



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

Qualità dell'aria interna in ambiente universitario in caso di applicazione di pareti verdi: valutazione dell'efficacia attraverso sistemi multi-agente

Indoor air quality in a university environment in case of application of green walls: evaluation of effectiveness through multi-agent systems

RELATORE:

Prof. Ing. Arch. Marco D'Orazio

TESI DI LAUREA DI:

Elisa Santarelli

CORRELATORE:

Prof. Ing. Gabriele Bernardini

A.A. 2022/2023

INDICE

1. INTRODUZIONE	5
1.1 Motivazioni e obiettivi	6
1.2 Articolazione della tesi	9
2. STATO DELL'ARTE	11
2.1 Accumulo di CO ₂ in ambiente interno	12
2.2 Sottrazione di CO ₂ da parte delle piante	14
3. FASI, MATERIALI E METODI	21
3.1 Fasi operative	23
3.2 Selezione dei dati sperimentali	24
3.3 Applicabilità del sistema di pareti verdi	25
3.3.1 Caso studio	25
3.3.2 Ipotesi di parete verde e verifiche	26
3.4 Implementazione del modello	29
3.4.1 Definizione del modello	30
3.4.2 Definizione della legge di bilanciamento della CO ₂	32
3.4.3 Implementazione del codice	34
3.4.3.1 Definizione degli agenti	34
3.4.3.2 Definizione delle variabili di input	37
3.4.3.3 Definizione delle funzioni	46
3.4.3.4 Definizione delle variabili di output	50
3.5 Valutazione dei scenari e manipolazione dati	55
3.5.1 Scenari di rischio per tempi di esposizione	55
3.5.2 Analisi di sensitività	58
3.5.3 Andamenti di CO ₂ nel tempo	61

3. FASI, MATERIALI E METODI	
3.6 Ricostruzione dello scenario in ambiente virtuale	64
3.6.1 Costruzione del modello 3D	65
3.6.2 Studio illuminotecnico sperimentale	69
3.6.3 Conduzione delle prove	72
4. ANALISI DEI RISULTATI: SIMULAZIONI	81
4.1 Efficacia delle pareti verdi per tempi di esposizione	83
4.2 Analisi di sensitività	87
4.3 Risultati degli andamenti della CO ₂ nel tempo	95
4.4 Confronto fra caso generalizzato e aule rappresentative	105
4.5 Confronto dell'efficacia: aerazione e pareti verdi	106
4.6 Confronto fra scenari di rilievo	109
5. ANALISI DEI RISULTATI: PROVE DI COMFORT	111
6. DISCUSSIONE DEI RISULTATI	117
6.1 Discussione dei risultati principali	118
6.2 Discussione dell'effetto sugli occupanti	120
6.3 Limitazioni	121
7. CONCLUSIONI	123
Bibliografia	127
Allegati	129

1

INTRODUZIONE

1.1 Motivazioni e obiettivi

1.2 Articolazione della tesi

1.1 Motivazioni e obiettivi

L'aria pulita è un attributo necessario per la vita.

Nell'ultimo decennio la qualità dell'aria interna (IAQ) è diventata una preoccupazione globale del pubblico, dei governi e della comunità scientifica poiché le persone trascorrono mediamente il 90% del loro tempo all'interno degli edifici, i quali risultano sempre più sigillati al fine di ridurre il consumo energetico degli stessi.

Quando si parla di qualità dell'aria interna si fa riferimento agli ambienti confinati come le abitazioni, gli uffici, le strutture comunitarie, gli spazi per attività ricreative e sociali, i mezzi di trasporto.

Si sono rilevati, in alcuni ambienti interni, livelli di inquinamento dell'aria fino a cento volte maggiori dei livelli riscontrabili in ambiente esterno. In particolare, ciò avviene in presenza di significativi affollamenti. Costruzioni con funzioni pubbliche come: scuole, università, uffici o centri commerciali sono pertanto maggiormente soggetti a questa problematica.

Uno dei maggiori effetti di una scarsa qualità dell'aria interna prende oggi il nome di Sindrome dell'edificio malato. Il termine "Sindrome dell'edificio malato" (SBS) viene utilizzato per descrivere situazioni in cui gli occupanti dell'edificio sperimentano effetti acuti sulla salute e sul comfort collegati al tempo trascorso in un edificio, ma non è possibile identificare alcuna malattia o causa specifica. L'Organizzazione Mondiale della Sanità riconosce la SBS come un gruppo di sintomi che non ha un'eziologia chiara, ma che si evidenzia in corrispondenza di elevate concentrazioni di agenti inquinanti e CO₂. I sintomi della SBS includono fastidio ad occhi, naso, e irritazione della gola, sensazione di mucose secche, pelle secca, pruriginosa e arrossata, mal di testa e stanchezza mentale estrema, nausea e vertigini. [1]

Abbiamo però a disposizione un'ampia letteratura che evidenzia una possibile strada per un importante miglioramento a tal riguardo. Infatti, le piante d'appartamento han-

no dimostrato di essere in grado di ridurre la maggior parte degli inquinanti atmosferici e di CO₂ presenti in ambiente indoor, permettendo di ipotizzare una mitigazione del fenomeno della SBS. La letteratura alla quale si fa riferimento si basa su studi sperimentali, nei quali molte specie vegetali sono state inserite in camere di prova ed osservate in laboratorio, permettendo la misurazione dei tassi di rimozione di agenti inquinanti e di CO₂. Tali esperimenti quindi garantiscono risultati, a determinati livelli di illuminamento, che fanno ben sperare sull'utilizzo di piante in ambiente indoor. Tuttavia affinché la quantità di piante possa essere adeguata all'ottenimento di significativi risultati, è necessario ipotizzare l'utilizzo non tanto della singola pianta in vaso, ma di un sistema di pareti verdi.

Nonostante l'esauriva letteratura circa gli argomenti trattati precedentemente, si riscontra un'importante criticità: l'assenza di un metodo di calcolo che sia in grado di valutare l'impatto dei sistemi di parete verde in ambienti interni reali, analizzando tutte le possibili interazioni fra piante, persone presenti e condizioni ambientali variabili quali: illuminamento, ventilazione ed aerazione.

Affinché si possa ottenere un'evidenza scientifica dell'effettivo contributo migliorativo da parte dei sistemi di parete verde nel miglioramento dell'IAQ, attraverso sottrazione di CO₂, risulta necessario mantenere il problema nel campo dei sistemi complessi, in cui le singole parti sono interessate da interazioni locali, che poi provocano cambiamenti nella struttura complessiva, non tramite una analisi delle componenti prese singolarmente.

La presente tesi, alla luce delle problematiche descritte, si pone l'obiettivo di valutare l'efficacia delle pareti verdi nella loro capacità di migliorare la qualità dell'aria interna, in termini quantitativi, attraverso la sottrazione di CO₂, in ambienti in cui vi è: un'elevata presenza di persone, presenza di impianti per la ventilazione funzionanti ed aerazione dovuta all'apertura delle finestre. La metodologia attraverso la quale si persegue

l'obiettivo è di modellazione multi-agent (ABM) in cui si vanno a definire gli agenti, l'ambiente e le variabili di input. L'ambiente reale preso in considerazione è una porzione del polo Monte Dago, UNIVPM. Tuttavia risulta necessario sottolineare come la flessibilità del modello permetta di ottenere ambienti di altro tipo, in base alle necessità, con estrema facilità.

Tale modello ci fornisce un ampio campione di simulazioni in grado di rappresentare una vasta quantità di scenari, attraverso i quali si possono quindi ottenere risultati di output, che si rendono leggibili attraverso i metodi dell'analisi statistica.

1.2 Articolazione della tesi

Definite queste premesse, l'elaborato di tesi si struttura in vari capitoli. Dopo questo primo capitolo di introduzione, gli argomenti andranno a strutturarsi nelle seguenti parti:

- Capitolo 2: Si tratta dello stato dell'arte, ossia la raccolta degli studi scientifici consultati sull'argomento trattato e sui metodi utilizzati, che rappresenta una presa visione degli approcci e delle metodologie utilizzate in precedenza, che rende possibile definire quello che sarà il contributo di questo studio di tesi. Lo stato dell'arte serve per definire gli specifici argomenti: fenomeno dell'accumulo di CO₂ in ambienti interni e conseguenze connesse, capacità delle piante di sottrarre CO₂ e studi fino ad ora condotti per l'applicazione in ambiente interno.
- Capitolo 3: In questo capitolo si analizza quelle che sono le fasi dell'attività di ricerca e le relative metodologie applicate, descrivendo quindi in dettaglio le quattro macrofasi operative: selezione dei dati sperimentali, implementazione del modello, valutazione e confronto degli scenari ottenuti, ricostruzione dello scenario in ambiente virtuale.
- Capitolo 4: In questo capitolo si tratta l'analisi dei risultati successiva alle simulazioni, per l'ottenimento di una risposta al quesito che ci si è posti e per la comprensione di quelli che sono i parametri di maggiore influenza.
- Capitolo 5: Questo capitolo tratta l'analisi dei risultati riferita alle prove di comfort svolte attraverso i metodi della realtà immersiva, per comprendere la fattibilità pre-occupazionale in termini di comfort in ambienti interni nei scenari previsti.

- Capitolo 6: Viene riservato alla discussione dei risultati presentati al capitolo 4 e al capitolo 5.
- Capitolo 7: Viene riservato alle conclusioni.

2

STATO DELL'ARTE

2.1 Accumulo di CO₂ in ambiente interno

2.2 Sottrazione di CO₂ da parte delle piante

2.1 Accumulo di CO₂ in ambiente interno

Il fenomeno di accumulo di CO₂ in ambienti interni si definisce come una delle principali cause di scarsa qualità dell'aria interna e del conseguente effetto di "Sindrome dell'edificio malato" percepito dagli occupanti, di cui si è discusso al capitolo 1.

Come appena introdotto, l'inquinamento dell'aria interna ha una concentrazione maggiore dell'aria in ambiente esterno. Quando l'aria contaminata di origine esterna entra attraverso la ventilazione naturale o meccanica, si mescola con inquinanti di origine interna, in particolare all'anidride carbonica dovuta alle emissioni respiratorie umane, incrementando significativamente i livelli di CO₂ presenti.

Gli ultimi studi relativi a tale tematica sottolineano come l'anidride carbonica agisca sulle nostre funzioni fisiche e vitali in molti modi, modificando la respirazione, modificando la regolare circolazione del sangue ed alterando l'acidità dei fluidi del corpo. Le prime percezioni di un'esposizione a concentrazioni elevate di CO₂ portano comunemente ad avvertire fastidi ben noti. La qualità dell'aria interna è quindi diventata un importante problema di salute internazionale ed è stata designata come un problema sanitario significativo sia negli Stati Uniti che in Europa da diversi anni. [2].

In particolare un recente studio in merito a tale questione contribuisce in maniera significativa all'individuazione di quelli che sono gli effetti sugli utenti a differenti livelli di CO₂. Sono stati esaminati letteratura scientifica e documenti relativi agli effetti dell'esposizione per inalazione all'anidride carbonica (CO₂ a concentrazioni comprese tra 500 e 5000 ppm). Tali studi sperimentali sull'uomo hanno suggerito che l'esposizione a breve termine alla CO₂, a partire da 800 ppm, provochi irritazione di tipo oculare e alle vie respiratorie superiori. A partire da 1000 ppm influisce sulle prestazioni cognitive, compreso il processo decisionale e la risoluzione dei problemi, si verifica inoltre tosse secca e in alcuni casi rinite.

Effetti a lungo termine della CO₂ a bassi livelli sulla salute umana e sulle prestazioni psicomotorie sono stati ulteriormente esaminati. Numerosi studi epidemiologici indicano quindi un'associazione tra esposizione a bassi livelli di CO₂, a partire da 700 ppm, e sintomi quali mal di testa, vertigini, stanchezza. Inoltre sintomi legati a problemi di tipo respiratorio sono stati segnalati nei bambini esposti a concentrazioni di CO₂ indoor superiori a 1000 ppm.

Tuttavia, la partecipazione di altri inquinanti interni coinvolti, contribuisce parzialmente alla manifestazione di tali effetti. [3]

Ulteriori studi hanno individuato gli effetti ad elevate concentrazioni di CO₂ (≥ 20.000 ppm), i quali sono stati analizzati durante un tempo di esposizione relativamente breve (cioè della durata di 10-20 minuti). È stato osservato che l'inalazione di una concentrazione di 50.000 ppm di CO₂ aumenta in maniera importante la frequenza cardiaca e la pressione sanguigna. Inoltre, l'inalazione di concentrazioni di CO₂ ≥ 50.000 ppm può aumentare le bande di potenza a bassa frequenza delta e theta dell'EEG. Infine per concentrazioni di CO₂ ≥ 20.000 , 40.000, 100.000 e 250.000 ppm gli effetti riscontrati sono rispettivamente quelli di respirazione più profonda, sensazione di mancanza di respiro, disturbi visivi, tremori e morte.

Tuttavia, le concentrazioni di CO₂ indoor sono di un ordine di grandezza inferiori a quelle degli studi sopra riportati, che sono generalmente inferiori a 2000-3000 ppm, in alcuni casi raggiungono 4000-4500 ppm.

Alla luce di ciò di cui si è fino ad ora discusso, può risultare chiara l'importanza di un adeguato impianto di ventilazione e di una corretta pratica di aerazione tramite apertura delle finestre in determinati ambienti interni, in particolare dove si forma affollamento di persone. Può essere considerato però altrettanto importante, a fronte di tale problematica, indagare eventuali ulteriori sistemi per la sottrazione di CO₂ in ambiente interno.

2.2 Sottrazione di CO₂ da parte delle piante

Diversi sono gli studi che negli ultimi anni hanno tentato di dare una risposta al quesito che ci stiamo ponendo, ovvero se le piante possano davvero migliorare la qualità dell'aria interna, oltre che essere utilizzate per semplici scopi estetici e per benefici effetti psicologici su chi ne è circondato. Di fatto, la loro capacità di ripulire l'aria sottraendo CO₂ ed emettendo O₂ in ambiente esterno, è senz'altro accertata, essendo fasi che appartengono al noto fenomeno di fotosintesi clorofilliana. È altrettanto fondamentale ricordare che le condizioni ambientali, nelle quali le piante d'appartamento si trovano, sono ben diverse da quelle dell'ambiente esterno. Sarà pertanto fondamentale comprovarne la loro capacità benefica.

Possiamo affermare che studi fino ad ora condotti, tutti di carattere sperimentale, danno risposte principalmente positive. Infatti, permettono di ipotizzare l'inserimento di piante in ambienti indoor, al fine di ridurre gli agenti inquinanti ed in particolare la CO₂.

Primi studi circa tale argomento sono stati svolti dalla NASA, la quale ha testato la capacità delle piante di pulire l'aria interna per un possibile utilizzo nelle stazioni spaziali. Ancor prima che aumentasse la consapevolezza dell'inquinamento dell'aria interna nei primi anni '80, la NASA aveva già finanziato la ricerca sull'utilizzo delle piante per la pulizia dell'aria. La stessa NASA ha inoltre espresso un'importante preoccupazione per la scarsa qualità dell'aria interna [4].

In uno studio in camera di prova di laboratorio di Ah e altri. (2011), è stata misurata la capacità di ridurre l'anidride carbonica attraverso l'utilizzo di tre specie di piante indoor in presenza di continui incrementi dei livelli di concentrazione di CO₂, generata dalla respirazione di animali da esperimento. Si è quindi scoperto che i tassi di rimozione di CO₂ fossero dipendenti dalla concentrazione dell'anidride carbonica stessa e che le

piante hanno di fatto contribuito a mitigare l'aumento delle concentrazioni di CO₂ in maniera significativa. Tuttavia, i test sono stati condotti a un singolo livello di luce (16±5 µmol/m²/s), pertanto l'influenza delle variazioni dei livelli di luce sulle risposte fotosintetiche non è stata affrontata.

Un altro studio, Pennisi e van Iersel (2012), ha profilato il sequestro dell'anidride carbonica delle comuni piante da interno acclimatate a condizioni ambientali interne simulate e in situ, concludendo che sarebbe necessario un numero irrealizzabile di piante da interno per fare una differenza sostanziale in termini di livelli di CO₂ indoor [5].

Si desume pertanto che affinché l'ipotesi sia realizzabile, risulta necessario che le piante vadano a comporre un elemento edilizio di possibile applicazione negli spazi interni.

Alcuni studi hanno evidenziato differenze piuttosto elevate tra edifici climatizzati e no. Infatti, in uno studio sul campo svolto utilizzando 55 uffici comunali, si è scoperto che le stanze con tre o più piante in vaso erano associate a una riduzione del 10% delle concentrazioni di CO₂ in un edificio climatizzato, mentre una riduzione del 25% in un edificio non climatizzato. Tuttavia, utilizzando le stesse due specie di piante, in due edifici climatizzati più moderni, si è rilevata solo una rimozione insignificante di CO₂ (Brennan, 2011) [6].

Si è quindi concluso, sulla base degli studi precedentemente descritti, che i tassi di rimozione inferiori registrati nel caso di edifici climatizzati fossero dovuti ai sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) più efficienti negli edifici più nuovi, che mascheravano il potenziale contributo delle piante al miglioramento della qualità dell'aria interna in virtù dei loro tassi di ventilazione più elevati.

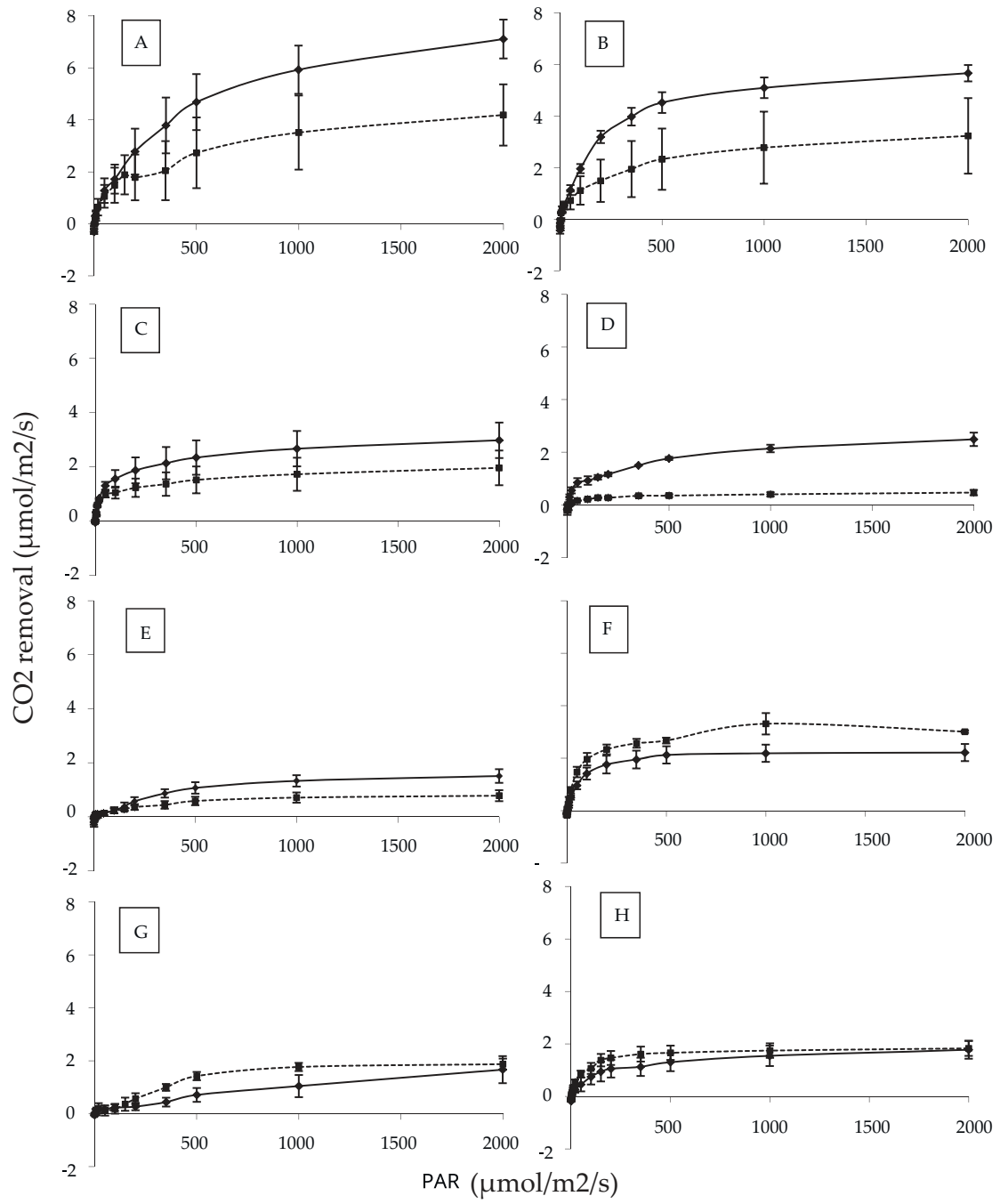
I risultati combinati degli studi sul campo suggeriscono che gli impianti interni potrebbero essere utilizzati per ridurre i requisiti di ventilazione HVAC, riducendo non solo i costi energetici ma anche il contributo dell'edificio alle emissioni di gas serra e all'impronta di carbonio. È stato stimato che l'uso di un'adeguata progettazione di impianti

verdi potrebbe ridurre i carichi energetici HVAC del 10-20% (Afrin, 2009) [7].

Ulteriore tema trattato delle ricerche fino ad ora condotte, è stato quello dell'influenza dei tassi fotosintetici intrinseci nei risultati riportati. Infatti, qualsiasi pianta verde e sana, con luce adeguata, fotosintetizzerà, assorbendo CO₂ e rilasciando quantità equimolecolari di O₂. Tuttavia, le specie variano nei requisiti di luce e nei tassi fotosintetici intrinseci per unità di superficie fogliare; quindi i tassi fotosintetici a un dato livello di luce sono specifici della specie. Inoltre, sebbene i tassi fotosintetici fogliari siano stati ampiamente utilizzati per stimare la capacità di rimozione di CO₂ delle piante da esterno (Asensio et al., 2007), questi dati potrebbero non riflettere le reali prestazioni di un sistema vegetale, poiché le piante possiedono anche tessuti non verdi e associazioni con microrganismi della zona radicale nei loro substrati, ognuno dei quali ha il proprio utilizzo di carbonio e profili di rilascio (Somova e Pechurkin, 2001) [8].

In un ulteriore studio sono state determinate le curve di risposta alla luce fogliare per otto specie comuni di piante da interno, per confrontare le capacità fotosintetiche intrinseche quando soggette a livelli di luce crescenti, osservabili in *Figura 1*. In secondo luogo, sono stati misurati gli scambi di CO₂ dell'intera pianta in vaso, utilizzando camere di prova sigillate, per determinare la rimozione di CO₂ lorda in ppm che ci si può aspettare, sia in condizioni di illuminamento interno normale che elevato.

Da tale studio emerge che il più alto tasso di prelievo di CO₂ registrato è di 657 mgCO₂/m² superficie fogliare/h per la specie "D. lutescens" ad un livello di illuminamento piuttosto elevato, ovvero 350 μmol/m²/s, come si può osservare in *Figura 2*. [9]



(Figura 1. curve di risposta alla luce fogliare, [2])

Table 4
CO₂ removal performance of the test species at two test light levels. 'Plant' represents the net CO₂ flux per individual potted plant, including substrate. Data are arranged in order of decreasing CO₂ removal/plant/h at 10 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Negative values indicate the net production of CO₂. Values are means \pm SEM (n=8).

Test species	Acclimatisation	10 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$		350 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
		mg CO ₂ removed/plant/h	mg CO ₂ removed/m ² leaf area/h	mg CO ₂ removed/plant/h	mg CO ₂ removed/m ² leaf area/h
<i>C. elegans</i>	Low light	5.21 \pm 0.00	4.20 \pm 0.03	110 \pm 0.00	88.7 \pm 0.03
	High light	-402 \pm 0.04	-13.5 \pm 0.03	118 \pm 0.00	95.4 \pm 0.03
<i>H. forsteriana</i>	Low light	3.88 \pm 0.00	5.21 \pm 0.02	168 \pm 0.00	225 \pm 0.02
	High light	-9.51 \pm 0.00	-12.8 \pm 0.02	154 \pm 0.00	206 \pm 0.02
<i>C. australe</i>	Low light	-21.3 \pm 0.00	-40.5 \pm 0.02	59.4 \pm 0.00	113 \pm 0.02
	High light	1.87 \pm 0.00	3.57 \pm 0.03	36.1 \pm 0.00	68.9 \pm 0.02
<i>D. lutescens</i>	Low light	-4.66 \pm 0.00	-22.0 \pm 0.08	76.1 \pm 0.00	360 \pm 0.08
	High light	-7.23 \pm 0.00	-34.2 \pm 0.08	139 \pm 0.00	657 \pm 0.07
<i>F. benjamina</i>	Low light	-8.08 \pm 0.00	-49.1 \pm 0.09	18.5 \pm 0.00	89.12 \pm 0.09
	High light	-6.41 \pm 0.00	-30.8 \pm 0.09	46.9 \pm 0.00	225 \pm 0.09
<i>D. deremensis</i>	Low light	-11.0 \pm 0.00	-51.0 \pm 0.10	33.1 \pm 0.00	153 \pm 0.10
	High light	-13.6 \pm 0.00	-63.0 \pm 0.10	85.8 \pm 0.00	397 \pm 0.09
<i>A. elatior</i>	Low light	-35.6 \pm 0.04	-63.6 \pm 0.03	90.0 \pm 0.00	386 \pm 0.03
	High light	-12.6 \pm 0.00	-54.1 \pm 0.03	59.2 \pm 0.00	254 \pm 0.03
<i>A. commutatum</i>	Low light	-62.4 \pm 0.04	-5.72 \pm 0.08	73.5 \pm 0.00	162 \pm 0.08
	High light	-76.5 \pm 0.04	-7.02 \pm 0.08	47.9 \pm 0.00	106 \pm 0.08

(Figura 2. Tassi di rimozione di CO₂ a differenti livelli di illuminamento, [2])

Una recente ricerca ha ulteriormente studiato, per via sperimentale, le prestazioni dell'illuminazione supplementare impiegata per i sistemi di pareti viventi interne, ponendosi l'obiettivo di verificare se le condizioni di illuminazione ottimizzate possano portare a un miglioramento della CO₂ rimossa. Per campionare gli scenari luminosi attualmente utilizzati sono state effettuate prove con diverse pareti viventi interne di dimensioni medio-grandi, a differenza degli studi precedenti in cui la sperimentazione è stata affrontata sulle singole piante in vaso. Si è concluso che la maggior parte delle piante nei sistemi esistenti attuali sono state esposte a un'illuminazione non ottimale, ovvero a bassi livelli di illuminamento e sfavorevole inclinazione del corpo illuminante. Si è potuto dunque affermare che in tali condizioni la CO₂ netta possa essere considerata pari a zero. [10]

La letteratura fino ad ora descritta ci dà importanti informazioni a partire dalle quali si può pensare di indagare in maniera approfondita quella che è l'efficacia delle pareti verdi in particolari condizioni. Inoltre, la letteratura mette in evidenza l'influenza dei livelli di luminosità ai quali il verde viene sottoposto.

Va sottolineato come il tema di sottrazione di CO₂ da parte delle piante, sia stato fino

ad oggi affrontato unicamente per via sperimentale, ma si può ipotizzare di affrontarlo anche per via analitica.

In particolare, un studio del 2021, dimostra come strumenti di simulazione avanzati come strumenti multi-agente possano contribuire a migliorare l'IAQ in un edificio, garantendo così un ambiente interno sano. Tale metodologia è già stata utilizzata per la valutazione dell'IAQ in presenza di SARS-CoV-2, al fine di analizzarne la concentrazione del virus nell'aria e l'impatto di misure singole e di combinazione di misure. Tra gli strumenti più efficaci figuravano il miglioramento della ventilazione naturale, la limitazione della durata delle riunioni e l'uso di mascherine. [11]

Alla luce di quanto descritto da letteratura, si assume consolidata la capacità delle piante di ridurre CO_2 , ma non si ha evidenza scientifica dell'effettivo impatto, in termini quantitativi, di un sistema costituito da molteplici piante, ovvero un sistema di pareti verdi, in determinate condizioni, quali: affollamento di persone, presenza di impianti di ventilazione funzionanti ed aerazione.

