definiti nel Clean Air Act Amendments del 1970.

Illinois ha avuto l'obbligo di ridurre le emissioni di ozono del 3% entro il 2007.

I ricercatori del Northwestern esaminarono i dati di ozono dal 1992 al 1996 e scoprirono che la maggior parte dei giorni di inosservanza dei limiti di ozono non si verificava nel centro città, bensì nella periferia.

Riportiamo di seguito l'andamento mensile dei principali inquinanti atmosferici per la città di Chicago da Agosto 2006 a Luglio 2007 (Yang, 2008):

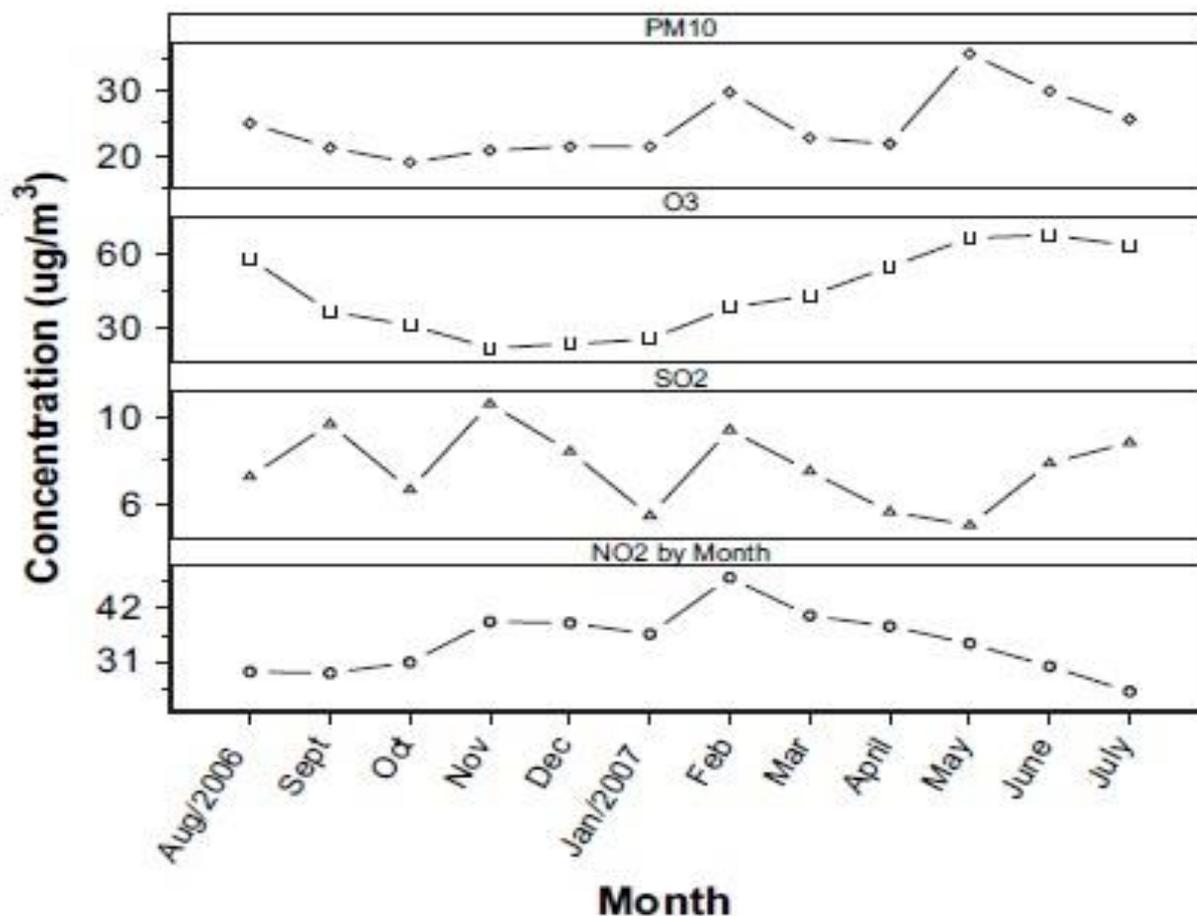


Figura 55 Andamento annuale degli inquinanti atmosferici, 2006-2007, Yang et al., 2008

Si può notare come il principale inquinante sia l'ozono, che nei mesi estivi può superare i 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il secondo inquinante è NO_2 , con un massimo di 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, il terzo è il PM_{10} , con punte di 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a Maggio, mentre il più basso è SO_2 , con picchi di 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

I valori medi annui sono riportati in tabella:

	O₃	PM₁₀	NO₂	SO₂
Concentrazioni annuali ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	45	24,25	36,08	7,87

Tabella 13 Concentrazioni inquinanti a Chicago

2.3.4 Azioni intraprese dalla città di Chicago e benefici attesi

All'interno del programma Green Building Permits, un insieme di strategie che attuano il Chicago's Green Building Agenda, lanciata nel 2004, è inclusa un'iniziativa volta all'implementazione delle green technologies, come i tetti verdi.

Tale iniziativa è articolata in due azioni distinte, che hanno come scopo il miglioramento delle performance degli edifici in un contesto di cambiamento climatico:

- **Green Roofs Initiative:** applicabile agli edifici pubblici nuovi e alle strutture fondate privatamente, ed è controllato dalla città di Chicago. Tale iniziativa promuove i tetti verdi attraverso incentivi e risorse tecniche. Viene offerto un bonus di densità a coloro che coprono il 50% o 2000 m² di un tetto con la vegetazione. La città inoltre mette a disposizione 5000 \$ in sconti per installazioni di tetti verdi per proprietà private e commerciali di piccole dimensioni.

Il programma ha portato alla creazione di più di 80 tetti verdi in città, totalizzando più di 2,5 milioni m².

- **Green Roof Improvement Program (GRIF):** riguardante i progetti commerciali nella Central Loop Area (il distretto finanziario), che può ricevere rimborsi fino a 100000 \$ a patto che gli edifici sottostiano a certe condizioni di progetto: coperture verdi per più del 50% dell'area netta del tetto, che inoltre deve essere visibile agli edifici circostanti e dotati di un sistema di monitoraggio delle prestazioni del tetto in termini di gestione delle acque meteoriche e mitigazione dell'effetto isola di calore

Le linee guida seguite sono quelle della **FLL Guidelines**, uno standard tedesco, molto seguito anche in Europa e nel Nord America, che definisce sulla base della specie vegetale lo spessore del substrato, che nel caso del **sedum** e dei **tappeti erbosi** è compreso tra 10-15 cm.

Sono previsti tetti verdi per superfici **piatte**, ma che prevedano canali di scolo in pendenza per garantire un buon drenaggio.

Questo imponente progetto ha portato ad oggi alla realizzazione di **509 tetti verdi**, per una superficie complessiva di **516950 m²**, rispetto ai 606 km² della città, di cui il 38% realizzati nel 2008 e rendendo Chicago una delle città degli Stati Uniti con la maggiore superficie di tetti verdi.

Tale dato viene aggiornato periodicamente dalla Città di Chicago mediante acquisizioni di immagini satellitari, che hanno fornito la seguente densità di tetti verdi:

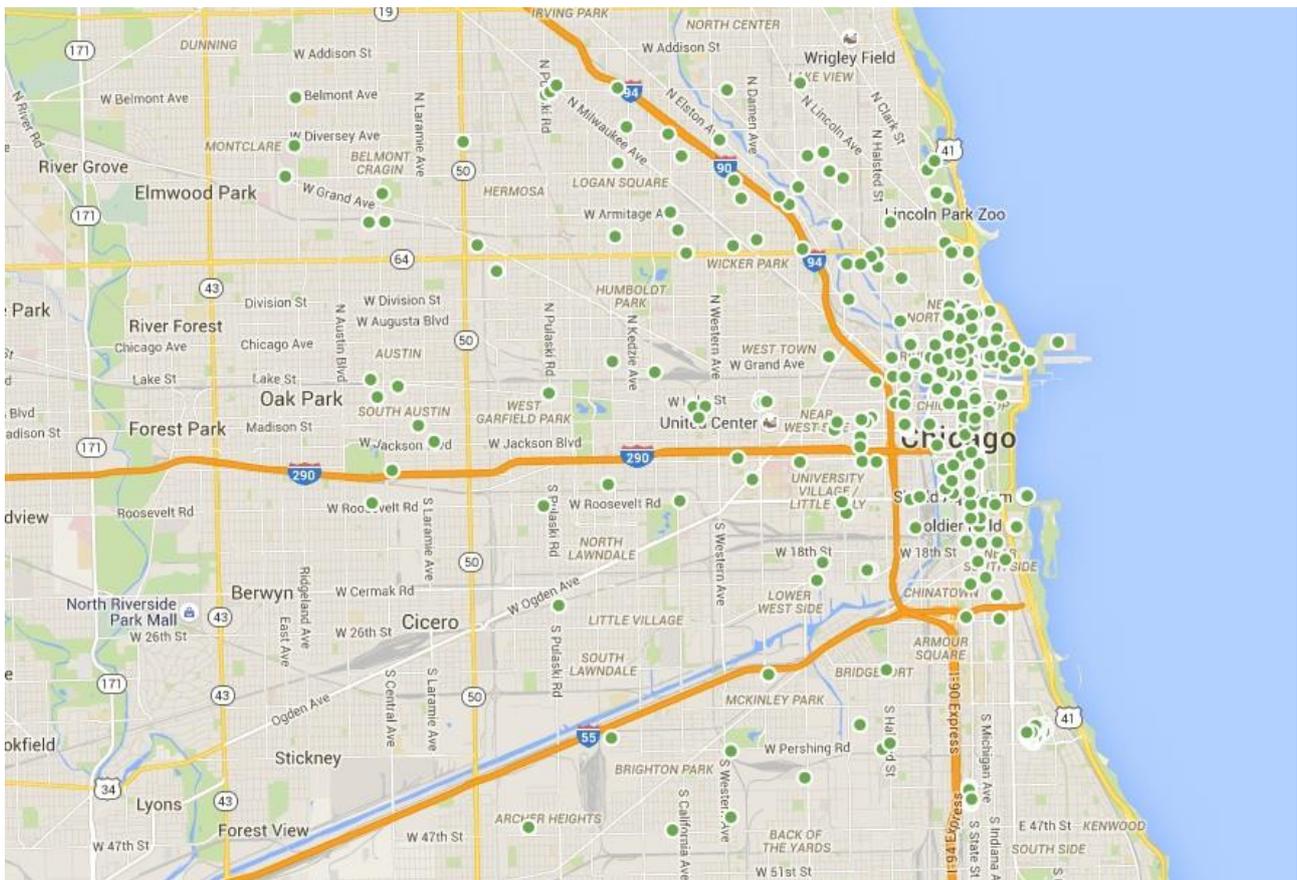


Figura 56 Distribuzione attuale dei tetti verdi a Chicago

Nel **Climate Action Plan** del 2008, la città di Chicago ha fissato degli obiettivi da raggiungere nel 2020 per fare fronte ai cambiamenti climatici, riducendo del 25% le emissioni di CO₂, attraverso 5 strategie: migliorare l'efficienza energetica degli edifici, incrementare l'utilizzo delle fonti pulite e rinnovabili, migliorare i servizi di trasporto, ridurre i rifiuti e l'inquinamento industriale, mettere in atto azioni di adattamento.

Per perseguire il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici, è stato fissato

un incremento dell'inverdimento dei tetti, fino a raggiungere almeno **6000 tetti verdi**, per una superficie complessiva di **5574180 m²**.

Quest'ultimo valore non è esplicitato nel Chicago Climate Action Plan, ma è stato ricavato supponendo un rapporto di proporzionalità diretta tra numero dei tetti verdi e superficie.

Sulla base dell'obiettivo posto nel 2020, sono stati calcolati i benefici ambientali, come nei casi precedenti.

2.3.4.1 Riduzione del runoff

In base a quanto pubblicato sul Chicago Green Infrastructure Stormwater Strategy ad oggi l'installazione dei soli tetti verdi nella città di Chicago ha provveduto al raccoglimento e stoccaggio di oltre 299532 m³/anno di acque piovane.

Inoltre è stato stimato che se su tutti i tetti della città (circa il 30% della superficie totale) venisse impiantata la vegetazione, la riduzione del carico di portata al sistema fognario sarebbe del 70%.

La città ha inoltre intrapreso numerose azioni per la riduzione del runoff adottando altre infrastrutture verdi, quali le aree di captazione e le pavimentazioni permeabili, utilizzate su larga scala in tutto il contesto cittadino.

Riferendo il dato alla superficie prevista per il 2020, mediante un rapporto di proporzionalità diretta con il dato attuale, si avrebbe una riduzione del runoff pari a **3265174 m³/anno**.

2.3.4.2 Mitigazione della Urban Heat Island e risparmio energetico

Fonti EPA riportano ad esempio l'installazione del tetto verde sull'edificio del comune, in cui sono state piantumate 20000 diverse piante erbacee, occupando più del 50% della superficie totale del tetto, pari quindi a 1858 m² e completata da un sistema di stoccaggio delle acque piovane.



Figura 57 Tetto verde della City Hall a Chicago

I ricercatori hanno stimato mediante un modello sviluppato dall'American Society of Heating che la sola evapotraspirazione eliminerebbe il carico di energia richiesta dall'edificio per il condizionamento.

E questo fenomeno sarebbe ancora più accentuato nei mesi estivi, poiché più piovosi e ciò porterebbe a un aumento dell'evapotraspirazione.

Il totale effetto raffrescante dovuto all'evapotraspirazione del tetto verde è pari al 730% di ciò che servirebbe per eliminare il carico di energia richiesta per il condizionamento.

Il surplus ridurrebbe il carico di energia persino negli edifici vicini al comune.

Il risparmio energetico calcolato per questo tetto verde è di 9272 kWh/anno. Estendendo il risparmio energetico all'intera superficie di tetti verdi di 5574180 m² si ottengono 4,99 kWh/(m²*anno), ovvero **27816 MWh/anno**.

Come possiamo notare la riduzione di energia è inferiore rispetto al caso di Toronto, ma è presente una superficie di tetti verdi notevolmente inferiore e inoltre i tetti verdi installati nella città di Chicago sono installati su edifici situati soprattutto nella zona residenziale, che risente maggiormente dell'influenza del lago Michigan.

2.3.4.3 Miglioramento della qualità dell'aria

Nello studio "Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago" di Yang, Yu, Gong del 2008 viene valutata la captazione degli inquinanti atmosferici nel periodo Agosto 2006-Luglio 2007 mediante il modello di Nowak.

Nel 2008 i tetti verdi presenti nella città di Chicago ricoprivano 19,8 ettari ed erano formati per il 63% da erba corta, per il 14% da larghe piante erbacee, per l'11% da alberi e cespugli e per il 12% da varie strutture e superfici di cemento.

Type of vegetation	SO ₂ (g m ⁻² yr ⁻¹)	NO ₂ (g m ⁻² yr ⁻¹)	PM ₁₀ (g m ⁻² yr ⁻¹)	O ₃ (g m ⁻² yr ⁻¹)	Total (g m ⁻² yr ⁻¹)
Short grass	0.65	2.33	1.12	4.49	8.59
Tall herbaceous plants	0.83	2.94	1.52	5.81	11.10
Deciduous trees	1.01	3.57	2.16	7.17	13.91

Figura 58 Rimozione degli inquinanti a Chicago, Yang 2008

Nell'immagine sono riportati i g/(m² anno) di inquinanti rimossi dai vari tipi di vegetazione sulla base dei diversi valori di velocità V_d.

I risultati mostrano che un totale di 1675 kg di inquinanti atmosferici sono stati rimossi in un anno da 19,8 ettari di tetti verdi, di cui l'ozono rappresenta il 52% del totale, NO₂ il 27%, PM₁₀ il 14% e SO₂ il 7%.

