



FO₃X (Ozone FACE - Free Air Controlled Exposure): An innovative infrastructure for a realistic assessment of the impact of tropospheric ozone on vegetation

FO₃X (Ozone FACE - Free-Air Controlled Exposure): un'infrastruttura innovativa per una valutazione realistica dell'impatto dell'ozono troposferico sulla vegetazione

Leonardo Lazzara ^(a) - Elena Marra ^{(a)(*)} - Barbara Baesso Moura ^{(a)(b)} - Jacopo Manzini ^{(a)(c)}
Andrea Viviano ^{(a)(c)} - Cesare Garosi ^(a) - Yasutomo Hoshika ^{(a)(b)} - Elena Paoletti ^{(a)(b)}

^(a) Istituto di Ricerca sugli Ecosistemi Terrestri (IRET), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino, Italia.

^(b) National Biodiversity Future Center (NBFC), Palermo 90133, Italia.

^(c) Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze, Italia.

^(*) Corresponding author; elena.marra@cnr.it

Abstract: Tropospheric ozone (O₃) is an oxidative air pollutant causing a significant negative effect on forest species. Therefore, it is essential to develop exposure systems that can provide realistic estimates of plant responses to O₃ under real world conditions. This article focuses on an O₃ Free-Air Controlled Exposure (FACE) system developed in Italy (FO₃X facility). Since 2015, the FO₃X has been running as a last generation O₃ FACE facility at the CNR experimental garden in central Italy, which is a unique facility in Mediterranean Europe within the AnaEE (Analysis and Experimentation on Ecosystems) European research infrastructure. This facility allows the exposure of plants to three levels of O₃ concentrations (ambient, 1.5- and 2.0-times ambient concentration), with main environmental variables continuously monitored. This paper also introduces the five modern O₃ FACE facilities for plant species currently running in the world and a further technological development with perspective for climate change studies.

Key words: tropospheric ozone; ozone FACE; forest health; technological development.

Citation: Lazzara L., Marra E., Moura B.B., Manzini J., Viviano A., Garosi C., Hoshika Y., Paoletti E., 2025 - FO₃X (Ozone FACE - Free-Air Controlled Exposure): Un'infrastruttura innovativa per una valutazione realistica dell'impatto dell'ozono troposferico sulla vegetazione. L'Italia Forestale e Montana, 80 (1): 7-22; <https://dx.doi.org/10.36253/ifm-1155>

Received: 05/12/2024 **Revised version:** 11/03/2025 **Published online:** 06/05/2025

1. INTRODUZIONE

L'ozono troposferico (O₃), oltre ad esse-

re un gas serra (Ainsworth *et al.*, 2012), è un inquinante atmosferico stagionale fortemente connesso con il cambiamento climatico (Ste-

venson *et al.*, 2005; De Marco *et al.*, 2022). In presenza di luce solare, si innescano reazioni fotochimiche tra ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili (COV) e monossido di carbonio (CO) che portano alla formazione di O_3 (Paoletti, 2007). Inoltre, l'aumento della temperatura e della radiazione solare, nonché il rilascio dei precursori a causa delle attività antropiche, favoriscono l'aumento delle concentrazioni atmosferiche di O_3 . Alte concentrazioni di O_3 si ritrovano nell'area Mediterranea in particolare durante la stagione estiva, quando le condizioni climatiche sono più stabili e caratterizzate da un'intensa esposizione solare con elevate e persistenti temperature (Paoletti, 2006). In particolare, le concentrazioni di O_3 in Italia continuano a superare il livello standard stabilito nella comunità Europea (40 ppb), e l'impatto di questo inquinante ha un'incidenza maggiore nelle zone prealpine e montane a causa della facilità di spostamento dei precursori (Paoletti *et al.*, 2022). Questo inquinante secondario, oltre ad essere dannoso per la salute umana, risulta essere un importante fattore di stress abiotico per le specie vegetali forestali provocando effetti negativi evidenti sulla fisiologia, la biochimica e la morfologia fogliare (Chappelka e Samuelson, 1998; Paoletti *et al.*, 2022). Le alterazioni nei processi di scambio gassoso indotte dall' O_3 causano un disaccoppiamento tra fotosintesi e conduttanza stomatica (Paoletti e Manning, 2007), con conseguenti cambiamenti funzionali negli stomi delle piante, sia in latifoglie che in conifere (Larsen *et al.*, 1990; Tognetti *et al.*, 2004; Contrana e Paoletti, 2007). L'azione fitotossica dell' O_3 comporta una ridotta assimilazione del carbonio ed un cambiamento nella riallocazione delle risorse nutritive, maggiormente indirizzate verso i meccanismi di difesa antiossidante a scapito della crescita (Fiscus *et al.*, 2005). Le principali conseguenze possono essere riassunte in una riduzione della

copertura fogliare, causata da defogliazione e anomalie morfologiche, dell'accrescimento radiale e della produttività, influenzando negativamente sia la resa delle colture agrarie che la biomassa delle foreste (Paoletti *et al.*, 2022). In particolare, i sintomi visibili sulle foglie, pur essendo specie-specifici, si presentano come diverse tipologie di punteggiature e bronzature, e risultano essere indicatori chiave per monitorare l'inquinamento da O_3 e valutare il rischio per gli ecosistemi forestali europei (Moura *et al.*, 2022).

Questi sintomi sono confermati da osservazioni sul campo e possono essere riprodotti tramite esperimenti. Solitamente la simulazione sperimentale dell'esposizione all' O_3 viene effettuata mediante l'utilizzo di camere chiuse o *closed chamber* (inclusi fitotroni, serre e camere di crescita), camere a tetto aperto o *open top* (Bortier *et al.*, 2000, Novak *et al.*, 2007), o fumigazione in aria libera e controllata (Mattysek *et al.*, 2007). La maggior parte degli esperimenti vengono eseguiti in queste condizioni, sebbene le camere non rappresentino fedelmente le condizioni reali di campo (luce, temperatura, precipitazioni, umidità dell'aria e ventilazione rispetto all'aria ambiente) (Paoletti, 2007). Inoltre, queste strutture hanno generalmente dimensioni limitate, per cui sono in grado di ospitare solo piante giovani, spesso in vaso (McLeod e Long, 1999). Queste metodologie sono più adatte per studiare i meccanismi di funzionamento della pianta, ma possono generare valutazioni fuorvianti del rischio da O_3 .

Negli anni '90 sono stati sviluppati invece i primi sistemi *Free Air Controlled Enrichment* (FACE) per simulare elevate concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica (CO_2), ed il loro utilizzo è cresciuto significativamente già nel decennio successivo (Hendrey *et al.*, 1993). I sistemi FACE utilizzano tecniche sperimentali atte a valutare gli effetti dell'aumento delle concentrazioni di gas inquinanti atmosferici su

