



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e  
Ambiente

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLE PRODUZIONI VEGETALI

CICLO:XXVI

La sostenibilità degli interventi su alberi veterani:  
un protocollo per la valutazione integrata e la  
cura

**Direttore della Scuola** : Ch.mo Prof. Antonio Berti

**Supervisore** :Ch.mo Prof. Sergio Mutto Accordi

**Dottorando** : Luigi stazzabosco



## **Declaration**

I hereby declare that this submission is my own work and that, to the best of my knowledge and belief, it contains no material previously published or written by another person nor material which to a substantial extent has been accepted for the award of any other degree or diploma of the university or other institute of higher learning, except where due acknowledgment has been made in the text.

Luigi Strazzabosco 31/01/2014

A copy of the thesis will be available at <http://paduaresearch.cab.unipd.it/>

## **Dichiarazione**

Con la presente affermo che questa tesi è frutto del mio lavoro e che, per quanto io ne sia a conoscenza, non contiene materiale precedentemente pubblicato o scritto da un'altra persona né materiale che è stato utilizzato per l'ottenimento di qualunque altro titolo o diploma dell'università o altro istituto di apprendimento, a eccezione del caso in cui ciò venga riconosciuto nel testo.

Luigi Strazzabosco 31/01/2014

Una copia della tesi sarà disponibile presso <http://paduaresearch.cab.unipd.it/>



# Indice

<b>Riassunto .....</b>	<b>1</b>
<b>Summary .....</b>	<b>1</b>
<b>Introduzione.....</b>	<b>3</b>
<b>Capitolo I.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Inquadramento legislativo dell'albero monumentale .....</b>	<b>5</b>
<i>1.2 Scopo della Tesi.....</i>	<i>6</i>
<b>Capitolo II .....</b>	<b>9</b>
<b>2 La fisiologia dell'albero .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 IL CONCETTO DI SENESCENZA NEGLI ALBERI.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Optimal adjustment .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 La rigenerazione degli apparati radicali .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4 STADI DI SVILUPPO DI UN APPARATO RADICALE .....</b>	<b>22</b>
<b>Capitolo III.....</b>	<b>25</b>
<b>3. Valutazione e anamnesi dei parametri vitali .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Indagini morfologiche.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Apparato epigeo.....</b>	<b>27</b>
3.2.1 Trasparenza della chioma.....	27
<b>3.3 Presenza e stato dei rami epicormici .....</b>	<b>28</b>
3.4.1 Analisi della lunghezza radicale.....	31
<b>3.5 Micorizzazione.....</b>	<b>31</b>
3.5.1 Presenza di micorrize in funzione della copertura vegetale .....	33
<b>3.6 Indagini fisiologiche .....</b>	<b>35</b>
<b>3.6.1 Apparato epigeo.....</b>	<b>36</b>
3.6.2 Potenziale idrico degli aghi o dei germogli.....	36
<b>3.7 Apparato ipogeo .....</b>	<b>37</b>
<b>3.8 Cambiamenti di colore della chioma .....</b>	<b>38</b>
3.8.3 Deviazione dallo sviluppo normale .....	39
3.8.3 Presenza di essudati e incrostazioni .....	40

3.8.4 Variazioni della consistenza e della struttura di foglie, germogli, rami, branche, tronco, radici.....	41
<b>3.9 Stato fitosanitario dell'apparato ipogeo.....</b>	<b>41</b>
<b>Capitolo IV .....</b>	<b>43</b>
<b>4 La formazione di radici .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Verifiche sperimentali .....</b>	<b>51</b>
4.1.1 Formazione di una radice in struttura primaria.....	51
4.1.2 Materiale e Metodi.....	51
4.1.3 risultati .....	52
<b>4.2 Traccia di radice dopo la perdita del'asse laterale .....</b>	<b>52</b>
4.2.1Materiale e Metodi.....	52
4.2.2 Risultati.....	53
<b>4.3 Tracce in tessuto vascolare parentale con aggiunta di tessuti xilematici.....</b>	<b>54</b>
4.3.1 Materiali e metodi .....	54
4.3.2 Risultati .....	55
<b>Capitolo V .....</b>	<b>57</b>
<b>5 La Rizosfera del piatto radicale.....</b>	<b>57</b>
<b>Capitolo VI .....</b>	<b>67</b>
<b>6. Indice di reattività all'ossigenazione .....</b>	<b>67</b>
<b>Capitolo VII.....</b>	<b>69</b>
<b>7 .Relazione tra diametro delle radici e periodo della prova di ossigenazione.....</b>	<b>69</b>
<b>7.1 Materiali e metodi.....</b>	<b>69</b>
<i>ESITI DEI RILIEVI E DELLA PROVA.....</i>	<i>72</i>
Grafici ed elaborazione statistica dei dati raccolti .....	75
<b><i>RAPPORTO SUI PRELIEVI del 16/12/11 E LE OPERAZIONI SUCCESSIVE .....</i></b>	<b><i>80</i></b>
<b><i>ESITI DEI RILIEVI E DELLA PROVA.....</i></b>	<b><i>80</i></b>
Grafici ed elaborazione statistica dei dati raccolti .....	83
<b>7.3 Risultati.....</b>	<b>84</b>
Analisi dell'Indice di Correlazione di Pearson e Welch Two Sample t-test.....	84
<b>Capitolo VIII .....</b>	<b>85</b>
<b>8 LA PROVA IN ASSENZA DI OSSIGENO.....</b>	<b>85</b>

8.1	Introduzione.....	85
8.2	Risultati .....	90
<b>Capitolo IX.....</b>		<b>93</b>
9	Analisi dell'amido su tessuti legnosi .....	93
9.1	Materiali e metodi .....	96
9.2	Conclusioni.....	109
<b>Capitolo X .....</b>		<b>111</b>
10	La Valutazione Biomeccanica "Orebla un metodo .....	111
10.1	Introduzione.....	111
10.2	Orebla.....	112
10.3	La modellazione dell'albero .....	113
10.3.1	Il tronco dell'albero .....	114
10.3.2	La chioma .....	116
10.3.3	Eccentricità.....	120
10.3.4	Il contributo della forma del colletto alla sezione resistente .....	121
10.3.5	Il modellazione del carico da neve.....	125
10.5	modellazione del vento.....	131
10.5	verifica al ribaltamento.....	145
10.6	Verifica allo schiacciamento.....	147
10.7	Verifica allo slittamento.....	148
<b>Capitolo IX.....</b>		<b>149</b>
11	Applicazione.....	149
11.1	OREBLA E PULLING TEST.....	155
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>173</b>



## **Riassunto**

Lo scopo dello studio è stato quello di sviluppare e implementare un protocollo per l'analisi del rischio e la valutazione di alberi veterani in luoghi aperti al pubblico . Uno dei principali obiettivi dei piani di gestione dei siti storici è la conservazione degli alberi "fondatori" . Molti degli alberi "fondatore" superstiti sono sottoposti a pratiche gestionali inadeguate , che ha abbassato la loro speranza di vita e notevolmente ridotto il loro fattore di sicurezza biomeccanico . Il protocollo messo a punto per la valutazione di questi alberi si basa su due tipi di analisi : una valutazione biologica di salute degli alberi e il benessere e un nuovo metodo per la valutazione biomeccanica della stabilità dell'albero ( OREBLA - un foglio di lavoro digitale basato modellazione albero e sistema di valutazione ) .

La valutazione biologica di salute degli alberi è un passo fondamentale per valutare la capacità di un albero veterano di reagire alle pratiche di gestione che comportano la riduzione della biomassa . In particolare l'attività metabolica del sistema radicale viene valutata mediante la misurazione del contenuto di amido radice che è stato dimostrato essere correlata alla risposta albero alle pratiche di gestione . OREBLA è uno strumento integrato analisi biomeccanica , che comprende una modellazione della struttura ad albero basato sul protocollo EUROCODE per la valutazione del fattore di sicurezza di strutture esposta al vento . La valutazione si basa su dati dendrometriche e diagnostici, strumenti non invasivi , per il tronco e gli arti di analisi ( Sonic e tomografia elettrica), e anche su una valutazione del rischio di fallimento albero a causa della zolla fratturazione (Pulling Test) . Il protocollo è stato testato nella valutazione degli alberi veterani " fondatori " del Parco Revedin Bolasco a Castelfranco Veneto ( Italia) .

## **Summary**

The purpose of this study was to develop and implement a protocol for risk analysis and assessment of veteran trees in public places . One of the main objectives of the management plans of the historical sites is the preservation of the trees "founders" . Many of the trees "founder" survivors are subjected to inappropriate management practices , which lowered their life expectancy and greatly reduced their biomechanical safety factor . The protocol developed for the assessment of these trees is based on two types of analysis: a biological

assessment of tree health and well-being , and a new method for assessing the biomechanical stability of the tree

( OREBLA - a worksheet digital based tree modeling and evaluation system ) . The biological evaluation of tree health is a critical step to evaluate the ability of a veteran tree to react to management practices that lead to the reduction of the biomass. In particular, the metabolic activity of the root system is evaluated by measuring the starch content of the root that has been shown to be related to the response to tree management practices. OREBLA is an integrated tool biomechanical analysis , which includes a modeling of the tree structure based on the protocol EUROCODE for the evaluation of the safety factor of structures exposed to the wind . The evaluation is based on data dendrometric and diagnostic , non-invasive tools for the analysis of the trunk and limbs ( Sonic tomography and electrical ) , and also on an assessment of the risk of tree failure due to fracturing of the plate ( Pulling Test) .The protocol was tested in the assessment of veterans 'founders' of the Park trees Revedin Bolasco in Castelfranco Veneto (Italy).