I risultati mostrano che la rimozione degli inquinanti dipendeva fortemente dalle condizioni metereologiche e dalla crescita delle piante:

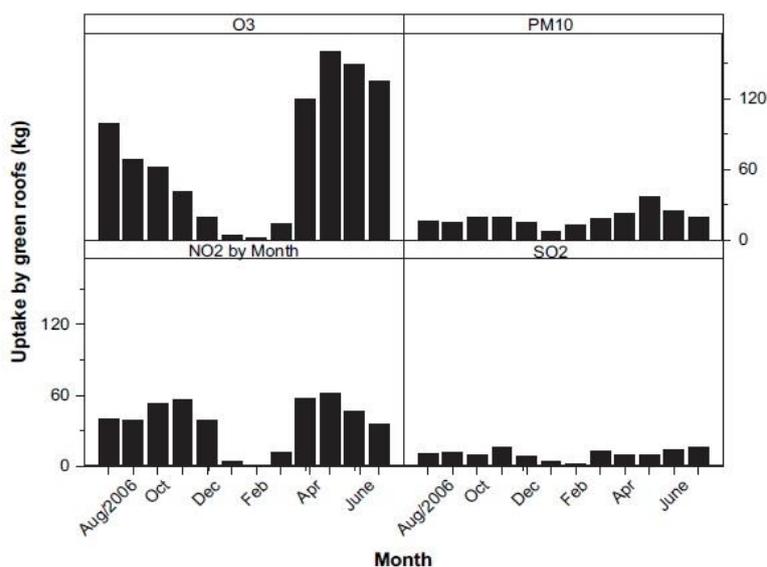


Figura 59 Rimozione stagionale degli inquinanti

L'efficacia della rimozione degli inquinanti è maggiore in Maggio, quando le foglie delle piante sono al massimo della loro ampiezza e la concentrazione degli inquinanti è alta; risulta essere invece più bassa in Febbraio quando la vegetazione è coperta dalla neve.

Applicando il modello di Nowak, è stato possibile estendere i benefici nella captazione degli inquinanti anche alla superficie di tetti verdi realizzata entro il 2020.

Chicago (Area Tetti verdi 5574180 m²)				
	NO₂	SO₂	PM₁₀	O₃
Concentrazione inquinante presente (µg/m³)	36,08	7,87	24,25	45
V_d (cm/s)	0,11	0,6	0,16	0,2
Portata inquinante rimossa (g/anno)	6976	8300	6820	15820

Tabella 14 Rimozione inquinanti a Chicago con Nowak

Anche in questo caso ci si è riferiti al tipo di vegetazione “Grass” per determinare il valore di V_d e si è posto T=31536000 s, riferendoci al periodo anno.

2.4 Singapore



Figura 60 Immagine satellitare di Singapore

Singapore è un'isola città-Stato nel sud est asiatico. Con una popolazione di circa 5,2 milioni di persone e una superficie totale di 712 km², è il secondo paese più densamente popolato al mondo, dopo Monaco, un'altra città-Stato.

L'intera isola funziona come una singola area metropolitana. Il centro città situato nella parte sud è contornato da città satellite, parchi, riserve e zone industriali, che sono connesse al centro città e tra di loro mediante una fitta rete di strade, metropolitane e autostrade.

2.4.1 Geografia

Si sviluppa su un arcipelago formato da circa 60 isole, la più grande e principale delle quali è l'isola di Singapore che ospita la metropoli. A nord Singapore è separata dalla Malesia dallo Stretto di Johor, a sud è separato dalle indonesiane isole Riau dallo

Stretto di Singapore. È per lo più pianeggiante, infatti il punto più alto della città è il Bukit Timah, con un'altezza di 165 m. Colline e valli di rocce sedimentarie dominano il nordovest, mentre le regioni ad est sono costituite per lo più da terre sabbiose e piatte. Non sono presenti laghi naturali.

2.4.2 Clima

Situata a 152 km a nord dell'equatore, il clima di Singapore nella classificazione dei climi di Köppen è equatoriale poiché non vi è una stagione secca, con un'uniformità di temperatura e pressione, elevata umidità grazie alla vicinanza con il mare.

Anche se il clima è abbastanza uniforme, si possono notare alcune variazioni nel corso dell'anno, dovute ai due monsoni: quello da nord-est, da novembre a marzo, più piovoso soprattutto nella prima parte, e quello da sud-ovest, da giugno a settembre. Il primo periodo tra i due monsoni, da aprile all'inizio di giugno, è il più caldo e il più spiacevole dell'anno.

Nel corso dell'anno cadono circa 2.400 millimetri di pioggia, di cui circa 250 al mese a novembre, dicembre e gennaio, mentre nel resto dell'anno ne cadono da 150 a 200 al mese, dunque non vi è un mese senza piogge abbondanti.

Da novembre a gennaio, le **piogge** oltre ad essere più abbondanti sono più frequenti e durano di più, e si presentano in genere nel pomeriggio o in serata. Il monzone di sud-ovest invece è l'epoca dei "colpi di Sumatra": le piogge sono più brevi, e si presentano come violenti acquazzoni che possono scoppiare da un momento all'altro senza preavviso, in genere nel primo mattino o durante la mattinata.

Le **temperature** sono molto uniformi, dal momento che in media variano di appena un paio di gradi tra i mesi più freschi e quelli più caldi. La temperatura minima tocca infatti i 23 gradi a dicembre e gennaio, per portarsi fino a 25 a maggio e giugno, mentre la massima va dai 30 gradi dicembre e gennaio ai 32 di aprile e maggio. Anche i record sono contenuti: di notte non si scende quasi mai sotto i 20 gradi, mentre di giorno è raro che si superino i 33/34 gradi. Ma è soprattutto l'onnipresente **umidità** dell'aria a rendere fastidioso il clima, dato che l'umidità relativa spesso non scende sotto il 70%

neanche nelle ore più calde.

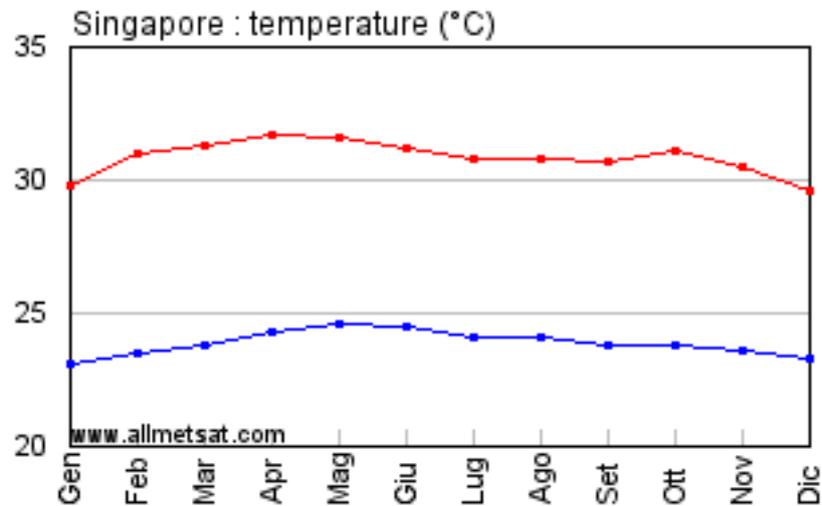


Figura 61 Andamento annuale delle temperature a Singapore

Maggio e giugno sono i mesi più caldi a causa del vento debole e delle inclinazioni molto forti dei raggi solari per la vicinanza all'equatore, mentre novembre e dicembre costituiscono i più umidi con la stagione del monzone.

Riportiamo di seguito le principali informazioni climatiche riassuntive:

Singapore	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
Prec. (mm)	250	175	200	195	175	170	165	190	180	210	250	265	2425
Giorni	17	12	13	15	15	13	13	15	14	16	19	19	181
Singapore	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	
Min (°C)	23	24	24	24	25	25	24	24	24	24	24	24	23
Max (°C)	30	31	31	32	32	31	31	31	31	31	31	31	30

Figura 62 Tabella climatica di Singapore, climieviaggi.it

2.4.3 Problemi ambientali

2.4.3.1 Inquinamento atmosferico

La qualità dell'aria a Singapore è tenuta costantemente sotto controllo, mediante la definizione di un indice, Pollutant Standards Index (PSI), basato su sei inquinanti: PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂, SO₂, O₃ e CO.

Per ognuno di questi inquinanti è definito un indice PSI di sottolivello calcolato mediante una funzione lineare che lega la concentrazione (media giornaliera in µg/m³) misurata con diverse stazioni di monitoraggio al valore del sub-indice relativo.

Viene poi stabilito il PSI, come il massimo dei sei sub-indici ed è poi raggruppato in 5 categorie di valori crescenti che identificano un diverso stato della qualità dell'aria:

PSI Value	Air Quality Descriptor
0 - 50	Good
51 - 100	Moderate
101 - 200	Unhealthy
201 - 300	Very unhealthy
Above 300	Hazardous

Figura 63 Intervalli di PSI per Singapore

Per ogni fascia di valori il governo di Singapore fornisce linee guida circa il comportamento da tenere, ad esempio per lo stato “Good” non sono previste limitazioni nelle normali attività, mentre per lo stato “Hazardous” consiglia caldamente di evitare qualsiasi tipo di attività all'aperto e di evitare il più possibile gli spostamenti.

I valori medi degli inquinanti sono stati ottenuti mediando i dati tra le 5 regioni di Singapore: West, North, East, South e Central in base a quanto riportato dal National

Environment Agency di Singapore:

	SO₂	NO₂	PM₁₀	O₃
Concentrazioni medie (µg/m³)	12,8	25,6	20	9,2

Tabella 15 Concentrazione inquinanti a Singapore

La qualità dell'aria può essere però pericolosamente compromessa da un fenomeno che si verifica con frequenza pressochè annuale, quando dall'isola di Sumatra (Indonesia) giungono i fumi degli incendi appiccati dai contadini locali nei mesi secchi per ripulire il terreno dalla vegetazione e prepararlo alla coltivazione della palma.

Il 21 giugno 2013 è stato infatti registrato un peggioramento della qualità dell'aria fino a superare il valore di 370 PSI (normalmente non supera i 70), che indica gravissimo pericolo per la salute.

Il governo della città ha invitato i cittadini a restare chiusi in casa e i pochi che si sono avventurati per le strade hanno dichiarato di non riuscire a vedere nulla oltre i 500 m di distanza.



Figura 64 Inquinamento atmosferico dovuto ai fumi degli incendi in Indonesia

Questo fenomeno è molto difficile da prevedere e quantificare, in quanto la composizione dei fumi dipende dal materiale che brucia, inoltre i fumi investono la città di Singapore per un tempo variabile, anche per mesi. E a differenza delle emissioni industriali e dei trasporti, non è possibile ridurre gli inquinanti con gli scrubber o altri sistemi di abbattimento degli inquinanti.

È evidente che naturalmente neanche i tetti verdi possono contribuire significativamente al miglioramento della qualità dell'aria quando la città viene investita da un fenomeno di questa portata.

2.4.3.2 Urban Heat Island

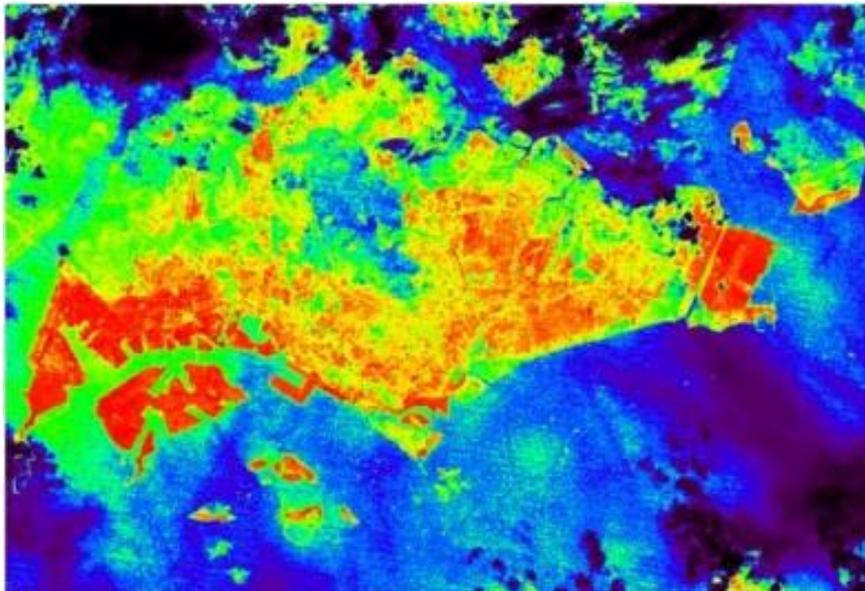


Figura 65 Immagine termica dell'UHI a Singapore

L'immagine satellitare mostra la differenza di temperatura tra l'area urbana e quella rurale. Le zone rosse identificano le superfici di cemento dell'area industriale, l'aeroporto e il Central Business District (CBD). L'immagine mostra anche le zone "fredde" che rappresentano i parchi, le riserve e le zone di caccia.

La differenza massima di temperatura registrata è di $4,01^{\circ}\text{C}$ ed è stata misurata tra le zone a più fitta vegetazione (Lim Chu Kang) e il CBD.

Nel primo caso infatti le temperature sono comprese tra i $24,3\text{-}25^{\circ}\text{C}$, mentre nel

secondo è stato misurato un range di 28,08-28,31°C.

Nell'immagine riportata sotto è possibile vedere l'andamento del profilo di temperatura su Singapore, dal CBD a Lim Chu Kang. (Wong)

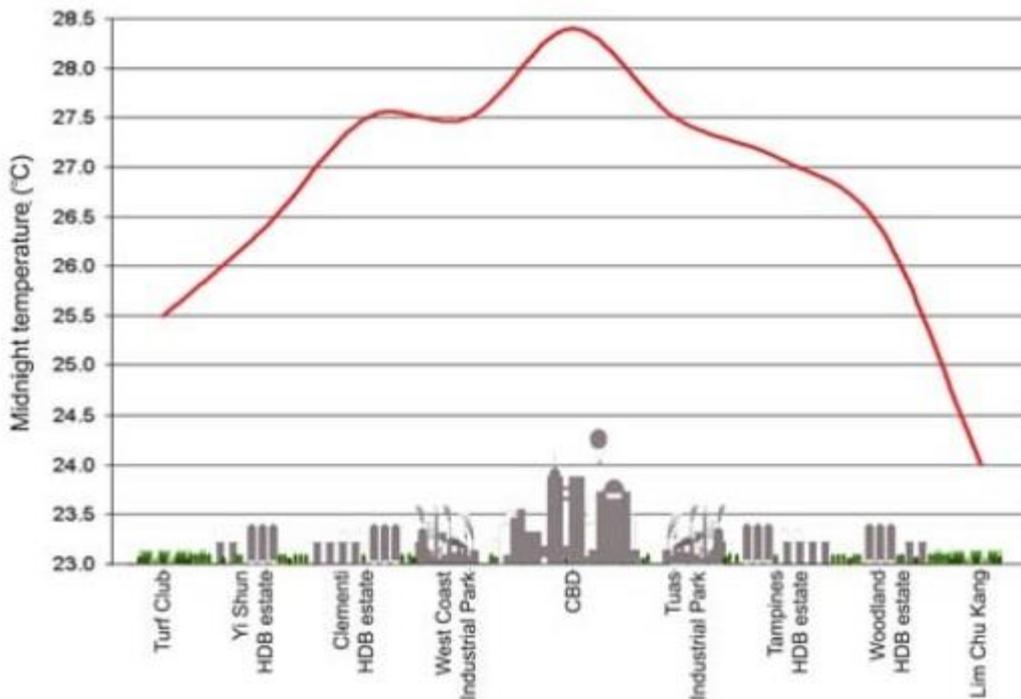


Figura 66 Andamento dell'UHI a Singapore

2.4.3.3 Inondazioni

Come detto in precedenza, il clima di Singapore è di tipo equatoriale, vale a dire caldo umido e piovoso, senza che vi sia una stagione secca.