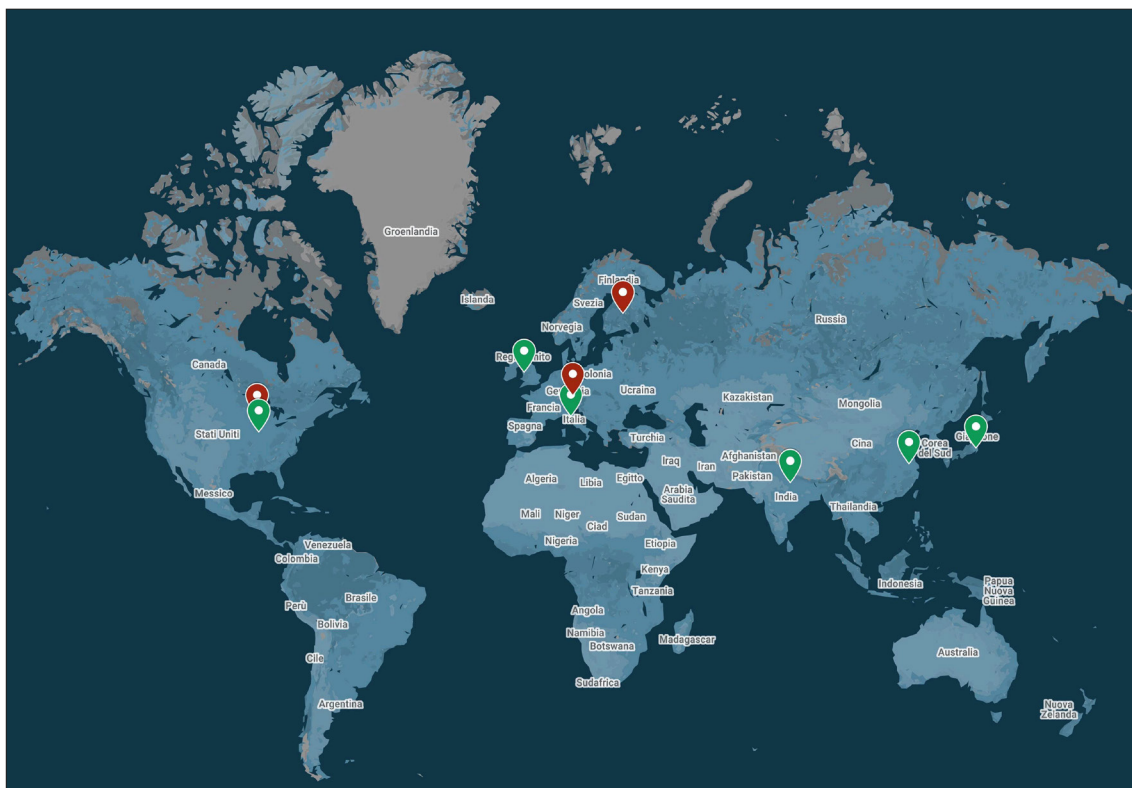


Figura 1 - Localizzazione dei siti Free Air Controlled Enrichment (FACE) di ozono (O₃ FACE) attualmente in funzione (tag verde) e dismessi (tag rosso).

piante di diversa tipologia, con l'obiettivo di mantenere l'ambiente in uno stato più naturale e realistico in cui solo determinate variabili possano essere modificate. Negli ultimi anni strutture FACE, simili a quelle utilizzate per simulare elevate concentrazioni atmosferiche di CO₂, sono state sviluppate anche per l'esposizione delle piante all'O₃. I sistemi FACE prevedono l'utilizzo di una struttura costituita da tubature verticali ed orizzontali, che consentono la diffusione controllata di getti d'aria o di gas puro direttamente a livello della chioma delle piante. I primi sistemi FACE utilizzavano soffiatori o ventole per distribuire aria arricchita di CO₂ (Hendrey *et al.*, 1993); le più moderne versioni, invece, prevedono il rilascio ad alta velocità del gas puro da tubi di emissione dotati di numerose e piccole perforazioni. I vantaggi di questi sistemi sono notevoli.

Innanzitutto, la possibilità di controllare con precisione le concentrazioni di gas e condurre studi a lungo termine permette di ottenere dati preziosi sugli effetti cronici dell'inquinamento. Inoltre, i risultati possono essere utilizzati per fare previsioni sugli effetti futuri dell'inquinamento atmosferico su scala globale, aiutando a capire come affrontare le sfide del cambiamento climatico. Tuttavia, questi impianti presentano anche delle criticità. La loro costruzione e gestione sono estremamente costose, poiché richiedono infrastrutture complesse e manutenzione continua. Infine, i sistemi FACE coprono aree relativamente piccole, il che limita la possibilità di replicare gli esperimenti su larga scala o su ecosistemi più complessi.

Il presente studio ha come obiettivo quello di (i) fare una panoramica sulle principali strutture FACE presenti a livello mondiale;

(ii) descrivere l'innovativo impianto FO_3X , un FACE ad esposizione controllata, che consente di monitorare le risposte fisiologiche degli alberi a diverse concentrazioni di O_3 ; (iii) analizzare le future implementazioni tecnologiche di FO_3X per condurre ricerche che considerino anche le conseguenze del cambiamento climatico.

2. FACE DELL'OZONO (O_3 FACE) NEL MONDO

A livello globale, esistono 14 siti FACE distribuiti nei cinque continenti (Ainsworth e Long, 2021). Questi impianti, sebbene molteplici nella loro applicazione, sono progettati per osservare gli effetti dell'arricchimento atmosferico di CO_2 (Free Air CO_2 Enrichment), NO_2 , CH_4 e altri gas, analizzando la crescita e la biomassa delle piante, gli effetti sulla fotosintesi, l'efficienza nell'uso dell'acqua e le interazioni con altri fattori ambientali.

Negli ultimi anni, sono stati sviluppati sistemi di fumigazione in aria libera e controllata per studiare l'impatto dell' O_3 sulle piante, basati su strutture simili ai sistemi FACE utilizzati per simulare alte concentrazioni di CO_2 . Tuttavia, a causa della reattività molto maggiore dell' O_3 (Penner *et al.*, 2010) il controllo delle sue concentrazioni e distribuzione nei sistemi FACE risulta tecnicamente più complesso rispetto a quello del CO_2 (Paoletti *et al.*, 2017). Di conseguenza, attualmente esistono sei strutture FACE dedicate all' O_3 in tutto il mondo (Fig. 1), situate in Cina, Giappone, Inghilterra, India, Stati Uniti e Italia. Alcuni dei primi impianti sono stati dismessi, come quelli negli Stati Uniti (Karnosky *et al.*, 2007), Finlandia (Oksanen *et al.*, 2007), Germania (Werner e Fabian, 2002, Matyssek *et al.*, 2010).

I sistemi FACE per l' O_3 sopradescritti sono strutturati attorno ad alcuni elementi chiave. Innanzitutto, vi è la presenza di un sistema di diffusione, che circonda l'area sperimentale e

rilascia il gas in modo controllato. In secondo luogo, vengono utilizzati sensori ambientali per monitorare la concentrazione di O_3 e regolare il flusso del gas in base a parametri come temperatura e velocità del vento. Questi sistemi sono installati in ecosistemi naturali, come foreste o campi agricoli, e ogni area di trattamento con O_3 è accompagnata da un'area di controllo in cui la concentrazione rimane a livello ambientale, per consentire confronti affidabili. Nonostante queste somiglianze, ogni sito ha delle peculiarità che lo rendono unico (Tabella 1). Il sito FACE di Jiangsu (Cina), per esempio, si distingue per focalizzare le sue attività di ricerca sulle colture alimentari chiave, come il riso, che rappresenta una risorsa fondamentale per l'economia agricola cinese (Zaisheng *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2021; Feng *et al.*, 2012). Questo sito utilizza un sistema avanzato chiamato O_3 -T-FACE, che permette di simulare simultaneamente l'aumento delle concentrazioni di O_3 e della temperatura. Questo approccio è essenziale per studiare non solo gli effetti dell' O_3 , ma anche quelli del cambiamento climatico sul lungo termine.

Alcuni sistemi avanzati, come il moderno sistema FACE in Giappone (Tsukuba), rilasciano l' O_3 attraverso una rete tridimensionale (3D) di tubi, migliorandone la sua distribuzione uniforme, riducendo i gradienti di concentrazione che spesso si creano con i sistemi più tradizionali (Koike *et al.*, 2013; Kitao *et al.*, 2015; Tobita *et al.*, 2019). A Tsukuba vengono studiate sia specie forestali come querce, sia colture agrarie come il riso, rendendo questo impianto cruciale per capire l'impatto dell' O_3 su diversi tipi di ecosistemi.

Lucknow (India), invece, è un sito strategico per lo studio delle colture tipiche dell'agricoltura indiana, come il grano e il riso. Il focus principale di questo sito è la sicurezza alimentare, poiché l'India è particolarmente vulnerabile agli effetti dell'inquinamento atmosferico

Tabella 1 - Riassunto dei principali studi effettuati con l'utilizzo di sistemi di Free Air Controlled Enrichment (FACE) con O₃ presenti nel mondo.

