

PROGETTO INFOGESO

Influenza dell'ozono sulla gestione sostenibile del sistema agricolo e forestale della Lombardia. *(progetto finanziato dalla Regione Lombardia nell'ambito del Piano per la ricerca e lo sviluppo 2004)*

Il progetto **INFOGESO** si proponeva di ottenere informazioni più complete e scientificamente solide utili a valutare il danno reale e potenziale dell'ozono sulla vegetazione agricola e forestale nel territorio lombardo, individuando al contempo indicazioni per l'introduzione di correttivi, in termini di mitigazione o adattamento, nei sistemi di coltivazione agronomica e di gestione forestale. Il progetto inoltre era finalizzato a mettere a punto sistemi di valutazione della qualità dell'aria in riferimento agli effetti sugli ecosistemi alla luce della normativa e fornire indicazioni utili per la revisione in corso della direttiva comunitaria, in grado di fornire indicatori di esposizione più attendibili di quelli oggi disponibili. Le metodologie messe a punto con il progetto per il campionamento dei sintomi da ozono sulla vegetazione spontanea contribuiscono all'implementazione del programma europeo in ambito ICP-Forests e costituiscono la base per analoghe esperienze da sviluppare su base territoriale più ampia nella regione Lombardia. Le maggiori conoscenze acquisite sulla sensibilità e sulla sintomatologia delle specie vegetali contribuiscono al miglioramento dell'efficacia dei programmi europei di biomonitoraggio passivo. La maggior conoscenza della sensibilità delle specie spontanee rende possibile il loro utilizzo in programmi di biomonitoraggio e di educazione ambientale. Le conoscenze sulle dinamiche dell'ozono a scala locale (nelle aree dove si sono effettuate le indagini estensive) mettono a disposizione degli amministratori locali strumenti più efficienti per la gestione dell'ambiente. L'analisi effettuata implementa le informazioni necessarie per l'ecocertificazione (Gestione Forestale Sostenibile, secondo il processo di Helsinki); più in generale, la conoscenza dei rischi ambientali permette di elaborare piani di gestione ecologicamente sostenibili.

Le policies strategiche alla base dell'ideazione del progetto

Il progetto INFOGESO (INfluenza dell'Ozono sulla GESTione SOstenibile del sistema agricolo e forestale lombardo) era stato concepito nell'ambito di una collaborazione tra DG Agricoltura della Regione Lombardia e ERSAF Lombardia sulla base di queste finalità:

- creare una rete di alta qualità scientifica tra gruppi di ricerca presenti nelle università e negli enti di ricerca della Lombardia dotati di particolari competenze nel settore dell'ecologia agraria e forestale, organizzandone la cooperazione nell'ambito del controllo dell'inquinamento atmosferico sul comparto agro-forestale e in particolare sul problema della valutazione degli impatti dell'ozono sulle colture e le foreste della regione.
- aggiornare le conoscenze dell'impatto dell'ozono troposferico sulle colture agrarie e sulle foreste della Lombardia alla luce dell'evoluzione della ricerca internazionale e di studi specifici svolti nel passato o in corso sul territorio lombardo.
- dotarsi di una adeguata base di dati sperimentali e di campo utili sia per l'implementazione della nuova normativa comunitaria sul controllo dell'inquinamento da ozono in relazione alla vegetazione (direttiva 2002/03), sia a studiarne possibili evoluzioni in termini di indicatori di danno e di esposizione più adeguati all'ecologia e alla climatologia della valle padana.

Il problema da affrontare: l'impatto dell'ozono troposferico sul sistema agro-forestale della Lombardia

Tra i vari inquinanti fitotossici che producono evidenti danni biologici alla vegetazione coltivata e naturale in Europa, quello che desta la maggior preoccupazione è senz'altro rappresentato dall'ozono. A differenza di altri inquinanti associati all'industria pesante, come per esempio il biossido di zolfo (SO₂), le concentrazioni di ozono non sono diminuite negli ultimi anni; anzi, in alcune regioni europee, tra cui la valle padana, sono sensibilmente aumentate rispetto agli anni 60-70. Gli attuali livelli sono sicuramente più elevati di quelli caratteristici dell'epoca preindustriale, ma permane una notevole incertezza sui loro andamenti temporali, soprattutto in zone rurali e nelle aree forestali, essendo iniziato solo negli anni '80 un monitoraggio sistematico e affidabile. Il problema è reso più difficile dal fatto che le reti di monitoraggio della qualità dell'aria sono state per lo più concepite e di conseguenza collocate sul territorio per un monitoraggio rivolto alla protezione della salute umana, con sensori distribuiti quindi