Anche se il clima è abbastanza uniforme, si possono notare alcune variazioni nel corso dell'anno, dovute ai **due monsoni**: quello da *nord-est*, da novembre a marzo, più piovoso soprattutto nella prima parte, e quello da *sud-ovest*, da giugno a settembre. Il primo periodo tra i due monsoni, da aprile all'inizio di giugno, è il più caldo e il più spiacevole dell'anno.

Singapore è stata vessata negli ultimi 5 anni da una serie ravvicinata di inondazioni molto brevi e intense, dette *flash floods*, dovute a piogge molto più abbondanti della media (90-120% in più) e verificatesi in un breve periodo di tempo, con picchi di 100 mm d'acqua in 2 ore.

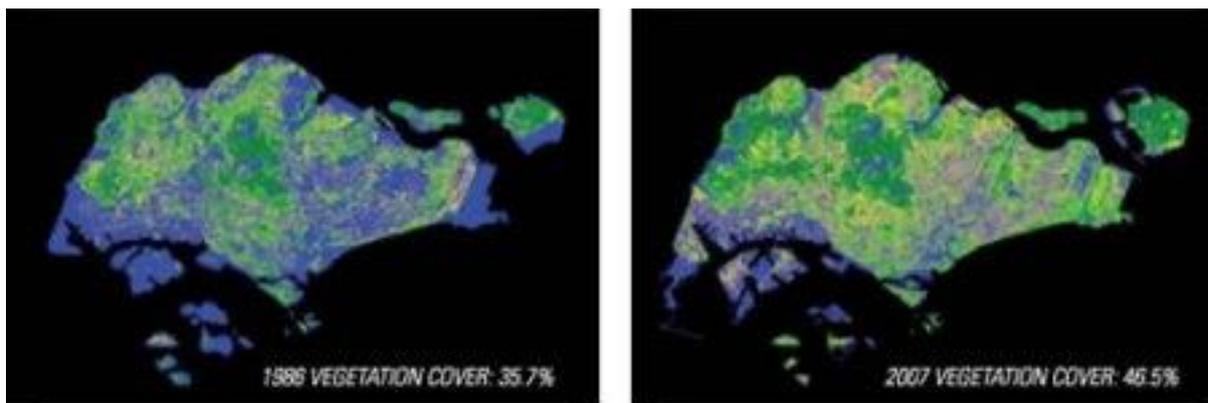
Numerosi sono stati i disagi alla popolazione e si sono verificati anche 4 morti.

2.4.4 Azioni intraprese dalla città-stato di Singapore e benefici attesi

La sfida per un inverdimento di una piccola città-stato con un'area di soli 700 km² e una popolazione di 4,6 milioni (e sta ancora crescendo) è lo spazio.

Dove la terra scarseggia, con un'attenta pianificazione, Singapore è riuscita a convertire il 9% dell'area totale in parchi e riserve naturali.

Tra il 1986 e il 2007, nonostante la popolazione sia cresciuta del 68% passando da 2,7 milioni agli odierni 4,6 milioni, gli spazi verdi a Singapore sono cresciuti dal 35,7% al 47 %.



Source: NParks

Figura 67 Aumento del verde urbano dal 1986 al 2007

L'importanza di aumentare il verde urbano per la qualità dell'ambiente in cui si vive ha preso forma attraverso il Master Plan del 2003.

Il Master Plan, progettato dalla Urban Redevelopment Authority (URA) per pianificare lo sviluppo urbano di Singapore per i seguenti 15 anni, prevedeva i seguenti principi:

- Pianificare una gerarchia di parchi distribuiti attraverso l'isola, dai parchi più grandi con più strutture, ai parchi più piccolo vicino casa, con una linea guida di 0,8 ettari per 1000 persone.
- Realizzare gruppi di aree verdi con ecosistemi e attività complementari e connetterli tra loro il più possibile per fornire al cittadina un'esperienza più

olistica.

- Avvicinare le persone alla natura e, dove possibile, integrare la natura nel contest urbano.
- Pianificare una rete di verde attraverso la città che colleghi parchi ai corpi idrici con le aree residenziali.

La rete di parchi è una serie di sette piste ciclabili o percorsi natura.

Il loro obiettivo è di costruire 200 km di parchi connessi entro il 2015, coprendo sette cerchi chiusi per passeggiate e attività sportive.

Per quanto riguarda i tetti verdi, ad oggi ne sono stati realizzati **60 ettari** e grazie al **Skyrise Greenery Incentive Scheme**, è prevista la realizzazione di altri 50 ettari entro il 2020.

Lo Skyrise Greenery Incentive Scheme prevede di rimborsare il **50% del costo** del tetto verde o del verde verticale.

Nell'ambito dello stesso progetto sono definite anche **linee guida** per la progettazione, ogni fase della realizzazione del tetto verde e per la sua manutenzione. Non è stato possibile consultarle dal momento che sono a pagamento.

Questo programma, attivo dal 2009, ha fin ora permesso di realizzare tetti verdi per 100 edifici già esistenti.

Si prevede dunque che nel 2020 i tetti verdi copriranno una superficie di **110 ettari**.

Il tipo di vegetazione più diffusa è l'erba **ophiopogon**, si tratta di piccole piante perenni, sempreverdi, simili a densi ciuffi di erba leggermente coriacea, con un apparato radicale corto, rendendola quindi un'ottima tappezzante. Non sopporta lunghi periodi di siccità ed è quindi adatta al clima equatoriale.

2.4.4.1 Riduzione del runoff

Stimare la riduzione del runoff per un paese come Singapore caratterizzato da elevata piovosità e dall'assenza di periodi di secca è molto complicato.

Le prove di laboratorio che sono state effettuate si basano su eventi di pioggia con intensità moderate e durate limitate; il runoff invece dipende proprio dall'intensità di pioggia, dalla durata della precipitazione e dal numero di giorni precedenti l'evento di studio in cui non è piovuto (ovvero dall'umidità del terreno).

Pertanto il dato che ne deriverà dal calcolo potrà non essere preciso.

Per stimare la riduzione del runoff ci siamo basati sullo studio realizzato da Jeong et al., del 2003, relativo all'installazione di 65113 m² di tetti verdi sugli edifici residenziali della città di Andong, in Korea del Sud.

Questo studio ha evidenziato una riduzione del runoff pari a 800 m³ per un evento di pioggia della durata di 24 ore e con tempo di ritorno di 2 anni.

La città di Andong, presenta un clima simile a Singapore, ma le precipitazioni sono inferiori, assestandosi sui 1800 mm/anno.

Tuttavia questo è il dato più simile rinvenuto.

Pertanto la riduzione del runoff stimata è pari a 0,012 m³/(m²*anno), ovvero **13200 m³/anno** se consideriamo l'intera superficie dei tetti verdi prevista.

Questo risultato rispetta abbastanza le previsioni, sebbene non tenga conto della frequenza e dell'intensità delle precipitazioni a Singapore; il valore reale sarebbe più basso.

2.4.4.2 Miglioramento della qualità dell'aria

Per valutare il miglioramento della qualità dell'aria dovuto all'assorbimento degli inquinanti da parte della vegetazione è stato applicato come nei casi precedenti il modello matematico di Nowak, che ha fornito i seguenti risultati:

Singapore (Area Tetti verdi 1100000 m²)				
	NO₂	SO₂	PM₁₀	O₃
Concentrazione inquinante presente (µg/m³)	25,6	12,8	20	9,2
V_d (cm/s)	0,11	0,6	0,16	0,2
Portata inquinante rimossa (g/anno)	976	2664	1110	638

Tabella 16 Rimozione inquinanti a Singapore con Nowak

2.4.4.3 Mitigazione della Urban heat island e risparmio energetico

Il risparmio energetico che deriva dall'effetto di isolamento termico fornito dai tetti verdi è visibile in uno studio relativo agli effetti termici dovuti alla presenza di un tetto verde su un edificio commerciale a Singapore (Wong e. a., 2003), avente un'area di 966 m².

A seguito dell'applicazione del tetto verde costituito da una copertura di erba, 4 cm di terreno argilloso con 40% di umidità (un terreno secco avrebbe avuto una resistenza maggiore), è stato infatti riscontrato un risparmio energetico di 1 MWh/anno; il risparmio energetico aumenta se consideriamo un tipo di vegetazione differente come cespugli o alberi, fino a 3 MWh/anno.

Questo risultato è frutto dell'aumento della resistenza dovuto alla presenza della vegetazione, che da $R=1,94 \text{ m}^2\text{K/W}$ è passata a $R=2,32 \text{ m}^2\text{K/W}$.

È stato infatti riscontrato che esiste una diminuzione media della temperatura del tetto di 7,5 °C, rispetto al caso di tetto senza copertura, e una differenza massima di 15°C nella fascia oraria 10.00-16.00.

Basandoci su questo dato, abbiamo stimato il risparmio energetico dovuto a 1 m² di tetto verde, pari quindi a 1,03 kWh/(m²*anno); riferendolo quindi all'intera superficie obiettivo di 110 ettari, si otterrebbe un risparmio energetico pari a **1138 MWh/anno**.

Questo dato era riferito al tetto piatto, mentre per tetto spiovente il risparmio energetico era pari a 19 kWh/m².

È stato scelto il dato relativo al *typical flat roof* in quanto nei report e negli studi esaminati in precedenza si fa riferimento a tetti piatti o con pendenze irrisorie (es: Toronto prevede una pendenza massima del 2%).

È importante fare un'altra considerazione: lo studio di Wong è stato condotto su un edificio scarsamente isolato da un punto di vista termico; è stato dimostrato che edifici correttamente isolati non risentono in modo significativo o quasi per nulla dell'effetto coibentante del tetto verde.

Per quanto riguarda l'attenuazione del fenomeno **isola di calore**, è stata misurata una differenza media di temperatura dell'aria circostante di **0,5°C** rispetto all'assenza della copertura verde nella stessa fascia oraria, grazie all'evapotraspirazione della vegetazione.

2.5 Londra, Regno Unito



Figura 68 Posizione geografica di Londra, Google Earth

2.5.1 Geografia

Londra è la città più popolata dell'Unione europea; l'area metropolitana conta circa 14 milioni di residenti e si estende per 1572,15 km² lungo la valle del Tamigi, fino al suo enorme estuario. La sua estensione superficiale la rende la città più estesa d'Europa, seguita da Roma e Berlino.

2.5.2 Clima

Londra gode di un clima oceanico, simile al clima della gran parte del sud della Gran Bretagna. Il clima londinese è fortemente influenzato dalla Corrente del Golfo, che ne

mitiga le temperature in tutte le stagioni.

Gli inverni vanno generalmente dal fresco al freddo moderato con brinate e raramente gelate che si verificano in periferia, in media, due volte alla settimana da novembre a marzo mentre nel centro città con ancor meno frequenza. La neve, in piccole quantità, solitamente si presenta all'incirca 4 o 5 volte all'anno tra dicembre e febbraio. La neve a marzo e ad aprile è un evento raro, ma si verifica ogni due tre anni. Le temperature invernali raramente scendono al di sotto dei 1-2 °C e sotto zero solitamente a notte fonda. D'estate difficilmente si superano i 24 °C; la temperatura massima mai registrata a Londra è stata di 39,7 °C all'aeroporto Heathrow durante la torrida estate del 2003.

Sebbene sia diffuso lo stereotipo di Londra come città piovosa, Londra riceve solo 600 mm di **pioggia** all'anno. Ciò che invece giustifica tale nomea è il numero complessivo annuale di giorni piovosi, 148, che confrontati ai poco più di 600 mm complessivi fanno ben capire come le piogge siano frequenti, ma di limitata intensità, nonché costanti tutto l'anno (50 mm al mese).

I temporali sono assai poco frequenti. Anche la posizione geografica contribuisce a rendere limitata l'intensità pluviometrica, essendo la città situata nella zona orientale dell'isola, in cui le perturbazioni oceaniche giungono frequentemente, ma solo dopo aver già in parte scaricato ad ovest la loro umidità.

Il grave problema del clima londinese è comunque il tasso di **umidità**, che in primis nei mesi invernali raggiunge livelli considerevoli, fino al 70%.

Riportiamo di seguito le principali informazioni climatiche:

LONDRA ^[6]	Mesi												Stagioni				Anno
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Inv	Pri	Est	Aut	
T. max. media (°C)	7,2	7,6	10,3	13,0	17,0	20,3	22,3	21,9	19,1	15,2	10,4	8,2	7,7	13,4	21,5	14,9	14,4
T. min. media (°C)	2,4	2,5	3,8	5,6	8,7	11,6	13,7	13,4	11,4	8,9	5,1	3,4	2,8	6,0	12,9	8,5	7,5
Precipitazioni (mm)	53	49	48	47	51	50	48	54	53	57	57	57	159	146	152	167	624
Giorni di pioggia	14,8	13,5	13,4	12,7	12,5	10,5	10,1	10,9	10,5	11,6	14,0	13,2	41,5	38,6	31,5	36,1	147,7

Figura 69 Tabella climatica Londra, Wikipedia

2.5.3 Problemi ambientali

2.5.3.1 Urban Heat Island

In base allo studio commissionato dal sindaco di Londra Livingstone del 2006 “London’s Urban Heat Island: A Summary for Decision Makers”, il fenomeno dell’isola di calore colpisce duramente la città, con andamento crescente negli anni.

L’intensità dell’isola di calore misurata è di 6-8°C, raggiunti di solito tra le 23.00 e le 3.00 del mattino.

In eventi eccezionali si sono registrate differenze di temperatura anche di 9°C, come accadde per l’ondata di calore dell’Agosto 2003.

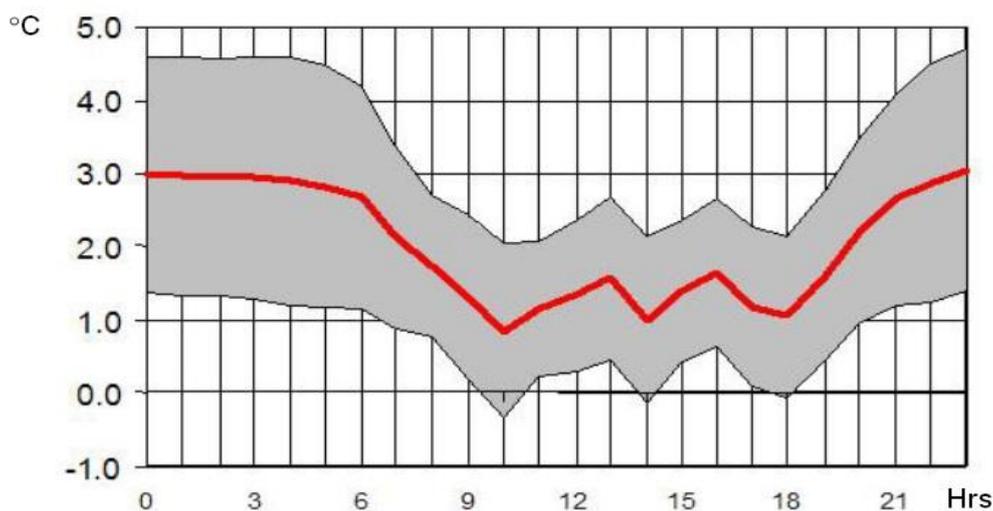


Figura 70 Andamento giornaliero dell’UHI a Londra

Nell’immagine sopra è riportato l’andamento medio della differenza di temperatura tra zone urbane e zone rurali (linea rossa) per l’estate del 2000.