SITO	ANNI DI ATTIVITÀ*	COLTURA STUDIATA	LIVELLO DI O ₃ PER TRATTAMENTO	FONTE BIBLIOGRAFICA
Cina - Jiangsu (O ₃ -T-FACE)	2020 - 2024	<i>Oryza sativa</i> L.	Ambiente (39 ppb), O ₃ elevato (1,5 × ambiente - 57 ppb), combinati con trattamenti di temperatura	Zaisheng <i>et al.</i> , 2024
Cina - Beijing (O ₃ -N-FACE)	2018 - 2019 - 2022	Cloni di Pioppo (<i>Populus deltoides</i> cv. '55/56' × <i>Populus deltoides</i> cv. 'Imperial' e <i>Populus euramericana</i> cv. '74/76')	Ambiente (40 ppb), O ₃ elevato (ambiente + 70%), combinati con trattamento azoto	Xu <i>et al.</i> , 2021
Cina - Jiangdou	2007 - 2010	Cultivar di grano (<i>Triticum aestivum</i> L. cv. Yangmai 15, Yangmai 16, Yangfuma 2, Yannong 9, Jia002)	Ambiente (36 ppb), O ₃ elevato (2 × ambiente)	Feng <i>et al.</i> , 2012
Cina - Jiangdou	2007 - 2009	Cultivar di Riso (<i>Oryza sativa</i> cv. Yangdao 6, Shanyou 63, Liangyoupeijiu, Wujing 15, Wuyujing 21)	Ambiente, O ₃ elevato	Zhang e Zhu 2016
Giappone - Tsukuba	2011 - 2012	<i>Fagus crenata</i> Blume	Ambiente (36 ppb), O ₃ elevato (2 × ambiente)	Tobita <i>et al.</i> , 2019
Giappone - Hokkaido	2011	<i>Quercus mongolica</i> Fisch var. <i>crispula</i> e <i>Quercus serrata</i> Murray	Ambiente, O ₃ elevato (2 × ambiente)	Watanabe <i>et al.</i> , 2013
Giappone - Tsukuba	2012 - 2013	<i>Quercus mongolica</i> Fisch var. <i>crispula</i> e <i>Quercus serrata</i> Murray	Ambiente (27 ppb), O ₃ elevato (2 × ambiente)	Kitao <i>et al.</i> , 2015
Inghilterra - North Wales	2014 - 2017	<i>Lolium perenne</i> L.	Ambiente (24 ppb), O ₃ elevato (ambiente + 10 ppb), O ₃ molto elevato (ambiente + 20 ppb)	Wang <i>et al.</i> , 2019
India - Lucknow (CSIR-NBRI FAOE)	2018 - 2024	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss., <i>Bougainvillea spectabilis</i> Willd., <i>Ficus benghalensis</i> L., <i>Ficus religiosa</i> L., <i>Nerium indicum</i> L., <i>Plumeria rubra</i> L., <i>Saraca asoca</i> W.J.de Wilde, <i>Tabernaemontana divaricata</i> L., <i>Terminalia arjuna</i> Roxb. Wight & Arn.	Ambiente (49 ppb), O ₃ elevato (ambiente + 20 ppb - 70 ppb)	Jamal <i>et al.</i> , 2023
USA - Champaign (SoyFACE)	2002 - 2003	<i>Glycine max</i> L. e <i>Zea mays</i> L.	Ambiente, O ₃ elevato (ambiente × 1,23)	Morgan <i>et al.</i> , 2006
USA - Champaign	2007 - 2008 - 2009 - 2010	Cultivar di soia (<i>Glycine max</i> cv. HS93-4118, IA-3010, Loda, LN97-15076, Pana)	Ambiente, O ₃ elevato 40 ppb, 55 ppb, 70 ppb, 85 ppb, 110 ppb, 130 ppb, 160 ppb, 200 ppb	Betzberger <i>et al.</i> , 2010
USA - Wisconsin (ASPEN FACE)	1998 - 2009	<i>Acer saccharum</i> Marshall, <i>Betula papyrifera</i> Marshall, <i>Populus tremuloides</i> Michx., <i>Fagus sylvatica</i> L., <i>Picea abies</i> L.	Ambiente, O ₃ elevato	Karnosky <i>et al.</i> , 2007
Finlandia - Kuopio	1996 - 2003	<i>Betula pendula</i> Roth	Ambiente, O ₃ elevato	Oksanen <i>et al.</i> , 2007
Germania - Freising	2000	<i>Fagus sylvatica</i> L., <i>Picea abies</i> L.	Ambiente, O ₃ elevato	Werner e Fabian, 2002
Germania - Freising	1997-2007	<i>Fagus sylvatica</i> L., <i>Picea abies</i> L.	Ambiente, O ₃ elevato	Matyssek <i>et al.</i> , 2010

*Anno a cui si riferisce lo studio.

(Jamal *et al.*, 2023). A differenza degli altri siti, Lucknow si concentra maggiormente sugli impatti economici e sociali dell'O₃ sulla produzione alimentare.

Negli Stati Uniti (Morgan *et al.*, 2006; Betzelberger *et al.*, 2010; Ainsworth, 2017), il sito SoyFACE (Champaign, Illinois) è uno dei più grandi e importanti a livello mondiale. Qui l'attenzione è rivolta principalmente alla soia e al mais, due colture di enorme rilevanza economica. SoyFACE è noto per la sua capacità di simulare scenari ambientali futuri, permettendo di valutare gli effetti combinati di CO₂ e O₃ su queste specie, con un focus sulla produttività agricola in un contesto di cambiamento climatico.

Infine, il sito di North Wales (UK) (Wang *et al.*, 2019) rappresenta un'eccezione rispetto agli altri, in quanto si concentra prevalentemente su ecosistemi naturali, come prati e foreste. Mentre gli altri impianti concentrano la loro attività sperimentale soprattutto sulle colture alimentari, a North Wales si studiano specie vegetali native e praterie, esplorando l'impatto dell'O₃ su ambienti naturali temperati. Questo lo rende particolarmente utile per capire come l'inquinamento atmosferico influenzerà la biodiversità in ambienti meno controllati. Studi recenti hanno infatti evidenziato come l'O₃ abbia un effetto nocivo sulla biodiversità influenzando microflora e fauna (ad esempio insetti impollinatori; Vanderplank *et al.*, 2021) con forti ripercussioni sugli ecosistemi (Grulke e Heath, 2020).

Tuttavia, la maggior parte degli impianti O₃-FACE utilizza anelli di distribuzione per trasportare il gas, ma a causa della sua elevata reattività, si creano forti gradienti di concentrazione dall'esterno dell'anello verso il centro (Paoletti *et al.*, 2017). Ciò limita lo studio a un piccolo numero di piante situate alla stessa distanza dall'anello. Inoltre, in questi impianti, l'unità statistica è la singola pianta o addirittu-

ra la singola foglia, poiché non sono disponibili appezzamenti replicabili. Inoltre, in genere vengono studiati solo due livelli di O₃: uno ambientale e uno arricchito (Tabella 1).

Il sistema FO₃X di Sesto Fiorentino si distingue come uno dei migliori impianti FACE dedicati all'O₃ grazie a una serie di innovazioni tecnologiche e metodologiche che lo rendono unico rispetto ad altri siti globali. Uno dei suoi principali vantaggi è la capacità di garantire una distribuzione uniforme dell'inquinante, superando i problemi dei gradienti di concentrazione che affliggono molti impianti.

FO₃X offre anche maggiore flessibilità nella sperimentazione, permettendo di applicare una gamma più ampia di concentrazioni di O₃, rispetto a molti altri siti che si limitano a uno o due livelli. Questo consente di studiare le risposte delle piante in modo più dettagliato e con maggiore replicabilità, cosa che non sempre è possibile in impianti più tradizionali. Inoltre, a differenza di molti altri siti, FO₃X permette di condurre esperimenti su un'ampia varietà di specie vegetali, dalle colture alimentari alle specie forestali fino a quelle ornamentali per il verde urbano. L'impianto è parte di una rete internazionale di ricerca (AnaEE), che facilita la collaborazione con piattaforme FACE, sviluppate per la valutazione dell'impatto sulla vegetazione di altri stress abiotici come, ad esempio, CO₂ e deposizioni azotate. Infine, FO₃X è altamente adattabile e predisposto per futuri aggiornamenti tecnologici, rendendolo una struttura di riferimento per lo studio degli effetti dell'O₃ sugli ecosistemi in un contesto di cambiamento climatico.

Nonostante le sfide tecniche e i costi elevati, i sistemi FACE per l'O₃ rimangono strumenti fondamentali per comprendere l'impatto dell'inquinamento atmosferico sugli ecosistemi e sono cruciali per sviluppare strategie di mitigazione a lungo termine.