In questo quadro, la presente tesi assume l'obiettivo di valutare l'efficacia dei sistemi di parete verde in ambienti interni, nelle condizioni appena descritte, nella loro capacità di migliorare la qualità dell'aria interna, sottraendo CO_2 e quindi di mitigare gli effetti della Sindrome dell'edificio malato sugli utenti. L'obiettivo viene perseguito tramite l'utilizzo di una consolidata metodologia basata sui sistemi multi-agente, come appena suggerito. In particolare l'ambiente che si prende in considerazione è quello universitario. La comprensione dell'impatto di questo componente edilizio all'interno di ambienti interni potrà diventare fondamentale per la loro adeguata applicazione.

3

FASI, MATERIALI E METODI

3.1 Fasi operative

3.2 Selezione dei dati sperimentali

3.3 Applicabilità del sistema di pareti verdi

3.3.1 Caso studio

3.3.2 Ipotesi di parete verde e verifiche

3.4 Implementazione del modello

3.4.1 Definizione del modello

3.4.2 Definizione della legge di bilanciamento della CO_2

3.4.3 Implementazione del codice

3.4.3.1 Definizione degli agenti

3.4.3.2 Definizione delle variabili di input

3.4.3.3 Definizione delle funzioni

3.4.3.4 Definizione delle variabili di output

3.5 Valutazione scenari e criteri di analisi dei dati

3.5.1 Scenari di rischio per tempi di esposizione

3.5.2 Analisi di sensitività

3.5.3 Andamenti di CO_2 nel tempo

FASI, MATERIALI E METODI

3.6 Ricostruzione dello scenario in ambiente virtuale

3.6.1 Costruzione del modello 3D

3.6.2 Studio illuminotecnico sperimentale

3.6.3 Conduzione delle prove

Questo capitolo si pone l'obiettivo di descrivere quelle che sono le fasi seguite, la metodologia applicata e gli strumenti utilizzati nello studio di ricerca condotto nella tesi. Si elencano di seguito le fasi operative ed i passaggi seguiti, che porteranno a giustificare l'utilizzo dello strumento di calcolo ed a valutare gli scenari da analizzare.

3.1 Fasi operative

Le fasi operative che costituiscono l'attività di ricerca svolta in questo lavoro di tesi sono:

3.2 Selezione dei dati sperimentali

3.3 Applicabilità del sistema di pareti verdi, considerando un caso studio rilevante (spazi per aule didattiche della facoltà di ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche).

3.4 Implementazione del modello multi-agent, attraverso la definizione dell'ambiente di simulazione, degli agenti e delle variabili di input ed output.

3.5 Valutazione e confronto dei diversi scenari forniti dalle simulazioni prodotte, in funzione degli indicatori metodologici definiti.

3.6 Ricostruzione dello scenario in ambiente virtuale, tramite l'utilizzo della realtà immersiva, per la valutazione del comfort in ambiente interno.

3.2 Selezione dei dati sperimentali

In primo luogo si sono selezionati i dati sperimentali a partire dalla letteratura a disposizione. Di seguito, si ritrovano i valori presi in considerazione e i relativi riferimenti.

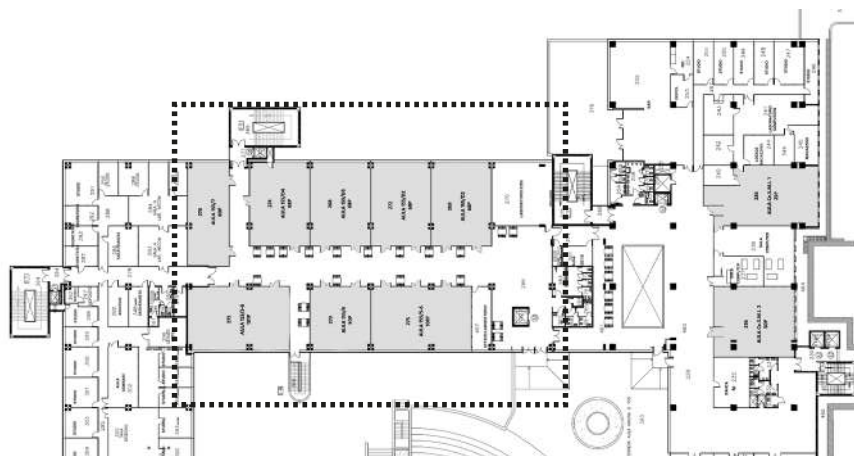
Dati sperimentali	Valori
1_ CO₂ emessa da ogni occupante	mattina: 15.5 ± 0.8 L/h pomeriggio: 16.4 ± 0.7 L/h
I valori sono stati individuati all'interno dell'articolo "Examining CO ₂ Levels in School Classrooms", <i>Mark B. Luther, Peter Horan and Steven E. Atkinson (2014)</i> .	
2_ CO₂ di partenza	540 ± 39 ppm
Il valore è stato selezionato a seguito del calcolo di media e deviazione standard del campione di dati proveniente dal Monitoraggio condotto all'interno dell'Università dal dipartimento DICEA.	
3_ CO₂ sottratta dalle piante	<ul style="list-style-type: none"> • $350 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$: $-0.1095 \text{ g}/\text{m}^2 \pm 0.0000116$ • $10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$: $0.0057 \text{ g}/\text{m}^2 \pm 0.0000133$
I valori presi in considerazione rappresentano due differenti condizioni: la prima si ha in condizioni di adeguato illuminamento delle piante, la seconda a livelli di luce normale. La fonte dei dati selezionati è l'articolo "Urban Forestry & Urban Greening Profiling indoor plants for the amelioration of high CO ₂ concentrations", <i>F.R. Torpy, P.J. Irga, M.D. Burchett (2014)</i>	
4_ Ricambi d'aria	
I valori sono stati selezionati a partire da dati provenienti dal Monitoraggio condotto all'interno dell'Università dal dipartimento DICEA.	

3.3 Applicabilità del sistema di pareti verdi

In questa fase si vuole quindi ipotizzare l'applicazione di un sistema di pareti verdi in un caso studio: spazi per aule didattiche della facoltà di ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche. Si vuole condurre lo studio nella direzione di una possibile implementazione di questo componente edilizio all'interno degli spazi affollati senza che questi debbano subire ristrutturazioni ed interventi, che potrebbero renderne l'applicazione meno attuabile. Vengono pertanto segnalati gli aspetti normativi da tenere in considerazione affinché l'ipotesi possa essere fondata.

3.3.1 Caso studio

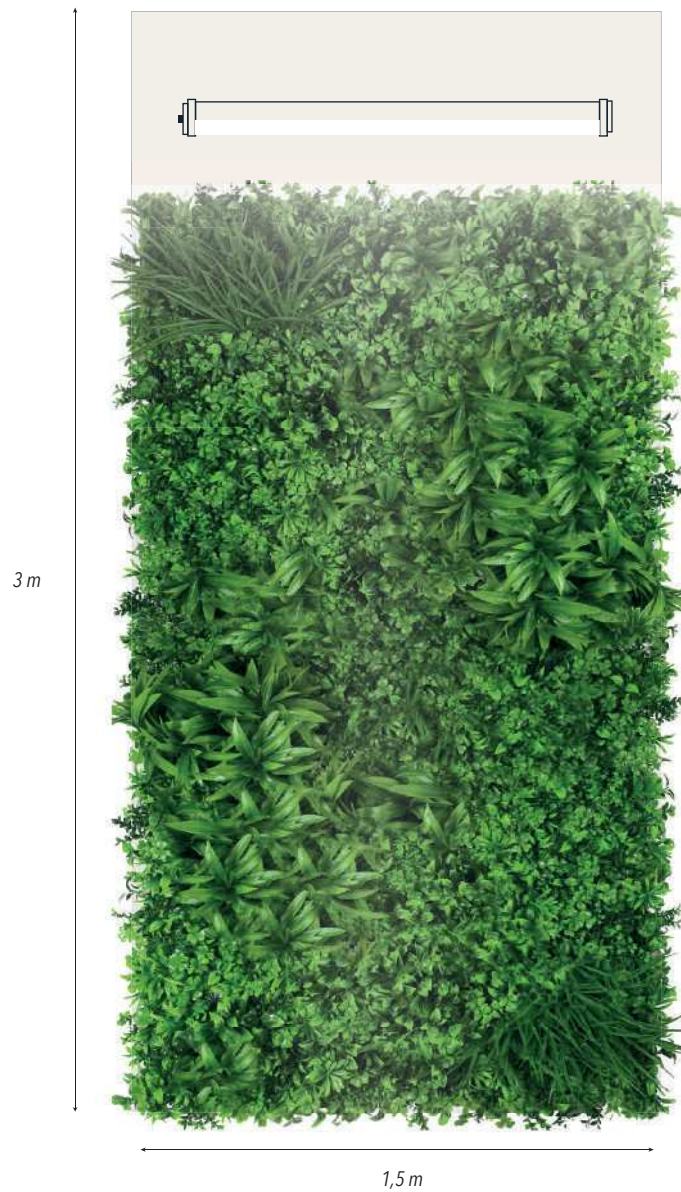
L'ambiente nel quale si sviluppa lo studio è un ambiente universitario, porzione del polo Monte Dago, Univpm, a quota 155. L'ambiente considerato è un ambiente formato da molteplici aule, valutate come ambienti indipendenti, in cui si ipotizza che non ci sia possibilità di scambio d'aria fra un ambiente e l'altro. Ognuna di queste aule è dotata di impianto di ventilazione funzionante e di finestre. Inoltre, in ognuna di esse, a causa della destinazione d'uso, si creano affollamenti costanti. Gli spazi comuni non vengono presi in considerazione in termini di calcolo di CO₂.



(Figura 3. Planimetria del Caso studio, [12])

3.3.2 Ipotesi di parete verde

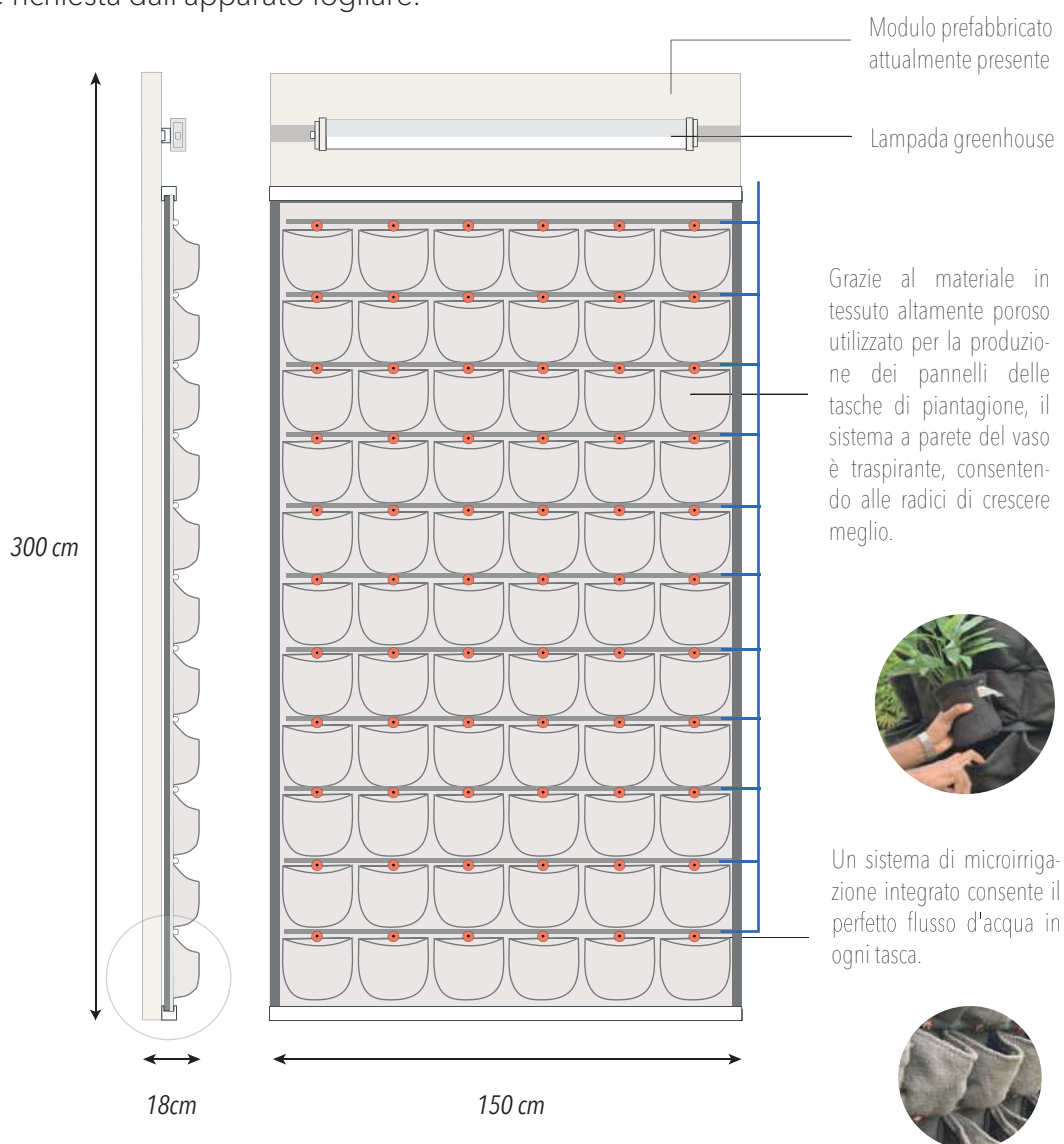
Di seguito, si riporta il modulo standard preso in considerazione. Le dimensioni sono equivalenti a quelle del modulo prefabbricato del tramezzo presente ad oggi all'interno delle aule.



(Figura 4. Modulo di parete verde)

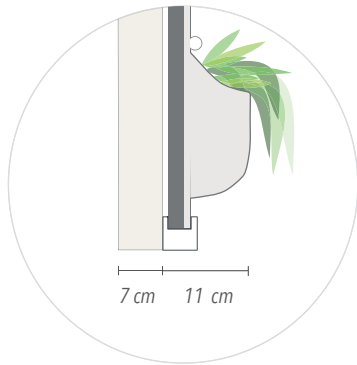
PARETE PROPOSTA

Si propone di applicare all'elemento prefabbricato preesistente, *SKYGROW STAND-ALONE VERTICAL GARDEN STRUCTURES (DIY)* [13], un elemento in tessuto composto da tasche per l'alloggiamento delle piante e sistema di microirrigazione. La tipologia scelta è già presente in commercio, ed è prodotta da un'azienda che studia sistemi innovativi per giardini verticali, sia per interni che per esterni. Inoltre dovrà essere posizionata una lampada led di intensità luminosa pari a $350 \mu\text{mol/s/m}^2$ al fine di garantire la prestazione richiesta dall'apparato fogliare.



(Figura 5. Ipotesi tecnologia utilizzata)

VERIFICHE



L'elemento è composto da un sostegno di circa 2 cm, sul quale viene applicato il tessuto formato da tasche, all'interno delle quali si andranno ad inserire le piante. Le tasche hanno una profondità di 3 pollici (7,64 cm). Nel complesso lo spessore aggiunto risulta essere inferiore a 11 cm.

- Tale spessore aggiuntivo ci permette di mantenere verificata la larghezza minima di 90 cm per le vie di fuga (codice prevenzione incendi) e la larghezza minima riferita all'accessibilità nell'uso da parte di disabili di 100 cm per percorsi orizzontali (DM 236/89).
- Si ipotizza che non sia necessario applicare un impermeabilizzante, essendo in presenza di un pannello zincato.
- Si ipotizza inoltre che non sia necessario inserire una guida di base per eventuale scolo dell'acqua, in quanto si ha microirrigazione.
- Infine, non è stata verificata la resistenza meccanica del pannello originale, rispetto al peso che si va ad applicare.

Si conclude pertanto che, denunciate le verifiche necessarie, queste dovrebbero essere approfondite in maniera ulteriore per una fattilità pre-occupazionale.

3.4 Implementazione del modello

Si è poi passati all'implementazione del modello multi-agent, utilizzando il software Netlogo per la simulazione del fenomeno di interesse, il quale dispone di un'interfaccia grafica di supporto alla simulazione. Per l'implementazione del modello si sono seguite delle ulteriori fasi operative per la conduzione dello studio, quali:

- Definizione del modello, in termini di agenti e relative regole principali di interazione.
- Definizione di una legge di bilanciamento della CO_2 , per il calcolo della quantità (g) di CO_2 presente all'interno degli ambienti simulati, ad istanti discreti.
- Implementazione del codice nel software di simulazione utilizzato.

3.4.1 Definizione del modello

Per la definizione del sistema nella sua complessità si operato in primo luogo andando a creare un macro-schema guida, attraverso una prima definizione di agenti ed input ad essi associati. In tale schema si sono quindi raccolti i dati ricercati in letteratura.

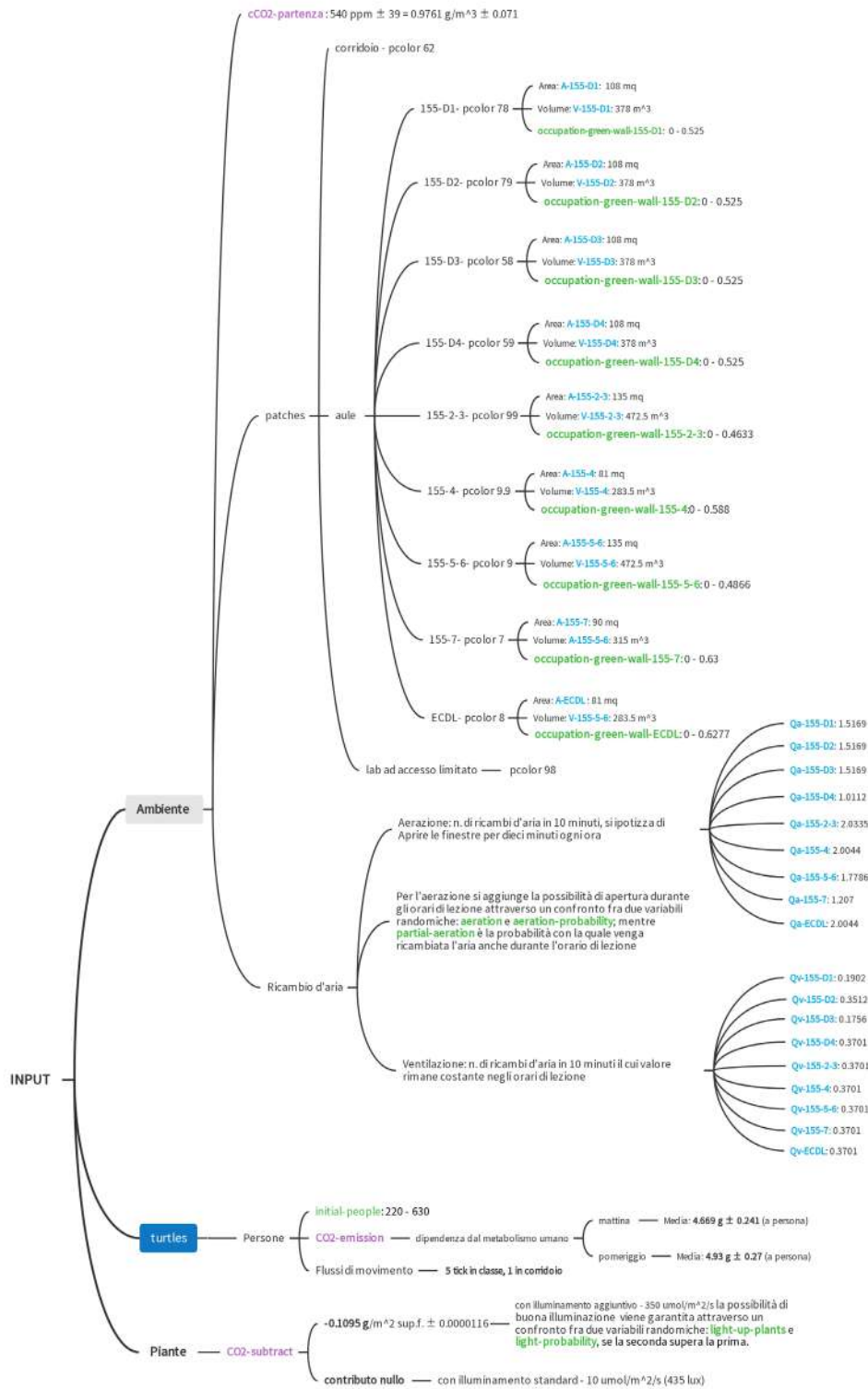
Vengono quindi individuati come agenti: l'ambiente, le persone e le piante. Ognuno dei quali, porta con sé degli input.

L'ambiente nel quale si sviluppa lo studio è quindi un ambiente universitario, porzione del polo Monte Dago, Univpm. Tale ambiente sarà quindi costituito da una concentrazione di CO_2 di base, che può quindi essere assunta pari a quella esterna, ipotizzando di trovarci in una condizione iniziale per la quale l'ambiente è stato totalmente arieggiato. Inoltre, l'ambiente sarà formato da finestre, pertanto possiamo ipotizzare di assegnare un input che definisca il numero di ricambi d'aria. Oltre ai ricambi d'aria, dovuti all'apertura delle finestre, si dovrà aggiungere la quantità di ricambi d'aria dovuti alla ventilazione presente all'interno dell'edificio.

Inoltre, l'ambiente è formato da aule, ognuna delle quali rappresenta uno spazio confinato. Per semplicità, infatti, si ipotizza che non ci sia scambio di flussi fra un'aula e l'altra. Ogni aula avrà ulteriori dati di input fissi quali volume ed area.

Altro agente da prendere in considerazione sono invece le persone. L'unico input che ci interessa considerare in questo caso è la quantità di CO_2 prodotta dalle persone. Sarà poi da tenere in considerazione il numero di persone presenti e il loro movimento. Per quello che riguarda invece le piante, sono stati presi in considerazione come parametri di input la quantità di CO_2 sottratta di giorno, a determinati valori di illuminamento, e la quantità di CO_2 prodotta di notte, o in mancanza di adeguato illuminamento.

Di seguito si riporta il macro-schema definito per l'implementazione del modello, in *Figura 5*.



(Figura 6. Macro-schema guida)

3.4.2 Definizione della legge di bilanciamento della CO₂

Al fine di valutare e comprendere i benefici delle piante poste all'interno degli edifici, in termini di riduzione di CO₂, si è riscontrato necessario costruire un'equazione di bilanciamento (1) capace di evidenziare la variazione di concentrazione di CO₂ all'interno di uno spazio confinato, ovvero le aule.

L'equazione si definisce partendo da un valore di CO₂ di base, assunto pari a quello che si ha in ambiente esterno, ottenuto tramite monitoraggio UNIVPM. A tale valore vengono poi sommati i seguenti incrementi:

- la quantità di CO₂ immessa nell'ambiente da parte delle persone presenti all'interno dell'aula;
- la quantità di CO₂ sottratta ed immessa dalle piante, alle differenti condizioni di illuminamento;
- la quantità di CO₂ sottratta dovuta al ricambio d'aria tramite ventilazione, assunta costante;
- la quantità di CO₂ sottratta dovuta al ricambio d'aria tramite areazione, ipotizzando di aprire le finestre per dieci minuti ogni ora.

Gli istanti temporali, ai quali si è valutata tale variazione, sono istanti discreti, di intervallo dieci minuti. L'intervallo è stato scelto affinché l'ipotesi di base fosse verosimile rispetto al comportamento degli studenti all'interno dell'edificio.

Perciò tutti i valori di emissione o sottrazione di CO₂ orari, sono rapportati ai dieci minuti.

$$C_{CO_2}(t) = C_{CO_2}(t-1) + \sum_i C_{CO_2,i}(dt) + \sum_p C_{CO_2,p}(dt) - Q \cdot V \cdot (C_{CO_2}(t-1) - C_{CO_2,ext}) \quad (1)$$

Dove:

$C_{CO_2}(t-1)$: quantità di CO_2 all'istante precedente (g)

* all'istante iniziale tale valore sarà coincidente con la quantità presente
in ambiente esterno

$\sum_i C_{CO_2,i}(dt)$: quantità di CO_2 prodotta da tutti gli occupanti i (g)

$\sum_p C_{CO_2,p}(dt)$: quantità di CO_2 sottratta (di giorno) e prodotta (di notte) dalle
piante p (kg)

$Q \cdot V$: ricambi d'aria complessivi (m^3)

$C_{CO_2,ext}$: concentrazione di CO_2 dell'ambiente esterno (g/m^3)

$C_{CO_2}(t-1)$: concentrazione di CO_2 all'istante precedente (g/m^3)

3.4.3 Implementazione del codice

3.4.3.1 Definizione degli agenti

In definitiva, si è quindi passati all'implementazione del modello all'interno dell'ambiente di modellazione NETLOGO, versione 6.2.0 [14]. Il software definisce l'ambiente tramite un tipo speciale di agenti stazionari che compongono il mondo del modello, chiamati "patches". Sulla base di ciò, si è descritto lo spazio di interesse, ovvero le aule e gli spazi comuni, attraverso una mappatura della planimetria. La patch rappresenta pertanto l'unità minima considerata. Ad ognuna corrisponde una larghezza di 50 cm ed equivalente altezza, per permettere la presenza, in ognuna delle singole patch, di una persona sia seduta che in piedi. Di seguito si riporta uno stralcio di codice per la definizione delle patches.

```
to setup-patch
```

```
ask patches [ set pcolor 62 ]
ask patches with [pycor < 18 and pxcor < 30] [ set pcolor 9]; 155-5-6
ask patches with [pycor > 24 and pxcor < 12] [ set pcolor 7 ] ; 155-7
ask patches with [pycor > 30 and pxcor > 18 and pxcor <= 36] [ set pcolor 59 ]; 155-D4
ask patches with [pycor > 30 and pxcor > 36 and pxcor <= 54] [ set pcolor 58 ] ; 155-D3
ask patches with [pycor > 30 and pxcor > 54 and pxcor <= 72] [ set pcolor 79 ] ; 155-D2
ask patches with [pycor > 30 and pxcor > 72 and pxcor <= 90] [ set pcolor 78 ] ; 155-D1
ask patches with [pycor > 36 and pxcor > 90 and pxcor <= 108] [ set pcolor 8 ] ; ECDL
ask patches with [pycor < 18 and pxcor > 36 and pxcor <= 54 ] [ set pcolor 9.9 ] ; 155-4
ask patches with [pycor < 18 and pxcor > 54 and pxcor <= 84 ] [ set pcolor 99 ] ; 155-2-3

; aule non monitorate
ask patches with [pycor < 18 and pxcor > 84 and pxcor <= 90 ] [ set pcolor 98 ]
ask patches with [pycor < 9 and pxcor > 90 and pxcor <= 96 ] [ set pcolor 89 ]
ask patches with [pycor < 18 and pycor >= 9 and pxcor > 90 and pxcor <= 96 ] [ set pcolor 88 ]
```

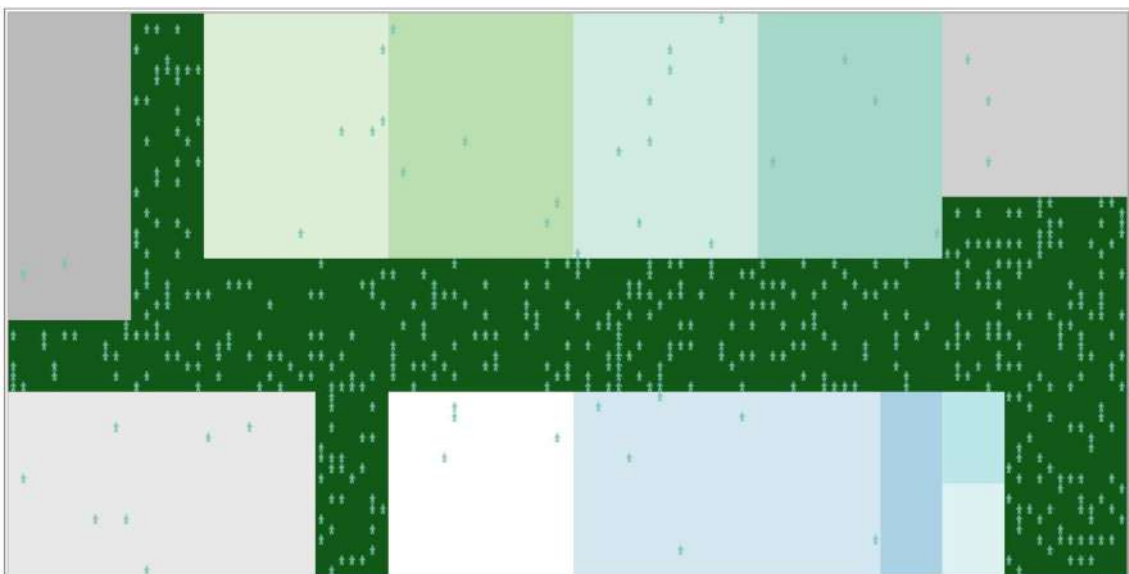
```
end
```

Inoltre, il software utilizzato descrive gli agenti mobili attraverso le "turtles", questo particolare tipo di agente è stato utilizzato per descrivere le persone presenti, affinché si

potesse quindi valutare il loro comportamento nello spazio. In particolare il movimento delle turtles è stato definito a partire da due possibili condizioni in cui queste possono trovarsi: all'interno delle aule durante le lezioni e nel corridoio durante le pause. Si è inoltre aggiunto un parametro all'interfaccia in grado di modificare il comportamento degli utenti, attraverso la percentuale di presenza in corridoio durante la pausa. Di seguito in *Figura 6* e *7* si mostrano le due condizioni: persone all'interno delle aule in presenza di lezioni e in corridoio durante le pause.