La zona grigia indica gli estremi superiori e inferiori che si sono registrati in quell’anno.

La zona maggiormente colpita è l’area del British Museum, dove le isoterme evidenziano temperature maggiori di 6°C rispetto alle circostanti zone rurali, mentre la zona più fredda è quella di Richmond Park in blu scuro:

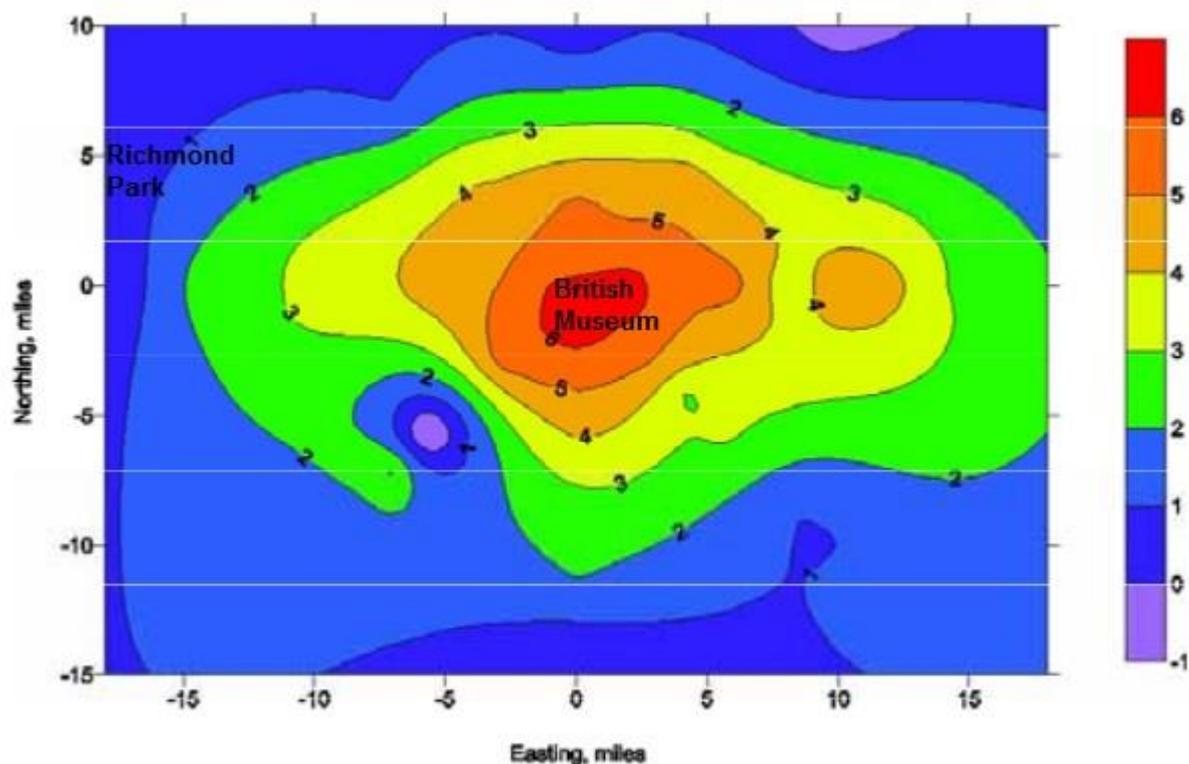


Figura 71 Isotherme per Londra

Nello studio viene inoltre messa in evidenza la correlazione che c'è tra le ondate di calore e la mortalità; questa è aumentata considerevolmente nell'agosto del 2003, presentando il doppio dei casi di decesso rispetto alla media annuale, e colpendo soprattutto gli anziani:

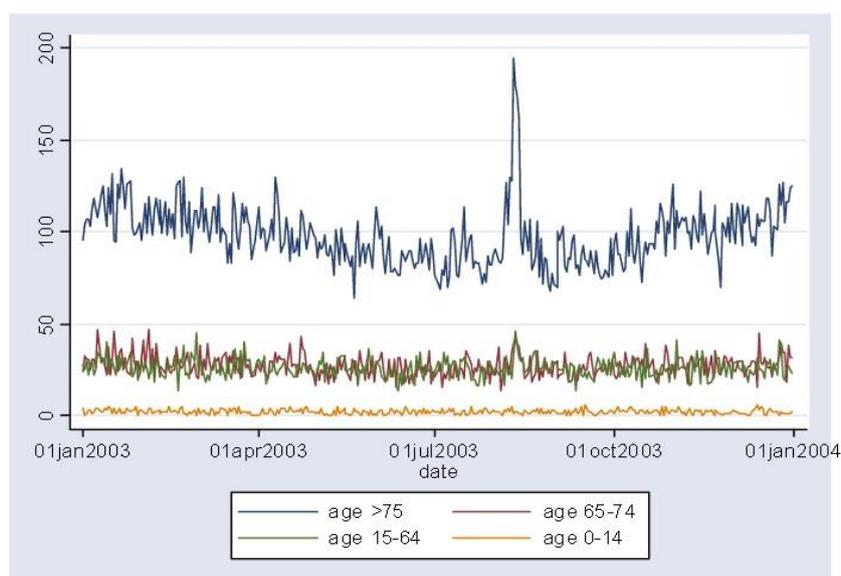


Figura 72 Aumento delle morti in seguito all'ondata di calore di agosto 2003 a Londra

Le condizioni di clima caldo e anti-ciclonico che sono responsabili per lo urban heat island producono anche elevati livelli di inquinamento atmosferico.

Infatti le reazioni chimiche che producono ozono e smog sono accelerate dalle alte temperature; inoltre la bassa velocità del vento fa sì che il calore e l'inquinamento rimangano intrappolati nella città. (London, London's Urban Heat Island: A Summary for Decision Makers)

2.5.3.2 Inondazioni

Sebbene al momento attuale il rischio legato alle inondazioni nella città di Londra non sia alto (in passato si sono verificati rari episodi di sovraccarico dell'impianto fognario con conseguente allagamento delle metropolitane e strade), è comunque molto più probabile dello straripamento del Tamigi.

A causa infatti del cambiamento climatico, sono previsti inverni più freddi e piovosi ed estati più calde e secche, che potrebbero rendere le inondazioni un problema concreto. Se consideriamo infatti il trend della piovosità dal 1960 al 2006, questo è aumentato del 22% in inverno e si è ridotto del 16% in estate.

Quindi è lecito aspettarsi che questo andamento venga rispettato negli anni futuri, fino a raggiungere il 50% di precipitazioni invernali in più nel 2080 rispetto a oggi.

2.5.3.3 Inquinamento atmosferico

Le concentrazioni medie annuali dei principali inquinanti atmosferici sono riportate in tabella (London Air Quality Network):

	NO₂	SO₂	PM₁₀	O₃
Concentrazione annuale (µg/m³)	80	20	65	120

Tabella 17 Concentrazioni inquinanti a Londra

Il principale inquinante è il biossido di azoto (NO₂), emesso soprattutto dai motori a diesel e supera localmente di 2 o 3 volte il valore fissato dall'Unione Europea (40 µg/m³).

Anche il PM10 supera il limite fissato dalla UE (40 µg/m³), ma è in calo rispetto ai trend passati.

Per completezza riportiamo i limiti fissati dall'UE per gli inquinanti atmosferici:

	NO ₂	SO ₂	PM ₁₀	O ₃
Limite UE (µg/m³)	40	125 (24h)	40	120 (8h)

Tabella 18 Concentrazioni soglia degli inquinanti per UE

2.5.4 Azioni intraprese dalla città di Londra e benefici attesi

Il sindaco Livingstone ha commissionato nel 2006 uno studio dal titolo “Living Roofs and Walls-Technical Report: Supporting London Plan Policy” in cui esprime la necessità di ampliare le superfici ricoperte da tetti verdi per contrastare i possibili danni dovuti al cambiamento climatico.

Dopo avere stimato che circa il 32% della superficie occupata dai tetti nella parte centrale di Londra è potenzialmente adatto ad ospitare tetti verdi (poiché sgombre da impianti per il condizionamento e abbastanza grandi), lo studio individua 4 zone nella città di Londra sulla base dei benefici che potrebbero ricevere dall'inverdimento:

- City of London
- Parte del London Borough of Hackney
- Parte del London Borough of Tower Hamlets
- Parte del West End

La loro superficie totale è di 10 milioni di m², per cui il 32% consiste in **320 ettari**.

Ad oggi però, non è ancora stato redatto un piano d'azione nazionale che incoraggi o richieda l'uso dei tetti verdi. (London, Living Roofs and Walls-Technical Report: Supporting London Plan Policy, 2006)

Nello stesso studio sono presenti anche **linee guida** per la realizzazione dei tetti verdi; in particolar modo per i tetti estensivi si consiglia uno **spessore del substrato** compreso tra i 75-150 mm e come tipo di vegetazione viene suggerito il **sedum** o comunque specie in grado di sopravvivere con bassa manutenzione e in presenza di terreni a basso contenuto di nutrienti.

2.5.4.1 Risparmio energetico

Nel medesimo studio viene fatta un'analisi dei benefici relativi al risparmio energetico, è stato considerato l'intervallo tra 10.15 e 6.15 kWh/m²/anno, ottenuto sommando i dati del Canada (per l'estate – 4.15 kWh/m²/anno) e Germania (inverno 6-2 kWh/m²/anno).

È stato deciso di utilizzare un approccio conservativo scegliendo 6 kWh/m²/anno di potenziale risparmio energetico grazie a tetti verdi installati su edifici nuovi o preesistenti

Considerando quindi l'intera superficie ipotizzata di 320 ettari, il risparmio totale ammonta a **19200 MWh/anno**.

2.5.4.2 Riduzione del runoff

È stata analizzata anche la possibilità di ottenere una riduzione del runoff; è stato stimato un valore di potenziale assorbimento dell'acqua da parte di 1 m² di tetto verde, tenendo conto delle caratteristiche climatiche inglesi, ovvero clima umido e precipitazioni molto frequenti, seppur moderate.

Il valore utilizzato è di 0,025 m³/m²/anno, che risulta essere un valore piuttosto basso.

Moltiplicandolo per l'area totale si ottiene una riduzione del runoff pari a **80000 m³/anno**.

2.5.4.3 Miglioramento della qualità dell'aria

Come per i casi precedenti il miglioramento della qualità dell'aria è stato stimato utilizzando il modello di Nowak, che fornisce in output il quantitativo di inquinante rimosso espresso in g/anno.

Diversi valori di V_d sono stati applicati ai diversi inquinanti come suggerito dai valori di letteratura ed è stato scelto, in via semplificativa, il tipo di vegetazione "Grass":

Londra (Area Tetti verdi 3200000 m²)				
	NO₂	SO₂	PM₁₀	O₃
Concentrazione inquinante presente (µg/m³)	80	20	65	120
V_d (cm/s)	0,11	0,6	0,16	0,2
Portata inquinante rimossa (g/anno)	8880	12109	10495	24219

Tabella 19 Rimozione inquinanti a Londra con Nowak

2.6 Confronto tra i casi di studio

Per analizzare le prestazioni ambientali dei tetti verdi a livello globale facciamo ora un confronto tra le varie città esaminate, considerando dapprima l'intera estensione dei tetti verdi a livello cittadino e, in seguito, consideriamo i benefici che derivano da 1 m² di copertura verde, al fine di evidenziare l'influenza delle diverse condizioni climatiche sulle prestazioni.

Ciò che ci aspettiamo di trovare è che in presenza delle condizioni climatiche favorevoli all'installazione dei tetti verdi, aumentino i benefici che ne derivano, viceversa, per climi sfavorevoli, tali benefici saranno meno evidenti.

La complessità e il numero dei fattori che caratterizzano un clima è tale da non poterci aspettare, in modo preciso, relazioni di tipo lineare. Cercheremo in ogni caso di fornire una spiegazione a eventuali anomalie.

2.6.1 Riduzione del runoff

Mediante una tabella riassuntiva, riportiamo le prestazioni dei tetti verdi relative alla riduzione del runoff per le varie città esaminate:

	Superficie tetti verdi (ettari)	Volume captato (m ³ /anno)	Precipitazioni (mm/anno)
Singapore	110	13.514	2.400
Buenos Aires	3.500	4.258.333	1.300
Chicago	557	3.265.174	900
Toronto	4.984	12.680.769	810
Londra	320	80.000	600

Tabella 20 Riduzione totale del runoff

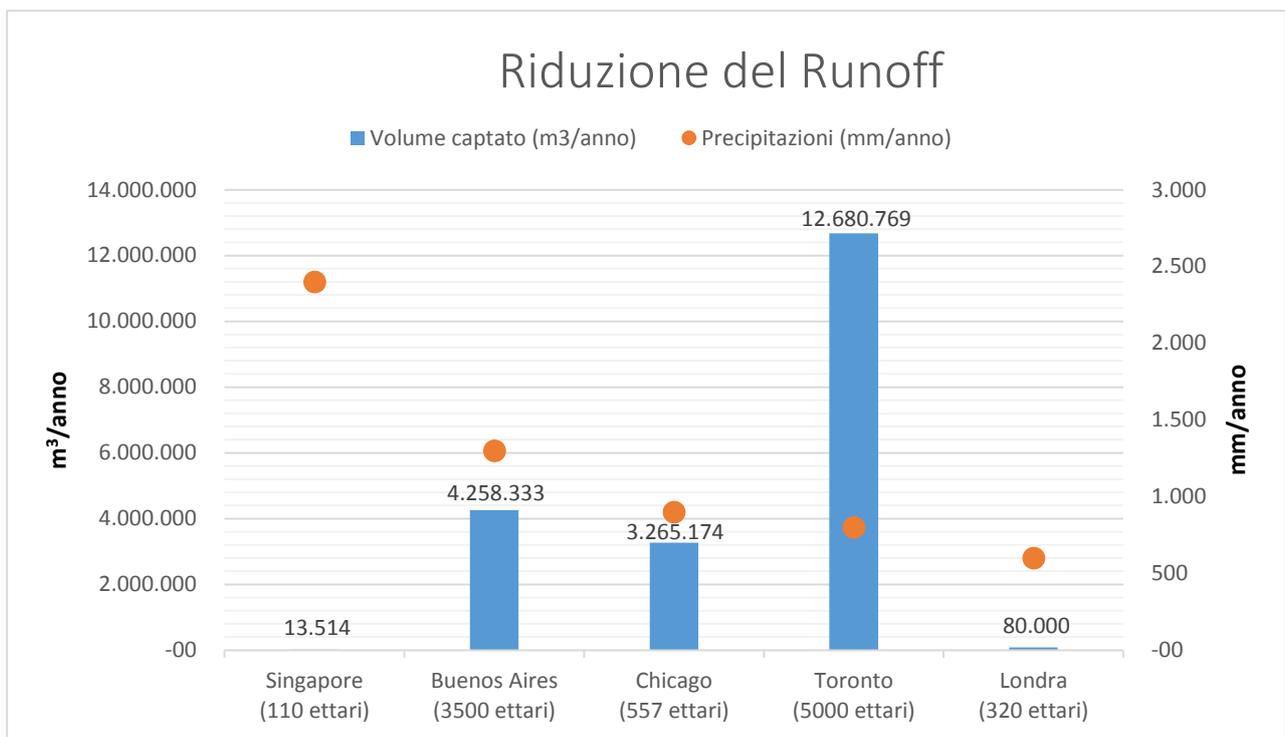


Figura 73 Riduzione totale del runoff per le città

Come è possibile notare, ciò che influenza maggiormente le prestazioni dei tetti verdi se consideriamo l'intera estensione urbana, è la superficie totale dei tetti verdi.

Esiste infatti una grande disparità in termini di estensione delle coperture verdi tra le città esaminate che non ci consente di effettuare in modo chiaro valutazioni circa l'influenza del clima sulle prestazioni.