## Introduzione

“Gli alberi sono esseri viventi; sono meravigliosi sistemi viventi! sono gli esseri viventi più alti e longevi al mondo, ma non possono fare quello che noi facciamo: non possono correre, e per questo rimangono sul luogo in cui sono nati. Non hanno intelligenza; per questo possiedono capacità di difesa straordinarie ed efficaci”(Alex Shigo 1986)). Possiamo affermare che gli alberi tra gli esseri viventi sono quelli che maggiormente si avvicinano al concetto di immortalità essi infatti crescono per tutta la loro vita, difficilmente muoiono più facilmente cadono (in verbis Sergio Mutto Accordi, Mencuccini et al. 2005, Anfodillo et al. 2006)

Il presente lavoro fa il punto della situazione, un aggiornamento, su aspetti riguardanti in particolare la vita degli alberi e gli aspetti biomeccanici, alla luce di recenti e meno recenti (ma non sempre conosciute) acquisizioni. L’obiettivo è di fornire riferimenti, formulare un protocollo che consenta di intervenire con maggiore cognizione a salvaguardia del nostro patrimonio arboreo, in particolare di quello di maggior pregio, attualmente tutelato dalla legislazione alla stregua dei monumenti cioè l’albero monumentale.



# Capitolo I

## 1.1 Inquadramento legislativo dell'albero monumentale

Si può per questo condividere l'affermazione secondo la quale un albero monumentale è: "un essere vivente che cessa di essere tale per divenire testimone del passato e della sua vita in relazione con gli uomini ed il paesaggio". (Il termine monumento deriva dal latino "monere", ossia ricordare). Il Decreto Legislativo 26 marzo 2008 n. 62, relativo ai beni culturali, e il Decreto Legislativo 26 marzo 2008 n. 63, relativo al paesaggio, pubblicati sulla Gazzetta Ufficiale n. 84 del 9 aprile 2008, sono entrati in vigore il 24 aprile 2008. Sulla scorta dei principi espressi dalla Corte Costituzionale, i due Decreti Legislativi apportano ulteriori modifiche al D. Lgs. n. 42 del 2004 «Codice dei beni culturali e del paesaggio», meglio noto come Codice Urbani (già emendato in passato con il DPCM 12/12/2005, col D. Lgs. 156/2006 e col D. Lgs. 157/2006) adeguandone, tra l'altro, la definizione di «Paesaggio» a quella adottata nel 2000 proprio dalla Convenzione Europea sul Paesaggio sottoscritta nel 2000 a Firenze e ratificata dalla Repubblica Italiana con Legge del 9 gennaio 2006, n. 14. Le modifiche introdotte all'art. 136 del Codice Urbani inseriscono esplicitamente a pieno titolo gli alberi monumentali tra quei beni immobili che possono essere dichiarati di notevole interesse pubblico e quindi annoverati nell'elenco dei beni paesaggistici, al pari dei complessi archeologici, delle ville, dei castelli e dei centri storici di maggior pregio.

Ma è senza dubbio la legge n°10 del 14 gennaio 2013 "Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani" pubblicata sulla G.U. n°27 del 1 febbraio 2013 che regola in maniera più articolata gli alberi monumentali.

L'articolo 7 della legge "Disposizioni per la tutela e la salvaguardia degli alberi monumentali, dei filari e delle alberate di particolare pregio paesaggistico, naturalistico, monumentale, storico e culturale" oltre a regolamentare la materia recependo le modifiche all'articolo 156 del codice dei beni ambientali decretando l'organizzazione degli elenchi degli alberi monumentali non più su base regionale ma nazionale che presenta gli aspetti di maggior interesse.

In particolare il comma 4 del su citato articolo prevede sanzioni amministrative fino a €100.000 per l'abbattimento e il danneggiamento di alberi monumentali ma soprattutto impone che modifiche della chiome e dell'apparato radicale effettuate per casi motivati e improcrastinabili, dietro specifica autorizzazione comunale, debbono avere un parere vincolante del Corpo Forestale dello Stato. Appare per cui evidente che Gli interventi di salvaguardia e recupero devono essere preceduti da attente valutazioni delle condizioni degli esemplari arborei valutando attentamente i parametri vitali e biomeccanici. Dopodiché, si potranno stabilire i tempi, i modi e le tecniche più idonei al caso specifico. Diviene indispensabile, predisporre un "protocollo" per la valutazione e la sostenibilità dei possibili interventi, che è l'obiettivo che questo lavoro si propone. Ma (al di là delle descrizioni che ne fa la legislazione) che cos'è esattamente un albero monumentale? In realtà già la stessa definizione di albero monumentale sfugge ad ogni criterio di rigosità scientifica; e non ci è d'aiuto associare al generico concetto di albero l'aggettivo "monumentale" che, pur se ricco di suggestione

evocativa, non ha alcuna rilevanza di tipo biologico. Seguendo questo ragionamento dovremmo perciò concludere che un albero monumentale è tale soprattutto in ragione delle sue peculiarità esteriori ed immediatamente riconoscibili, ovvero essenzialmente le dimensioni e l'aspetto, cui siamo soliti attribuire una valenza estetica. Tuttavia, un albero è innanzi tutto un essere vivente; in questo senso il suo aspetto è il risultato di un processo biologico del quale, in estrema sintesi, le dimensioni, o meglio alcuni dei parametri biometrici, auxologici, dendrometrici corrispondono ad un'età avanzata. Eppure un albero monumentale non è solo *“un grande albero di bell'aspetto”*; esso è soprattutto *“un sopravvissuto”, il relitto o la testimonianza di un paesaggio, di un ecosistema, di un uso del suolo e di una precisa fase della vita degli uomini che, attraverso le generazioni, l'hanno piantato, governato, accudito e ne hanno a vario titolo goduto i benefici. In altre parole cessa di essere “un albero” per divenire “l'albero” ovvero si carica di funzioni documentarie e culturali in senso lato, acquisendo una sua specifica individualità che spesso è testimonianza del nome o dell'appellativo che gli vengono attribuiti.* Per questo la più compiuta definizione per un albero monumentale è quella di un esclusivo ed individuale interesse biologico, culturale, storico ed estetico; un ponte tra passato e presente.

## **1.2 Scopo della Tesi**

L'attribuzione di un particolare e preminente valore agli alberi veterani significa implicitamente che l'importanza di ogni singolo individuo dipende anche dal “contesto”. Non necessariamente questo contesto è naturale; anzi, essendo l'albero monumentale legato almeno percettivamente all'attività dell'uomo, si tratta di un contesto antropizzato. Vista la sua importanza appare quindi necessario fornire una definizione di “contesto” applicabile agli alberi monumentali.

In questo senso potremo definire contesto di un albero monumentale l'insieme delle caratterizzazioni paesaggistiche, ecologiche, ambientali ed antropiche del sito di radicazione che permettono di comprendere la presenza di uno o più alberi in un dato luogo e le modalità con le quali sono stati gestiti negli anni. Si può dire pertanto che contribuisce alla compiutezza di fruibilità sia percettiva sia fisica dell'albero monumentale, incrementandone anche le potenzialità estetiche.

Per quanto detto la separazione di un albero monumentale dal suo contesto comporta un'irreparabile mutilazione e l'inevitabile impoverimento. Da ciò consegue necessariamente che la salvaguardia di un albero monumentale non può prescindere dalla tutela e della conservazione del contesto nel quale è inserito.

Per dare concretezza a tutto ciò sarebbe ovviamente necessario quantificare dimensionalmente il concetto di contesto, che tuttavia risulta evidentemente soggettivo dal punto di vista percettivo e non facile da identificare fisicamente. Molto più facile è il caso in cui il contesto corrisponda ad un parco o ad un giardino di cui la pianta monumentale è parte integrante, e quindi godano assieme dei medesimi vincoli legati ad obiettivi di salvaguardia e tutela.

Pertanto più praticamente può essere utile riferirsi ad un'accezione ristretta di *“contesto”*, ovvero il contesto *“vitale”*

Con la definizione di “*contesto vitale*” si intende lo spazio minimo da sottoporre a controllo e tutela, necessario affinché possano rimanere invariate le condizioni generali della stazione di radicazione (condizioni chimico fisiche e microbiologiche del suolo, idrologiche e orografiche) che hanno permesso l’insediamento e lo sviluppo nel tempo e nello spazio di uno o più alberi monumentali. Per comprendere l’importanza del concetto del “contesto vitale” può essere utile ricordare che gli alberi sono esseri viventi “opportunisti” il cui declino in un ambiente antropizzato, è perlopiù riconducibile a modifiche indotte al sito di radicazione e non, come si potrebbe pensare, ad un danno diretto arrecato all’integrità fisica dell’esemplare arboreo in senso stretto. Chiaramente del contesto vitale è fuorviante stabilire parametri dimensionali di carattere universale ma devono essere dedotti da rilievi, indagini e approfondimenti necessari per la sua quantificazione. Stabilito il contesto vitale ogni intervento esterno dovrebbe essere accompagnato da una precisa valutazione delle conseguenze, a medio e lungo termine, che l’intervento stesso potrebbe avere sugli esemplari monumentali.