(Figura 7. Ambiente del modello con turtles in aula)



(Figura 8. Ambiente del modello con turtles in corridoio)

Per quello che riguarda la definizione delle piante all'interno del modello, queste seppur da considerarsi agenti autonomi, sono di fatto elementi fissi, non sono pertanto state considerate turtles. In linea teorica queste si sarebbero potute considerare patches, ma avendo definite la dimensione base di una patch di 50 cm x 50 cm, sulla base dello spazio occupato dalle persone, l'occupazione spaziale delle pareti verdi si è definito come una percentuale di area di queste sulle singole patches.

Ovviamente la presenza delle pareti verdi rimane confinata ai bordi di ogni aula. Se si fosse voluto ottenere un modello equivalente alla realtà si sarebbe dovuto associare lo spazio occupato dalle pareti verdi solamente alle patches di contorno.

Partendo però dall'ipotesi che si considera la concentrazione di CO_2 in ogni aula omogenea in ogni suo punto, si è potuta tralasciare questa considerazione, associando la percentuale di occupazione delle pareti verdi ad ogni patch presente nell'aula in maniera indistinta, operando attraverso un processo di omogeneizzazione.

Per calcolare questa percentuale di occupazione massima, si è ipotizzato di inserire le pareti verdi in prossimità dei tramezzi, lasciando libere le pareti in cui si è in presenza di finestre e della lavagna. Una volta effettuato il calcolo dell'area massima occupata dalle pareti verdi di ogni aula, questa è stata divisa per l'area pavimentata, ottenendo pertanto la percentuale massima di occupazione delle piante per ogni patch.

Le variabili riferite alle piante si sono pertanto definite come variabili globali, non potendo quindi essere associate ad alcun tipo di agente.

3.4.3.2 Definizione delle variabili di input

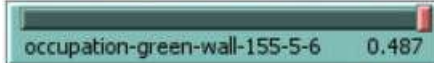
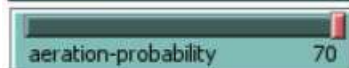
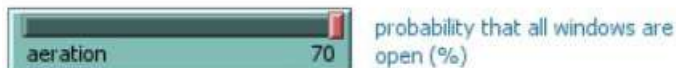
Tra le variabili che si sono definite si hanno variabili associate agli agenti e variabili di carattere globale che sono state inserite direttamente all'interno del codice.

Altre variabili invece si sono definite direttamente a livello di interfaccia, come visibile in *Figura 8*. Così facendo si rende il modello facilmente adattabile a casistiche differenti.

INPUT variables for the whole population:



ROOM CHARATERISTICS



(Figura 9. Sliders all'interfaccia)

1. INPUT - Ambiente

VARIABILI	VALORI	
1.1 cCO₂-partenza (Espressa in g/m ³)		
La cCO ₂ -partenza è una variabile di distribuzione normale indicativa del livello di concentrazione di anidride carbonica presente all'interno dell'edificio, in condizioni di equilibrio con l'ambiente esterno.	0.9761 ± 0.071 g/m ³	
1.2 occupation-green-wall		
occupation-green-wall-155-D1	0	0.525
occupation-green-wall-155-D2	0	0.525
occupation-green-wall-155-D3	0	0.525
occupation-green-wall-155-D4	0	0.525
occupation-green-wall-155-2-3	0	0.4633
occupation-green-wall-155-4	0	0.588
occupation-green-wall-155-5-6	0	0.4866
occupation-green-wall-155-7	0	0.63
occupation-green-wall-ECDL	0	0.6277
Occupation-green-wall sono variabili di distribuzione uniforme. Rappresentano la porzione di patch occupata dalla parete verde in m ² di sup. verticale / m ² di sup. pavimentata.		
1.3 partial-aeration		
partial-aeration è una variabile di distribuzione uniforme che ha la funzione di andare individuare la percentuale di ricambi d'aria dovuti alla apertura delle finestre durante gli orari di lezione.	MIN	MAX
	0	70

FONTI

CALCOLI/CONVERSIONI

Monitoraggio Univpm

Dato il campione di misurazioni a disposizione si sono calcolate media e deviazione standard: 540 ± 39 ppm.

Convertite poi in g/m³ moltiplicando la concentrazione per la densità della CO₂ in condizioni di T= 20 °C e 1 atm (1.8075 kg/m³).

/

Il calcolo svolto è stato fatto ipotizzando la possibile massima superficie di parete verde presente per ogni aula. Tale superficie sarà data dalla somma delle superfici delle pareti divisorie fra le aule, ad esclusione delle porte e limitata da un'altezza massima di 3 m.

A literature review on driving factors and contextual events influencing occupants' behaviours in buildings

Francesca Stazi, Federica Naspi, Marco D'Orazio

Come nel caso a seguire della variabile aeration il valore massimo di percentuale di apertura delle finestre sarà di circa il 70%, mentre la minima apertura può anche essere 0, dato che all'interno dell'aula si svolge attività di lezione e l'apertura potrebbe casare disagio, sia di tipo termico che acustico.

2. INPUT - Turtles (persone)

VARIABILI	VALORI	
<hr/>		
2.1 CO2-emission (Espressa in g)		
La CO2-emission è una variabile di distribuzione normale, la quale indica la quantità di anidride carbonica emessa da una singola persona in un arco temporale di 10 minuti.		
		mattina: $4.669 \text{ g} \pm 0.241$
		pomeriggio: $4.930 \text{ g} \pm 0.27$
		*differenza dovuta al metabolismo umano prima e dopo aver mangiato.
<hr/>		
2.2 initial-people		
initial-people è una variabile di distribuzione uniforme che fissa il numero di persone presenti.	MIN	MAX
	220	630
<hr/>		
2.3 moving-at-pause		
Data la presenza iniziale delle persone che vengono distribuite in maniera casuale all'interno delle aule, si impone il loro spostamento lungo il corridoio al cambio d'ora.		
La variabile moving-at-pause definisce la percentuale di persone che si sposteranno, ipotizzando quindi uno scenario per il quale una percentuale di studenti rimarrà in aula e contribuirà quindi all'aumento della CO2 interna all'aula anche in questi 10 minuti ogni ora.	MIN	MAX
	0	100

FONTI

CALCOLI/CONVERSIONI

Examining CO2 Levels in School Classrooms

Mark B. Luther, Peter Horan and Steven E. Atkinson (2014)

Dato il campione di misurazioni provenienti dalla letteratura si sono calcolate media e deviazione standard:

-mattina: 15.5 ± 0.8 L/h

-pomeriggio: 16.4 ± 0.7 L/h

Tali valori sono stati rapportati ad un tempo di 10 minuti e si è trovata la massa (in g), andando a moltiplicare il Volume per la densità citata al 1.1.

Planimetria Univpm

Il valore minimo è stato calcolato ipotizzando che la probabilità che ci sia lezione contemporaneamente in tutte le aule sia del 50 % e che il numero di studenti presenti a lezione sia di circa il 70 %.

Il valore massimo è stato calcolato sommando la massima capienza di ogni aula.

/

/

3. INPUT - Piante

VARIABILI

VALORI

3.1 CO₂-subtract (Espressa in g/m²)

La CO₂-subtract è una variabile di distribuzione normale, la quale indica la quantità di anidride carbonica sottratta da parte delle piante nel caso in cui la pianta sia sottoposta ad un adeguato illuminamento (350 μmol/m²/s) in un arco temporale di 10 minuti.

Al contrario, nel caso questo illuminamento non fosse garantito, la variabile contribuirebbe ad aumentare in minima parte la CO₂ interna. Tali valori in letteratura si hanno per circa 435 lux (10 μmol/m²/s), ma vengono accettati anche per condizioni di totale mancanza di illuminamento (di notte), data la scarsità di dati a disposizione in letteratura e la contemporanea affermazione di "effetto neutrale" di una parete verde non illuminata.

In particolare la pianta presa in considerazione è la **Dypsis lutescens (Figura 1)** in condizioni di acclimatazione ad High Light, ovvero paragonabili ad una crescita in serra.

350 μmol/m²/s:
- 0.1095 g/m² ± 0.0000116

10 μmol/m²/s:
0.0057 g/m² ± 0.0000133

*il simbolo - nel caso di adeguato illuminamento indica che il seguente valore verrà sottratto nell'equazione di bilanciamento finale

La Dypsis Lutescens o Areca è una pianta perenne da interno proveniente dal Madagascar ed appartenente alla famiglia delle Arecaceae.

Essa è caratterizzata da un fusto rigido da cui si propagano le foglie bipennate di colore verde scuro. In natura, in estate produce grandi fiori bianchi o gialli, ma la fioritura è rara se coltivata in vaso. Non richiede molte cure se non una temperatura che non scenda sotto i 18-20 gradi.



FONTI

CALCOLI/CONVERSIONI

- Urban Forestry & Urban Greening
Profiling indoor plants for the amelioration of high CO₂ concentrations

F.R. Torpy, P.J. Irga, M.D. Burchett (2014)

- Analysis of lighting conditions of indoor living walls: Effects on CO₂ removal

L. Dominici, R. Fleck, R. L. Gill, T. J. Pettit, P.J Irga, E. Comino, F.R. Torpy (2021)

I dati provenienti dalla letteratura vengono forniti in termini di CO₂ sottratta (o emessa) in mg su superficie fogliare / h.

Si è quindi rapportato tale valore in un tempo di 10 minuti e lo si è trasformato in grammi.

Si sono poi convertiti (all'interno del codice) i m² di superficie fogliare in m² di parete verde tramite indicazioni di letteratura, che prevedono un'equivalenza di 57 m² di superficie verde ogni 5 m² di parete verde.

3. INPUT - Piante

VARIABILI	VALORI	
3.2 light-up-plants		
Tale variabile di distribuzione uniforme rappresenta il buon illuminamento delle piante.	MIN	MAX
	0	100
3.3 light-probability		
Tale variabile, pescando un valore randomico tra 0 e 100, viene confrontata con la variabile di light-up-plants.	MIN	MAX
Nel caso quest'ultima fosse minore della variabile light-up-plants, si ha la condizione di buon illuminamento ($350 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$), altrimenti si è nel caso di cattivo illuminamento delle piante.	0	100

FONTI

CALCOLI/CONVERSIONI

/

/

/

/

3.4.3.3 Definizione delle funzioni

Si sono poi andate a definire delle funzioni in grado di calcolare aula per aula, ad istanti discreti di dieci minuti, i contributi di CO₂ positivi e negativi, dovuti: all'emissione da parte delle persone, alla sottrazione dovuta alla ventilazione, alla sottrazione dovuta dall'aerazione ed infine alla sottrazione di CO₂ da parte delle piante in fase diurna (ad adeguate condizioni di illuminamento).

Le porzioni di codice riportate si riferiscono all'aula 155/5-6, ma sono stati replicati per tutte le aule prese in considerazione.

Le funzioni definite sono pertanto:

1. emit

Tale funzione somma alla CO₂ presente all'istante precedente all'interno dell'aula, la CO₂ emessa da un singolo utente e replica tale procedura per ogni singola persona, ottenendo la somma delle emissioni totali di CO₂ di tutte le persone presenti per singola aula.

to emit

```
ask turtles with [pcolor = 9] ;155-5-6
[
  set CO2-emission-155-5-6 CO2-emission + CO2-emission-155-5-6
]
```

2. VentSubtract

Questa funzione calcola la differenza di concentrazione di anidride carbonica presente all'interno di ogni singola aula e la moltiplica per il volume dell'aula, tale prodotto viene moltiplicato per la portata d'aria ricavata da dati Univpm, ottenendo la quantità di CO₂, che istante per istante, viene sottratta dalla ventilazione meccanica.

to VentSubtract

```
set CO2-Vsubtraction-155-5-6 Qv-155-5-6 * V-155-5-6 * (cCO2-t-155-5-6 - cCO2-partenza)
```

3. ArSubtract

Questa funzione calcola la differenza di concentrazione di anidride carbonica presente all'interno di ogni singola aula e la moltiplica per il volume dell'aula, tale prodotto viene moltiplicato per la portata d'aria ricavata da dati Univpm, ottenendo la quantità di CO₂, che istante per istante, viene sottratta dall'aerazione dovuta all'apertura delle finestre per un tempo di 10 minuti ogni ora.

to ArSubtract

```
set CO2-Arsubtraction-155-5-6 Qa-155-5-6 * aeration / 100 * V-155-5-6 * (cCO2-t-155-5-6
- cCO2-partenza)
```

4. subtract-daylight

Tale funzione calcola la quantità di CO₂ sottratta da parte delle piante, partendo dal quantitativo di CO₂ sottratta da un singolo metro quadro di superficie fogliare, il cui dato si è ricavato da letteratura, moltiplicata per la porzione di area occupata dalle pareti verdi in ogni singola patch e moltiplicata nuovamente per l'area totale dell'aula presa in considerazione.

to subtract-daylight

```
set CO2-subtraction random-normal -0.1095 0.0000116
```

```
set CO2-subtraction-155-5-6 occupation-green-wall-155-5-6 * A-155-5-6 * CO2-subtraction * 11.4
```

5. subtract-night

Tale funzione calcola la quantità di CO₂ emessa da parte delle piante in condizioni di cattivo illuminamento, ovvero in condizioni notturne e in condizioni diurne in assenza di lezioni. Si moltiplica pertanto il quantitativo di CO₂ emessa da un singolo metro quadro di superficie fogliare, per la porzione di area occupata dalle pareti verdi in ogni singola patch e moltiplicata nuovamente per l'area totale dell'aula presa in considerazione.

to subtract-night

```
set CO2-subtraction random-normal 0.0057 0.0000133 ;sottrazione CO2 per m2 superficie fogliare
```

```
set CO2-subtraction-155-5-6 occupation-green-wall-155-5-6 * A-155-5-6 * CO2-subtraction * 11.4
```

6. Ex-Aeration

Questa funzione calcola la quantità di CO₂ sottratta ulteriormente ipotizzando che ci sia una maggiore apertura delle finestre rispetto ai soli dieci minuti orari presi in considerazione. Tale condizione si evidenzia maggiormente in presenza di temperature elevate in dipendenza dalle stagioni. Può inoltre essere così rappresentato anche il minimo apporto d'aria dovuto alle infiltrazioni delle finestre.

to Ex-Aeration

```
set CO2-EXTRAsubtraction-155-5-6 Qa-155-5-6 * partial-aeration / 100 * V-155-5-6 *  
(cCO2-t-155-5-6 - cCO2-partenza)
```

7. calculate-CO2-t

Tale funzione calcola la CO₂ totale presente ad ogni istante discreto considerato, sulla base dell'equazione di bilanciamento predefinita in fase iniziale. Si definisce partendo da un valore di CO₂ di base, assunto pari a quello che si ha in ambiente esterno. A tale valore vengono poi sommati gli incrementi già precedentemente citati.

to calculate-CO2-t

```
set CO2-t-155-5-6 CO2-t-155-5-6 + CO2-emission-155-5-6 - CO2-Vsubtraction-155-5-6 -  
CO2-Arsubtraction-155-5-6 - CO2-EXTRAsubtraction-155-5-6  
if ( CO2-t-155-5-6 < (cCO2-partenza * V-155-5-6) )  
[  
  set CO2-t-155-5-6 cCO2-partenza * V-155-5-6  
]  
set CO2-t-155-5-6 CO2-t-155-5-6 + CO2-subtraction-155-5-6  
set cCO2-t-155-5-6 CO2-t-155-5-6 / V-155-5-6  
set ppmCO2-t-155-5-6 cCO2-t-155-5-6 / 1.8075 / 10 ^ 3 * 10 ^ 6
```


8. IAQ

Tale funzione, attraverso dei cicli di tipo ifelse, riesce a definire sulla base della concentrazione di CO₂ presente all'interno di ogni aula, il tempo trascorso da ogni persona presente all'interno dell'aula a determinati livelli di CO₂. Si sono infatti definite quattro classi, corrispondenti a range di variazione di anidride carbonica, sulla base delle indicazioni normative (EN 16798-1:2019).

to IAQ

```

let errorcount 0
ifelse ( cppmCO2-t-155-5-6 <= ((cCO2-partenza * 1000 / 1.8075) + 550))
[
  set CO2-IAQ-155-5-6 1
  ask turtles with [pcolor = 9]
  [
    set time-L1 time-L1 + 1]
]
[
  ifelse ((cCO2-partenza * (1000 / 1.8075) + 350) < cppmCO2-t-155-5-6 and cppmCO2-t-155-5-6
<= ((cCO2-partenza * 1000 / 1.8075) + 8800))
  [
    set CO2-IAQ-155-5-6 2
    ask turtles with [pcolor = 9]
    [
      set time-L2 time-L2 + 1]
  ]
  [
    ifelse ((cCO2-partenza * (1000 / 1.8075) + 800) < cppmCO2-t-155-5-6 and cppmCO2-t-155-5-6
<= ((cCO2-partenza * 1000 / 1.8075) + 1350))
    [
      set CO2-IAQ-155-5-6 3
      ask turtles with [pcolor = 9]
      [
        set time-L3 time-L3 + 1]
      ]
    ]
  [
    ifelse ( cppmCO2-t-155-5-6 > ((cCO2-partenza * 1000 / 1.8075) + 1350))
    [
      set CO2-IAQ-155-5-6 4
      ask turtles with [pcolor = 9]
      [ set time-L4 time-L4 + 1]]

      [ set errorcount errorcount + 1 ]
    ]
  ]
]
]

```

3.4.3.4 Definizione delle variabili di output

1. OUTPUT

VARIABILI	VALORI
1 Tempi di esposizione	ΔCO_2 (in ppm)
time-L1-tot	I: < 550
time-L2-tot	II: 550 - 800
time-L3-tot	III: 800 - 1350
time-L4-tot	IV: > 1350

Queste variabili vanno ad indicare, il tempo totale (espresso in tick) per il quale il campione di persone preso in considerazione viene esposto a determinati livelli di concentrazione di CO_2 associati, identificati tramite quelle che sono le categorie di Qualità Ambientale definite nella norma EN 16798-1:2019.

Le categorie sono definite non soltanto dalla concentrazione di CO_2 presente, ma anche dalla temperatura operativa, dalla velocità dell'aria, illuminamento e livello di pressione sonora, ma in questo specifico caso vengono presi i soli livelli di concentrazione di anidride carbonica come unici parametri di questa analisi.

*le concentrazioni di anidride carbonica vengono espresse in termini di differenza tra quella ed esterna

Effetti sull'uomo:

Si attesta da letteratura, che una concentrazione di CO_2 superiore a 800 ppm, provoca irritazione di tipo oculare e alle vie respiratorie superiori, mentre a concentrazioni di circa 1000 ppm si verifica tosse secca e in alcuni casi rinite. Infine ad un livello superiore ai 1500 ppm si riscontra secchezza alla gola, vertigini e stanchezza, se tale condizione si protrae oltre due ore si attesta aumento di pressione sanguigna e cardiaca.

FONTI

CALCOLI/CONVERSIONI

- Proposal of comfort classification indexes suitable for both single environments and whole buildings

C. Marino, A. Nucara, M. Pietrafesa (2012)

- Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance

K. Azuma, N. Kagi, U. Yanagi, H. Osawa (2018)

Tali valori di concentrazione sono relativi alla differenza in ppm tra la concentrazione indoor e quella outdoor, pertanto si possono convertire, considerata la media di concentrazione iniziale presa in esame di 540 ppm, in:

I: $< 550 \approx < 1090$ ppm

II: $550 - 800 \approx 1090 - 1340$ ppm

III: $800 - 1350 \approx 1340 - 1890$ ppm

IV: $> 1350 \approx > 1890$ ppm

2. OUTPUT

VARIABILI

1 CO₂ emessa per aula
(g)

CO2-emission-155-5-6
CO2-emission-155-7
CO2-emission-155-D4
CO2-emission-155-D3
CO2-emission-155-D2
CO2-emission-155-D1
CO2-emission-ECDL
CO2-emission-155-4
CO2-emission-155-2-3

2 CO₂ sottratta dalle piante per aula
(g)

CO2-subtraction-155-5-6
CO2-subtraction-155-7
CO2-subtraction-155-D4
CO2-subtraction-155-D3
CO2-subtraction-155-D2
CO2-subtraction-155-D1
CO2-subtraction-ECDL
CO2-subtraction-155-4
CO2-subtraction-155-2-3

3 CO₂ sottratta dall'imp. Vent. per aula
(g)

CO2-Vsubtraction-155-5-6
CO2-Vsubtraction-155-7
CO2-Vsubtraction-155-D4
CO2-Vsubtraction-155-D3
CO2-Vsubtraction-155-D2
CO2-Vsubtraction-155-D1
CO2-Vsubtraction-ECDL
CO2-Vsubtraction-155-4
CO2-Vsubtraction-155-2-3

2. OUTPUT

VARIABILI

4 CO2 sottratta dall'ap. Finestre al cambio d'ora
(g)

CO2-Arsubtraction-155-5-6
CO2-Arsubtraction-155-7
CO2-Arsubtraction-155-D4
CO2-Arsubtraction-155-D3
CO2-Arsubtraction-155-D2
CO2-Arsubtraction-155-D1
CO2-Arsubtraction-ECDL
CO2-Arsubtraction-155-4
CO2-Arsubtraction-155-2-3

5 CO2 sottratta dall'ap. Finestre durante l'ora
(g)

CO2-EXTRArsubtraction-155-5-6
CO2-EXTRArsubtraction-155-7
CO2-EXTRArsubtraction-155-D4
CO2-EXTRArsubtraction-155-D3
CO2-EXTRArsubtraction-155-D2
CO2-EXTRArsubtraction-155-D1
CO2-EXTRArsubtraction-ECDL
CO2-EXTRArsubtraction-155-4
CO2-EXTRArsubtraction-155-2-3

6 CO2 al tempo t
(g)

CO2-t-155-5-6
CO2-t-155-7
CO2-t-155-D4
CO2-t-155-D3
CO2-t-155-D2
CO2-t-155-D1
CO2-t-ECDL
CO2-t-155-4
CO2-t-155-2-3

2. OUTPUT

VARIABILI

7 Concentrazione CO₂ al tempo t
(g/m³)

cCO2-t-155-5-6
cCO2-t-155-7
cCO2-t-155-D4
cCO2-t-155-D3
cCO2-t-155-D2
cCO2-t-155-D1
cCO2-t-ECDL
cCO2-t-155-4
cCO2-t-155-2-3

8 Concentrazione CO₂ al tempo t
(ppm)

cppmCO2-t-155-5-6
cppmCO2-t-155-7
cppmCO2-t-155-D4
cppmCO2-t-155-D3
cppmCO2-t-155-D2
cppmCO2-t-155-D1
cppmCO2-t-ECDL
cppmCO2-t-155-4
cppmCO2-t-155-2-3

3.5 Valutazione scenari e criteri di analisi dei dati

A modello implementato, si è proseguita l'attività, lanciando due serie estese di simulazioni, valutando in maniera randomica i valori delle molteplici variabili considerate. Rispettivamente dalla prima e seconda serie di simulazioni svolte, si sono estratti i dati di output definiti come prima e seconda tipologia al paragrafo precedente.

Risulta necessario a questo punto sottolineare la complessità del sistema preso in considerazione, formato da un'ampia gamma di variabili. Per questa ragione si è scelto di utilizzare il software Rstudio versione 4.2.2 [15], per la manipolazione e l'elaborazione dei dati.

3.5.1 Scenari di rischio per tempi di esposizione

A seguito della prima serie di simulazioni si sono quindi ottenuti gli output relativi ai tempi di esposizione totali per persona (espressi in ticks) a differenti livelli di CO₂, considerati nelle quattro categorie di rischio descritte precedentemente.

Il primo obiettivo da raggiungere è pertanto quello di valutare i differenti scenari di rischio ai quali gli utenti sono sottoposti, in funzione delle pareti verdi.

Si è pertanto operato attraverso una manipolazione dei dati per una corretta analisi dei risultati.

In primo luogo, si passa da quello che è il tempo totale di esposizione per categoria, per persona, alla percentuale di tempo trascorsa per categoria, per persona. Così facendo si ottiene una prima probabilità di esposizione al rischio.

```
CO2_results$time.L1.pers <- CO2_results$time.L1.tot / CO2_results$initial.people / 62
```

```
CO2_results$time.L2.pers <- CO2_results$time.L2.tot / CO2_results$initial.people / 62
```

```
CO2_results$time.L3.pers <- CO2_results$time.L3.tot / CO2_results$initial.people / 62
```

```
CO2_results$time.L4.pers <- CO2_results$time.L4.tot / CO2_results$initial.people / 62
```

Si sono poi dovute rimanere le variabili di input riferite all'occupazione del verde all'interno delle aule. Infatti, la volontà è quella di riuscire a determinare dei risultati che siano indipendenti dalle singole aule, pertanto si è operato attraverso la creazione di un'unica metrica attraverso la somma pesata dei occupation-green-wall rispetto alle aree delle singole aule.

```
CO2_results$green_occupation_sumpesata <- (CO2_results$occupation.green.wall.155.D1 * Aula_data$Aula_area[1]
+ CO2_results$occupation.green.wall.155.D2 * Aula_data$Aula_area[2] + CO2_results$occupation.green.wall.155.4
* Aula_data$Aula_area[3]+ CO2_results$occupation.green.wall.155.D3 * Aula_data$Aula_area[4] + CO2_result-
s$occupation.green.wall.155.D4 * Aula_data$Aula_area[5]+ CO2_results$occupation.green.wall.155.2.3 * Aula_da-
ta$Aula_area[6]+ CO2_results$occupation.green.wall.155.5.6 * Aula_data$Aula_area[7] + CO2_results$occupation.
green.wall.155.7 * Aula_data$Aula_area[8] + CO2_results$occupation.green.wall.ECDL * Aula_data$Aula_area[9]) /
sum(Aula_data$Aula_area)
```

Ulteriore step di manipolazione, è stato quello del calcolo aggregazioni tra livelli. Si è quindi calcolato il totale delle ore trascorse e la percentuale di tempo trascorso nelle due classi di rischio definite:

- Low Risk : somma dei scenari delle categorie: L1, L2
- High Risk : somma dei scenari delle categorie: L3, L4

Il valore di concentrazione di CO₂ di soglia per l'individuazione delle due classi di rischio appena definite è di 1340 ppm, valore stabilito a partire dalla conoscenza degli effetti sull'uomo definiti in letteratura e dalle classi stabilite all'interno dell'EN 16798-1:2019.

```
CO2_mean_Risk$nHourLR <- ((CO2_mean_Risk$time.L1.tot + CO2_mean_Risk$time.L2.tot + CO2_mean_Risk$time.
L3.tot )/6)
CO2_mean_Risk$nHourLR.rounded <- round(CO2_mean_Risk$nHourLR/ 10, digits = 1) * 10

CO2_mean_Risk$nHourHR <- (( CO2_mean_Risk$time.L4.tot)/6)
CO2_mean_Risk$nHourHR.rounded <- round(CO2_mean_Risk$nHourHR/ 10, digits = 1) * 10
```



```
CO2_mean_Risk$perc.Low.R <- (CO2_mean_Risk$nHourLR * 100)/(CO2_mean_Risk$nHourLR+ CO2_mean_Risk$nHourHR)
CO2_mean_Risk$perc.high.R <- (CO2_mean_Risk$nHourHR * 100)/(CO2_mean_Risk$nHourLR+ CO2_mean_Risk$nHourHR)

CO2_mean_Risk$perc.Low.R.rounded <- round(CO2_mean_Risk$perc.Low.R/ 10, digits = 1) * 10
CO2_mean_Risk$perc.high.R.rounded <- round(CO2_mean_Risk$perc.high.R/ 10, digits = 1) * 10
```

Infine, si è quindi definito un vettore con le percentuali di rischio in funzione delle pareti verdi, così da ottenere una efficace risposta al quesito che ci si è posti in partenza. Si considera il verde come un parametro dipendente da: somma pesata delle variabili riferite all'occupazione delle pareti verdi in ogni aula e probabilità di un adeguato illuminamento delle pareti.

```
CO2_results$green <- (((CO2_results$green_occupation_sumpesata * 100 / max(CO2_results$green_occupation_sumpesata)) * CO2_results$light)/100)

#creo un vettore con le percentuali dei rischi al variare del verde
CO2_mean_Risk_G <- aggregate(CO2_mean_Risk$perc.Low.R.rounded, list(CO2_mean_Risk$green), FUN=mean)

CO2_mean_HRiskG <- aggregate(CO2_mean_Risk$perc.high.R.rounded, list(CO2_mean_Risk$green), FUN = mean)
```

Si è inoltre definito un vettore con le percentuali di rischio in funzione all'aerazione, in modo tale da poter porre a confronto l'impatto dei due parametri.

```
#creo un vettore con le percentuali dei rischi al variare dell'aerazione
CO2_mean_Risk_A <- aggregate(CO2_mean_Risk$perc.Low.R.rounded, list(CO2_mean_Risk$aeration), FUN=mean)
CO2_mean_HRiskA <- aggregate(CO2_mean_Risk$perc.high.R.rounded, list(CO2_mean_Risk$aeration), FUN = mean)
```

3.5.2 Analisi di sensitività

Inoltre si vuole approfondire lo studio attraverso un'analisi di sensitività per valutare la robustezza del modello costruito.