principalmente in zone urbane o semi-urbane e con un numero esiguo di stazioni di misura in zone remote dove la concentrazione di ozono è notoriamente più alta ed inoltre estremamente influenzata dai precursori organici volatili di origine biogenica. Una descrizione dettagliata dei processi di formazione dell'ozono nella bassa atmosfera è riportata in Finlayson-Pitts et al. (1999). L'Italia, come altri paesi dell'Europa meridionale, risulta essere particolarmente soggetta alla formazione di condizioni di elevato inquinamento da ozono al suolo a causa delle caratteristiche climatiche e della densità delle attività antropiche. Anche in Lombardia, come in larga parte dell'Italia, si registra una scarsa disponibilità di informazioni circa i livelli di concentrazione e la distribuzione di questo inquinante. Nonostante l'ampio numero di sensori che rilevano le concentrazioni di ozono, solo pochi di essi sono posti in aree extraurbane e, soprattutto nelle valli alpine e prealpine, le attività di monitoraggio sono limitate e prevalentemente occasionali. La misura di inquinanti atmosferici in aree remote, soprattutto in quelle di carattere montano, si scontra frequentemente con l'impossibilità di accedere alla rete elettrica per il funzionamento degli analizzatori in continuo e con le difficoltà di garantire una costante manutenzione degli stessi (Krupa e Legge, 2002). Negli ultimi anni ha riscontrato un crescente interesse l'impiego di campionatori passivi, strumenti sviluppati per la misura di vari inquinanti gassosi in atmosfera basati sul principio della diffusione passiva. In diversi paesi europei sono attive da anni estese reti di misura basate su questi strumenti per la valutazione della qualità dell'aria in aree urbane ma soprattutto al di fuori dei centri abitati. Reti di dispositivi della stessa natura sono stati utilizzati in numerose esperienze di monitoraggio dell'ozono in ambienti forestali (Grosjean et al., 1995; Manning et al., 1996; Hangartner et al., 1996; Blum et al., 1997; Brace e Peterson, 1998; Bytnerowicz, et al., 2002a; Yuska et al., 2003). Un approccio di questo tipo appare in grado di fornire un quadro dei livelli di concentrazione e degli andamenti di questo inquinante nel tempo in aree di interesse agricolo e naturale. Elaborazioni modellistiche possono essere adottate per una stima dei livelli di esposizione (Krupa et al., 2003; Tuovinen, 2002; Gerosa et al. 2003; Mazzali et al., 2002). I danni prodotti dall'ozono alla vegetazione sono molteplici e complessi. Tra i sistemi fisiologici più colpiti sono quelli dell'assimilazione del carbonio e della riallocazione delle risorse nutritive dentro l'organismo vegetale. Lo stress ossidativo prodotto dall'ozono produce anche un conseguente aumento delle risorse per le difese antiossidative e per la detossificazione e quindi una riduzione delle risorse disponibili per la crescita della pianta (dimensioni dei rami e delle radici, copertura fogliare) con il risultato di una perdita di biomassa e di produttività. Nelle colture agrarie si osservano pertanto cali di rese e nelle foreste una diminuzione degli accrescimenti, fenomeni di defoliazione, aberrazioni morfologiche e cromatiche.