Un’ulteriore contrazione del concetto di “contesto” ci permette di definire lo “spazio minimo vitale” facendolo coincidere con il concetto di G.P.A. (zona di protezione dell’albero, o TPZ, Tree Protection Zone) ovvero di un’area fisica ben delineata. A questo proposito esistono molte interpretazioni, come ad esempio: "la distanza minima di sicurezza dalla base degli alberi, per gli scavi (per garantire la sopravvivenza della pianta) non può essere inferiore a una distanza pari a due volte la circonferenza della chioma". Il Professor Ian Richardson, esperto dei Kew Gardens inglesi, prevede addirittura distanze maggiori, corrispondenti ad una volta e mezzo l'altezza degli alberi; si arriva perciò ad una distanza di sicurezza di circa 35-37 metri di raggio, nel caso di alberi alti fra i 20 e i 25 metri. La distanza minima di rispetto nei confronti degli alberi rappresenta una zona di rispetto “sacra” atta a tutelare l’apparato radicale che conferisce stabilità strutturale all’albero. Le dimensioni della TPZ dovrebbero dipendere soprattutto dall’età dell’albero, dall’ampiezza della chioma e dalla sua altezza.

Alla luce di quanto invece spesso accade o delle reali possibilità, potrebbe essere accettabile (e stabilito per convenzione) che quest’area coincida con 1,5 volte la proiezione della chioma sul terreno e comunque non inferiore ad 8 metri dal colletto.

Non necessariamente questo spazio “minimo vitale” è costituito da terreno libero ed indisturbato; potrebbe essere una superficie sulla quale sono ospitati manufatti di varia natura. Se queste ingerenze sono storicizzate e caratterizzate da una lunga convivenza con l’individuo arboreo sono addirittura funzionalmente legati a questo, e la rimozione potrebbe determinare gravi alterazioni al pedoclima e danni all’albero stesso. Possiamo affermare che l’albero è condizionato dalla coevoluzione con il sistema di stazione e pertanto la valutazione dell’albero deve tenere conto delle relazioni ecologiche del sito di radicazione, per cui l’approccio deve essere olistico e non specialistico deve valutare tutte le relazioni e i suoi parametri vitali .

Tenuto conto di quanto detto bisogna considerare anche il particolare stato fisiologico dell’albero veterano, il precario equilibrio metabolico, la difficoltà di intervenire nelle cure all’albero senza aver prima valutato la capacità di sopportarle, spesso infatti l’albero veterano ha seguito delle cure che incidono pesantemente sulla sua fitness collassano, come dire usando un aforisma “l’intervento è riuscito ma il paziente è morto”.

Spesso interventi di cura, che non tengono conto di questo producono risultati disastrosi per lo stato di salute dell’albero veterano.

Gran parte di questo lavoro è concentrato sugli apparati radicali, questo perché molto spesso il deperimento dell'albero inizia dal deperimento delle radici, pertanto lo stato metabolico delle radici è fondamentale per comprendere le condizioni di salute di un albero veterano e poter valutare la capacità dell'albero di sostenere la cura.

La seconda parte di questo lavoro è improntata sulla valutazione biomeccanica, perché nell'albero veterano, dove i danni delle carie, la riduzione degli apparati radicali, e lo sbilanciamento delle forze destabilizzanti che agiscono all'esterno della zolla utile determinano un elevato rischio di cedimento.

Dopo un attenta analisi della letteratura di riferimento il dato che emerge è che le valutazioni di biomeccaniche, sono per lo più frutto di analisi euristiche e di preveggenza, che certo non appartengono a valutazioni di tipo scientifico.

Il metodo che abbiamo impiegato migliorandolo su alcuni aspetti è "Orebla" proposto da Sani L. noto cultore della materia autore di numerosi articoli. Il metodo proposto supera la recente impostazione della propensione al cedimento e valuta il fattore di sicurezza residuo restituendo un valore e non una previsione nella valutazione.

# Capitolo II

## 2 La fisiologia dell'albero

Durante i primi anni della sua vita la scelta strategica per la sopravvivenza degli alberi, porta alla colonizzazione dello spazio disponibile sia nell'accrescimento primario della parte epigea che nella colonizzazione del terreno nella parte ipogea (Raimbault, 1995) in funzione soprattutto della pressione ambientale e dalle caratteristiche genetiche.

Durante questa fase che potremmo indicare sinteticamente formativa e di esplorazione, il volume dei successivi incrementi radiali tende ad aumentare perché il volume della corona e quindi della capacità fotosintetica della pianta è in aumento (White, 1998).

La capacità fotosintetica cessa di aumentare quando l'albero raggiunge la maturità, su questa base si possono distinguere tre fasi della vita di un albero: la formazione, la maturità e senescenza o deperimento.

Anche se la senescenza non è il termine adeguato a descrivere gli organismi a crescita indefinita visto, che ancora in questa fase si alternano momenti di iperattività nella crescita con momenti di degrado e regressione.

Inoltre va' osservato che Raimbault ha descritto un numero di tappe intermedie secondo le modificazioni della corona della chioma. L'aumento del diametro del cilindro legnoso durante la fase matura fa sì che gli incrementi della crescita secondaria siano sempre progressivamente più stretti (come ben sanno i forestali che su l'analisi delle crescite incrementali basano il periodo di curazione del bosco).

Questo perché quando la chioma ha raggiunto la maturità tende a produrre sempre la stessa quantità di fotosintetati ogni anno, pur con fluttuazioni legate alla pressione degli agenti abiotici e biotici; gli incrementi radiali del legno nuovo e della corteccia hanno quindi lo stesso volume ma distribuiti su un aumento della circonferenza.

Bianco suggerisce che gli incrementi continuano con un incremento radiale di 0,5 mm. all'anno. Anche se gli incrementi radiali potrebbero in teoria formarsi per secoli o addirittura millenni, si può ipotizzare che questo processo è turbato dalla diminuzioni degli incrementi fino ad avere ripercussioni sui tessuti conduttivi e di riserva influenzando la capacità di sostenere la corona della chioma causandone regressione a causa dell'insufficiente energia per la crescita ed il consolidamento meccanico .

La diminuzione del sostegno fisiologico del sistema vascolare e di stoccaggio porta ad una conseguente diminuzione del sistema fotosintetico con minori apporti al cambio, che genera a sua volta un accelerazione del restringimento di nuovi incrementi radiali, più di quanto sia previsto per la geometria della pianta stessa.

Quando un albero entra in questa fase mostra evidenti regressioni della corona che caratterizzano questa fase di declino della sua vita che portano a perdite di tessuti vascolarmente funzionali nell'alburno.

In osservazioni fatte su alberi molto vecchi, questi sintomi sono evidenti anche superficialmente sul tronco e le branche primarie con ampie necrosi sul legno e in alcuni casi possono interessare ampi settori della circonferenza del tronco fino al colletto che sembrano funzionalmente collegate a regressioni di ampie porzioni dell'apparato radicale.

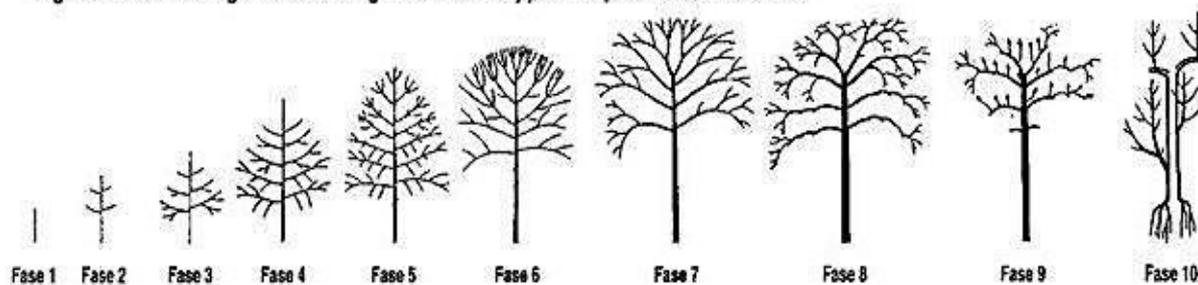
E' noto che danni su alberi molto vecchi della chioma e alle radici portano alla necrosi di ampi settori del cambio funzionalmente collegato ma è anche possibile che il degrado del cambio porta a perdita di settori della corona e dell'apparato radicale dalla perdita di tessuto funzionale dell'alburno e del floema che avvia i processi di declino.

Anche se le necrosi superficiali possono aumentare il tasso di decadimento, la riduzione del cambio funzionale a settori discreti della circonferenza del fusto può anche essere visto come una strategia di sopravvivenza per un albero che non può più mantenere una struttura funzionale completa di alburno e corteccia.