L'analisi di sensitività si definisce come lo studio di come l'incertezza dell'output di un codice o di un sistema possa essere attribuita all'incertezza delle sue voci. Le combinazioni dei parametri di input seguono il metodo di calcolo di Sobol, che ci permette di valutare globalmente quali sono i parametri che più influiscono sulla variazione dei dati output.

L'analisi della sensitività basata sulla varianza (spesso indicata come metodo Sobol o indici Sobol) è una forma di analisi della sensibilità globale con cui gli scenari individuati saranno studiati. Lavorando all'interno di un quadro probabilistico, scompone la varianza dell'output del modello o del sistema in frazioni che possono essere attribuite a sistemi di input.

Indici del primo ordine

Una misura diretta della sensibilità S_i basata sulla varianza, chiamata "indice di sensibilità del primo ordine", o "indice dell'effetto principale" è definita come segue:

$$S_i = \frac{V_i}{\text{Var}(Y)}$$

Questo è il contributo alla varianza di output dell'effetto principale di X_i , quindi misura l'effetto della variazione del solo X_i , ma mediato rispetto alle variazioni di altri parametri di input. È standardizzato dalla varianza totale per fornire un contributo frazionario. Gli indici di interazione di ordine superiore S_{ij} , S_{ijk} e così via possono essere formati dividendo altri termini nella scomposizione della varianza per $\text{Var}(Y)$. Si noti che ciò implica che:

$$\sum_{i=1}^d S_i + \sum_{i < j}^d S_{ij} + \dots + S_{12\dots d} = 1$$

Indici dell'effetto totale

Usando gli indici S_i, S_{ij} e di ordine superiore indicato, si può costruire un quadro dell'importanza di ciascuna variabile nel determinare la varianza dell'output. Tuttavia, quando il numero di variabili è elevato, ciò richiede la valutazione di $2^d - 1$ indici, che possono essere troppo impegnativi computazionalmente. Per questo motivo, viene utilizzata una misura nota come "indice di effetto totale" o "indice di ordine totale", S_{Ti} . [5] Ciò misura il contributo alla varianza di output di X_i , inclusa tutta la varianza causata dalle sue interazioni, di qualsiasi ordine, con qualsiasi altra variabile di input. È dato come:

$$S_{Ti} = \frac{E_{\mathbf{X}_{\sim i}} (\text{Var}_{X_i} (Y | \mathbf{X}_{\sim i}))}{\text{Var}(Y)} = 1 - \frac{\text{Var}_{\mathbf{X}_{\sim i}} (E_{X_i} (Y | \mathbf{X}_{\sim i}))}{\text{Var}(Y)}$$

Si noti che a differenza del S_i :

$$\sum_{i=1}^d S_{Ti} \geq 1$$

a causa del fatto che l'effetto di interazione tra ad esempio X_i e X_j viene conteggiato sia in S_{Ti} che in S_{Tj} . Infatti la somma degli S_{Ti} sarà pari a 1 solo quando il modello è puramente additivo. [16]

Si sono pertanto estratti gli indici di primo ordine e totali per tutte le metriche di output. Essendo il modello elaborato per ambienti considerati in maniera distinta, inevitabilmente si ottiene un risultato frazionato nelle molteplici variabili considerate, pertanto si è operato anche in questo caso attraverso una manipolazione dei dati. Si sono quindi accorpate le variabili di input in gruppi di parametri:

1_greenwall_effects:

- Presenza di pareti verdi;

2_lights_effects:

- Illuminamento delle pareti verdi;

3_users_effects:

- Presenza delle persone in aula;

4_aeration_effects:

- Aerazione dovuta all'apertura delle finestre;
- Aerazione dovuta all'apertura delle finestre, inclusiva della probabilità che le finestre vengano aperte ulteriormente rispetto al minimo considerato.

3.5.3 Andamenti di CO₂ nel tempo

A seguito della seconda serie di simulazioni, si sono esportati gli output della seconda tipologia proposta al paragrafo precedente, ovvero tutti i contributi di CO₂ emessa e sottratta ad ogni tick ed i valori di CO₂ totale presenti in ogni aula a fine giornata, sia espressa in g che in ppm, come concentrazione. L'obiettivo di questo secondo tool di simulazione è quello di tracciare e valutare l'andamento della CO₂ all'interno delle aule, in funzione della capacità di sottrazione da parte delle piante in primis, ma anche in funzione di ulteriori parametri quali: l'aerazione dovuta l'apertura delle finestre e la presenza delle persone all'interno delle aule.

Non si prende in considerazione l'andamento dell'anidride carbonica in funzione della ventilazione meccanica, in quanto questa viene rappresentata da una variabile fissata in dipendenza dei ricambi d'aria.

In questa fase si sono manipolate le variabili di input, che essendo appunto di estesa quantità, non permettevano la comprensione del fenomeno in maniera chiara. Inoltre, essendo il modello definito attraverso una suddivisione delle aule in termini di andamento di CO₂ nel tempo, si sono considerate due aule rappresentative: L'aula 155/d1 e l'aula 155/2-3.

Si sono pertanto definiti degli indicatori metodologici in grado di mostrare (misurare) l'andamento del fenomeno nel tempo, per l'analisi e il confronto dei risultati, per ognuna delle aule prese in considerazione.

Di seguito gli indicatori metodologici e i rispettivi parametri attraverso cui si sono definti:

1_greenwall_effects:

- Presenza di pareti verdi;

2_lights_effects:

- Illuminamento delle pareti verdi;

3_users_effects:

- Presenza delle persone in aula;

4_aeration_effects:

- Aerazione dovuta all'apertura delle finestre;
- Aerazione dovuta all'apertura delle finestre, inclusiva della probabilità che le finestre vengano aperte ulteriormente rispetto al minimo considerato.

Tali indicatori sono stati ottenuti attraverso alcune manipolazioni, pertanto:

1_greenwall_effects:

il primo indicatore si è ottenuto considerando la variabile "occupation.green.wall.aula", indicativa della presenza delle pareti verdi interne all'aula, senza ulteriori modifiche.

```
CO2_trends$light <- (((100 - CO2_trends$light.probability) * (CO2_trends$light.up.plants)) / 100)
```

4_lights_effects:

Si considera infine l'adeguato illuminamento delle pareti verdi, andando a moltiplicare "light.up.plants", la variabile riferita alla probabilità con cui le piante siano ben illuminate dai corpi illuminanti predisposti, con una ulteriore variabile "light.probability", utile per includere la possibilità che le piante non vengano per nulla illuminate. Quest'ultima condizione è rappresentativa infatti di scenari in cui i corpi illuminanti vengono spenti a causa di problematiche legate alla didattica o durante le ore del giorno in cui non ci sono persone presenti all'interno delle aule.

2_users_effects:

Il secondo indicatore metodologico si è definito attraverso la combinazione di due ulteriori variabili: "initial.people", indicativo del numero totale di persone presenti all'interno dell'università, di cui quindi una randomica percentuale sarà quella presente all'interno dell'aula considerata e "moving.at.pause", variabile che definisce la percentuale di persone che si muovono durante la pausa fra le lezioni. Si ottiene quindi un parametro in grado di considerare contemporaneamente le variabili riferite alla presenza delle persone all'interno delle aule.

```
CO2_trends$initial.people.perc <- ((CO2_trends$initial.people)/630 * 100)
CO2_trends$people <- ((100 - CO2_trends$moving.at.pause) * (CO2_trends$initial.people.perc)/100)
```

3_aeration_effects:

Il terzo indicatore si è invece ottenuto considerando la variabile "aeration", utilizzata all'interno del codice per individuare la probabilità con cui vengono aperte le finestre nella loro totalità, con un limite massimo fissato al 70% di probabilità.

L'ultimo indicatore considerato, si riferisce insieme al precedente alla comprensione dell'impatto dell'aerazione sull'andamento della CO₂, ma in questo caso si sono combinate due variabili: "aeration" e "aeration.probability", includendo quindi la possibilità che ci sia un'ulteriore apertura delle finestre, rappresentativa di scenari per cui si potrebbe essere in presenza di temperature piuttosto elevate o semplicemente di un'analisi comportamentale delle persone presenti, per cui si sente la necessità di aprire le finestre. Questo secondo aspetto non è però stato ulteriormente indagato.

```
CO2_trends$aerationtot <- (((70 - CO2_trends$aeration.probability) * (CO2_trends$aeration) * (CO2_trends$partial.aeration))/393000 * 100)
```

3.6 Ricostruzione dello scenario in ambiente virtuale

In questa ultima fase si vuole indagare quello che è l'impatto sugli occupanti delle pareti verdi di cui finora si è valutata l'efficacia, affinché la ricerca svolta abbia un riscontro ed una validità per la definizione di un componente edilizio funzionale in cui si ipotizza l'integrazione del corpo illuminante necessario per l'ottenimento dello scenario di più importante impatto sulla riduzione della CO₂.

Le principali fasi operative sono:

- Costruzione del modello tridimensionale dell'ambiente di prova tramite i programmi Rhinoceros 7 [17] e Unity3D versione 2018.4.14f1[18], in particolare sono stati creati 3 scenari visivi:
 - Ambiente virtuale base
 - Ambiente virtuale caratterizzato dalla presenza di pareti verdi
 - Ambiente virtuale caratterizzato dalla presenza di pareti verdi e corpi illuminanti

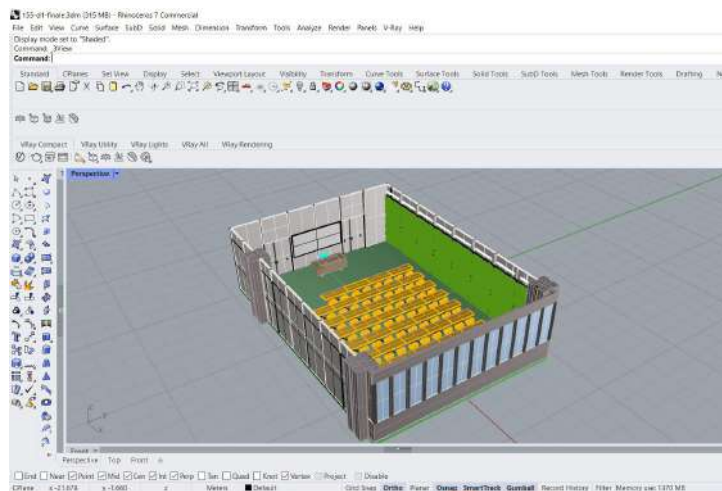
- Confronto fra l'ambiente reale e l'ambiente virtuale attraverso uno studio sperimentale dell'illuminamento.

- Selezione del campione di popolazione partecipante, predisposizione stanza per lo svolgimento delle prove e sperimentazione scenari.

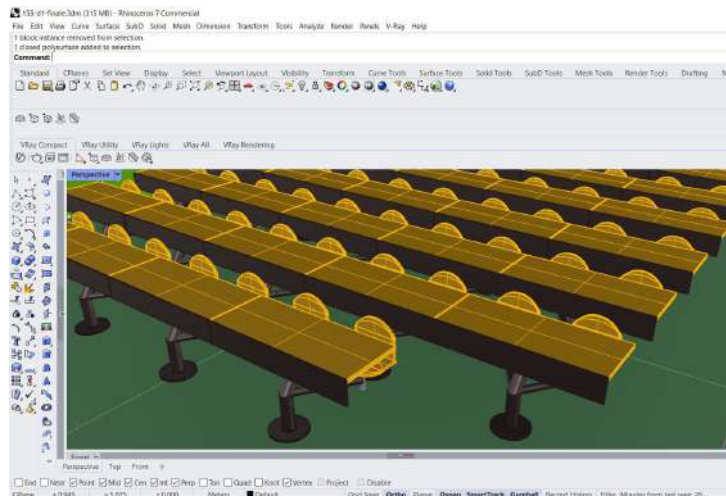
3.6.1 Costruzione del modello 3D

A tal fine, si è ricostruito il modello di un'aula rappresentativa, l'aula 155/d1. Partendo dalla planimetria fornita dall'ateneo, gestita attraverso il software Autocad (2020), in primo luogo si è operato attraverso la riproduzione in 3D con il massimo livello di dettaglio possibile con il software Rhinoceros (versione 7.0) e infine si sono applicati materiali, luci e Capsule Camera, la quale consente il firstperson player control, in Unity (versione 2020.3.21f1), una piattaforma per lo sviluppo di elementi 3D realistici.

Il modello 3D è stato quindi restituito con attenzione affinché fosse più realistico possibile. In particolare sono stati ricostruiti i banchi a seguito di un rilievo del mobilio presente all'interno dell'aula.

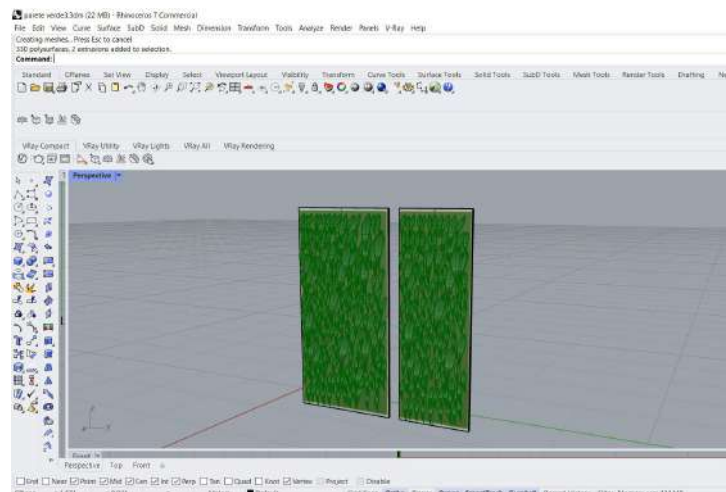


(Figura 10. Modello aula in Rhinoceros)



(Figura 11. Modello banchi in Rhinoceros)

A tale modello sono state poi ovviamente aggiunte delle pareti verdi modellate appositamente. Si sono inserite delle foglie rappresentative della tipologia di pianta selezionata inizialmente per condurre l'analisi. Ovvero la specie con maggior capacità di ridurre CO₂ da dati sperimentali provenienti in letteratura. Le dimensioni sono state definite in modo tale che si ottenesse un modulo di dimensioni pari a quelle del modulo prefabbricato di tramezzo presente all'interno dell'aula.



(Figura 12. Modello parete verde in Rhinoceros)

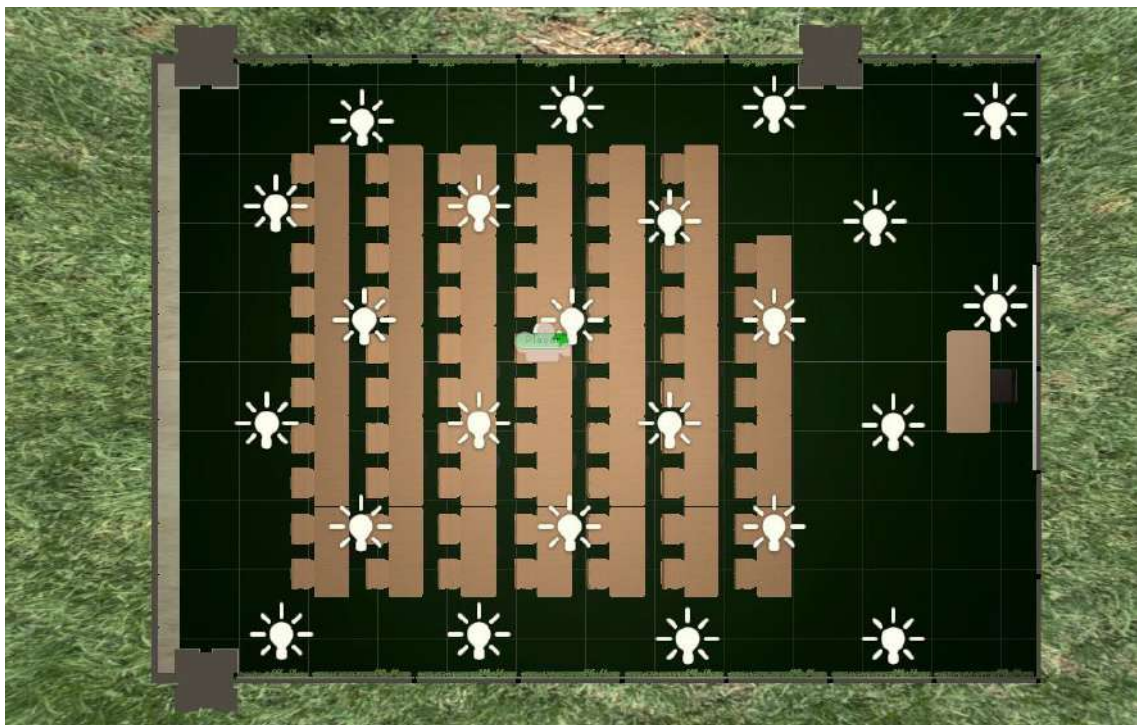
In secondo luogo si è passati alla ricostruzione dell'ambiente attraverso adeguati materiali e textures, che fossero il più possibile realistici. Come già definito, il programma utilizzato è Unity (versione 2020.3.21f1). Con lo scopo di avere una fedele trasposizione della stanza presa come esempio nell'ambiente virtuale, è stato necessario inserire all'interno del modello la corretta colorazione delle pareti, dei pilastri e dei controsoffitti. Per farlo si sono utilizzate colorazioni e textures già acquisite dal dipartimento DICEA, Università Politecnica delle Marche. Inoltre sono stati aggiunti elementi di dettaglio per ricreare un ambiente quanto più vicino a quello reale. Di seguito si riportano alcune foto rappresentative del modello ricostruito.



(Figura 13. Modello aula su Unity)



(Figura 14. Modello aula su Unity)

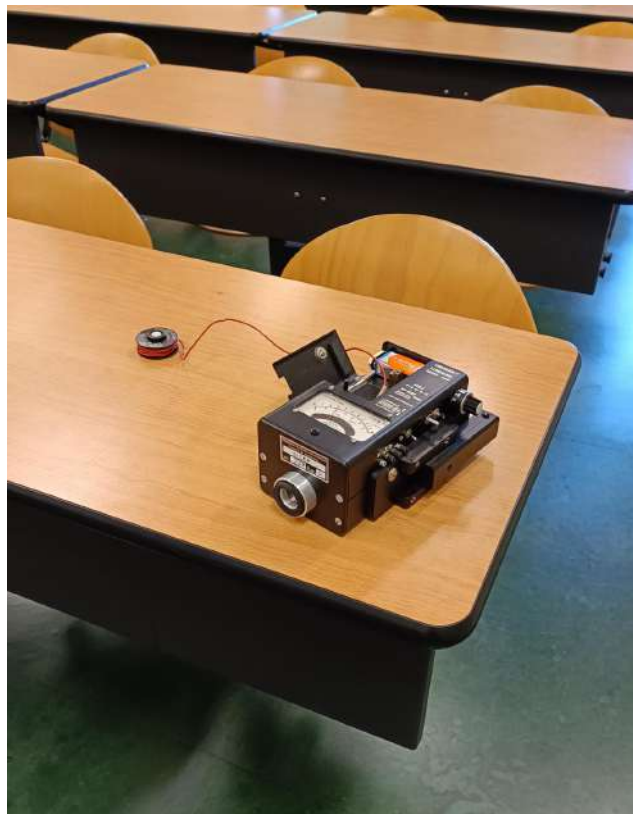


(Figura 15. Modello aula su Unity)

3.6.2 Studio illuminotecnico sperimentale

In questa seconda fase si è tentato di comprendere la corrispondenza in termini di luminanza, fra i due ambienti: l'ambiente reale e l'ambiente virtuale. Questo studio ha l'obiettivo di validare l'utilizzo della realtà immersiva per la sua capacità di rappresentare l'ambiente reale in termini di comfort visivo al fine di poter ottenere dei risultati, derivanti dalle prove di comfort condotte, che possano essere significativi per eventuali indicazioni progettuali sul componente edilizio studiato.

In primo luogo, si è operato andando ad condurre delle misurazioni in aula tramite l'utilizzo del luxmetro. Le misurazioni sono state prese all'altezza dei piani di lavoro (banchi) in cinque differenti postazioni.



(Figura 16. Foto misurazioni in aula con luxmetro)

In secondo luogo, si sono condotte equivalenti misurazioni in ambiente virtuale. Per farlo, si sono inserite Capsule Camera nelle medesime posizioni reali, all'altezza dei banchi. Si è poi predisposta la stanza in modo tale che non ci fossero altre fonti di luce oltre a quella proveniente dal visore VIVE PRO.

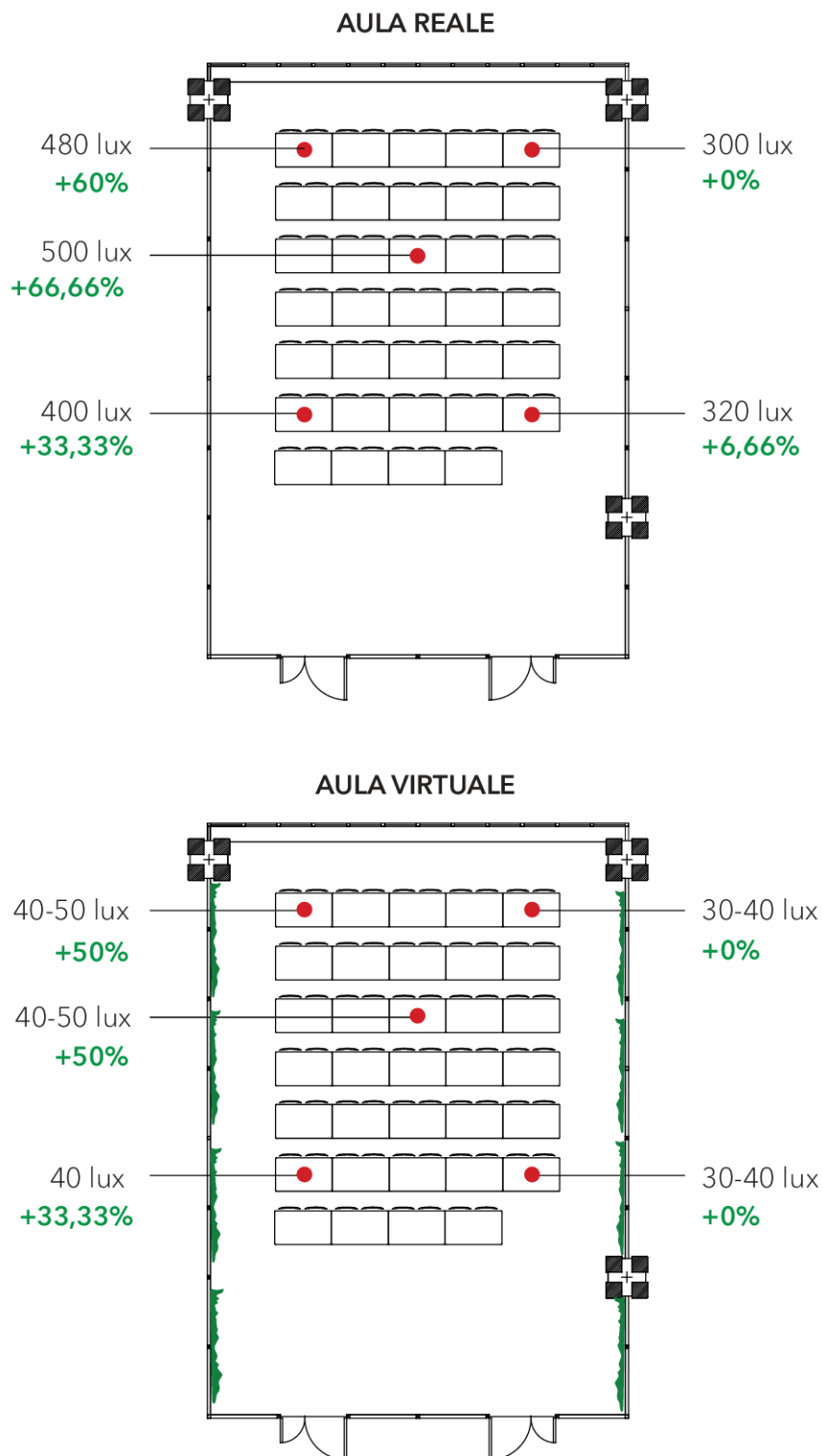
Il visore è stato posizionato in modo tale da riprodurre lo stesso scenario ideale, ovvero diretto verso l'alto. Il sensore, collegato al luxmetro, a questo punto è stato predisposto al di sotto del visore in modo tale da poter quindi ottenere le misurazioni necessarie, nelle cinque posizioni prese in considerazione.

Inoltre, si è operato un confronto, dal quale si evidenzia una differenza di scala dei due differenti scenari.

Infatti, l'ordine di grandezza dei lux, come si ipotizzava, in ambiente reale è compreso fra i 300 ed i 500 lux, mentre l'ordine di grandezza dell'ambiente virtuale risulta compreso fra i 30 e i 50 lux.

Si attesta pertanto una differenza fra i due scenari confrontati. Si valuta però la percentuale di incremento di lux, fatta rispetto al minimo, in entrambi i casi. Scoprendo così che si ha un'omogeneità dei risultati dei due ambienti. Pertanto lo strumento è validato e si ha conoscenza della scala con cui si rapportano i due differenti ambienti.

Di seguito si riporta uno schema in cui si inseriscono le misurazioni osservate nei due ambienti.



(Figura 17. Schema di confronto illuminotecnico fra i due scenari)

3.6.3 Conduzione delle prove

La conduzione delle prove per la sperimentazione dei tre scenari individuati ha l'obiettivo, nell'ambito della presente tesi, di valutare l'impatto visivo a livello soggettivo dell'intensità luminosa dei corpi illuminanti che si ipotizza di applicare alle pareti verdi di tecnologia già esistente, precedentemente definita.

La durata complessiva del test è di circa 20 minuti. Prima di iniziare la sessione di prova in VR, i partecipanti firmano il modulo per il consenso e successivamente vengono istruiti sulle modalità della prova. Sempre in fase pre-sperimentale, i partecipanti compilano il questionario introduttivo per la raccolta di informazioni generali. Tale questionario è stato realizzato tramite Google Form da parte del dipartimento DICEA.