Il contesto scientifico e normativo italiano ed europeo

Le politiche volte a contrastare l'inquinamento atmosferico da ozono troposferico rappresentano uno degli obiettivi della Convenzione internazionale sull'inquinamento transfrontaliero a lunga distanza (CLRTAP – Convention on Long Range Transboundary Air Pollution) sottoscritta a Ginevra nel 1979 da una quarantina di paesi – per lo più europei, tra cui l'Italia – e che impegna i paesi aderenti a cooperare sia per la raccolta di dati ed informazioni scientifiche che per l'attivazione di specifiche politiche di controllo delle emissioni in atmosfera degli inquinanti primari (tra cui ossidi di azoto e composti organici volatili, precursori entrambi dell'ozono troposferico). La Convenzione di Ginevra ha dato vita in questi ultimi anni a diversi protocolli attuativi tra cui quello relativo all'ozono, sottoscritto a Göteborg (Svezia) nel 1999 e ratificato dal nostro paese come da tutti i membri dell'Unione Europea. La commissione economica per l'Europa della Nazioni Unite (UN-ECE - United Nations Economic Commission for Europe), nell'ambito della Convenzione sull'inquinamento transfrontaliero a lunga distanza, aveva avviato da oltre un decennio due programmi di monitoraggio e valutazione degli effetti dell'ozono sulla vegetazione naturale e coltivata (ICP-forests e ICP-crops). Alla luce dei risultati conseguiti, gli organismi scientifici e istituzionali dell'UN-ECE sono giunti alla conclusione che l'ozono è il parametro più importante da prendere in considerazione per prevenire danni di carattere biologico, ecologico ed economico a carico degli ecosistemi agro-forestali. La direttiva (EC 2002/03), recepita nel corso del 2004 dallo stato italiano con il D.lgs 183 del 21/5/04, ha introdotto quale parametro di valutazione dei livelli critici l'indicatore di dose cumulata AOT40, già adottato in sede UN-ECE e CLRTAP nel protocollo di Göteborg, calcolato come la somma delle differenze fra le concentrazioni orarie maggiori di 40 ppb ($\sim 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e la concentrazione di 40 ppb stessa, misurata sul periodo di ciclo vegetativo (maggio-

luglio per le colture), in condizioni di radiazione luminosa maggiore o uguale a 50 W/m² (nel testo della direttiva si considerano i valori orari compresi tra le ore 8:00 e le ore 20:00 di ciascun giorno). Già da qualche anno quindi gli organismi internazionali hanno proposto, sulla scorta di un'ampia e condivisa base scientifica, che i dati relativi alle concentrazioni ambientali di ozono debbano essere corretti sulla base di fattori di stress ambientale locale, in grado di influenzare sia l'assunzione reale di ozono (attraverso la regolazione dell'apertura degli stomi fogliari) che i meccanismi di difesa delle piante. L'impatto dell'ozono sulla vegetazione è infatti più strettamente legato alla dose di ozono assorbita attraverso gli stomi che alla semplice esposizione alla concentrazione atmosferica. Questa dose "biologicamente attiva" è pertanto determinata, oltre che da caratteristiche specie-specifiche, da fattori quali il contenuto di acqua nel suolo, deficit di pressione di vapore in atmosfera, la velocità del vento, l'intensità della radiazione solare e la temperatura. Più recentemente al meeting di Göteborg (SE) in ambito UN-ECE (novembre 2002), si è assistito ad un generale accordo (sia nella comunità scientifica che tra i rappresentanti delle più qualificate istituzioni ambientali) sul fatto che solo l'**analisi dei flussi di ozono** (cioè la velocità istantanea con cui la superficie delle piante assorbe l'ozono) può condurre ad una stima biologicamente significativa del rischio ozono. Questo cosiddetto **approccio di Secondo Livello (Level II)** comporta il coinvolgimento dell'analisi di numerosi parametri ambientali addizionali, in relazione alla loro capacità di influenzare l'apertura stomatica e quindi la risposta finale della vegetazione. Né è derivata l'esigenza a livello lombardo da un lato di irrobustire le **reti di rilevamento** dell'ozono troposferico con particolare attenzione ai siti rurali (posizionati cioè lontano dalle aree urbane o dalle maggiori vie di comunicazione) e dall'altro di calcolare, sull'intero territorio regionale e in particolare nelle zone più sensibili (aree protette, foreste montane e pianiziali, aree agricole con colture più sensibili allo stress ossidativo), le dosi cumulate di ozono per poi pervenire ad opportune mappe di risk assessment utili ad una valutazione almeno potenziale dei danni attesi alla vegetazione e ad impostare di conseguenza misure più mirate di monitoraggio di mitigazione e politiche di abbattimento delle emissioni dei precursori dell'ozono. Un'analisi sperimentale della divergenza tra valutazioni di rischio di I livello (cioè basate sulle sole esposizioni) e di II livello (basate cioè su misure o stime di flussi di ozono) consente alle istituzioni competenti del nostro paese di presentare, proposte di miglioramento delle attuali normative e politiche in funzione delle reali risposte all'inquinamento della vegetazione presente nei vari ambienti climatici del territorio nazionale. Si eviterebbe così, fra l'altro, di introdurre nel nuovo protocollo criteri di valutazione di rischio che, come avviene attualmente con l'indicatore AOT40, sovrastimano anche vistosamente il danno potenziale da ozono per la vegetazione in ambito mediterraneo.