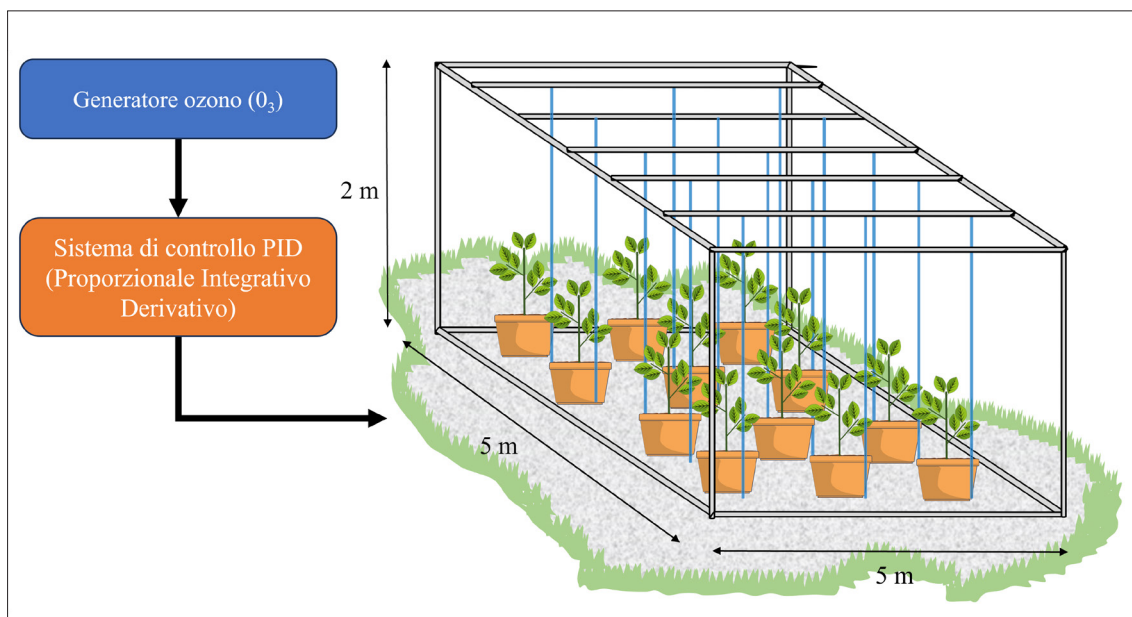


Figura 2 - Rappresentazione schematica di una delle parcelle in cui viene effettuato l'arricchimento di O₃ (1,5 e 2,0 volte la concentrazione ambientale).

3. LA PIATTAFORMA FO₃X (OZONE FACE - FREE AIR CONTROLLED EXPOSURE)

La piattaforma FO₃X (Free-air O₃ Exposure), situata presso l'area di ricerca CNR di Sesto Fiorentino (43°48'59"N, 11°12'01"E, 55 m s.l.m.), rappresenta l'unico impianto FACE al mondo dedicato allo studio dell'O₃ in condizioni di clima mediterraneo. Questa struttura consente di simulare, in condizioni di campo aperto, l'esposizione realistica delle piante a differenti livelli di O₃. La piattaforma FO₃X è progettata per esperimenti a lungo termine sulla vegetazione, finalizzati anche a valutare gli effetti combinati dell'O₃ e di altri fattori di stress ambientale, come la salinità, la carenza idrica e la disponibilità di nutrienti. L'impianto comprende nove parcelle sperimentali (5 × 5 m ciascuna, volume di 50 m³ - Figura 2), disposte in tre blocchi di tre parcelle. In ciascun blocco è presente un livello di O₃ differente: livello ambientale (AA), livello intermedio (1,5 × AA) e livello elevato di

O₃ (2,0 × AA). In questi ultimi due blocchi viene immesso O₃, in maniera controllata, per raggiungere la concentrazione richiesta. Tale disposizione consente di ridurre le interferenze tra i blocchi sperimentali, grazie anche a una distanza minima di 15 m tra di essi.

La piattaforma FO₃X è sostanzialmente formata da tre componenti: un generatore di O₃ che produce l'O₃ necessario ad arricchire l'aria all'interno delle parcelle, un'unità di controllo che regola la quantità di O₃ immessa ed un sistema di distribuzione che assicura la corretta distribuzione dell'O₃ all'interno delle parcelle.

Per la produzione dell'O₃ viene utilizzato il generatore industriale TOGC45X (Suez Environment, Paris, France), con capacità di produzione di 45 g/h di O₃. Questo generatore è dotato di un compressore di aria e un concentratore di ossigeno (O₂) integrati, il che evita l'uso di sorgenti di O₂ esterne. L'O₂ prodotto è fatto passare attraverso una cella di produzione di O₃ basata sull'effetto corona, in grado di garantire una purezza dell'O₂ superiore al

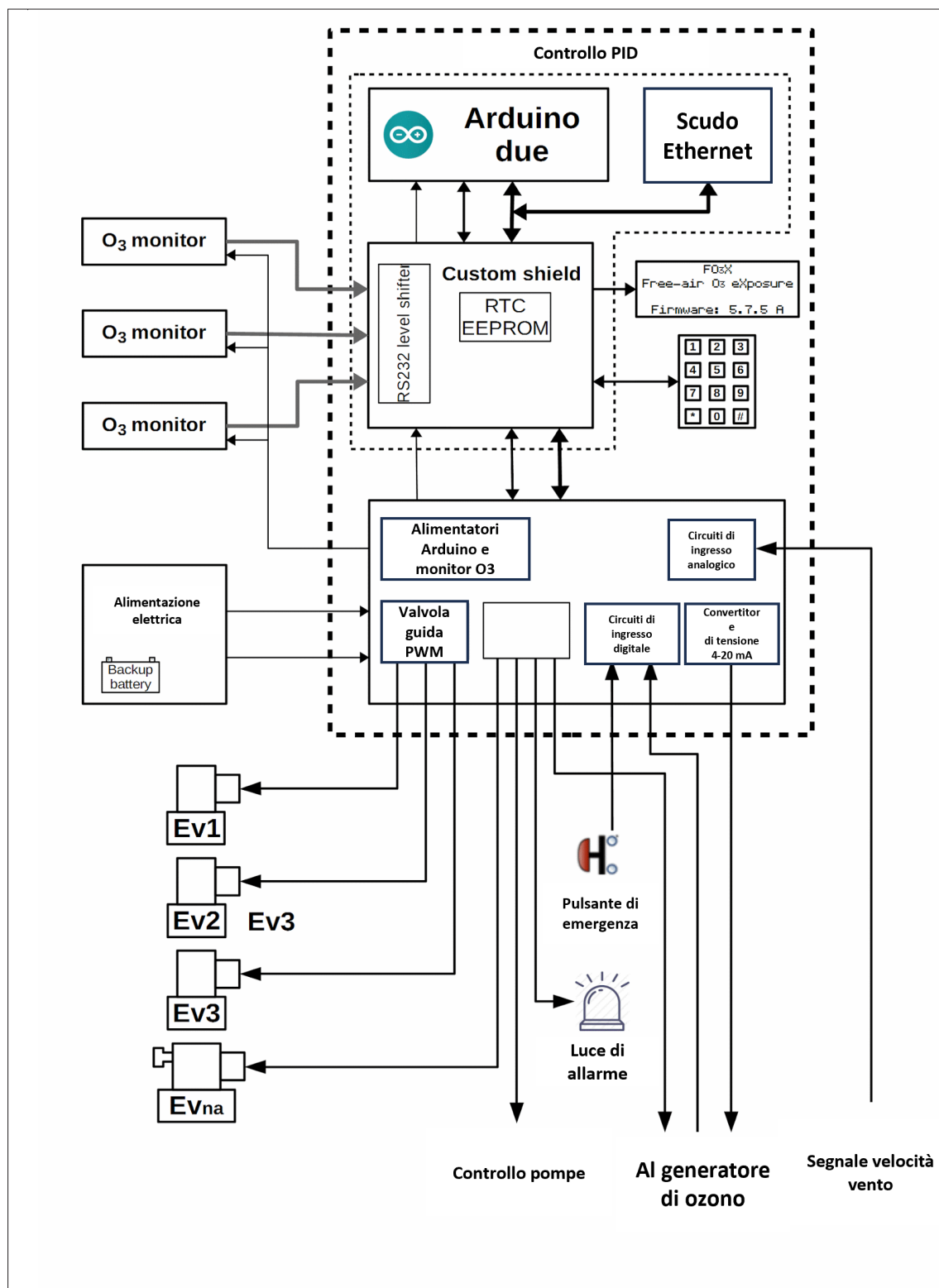


Figura 3 - Schema a blocchi dell'unità di controllo.

90%, per evitare la produzione di altri inquinanti quali NO_x (Tang *et al.*, 2011). Poiché la reazione che avviene all'interno della cella produce calore questa necessita di un raffreddamento a liquido. È possibile regolare la produzione di O₃, sia direttamente sul generatore sia da remoto tramite un segnale elettrico.

L'O₃ prodotto dal generatore è convogliato all'unità controllo dove delle servovalvole regolano il flusso di O₃ verso le parcelle. Queste valvole sono comandate da un controllo di tipo PID (Proporzionale Integrativo Derivativo).