## 2.1 IL CONCETTO DI SENESCENZA NEGLI ALBERI

Cosa si intende esattamente il concetto di senescenza riferito ad un albero è sicuramente di difficile definizione senza correre il rischio di antropomorfizzare un concetto così comune nella nostra esistenza come la vecchiaia.

Figura 1 - Fasi fisiologiche e morfologiche dello sviluppo della parte aerea dell'albero



Quali sono i benefici ed i costi per un albero all'aumentare delle dimensioni? Perché gli alberi muoiono? A queste domande non è ancora possibile dare risposte certe (Midgley 2003). Molte ricerche sono state condotte a riguardo: alcune hanno approfondito le relazioni tra età/dimensione e aumento di biomassa a scala di popolamento, altre invece a scala di singolo individuo. Ritengo importante tenere ben separate le due scale di analisi perché i processi coinvolti sono diversi: ad esempio, a scala di popolamento è necessario tenere in considerazione la competizione per le risorse, la dinamica di selezione tra gli alberi e la differenziazione in posizione sociale. Voglio limitare le considerazioni solo a quello che può avvenire a livello di singolo individuo. Dal momento che ogni albero può raggiungere una data altezza massima (che è specie e sito dipendente), ci deve essere una ragione che determina una riduzione dell'incremento in altezza e quindi una stabilizzazione dell'incremento corrente di massa cormometrica nelle piante molto grandi (o molto vecchie). Bond (2000) riporta che nelle piante vecchie rispetto a quelle giovani si osserva di frequente una diminuzione dell'assimilazione netta, e quindi della capacità della piante di produrre sostanza organica. Più recentemente Köch et al. (2004), osservando ciò che avviene sulle piante più alte del pianeta (delle sequoie di quasi 113 m), hanno dimostrato che le foglie delle parti più alte della chioma rispetto a quelle poste in basso hanno assimilazione minore e minore discriminazione del carbonio "pesante". Gli autori ritengono che queste due

risposte siano essenzialmente da collegare alla difficoltà della pianta nel trasportare l'acqua contro il gradiente gravitazionale fino alla cima dell'albero; in altre parole l'efficienza complessiva del sistema di trasporto dovrebbe avere un ruolo primario nel determinare la massima dimensione dei singoli individui. Peraltro, bisogna anche considerare che gli individui più alti sono di norma anche quelli più vecchi per cui potrebbe essere lecito chiedersi se i bassi tassi di assimilazione delle piante grandi siano in qualche modo collegati a processi di "senescenza" meristemica (ossia dipendenti intrinsecamente all'età dell'individuo) oppure siano determinati da fattori estrinseci (come ad esempio una limitazione idraulica dipendente solo dalla dimensione dell'individuo). A questa semplice, ma importante domanda, hanno voluto rispondere Mencuccini et al. (2005). Su un campione di 4 specie legnose (frassino maggiore, acero montano, pino silvestre e un clone di pioppo) hanno raccolto dei rametti nella parte alta della chioma da individui di età diversa (da un minimo di 1-39 anni ad un massimo di 32-269 a seconda della specie) e li hanno innestati su piccole piante radicate della stessa specie. In questo modo hanno potuto valutare le risposte (accrescimento relativo, assimilazione netta, conduttanza stomatica e altro) dei rami di piante "vecchie" ma, adesso, di piccole dimensioni rispetto agli omologhi rametti rimasti, invece, sulle piante madri. Sottolineo che questo modo di procedere può indagare solo sugli effetti fisiologici che si osservano a scala di singolo individuo. I risultati sono chiari: tutti i rametti di piante "vecchie" innestati dimostrano accrescimenti molto superiori rispetto ai corrispondenti sulle piante madri. Non vi sono effetti legati all'età della pianta madre in nessuno dei parametri fisiologici dei rametti innestati in nessuna specie, ossia l'età della pianta madre non determina variazioni sulla performance di rametti che vengono da questa prelevati e fatti vegetare indipendentemente. In sostanza, sembra plausibile rifiutare l'ipotesi della senescenza meristemica nelle piante anche se, come gli autori sottolineano alla fine dell'abstract, alberi di età maggiore rispetto a quelli campionati potrebbero dimostrare sintomi di senescenza. Per cercare risolvere anche questo dubbio posto degli autori è possibile discutere quanto viene riportato in lavori sul medesimo argomento. In particolare, non possono essere dimenticati i lavori di Connor & Lanner (1990) e Lanner & Connor (2001) che hanno cercato di valutare possibili sintomi di senescenza nelle piante più vecchie del pianeta ossia in esemplari di *Pinus longaeva* di 4713 anni (!) rispetto a piante "giovani" della stessa specie (di circa 200 anni). Sono stati analizzati molti parametri che in genere si associano alla senescenza come vitalità pollinica, germinabilità dei semi, peso dei semi e anche altri come struttura dello xilema e del floema, lunghezza dei getti annuali. In nessuno di questi parametri si sono potute osservare delle variazioni determinate dall'età degli individui. Lanner & Connor (2001) concludono, quindi, che il concetto di senescenza dei meristemi apicali o cambiali non si può applicare nel caso della specie indagata perché nessun tipo di degenerazione funzionale è stata osservata.

In sostanza, se possiamo ritenere le osservazioni su *Pinus longaeva* generalizzabili e in linea con quanto osservato da Mencuccini et al. (2005) potremmo rispondere alla domanda iniziale (perché gli alberi muoiono) con la seguente risposta: "Probabilmente non muoiono perché sono vecchi!". I lavori sul *Pinus longaeva* sono estremamente importanti anche perché si contrappongono idealmente a quelle osservazioni di "breve periodo" del forestale-selvicoltore (1-2 secoli) che hanno fatto evolvere il concetto di age related decline (o, invece, size-related decline come suggerito da Mencuccini et al. 2005) sposato da Bond (2000) e da molti altri. Questo approccio sostanzialmente sostiene che gli alberi, dopo alcuni decenni di vita, cadano

irrimediabilmente in uno status di stress progressivo (ossia sempre più grave) che ha degli effetti deleteri sul tasso di assimilazione, quindi sulla produttività ed in ultima analisi sulla sopravvivenza dell'individuo. Non sembrano essere compatibili con questa ipotesi né le osservazioni di Connor & Lanner (1990) né i recenti lavori di Körner (2003) e Körner et al. (2005) che riportano come l'assimilazione per se non sembra essere fattore limitante la crescita degli alberi adulti dato che nessun effetto si riscontra sull'accrescimento in condizioni di alta CO<sub>2</sub>. Un'ipotesi che, invece, mi pare compatibile con i sopracitati dati sperimentali potrebbe essere delineata in base ad alcune delle conseguenze che derivano dal modello di West et al. (1999), verificato empiricamente da Anfodillo et al. (2006), e da alcuni lavori collegati (Enquist 2002, Enquist 2003). Al concetto di size -related decline (ossia stress progressivo in funzione della dimensione) verrebbe sostituito un concetto che potrei definire di optimal adjustment ossia di permanenza in uno status fisiologico ottimale durante la crescita che viene realizzato con modificazioni strutturali del sistema di conduzione (rastremazione degli elementi di conduzione) atte a mantenere una conduttanza specifica fogliare praticamente costante. Gli alberi, man mano che aumentano le proprie dimensioni, manterrebbero una struttura di trasporto dell'acqua sempre ottimale (quando sono in fase giovanile di crescita molto attiva) o al limite dell'ottimalità (quando hanno raggiunto l'altezza massima). In questo stato limite, che in natura è oscillante a seconda delle condizioni d'ambiente (concetto analogo a quello della numerosità di una popolazione animale arrivata alla capacità portante), la conduttanza specifica fogliare potrebbe anche diminuire leggermente (e così la fotosintesi) in accordo a quanto osservato in piante alte (Koch et al. 2004) rispetto a quelle piccole (Ryan et al. 2005). Una volta raggiunta la loro dimensione massima gli alberi potrebbero mantenere questo status sub-ottimale virtualmente per un tempo infinito (come ci potrebbe suggerire il *Pinus longaeva*) senza, quindi, essere soggetti ad un progressivo declino. Similmente, le piante arrivate alla loro altezza massima (al limite dell'ottimizzazione del sistema di trasporto) non hanno alcun beneficio se "fertilizzate" in CO<sub>2</sub> dato che non è la mancanza di carbonio che limita l'optimal adjustment. Questo induce a domandarsi cosa conduca la pianta al limite nella possibilità di mantenere un sistema di trasporto ottimizzato (ossia cosa determini l'altezza massima degli individui). Evidentemente, ci sono altre domande a cui dobbiamo ancora rispondere. Questi giganti, rilevandone condizioni e caratteristiche in fase di censimento è infatti capitato frequentemente, tornando a visitare un grande albero già conosciuto, di verificare un peggioramento delle sue condizioni, una riduzione della chioma o addirittura di trovare al suo posto solo il grande vuoto che normalmente si crea in seguito all'abbattimento di un esemplare storico. Se, da un lato, gran parte degli alberi monumentali ha raggiunto tale condizione perché conservata dall'uomo (molti degli esemplari censiti si sono conservati in quanto ubicati in giardini e parchi pubblici o per il loro valore affettivo o funzionale), d'altra parte è proprio l'uomo a costituire la prima fonte di pericolo per questi patriarchi. Potature errate, traumi al tronco e alle branche principali, danni agli apparati radicali, conflitti con impianti tecnologici, manufatti e pavimentazioni sono infatti le principali cause della prematura morte di molti grandi alberi. Detto questo, appare fondamentale la tutela e la protezione dei grandi alberi non tanto come intervento semplicemente vincolistico ma, piuttosto, come programmazione della cura e della corretta gestione dell'albero in tutte le sue fasi di sviluppo, soprattutto nel caso degli alberi che convivono con noi in ambiente urbano. È a questo fine che si ritiene utile approfondire argomenti quali la gestione degli alberi maturi o il funzionamento di un albero. Un