Questo grafico però mostra quali sono le potenzialità massime di ogni città, che sono certamente influenzate da fattori di tipo politico, urbanistico e culturale.

Al fine di valutare in modo completo il contesto urbano di ogni città, riportiamo anche una tabella con le informazioni sull'area di ogni città e la sua densità abitativa.

	Area (km ²)	Densità abitativa (ab./km ²)
Singapore	712	7.669
Buenos Aires	202	14.312
Chicago	606	4.487
Toronto	630	3.973
Londra	1.572	5.284

Tabella 21 Area e densità abitativa delle città

La città di Toronto, che normalmente si distingue per senso civico e interesse per le problematiche ambientali, punta alla realizzazione di una grande superficie di tetti verdi, maggiore rispetto a quella prevista dalle altre città, pur possedendo circa la stessa superficie e densità della popolazione di Chicago, che risulta tra le meno “inverdite”.

Le ultime classificate sono Singapore e Londra; quest’ultima pur disponendo di una grande superficie urbana, conta la minor superficie di tetti verdi, a differenza di Buenos Aires, la cui limitata superficie e l’alta densità di popolazione, non ha comunque impedito di progettare una grande opera di inverdimento.

Questo dato risulta sorprendente, in quanto, come per la città di Singapore, a grandi densità abitative e piccole superfici, corrispondono edifici sviluppati soprattutto in verticale, con modeste estensioni dei tetti.

Evidentemente è necessaria un’analisi urbanistica più approfondita per conoscere il contesto urbano e capire dove le potenzialità siano sfruttate al massimo e dove, invece, incidono disinteresse e mancanza di una legislazione appropriata.

Attenendoci comunque ai risultati mostrati, il maggior beneficio a livello urbano è riscontrabile soprattutto a Toronto, seguita da Buenos Aires, Chicago, Londra e Singapore.

Esaminiamo ora la riduzione del runoff a prescindere dall’estensione totale dei tetti verdi, riferendoci quindi a 1 m²:

	Volume captato (m³/(m²*anno))	Precipitazioni (mm/anno)
Singapore	0,012	2.400
Buenos Aires	0,12	1.300
Chicago	0,58	900
Toronto	0,25	810
Londra	0,025	600

Tabella 22 Riduzione del runoff per 1 m² di tetto verde

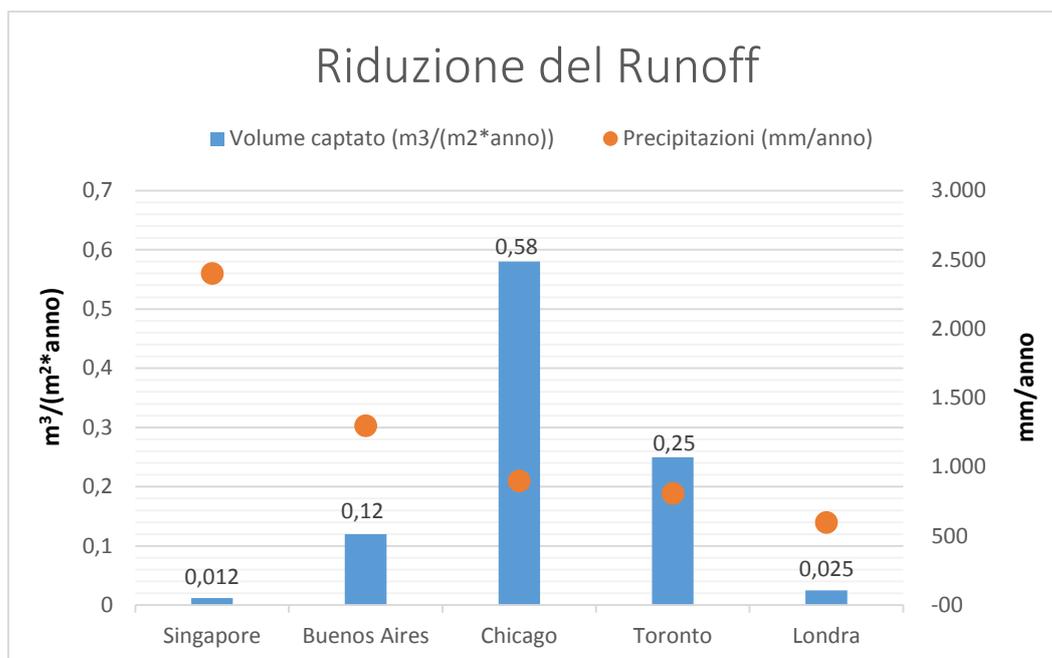


Figura 74 Riduzione del runoff per 1 m² di tetto verde

Il grafico mostra qual è la riduzione del runoff annuale, espressa in m³/(m²*anno) per 1 m² di tetto verde, a confronto con le precipitazioni annuali, espresse in mm/anno.

Come già accennato, l'assorbimento da parte del terreno dipende da molteplici fattori: volume, intensità e frequenza delle piogge, spessore e grado di umidità del substrato. Tenendo conto di questi fattori, i dati riportati rispettano abbastanza l'andamento che ci aspettavamo: a piogge abbondanti e frequenti (Singapore) corrisponde un basso assorbimento d'acqua piovana.

Un discorso analogo può essere fatto per la città di Londra, dove le precipitazioni sono praticamente continue, seppur molto moderate.

Il tempo che intercorre tra un evento e l'altro, infatti, incide negativamente sulla riduzione del runoff.

Le città di Buenos Aires, Toronto e Chicago, che sono comunque caratterizzate da precipitazioni consistenti, non presentano però la stessa frequenza delle precedenti, avendo infatti stagioni ben distinte e con precipitazioni che variano a seconda della stagione.

Il dato più significativo però lo registra la città di Chicago, con una riduzione del runoff pari a 0,58 m³/(m²*anno).

Questo dato può essere spiegato analizzando l'andamento delle piogge: le precipitazioni in Agosto sono il triplo rispetto a quelle di Gennaio e sono comunque limitate a periodi più brevi. Ciò differenzia molto le stagioni, più che nei due casi precedenti, dove le precipitazioni nei mesi più piovosi sono il doppio rispetto ai mesi meno piovosi, indicando quindi che la distribuzione è più omogenea rispetto al caso di Chicago.

Un altro fattore che potrebbe incidere è il tipo di tetto verde impiegato: Londra, Toronto e Buenos Aires hanno preso ad esempio la riduzione del runoff per tetti verdi estensivi, che hanno uno spessore del substrato compreso tra 5-15 cm.

Nel caso di Chicago potrebbero essere frequenti tetti verdi di tipo intensivo con spessori del substrato maggiori.

2.6.2 Risparmio energetico e mitigazione della Urban Heat Island

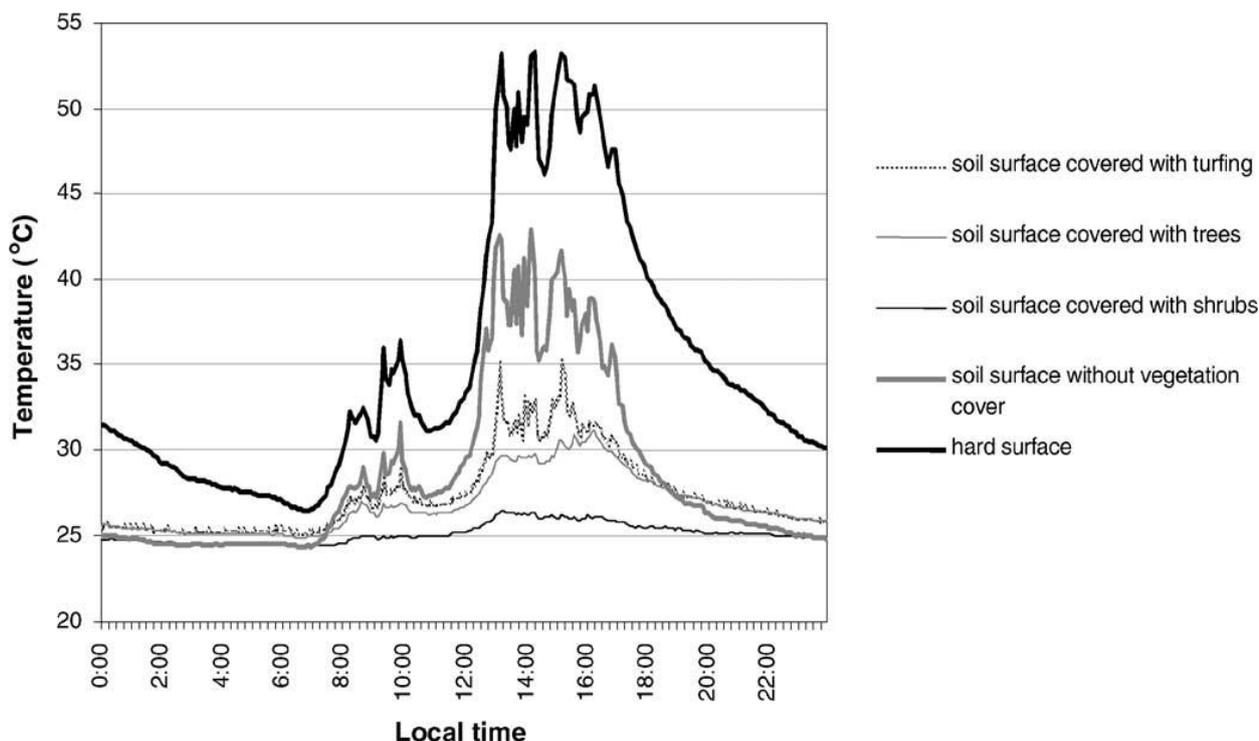
Il **risparmio energetico** viene valutato sulla capacità del tetto verde di influenzare tre grandezze: la T superficiale, il flusso di calore e la T interna (T operativa).

Come già visto infatti

$$q \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{1}{R} (T_{est} - T_{int})$$

T superficiale

Come dimostrato dallo studio condotto da Wong et al., (2003), la presenza di vegetazione abbassa la temperatura superficiale rispetto al caso di tetto convenzionale:



Come si può notare vi è una differenza media di temperatura di 7°C, e nelle ore più calde possono esserci anche 15°C di differenza.

La presenza di vegetazione infatti garantisce infatti maggiore protezione dall'irraggiamento diretto grazie all'ombreggiatura, riducendo il surriscaldamento del substrato di suolo e mantenendo più bassa la T superficiale.

Questo fenomeno aumenta all'aumentare della superficie fogliare della vegetazione: foglie larghe e più fitte forniscono prestazioni superiori.

Questa differenza si riduce progressivamente nelle ore notturne, quando le T del tetto verde rimangono generalmente più alte (1-2°C) a causa dell'inerzia termica del pacchetto verde e della riduzione delle dispersioni di calore verso la volta celeste dovute alla presenza della superficie fogliare.

Il flusso termico

Wong et al., nel confronto tra coperture tradizionali scarsamente isolate e tetti verdi, hanno calcolato una riduzione potenziale di oltre il 60% del flusso di calore durante il periodo caldo estivo, concludendo che il tetto verde si comporta come uno strato isolante altamente performante dal momento che, al contrario di uno strato di isolamento tradizionale, nel periodo di maggiore stress termico ossia nelle ore più calde della giornata, il flusso di calore inverte la propria direzione e il calore in eccesso viene sottratto all'ambiente interno e assorbito dalla massa termica della copertura.

Aumentando la resistenza termica riduce il flusso di calore che giunge all'interno e la propria massa termica assorbe quota parte del calore in eccesso prodotto all'interno degli ambienti, riducendo così il valore della T Operativa all'interno degli ambienti.

La riduzione sensibile dell'intensità del flusso, in entrambe le direzioni, è particolarmente rilevante nei climi più freddi. Tale differenza si riduce drasticamente nei climi caldi (ENEA)

Riportiamo ora i dati relativi al risparmio energetico, considerando anzitutto l'intera superficie dei tetti verdi:

	Superficie tetti verdi (ettari)	Risparmio energetico (MWh/anno)	Tmax (°C)
Toronto	4.984	206.836	26
Chicago	557	27.816	28
Buenos Aires	3.500	21.787	30
Singapore	110	1.138	33
Londra	320	19.200	23

Tabella 23 Risparmio energetico totale

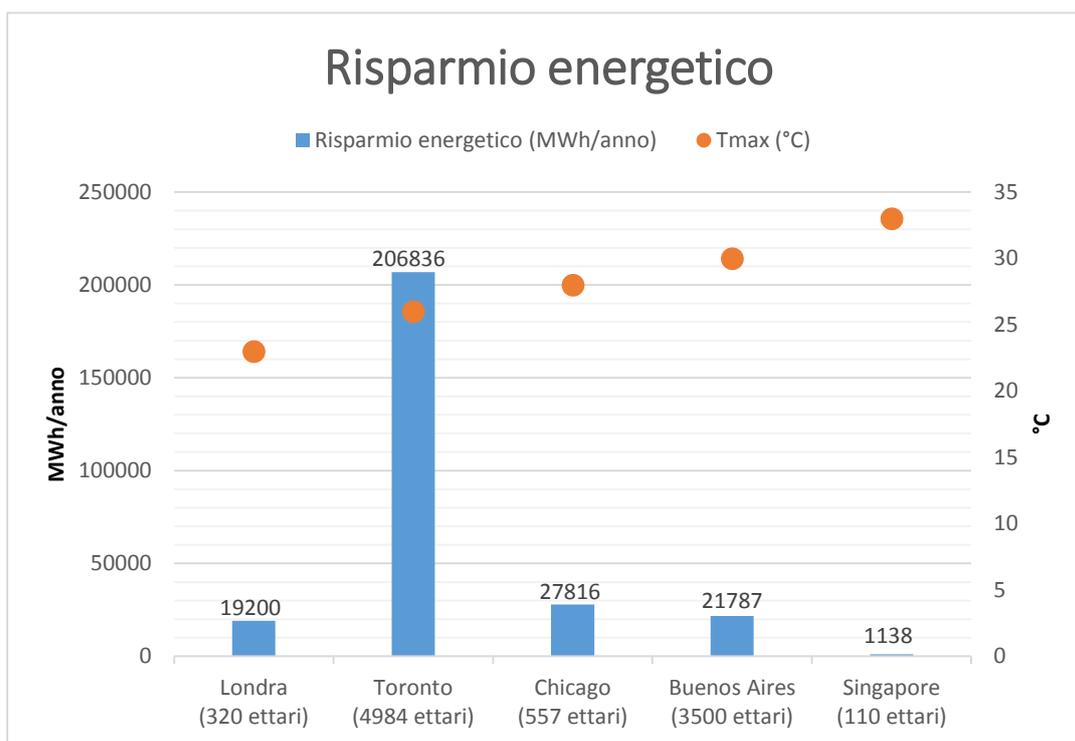


Figura 75 Risparmio energetico totale per le città

Anche in questo caso l'estensione dei tetti verdi incide significativamente sul risparmio energetico e si può notare come la città di Toronto ne benefici più delle altre.