Gli obiettivi del progetto

In questo quadro normativo e di policies europee il progetto INFOGESO si proponeva dunque di:

- ottenere informazioni più complete e scientificamente solide utili a valutare il danno reale e potenziale dell'ozono sulla vegetazione agricola e forestale nel territorio regionale, individuando al contempo indicazioni per l'introduzione di correttivi, in termini di mitigazione o adattamento, nei sistemi di coltivazione agronomica e di gestione forestale;
- mettere a punto sistemi di valutazione della qualità dell'aria in riferimento agli effetti sugli ecosistemi alla luce dell'attuale normativa e fornire indicazioni utili per la revisione in corso delle normative comunitarie, in grado di fornire indicatori di esposizione più attendibili di quelli oggi disponibili.

In particolare il progetto si era dato due gruppi di obiettivi specifici articolati su due linee di ricerca autonome e parallele che prendevano in considerazione sia il comparto agricolo che quello forestale

Comparto agricolo

1. Quantificare la dose di ozono assorbita a livello di agroecosistema da parte di una coltura agraria e valutare l'entità della divergenza tra l'esposizione calcolata come AOT40 e i flussi di ozono misurati al fine di correggere le stime di rischio di primo livello già effettuate in Lombardia. Tali misure sono particolarmente importanti perché ancora non si dispone di dati sperimentali di questo tipo, per le colture agrarie, in ambiente mediterraneo ed in particolare in Italia.

2. Stima dei parametri biofisici che caratterizzano la vegetazione e quindi le deposizioni di ozono. Questi parametri sono ricavabili a partire da immagini multispettrali (acquisibili da satellite e corrette sulle base delle proprietà dell'atmosfera) mediante l'impiego di modelli semiempirici e tramite inversione di modelli fisici, che simulano il trasferimento radiativo all'interno della canopy.
3. Stima in laboratorio delle proprietà ottiche della vegetazione a diversi livelli di dose di ozono (attraverso camere di fumigazione) tramite misure spettroradiometriche al fine di individuare indicatori precoci di danno di tipo spettrale.
4. Indagini istologiche ed istochimiche impiegando tecniche di microscopia ottica ed elettronica per il riconoscimento e la caratterizzazione dei danni a livello ultrastrutturale.

Comparto forestale

1. Valutazione dell'estensione dell'impatto dell'ozono sulle foreste e sulla vegetazione spontanea della Lombardia per mezzo di indagini estensive sui sintomi da ozono, secondo una metodologia compatibile con quella ICP-Forests.
2. Determinazione dello sviluppo dei sintomi nella vegetazione spontanea in relazione ai livelli di esposizione e alla fenologia delle singole specie.
3. Validazione dei sintomi visibili sulle specie forestali e sulla vegetazione spontanea per mezzo di trattamento in ambiente semicontrollato (impianto di Open Top Chambers a Curno).
4. Verifica della risposta all'ozono a livello ultrastrutturale (microscopio ottico ed elettronico) e fisiologico di piante sensibili, sia in Open Top Chamber che in pieno campo.
5. Realizzazione di una rete estensiva – territoriale di campionatori diffusivi per l'ozono.
6. Individuazione di specie o cloni sensibili da poter essere usati come bioindicatori.

Sinopsi dei principali risultati

Risk assessment : la classificazione e valutazione del danno

1. Monitoraggi intensivi del sistema forestale lombardo, studio estensivo floristico e classificazione dei danni visibili sulla vegetazione forestale anche in relazione alla dinamica dei sintomi e alla loro relazione con i livelli di esposizione.
2. Individuazione di indicatori del danno da ozono tramite analisi di laboratorio, misure ecofisiologiche e la valutazione dei sintomi sulla vegetazione forestale. Analisi dei sintomi visibili per l'individuazione di specie sensibili da impiegarsi come bioindicatori.
3. Test biochimici e osservazioni ultrastrutturali per l'individuazione e caratterizzazione dei danni biologici precoci microscopici da ozono in sistemi di pieno campo o in OTC.