fondamentale compito degli arboricoltori è quindi, quello di sviluppare programmi di gestione e governo degli alberi; si tratta di un compito particolarmente complesso a causa del numero di specie presenti e della diversità delle condizioni ambientali incontrate. Inoltre le esigenze e la biologia dell'albero variano in funzione dell'età, tanto che l'albero maturo non può ricevere né sopportare gli stessi trattamenti riservati all'albero giovane ma, anzi, richiede cure colturali profondamente diverse. In cosa consiste il processo di invecchiamento negli alberi e quando possiamo considerare "maturo" un albero? È possibile mantenerlo in questa condizione ritardandone l'inevitabile morte? Se, per qualsiasi causa, l'attività fotosintetica verrà ridotta, l'albero potrà immagazzinare solo una limitata quantità di sostanze o, al limite, dovrà consumare parte delle proprie riserve, indebolendosi. Allo stesso tempo, se verranno asportati o comunque persi molti tessuti vivi, l'albero non disporrà di un "magazzino" sufficientemente ampio. Mentre l'albero giovane, formato per la maggior parte da tessuti fotosintetici, è in grado di ristabilire in breve tempo le proprie riserve, quello maturo sarà costretto ad abbassare temporaneamente il livello delle proprie difese; un nuovo fattore di stress potrebbe spingerlo in una spirale dalla quale sarebbe impossibile uscire. Un albero adulto sopporta quindi molto meno di uno giovane trattamenti scorretti e variazioni ambientali. In sostanza, la gestione di un patrimonio arboreo adulto va impostata sul mantenimento di un ambiente stabile il che vuol dire che anche gli interventi di cura e manutenzione costituiscono un beneficio solo se impostati e mantenuti secondo programmi a lungo termine: interventi "una tantum" sono generalmente inefficaci (per il tipo di "risposta" che un albero adulto è in grado di dare) o sono addirittura dannosi quando comportano variazioni improvvise nell'ambiente cui l'albero si era adeguato. Facciamo alcuni esempi: decidere di irrigare o concimare un albero adulto, al di fuori di una programmazione pluriennale, comporta reazioni nell'albero che rischiano di comprometterne l'equilibrio energetico; se poi l'albero è sofferente o addirittura in declino (caso tipico in cui si interviene in maniera emotiva irrigando e concimando a caso) stimolare la vegetazione può comportare, nell'immediato, una diminuzione delle riserve energetiche a disposizione per la difesa; non va poi dimenticato che anche i patogeni – tra cui gli agenti di marciumi radicali - traggono particolare beneficio da questo tipo di pratiche colturali. Per quanto riguarda la potatura, va ricordato che questa pratica, oltre ad influire direttamente sulla crescita e sulla fonte energetica dell'albero (l'apparato fogliare) è causa di ferite e può quindi facilitare i processi di decadimento (ad.es. carie del legno), specialmente se eseguita in modo scorretto: essa andrà effettuata, nel rispetto delle difese naturali dell'albero, cominciando quando l'albero è giovane (gli alberi nei primi anni di vita possono sopportare anche potature drastiche, se utili per impostare la forma di allevamento voluta: un esempio estremo è fornito dall'arte Bonsai, limitandosi poi all'eliminazione dei seccumi e a leggere potature di mantenimento e rinnovamento quando l'albero è adulto. La riduzione del tasso di crescita e l'aumentata suscettibilità a parassiti e a stress ambientali, insieme alla capacità di produrre fiori e frutti, sono gli indici più evidenti del passaggio dell'albero dalla fase giovanile a quella adulta. Questi cambiamenti, ben visibili dall'esterno, riflettono una serie di mutamenti di natura fisiologica che avvengono all'interno dell'albero. Ogni sistema, per il proprio funzionamento, richiede energia; consideriamo ora il destino dell'energia catturata durante il processo di fotosintesi: una parte verrà prontamente utilizzata per il mantenimento delle funzioni vitali (metabolismo, crescita e riproduzione), la restante sarà conservata nelle cellule vive del legno, nel tronco e soprattutto nelle radici. Questa energia di riserva verrà utilizzata

dall'albero durante la fase critica della ripresa vegetativa e servirà inoltre per mantenere attivo il sistema difensivo. Per difendersi dalle ferite l'albero consuma molta energia: le sostanze di riserva, immagazzinate principalmente sotto forma di amido nelle cellule vive del legno, vengono infatti trasformate in composti con funzione difensiva (fenolici nelle latifoglie, terpenici nelle conifere), con un "costo" energetico di circa il doppio rispetto alla formazione di nuovo legno. Pertanto, quando un albero invecchia, aumenta molto il suo consumo di energia: per la crescita, per la riproduzione, per la difesa, per il mantenimento della massa in continua crescita; aumenta quindi anche il rapporto tra massa ed energia scienziato statunitense Alex Shigo ed indica un processo dinamico con cui l'albero forma delle barriere che si oppongono alla diffusione di organismi patogeni che aggrediscono il legno causandone il decadimento ("carie"). A differenza degli animali, quindi, gli alberi non sono in grado di "cicatizzare" e guarire le ferite, ma isolano i tessuti lesionati e producono nuovi tessuti in nuove posizioni: ciò rende evidente come la cura delle ferite negli alberi sia molto diversa dalla "chirurgia" impiegata per gli animali. Interventi di cura dei grandi alberi prima di un qualsiasi intervento di cura di un albero monumentale è auspicabile un intervento tecnico di verifica delle sue condizioni. La potatura diminuisce la biomassa foto sintetica. Incrementa la compartimentalizzazione. Negli alberi deperienti la potatura ha principalmente la funzione di migliorare la stabilità della pianta: prevenendo rotture e crolli di rami e branche, e riducendo le sollecitazioni a cui le parti dell'albero sono sottoposte. Gli interventi dovranno primariamente consistere nell'asportazione delle parti secche della chioma. Queste infatti, oltre a costituire fonti di infezioni da parte di agenti patogeni, possono staccarsi dall'albero danneggiando l'albero stesso e/o cose e persone sottostanti. Altra operazione che può essere necessaria in un albero vecchio, caratterizzato da problemi di degenerazione del legno, al fine di migliorarne la stabilità, è la riduzione della chioma. Questa infatti, soprattutto in caso di eventi meteorici avversi (pioggia e vento), è sottoposta a notevoli sollecitazioni meccaniche che sono maggiori tanto più è ampia la chioma e grande la superficie fogliare. L'operazione viene detta "riduzione dell'effetto vela" in quanto la chioma investita dal vento si comporta come una vela anche se mi preme far osservare che nessun albero si "oppone" al vento gli alberi come tutti gli esseri viventi sono opportunisti loro cercano sempre di dissipare la forzante eoloica attraverso modificazioni della resistenza riducendo il loro coefficiente "aerodinamico". La riduzione della chioma può avvenire asportando per intero rami o branche selezionando quelle "peggiori": più deperite, con poca superficie fogliare, mal inserite, con cavità, ecc. oppure accorciando i rami e le branche, operazione da effettuare praticando tagli in corrispondenza di ramificazioni che sostituiscano la cima eliminata col taglio ("tagli di ritorno"). Nel complesso queste operazioni di alleggerimento della chioma, una volta stabilita la loro effettiva necessità, dovranno esser eseguite con molta cautela, da personale esperto e sotto la guida di un tecnico specializzato ed abilitato. Errori nell'esecuzione di questi interventi possono infatti compromettere definitivamente la vita dell'albero. In effetti la semplice attribuzione di un'età anagrafica ad un albero è priva di significato se non in termini puramente statistici, concettualmente potremmo quindi immaginare, secondo la esemplificazione di Alex Shigo che ogni anno un albero nuovo va a ricoprire quello preesistente in quanto negli alberi non vi sono specifici meccanismi genetici che presiedono ad un progressivo ed ineluttabile processo di invecchiamento. In altre parole per un albero la vecchiaia costituisce solo una tappa ovviamente l'ultima, di un costante processo di modifica tanto nella fisiologia che nella morfologia.

Poiché le funzioni biologiche dell'albero sono le stesse per tutta la durata della vita, con il concetto di senescenza o vecchiaia per un albero si intende sostanzialmente un rallentamento dell'efficienza di tali funzioni che comporta un rallentamento della realtà metabolica dell'albero ed infine un minore accumulo di biomassa .