In contemporanea alla compilazione del questionario pre-sperimentale da parte del soggetto, lo staff imposta l'ordine di svolgimento delle prove e predispone le strumentazioni per l'inizio della fase operativa.

Terminata la compilazione del questionario pre-sperimentale, i soggetti indossano il visore VIVE PRO Eye. In primis si setta la distanza tra le lenti per ottimizzare la visualizzazione del modello, poi ha inizio la fase di immersione nell'ambiente virtuale.

Il soggetto esegue il settaggio dell'Eyetracking tramite la procedura di launch calibration, gestita da un operatore, per garantire la precisione e l'accuratezza dei dati raccolti durante l'esperimento.

In un primo momento, ai soggetti è stato chiesto di riposare con gli occhi chiusi per 30 secondi, per evitare effetti indesiderati della cinetosi dovuti all'uso del visore. Dopodiché il soggetto ha iniziato a esplorare l'ambiente virtuale immersivo per adattarsi alla scena. Durante questa fase di adattamento, durata 3 minuti, il soggetto era libero di guardarsi intorno, rimanendo seduto nella sua postazione. Trascorsi i minuti per l'adattamento, ha avuto inizio la fase operativa della sperimentazione. Prima di procedere con la somministrazione del test l'operatore ha aspettato il consenso verbale del

soggetto per assicurarsi che quest'ultimo avesse avuto il tempo necessario per leggere e comprendere le istruzioni. Questa procedura è stata ripetuta per i tre scenari considerati:

- Ambiente virtuale base
- Ambiente virtuale caratterizzato dalla presenza di pareti verdi
- Ambiente virtuale caratterizzato dalla presenza di pareti verdi e corpi illuminanti

L'ordine di visualizzazione dei tre scenari viene randomizzato tra i soggetti (es. 1-2-3, 2-3-1).

I questionari di tipo pre-sperimentale e post-sperimentale sono stati elaborati in ambito di un'altra tesi di laurea all'interno del dipartimento DICEA, Univpm.

Le domande relative alla questione di interesse per la presente tesi, sono pertanto state elaborate per la valutazione dell'illuminazione e appartengono al questionario post-sperimentale.

QUESTIONARIO POST-SPERIMENTALE IN VR:

Le risposte che si sono considerate positive da un punto di vista di gradimento dell'ambiente da parte degli utenti sono poi sommate e trasformate in indicatori percentuali rispetto ad ogni domanda. Si definiscono positive le risposte a cui sono stati applicati i riquadri.

Domande a cui i soggetti sono stati sottoposti e possibili risposte:

- Come giudichi il colore della luce artificiale?

Molto freddo

Freddo

Leggermente freddo

Neutro

Leggermente caldo

Caldo

Molto caldo

- Come percepisci l'ambiente dal punto di vista dell'illuminazione?

Molto buio

Buio

Leggermente buio

Neutrale

Leggermente luminoso

Luminoso

Molto luminoso/abbagliante

- Come ti senti in questo ambiente a livello visivo?

A mio agio

Leggermente a disagio

A disagio

Molto a disagio

Estremamente a disagio

- In questo momento preferiresti che il colore della luce artificiale fosse?

Molto più freddo

Più freddo

Leggermente più freddo

Senza cambiamenti

Leggermente più caldo

Più caldo

Molto più caldo

- Come preferiresti che fosse l'ambiente dal punto di vista dell'illuminazione?

Molto più buio

Più Buio

Leggermente più buio

Neutrale

Leggermente più luminoso

Più Luminoso

Molto più luminoso

- La luce è distribuita uniformemente

Totalmente d'accordo

D'accordo

Leggermente d'accordo

Neutro

Leggermente in disaccordo

In disaccordo

Totalmente in disaccordo

- La condizione di illuminazione mi causa affaticamento agli occhi

Totalmente d'accordo

D'accordo

Leggermente d'accordo

Neutro

Leggermente in disaccordo

In disaccordo

Totalmente in disaccordo

- La condizione di illuminazione mi causa abbagliamento

Totalmente d'accordo

D'accordo

Leggermente d'accordo

Neutro

Leggermente in disaccordo

In disaccordo

Totalmente in disaccordo

- L'illuminazione dell'ambiente rende l'ufficio realistico

Totalmente d'accordo

D'accordo

Leggermente d'accordo

Neutro

Leggermente in disaccordo

In disaccordo

Totalmente in disaccordo

- L'illuminazione dell'ambiente sarebbe gradevole per lavorare

Totalmente d'accordo

D'accordo

Leggermente d'accordo

Neutro

Leggermente in disaccordo

In disaccordo

Totalmente in disaccordo

- La configurazione dell'ambiente sarebbe gradevole per lavorare

Totalmente d'accordo

D'accordo

Leggermente d'accordo

Neutro

Leggermente in disaccordo

In disaccordo

Totalmente in disaccordo

Di seguito si riportano delle immagini rappresentative degli scenari in cui gli utenti sono stati coinvolti per lo svolgimento della prova.



(Figura 18. Scenario di ambiente virtuale con pareti verdi)



(Figura 19. Scenario di ambiente virtuale dell'aula allo stato di fatto)



(Figura 20. Scenario di ambiente virtuale con pareti verdi)



(Figura 21. Scenario di ambiente virtuale dell'aula con applicazioe di pareti verdi e corpi illuminanti)

4

ANALISI DEI RISULTATI SIMULAZIONI

- 4.1 Efficacia delle pareti verdi per tempi di esposizione
- 4.2 Analisi di sensitività
- 4.3 Risultati degli andamenti della CO₂ nel tempo
- 4.4 Confronto fra caso generalizzato e aule rappresentative
- 4.5 Confronto dell'efficacia: aerazione e pareti verdi
- 4.6 Confronto fra scenari di rilievo

In questo capitolo si vanno a delineare quelli che sono i risultati provenienti dalle simulazioni svolte e le successive manipolazioni, al fine di poter dare una risposta chiara agli obiettivi posti in partenza.

Il macro-obiettivo si ricorda essere: valutare l'efficacia delle pareti verdi nella loro capacità di sottrazione di CO₂. A tal fine si sono seguite le seguenti fasi:

- In primo luogo si valuta se gli utenti, presenti all'interno degli ambienti presi in considerazione, possano essere sottoposti a classi di esposizione al rischio più elevate per un significativo tempo inferiore in presenza di pareti verdi.
- In secondo luogo si valuta la robustezza del modello attraverso un'analisi di sensibilità, che ci permette di comprendere globalmente quali sono i parametri che più influiscono sulla varianza dell'output.
- Infine, si valuta l'andamento delle concentrazioni di CO₂ al variare degli indicatori metodologici definiti al punto precedente, in modo tale da comprenderne la loro influenza.

4.1 Efficacia delle pareti verdi per tempi di esposizione

Il primo obiettivo che ci si è posti, definito al capitolo 3, è pertanto quello di valutare i differenti scenari di rischio ai quali gli utenti sono sottoposti in funzione delle pareti verdi. In questa maniera è possibile comprendere l'impatto delle pareti verdi in termini di efficacia di riduzione di CO₂ e di conseguente miglioramento dell'IAQ nelle condizioni considerate.

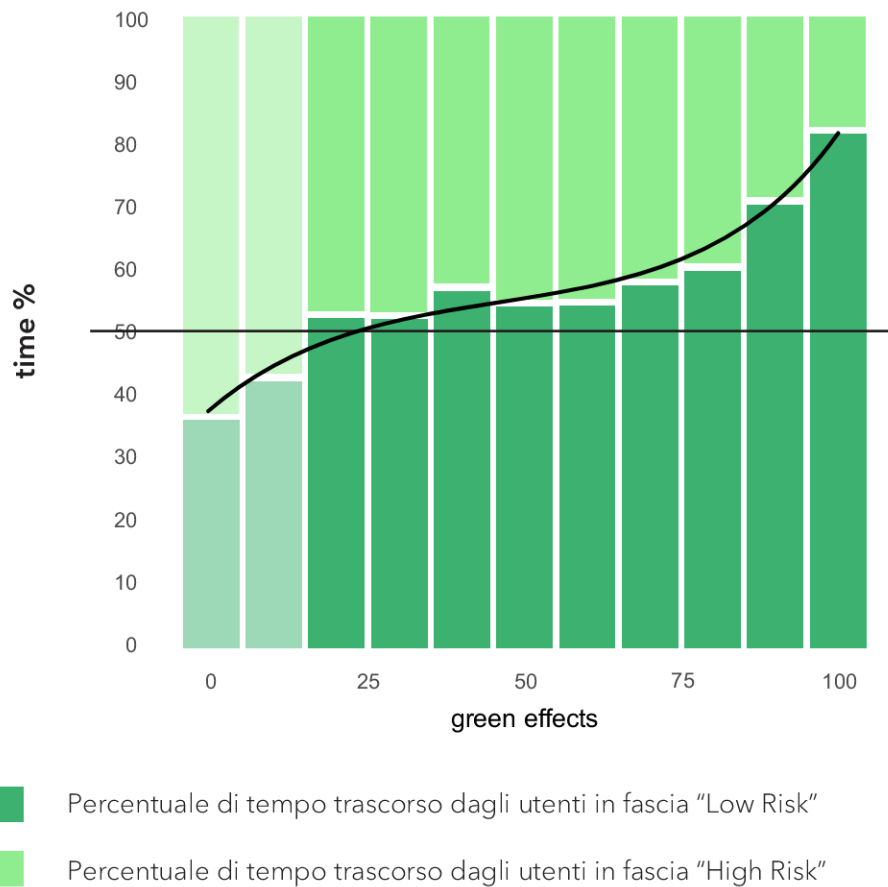
A seguito di una manipolazione dei dati, anch'essa definita al capitolo 3, si sono potuti ottenere importanti risultati. Le simulazioni sono condotte per tempi di permanenza degli utenti all'interno delle aule, pertanto con orario 08:30 - 18:30.

Occorre ricordare quelle che sono le due categorie di rischio all'esposizione di CO₂ che si sono definite:

- Low Risk : somma degli scenari delle categorie: L1, L2
- High Risk : somma degli scenari delle categorie: L3, L4

Gli utenti si trovano in categoria:

- L1 per concentrazioni di CO₂ inferiori 1090 ppm;
- L2 per concentrazioni di CO₂ comprese tra 1090 e 1340 ppm;
- L3 per concentrazioni di CO₂ comprese tra 1340 e 1890 ppm;
- L4 per concentrazioni di CO₂ superiori a 1890 ppm;



(Grafico 1. Percentuali di tempo trascorso nelle due fasce di rischio "Low Risk e "High Risk" di esposizione alla CO₂ al variare di green_effects)

Il *Grafico 1* dà una risposta chiara al quesito fondamentale che ci si è posti. Infatti, si può facilmente leggere come all'aumentare dei valori riferiti al parametro **green_effects** che aggrega le variabili di presenza, in termini di quantità di m² di pareti verdi e di adeguato illuminamento delle stesse, si ha un importantissimo abbattimento delle percentuali di tempo che complessivamente gli utenti trascorrono nella fascia di rischio più elevata "High Risk", cioè ad elevate concentrazioni di CO₂ (> 1340 ppm). Contemporaneamente, dal grafico risulta viceversa visibile come le percentuali di tempo trascorse nella fascia di rischio inferiore "Low Risk" aumentino, passando dal

solo **37%**, per valori di **green_effects** pari a 0, al **82%** per valori massimi.

In particolare, il sistema di pareti verdi illuminate si può definire come funzionale non appena si superano delle percentuali di tempo trascorse in fascia di rischio bassa, Low Risk, maggiori del 50%. Risulta quindi visibile nel *Grafico 1*, che l'effetto positivo si ha a partire dalla classe **18-27%** in su.

Inoltre, si può evidenziare come, applicando la funzione di media mobile all'istogramma riportato al *Grafico 1*, si ottenga una curva che presenta un flesso in prossimità di valori di green effects che si attestano intorno al 50. Dai valori della fascia 75-84 di green effects in poi, si ottiene un miglioramento più che lineare dell'efficacia del sistema considerato. Equivalentemente, da valori di fascia 27-36 in giù si hanno percentuali di tempo che diminuiscono con un andamento meno che lineare. Ciò suggerisce che possano esistere dei valori di green effects limite, oltre i quali l'effetto risulta amplificato. Si ha quindi una maggiore probabilità di trovarsi in prossimità del valore soglia, 1340 ppm, che definisce il passaggio fra le due fasce High Risk e Low Risk.

Al fine di comprendere il significato dei valori di green effects appena descritti, si ricorda come questi siano stati calcolati. Si è svolto il prodotto fra due variabili:

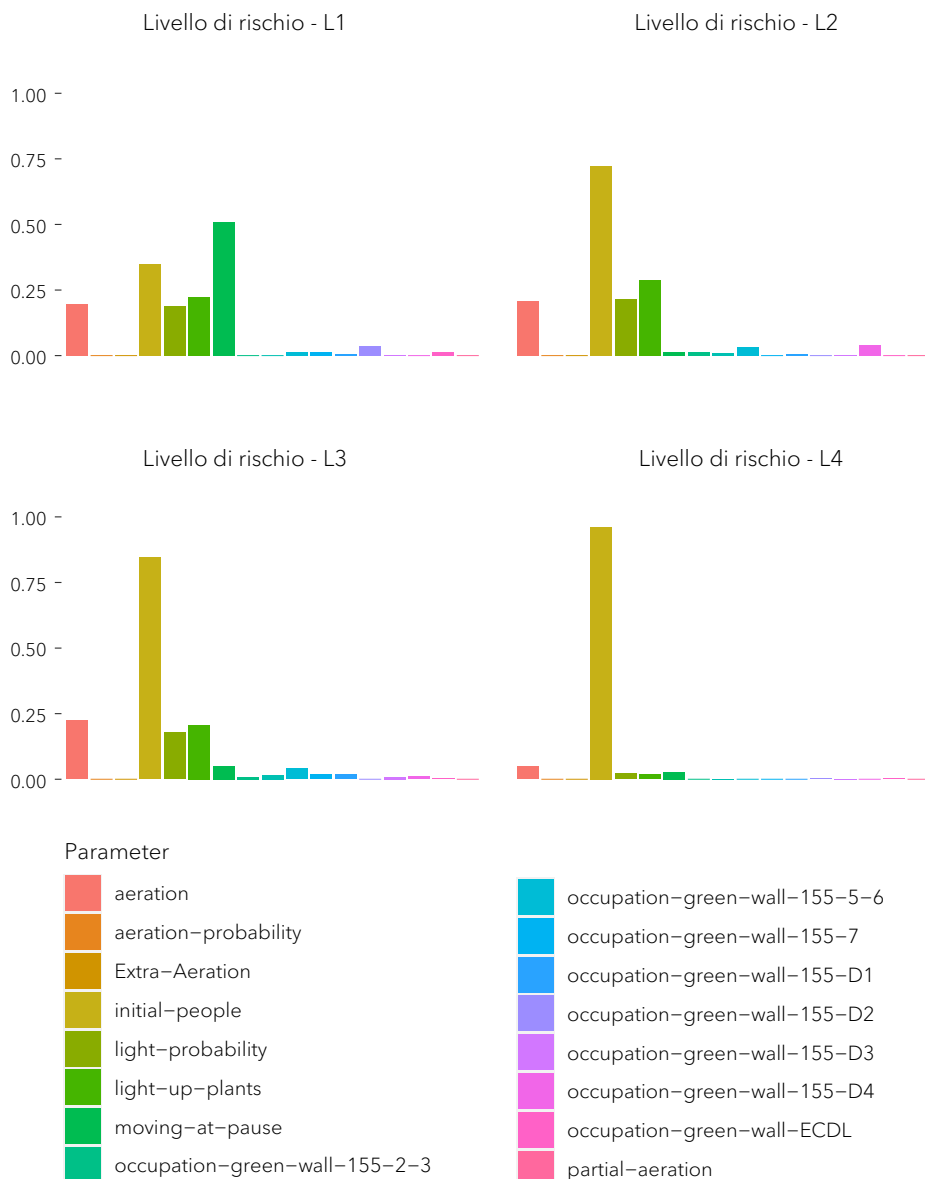
- **green_occupation_sumpesata**: indicativa della somma pesata delle percentuali di occupazione delle pareti verdi presenti complessivamente in tutte le aule, moltiplicata per 100 e ridivisa del massimo valore di green_occupation_sumpesata;
- **light**: calcolata come prodotto delle due variabili **light.up.plants** e **light.probability**, già espressa in percentuale.

Il risultato è stato ridiviso per 100, ottenendo quindi un valore finale all'interno di un range che varia da 0 a 100.

Si possono riassumere alcune combinazioni di valori caratteristici di `green_occupation_sumpesata` e di `light` necessarie per ottenere valori di `green_effects` maggiori di 50. Queste possono rispettivamente essere: **0.5 e 50, 0.4 e 62.5, 0.3 e 83, 0.25 e 100**. Come risulta chiaro, affinché si ottenga un risultato finale positivo, al decrescere della percentuale di occupazione delle pareti verdi presenti, si dovrà avere una compensazione attraverso la crescita della percentuale di probabilità che le piante vengano correttamente illuminate, o viceversa.

4.2 Analisi di sensitività

In secondo luogo si svolge l'analisi di sensitività globale, si estraggono quindi gli indici totali per i quattro scenari L1, L2, L3, L4 che compongono poi le due macroclassi di rischio considerate, come visibile al *Grafico 2*. Tali indici ci permettono quindi di valutare quali parametri tenere in considerazione maggiormente.



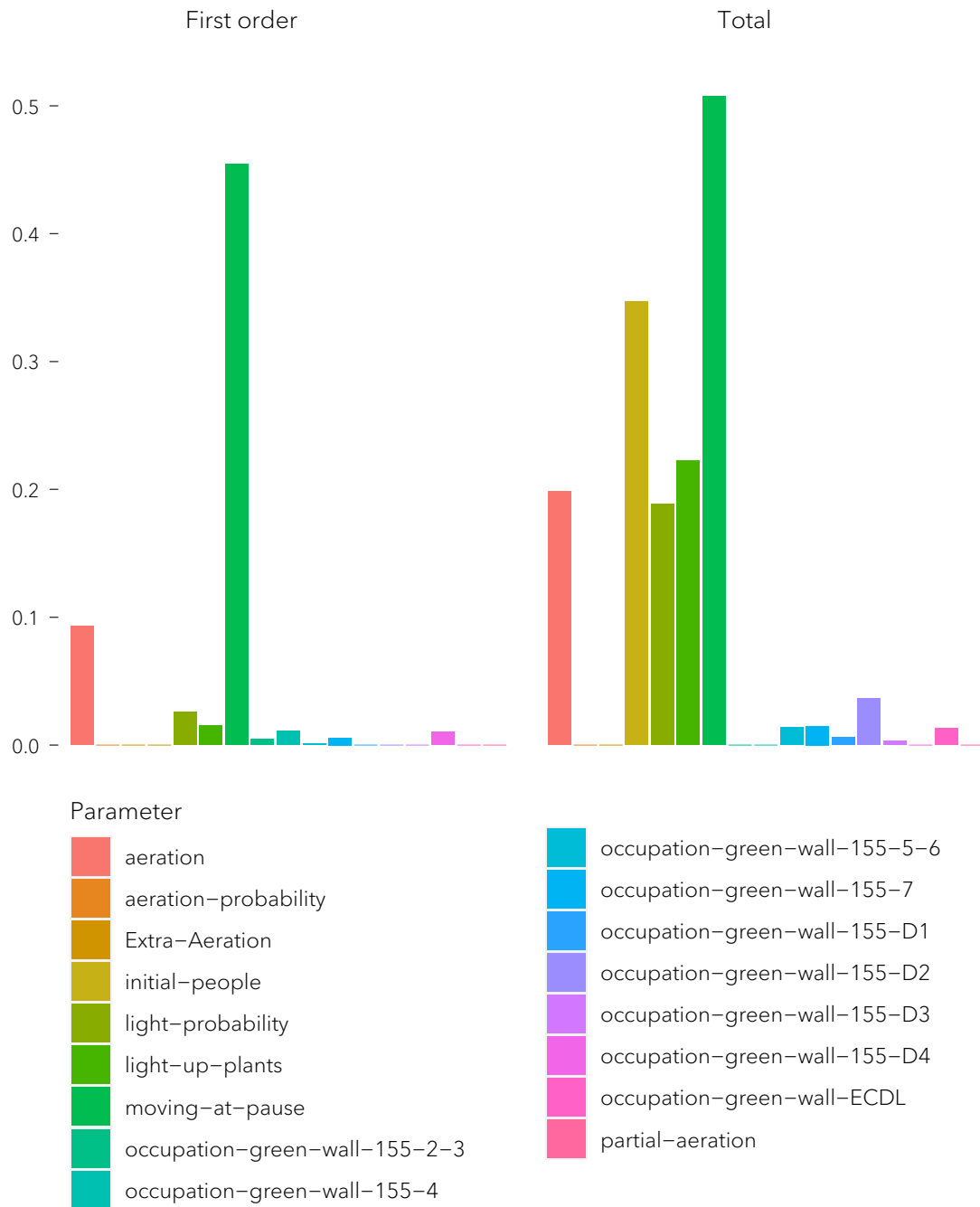
(Grafico 2. Istogrammi relativi agli indici di Sobolj ST di ogni variabile di input nei quattro scenari t: L1, L2, L3, L4)

A seguire, si trovano i grafici di indici del primo ordine S_1 e degli indici di effetto totale per ogni singola metrica considerata, ovvero nei quattro scenari di classe: L1, L2, L3, L4.

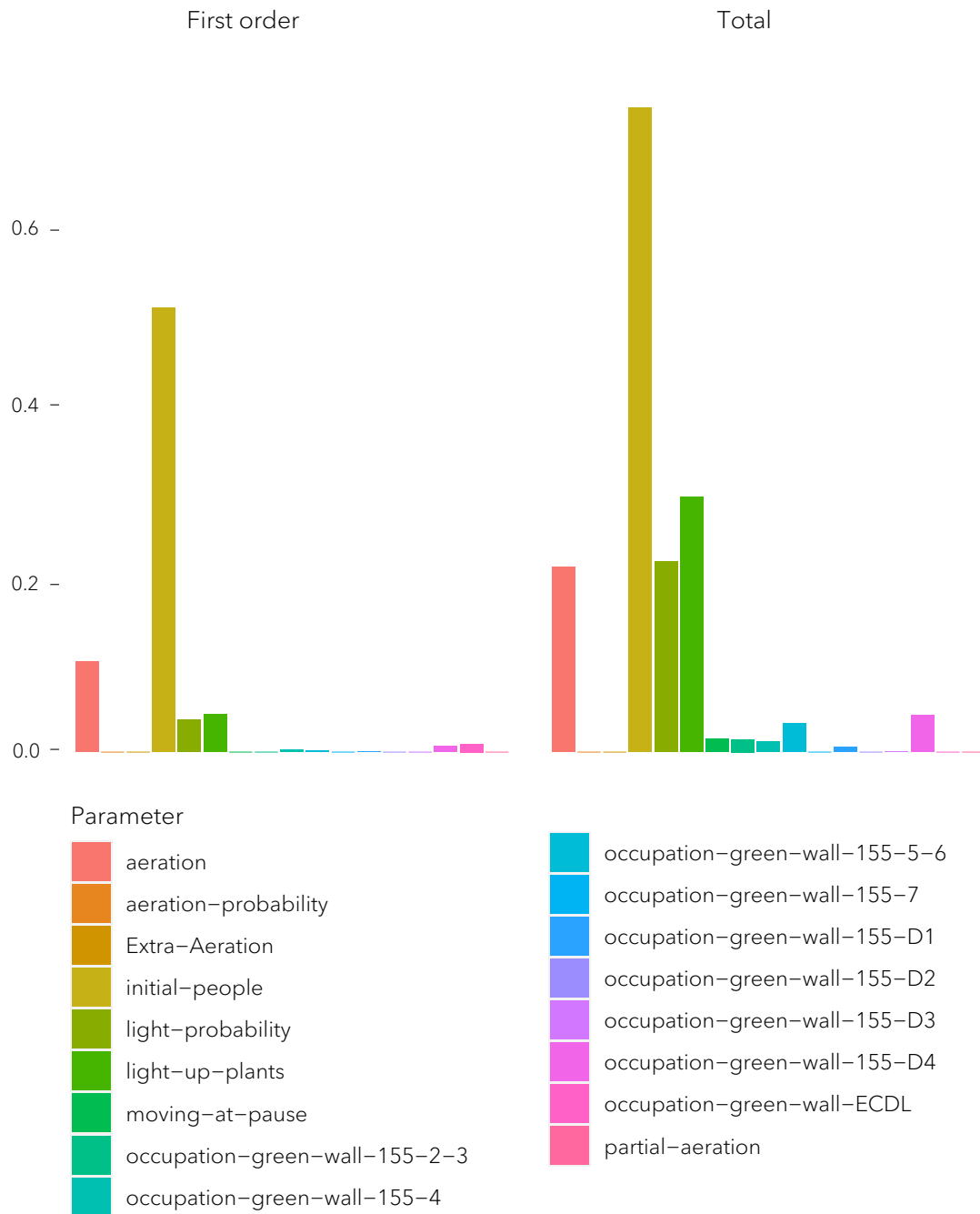
L'indice del primo ordine S_1 rappresenta il contributo dell'effetto principale di ciascun fattore di input alla varianza dell'output, è descritto come una "misura di importanza" e come "rapporto di correlazione"[19].

Gli effetti totali risultano invece una diretta conseguenza dell'approccio di scomposizione della varianza e della stima di Sobol.

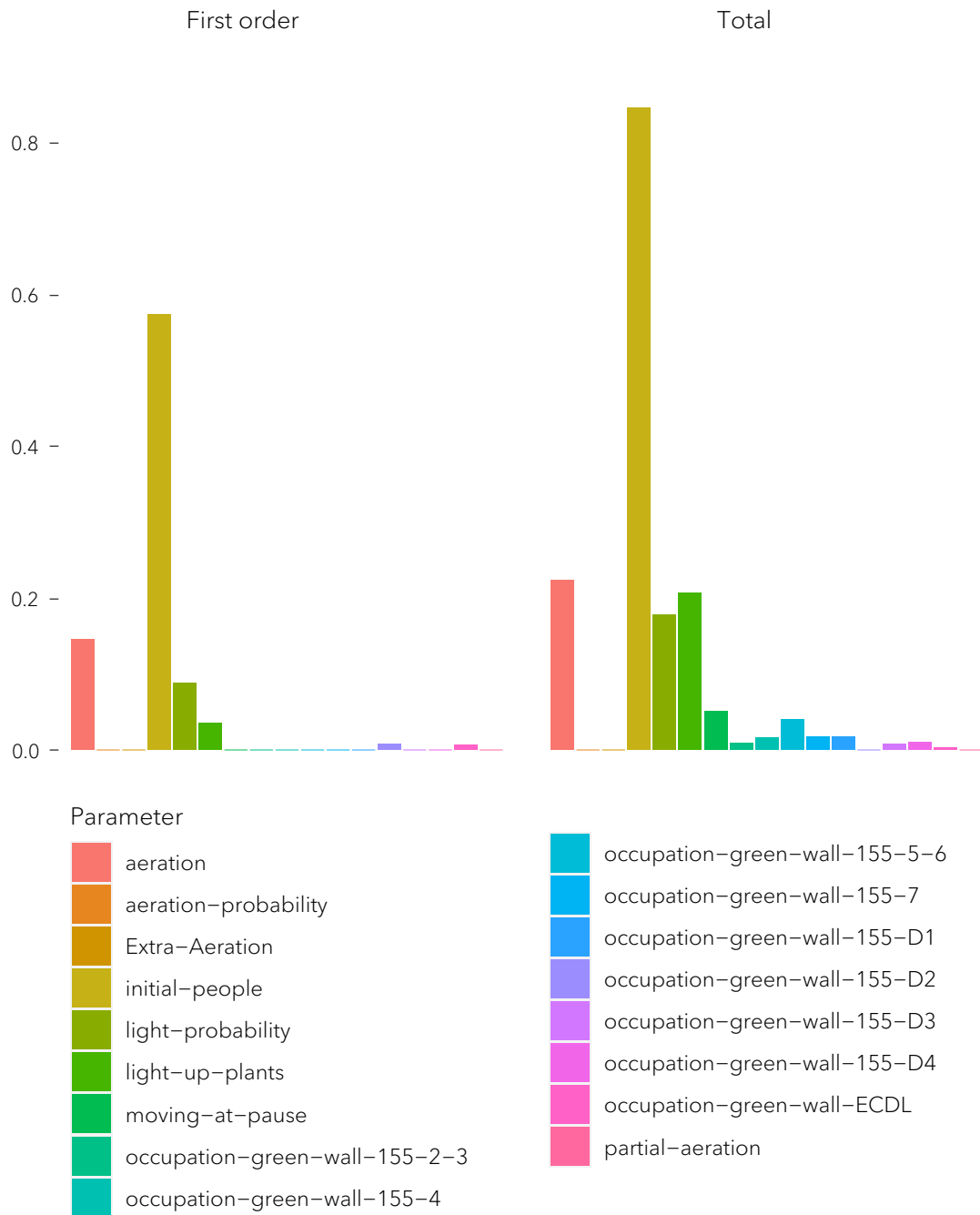
L'indice dell'effetto totale ST rappresenta quindi il contributo totale alla varianza dell'output, dovuto al suo effetto di primo ordine più tutti gli effetti di ordine superiore dovuti alle interazioni[19]. Attraverso la conoscenza degli indici descritti si può costruire un quadro dell'importanza di ciascuna variabile nel determinare la varianza dell'output.