Risk assessment – calcolo dell'esposizione e della dose attiva

4. Il problema delle relazioni esposizione/dose – danno in colture agrarie: calcolo delle dosi biologicamente attive mediante misura dei flussi di ozono in sistemi agricoli.

Nuovi sistemi fisici e biologici di monitoraggio in aree rurali e remote.

5. Telemisure spettrali non invasive per l'individuazione di early warnings del danno da ozono.
6. Sperimentazione e validazione di sistemi di monitoraggio in aree remote e rurali mediante campionatori passivi ed analizzatori automatici.
7. Analisi statistiche e modellistiche per l'analisi della distribuzione temporale e spaziale dell'ozono e le sue correlazioni con le variabili ambientali.

Considerazioni conclusive

Le metodologie messe a punto con il progetto per il campionamento dei sintomi da ozono sulla vegetazione spontanea contribuiscono all'implementazione del programma europeo in ambito ICP-Forests e costituiscono la base per analoghe esperienze da sviluppare su base territoriale più ampia nella regione Lombardia. Le maggiori conoscenze acquisite sulla sensibilità e sulla sintomatologia delle specie vegetali contribuiscono al miglioramento dell'efficacia dei programmi europei di biomonitoraggio passivo. Le nuove specie sensibili individuate hanno contribuito all'arricchimento delle attività di validazione in corso nelle Open Top Chambers a Lattecaldo (CH) e Curno (BG). La maggior conoscenza della sensibilità delle specie spontanee rende possibile il loro utilizzo in programmi di biomonitoraggio e di educazione ambientale. Le conoscenze sulle dinamiche dell'ozono a scala locale (nelle aree dove si sono effettuate le indagini estensive) mettono a disposizione degli amministratori locali strumenti più efficienti per la gestione dell'ambiente. L'analisi effettuata implementa le informazioni necessarie per l'ecocertificazione (Gestione Forestale Sostenibile, secondo il processo di Helsinki); più in generale, la conoscenza dei rischi ambientali permette di elaborare piani di gestione ecologicamente sostenibili.