Il concetto sopra esposto risulta maggiormente comprensibile se noi pensiamo all'albero come un sistema energetico nel quale l'energia immagazzinata , che in una dimensione fisica potremmo definire "energia potenziale" funge da motore per garantire la sopravvivenza che corrisponde quindi ad una situazione di equilibrio. Tale energia quindi si trasforma in energia cinetica e viene spesa nell'opera di "resistenza" cioè nei confronti dei fattori causa di stress che richiedono ovviamente energia metabolica. Questi i passaggi fondamentali che caratterizzano lo stato di salute dell'albero garantiscono la sopravvivenza mentre quando questo bilancio è negativo l'esaurimento delle riserve accumulate portano ineluttabilmente, ad un livello energetico in cui non è più in grado di garantire il complesso sistema cioè un calo della resistenza portando l'albero ad essere suscettibile agli stress. Le cause che conducono a questo collasso energetico sono molto complesse e per lo più non molto chiari anche se successivamente tenteremo di ipotizzarle, comunque tentando una semplificazione si potrebbe immaginare l'organismo albero che continua a crescere perseguendo quella condizione ideale di equilibrio tra le risorse disponibili ovvero luce, risorse nutrizionali del substrato etc. Raggiunto questo equilibrio cessa il suo incremento dimensionale inteso come crescita spaziale ed entra in una fase di mantenimento di questa condizione ideale. Questo stato di equilibrio non essendo statico ma caratterizzato dalla dinamicità ad esempio il progressivo impoverimento del substrato, con il calo dell'energia disponibile in rapporto della massa della struttura anatomica che cresce in complessità riducendo l'efficienza del meccanismo di conduzione. In termini molto generali potremmo affermare che un albero monumentale è di norma caratterizzato da una specifica condizione morfofisiologica che lo rende particolarmente vulnerabile e suscettibile alle più diverse modifiche delle condizioni ambientali siano esse di origine biotica o abiotica, inducendo uno stato di stress la cui irreversibilità è strettamente connessa alle condizioni generali dell'albero.

## **2.2 Optimal adjustment**

Al concetto di *size-related decline* (ossia stress progressivo in funzione della dimensione) verrebbe sostituito un concetto che potrei definire di *optimal adjustment* ossia di permanenza in uno status fisiologico ottimale durante la crescita che viene realizzato con modificazioni strutturali del sistema di conduzione (Anfodillo et al., 2006) potrebbe essere delineata in base ad alcune delle conseguenze che derivano dal modello di West et al. (1999), verificato empiricamente da Anfodillo et al. (2006), e da alcuni lavori collegati (Enquist; 2002; Enquist, 2003).

l'assimilazione per se non sembra essere fattore limitante la crescita degli alberi adulti dato che nessun effetto si riscontra sull'accrescimento in condizioni di alta CO<sub>2</sub>

Poiché le funzioni biologiche dell'albero sono le stesse per tutta la durata della vita, con il concetto di senescenza o vecchiaia per un albero si intende sostanzialmente un rallentamento dell'efficienza di tali funzioni che comporta un rallentamento della realtà metabolica dell'albero ed infine un minore accumulo di biomassa

Quali le modificazioni strutturali del sistema di conduzione vengono realizzate nell'albero, intanto se dovessimo definire un algoritmo che giustifichi questo concetto dovremmo osservare che:

$$P < E$$

Il peso dell'albero cioè la quantità di legno prodotto non può essere superiore alla quantità di energia metabolica disponibile. Gli alberi possono essere paragonati ad un'enorme pompa vivente. Per mantenere un elevato grado di funzionamento in un sistema vivente è necessaria una continua somministrazione di energia. Un elevato grado d'ordine nel sistema vuol dire salute. (Da: The modern arboriculture, di A. Shigo)

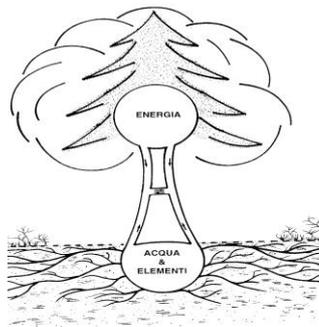


Figura n° 2 da The modern arboriculture, di A. Shigo)

L'albero del resto è una reiterazione di moduli uguali in rastremazione idraulica:

**RASTREMAZIONE**

$$d^2 = \sum d_i^2$$

**Regola di Leonardo (Leonardo da Vinci (1452 -1519))**

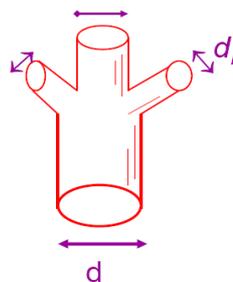


Figura n°3

Pertanto la conduttanza idraulica nella reiterazione dei moduli può così tradursi: nelle ramificazioni la sommatoria dei quadrati delle sezioni di ogni ramificazione deve essere pari al quadrato del diametro della sezione originaria (“invarianza della sezione piatta”). Questo rapporto è garanzia di efficienza del sistema di conduzione ma soprattutto ci permette di osservare come la perdita di moduli in rastremazione idraulica non determini riduzioni di efficienza nel sistema vascolare

L’albero si forma per accrescimento della struttura secondaria, mediante apposizione annuale di materiale prodotto dal cambio; si ottiene in questo modo un accrescimento primario (allungamento) ed un accrescimento secondario radiale osservabile negli anelli annuali di accrescimento. Questo accrescimento è in parte regolato geneticamente e in parte determinato dalle condizioni morfo-strutturali dell’albero, oltre che dalle condizioni ambientali.

Vi sono diverse teorie a proposito di accrescimento, di cui 3 principali:

- Needle mass theory (accrescimento biometricamente condizionato);
- Constant stress theory (accrescimento meccanicamente condizionato);
- Pipe model theory (accrescimento idraulicamente condizionato).

Quest’ultimo modello al quale ci siamo riferiti, che potremmo tradurre “modello della pianta a tubi” e proposto nel 1967 da Shinozaki, ci dice come ad ogni unità di foglie corrisponda una unità di radici

“pipe model“  
(SHINOZAKI et al. 1964) :

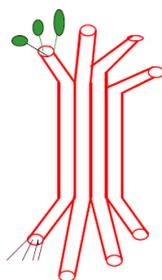


Figura n°

Secondo il modello della “pianta a tubi” (Unit pipe model of plant form) l’albero è visto come un insieme di unità elementari a forma di tubo, ognuna delle quali sostiene una unità di foglie (Shinozaky et al.1964). Secondo il modello della “pianta a tubi” (Unit pipe model of plant form) .Secondo questo modello una pianta può permettersi una certa massa di foglie a patto di avere un sistema di conduzione adeguato.



Foto n°1 (Strazzabosco-Maroe)

L'albero della foto 1 possiamo affermare che la sua produzione di legno è al limite della sua capacità metabolica e di conduzione, per cui inizia un processo di modificazioni strutturali per raggiungere un equilibrio energetico.



Foto n°2 (Strazzabosco-Maroe)

Queste modificazioni strutturali iniziano con un aumento della trasparenza della chioma, microfillia e seccumi distali



Foto n°3 (Strazzabosco-Maroe)

Continuano con perdita di ratei di moduli sia epigei che ipogei fino al bilanciamento energetico sia ipogeo che epigeo.





Foto n°4-5-6-7-8-9( Strazzabosco)

Quando l'albero ha raggiunto un bilanciamento metabolico se non intervengono fattori legati alla competizione dello spazio inizia una ricrescita dei moduli reiterati, realizzato con modificazioni strutturali del sistema di conduzione (rastremazione degli elementi di conduzione) atte a mantenere una conduttanza specifica fogliare praticamente costante.

Molti non riescono a comprendere - o non ci pensano - come la fisiologia degli alberi sia sottoposta e dipenda in toto da bilanci energetici e dai principi della termodinamica.

Le piante sono le più grandi accumulatrici viventi di energia solare che viene poi reimpiegata in parte per crescere, per sostenersi, per difendersi e per riprodursi. Ogni azione compiuta dagli uomini o dall'ambiente circostante ha ripercussioni su queste "batterie" naturali. Solo ragionando in termini energetici si possono capire a fondo gli alberi

### ***2.3 La rigenerazione degli apparati radicali***

Cosa dire se gli alberi mantengono inalterato il loro equilibrio per tutta la vita non mostrano evidenze di "senescenza" allora il deperimento degli alberi è dovuto sostanzialmente ad un rallentamento della realtà metabolica dell'albero ed infine un minore accumulo di biomassa è dovuto al declino degli apparati radicali e visto il modello della pianta a tubi (Unit pipe model of plant form Tyree M. et al. 1991) ricostruendo un sistema di conduzione a partire dalla rigenerazione degli apparati radicali è possibile ribilanciare la massa fogliare ricreando le condizioni dell'optimal adjustment (Mencuccini et al. 2005, Anfodillo et al. 2006).