L'unità di controllo (Figura 3) è basata su una scheda Arduino DUE (Arduino S.r.l., Italia), dotata di un microcontrollore ARM a 32 bit. Intorno a questa scheda sono stati realizzati *ad hoc* tutti i circuiti necessari al pilotaggio delle servovalvole, alla regolazione della produzione dell'O₃, all'acquisizione dei dati dei sensori e all'alimentazione. È presente una porta Ethernet, per la connessione a un server FTP, e l'alloggiamento per una scheda memoria μSD, per la memorizzazione dei dati in locale. La misura dell'O₃ è affidata a tre strumenti basati sul principio dell'assorbimento UV

(modello 202 e 205, 2B Technologies, Boulder CO, USA) mentre un anemometro a ultrasuoni (WindSonic, Gill Instruments, UK), fornisce la misura della direzione e della velocità del vento. Il circuito di alimentazione è provvisto di una batteria in tampone che mantiene alimentata l'unità di controllo in assenza della rete elettrica. La misura dell'O₃ e della velocità del vento vengono effettuate ogni 10 s, e con la stessa frequenza il controllo regola l'apertura delle servovalvole che regolano il flusso dell'O₃. Ogni minuto il controllo regola la produzione di O₃ da parte del generatore, basandosi sui valori dei livelli di O₃ e della velocità del vento. Con questo intervallo sono memorizzati i dati sulla scheda di memoria e sul server FTP e vengono gestite eventuali condizioni di errore, per le quali è previsto l'invio di e-mail di segnalazione. Durante il periodo notturno, in presenza di condizioni di calma di vento e bassa concentrazione dell'inquinante, l'arricchimento di O₃ viene interrotto.

Il sistema di distribuzione dell'O₃ (Figura 4) è costituito da due unità identiche, ciascuna delle quali alimenta tre parcelle. Sopra ogni

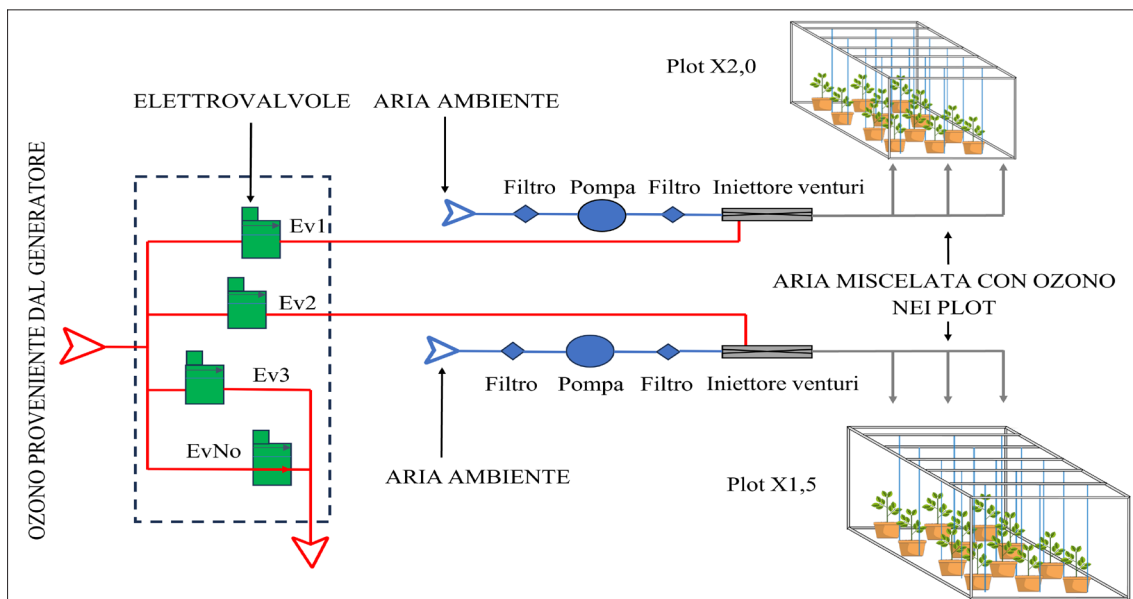


Figura 4 - Schema illustrativo della distribuzione dell'O₃ proveniente dal generatore, nei due plot.

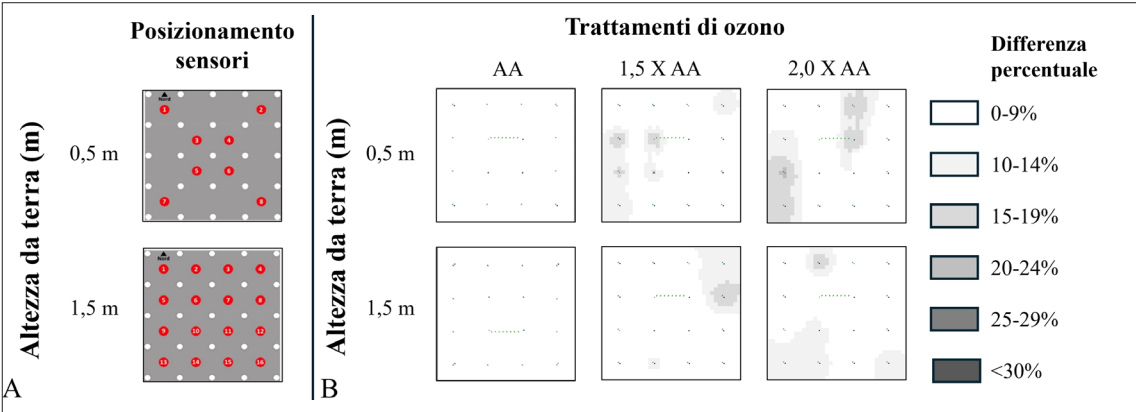


Figura 5 - Rappresentazione schematica della posizione di campionatori passivi di O₃ a diverse altezze (A) utilizzati per confrontare le differenze percentuali delle concentrazioni all'interno dei trattamenti (B).

Tabella 2 - Concentrazione di O₃ nell'ultimo triennio (2021-2023) per i diversi trattamenti.

ANNO	CONCENTRAZIONE MEDIA ANNUALE DI O ₃ PER DIVERSI TRATTAMENTI		
	AA (ppb)	1,5 × AA (ppb)	2,0 × AA (ppb)
2021	37,61	54,04	71,01
2022	35,35	50,55	68,12
2023	37,06	49,77	66,22

Tabella 3 - Media delle concentrazioni orarie di O₃ (± errore standard) per ogni classe di velocità del vento (periodo 2021-2023) e frequenza di scostamento del 20% dalla concentrazione target di O₃.

VELOCITÀ DEL VENTO (m s ⁻¹)	FREQUENZA (%)	MEDIA O ₃ AA (ppb)	MEDIA O ₃ 1,5×AA (ppb)	MEDIA O ₃ 2,0×AA (ppb)	SCOSTAMENTO ±20 % DAL VALORE DI CONCENTRAZIONE ATTESO	
					Frequenza (%) 1,5×AA*	Frequenza (%) 2,0×AA*
0-0,5	31,1	21,7 ± 0,2	32,1 ± 0,4	42,3 ± 0,7	68,3	53,1
0,5-1,0	27,4	30,8 ± 0,3	43,1 ± 0,5	56,3 ± 0,8	67,6	49,4
1,0-1,5	20,0	49,7 ± 0,3	69,8 ± 0,5	94,2 ± 0,7	88,4	82,3
1,5-2,0	12,6	52,9 ± 0,3	74,1 ± 0,5	99,9 ± 0,7	93,8	91,8
>2,0	8,9	53,1 ± 0,4	71,4 ± 0,5	94,9 ± 0,7	89,7	85,2
Totale	100	36,5 ± 0,2	51,4 ± 0,3	68,4 ± 0,3	78,4	67,3

* Sono stati inclusi solo i valori orari > 10 ppb.

parcella, sostenuto da un telaio realizzato con profilati tubolari, è presente un reticolo di tubi, in PVC-C, resistenti all' O₃. A questo reticolo sono collegati 25 tubi in PTFE del diametro di 10 mm disposti verticalmente e chiusi alla base. Ciascuno di essi presenta 20 microfori disposti a intervalli regolari. Ogni gruppo di tre reticoli è alimentati dal flusso d'aria, fornito da un compressore a palette, a cui viene miscelato l'O₃ proveniente dall'unità di controllo, tramite un iniettore Venturi.