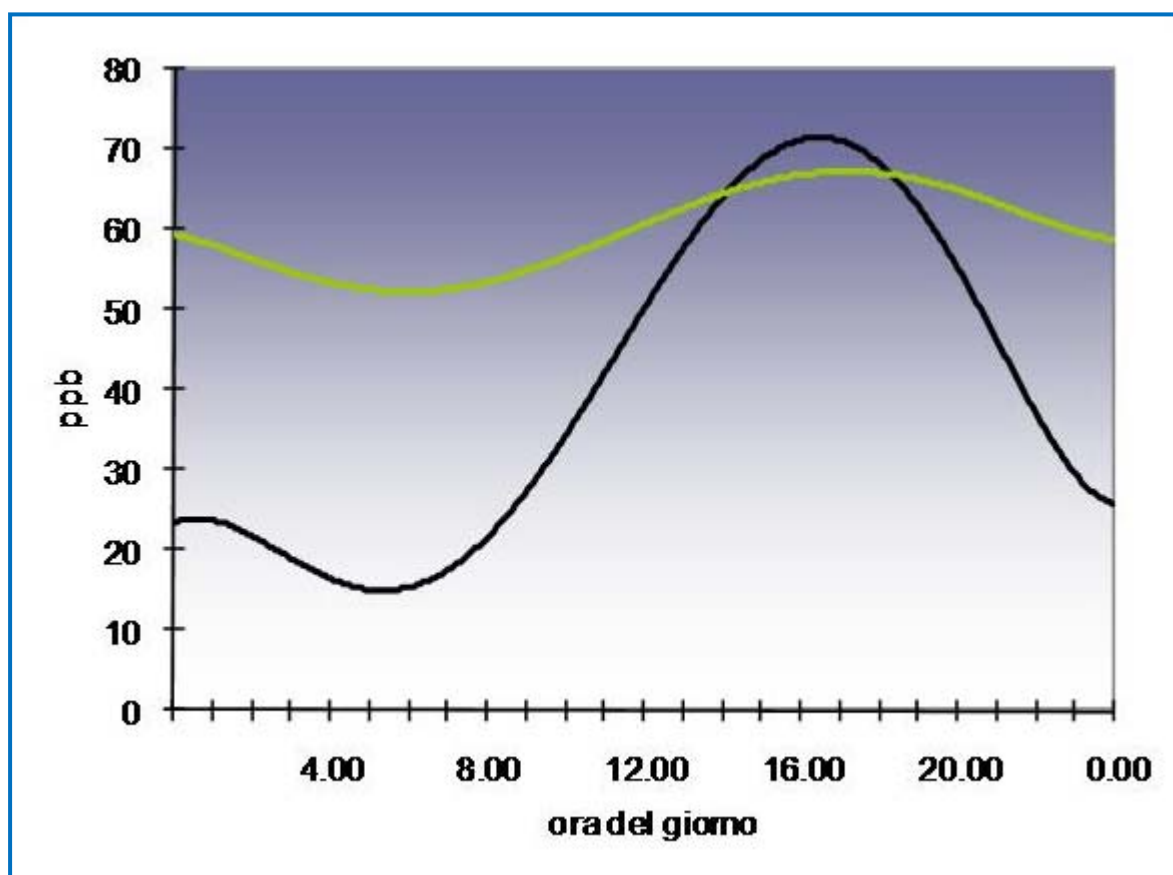


Figura 1 . Andamento delle concentrazioni orarie nel corso di un giorno estivo in un'area urbana e remota

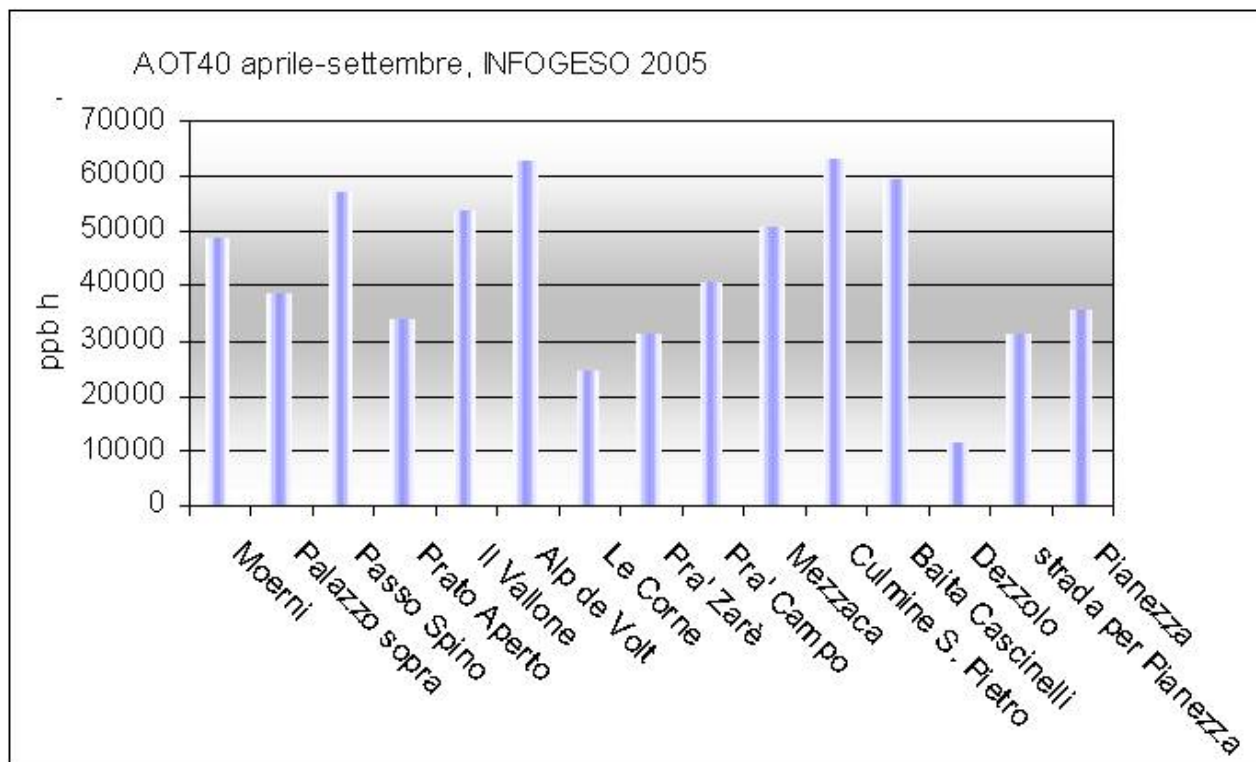


Figura 2. Valori di AOT40 stimati presso i punti di misura individuati per la campagna di misura 2005. In alto AOT40 per il periodo aprile – settembre, in basso per il periodo maggio-luglio.