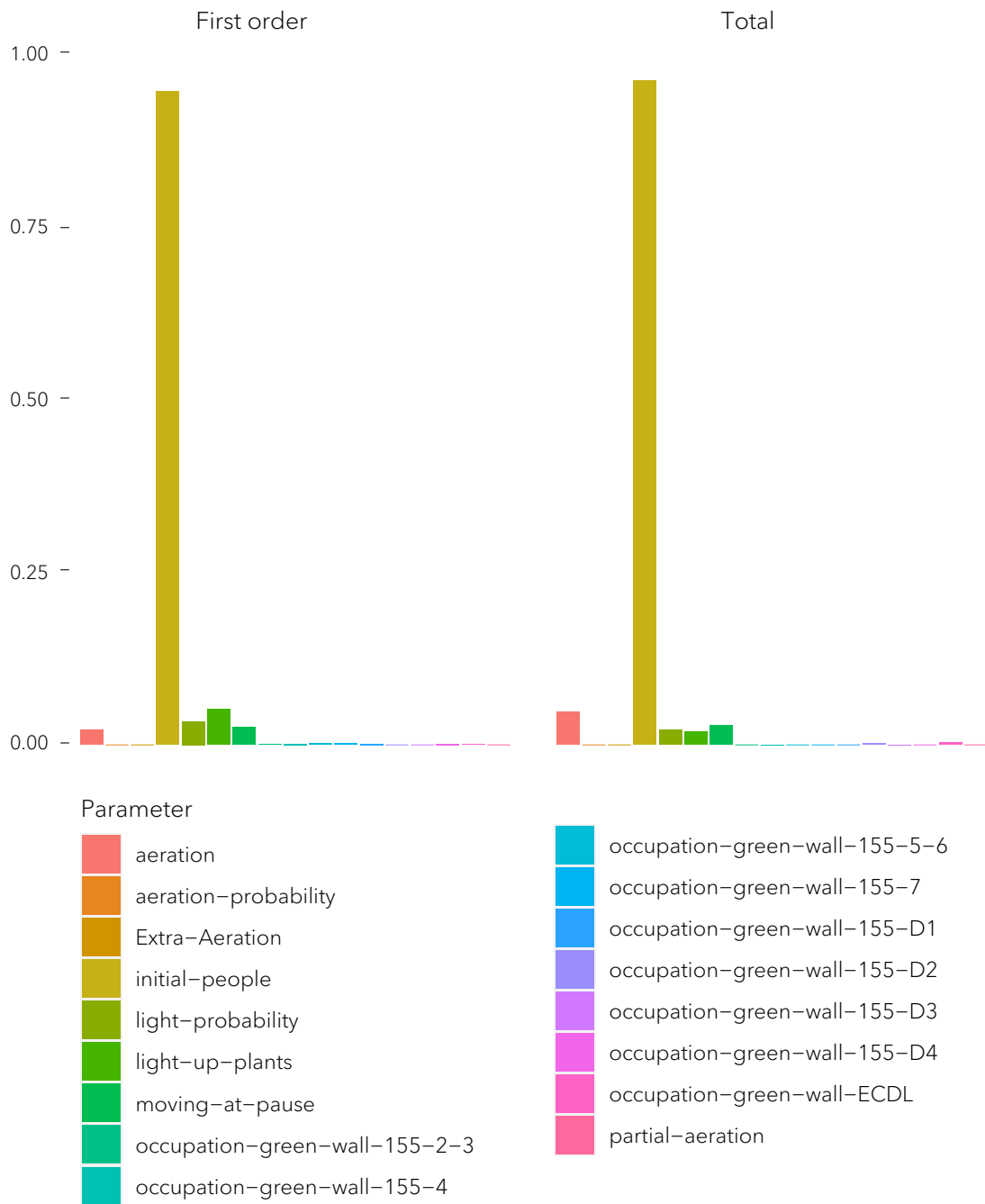
(Grafico 3. Indici di primo ordine S1 e totali ST per la classe di rischio L1)



(Grafico 4. Indici di primo ordine S1 e totali ST per la classe di rischio L2)



(Grafico 5. Indici di primo ordine S1 e totali ST per la classe di rischio L3)

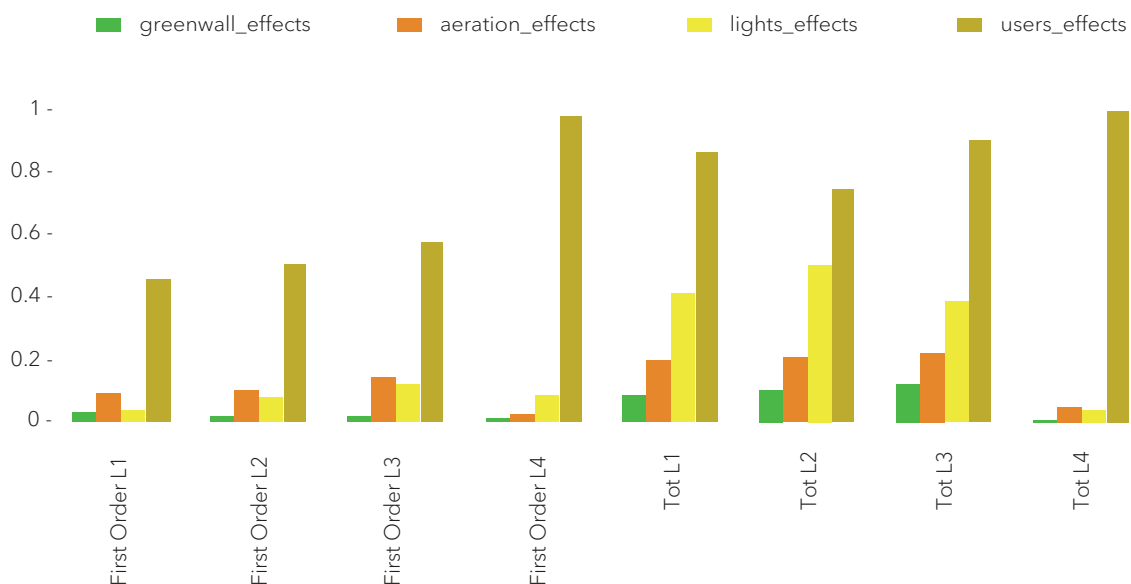


(Grafico 6. Indici di primo ordine S1 e totali ST per la classe di rischio L4)

A questo punto risulta evidente come, essendo il modello elaborato per ambienti considerati in maniera distinta, inevitabilmente si ottiene un risultato frazionato nelle molteplici variabili considerate, pertanto si è operato attraverso una manipolazione dei dati descritta precedentemente. Si sono quindi accorpate le variabili di input in gruppi di parametri, definiti anch'essi al capitolo 3, che possono essere visibili nelle colonne della *Tabella 1* sottostante. In questo modo si possono quindi conoscere il contributo dell'effetto principale e il contributo totale alla varianza dell'output della presenza delle pareti verdi, del loro illuminamento, dell'aerazione e della presenza delle persone.

	greenwall_effects	aeration_effects	lights_effects	user_effects
First order L1	0.0330	0.093	0.041	0.455
First order L2	0.02	0.1020	0.079	0.499
First order L3	0.0140	0.145	0.124	0.573
First order L4	0.0110	0.022	0.086	0.971
Tot L1	0.0870	0.198	0.41	0.855
Tot L2	0.1050	0.208	0.5	0.739
Tot L3	0.1220	0.223	0.386	0.896
Tot L4	0.0060	0.048	0.04	0.989

(Tabella 1. Indici del primo ordine e totali per la classe tutte le classi di rischio)



(Grafico 7. Indici di primo ordine S1 e totali ST per i gruppi di parametri: green_effects, aeration_effects, lights_effects, user_effects)

Alla luce dei risultati estratti a seguito della manipolazione dei dati, per una prima comprensione dell'importanza dei parametri di input, sia intesa come contributo dell'effetto principale, sia come contributo totale alla varianza dell'output, si compiono alcune osservazioni.

Si può facilmente notare al *Grafico 7*, come la presenza degli utenti rappresenti il parametro di maggiore influenza ad ogni livello di concentrazione di anidride carbonica, sia come contributo dell'effetto principale, sia come contributo totale.

Inoltre, nella valutazione del contributo totale alla variazione dell'output si riscontra essere di estrema influenza il parametro legato alla corretta illuminazione delle pareti verdi, in particolar modo nei scenari intermedi.

Risultano comunque significativi i parametri relativi all'aerazione e alla presenza di verde a randomiche condizioni di illuminazione.

4.3 Risultati degli andamenti della CO₂ nel tempo

Si sono inoltre analizzati gli andamenti della CO₂ nel tempo al variare dei gruppi di parametri d'interesse, già accorpati durante la fase di analisi di sensitività, nelle due aule prese in considerazione: 155/d1 e 155/2-3. Avendo modellato il sistema in maniera puntuale, al fine di ottenere risultati specifici per ogni aula, si è scelto di analizzarne due, rappresentative in termini dimensionali di tutte le aule in cui si è pensato di applicare il sistema. Ricapitolando, i gruppi di parametri presi in considerazione sono:

1_greenwall_effects:

- Presenza di pareti verdi;

2_lights_effects:

- Illuminamento delle pareti verdi;

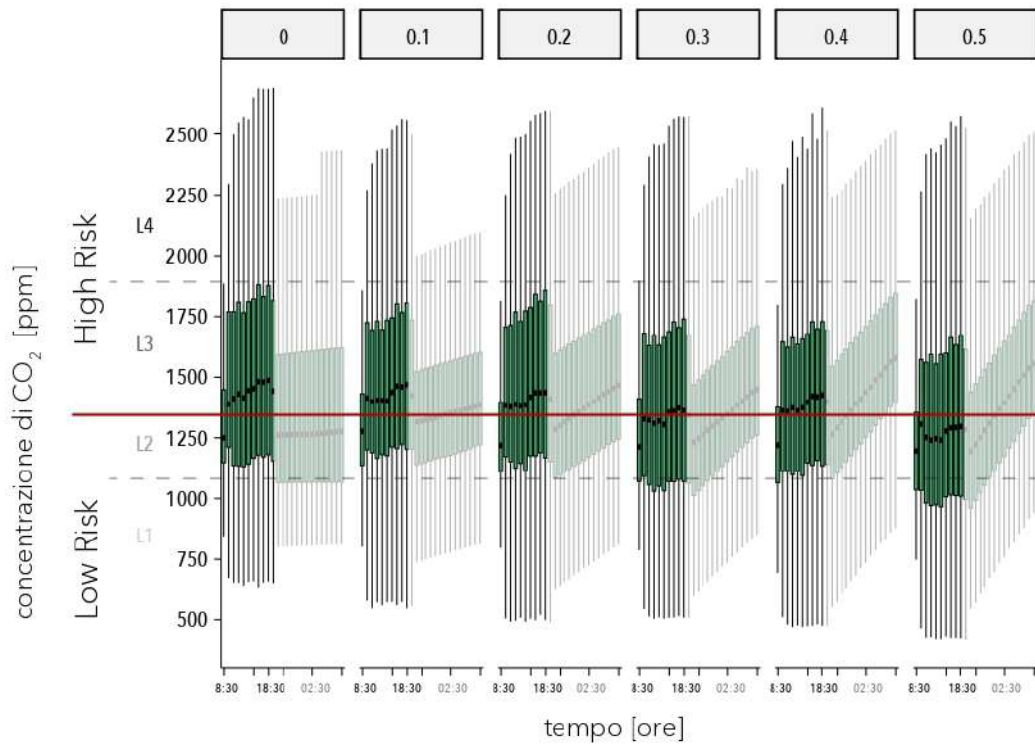
3_users_effects:

- Presenza delle persone in aula;

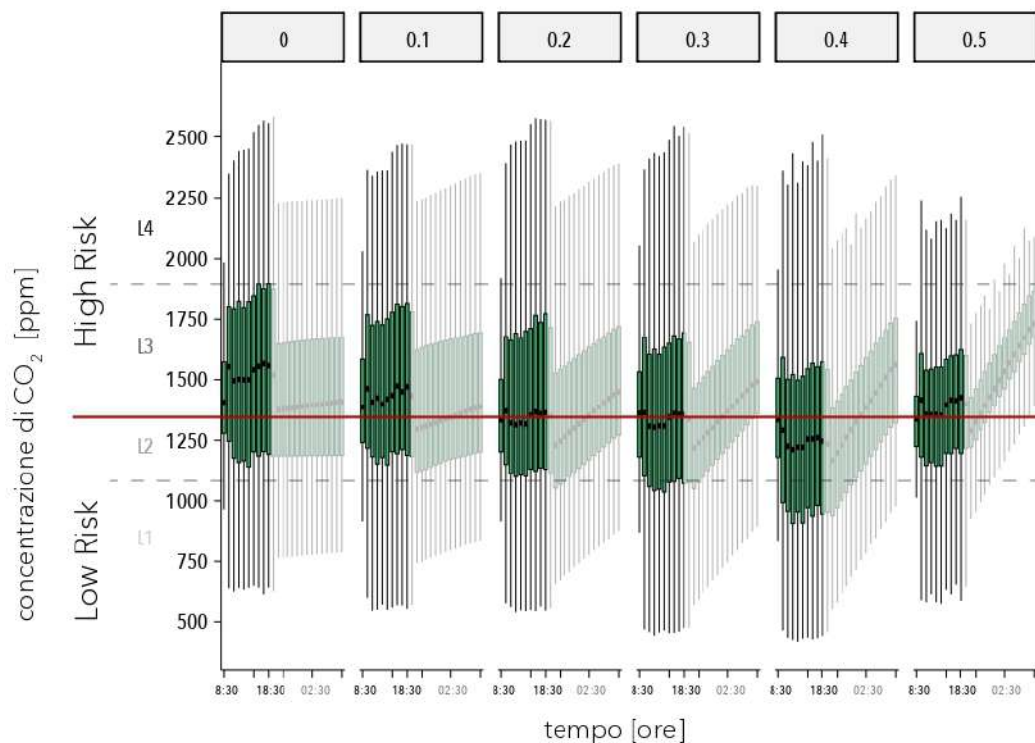
4_aeration_effects:

- Aerazione dovuta all'apertura delle finestre;
- Aerazione dovuta all'apertura delle finestre, inclusiva della probabilità che le finestre vengano aperte ulteriormente rispetto al minimo considerato.

Per analizzare i risultati dell'analisi condotta si sono utilizzati dei grafici a boxplot con distribuzione oraria. Il grafico di tipo boxplot risulta fondamentale perchè fornisce un riepilogo visivo rapido della variabilità dei valori del dataset. Mostrano infatti la mediana, il valore minimo e massimo. La distribuzione oraria ci permette di valutare l'andamento della concentrazione di CO₂ nel tempo. Si è valutato inoltre l'andamento al crescere dei parametri considerati in modo da comprenderne l'impatto. Si evidenzia la linea di confine fra la fascia di rischio inferiore e superiore posta a 1340 ppm.



(Grafico 8. Boxplot di distribuzione dell'andamento orario della concentrazione di CO₂ [ppm] al variare del parametro greenwall_effects - aula 155/d1)



(Grafico 9. Boxplot di distribuzione dell'andamento orario della concentrazione di CO₂ [ppm] al variare del parametro greenwall_effects - aula 155/2-3)

Considerazioni relative all'andamento della CO₂ nell'aula 155/d1:

Nel primo scenario visibile alla sinistra del *Grafico 8*, per una percentuale di occupazione delle pareti verdi pari a zero, quindi in assenza di esse, si attesta un range di variazione del valore medio della concentrazione della CO₂, nell'arco delle ore diurne considerate, che va da 1340 a 1500 ppm circa. Contemporaneamente, nell'ultimo scenario alla destra del grafico, con una percentuale di occupazione delle pareti verdi massima, quindi pari ad un valore di 0.5, il range di variazione del valore medio della CO₂ è compreso tra 1200 e 1300 ppm.

Considerazioni relative all'andamento della CO₂ nell'aula 155/2-3:

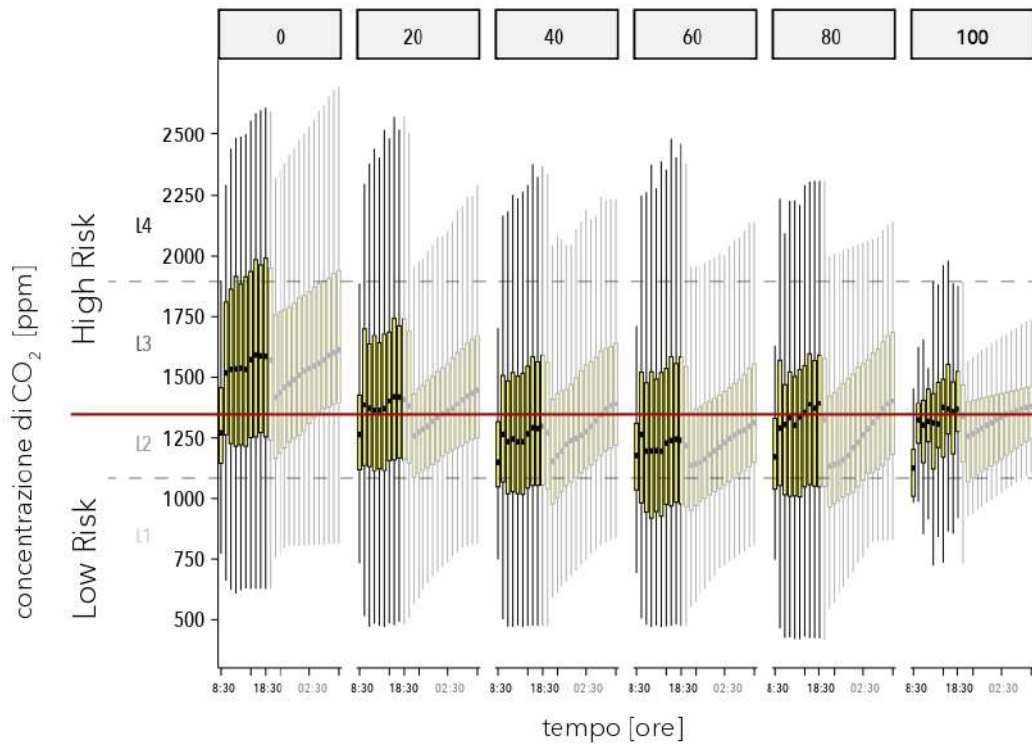
In questo secondo caso il primo scenario visibile nel *Grafico 9*, per una percentuale di occupazione delle pareti verdi pari a zero, si attesta un range variazione del valore medio della concentrazione della CO₂, nell'arco delle ore diurne considerate, da che va da 1350 a 1580 ppm circa. Si può inoltre riscontrare come i valori inferiori che si ottengono, in questo secondo caso, siano in corrispondenza di un valore di occupazione delle pareti verdi di 0.4 e non tanto a 0.5, come atteso. Risulta essere una leggera anomalia dovuta ad una riduzione del campione, per via di una minore probabilità che tale scenario si verifichi, per come il modello è stato ipotizzato. In questo caso il range di variazione del valore medio della CO₂ nel primo scenario, in assenza di pareti verdi, è compreso tra 1350 e 1580 ppm. Nello scenario maggiormente migliorativo, a valore di occupazione di parete verde di 0.4, si ha un range di variazione della CO₂ compreso tra 1200 e 1320 ppm.

Globalmente, in entrambi i casi considerati, la sola presenza di pareti verdi produce un impatto positivo. In particolare si ha una riduzione percentuale della concentrazione di CO₂ presente nelle aule 155/d1 e 155/2-3 rispettivamente del **15,6%** e **16,5%**.

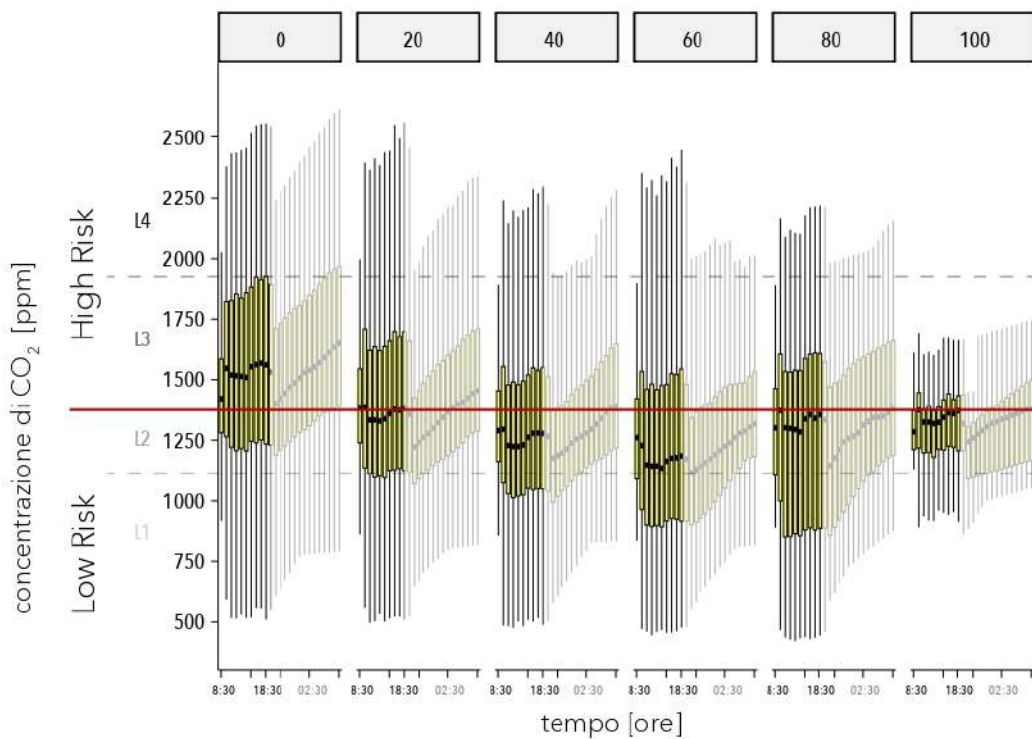
Si può inoltre notare come durante le ore notturne la concentrazione tenda a salire, causa dell'emissione di CO₂ da parte delle piante quando non sono ben illuminate. Nonostante la crescita, i valori risultano accettabili a condizione che prima dell'ingresso degli utenti all'interno delle aule avvenga un ricambio d'aria di dieci minuti.

Infine, si può notare come la mediana dei valori visibili nei bloxplot, passi dal trovarsi nella fascia di rischio "High Risk" nello scenario in cui c'è presenza nulla di pareti verdi alla fascia "Low Risk" nello scenario in cui si ha la massima presenza ipotizzabile di pareti verdi all'interno dell'aula 155/d1. Equivalentemente, le stesse considerazioni valgono per l'aula 155/2-3, con la differenza che in questo caso la condizione migliorativa è espressa per uno scenario di valore di occupazione di pareti verdi pari a 0.4, come precedentemente descritto.

Risulta pertanto considerevole l'impatto della presenza delle pareti verdi rispetto ai differenti scenari di rischio, precedentemente stabiliti sulla base delle indicazioni normative e della sintomatologia provocata, ai quali gli utenti vengono sottoposti.



(Grafico 10. Boxplot di distribuzione dell'andamento orario della concentrazione di CO₂ [ppm] al variare del parametro light_effects - aula 155/d1)



(Grafico 11. Boxplot di distribuzione dell'andamento orario della concentrazione di CO₂ [ppm] al variare del parametro light_effects - aula 155/2-3)

Nei due precedentemente grafici: *Grafico 10* e *Grafico 11* si sono invece valutati gli andamenti della CO₂ nel tempo rispetto alla condizione di illuminamento delle pareti verdi.

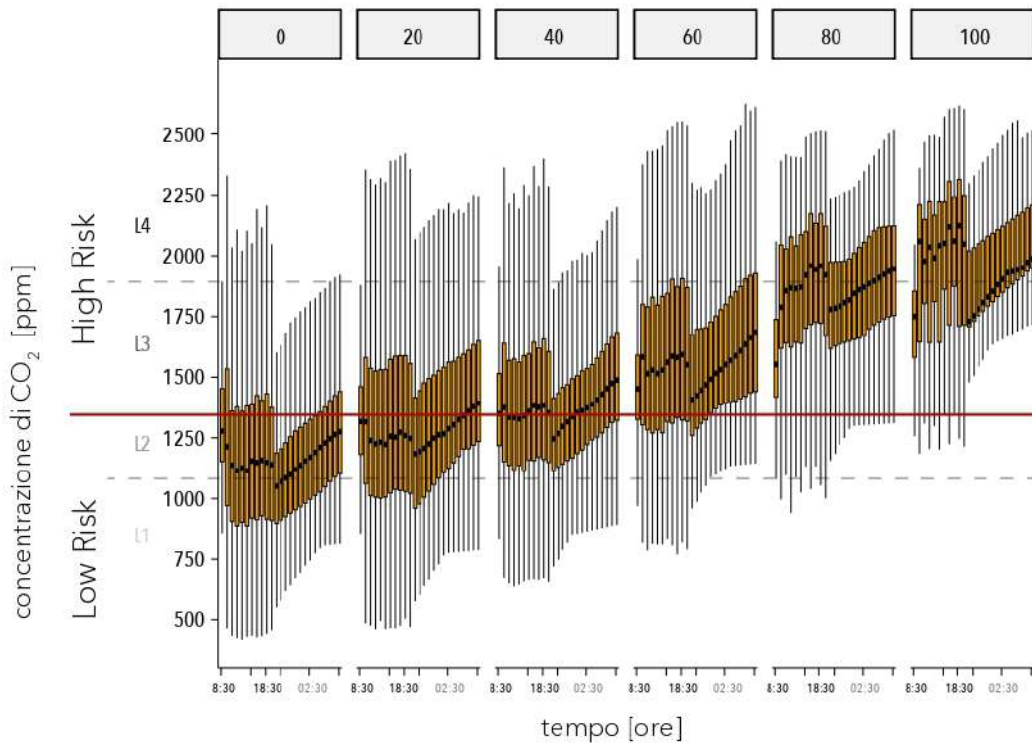
Considerazioni relative all'andamento della CO₂ nell'aula 155/d1:

In questo primo scenario visibile nel *Grafico 10*, per un illuminamento delle pareti verdi nullo, quindi nelle condizioni di normale illuminamento di un'aula esclusa la presenza di corpi illuminanti aggiuntivi, si attesta un range variazione del valore medio della concentrazione della CO₂, nell'arco delle ore considerate, da che va da 1500 a 1620 ppm circa. Anche in questa condizione si può ben notare come i valori inferiori che si ottengono, siano ad un valore medio di illuminamento di 60 e non tanto a 100, come atteso. Risulta particolarmente chiaro come nell'ultimo scenario a 100 si abbiano valori medi maggiori in corrispondenza di un campione di risultati piuttosto inferiore rispetto alle condizioni precedenti, che inevitabilmente ne condiziona il valore medio. Il range di variazione minimo si attesta fra 1200 e 1300 ppm.