Da dove l'albero reitera nuove radici? Coerentemente con la teoria della pianta a tubi la reiterazione di nuovi moduli è sostenuta dalla reiterazione di nuove radici.



Foto n°10 - 11( Strazzabosco) 12( Maroe)

Noi sappiamo che la reiterazione di nuove radici avviene in condizioni normali solo dal colletto dell'albero determinando per altro in alberi di aspetto monumentale; dove le forze destabilizzanti che agiscono al di fuori della zolla utile, la reiterazione di nuove radice determina una diminuzione del fattore di sicurezza legato alla caduta per rottura da taglio del terreno a livello della zolla.



Foto n° 13( Strazzabosco Pavoni)

Le radici sono una parte di fondamentale importanza per la pianta per le funzioni che svolgono, ma spesso insufficientemente considerata. La loro condizione è strettamente legata alla salute degli alberi; ma a

differenza della chioma, le radici non sono facilmente controllabili. E il loro declino anticipa quello dell'intera pianta.

Esse rappresentano circa il 15-25% della biomassa totale dell'albero, e si concentrano in prossimità del colletto; sono generalmente comprese nell'area della proiezione orizzontale della chioma, anche se in alcune situazioni raggiungono una maggiore estensione. Hanno un comportamento opportunistico e perciò si accrescono nel suolo in direzione verticale e orizzontale nelle zone in cui le condizioni sono più favorevoli al loro accrescimento.

Il loro portamento e la distribuzione sono in parte legati alla specie, in quanto funzione del corredo genetico, ma dipendono anche dalle caratteristiche e dalla qualità del terreno (Motta R. et al. 2008).

L'apparato radicale è una struttura molto complessa, costituita da segmenti che svolgono funzioni diverse e che in linea schematica possono essere suddivise in tre grandi gruppi: radici con funzione di ancoraggio, radici esploratrici e radici di assorbimento, che per semplicità definiamo "radici fini"; queste ultime hanno diametro inferiore a 2 millimetri e terminano con migliaia di apici, mediante la quale la pianta assorbe acqua e nutrienti.

## 2.4 STADI DI SVILUPPO DI UN APPARATO RADICALE

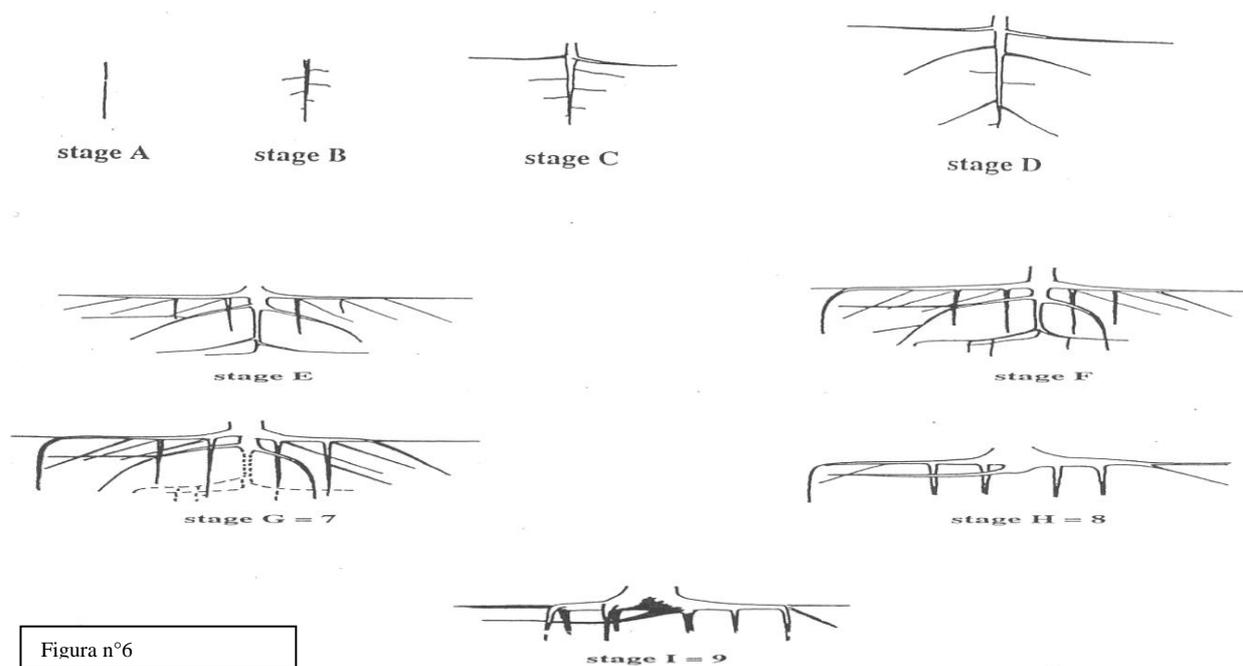
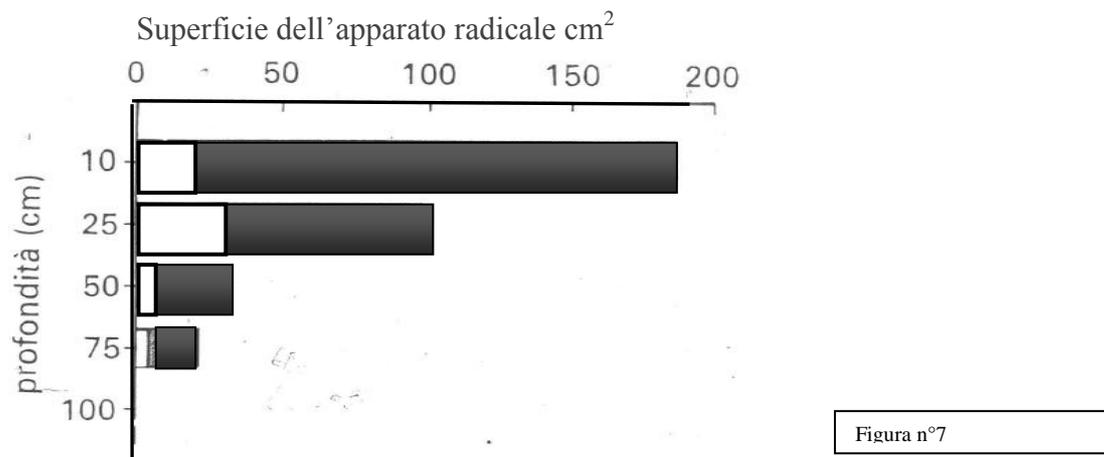


Figura n°6

La sequenza delle immagini schematiche nella figura n° 6 evidenzia l'evoluzione "architettonica" (in senso lato perché nell'apparato radicale non esiste una conformazione architettonica predefinita geneticamente come nella chioma) del sistema radicale, dalla fase giovanile a quella di declino; inizialmente le radici, di origine embrionale, hanno conformazione fittonante (comportamento pressoché analogo si evidenzia nella chioma in fase giovanile, in cui il germoglio apicale prevale sulle branche laterali, crescita primaria); via che le branche radicali, inserite sul fittone, divengono prevalenti, fino alla degenerazione e scomparsa del fittone

stesso; nelle fasi finali vi è una regressione del sistema radicale, con riduzione della massa complessiva, parallelamente ad un ridimensionamento dell'apparato aereo.

Il sistema delle radici principali e secondarie è composto per la maggior parte da segmenti cilindro-conici, i quali si collocano in direzione orizzontale preferenzialmente nei primi strati del terreno, compresi prevalentemente tra i 5 e i 75 centimetri (figura n°7), e la cui funzione principale è il trasporto della linfa. Esse agiscono come un intreccio di cavi che legano il suolo, sostengono la pianta permettendole di rimanere in posizione verticale. In situazioni meteorologiche avverse, quali forti venti, nevicate, ecc., le radici e la massa del suolo che esse inglobano costituiscono la contro spinta per sostenere la pianta.