Per la città di Buenos Aires ci aspettavamo un risparmio maggiore, data l'estensione dei tetti verdi, ma dobbiamo tenere in considerazione che questo risultato è stato ottenuto sotto alcune ipotesi che influenzano negativamente la prestazione energetica

Pertanto è necessario riferire i risultati a 1 m² di tetto verde:

	Risparmio energetico (kWh/(m ² *anno))	Tmax (°C)
Toronto	4,15	26
Chicago	4,99	28
Buenos Aires	0,62	30
Singapore	1,03	33
Londra	6	23

Tabella 24 Risparmio energetico per 1 m² di tetto verde

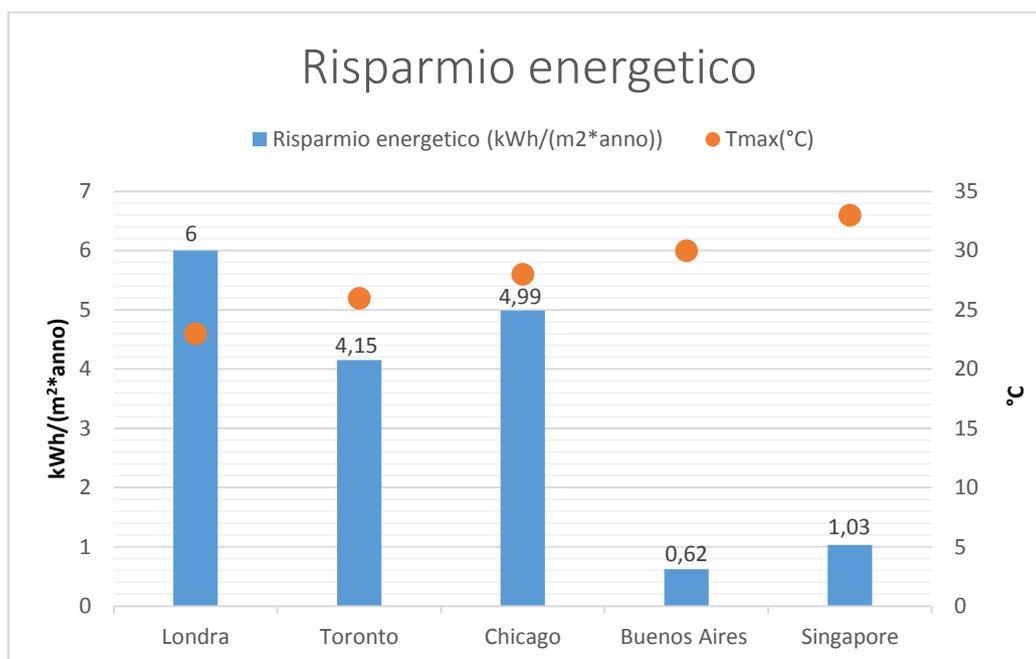


Figura 76 Risparmio energetico per 1 m² di tetto verde

I risultati ottenuti mostrano una riduzione significativa dei consumi energetici soprattutto nelle città con temperature più basse (riferendoci sempre al periodo più caldo), mentre nelle città con climi più caldi (Singapore e Buenos Aires) le riduzioni sono notevolmente più basse.

Si ricorda che per Singapore è stata fatta l'assunzione di tetto piatto, in accordo con quanto previsto dalle altre città e che per Buenos Aires esiste un'incertezza legata alle particolari condizioni in cui si trova l'edificio di riferimento.

Questi risultati sono in accordo con uno studio effettuato a livello nazionale dell'ENEA per il Ministero dello Sviluppo Economico del 2003, che, confrontando il risparmio energetico di Torino, Pisa e Palermo ha riscontrato come nella città di Torino il risparmio sia di gran lunga superiore rispetto alla città di Palermo.

Analoghi risultati sono emersi confrontando la differenza nelle temperature superficiali: a Torino si potevano apprezzare differenze di temperature fino a 20°C, a Palermo erano limitate a 5-7°C.

Questo studio sembrerebbe supportare i risultati ottenuti in questa tesi: nei climi più temperati, dove le T superficiali e i livelli di irradianza (W/m²) sono inferiori ai climi caldi, è possibile ottenere prestazioni migliori.

La radiazione solare infatti dipende dalle stagioni (inclinazione dell'asse terrestre di + o -23° a seconda dell'emisfero) e dalla latitudine.

Ma se mediamo la radiazione solare su tutto l'anno, allora l'unico fattore che incide è la latitudine.

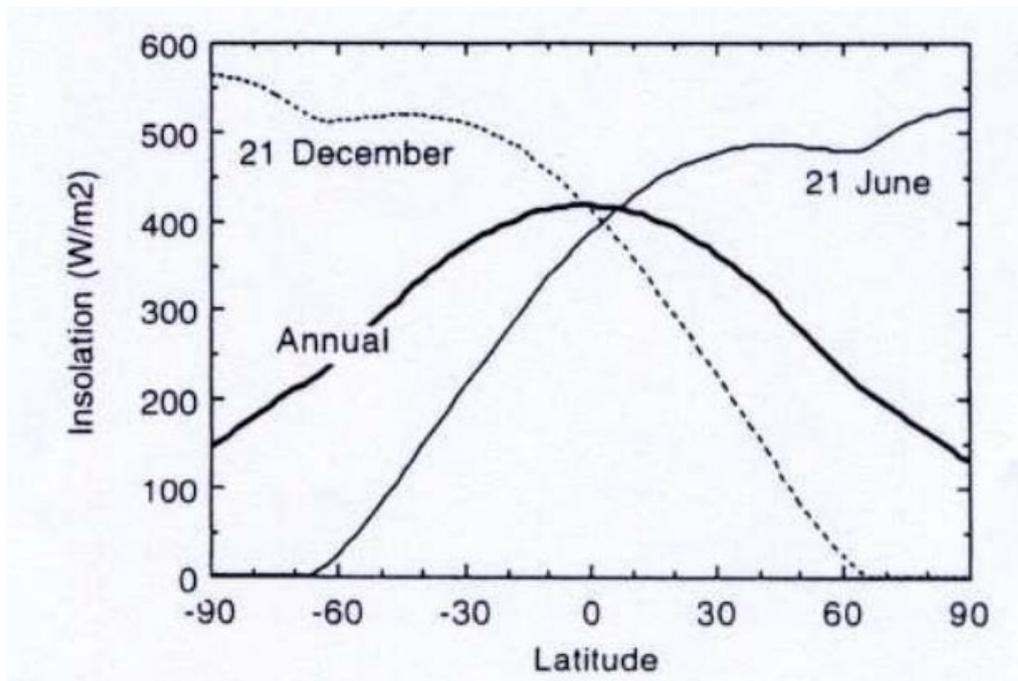


Figura 77 Dipendenza della radiazione solare dalla latitudine

La città di Singapore, situata a 1 km dall'equatore, 1,45° latitudine, è quella che viene investita in maniera più diretta dai raggi del sole, che hanno un'inclinazione massima molto forte durante tutto l'anno e pertanto massimizza l'energia ricevuta (kWh/m²).

La città di Buenos Aires è anch'essa investita da una discreta intensità dei raggi solari data la posizione tropicale, con una latitudine di -31°, seguita da Chicago (42°), Toronto (44°) e Londra (51°).

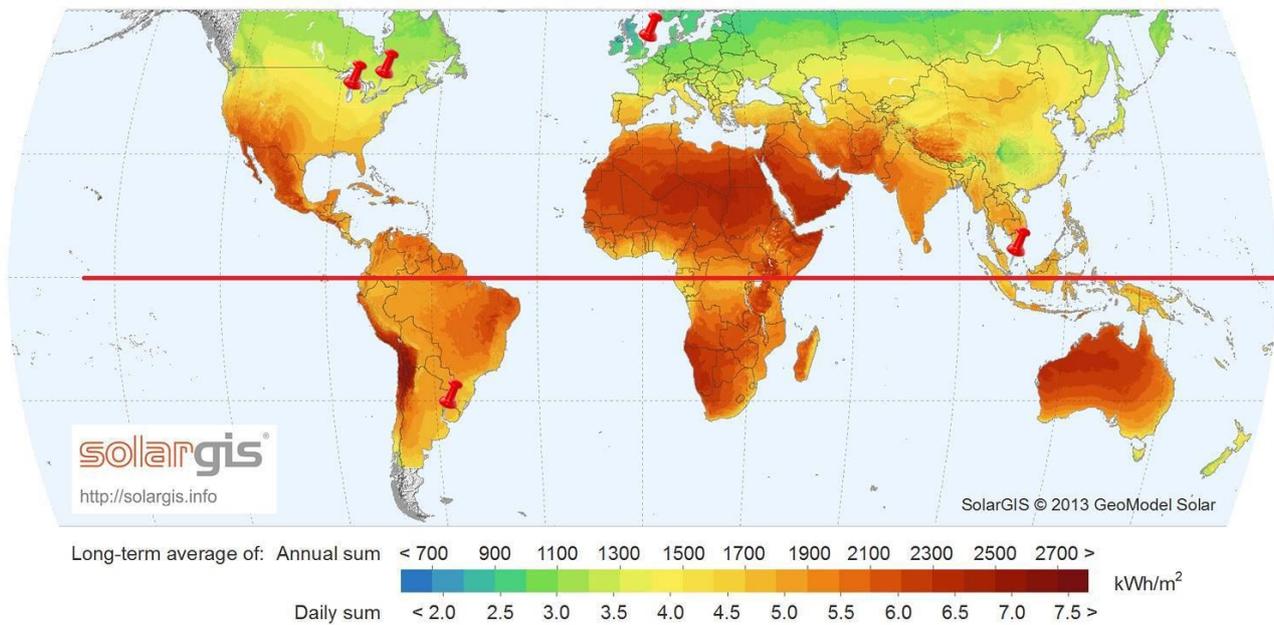


Figura 78 Mappa mondiale della radiazione solare

Pertanto, all'aumentare della radiazione solare, aumenterà anche il flusso di calore e, quindi, a parità di resistenza opposta dalla vegetazione, maggiore sarà la temperatura interna e minore il risparmio energetico.

Per quanto riguarda la mitigazione dell'**effetto isola di calore**, questa è di più difficile determinazione.

Sono state stimate riduzioni nell'effetto isola di calore che vanno da 0,5°C per i climi più caldi (Singapore) a 1-2°C per i climi più freddi (Toronto), e ciò è dovuto all'evapotraspirazione delle piante, che, assorbono calore e rinfrescano l'aria circostante.

L'evapotraspirazione è favorita in ambienti caldi e secchi, l'umidità atmosferica infatti inibisce il fenomeno e quindi si avrebbe una debole mitigazione dell'isola di calore a Singapore e Londra.

Un fattore che invece favorisce l'evapotraspirazione è l'umidità del terreno, è quindi utile, quando le precipitazioni scarseggiano, irrigare il tetto verde.

2.6.3 Miglioramento della qualità dell'aria

Per valutare il miglioramento della qualità dell'aria abbiamo utilizzato l'algoritmo di Nowak (1994); tale algoritmo si basa sulla velocità di deposizione secca V_d e può essere immaginata come la velocità con cui la vegetazione rimuove l'inquinante dall'aria: infatti se un inquinante ha una $V_d=1$ cm/s, significa che la vegetazione sta rimuovendo completamente l'inquinante da uno strato d'aria spesso 1 cm ogni secondo.

Pollutants	Vegetation (h_0 in m)	V_d Value (cm s^{-1})	References
SO ₂	Short grass (0.1)	0.2 ± 0.1–0.4 ± 0.2	Sorimachi et al. (2003)
	Grass (0.3)	0.6–0.8	Feliciano et al. (2001)
	Heathland	0.8 ± 0.4	Erismán et al. (1993)
	Grassland	1.2 ± 0.3	Erismán et al. (1993)
	Grassland (0.1–0.8)	0.4–0.7	Pio and Feliciano (1996)
	Deciduous forest	0.48 ± 0.45	Zhang et al. (2002)
	Deciduous forest (22)	0.30–1.04	Finkelstein (2001)
NO ₂	Heathland	0.10–0.35	Coe and Gallagher (1992)
	Grass (0.15)	0.27 ± 0.017	Watt et al. (2004)
	Wheat	0–0.35	Pilegaard et al. (1998)
	Grassland	0.11–0.24	Hesterberg et al. (1996)
	Orchard (2.1)	0.2–0.6	Walton et al. (1997)
	Coniferous forest	0.4	Rondón et al. (1993)
O ₃	Short grass (0.1)	0.2 ± 0.2–0.4 ± 0.3	Sorimachi et al. (2003)
	Grassland (0.22)	0.22–0.36	Stocker et al. (1993)
	Grass (0.1–0.8)	0.1–0.5	Pio et al. (2000)
	Mooreland	0.2–0.7	Fowler et al. (2001)
	Deciduous trees (33)	0.2–1.0	Padro (1996)
	Deciduous forest (22)	0.10–0.75	Finkelstein (2001)
PM ₁₀	Grass (0.06)	0.16–0.12 ($d_p = 5$)	Chamberlain (1967)
	Nature grass (0.3–0.5)	0.22 ± 0.06	Wesely et al. (1985)
	Rye grass (0.75–1)	0.16 ± 0.072 (NGMD = 0.52)	Vong et al. (2004)
	Urban grass (0.1–0.25)	0.33–0.38 ($d_p = 0.6–0.8$)	Fowler et al. (2004)
	Urban woods (25)	0.7–1.07 ($d_p = 0.6–0.8$)	
	Deciduous trees (22)	0.1 ($d_p < 2$)	Hicks et al. (1989)
	Beach (24–25)	0.45 (NGMD ^a = 0.02–0.03)	Pryor (2006)
		0.15 (NGMD ^a = 0.06–0.07)	

^a NGMD is the number geometrical mean diameter (μm).

La velocità di deposizione secca è di difficile determinazione in quanto dipende da numerosi fattori, come la resistenza aerodinamica dell'inquinante e la resistenza della vegetazione.

Per semplificarne il calcolo si è attinto a dati di letteratura, che riportano i valori di V_d per tipo di inquinante e di vegetazione (fonte: Yang, Yu, Gong, 2008).

Il valore della velocità di deposizione secca serve a determinare il flusso di inquinante F ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), moltiplicandolo per la concentrazione dell'inquinante nell'aria C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$):

$$F = V_d \times C \times 10^{-8}$$

Da qui è possibile calcolare il quantitativo di inquinante rimosso all'anno Q (g/anno):

$$Q = F \times L \times T$$

dove

L = l'area del tetto verde (m²)

T = il tempo (s), posto uguale a 31536000 per ottenere la rimozione in un anno.

I risultati ottenuti sono riportati di seguito per ogni inquinante, per l'estensione totale dei tetti verdi e poi per 1 m².

Per la determinazione del valore di V_d è stata fatta la scelta conservativa di usare i dati relativi a "Grass", supponendo che questa ricopra la maggior parte dei tetti verdi estensivi.

NO₂

	QNO ₂ (g/anno)	Concentrazione (µg/m ³)	Area Tetti Verdi (ettari)
Toronto	48.755	28,2	4.984
Chicago	6.976	36,08	557
Buenos Aires	63.912	52,64	3.500
Singapore	976,85	25,6	110
Londra	8.880	80	320

Tabella 25 Rimozione totale di NO₂

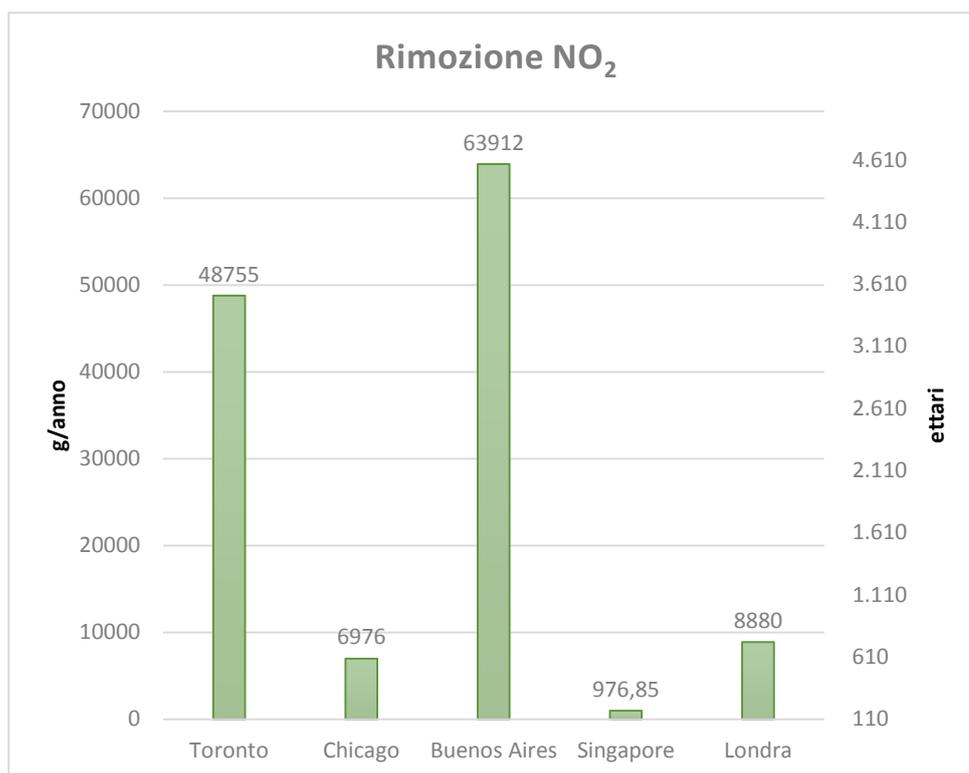


Figura 79 Riduzione totale di NO₂ per le città

Anche per il beneficio “Miglioramento della qualità dell’aria” incide prevalentemente l’estensione dei tetti verdi di ogni città.