Alla piattaforma FO₃X è associata una stazione meteorologica, composta da un data-logger Campbell Scientific CR1000 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA) accoppiato a un multiplexer AM16/32B (Campbell Scientific, Logan, UT, USA). Per la misura dei parametri meteo è utilizzato un multisensore HD52.3DP147 (DeltaOHM, Padova, Italia), posizionato all'altezza di 3 m. Questo strumento permette la misura delle seguenti grandezze: intensità e direzione del vento, temperatura e umidità dell'aria, radiazione solare e pressione atmosferica. La misura della pioggia è affidata a un pluviometro Munro a vaschetta oscillante con bocca tarata di 203 mm di diametro e risoluzione nominale 0,2 mm.

La distribuzione dell'O₃ è stata testata tramite campionatori passivi, posizionati a due differenti altezze (0,5 e 1,5 m) e in varie posizioni all'interno del plot (Figura 5A). La variabilità spaziale della concentrazione di O₃ nei plot è risultata essere inferiore al 20%, evidenziando la precisione del sistema di distribuzione (Figura 5B).

Questi dati, insieme alle misure di concentrazione rilevate dal monitor centrale, consentono di verificare l'uniformità della diffusione nelle parcelle sperimentali. In tabella 2 sono riportati i dati relativi alla concentrazione di O₃ durante il periodo sperimentale (Maggio - Ottobre) degli ultimi 3 anni. Il sistema è ottimizzato per garantire una stabilità costante

della concentrazione di O₃ durante l'intero periodo sperimentale, anche in presenza di agenti atmosferici. In tabella 3 è possibile osservare la variazione nella concentrazione di O₃ in presenza di vento. Nel complesso, la regolazione delle concentrazioni di O₃ risulta essere molto accurata, in quanto nel 79 % e 68 % delle volte la concentrazione ha uno scostamento inferiore al 20 % dal valore atteso, rispettivamente in 1,5 × AA e 2,0 × AA. Valori della concentrazione di O₃ meno accurati si registrano quando si hanno basse velocità del vento, situazione tipica durante le ore notturne durante le quali è possibile che l'arricchimento di O₃ venga interrotto. Tuttavia, durante la notte, quindi in assenza di attività fotosintetica, gli effetti dell'O₃ sulla vegetazione sono ridotti.

4. PROSPETTIVA (O₃ × HEAT FACE)

L'interazione tra O₃ e riscaldamento globale costituisce una delle principali sfide per lo studio della risposta delle piante e per la gestione degli ecosistemi nel contesto dei cambiamenti climatici (Bytnerowicz *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2022; Gupta *et al.*, 2022). I sistemi FACE rappresentano un'infrastruttura preziosa per studiare in modo realistico gli effetti di diversi stress abiotici, tra cui l'O₃ (FO₃X) e l'incremento della temperatura (Heat-FACE), oppure la loro combinazione, su diverse specie vegetali. Questi esperimenti offrono la possibilità di simulare in ambienti reali le condizioni future del clima, fornendo dati cruciali per comprendere la risposta fisiologica delle piante.

Numerosi studi hanno evidenziato che l'esposizione combinata a elevate concentrazioni di O₃ e temperature più alte intensifica lo stress ossidativo, con effetti negativi sulla capacità fotosintetica, sullo sviluppo vegetativo e, soprattutto, sulla resa delle colture (Feng *et al.*, 2015; Cotrozzi *et al.*, 2016; Lee *et al.*,

2020). Mentre un lieve incremento della temperatura (1-5 °C) può stimolare la fotosintesi e la crescita, alte concentrazioni di O_3 sono spesso associate a riduzioni nella conduttanza stomatica, fotosintesi e sviluppo generale della pianta (Lee *et al.*, 2020). La risposta finale delle piante all'interazione tra O_3 e temperatura è determinata da complesse interazioni tra i loro processi fisiologici e biochimici. Ad esempio, temperature superiori all'ottimale possono ridurre l'assorbimento di O_3 riducendo la conduttanza stomatica, mentre temperature moderate (+5 °C) possono aumentarne l'assorbimento (Lee *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2022).

Esperimenti sul campo hanno mostrato che l' O_3 accelera la senescenza fogliare, mentre un modesto incremento di temperatura (+1,2 °C) può ritardare questo processo, come osservato nelle betulle (*Betula pendula* Roth.) (Kasurinen *et al.*, 2012). La comprensione dell'effetto combinato di O_3 e temperature elevate sulle

piante è ancora oggetto di discussione e approfondimento nella comunità scientifica, soprattutto riguardo al ruolo della variazione del deficit di pressione di vapore (VPD) che influisce sul movimento stomatico e sul flusso di O_3 all'interno delle piante (Wittig *et al.*, 2007).

L'integrazione di tecnologie come i sistemi di riscaldamento radiativo controllati da feedback che permettono un riscaldamento continuo delle chiome delle piante, associati ai sistemi FACE per l'esposizione all' O_3 , rappresenta un passo cruciale per studiare *in situ* le risposte delle specie vegetali. Questi sistemi combinati consentirebbero di ottenere dati più realistici, essenziali per sviluppare modelli predittivi accurati sugli effetti futuri del cambiamento climatico e dell'inquinamento atmosferico su diverse specie, erbacee e arboree. Ad oggi, l'unico sistema che possiede queste caratteristiche e permette lo studio dell'interazione temperatura- O_3 è il sistema O_3 -T-FACE, si-

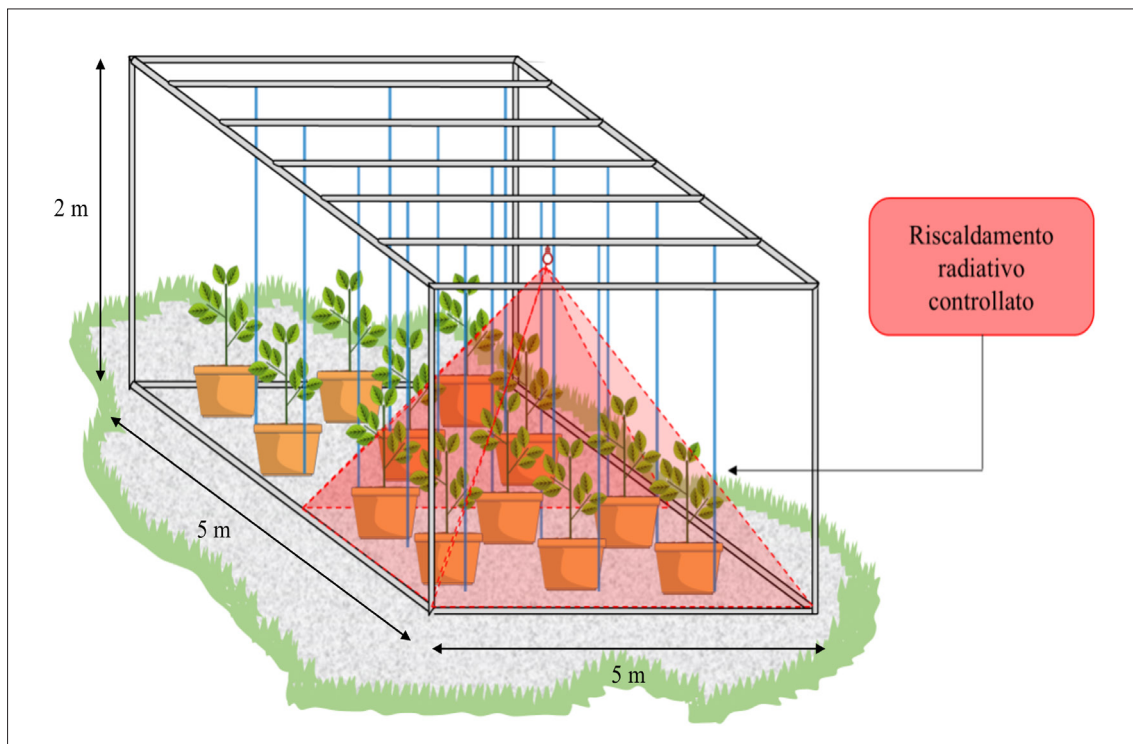


Figura 6 - Rappresentazione schematica del sistema $O_3 \times$ Heat FACE.

tuato a Wuqiao town, Jiangdu, in Cina (Shao *et al.*, 2024). Questo sistema consente lo studio di due livelli di esposizione all'O₃ (livello ambientale ed 1,5 × AA) e la regolazione della temperatura (fino ad un massimo di + 1,6°C rispetto alla temperatura ambientale) (Shao *et al.*, 2024).