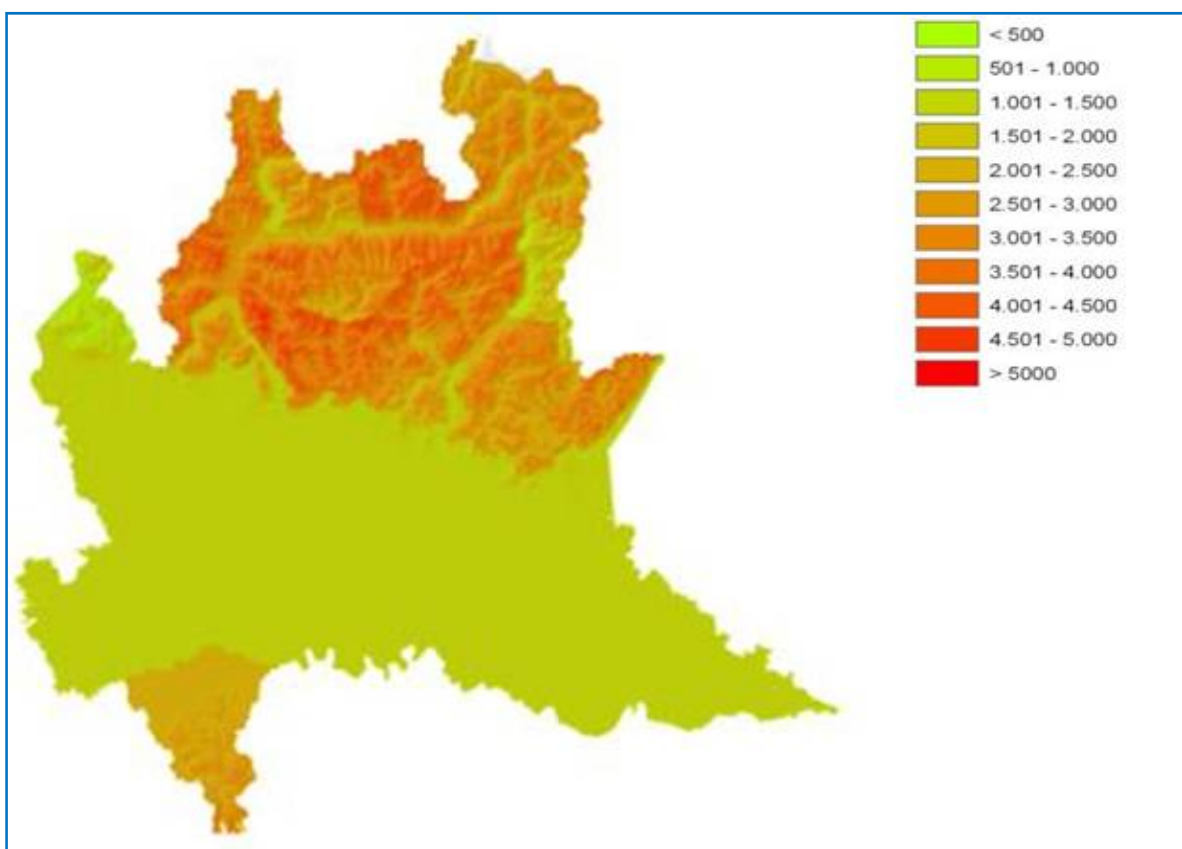


Figura 3. Mappatura dei valori di AOT40 nel corso di uno dei periodi di misura 2006.