Non esiste tuttavia, come affermato da Currie, un rapporto lineare tra estensione dei tetti verdi e rimozione degli inquinanti, poiché si deve tenere conto dell’eventuale vicinanza a parchi e aree verdi che potrebbero attenuare l’azione di assorbimento degli inquinanti da parte della vegetazione.

Data la complessità del contesto urbano, è necessario però operare una semplificazione ed estendere l’algoritmo di Nowak anche allo studio dei tetti verdi.

Se riferiamo la rimozione degli inquinanti a un solo m² di tetto verde, allora questa, a parità di tipo di vegetazione impiegata (Grass), dipenderà linearmente dalla concentrazione dell’inquinante presente.

	QNO ₂ (g/(m ² *anno))	Concentrazione (µg/m ³)
Londra	0,003	80
Buenos Aires	0,0019	52,64
Chicago	0,00125	36,08
Toronto	0,00097	28,2
Singapore	0,0009	25,6

Tabella 26 Rimozione di NO₂ per 1 m² di tetto verde

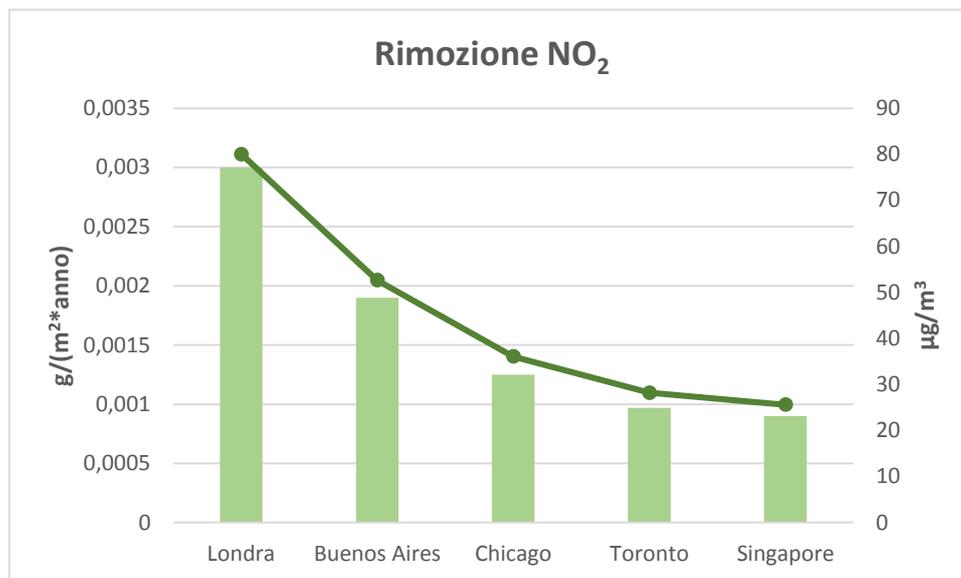


Figura 80 Riduzione di NO₂ per 1 m² di tetto verde

Come è possibile notare, al diminuire della concentrazione, diminuirà anche la quantità di inquinante rimosso, e quindi la miglior efficienza nella rimozione si ha a Londra, la peggiore a Singapore.

Risultati analoghi sono presenti per gli altri inquinanti.

SO₂

	QSO ₂ (g/anno)	Concentrazione (µg/m ³)	Area tetti verdi (ettari)
Toronto	41.965	4,45	4.984
Chicago	8.300	7,87	557
Buenos Aires	264.902	40	3.500
Singapore	2.664	12,8	110
Londra	12.109	20	320

Tabella 27 Rimozione totale di SO₂

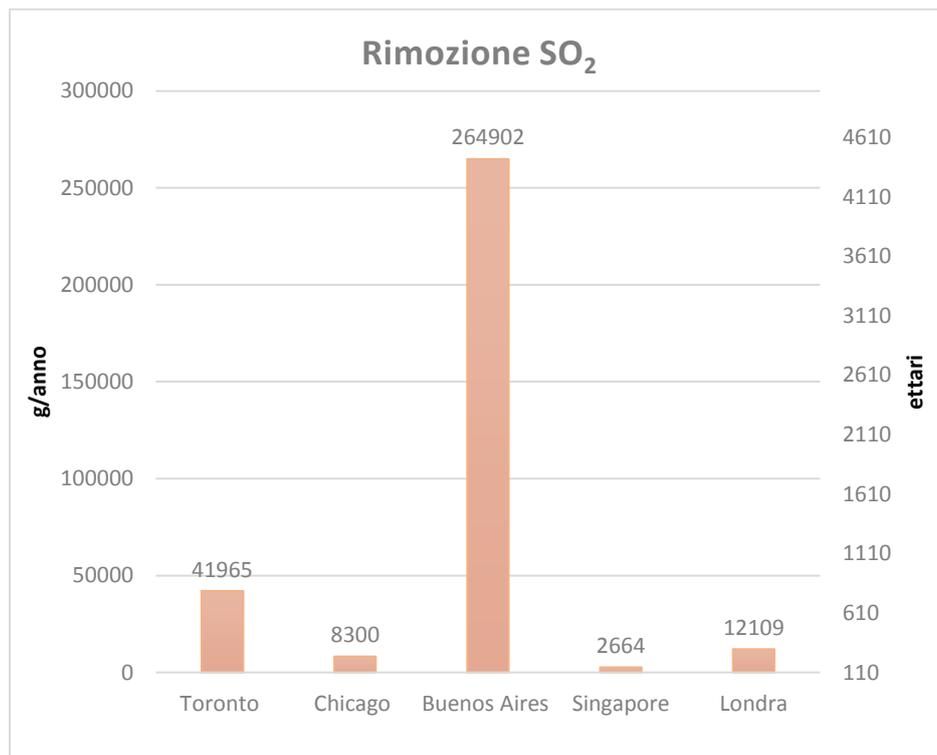


Figura 81 Riduzione totale di SO₂ per le città

Riferendoci a 1 m² otteniamo:

	QSO ₂ (g/(m ² *anno))	Concentrazione (µg/m ³)
Buenos Aires	0,0075	40
Londra	0,0037	20
Singapore	0,0024	12,8
Chicago	0,0014	7,87
Toronto	0,0008	4,45

Tabella 28Rimozione di SO₂ per 1 m² di tetto verde

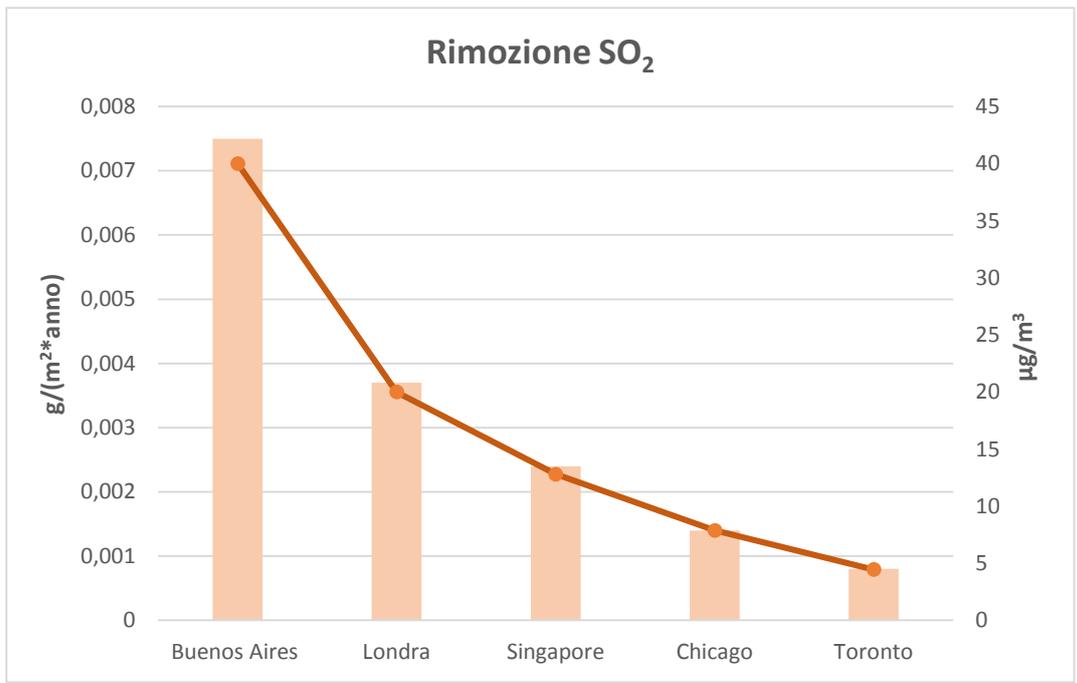


Figura 82Rimozione di SO₂ per 1 m² di tetto verde

La migliore efficienza in questo caso si ha a Buenos Aires, data la alta concentrazione iniziale di SO₂, la peggiore a Toronto. Del resto, come confermato da Shayna Stott che si occupa della regolamentazione dei tetti verdi nella città di Toronto, l'inquinamento atmosferico non è tra i principali problemi di Toronto.

PM₁₀

	QPM ₁₀ (g/anno)	Concentrazione (µg/m ³)	Area Tetti Verdi (ettari)
Toronto	17.603	7	4.984
Chicago	6.820	24	557
Buenos Aires	52.980	30	3.500
Singapore	1.110	20	110
Londra	10.495	65	320

Tabella 29 Rimozione totale di PM₁₀

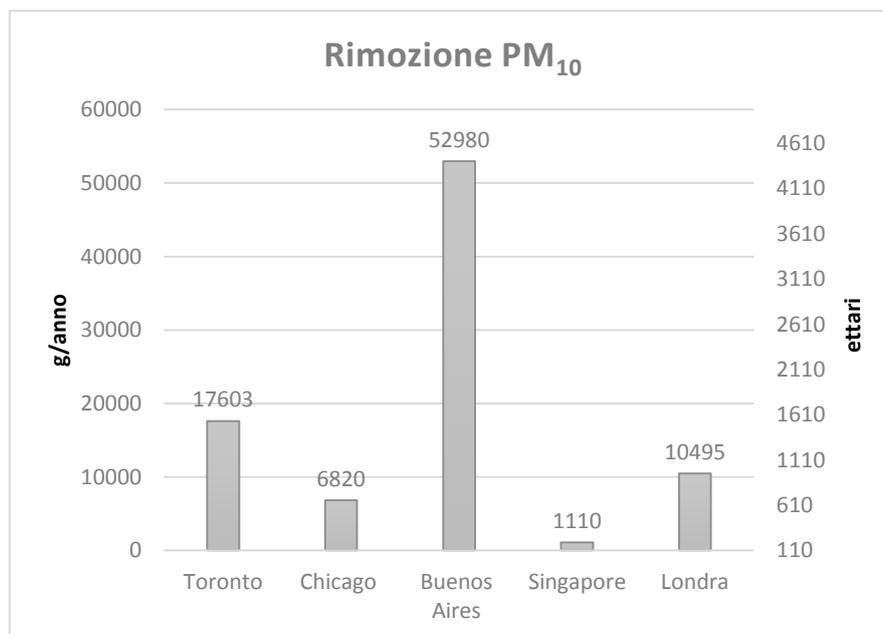


Figura 83 Riduzione totale di PM₁₀ per le varie città

Riferendoci a 1 m² di tetto verde:

	QPM ₁₀ (g/(m ² *anno))	Concentrazione (µg/m ³)
Londra	0,003	65
Buenos Aires	0,0015	30
Chicago	0,0012	24
Singapore	0,001	20
Toronto	0,00035	7

Tabella 30 Rimozione di PM₁₀ per 1 m² di tetto verde

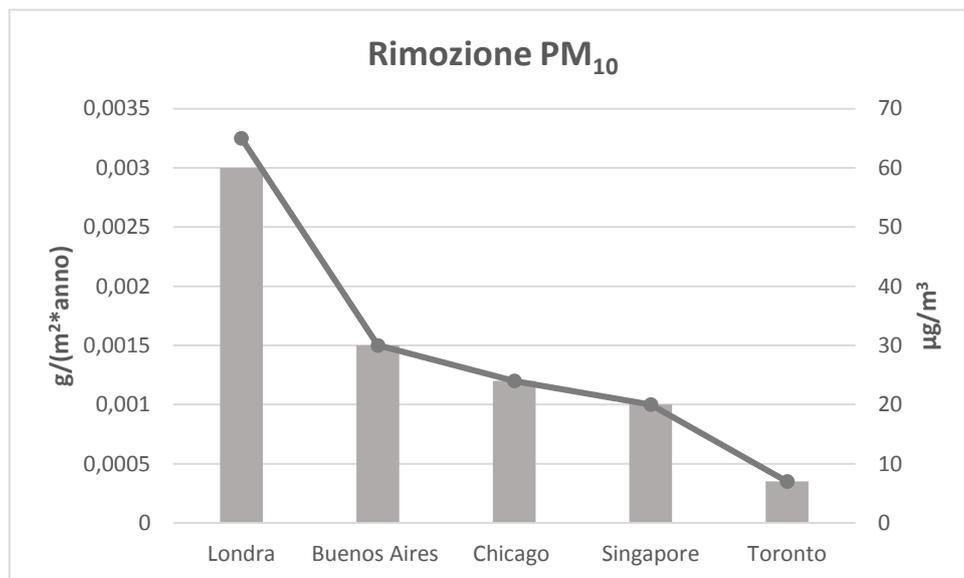


Figura 84 Riduzione di PM₁₀ per 1 m² di tetto verde

O₃

	QO ₃ (g/anno)	Concentrazione (µg/m ³)	Area tetti verdi (ettari)
Toronto	201.184	64	4.984
Chicago	15.820	45	557
Buenos Aires	150.111	68	3.500
Singapore	638	9,2	110
Londra	24.129	120	320