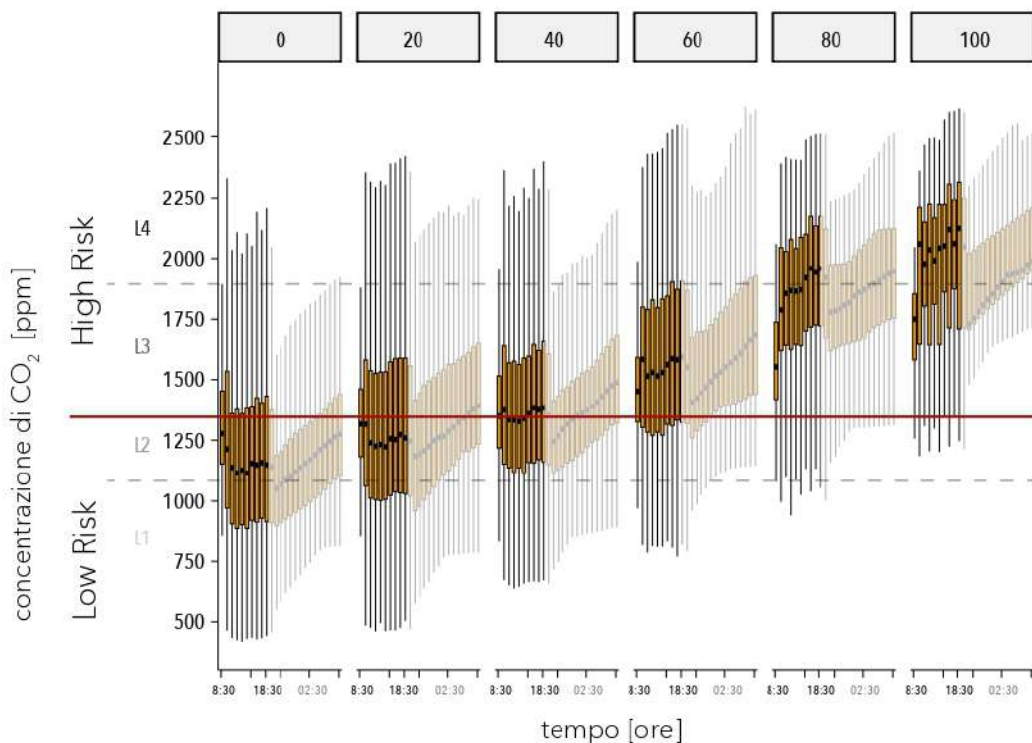
Considerazioni relative all'andamento della CO₂ nell'aula 155/2-3:

In questo caso, osservabile al *Grafico 11*, le considerazioni risultano essere piuttosto equivalenti all'aula 155/d1, con differenze legate al range di variazione: il cui massimo risulta essere compreso tra 1500 e 1600 mentre il minimo tra 1100 e 1200.

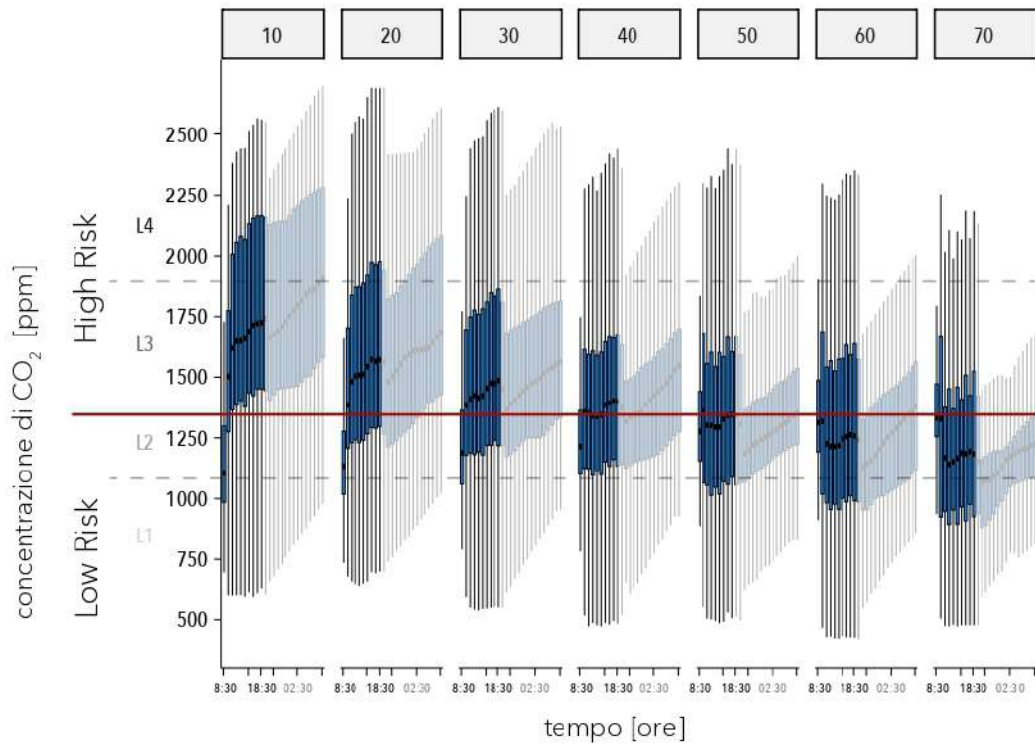
In entrambi i casi considerati, l'incremento della probabilità di una condizione di illuminamento che sia quella richiesta per la sottrazione di CO₂ da parte delle piante produce in impatto fortemente positivo. In particolare si ha una riduzione percentuale della concentrazione di CO₂ presente nelle aule 155/d1 e 155/2-3 rispettivamente di circa il **20%** e **25%**.



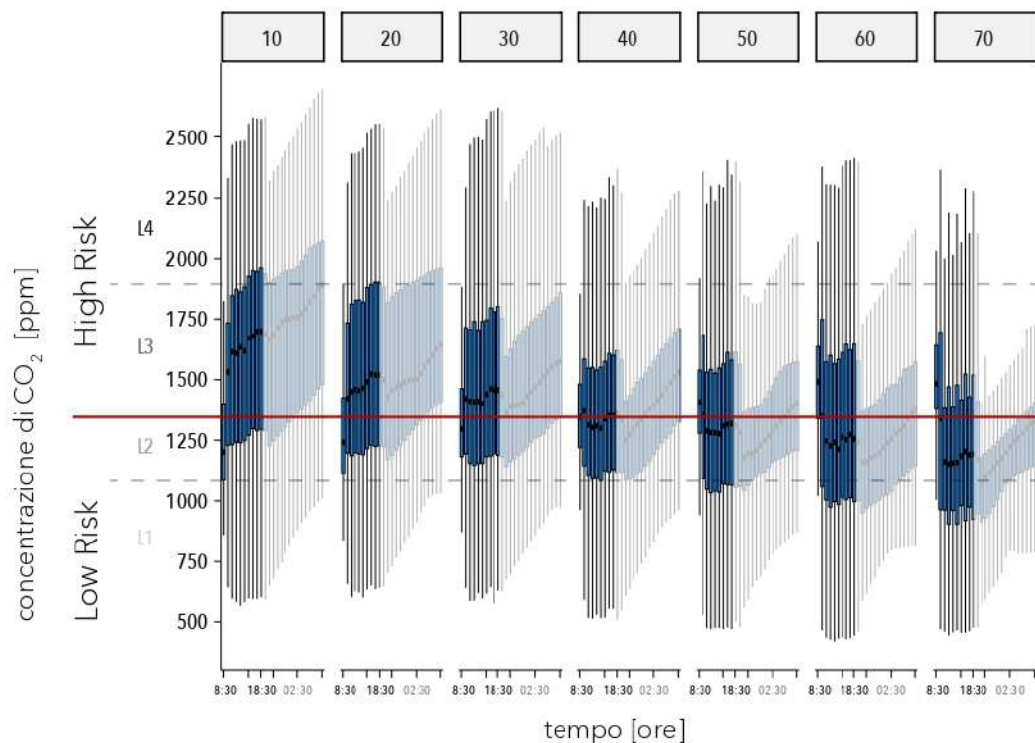
(Grafico 12. Boxplot di distribuzione dell'andamento orario della concentrazione di CO_2 [ppm] al variare del parametro `user_effects` - aula 155/d1)



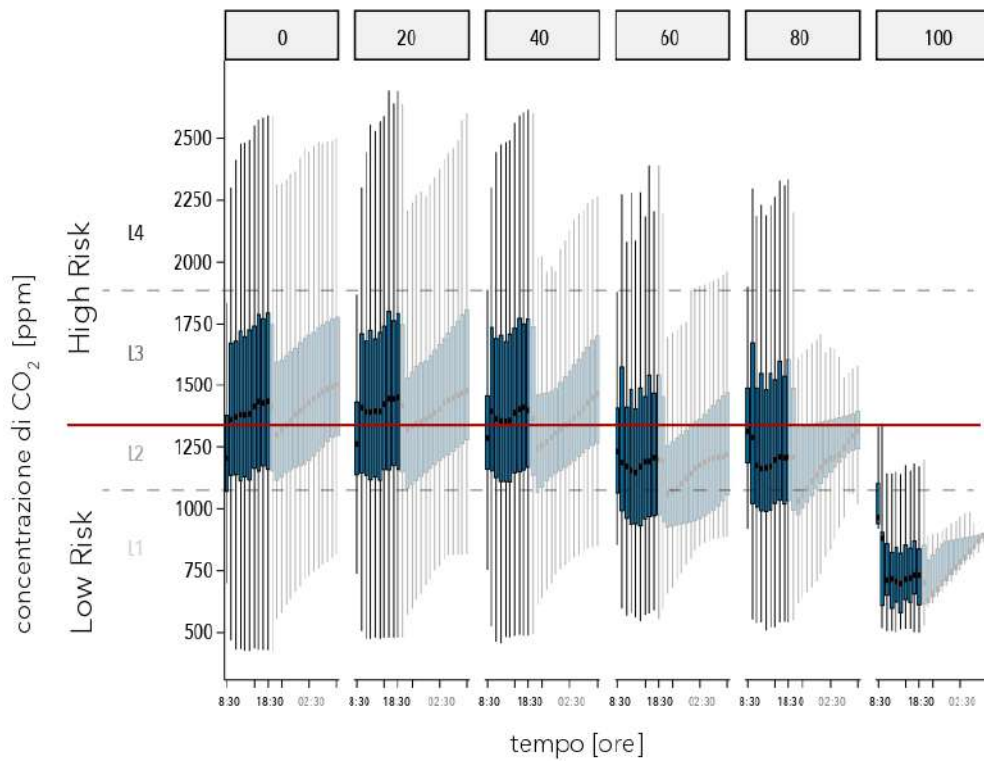
(Grafico 13. Boxplot di distribuzione dell'andamento orario della concentrazione di CO_2 [ppm] al variare del parametro `user_effects` - aula 155/2-3)



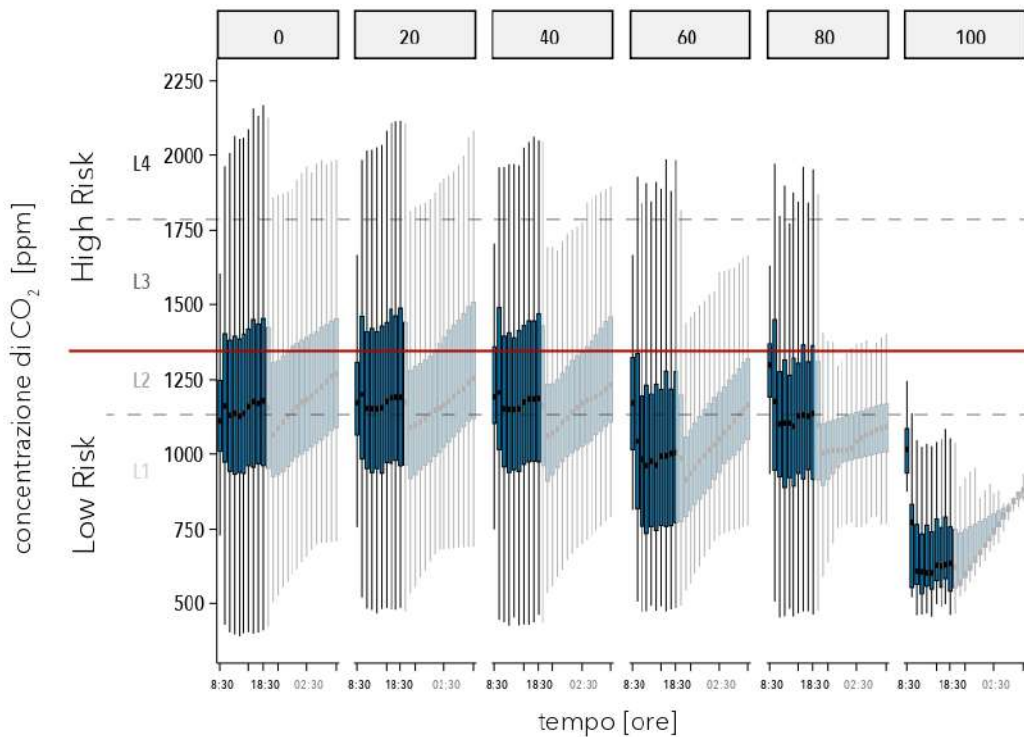
(Grafico 14. Boxplot di distribuzione dell'andamento orario della concentrazione di CO₂ [ppm] al variare del parametro aeration_effects - aula 155/d1)



(Grafico 15. Boxplot di distribuzione dell'andamento orario della concentrazione di CO₂ [ppm] al variare del parametro aeration_effects - aula 155/2-3)



(Grafico 16. Boxplot di distribuzione dell'andamento orario della concentrazione di CO₂ [ppm] al variare del parametro aeration_effects ed Extra Aeration- aula 155/d1)



(Grafico 17. Boxplot di distribuzione dell'andamento orario della concentrazione di CO₂ [ppm] al variare del parametro aeration_effects ed Extra Aeration- aula 155/2-3)

Ulteriormente, come ci si aspettava, dal *Grafico 12 e 13* appena mostrati si evidenzia come la presenza di persone, per via della maggiore quantità di CO₂ emessa degli utenti, aumenti considerevolmente all'aumentare del gruppo di parametri **user_effects**.

Inoltre, nel *Grafico 14 e Grafico 15* si ha una evidente diminuzione dei valori medi all'aumentare di **aeration_effects**. Si va da uno scenario in cui la probabilità di apertura delle finestre al cambio d'ora è nulla, verso uno scenario in cui la probabilità di apertura totale delle finestre nei dieci minuti previsti sale al 70%. Nel secondo caso, *Grafico 16*, per l'aula 155/d1, e *Grafico 17*, per l'aula 155/2-3, si ipotizza che si possa arrivare ad uno scenario in cui le finestre possono essere ulteriormente aperte durante l'orario di lezione ed è rappresentativo chiaramente di una condizione in cui le temperature esterne e i rumori provenienti dall'esterno lo consentono. In questo ultimo caso si attesta un chiaro importante abbassamento delle concentrazioni, ciò dipende dal fatto che l'aria interna per gran parte del tempo si miscela con l'aria esterna provocandone un impatto significativo.

Pur essendo ovviamente un'ottima soluzione per la riduzione di CO₂ non risulta applicabile con facilità per le questioni sopra descritte.

4.4 Confronto fra caso generalizzato e aule rappresentative

green_effects:

Si vuole ora tentare di comprendere, alla luce dei risultati precedentemente esposti, se vi è omogeneità fra i minimi valori considerati utili per l'ottenimento di un sistema di pareti verdi che sia efficace nel caso generalizzato, valutato per tempi di permanenza e di cui si è discusso al paragrafo 4.1, e quelli che si riferiscono ai specifici casi delle due aule considerate al paragrafo 4.3.

Nonostante ci sia una differenza fra le due condizioni considerate, il minimo valore utile nel caso generalizzato di **occupation_greenwall_sumpesata** rappresentato dal *Grafico 1*, per ottenere almeno un 50% del tempo nella fascia di rischio inferiore, risulta **0.25**. Similmente, dal *Grafico 8* e il *Grafico 9*, a rappresentazione dei risultati delle condizioni riferite alle specifiche aule, si può comprendere che i minimi valori di **occupation_greenwall_aula** necessari per ottenere un passaggio di fascia fra High Risk e Low Risk si attestano intorno a **0.3**. Nel caso delle specifiche aule, è necessario ricordare che si è in presenza di randomici valori di probabilità di corretto illuminamento, mentre nel caso generalizzato a valori di **occupation_greenwall_aula** di **0.25** si devono necessariamente affiancare valori massimi.

Inoltre, dal *Grafico 10* e del *Grafico 11* riferiti all'andamento della CO₂ nel tempo delle specifiche aule, rispetto a crescenti valori di **light**, variabile rappresentativa della probabilità di corretto illuminamento, si riscontra un valore minimo per il passaggio di fascia di **40**, anch'esso piuttosto vicino al valore riscontrato nel caso generalizzato di **50**. Complessivamente, le due casistiche confrontate si pongono obiettivi differenti di cui si è discusso nei paragrafi precedenti, ma si riscontra comunque un'evidenza nell'omogeneità dei risultati.

4.5 Confronto dell'efficacia: aerazione e pareti verdi

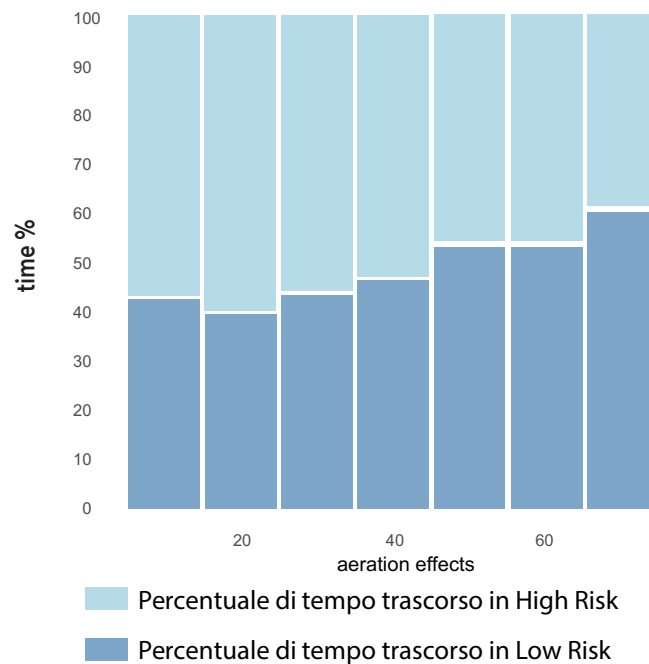
Ciò che si è già precedentemente affermato, attraverso l'indicazione dei risultati provenienti dal *Grafico 14* e dal *Grafico 15*, è che all'aumentare della variabile **aeration_effects** si hanno effetti di decremento dell'anidride carbonica e di passaggio dalla fascia di rischio superiore ad inferiore per valori compresi fra **40** e **50**. Nel secondo caso considerato, in cui si valuta il prodotto fra la variabile **aeration_effects** ed **Extra Aeration**, in riferimento al *Grafico 16* e al *Grafico 17*, l'andamento si riduce in maniera assolutamente drastica. Tali risultati potrebbero portare a pensare che avendo, l'apertura delle finestre, dei riscontri particolarmente positivi, questa possa risultare una soluzione estremamente semplice e praticabile, da sostituirsi all'applicazione di pareti verdi ipotizzata. Risulta però necessario compiere qualche osservazione ulteriore riguardo i risultati appena descritti. Oltre ad una difficoltà pratica di apertura delle finestre che sia superiore ad un ricambio d'aria orario, causa delle temperature esterne e dalla rumorosità dell'ambiente esterno, c'è un fattore che non si è fino ad ora considerato. Per spiegare in maniera approfondita la questione è quindi necessario tornare al modo con cui il modello è stato strutturato.

Bisogna infatti ricordare che la legge che si è definita in principio, con cui è stato descritto l'andamento della CO_2 , non è una funzione continua, bensì discreta, pertanto si hanno sei punti ogni ora a rappresentare il fenomeno. Per poter comprendere però l'andamento giornaliero dell'anidride carbonica è stato necessario creare dei grafici boxplot, precedentemente mostrati al paragrafo 4.3, i quali definiscono un valore orario della concentrazione di CO_2 all'interno degli ambienti, che non è altro che un valore medio rispetto ai sei risultati ottenuti, perdendo perciò di vista ciò che avviene durante l'ora.

In particolare nei primi cinquanta minuti non si ha nessun ricambio d'aria, se non quello costante dovuto alla ventilazione, perciò la concentrazione di CO_2 cresce inevitabil-

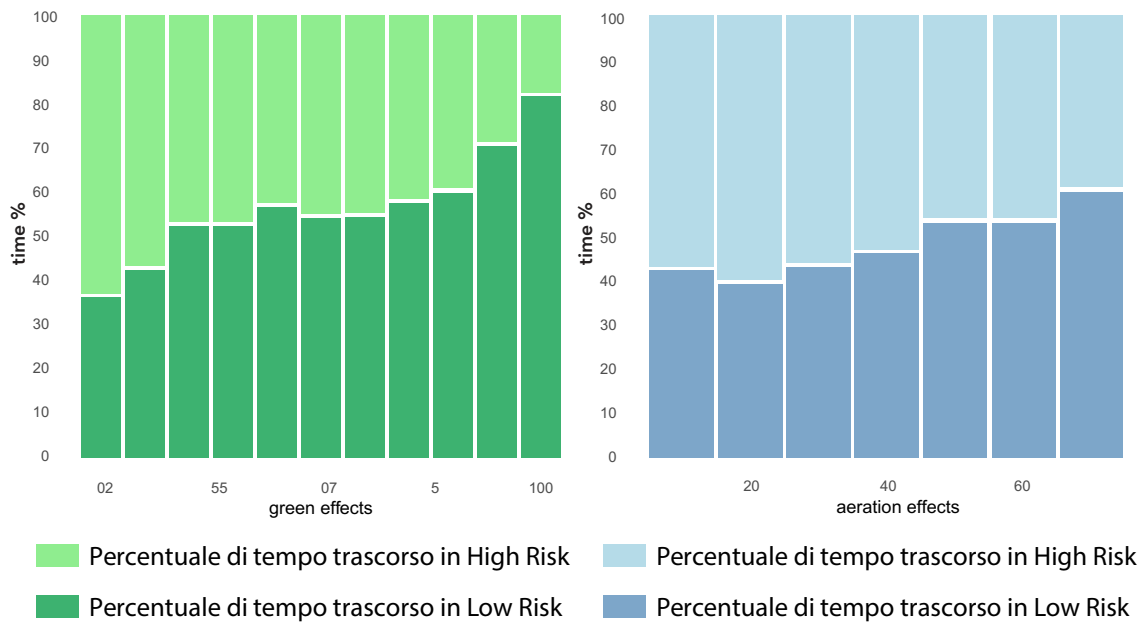
mente. Durante gli ultimi dieci minuti invece si considera una probabilità crescente di apertura di tutte le finestre presenti, fino ad un massimo del 70%. Ciò significa che il contributo dei ricambi d'aria dovuto all'apertura delle finestre, seppur fondamentale per poter abbassare il livello di concentrazione di CO₂ interna, non rappresenta una soluzione in grado di garantire una qualità dell'aria interna buona durante tutta l'ora di lezione. Al contrario il sistema di pareti verdi ipotizzato riesce ad abbassare in maniera continua il livello di concentrazione di CO₂, garantendo una migliore IAQ in modo costante.

La questione è inevitabilmente legata ai tempi di permanenza a determinati livelli di CO₂. L'incremento positivo, in termini di percentuale di tempo trascorso in Low Risk piuttosto che in High Risk in funzione dell'apertura delle finestre, come mostra il *Grafico 18*, passa dal **42%** al **60%** circa. In questo tempo c'è inoltre da considerare la probabilità per cui gli utenti potrebbero parzialmente non usufruire dell'aria "pulita", essendo le finestre aperte prevalentemente durante la pausa fra le lezioni.



(Grafico 18. Percentuali di tempo trascorso nelle due fasce di Rischio in funzione di aeration_effects)

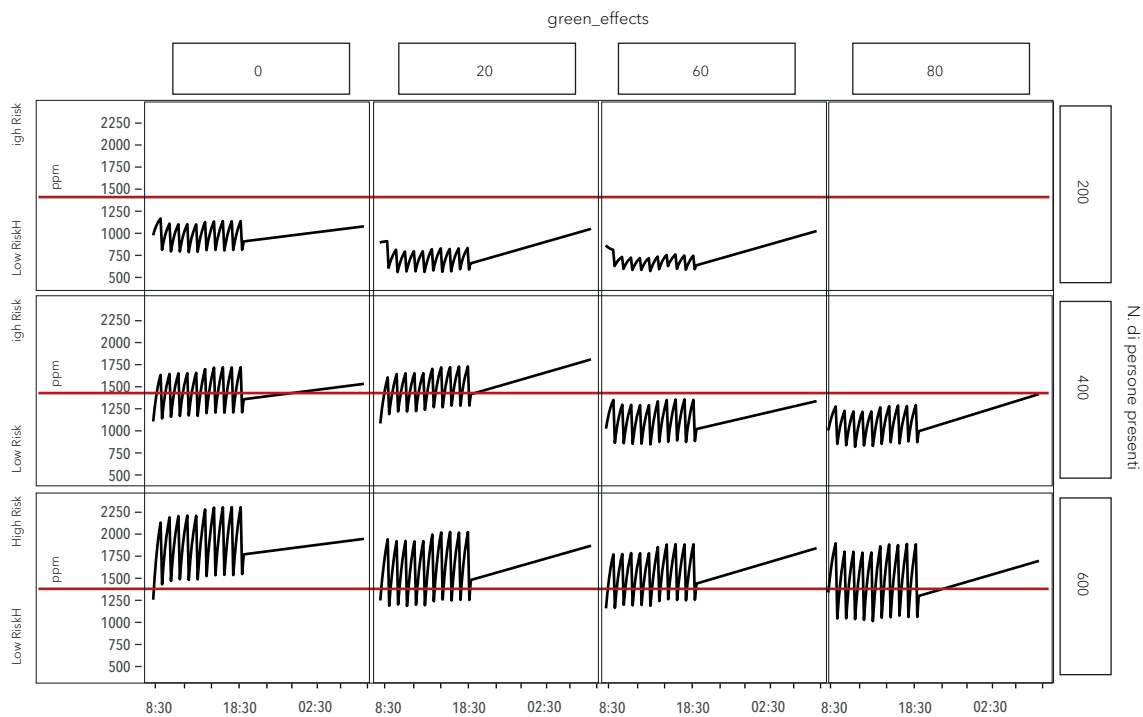
Di seguito, il *Grafico 19* mostra un piccolo confronto che permette la comprensione della maggiore efficacia del sistema di pareti verdi ipotizzato, rispetto alla semplice apertura delle finestre, a completamento della serie di osservazioni precedentemente descritte.



(Grafico 19. Istogrammi di confronto per percentuali di tempo trascorso nelle due fasce di Rischio al variare del parametro `green_effects [sx]` e `aeration_effecs [dx]`)

4.6 Confronto fra scenari di rilievo

Si è voluto a questo punto compiere un confronto degli andamenti di CO₂ nel tempo, di alcuni scenari di particolare rilievo, al fine di valutare l'efficacia del sistema proposto all'aumentare del parametro **green_effects**, rispetto a diverse condizioni di numerosità di occupanti, complessivamente presenti nelle aule.



(Grafico 20. Confronto fra andamenti di CO₂ al crescere della variabile **green_effects** e per diversi livelli di numerosità di persone presenti)

Nel *Grafico 18* si può infatti notare un'importante traslazione dell'intero andamento della CO₂ nell'arco della giornata. Per la fascia di inferiore numerosità di persone considerata, pari a 200, si nota oltre al complessivo abbassamento della curva, una riduzione dell'oscillazione fra i picchi. Nel caso di maggior numero di persone presenti all'interno di tutte le aule, per un totale di 600 persone, si attesta una riduzione complessiva notevole. Si passa infatti da un valore medio che si attesta intorno ai 1750 ppm, in

assenza di pareti verdi e di corpi illuminanti, ad un valore medio di circa 1350 ppm in uno scenario in cui la presenza di pareti verdi risulta massimizzata con aggiunta di corpi illuminanti con intensità pari a $350 \mu\text{mol/s/m}^2$.

Il sistema fornisce quindi un incremento positivo del **23%** circa.