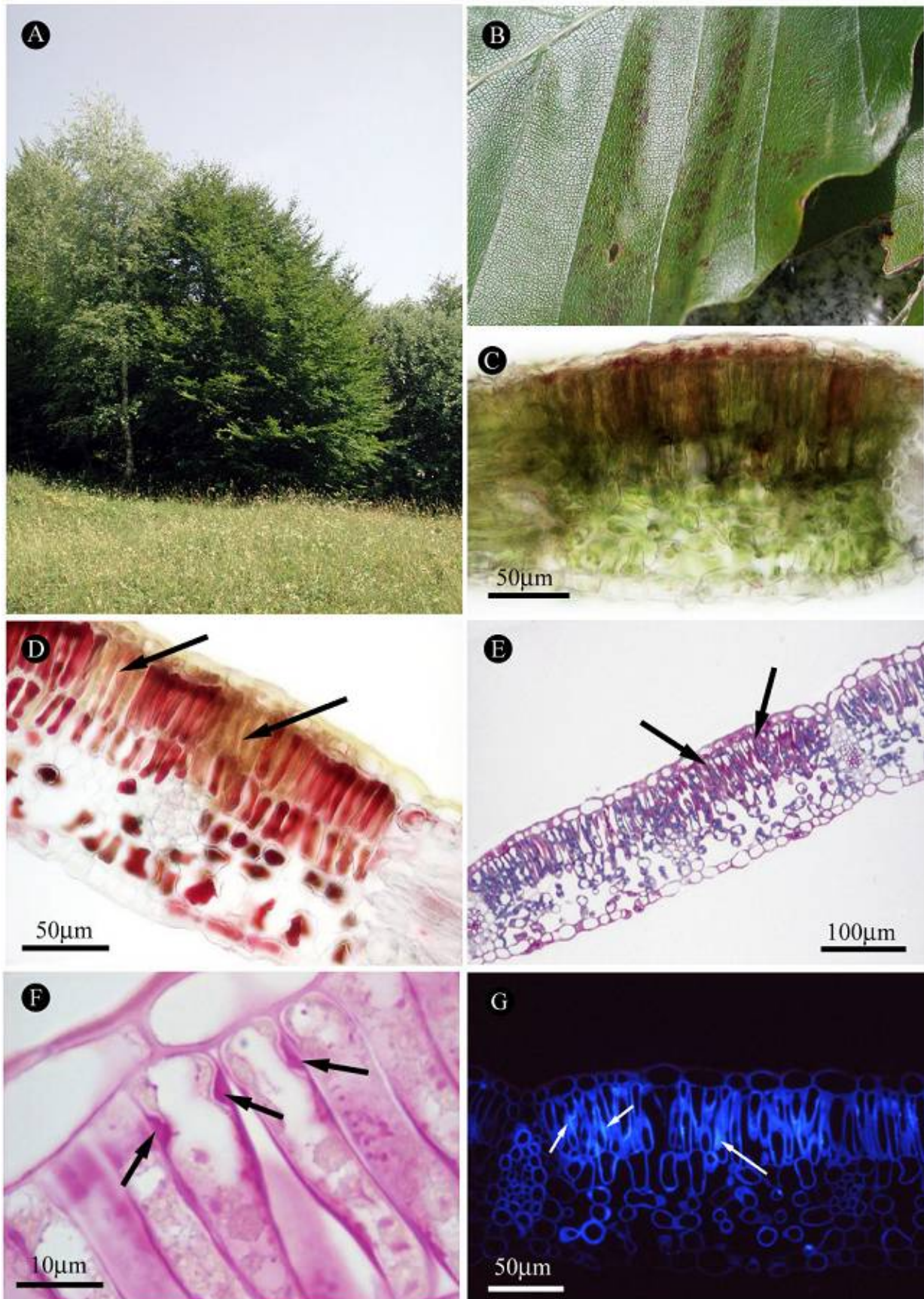


Fig 4 - **A** – Esempio di *Fagus sylvatica* in località Moggio; **B** – Stipples in posizione internervale. Palizzata fortemente danneggiato (come mostrano le frecce). Nelle suddette aree permane il pigmento bronzeo; **C** – Sezione a fresco. La zona danneggiata che appare imbrunita si estende sia nelle cellule dell'epidermide superiore sia nel tessuto a palizzata; **D** – (Vanillina) Tannini (in rosso) diffusi in tutto il mesofillo tranne nelle aree del tessuto a; **E** – (PASS+Anilina b.b.) Maggior intensità di colorazione rosa (sostanze polisaccaridiche) nella zona interessata dal danno; **F** – (PASS) Ispessimento delle pareti nelle cellule del palizzata che appaiono colorate in rosa. Le frecce evidenziano le protuberanze di natura polisaccaridica; **G** – (Calcofluor) Polisaccaridi di natura cellulosica che si mostrano con intensità di fluorescenza maggiore nelle aree danneggiate indicando l'ispessimento delle pareti nelle cellule del palizzata.