Al fine di colmare le lacune nelle conoscenze sull'impatto a breve e lungo termine del cambiamento climatico e dell'inquinamento atmosferico, verrà predisposta l'implementazione di riscaldamento radiativo controllati da feedback nell'impianto FO₃X sopra descritto (Figura 6). In questo caso, il sistema FO₃X permetterà lo studio di 3 diversi livelli di O₃ (AA, 1,5 × AA e 2,0 × AA) in combinazione con la variazione di temperatura, utilizzando una tecnologia simile a quella implementata nell'impianto O₃-T-FACE descritto in Shao *et al.*, (2024).

L'implementazione di queste infrastrutture, come il sistema O₃ × Heat FACE, è dunque fondamentale per migliorare la nostra comprensione degli impatti a breve e lungo termine del riscaldamento globale e dell'inquinamento atmosferico sugli ecosistemi, supportando una loro gestione più sostenibile tramite strategie di mitigazione e adattamento più efficaci.

Ringraziamenti

Si ringraziano i progetti Fondazione Cassa di Risparmio di Firenze (2013/7956); PNRR for Mission 4 (Component 2, Notice 3264/2021, IR0000032) - ITINERIS - Italian Integrated Environmental Research Infrastructure System CUP B53C22002150006; Project funded under the National Recovery and Resilience Plan (NRRP), Mission 4 Component 2 Investment 1.4 - Call for tender No. 3138 of 16 December 2021, rectified by Decree n.3175 of 18 December 2021 of Italian Ministry of University and Research

funded by the European Union - NextGenerationEU, Award Number: Project code CN_00000033, Concession Decree No. 1034 of 17 June 2022 adopted by the Italian Ministry of University and Research, CUP, H43C22000530001 Project title "National Biodiversity Future Center - NBFC" (Spoke 3 and 5) e tutti i partecipanti al progetto che hanno fornito supporto tecnico e scientifico permettendo la realizzazione di questo lavoro, in particolare, Moreno Lazzara, Alessandro Materassi e Gianni Fasano.

RIASSUNTO

L'ozono troposferico (O₃) è un inquinante atmosferico secondario che arreca stress ossidativo alle specie forestali. Per questo motivo, è essenziale sviluppare sistemi di esposizione all'O₃ in grado di fornire prove empiriche in merito alla risposta delle piante a questo inquinante in condizioni ambientali reali. Il seguente articolo è incentrato sulla descrizione di un sistema di esposizione controllata in aria libera (FACE) all'O₃, sviluppato in Italia (FO₃X). Dal 2015, l'O₃ FACE di ultima generazione, FO₃X, è in funzione nell'Italia centrale presso gli orti sperimentali del CNR di Sesto Fiorentino. Si tratta di un impianto unico nell'Europa mediterranea ed è parte integrante della infrastruttura di ricerca europea AnaEE (Analisi e sperimentazione sugli ecosistemi). La struttura consente l'esposizione delle specie vegetali a tre livelli di concentrazioni di O₃ (ambiente, 1,5 e 2,0 volte la concentrazione ambiente), monitorando in continuo le principali variabili ambientali. Il sistema FO₃X assicura un rilascio costante di O₃, offrendo un'esposizione affidabile con un impatto minimo sul microclima. Questo documento presenta anche le cinque strutture O₃ FACE più moderne, attualmente in funzione a livello mondiale. Inoltre, l'articolo presenta gli sviluppi tecnologici e le prospettive future per implementare la struttura al fine di valutare anche le conseguenze connesse al cambiamento climatico.

BIBLIOGRAFIA

Ainsworth E.A., Yendrek C.R., Sitch S., Collins W.J., Emberson L.D., 2012 - *The effects of tropospheric*

- ozone on net primary productivity and implications for climate change. Annual review of plant biology, 63 (1): 637-661. PMID: 22404461. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103829>
- Ainsworth E.A., 2017 - *Understanding and improving global crop response to ozone pollution*. The Plant Journal, 90 (5), 886-897. PMID: 27739639. <https://doi.org/10.1111/tpj.13298>
- Ainsworth E.A., Long S.P., 2021 - *30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation?* Global Change Biology, 27 (1): 27-49. PMID: 33135850. <https://doi.org/10.1111/gcb.15375>
- Betzberger A.M., Gillespie K.M., Mcgrath J.M., Koester R.P., Nelson R.L., Ainsworth E.A., 2010 - *Effects of chronic elevated ozone concentration on antioxidant capacity, photosynthesis and seed yield of 10 soybean cultivars*. Plant, Cell & Environment, 33: 1569-1581. PMID: 20444212. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02165.x>
- Bytnerowicz A., Omasa K., Paoletti E., 2007 - *Integrated effects of air pollution and climate change on forests: a northern hemisphere perspective*. Environmental Pollution, 147 (3): 438-45. PMID: 17034915. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.08.028>
- Bortier K., Dekelver, G., De Temmerman, L., Ceulemans, R., 2000 - *Stem injection of Populus nigra with EDU to study ozone effects under field conditions*. Environmental Pollution, 111: 199-208. PMID: 11202723. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00075-0)
- CLRTAP, 2017 - *Mapping Critical Levels for Vegetation, Chapter III of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends*. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. accessed on 01st July 2022 on Web at www.icpmapping.org
- Chappelka A.H., Samuelson, L.J., 1998 - *Ambient ozone effects on forest trees of the eastern United States: a review*. New Phytologist, 139: 91-108. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1998.00166.x>
- Contran N., Paoletti E., 2007 - *Visible foliar injury and physiological responses to ozone in Italian provenances of Fraxinus excelsior and F. ornus*. The Scientific World Journal, 7 (S1): 90-7. 3. PMID: 17450285. <https://doi.org/10.1100/tsw.2007.10>
- Cotrozzi L., Remorini D., Pellegrini E., Landi M., Massai R., Nali C., Guidi L., Lorenzini G., 2016 - *Variations in physiological and biochemical traits of oak seedlings grown under drought and ozone stress*. Physiologia Plantarum, 157 (1): 69-84. PMID: 26541269. <https://doi.org/10.1111/ppl.12402>
- De Marco A., Sicard P., Feng Z., Agathokleous E., Alonso R., Araminiene V., Augustatis A., Badea O., Beasley J.C., Branquinho C., Bruckman V.J. et al., 2022 - *Strategic roadmap to assess forest vulnerability under air pollution and climate change*. Global Change Biology, 28 (17): 5062-5085. PMID: 35642454. <https://doi.org/10.1111/gcb.16278>
- Feng Z., De Marco A., Anav A., Gualtieri M., Sicard P., Tian H., Paoletti E., 2015 - *Economic losses due to ozone impacts on human health, forest productivity and crop yield across China*. Environmental International, 131: 104966. PMID: 31284106. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104966>
- Feng Z., Tang H., Uddling J., Pleijel H., Kobayashi K., Zhu J., Oue H. Guo W., 2012 - *A stomatal ozone flux-response relationship to assess ozone-induced yield loss of winter wheat in subtropical China*. Environmental pollution, 164: 16-23. PMID: 22310057. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.01.014>
- Fiscus E.L., Booker F.L., Burkey K.O., 2005 - *Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning*. Plant, Cell & Environment, 28 (8): 997-1011.
- Grulke N.E., Heath R.L., 2020 - *Ozone effects on plants in natural ecosystems*. Plant Biology, 22: 12-37. <https://doi.org/10.1111/plb.12971>
- Gupta A., Yadav D.S., Agrawal S.B., Agrawal M., 2022 - *Individual effects of high temperature and tropospheric ozone on tomato: a review*. Journal of Plant Growth Regulation, 42: 1421-1443. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10678-2>
- Hendrey G.R., Lewin K.F., Nagy J., 1993 - *Free air carbon dioxide enrichment: development, progress, results*. Vegetatio, 104/105, 17-31.
- Jamal R., Narayan S., Dubey R., Kannaujia R., Rai R., Behera S.K., Behera S.K., Shirke P.A., Pandey V., Barik S.K., 2023 - *Response of tropical trees to elevated Ozone: a Free Air Ozone Enrichment study*. Environmental Monitoring and Assessment, 195 (1), 238. PMID: 36574061. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10713-5>
- Kasurinen A., Biasi C., Holopainen T., Rousi M., Mäenpää M., Oksanen E., 2012 - *Interactive effects of elevated ozone and temperature on carbon allocation of silver birch (Betula pendula) genotypes*