Tabella 31 Rimozione totale di O₃

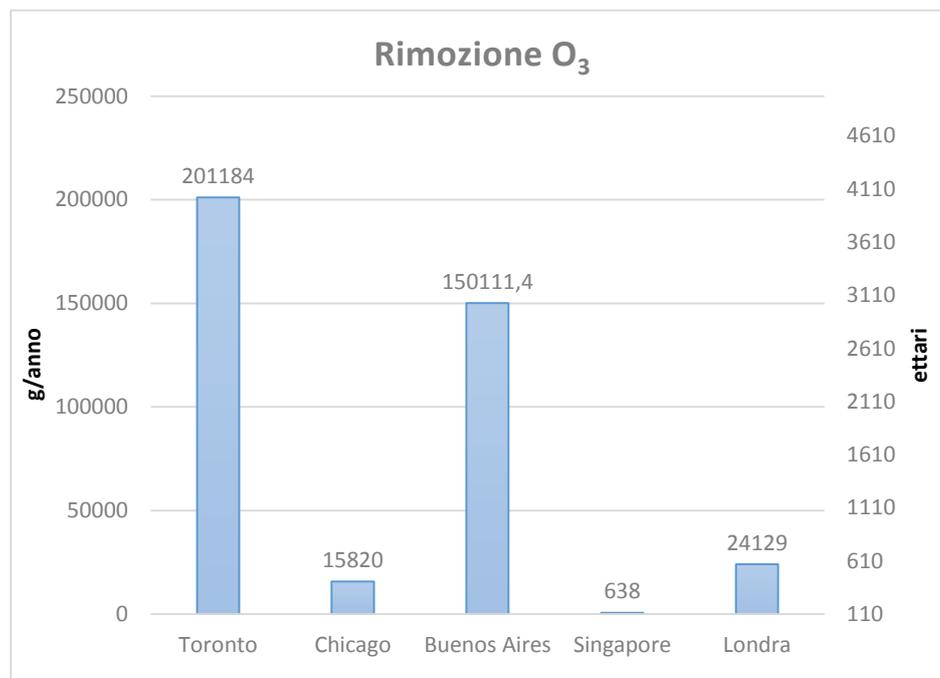


Figura 85 Riduzione totale di O₃ per le città

Riferendoci a 1 m² di tetto verde:

	QO ₃ (g/anno)	Concentrazione (µg/m ³)
Londra	0,0075	120
Buenos Aires	0,0042	68
Toronto	0,004	64
Chicago	0,003	45
Singapore	0,0006	9,2

Tabella
1 m² di tetto verde

32Rimozione O₃ per

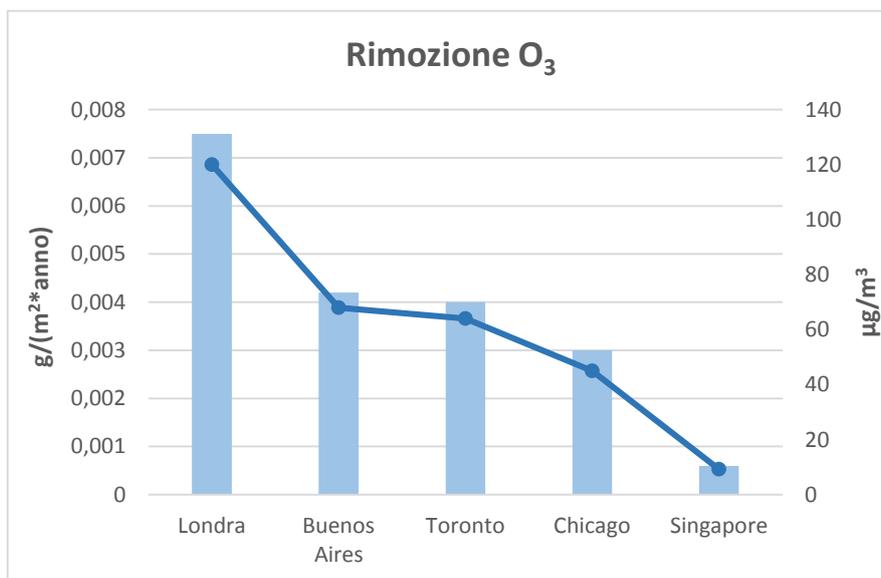


Figura 86 Riduzione di O₃ per 1 m² di tetto verde

Anche in questo caso la maggiore concentrazione di O₃ a Londra fa sì che la miglior rimozione di questo inquinante avvenga proprio nella suddetta città; la peggiore a Singapore.

Conclusione

In questo lavoro di tesi sono state raccolte le prestazioni più significative dei tetti verdi e messe a confronto in funzione della fascia climatica.

È stato evidenziato che in ognuno dei tre campi di studio i tetti verdi possono apportare un significativo contributo ambientale, che però è variabile e non prescindibile dai fattori climatici e ambientali.

Per quanto riguarda la riduzione del runoff, questa è più significativa nelle zone a clima continentale o subtropicale, dove le piogge presentano frequenze inferiori rispetto al clima equatoriale e oceanico.

Il risparmio energetico è maggiore alle alte latitudini, in virtù della minor radiazione solare che investe quelle zone e sensibilmente ridotta alle basse latitudini e vicino all'equatore.

Inoltre, in base all'algoritmo utilizzato, l'assorbimento degli inquinanti è favorito in presenza di elevate concentrazioni, a parità di tipo di vegetazione e superfici di assorbimento.

I risultati ottenuti forniscono una panoramica ampia, sebbene contornata da ipotesi semplificative e approssimazioni, laddove non era possibile essere più precisi.

Sarebbe stato molto interessante utilizzare strumenti di calcolo e software avanzati, ma un lavoro di tesi così accurato avrebbe richiesto un maggior impiego di tempo e risorse, data la complessità e il numero delle variabili in gioco.

Mi auguro comunque di aver fornito un quadro il più possibile sfaccettato e rappresentativo delle reali prestazioni dei tetti verdi e di aver creato un punto di partenza per studi futuri che tengano in considerazione tutti benefici ambientali e i parametri che influenzano le prestazioni dei tetti verdi.

Bibliografia

- ARPA, L. (s.d.). *Polveri e IPA, effetti sulla salute*.
- Carvalho. (2010). *Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil*.
- Chicago, C. o. (2011). *Green Stormwater infrastructure strategy*.
- Conte, D. (2012). *Tesi di laurea*.
- ENEA. (s.d.). *Simulazione del comportamento energetico di un fabbricato presenza di tetto verde per ottimizzare l'efficienza energetica degli edifici rispetto alle aree climatiche italiane*.
- EPA. (s.d.). *Urban Heat Island Pilot Project*.
- Europea, C. (2010). *Green Infrastructures*.
- Figuerola, M. (2005). *Urban-rural temperature differences in Buenos Aires*.
- Geoplast. (s.d.). *Drainroof-Normativa. Geoplast*.
- ISPRA. (s.d.). *Verde pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico*.
- Leone, M. (2014). *Rain gardens. Giardini fioriti per accogliere l'acqua piovana delle città*.
www.architetturaecosostenibile.it.
- London, C. o. (2006). *Living Roofs and Walls-Technical Report: Supporting London Plan Policy*.
- London, C. o. (s.d.). *London's Urban Heat Island: A Summary for Decision Makers*.
- Luca Siragusa, U. I. (s.d.). *Sistemi di inverdimento verticale per l'architettura urbana*.
- Nowak. (1994). *Algoritmo di assorbimento degli inquinanti*.
- Oke. (1987). *Boundary layer climates*.
- Palmieri. (2011). *Lo scambio gassoso nelle piante. Zanichelli.it*.
- Stojkov, C. (2012). *Tetti verdi sperimentali all'università di Bologna*.
- Tassi. (2013). *Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais*.
- Toronto, G. o. (2005). *Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto*.
- Venegas, M. R. (s.d.). *Evaluation of an emission inventory and air pollution in the metropolitan area of Buenos Aires*.
- Wikipedia. (s.d.). *Giardini pensili di Babilonia*.
- Wikipedia. (s.d.). *Isola di calore*.
- Wikipedia. (s.d.). *Toronto*.
- Wong. (s.d.). *A study of urban heat island in Singapore*.
- Wong, e. a. (2003). *Energy saving with green roof in a five-storey building in Singapore*.
- Yang. (2008). *Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago*.

Indice delle immagini

Figura 1 Giardino verticale a Barcellona	4
Figura 2 Una parete verde su Rue d'Alsace a Parigi	4
Figura 3 Blocco in calcestruzzo per pendii	6
Figura 4 Muro verde	7
Figura 5 Rain Garden a Bologna.....	9
Figura 6 Struttura del Rain Garden	9
Figura 7 Esempio di pavimentazione permeabile	11
Figura 8 Funzionamento di un blocco di calcestruzzo drenante	11
Figura 9 Giardini pensili di Babilonia.....	13
Figura 10 Giardino pensile del Mausoleo di Augusto.....	14
Figura 11 Giardino pensile del Palazzo Ducale a Urbino	15
Figura 12 Tetto-terrazza a Villa Savoye-Poissy	15
Figura 13 Stratigrafia del tetto verde	19
Figura 14 Esempio di coltura a sedum.....	23
Figura 15 Prato naturale.....	23
Figura 16 Tappeto di erbacee perenni	24
Figura 17 Prato fruibile.....	24
Figura 18 Orto.....	25
Figura 19 Alberi e siepi.....	25
Figura 20 Andamento dello Urban heat island	26
Figura 21 Aumento della resistenza.....	29
Figura 22 Andamenti della temperatura per diversi tetti, Wong et al., 2003	30
Figura 23 Radiazione netta al suolo, Oke 1987	32
Figura 24 Differenza di flussi termici nel caso campagna (a) e nel caso città (b), Oke 1987	32
Figura 25 Effetti sulla salute dei PM10	36
Figura 26 Funzionamento degli stomi, Zanichelli	37
Figura 27 Valori di Vd per inquinante e vegetazione.....	39
Figura 28 Riduzione dell'assorbimento dell'acqua piovana, Jennings et al., 2003	40
Figura 29 Bilancio idrico dovuto alla precipitazione.....	40
Figura 30 Idrogramma 20/08/2013, Stojkov et al., 2013	42
Figura 31 Mappa delle città per fascia climatica	46
Figura 32 Posizione geografica di Toronto	47

Figura 33	Tabella climatica Toronto, Wikipedia.....	49
Figura 34	Urban Heat Island Toronto, 1985-2005	50
Figura 35	Tipi di occupazioni del suolo a Toronto	51
Figura 36	Immagine termica dei parchi di Toronto	51
Figura 37	Inondazione del 08 luglio 2013 a Toronto.....	52
Figura 38	Distribuzione attuale dei tetti verdi a Toronto	56
Figura 39	Riduzione del runoff per ogni tipo di edificio a Toronto.....	60
Figura 40	Riduzione del runoff per ogni bacino a seconda dell'utilizzo del suolo a Toronto	61
Figura 41	Posizione geografica di Buenos Aires	65
Figura 42	Tabella climatica di Buenos Aires, Wikipedia.....	66
Figura 43	Posizione di Buenos Aires sul Rio de la Plata.....	67
Figura 44	Andamento delle precipitazioni dal 1900 al 1990 a Buenos Aires.....	69
Figura 45	Stazioni per il monitoraggio dell'UHI	69
Figura 46	Andamento settimanale dell'UHI	70
Figura 47	Andamento dell'UHI dal 1960 al 2004 a Buenos Aires.....	71
Figura 48	Influenza delle ore del giorno sull'UHI	71
Figura 49	Green roofs for Buenos Aires	73
Figura 50	Posizione geografica di Chicago	77
Figura 51	Tabella climatica di Chicago, climieviaggi.it	78
Figura 52	Trend delle precipitazioni dal 1991 al 2011	80
Figura 53	Urbanizzazione a Chicago dal 1972 al 1997	81
Figura 54	Andamento dell'UHI a Chicago.....	81
Figura 55	Andamento annuale degli inquinanti atmosferici, 2006-2007, Yang et al., 2008.....	83
Figura 56	Distribuzione attuale dei tetti verdi a Chicago	85
Figura 57	Tetto verde della City Hall a Chicago	87
Figura 58	Rimozione degli inquinanti a Chicago, Yang 2008	88
Figura 59	Rimozione stagionale degli inquinanti	88
Figura 60	Immagine satellitare di Singapore	90
Figura 61	Andamento annuale delle temperature a Singapore	92
Figura 62	Tabella climatica di Singapore, climieviaggi.it	92
Figura 63	Intervalli di PSI per Singapore	93
Figura 64	Inquinamento atmosferico dovuto ai fumi degli incendi in Indonesia	94
Figura 65	Immagine termica dell'UHI a Singapore	95
Figura 66	Andamento dell'UHI a Singapore.....	96
Figura 67	Aumento del verde urbano dal 1986 al 2007.....	97

Figura 68	Posizione geografica di Londra, Google Earth.....	102
Figura 69	Tabella climatica Londra, Wikipedia.....	103
Figura 70	Andamento giornaliero dell'UHI a Londra.....	104
Figura 71	Isoterme per Londra.....	105
Figura 72	Aumento delle morti in seguito all'ondata di calore di agosto 2013 a Londra	105
Figura 73	Riduzione totale del runoff per le città	111
Figura 74	Riduzione del runoff per 1 m ² di tetto verde.....	113
Figura 75	Risparmio energetico totale per le città	117
Figura 76	Risparmio energetico per 1 m ² di tetto verde	118
Figura 77	Dipendenza della radiazione solare dalla latitudine	119
Figura 78	Mappa mondiale della radiazione solare	120
Figura 79	Riduzione totale di NO ₂ per le città.....	123
Figura 80	Riduzione di NO ₂ per 1 m ² di tetto verde.....	124
Figura 81	Riduzione totale di SO ₂ per le città	125
Figura 82	Rimozione di SO ₂ per 1 m ² di tetto verde	126
Figura 83	Riduzione totale di PM10 per le varie città	127
Figura 84	Riduzione di PM10 per 1 m ² di tetto verde.....	128
Figura 85	Riduzione totale di O ₃ per le città.....	129
Figura 86	Riduzione di O ₃ per 1 m ² di tetto verde.....	130

Indice delle tabelle

Tabella 1	Principali tipologie di pareti verdi.....	6
Tabella 2	Tipologie di pavimentazioni permeabili.....	12
Tabella 3	Spessore del substrato per tipo di vegetazione.....	20
Tabella 4	Standard di qualità dell'aria per WHO.....	34
Tabella 5	Runoff per i vari tipi di utilizzo del suolo a Toronto.....	53
Tabella 6	Concentrazione degli inquinanti a Toronto.....	54
Tabella 7	Percentuale dei tetti verdi rispetto l'area totale di Toronto.....	58
Tabella 8	Risparmio energetico a Toronto.....	59
Tabella 9	Rimozione degli inquinanti per Currie, 2005.....	62
Tabella 10	Rimozione inquinanti a Toronto con Nowak.....	63
Tabella 11	Concentrazione inquinanti a Buenos Aires.....	72
Tabella 12	Rimozione inquinanti a Buenos Aires con Nowak.....	76
Tabella 13	Concentrazioni inquinanti a Chicago.....	83
Tabella 14	Rimozione inquinanti a Chicago con Nowak.....	89
Tabella 15	Concentrazione inquinanti a Singapore.....	94
Tabella 16	Rimozione inquinanti a Singapore con Nowak.....	100
Tabella 17	Concentrazioni inquinanti a Londra.....	106
Tabella 18	Concentrazioni soglia degli inquinanti per UE.....	107
Tabella 19	Rimozione inquinanti a Londra con Nowak.....	109
Tabella 20	Riduzione totale del runoff.....	110
Tabella 21	Area e densità abitativa delle città.....	111
Tabella 22	Riduzione del runoff per 1 m ² di tetto verde.....	112
Tabella 23	Risparmio energetico totale.....	116
Tabella 24	Risparmio energetico per 1 m ² di tetto verde.....	117
Tabella 25	Rimozione totale di NO ₂	122
Tabella 26	Rimozione di NO ₂ per 1 m ² di tetto verde.....	124
Tabella 27	Rimozione totale di SO ₂	125
Tabella 28	Rimozione di SO ₂ per 1 m ² di tetto verde.....	126
Tabella 29	Rimozione totale di PM10.....	127
Tabella 30	Rimozione di PM10 per 1 m ² di tetto verde.....	128
Tabella 31	Rimozione totale di O ₃	129

Tabella 32Rimozione O₃ per 1 m² di tetto verde..... 130