5

ANALISI DEI RISULTATI PROVE DI COMFORT

In questo capitolo si vuole analizzare e discutere l'accettabilità di uno scenario che risulta maggiormente capace di ridurre la concentrazione di CO₂ interna, migliorando la qualità dell'aria. Lo scenario ipotizzato è quindi caratterizzato da: presenza di pareti verdi alle quali si applicano dei corpi illuminanti ad elevata intensità luminosa. Lo studio viene svolto attraverso la conduzione di prove di comfort visivo per la sperimentazione di tre scenari individuati e modellati che vengono posti a confronto. Si tenta di comprenderne le differenze riferite al livello di gradimento fra i scenari ed in particolar modo nell'ipotesi di soluzione che si pensa di adottare, da un punto di vista semi quantitativo.

I tre scenari individuati sono:

- Scenario 1: Ambiente virtuale base
- Scenario 2: Ambiente virtuale caratterizzato dalla presenza di pareti verdi e corpi illuminanti
- Scenario 3: Ambiente virtuale caratterizzato dalla presenza di sole pareti verdi

L'obiettivo che ci si pone è quello di comprendere il livello di gradimento da parte degli utenti nei diversi ambienti in cui vengono immersi. In particolare, si vuole comprendere se si ha omogeneità fra il livello di incremento della qualità dell'aria interna, che si ottiene nello scenario ipotizzato e l'incremento della percezione di qualità dell'ambiente dal un punto di vista visivo.

La valutazione viene fatta sulla base dei risultati del questionario post-sperimentale elaborato in ambito di un'altra tesi di laurea all'interno del dipartimento DICEA, Univpm (Allegato 1).

In primo luogo si sono calcolate delle percentuali di gradimento degli ambienti. A tal fine si è svolto il calcolo attraverso la sommatoria di quelle che si sono stabilite risposte

positive, nel determinato scenario, ad ogni domanda definita all'interno del questionario a cui ogni utente è stato sottoposto, come descritto al capitolo 3. Si sono poi riportati i valori in termini percentuali.

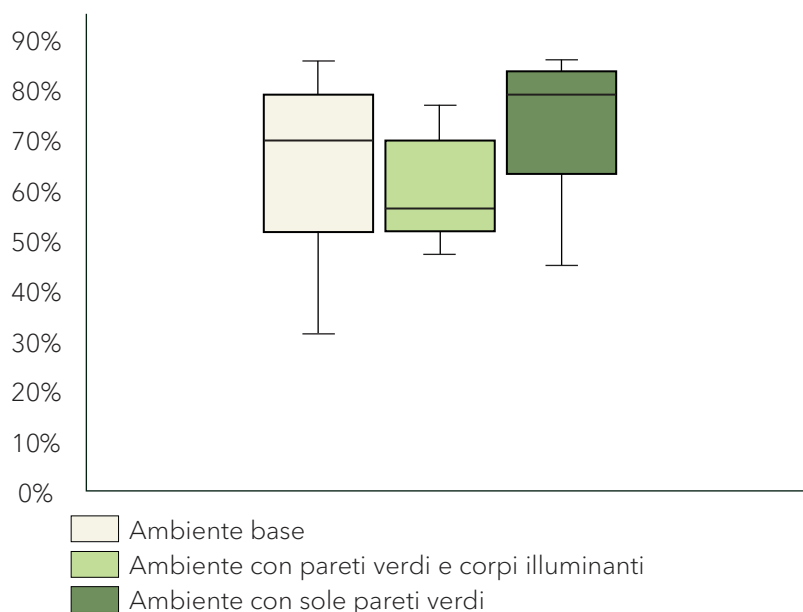
Percentuali di gradimento dei 3 scenari posti a confronto:

Domanda	Ambiente base	Ambiente con pareti verdi e corpi illuminanti	Ambiente con pareti verdi
1	32%	18%	45%
2	75%	77%	80%
3	66%	57%	80%
4	52%	48%	64%
5	50%	52%	59%
6	70%	68%	80%
7	75%	61%	70%
8	80%	57%	80%
9	93%	66%	84%
10	82%	70%	86%
11	70%	77%	84%

A partire da tali valori si è cercato di confrontare quella che è la percezione complessiva degli occupanti nei tre scenari a cui sono stati sottoposti.

Si è pertanto svolto un confronto fra distribuzioni dei dati ottenuti nei tre scenari.

Il *Grafico 19*, di seguito riportato, risulta utile per la descrizione del fenomeno. In primo luogo si descrive un confronto fra i primi due boxplot, indicativi rispettivamente dello scenario 1: ambiente di base e dello scenario 2: ambiente di base con pareti verdi e corpi illuminanti. Si prosegue poi con un confronto fra lo scenario 1 e lo scenario 3: ambiente di base in cui vi è la sola applicazione di pareti verdi.



(Grafico 21. Boxplot di distribuzione per il confronto del livello di gradimento da parte degli utenti nei tre scenari considerati)

Confronto fra lo scenario 1 e lo scenario 2:

Dal *Grafico 21* si può osservare come la distribuzione dei dati del secondo scenario presenti una concentrazione di valori complessivamente inferiore rispetto allo scenario 1. Il primo quartile risulta pressoché equivalente, mentre il terzo quartile dello scenario con pareti verdi e corpi illuminanti ha una percentuale di gradimento del 70% contro l'80% dell'ambiente base. Confrontando le due mediane, si evidenzia l'abbassamento della percezione positiva degli utenti nello scenario considerato. Si passa infatti dal 70% al 57%.

Confronto fra lo scenario 1 e lo scenario 3:

Operando ora un confronto fra lo scenario 1 e lo scenario 3, si nota come la distribuzione dei dati del terzo scenario presenti una concentrazione di valori complessivamente superiore rispetto allo scenario 1. Sia il primo che il terzo quartile risultino spo-

stati verso l'alto. Anche in questo caso, si è in presenza di un'asimmetria, la mediana è infatti spostata verso l'alto con un valore pari all'80%.

Si può quindi concludere che gli utenti si siano trovati a percepire l'ambiente dello scenario 2, che si sta ipotizzando come migliore scenario da un punto di vista di miglioramento della qualità dell'aria interna, come leggermente peggiorativo da un punto di vista di comfort visivo. Questa informazione può risultare correlabile alla modellazione dell'ambiente, infatti l'inserimento di neon ad elevata intensità luminosa, senza applicazione di elementi schermanti, può facilmente infastidire gli occupanti, creando abbagliamento.

Contemporaneamente, un'altra informazione utile è riferita all'incremento del livello di gradimento che si ottiene nello scenario 3. Ciò suggerisce che in presenza di sole pareti verdi, in assenza di ulteriori elementi illuminanti, gli occupanti si sentano maggiormente a loro agio rispetto alle condizioni di partenza.

6

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

6.1 Discussione dei risultati principali

6.2 Discussione dell'effetto sugli occupanti

6.3 Limitazioni

6.1 Discussione dei risultati principali

Alla luce dei risultati ottenuti, si può ora ampiamente discutere riguardo l'efficacia del sistema proposto. In primo luogo si può affermare che il sistema di pareti verdi con applicazione di corpi illuminanti ad intensità luminosa di $350 \mu\text{mol/s/m}^2$, riesca ad aumentare la probabilità degli occupanti di trovarsi ad un livello di rischio basso "Low Risk" rispetto all'esposizione di CO_2 fino al **122%**, passando da un valore minimo in assenza di pareti verdi del 37% ad un massimo, a sistema ottimizzato, del 82%. Questo è senz'altro un risultato di fondamentale importanza per l'obiettivo della presente tesi. Si può infatti garantire un impatto del sistema di pareti verdi e corpi illuminanti sulla qualità dell'aria dell'ambiente, estremamente soddisfacente. Inoltre, il sistema si può definire comunque funzionale, anche per valori molto esigui **18-27%** di quello che è il parametro di riferimento **green_effects**, che si ricorda essere indicativo di due variabili di interesse: il grado di occupazione delle pareti verdi e il corretto illuminamento delle stesse.

Inoltre, attraverso i risultati emersi dalle rappresentazioni dell'andamento della concentrazione di CO_2 oraria, valutata in due specifiche aule rappresentative, si è potuto comprendere l'impatto di quattro gruppi di parametri. I gruppi di interesse sono: **green_effects**, **light_effects**, **user_effects** e **aeration_effects**. Ciò che si può concludere a tal proposito, è che tutti i gruppi di parametri influenzano in maniera significativa l'andamento della CO_2 nel tempo. In particolare la presenza delle pareti verdi, valutata a randomiche condizioni di illuminazione, se ottimizzata, arriva a ridurre la percentuale di concentrazione di anidride carbonica fino al **16,5%**. Il corretto illuminamento delle pareti verdi, a randomiche percentuali di occupazione dell'aula delle stesse, arriva invece a ridurre la quantità di CO_2 presente fino al **25%**.

Ulteriori osservazioni si ritengono necessarie riguardo l'utilità dell'applicazione del sistema di pareti verdi. A partire dai risultati degli andamenti rispetto all'aerazione, che

sembrerebbero ottimali, si potrebbe pensare che il sistema di pareti verdi possa risultare meno efficace, oltre che maggiormente complesso nella sua applicazione, rispetto alla semplice apertura delle finestre. A tal proposito, in primo luogo è necessario ricordare che l'apertura delle finestre, oltre a quello che risulta essere un ricambio d'aria orario, può risultare inadeguata a causa delle temperature esterne e delle condizioni acustiche dell'ambiente circostante. Inoltre, essendo l'andamento della concentrazione della CO₂ interna rappresentato da valori orari, non è in grado di rappresentare ciò che avviene durante l'ora di lezione. Infatti, la concentrazione di CO₂ inevitabilmente cresce a causa dell'emissione da parte degli utenti nei primi 50 minuti, arrivando ad un picco massimo, che viene abbattuto dall'apertura delle finestre e miscelazione dell'aria interna con quella esterna. Ciò che il sistema di pareti verdi riesce a garantire, a differenza dell'aerazione, è proprio una riduzione della concentrazione di anidride carbonica in maniera costante durante tutta l'ora, migliorando la qualità dell'aria interna e assicurando migliori condizioni di salute e di comfort interno agli occupanti. Ciò nonostante, l'apertura delle finestre per dieci minuti ogni ora, risulta essenziale affinché non si arrivi mai a valori di picco estremi.

Infine, nonostante l'andamento della concentrazione di CO₂ venga ampiamente condizionato dalla presenza di elevata numerosità di persone al suo interno, il sistema risulta altamente prestante anche in tale configurazione.

In conclusione, la configurazione migliore per un efficace miglioramento della condizione dell'IAQ risulta essere: ambiente adeguatamente arieggiato, attraverso apertura delle finestre per 10 minuti ogni ora, presenza di pareti verdi massimizzata, in particolare con variabile riferita all'occupazione delle stesse pari a **0.5**, pareti correttamente illuminate attraverso corpi illuminanti di intensità luminosa pari a **350 $\mu\text{mol/s/m}^2$** , sia per scarsa che elevata numerosità di persone presenti.

6.2 Discussione dell'effetto sugli occupanti

Ciò che si evidenzia a partire dai risultati delle prove di comfort, attraverso il confronto di distribuzione dei dati, è che quando gli utenti vengono sottoposti allo scenario migliorativo precedentemente descritto dal punto di vista dell'IAQ: aula reale con applicazione di sistemi di pareti verdi e corpi illuminanti ad elevata intensità luminosa, si ottengono risultati leggermente negativi rispetto alla configurazione dell'aula attuale. Infatti, il **57%** degli occupanti si definisce a suo agio in queste condizioni, contro un **66%** ottenuto nello scenario di base. Si è inoltre in presenza di un complessivo decremento del livello di comfort visivo, visibile al *Grafico 19*. Al contrario, in uno scenario in cui si è all'interno dell'aula in presenza di solo verde attorno, gli occupanti percepiscono un livello di comfort visivo migliorato, nonostante la condizione di illuminazione rimanga esattamente equivalente al caso reale. Inoltre, l'**80%** degli utenti si è definito a suo agio in tali condizioni.

Ciò che va sottolineato però è che uno scenario in cui le pareti verdi non vengono illuminate attraverso la corretta intensità luminosa, queste non contribuiscono neanche in minima parte alla riduzione di CO₂ nell'ambiente considerato, a meno di parziale e randomica illuminazione da parte della luce solare che non può essere facilmente calcolata e comunque non significativa.

Dovendo affermare che, affinché si possa ottenere un importante miglioramento della qualità dell'aria interna, si dovrà necessariamente ipotizzare un sistema di pareti verdi con aggiunta di corpi illuminanti, sarà pertanto fondamentale comprendere in ulteriori studi futuri come poter applicare tale illuminamento necessario, senza che questo comporti una riduzione del livello di comfort interno, magari attraverso l'utilizzo di elementi schermanti che eliminino l'abbagliamento.

6.3 Limitazioni

Si devono inoltre definire quelle che sono le limitazioni della ricerca condotta, affinché queste possano essere superate attraverso studi futuri.

- In primo luogo, alla base del presente studio di tesi, si è considerata una specie di pianta in particolare: *Dypsis lutescens*, avendo estratto in letteratura quelli che erano i migliori risultati di sottrazione di CO₂ fra tutte le specie di piante prese in considerazione, quando sottoposte ad una luce proveniente da corpo illuminante di intensità luminosa pari a 350 μmol/s/m². Pertanto, nel caso venissero svolte ulteriori prove sperimentali su altre specie di piante o ad altri livelli di intensità luminosa, questi dati dovrebbero essere considerati ed eventualmente modificati.
- In secondo luogo, lo studio viene svolto modellando un caso studio specifico, ovvero di contesto universitario; perciò, se si volessero ottenere informazioni più ampie relative all'efficacia delle pareti verdi, si potrebbe pensare di modificare le condizioni di partenza e l'ambiente definito, prevedendo anche profili d'uso differenti.
- Relativamente all'effetto sugli utenti, dello scenario di migliore capacità di sottrazione di CO₂, con presenza di pareti verdi e corpi illuminanti, si deve sottolineare che gli strumenti utilizzati per la realtà immersiva non offrono la possibilità di creare dei fasci di luce che possono infastidire a livello oculare gli utenti, si è pertanto potuto valutare soltanto un impatto visivo complessivo dell'ambiente.
- Inoltre, non si è approfondito l'aspetto illuminotecnico dell'ambiente che si andrebbe a creare nello scenario considerato. Tale approfondimento verrà svolto nell'ambito di un'altra tesi di laurea già avviata nel proseguo degli studi.

7 CONCLUSIONI

La presente tesi ha avuto l'obiettivo di valutare l'efficacia dei sistemi di parete verde in ambienti interni, in determinate condizioni, quali: affollamento di persone, presenza di impianti di ventilazione funzionanti ed aerazione, nella loro capacità di migliorare la qualità dell'aria interna, sottraendo CO₂ e quindi di mitigare gli effetti della Sindrome dell'edificio malato sugli utenti.

Si è quindi ipotizzato di affrontare il problema per via analitica, in particolare, attraverso strumenti di simulazione avanzati.

L'ipotesi di base è quella di applicazione del sistema di pareti verdi in un caso studio rilevante, ossia spazi per aule didattiche della facoltà di ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche.

Si è proseguita l'attività implementando il modello multi-agent, attraverso la definizione dell'ambiente di simulazione, degli agenti e delle variabili di input ed output.

Tale metodologia ha permesso l'ottenimento di risultati di rilievo.

Primo fra tutti, si ha una chiara evidenza della capacità del sistema di pareti verdi ipotizzato di ridurre drasticamente la percentuale di tempo che mediamente gli utenti trascorrono ad elevati livelli di CO₂.

Si sono quindi stabilite, sulla base dell'attuale normativa presente e della sintomatologia associata ai diversi livelli di concentrazione di anidride carbonica, delle fasce di rischio, utili per la comprensione dell'efficacia del sistema: Low Risk, High Risk.

In particolare, in uno scenario in cui non c'è presenza di verde, ossia nella situazione attuale, le persone trascorrono all'incirca il **67%** del tempo all'interno delle aule in fascia High Risk, la più elevata. In uno scenario in cui si ipotizza di inserire un sistema di pareti verdi, con applicazione di corpi illuminanti che garantiscono una determinata capacità di sottrazione di CO₂ da parte delle piante, la percentuale di tempo trascorsa in fascia High Risk diminuisce tanto da arrivare al solo **18%**, ottenendo un decremento del **73%**. Si ottiene quindi un primo significativo risultato.

In secondo luogo, attraverso l'analisi di sensitività si è potuta svolgere una prima valutazione dell'influenza dei parametri considerati alla varianza dell'output.

Successivamente, attraverso lo studio dell'andamento della CO₂ in funzione dei gruppi di parametri considerati: la presenza e quantità di pareti verdi, il loro corretto illuminamento, l'aerazione e la numerosità delle persone presenti, si è compresa l'importanza del corretto illuminamento delle pareti, affinché queste possano garantire un significativo miglioramento della qualità dell'aria interna.

Ciò che si è concluso da tale analisi risulta essere appunto che lo scenario maggiormente significativo in termini di miglioramento della qualità dell'aria interna, attraverso la riduzione di anidride carbonica, sia proprio quello caratterizzato dal sistema di pareti verdi di massima area possibile, nel rispetto delle limitazioni geometriche dello spazio, con aggiunta di corpi illuminanti ad un'intensità luminosa di 350 $\mu\text{mol/s/m}^2$. Inoltre, il sistema offre ottime prestazioni anche in presenza di un elevato numero di persone. Ciò risulta pertanto fondamentale per ambienti di frequente affollamento come quelli universitari individuati, ma anche per altre condizioni come uffici, scuole, centri commerciali ecc.

Tali ipotesi portano a concludere che se si volesse utilizzare un sistema di pareti verdi, la cui prestazione richiesta è quella di abbattere la concentrazione di CO₂ interna, alle attuali pareti verdi già in commercio oggi si dovrebbe pensare di applicare dei corpi illuminanti, neon con intensità luminosa precedentemente indicata.

A questo punto si è posto un ulteriore obiettivo: comprendere l'accettabilità di tale ambiente indagando il livello di comfort percepito dagli utenti attraverso metodi di realtà immersiva.

A seguito delle prove di comfort eseguite su un campione di utenti in diversi scenari, ciò che si è riscontrato è che non si ha totale omogeneità fra il livello di incremento della qualità dell'aria interna, che si ottiene nello scenario ipotizzato, e l'incremento della

percezione di qualità dell'ambiente a livello visivo.

Infine, attraverso l'analisi dei risultati si attesta invece come la presenza delle sole pareti verdi, esclusi i corpi illuminanti, abbia un impatto positivo, infatti gli utenti si sentono maggiormente a loro agio e percepiscono un maggior comfort visivo.

Si può concludere che la presente tesi raggiunge significativi risultati, affermando l'efficacia di un sistema di pareti verdi con applicazione di corpi illuminanti.

Si sono inoltre compiute osservazioni di carattere normativo che dovrebbero essere approfondite nel caso di reale applicazione delle pareti.

Le analisi riferite al livello di gradimento dell'ambiente considerato possono risultare fondamentali per eventuali sviluppi futuri, in cui oltre alla valutazione soggettiva dell'impatto del sistema a livello visivo svolta, sarebbe necessario integrare lo studio attraverso un'analisi illuminotecnica dell'ambiente ai determinati lux raggiunti attraverso l'inserimento dei neon.

Inoltre, si consiglia che l'eventuale componente edilizio formato da pareti verdi e corpi illuminati da produrre venga progettato in modo tale che la luce proveniente dai neon venga schermata, evitando che il fascio luminoso arrivi ad infastidire gli occupanti.

Bibliografia

- [1] "Sindrome dell'edificio malato - Sick building syndrome" [Online].
Available: https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?id=4404&area=indor&menu=vuoto
- [2] Torpy, Flrga, PBurchett M, "Profiling indoor plants for the amelioration of high CO₂ concentrations" *Urban Forestry and Urban Greening*, (2014), 227-233, 13(2)
- [3] K. Azuma, N. Kagi, U. Yanagi, H. Osawa Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance, (2018)
- [4] Llewellyn, David Dixon, Mike, "Can Plants Really Improve Indoor Air Quality?" *Comprehensive Biotechnology*, (2011)
- [5] Pennisi S, Van Iersel M, "Quantification of Carbon Assimilation of Plants in Simulated and In Situ Interiorscapes", (2012)
- [6] Brennan, J., "Do Potted Plants Improve the Indoor Environment?" *University of Technology, Sydney, M.Sc. Master's Thesis*, (2011)
- [7] Afrin S., "Green Skyscraper: Integration of Plants into Skyscrapers", *M.Sc. Master's Thesis*, (2009)
- [8] Somova L.A., Pechurkin N.S., "Functional, regulatory and indicator features of microorganisms in man-made ecosystems" (2001)
- [9] Torpy, Flrga, PBurchett M, "Profiling indoor plants for the amelioration of high CO₂ concentrations" *Urban Forestry and Urban Greening*, (2014), 227-233, 13(2)
- [10] Laura Dominici, Robert Fleck, Raissa L. Gill b,c, Thomas J. Pettit, Peter J. Irga,

- Elena Comino, Fraser R. Torpy "Analysis of lighting conditions of indoor living walls: Effects on CO2 removal" *Journal of Building Engineering*, (2021)
- [11] Iñigo Martinez, Jan L. Bruse, Ane M. Florez-Tapia, Elisabeth Viles, I. Olaizola "ArchABM: An agent-based simulator of human interaction with the built environment. CO2 and viral load analysis for indoor air quality" (2022)
- [12] "Planimetrie della Facoltà di Ingegneria" [Online]. Available: www.ingegneria.univpm.it/sites/www.ingegneria.univpm.it/files/ingegneria/planimetrie/2016/Q155.pdf
- [13] "SkyTech" [Online]. Available: <https://www.skytech.lk/stand-alone-structures/>
- [14] "NetLogo" [Online]. Available: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- [15] "RStudio" [Online]. Available: <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>
- [16] "Variance-based_sensitivity_analysis @ en.wikipedia.org." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Variance-based_sensitivity_analysis.
- [17] "Rhino3D" [Online]. Available: <https://www.rhino3d.com/it/>
- [18] "Unity" [Online]. Available: <https://unity.com/>
- [19] A. Saltelli et al., *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Chichester: Wiley, John (2008)

Allegato 1

Come giudichi il colore della luce artificiale?			Come percepisci l'ambiente dal punto di vista dell'illuminazione?		
B	G	GL	B	G	GL
Leggermente caldo	Neutro	Leggermente caldo	Neutrale	Neutrale	Luminoso
Leggermente freddo	Leggermente freddo	Freddo	Luminoso	Luminoso	Leggermente Buio
Neutro	Neutro	Leggermente caldo	Neutrale	Neutrale	Leggermente luminoso
Neutro	Neutro	Neutro	Neutrale	Leggermente luminoso	Luminoso
Freddo	Freddo	Freddo	Luminoso	Leggermente Buio	Luminoso
Leggermente freddo	Leggermente freddo	Leggermente freddo	Leggermente luminoso	Leggermente luminoso	Leggermente luminoso
Leggermente freddo	Neutro	Leggermente freddo	Luminoso	Neutrale	Luminoso
Neutro	Neutro	Neutro	Neutrale	Neutrale	Neutrale
Leggermente freddo	Leggermente freddo	Leggermente freddo	Luminoso	Neutrale	Luminoso
Leggermente caldo	Neutro	Leggermente freddo	Luminoso	Neutrale	Luminoso
Leggermente freddo	Leggermente freddo	Leggermente freddo	Neutrale	Neutrale	Leggermente luminoso
Neutro	Neutro	Leggermente freddo	Neutrale	Leggermente Buio	Leggermente luminoso
Leggermente freddo	Neutro	Freddo	Luminoso	Luminoso	Luminoso
Neutro	Neutro	Caldo	Neutrale	Leggermente luminoso	Luminoso
Leggermente caldo	Neutro	Neutro	Leggermente Buio	Luminoso	Luminoso
Freddo	Freddo	Leggermente caldo	Neutrale	Leggermente luminoso	Neutrale
Leggermente freddo	Neutro	Neutro	Neutrale	Neutrale	Luminoso
Leggermente freddo	Neutro	Leggermente freddo	Leggermente Buio	Luminoso	Luminoso
Leggermente freddo	Leggermente freddo	Leggermente freddo	Leggermente Buio	Leggermente Buio	Leggermente Buio
Freddo	Freddo	Freddo	Neutrale	Neutrale	Neutrale
Neutro	Neutro	Neutro	Leggermente Buio	Leggermente Buio	Luminoso
Neutro	Leggermente caldo	Leggermente freddo	Neutrale	Neutrale	Luminoso
Leggermente caldo	Leggermente caldo	Leggermente caldo	Leggermente Buio	Neutrale	Neutrale
Leggermente caldo	Leggermente freddo	Leggermente freddo	Luminoso	Luminoso	Molto luminoso/abbagliante
Freddo	Freddo	Freddo	Luminoso	Luminoso	Luminoso
Freddo	Leggermente freddo	Leggermente freddo	Neutrale	Leggermente Buio	Leggermente Buio
Neutro	Leggermente caldo	Freddo	Leggermente Buio	Neutrale	Luminoso
Neutro	Neutro	Neutro	Luminoso	Luminoso	Luminoso
Neutro	Leggermente freddo	Neutro	Luminoso	Molto luminoso/abbagliante	Luminoso
Leggermente freddo	Leggermente freddo	Molto freddo	Luminoso	Luminoso	Molto luminoso/abbagliante
Leggermente caldo	Neutro	Neutro	Leggermente luminoso	Neutrale	Neutrale
Freddo	Leggermente freddo	Freddo	Leggermente luminoso	Leggermente luminoso	Leggermente luminoso
Neutro	Neutro	Leggermente freddo	Neutrale	Leggermente luminoso	Leggermente luminoso
Leggermente freddo	Freddo	Freddo	Leggermente Buio	Neutrale	Neutrale
Freddo	Leggermente freddo	Molto freddo	Luminoso	Leggermente luminoso	Molto luminoso/abbagliante
Neutro	Neutro	Leggermente freddo	Leggermente Buio	Luminoso	Luminoso
Neutro	Neutro	Leggermente freddo	Leggermente luminoso	Leggermente luminoso	Luminoso
Neutro	Neutro	Caldo	Leggermente luminoso	Neutrale	Leggermente luminoso
Leggermente caldo	Neutro	Leggermente caldo	Luminoso	Leggermente luminoso	Luminoso
Molto freddo	Freddo	Freddo	Leggermente luminoso	Leggermente Buio	Leggermente Buio
Leggermente freddo	Leggermente freddo	Leggermente freddo	Leggermente luminoso	Neutrale	Luminoso

Come ti senti in questo ambiente a livello visivo?			In questo momento preferiresti che il colore della luce artificiale fosse		
B	G	GL	B	G	GL
A mio agio	A mio agio	Leggermente a disagio	Leggermente più freddo	Senza cambiamenti	Leggermente più freddo
A mio agio	A mio agio	Leggermente a disagio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo
A mio agio	A mio agio	Leggermente a disagio	Leggermente più caldo	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	Leggermente a disagio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
Leggermente a disagio	Leggermente a disagio	Molto a disagio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	Leggermente a disagio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Leggermente più caldo	Leggermente più caldo	Leggermente più caldo
A mio agio	A mio agio	Leggermente a disagio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Più caldo
Leggermente a disagio	A mio agio	Leggermente a disagio	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti	Più caldo
Leggermente a disagio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti
Leggermente a disagio	A mio agio	A mio agio	Leggermente più freddo	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Più freddo
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
Leggermente a disagio	A mio agio	A mio agio	Leggermente più freddo	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
Leggermente a disagio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Leggermente più freddo	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
Leggermente a disagio	A mio agio	Leggermente a disagio	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
Leggermente a disagio	Leggermente a disagio	Leggermente a disagio	Più caldo	Leggermente più caldo	Leggermente più caldo
A mio agio	A mio agio	Leggermente a disagio	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo	Leggermente più caldo
A disagio	Leggermente a disagio	A mio agio	Leggermente più caldo	Leggermente più caldo	Leggermente più caldo
Leggermente a disagio	A mio agio	Leggermente a disagio	Leggermente più caldo	Leggermente più caldo	Leggermente più caldo
A mio agio	A mio agio	Leggermente a disagio	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo
A mio agio	A disagio	Leggermente a disagio	Leggermente più caldo	Leggermente più caldo	Più caldo
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti	Senza cambiamenti
Molto a disagio	Leggermente a disagio	Leggermente a disagio	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti	Più freddo
A mio agio	A mio agio	A mio agio	Leggermente più caldo	Senza cambiamenti	Leggermente più caldo