- in an open-air field exposure*. Tree Physiology, 32: 737-751. PMID:22363070. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps005>
- Karnosky D.F., Werner H., Holopainen T., Percy K., Oksanen T., Oksanen E., Heerdt C., Fabian P., Nagy J., Heilman W., Cox R., Nelson N., Matyssek R., 2007 - *Free-air exposure systems to scale up ozone research to mature trees*. Plant Biology (Stuttg), 9 (2): 181-90. PMID: 17357013. <https://doi.org/10.1055/s-2006-955915>.
- Kitao M., Komatsu M., Yazaki K., Kitaoka S., Tobita H., 2015 - *Growth overcompensation against O₃ exposure in two Japanese oak species, Quercus mongolica var. crispula and Quercus serrata, grown under elevated CO₂*. Environmental Pollution, 206: 133-41. PMID: 26162332. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.06.034>
- Koike T., Watanabe M., Hoshika Y., Kitao M., Matsumura H., Funada R., Izuta T., 2013 - *Effects of ozone on forest ecosystems in East and Southeast Asia*. Developments in Environmental Science, 13: 371-390. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098349-3.00017-7>
- Larsen J.B., Yang W., and Tiedemann A.V., 1990 - *Effects of ozone on gas exchange, frost resistance, flushing and growth of different provenances of European silver fir (Abies alba Mill.)*. European Journal of Forest Pathology, 20: 211-218. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1990.tb01132.x>
- Lee J.K., Woo S.Y., Kwak M.J., Park S.H., Kim H.D., Lim Y.J., Park J.H., Lee K.A., 2020 - *Effects of elevated temperature and ozone in Brassica juncea L.: Growth, physiology, and ROS accumulation*. Forests, 11 (1): 68. <https://doi.org/10.3390/f11010068>
- Lee J.K., Kwak M.J., Jeong S.G., Woo S.Y., 2022 - *Individual and Interactive Effects of Elevated Ozone and Temperature on Plant Responses*. Horticulturae, 8 (3): 211. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030211>
- Matyssek R., Bytnerowicz A., Karlsson P. E., Paoletti E., Sanz M., Schaub M., Wieser G., 2007 - *Promoting the O₃ flux concept for European forest trees*. Environmental pollution, 146 (3): 587-607. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.11.011>
- Matyssek R., Wieser G., Ceulemans R., Rennenberg H., Pretzsch H., Haberer K., Löw M., Nunn A.J., Werner H., Wipfler P., Oßwald W. *et al.*, 2010 - *Enhanced ozone strongly reduces carbon sink strength of adult beech (Fagus sylvatica) - Resume from the free-air fumigation study at Kranzberg Forest*. Environmental Pollution, 158: 2527-2532. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.05.009>.
- Morgan P.B., Mies T.A., Bollero G.A., Nelson R.L., Long, S. P., 2006 - *Season-long elevation of ozone concentration to projected 2050 levels under fully open-air conditions substantially decreases the growth and production of soybean*. New Phytologist, 170: 333-343. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01679.x>
- Moura B.B., Carrari E., Dalstein-Richier L., Sicard P., Leca S., Badea O., Shashikumar A., Ciriani M.L., Paoletti E., Hoshika, Y., 2022 - *Bridging experimental and monitoring research for visible foliar injury as bio-indicator of ozone impacts on forests*. Ecosystem Health and Sustainability, 8 (1): 2144466. <https://doi.org/10.1080/20964129.2022.2144466>
- McLeod A.R., Long S.P., 1999 - *Free air carbon dioxide enrichment (FACE) in global change research: a review*. Advances in Ecological Research, 28: 1-55. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60028-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60028-8)
- Novak K., Cherubini P., Saurer M., Fuhrer J., Skelly J.M., Kräuchi N., Schaub M. - 2007. *Ozone air pollution effects on tree-ring growth, δ¹³C, visible foliar injury and leaf gas exchange in three ozone-sensitive woody plant species*. Tree physiology, 27 (7): 941-949. PMID: 17403646. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.7.941>
- Oksanen E., Kontunen-Soppela S., Riikonen J., Peltonen P., Uddling, J., Vapaavuori E., 2007 - *Northern environment predisposes birches to ozone damage*. Plant Biology, 9: 191-196. <https://doi.org/10.1055/s-2006-924176>
- Paoletti E., 2006 - *Ozone impacts on Mediterranean forests: A review*. Environmental Pollution, 144: 463-474. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.12.051>
- Paoletti E., 2007 - *L'ozono ed i suoi effetti sulle foreste mediterranee*. Forest@, 4 (4): 478-487. [online] URL: <http://www.sisef.it/forest@/>. <https://doi.org/10.3832/efor0490-0040478>
- Paoletti E., Manning W.J., 2007 - *Toward a biologically significant and usable standard for ozone that will also protect plants*. Environmental Pollution, 150: 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.037>
- Paoletti E., Materassi A., Fasano G., Hoshika Y., Carriero G., Silaghi D., Badea O., 2017 - *A new-generation 3D ozone FACE (Free Air Controlled Exposure)*. Science of the Total Environment, 575: 1407-1414. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.217>

- Paoletti E., Sicard P., Hoshika Y., Fares S., Badea O., Pitar D., Popa I., Anav A., Moura B.B., De Marco A., 2022 - *Towards long-term sustainability of stomatal ozone flux monitoring at forest sites*. Sustainable Horizons, 2: <https://doi.org/100018.10.1016/j.horiz.2022.100018>
- Penner J.E., Prather M.J., Isaksen I.S.A., Fuglestvedt J.S., Klimont Z., Stevenson D.S., 2010 - *Short-lived uncertainty?* Nature Geoscience, 3: 587-588. <https://doi.org/10.1038/ngeo932>
- Werner H., Fabian P., 2002 - *Free-air fumigation of mature trees*. Environmental Science & Pollution Research., 9: 117-121. <https://doi.org/10.1007/BF02987458>
- Wittig V.E., Ainsworth E.A., Long S.P., 2007 - *To what extent do current and projected increases in surface ozone affect photosynthesis and stomatal conductance of trees? A meta-analytic review of the last 3 decades of experiments*. Plant, Cell & Environment, 30: 1150-1162. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01717.x>
- Shao Z., Gu J., He L., Xu Y., Shang B., Feng Z., 2024 - *Effects of elevated ozone, warming, and their interactions on the stem lodging resistance of rice under fully open-field conditions*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 376, 109249, ISSN 0167-8809. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109249>
- Stevenson D., Doherty R., Sanderson M., Johnson C., Collins B., Derwent D., 2005 - *Impacts of climate change and variability on tropospheric ozone and its precursors*. Faraday Discussions, 130: 41-57. <https://doi.org/10.1039/B417412G>
- Tang H., Liu, G., Han, Y., Zhu, J., Kobayashi, K., 2011 - *A system for free-air ozone concentration elevation with rice and wheat: control performance and ozone exposure regime*. Atmospheric Environment, 45 (35): 6276-6282. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.059>
- Tobita H., Komatsu M., Harayama H., Yazaki K., Kitaoka S., Kitao M., 2019 - *Effects of combined CO₂ and O₃ exposures on net CO₂ assimilation and biomass allocation in seedlings of the late-successional Fagus crenata*. Climate, 7: 117. <https://doi.org/10.3390/cli7100117>
- Tognetti R., Sebastiani L., Nocci A., 2004 - *Gas exchange and foliage characteristic of two poplar clones grown in soil amended with industrial waste*. Tree Physiology, 24: 75-82. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.1.75>
- Xu Y., Feng Z., Kobayashi K., 2021 - *Performances of a system for free-air ozone concentration elevation with poplar plantation under increased nitrogen deposition*. Environmental Science Pollution Research., 28: 58298-58309
- Vanderplanck M., Lapeyre B., Brondani M., Opsommer M., Dufay M., Hossaert-McKey M., Proffit M., 2021- *Ozone Pollution Alters Olfaction and Behavior of Pollinators*. Antioxidants, 10 (5): 636. <https://doi.org/10.3390/antiox10050636>
- Wang J., Hayes F., Turner R., Chadwick D.R., Mills G., Jones D.L., 2019 - *Effects of four years of elevated ozone on microbial biomass and extracellular enzyme activities in a semi-natural grassland*. Science of The Total Environment, 660: 260-268. PMID: 30640094. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.040>
- Zaisheng S., Jiaming G., Longxin H., Yansen X., Bo S., Zhaozhong F., 2024 - *Effects of elevated ozone, warming, and their interactions on the stem lodging resistance of rice under fully open-field conditions*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 376: 109249. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109249>