Gli apparati radicali degli alberi subiscono come la parte aerea il condizionamento del genotipo, ma anche dei fattori ambientali quali la natura del suolo e le condizioni fisiche (struttura e tessitura) che possono fortemente influenzare lo sviluppo centripeto della radice. Nelle piante si può riconoscere un apparato radicale di tipo fittonante, caratterizzato dalla presenza di una grossa radice che si sviluppa in direzione verticale, e da altre più piccole che vi si inseriscono e si accrescono con andamento orizzontale; oppure l'apparato radicale è di tipo fascicolato, costituito da più radici di dimensioni simili e ad andamento orizzontale( fig.8)

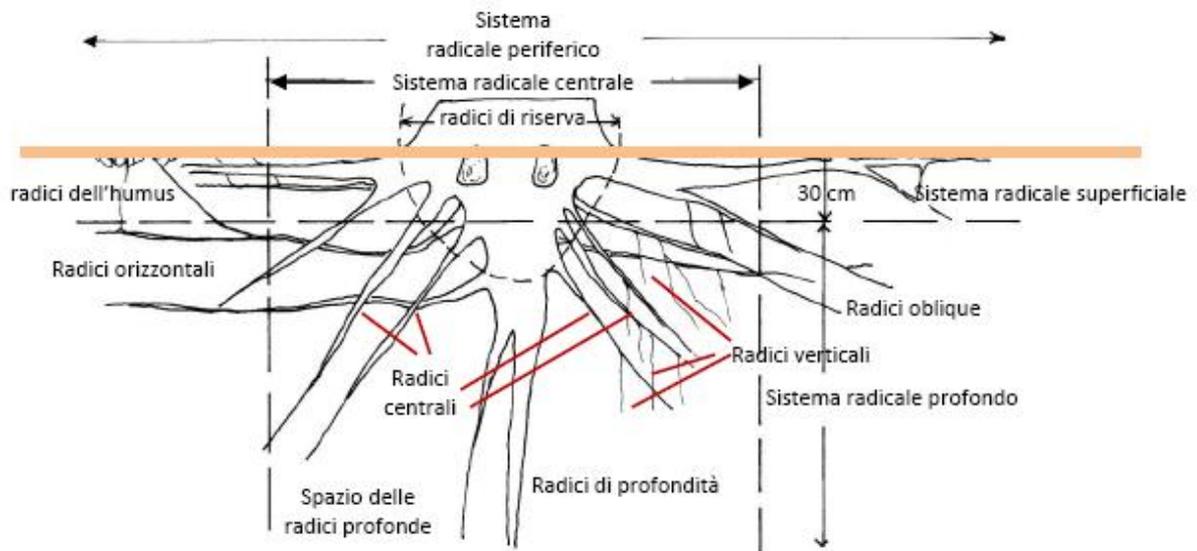


Fig n°8 Schema di un sistema radicale adulto, in cui si evidenziano la diversa distribuzione, la diversa conformazione e i diversi ruoli delle radici.

La radice verticale può degenerare o deviare direzione e permettere così la formazione di un apparato ipogeo fascicolato; in questo caso si accrescono con grande rapidità delle radici secondarie con andamento pressoché orizzontale e superficiale e che costituiscono la parte assorbente. (In genere gli alberi ornamentali perdono la radice verticale, ovvero il fittone, dopo il primo trapianto).

Esse costituiscono in peso la maggior parte della biomassa radicale e sono la quasi totalità dello sviluppo in lunghezza.

La funzionalità degli apparati radicali si esplica al massimo nei terreni forestali ben strutturati che hanno elevata resistenza al compattamento, disponibilità e capacità di trattenere l'aria, l'acqua e gli elementi nutritivi.

Tali caratteristiche sono direttamente legate alla: tessitura, struttura, pH, capacità di scambio cationico e alla presenza di sostanza organica umificata.

Le radici non sono visibili e non possono essere costantemente e facilmente controllate come la parte epigea il loro declino avviene prima del deperimento dell'intera pianta, rendendo problematica una interazione causa effetto.

Ricostruendo un sistema di conduzione a partire dalla rigenerazione degli apparati radicali è possibile ribilanciare la massa fogliare ricreando le condizioni di sviluppo, arrestando la reiterazioni di radici dal colletto.

Certo rigenerare apparati radicali ha partire da assi in crescita secondaria che hanno perso quantomeno notevolmente ridotto la capacità di "assorbire" reiterando radici primarie rappresenterebbe un notevole incremento di assorbimento e se tali radici rimangono attive certamente verrebbero innalzati i parametri metabolici dell'albero e con esse le sue condizioni di "salute" ma queste condizioni sono possibile e soprattutto si può reiterare un apparato radicale in struttura primaria a partire da assi in crescita secondaria?

## Capitolo III

### 3. Valutazione e anamnesi dei parametri vitali

L'albero non parla ma è in grado di comunicare con noi attraverso le sue strutture e i suoi organi. Essi svolgono le loro funzioni, si accrescono, vengono modificati dal peso proprio, dalle condizioni ambientali, dai danni provocati dalle malattie e mantengono per sempre i segni degli avvenimenti che ne hanno condizionato o favorito le fasi che hanno attraversato. Ogni anno la pianta emette nuovi rami, nuove foglie e nuove radici. dal loro esame Si può facilmente individuare la loro età valutare, l'accostimento annuale nel periodo esaminato ed avere un riferimento sulla vitalità del segmento esaminato. Ogni anno vengono prodotte nuove foglie Questa chiave di lettura ci permetterà di cogliere e comprendere, il linguaggio della pianta analizzare la sua storia, capire il suo stato attuale e le sue possibilità future. Attraverso una attenta e costante osservazione si può in una fase precoce, individuare parametri che danno ragione della vitalità, stabilità, la presenza di segni di deperimento o altri fattori legati alla salute e al benessere.

E' quindi necessario saper valutare la pianta in una fase in cui può essere ancora definita sana. Ciò è particolarmente importante poiché l'analisi dello stato dell'albero può essere fatto attraverso indagini morfologiche all'apparato ipogeo ed epigeo sostanzialmente semplici senza l'ausilio di costose attrezzature.

Ciò consentirà di comprendere le sue esigenze e mettere in atto a ragion veduta le misure necessarie al ripristino delle condizioni di salute energetiche.

La gemma apicale ha un diametro minore di quello del ramo e la zona intermedia è ricoperta da uno strato aggiuntivo di periderma.

Si origina così un cerchio di discontinuità, chiamato cicatrice perulare, che rimane ben visibile sulla superficie esterna del ramo per alcuni anni. In particolari situazioni si possono approfondire le ricerche prendendo in esame strumentalmente aspetti fisiologici e meccanici.

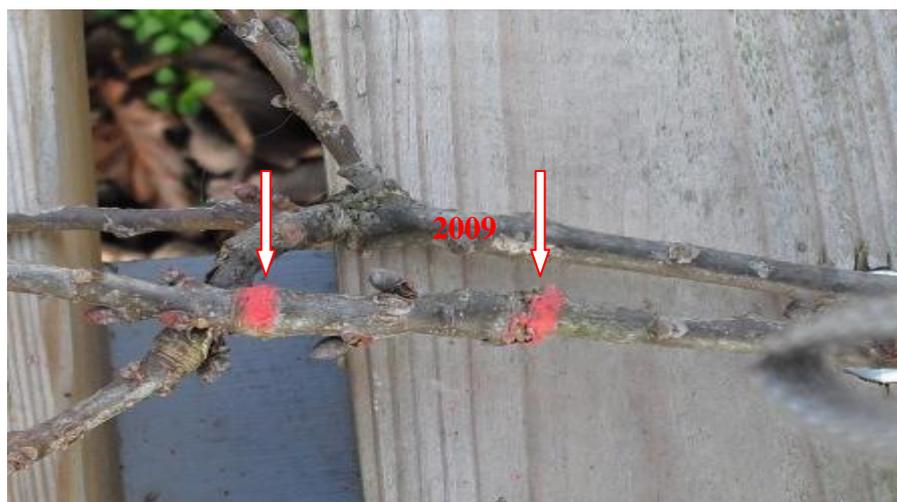


Foto 10 incremento del getto del 2009 con analisi del cerchio perulare

### **3.1 Indagini morfologiche**

Le indagini morfologiche che si eseguono sull'apparato epigeo e ipogeo possono essere effettuate attraverso semplici misurazioni di parametri dimensionali delle parti più rappresentative della pianta utilizzando strumenti quali righello, metro, ecc.

Per fare ciò è indispensabile avere un termine di paragone riferito a piante della stessa specie, che vegetano in maniera ottimale in condizioni analoghe di terreno, umidità relativa, esposizione, ecc. a quelle nelle quali si trova l'albero oggetto di studio. Dovranno sempre essere esaminati organi che si trovano nella medesima posizione e che hanno età analoga. Così per valutare un germoglio o una foglia bisogna studiarne un altro situato in analoga posizione ad esempio su un ramo di secondo ordine inserito su una branca di secondo ordine esposta a nord nella parte basale della chioma.

Sono anche disponibili dei programmi informatici che tramite una telecamera e lo sviluppo di un software adeguato sono in grado di fornire singolarmente l'area di qualsiasi organo vegetale (scanner).

Questa tecnologia però è molto sofisticata e costosa e perciò non è utilizzabile quando viene realizzato un inventario di vaste dimensioni, ma viene applicata soprattutto per studi scientifici o per situazioni molto particolari che richiedono una precisione molto alta.

In particolare per la chioma e le radici verranno analizzati i seguenti parametri:

#### Apparato Epigeo

- Allungamento dei getti apicali
- Valutazione trasparenza
- Dimensione delle foglie
- Presenza e dimensione dei rami epicormici
- Avanzamento del callo di cicatrizzazione
- Dendrocronologia

#### Apparato Ipogeo

- Perdita delle radici
- Numero di ramificazioni laterali
- Lunghezza apparati radicali
- Valutazione della micorizzazione

## **3.2 Apparato epigeo**

Allungamento dei getti apicali

E' un criterio molto utile e di facile esecuzione. Devono essere analizzati gli allungamenti dei getti apicali di un albero in un determinato settore ed esposizione e paragonati con quelli di una pianta ritenuta normale o sana che ha la stessa età e vive nel medesimo ambiente alla stessa esposizione di quella oggetto dell'indagine (Bellocchi et. Al. 2002).

Si prelevano i getti degli ultimi 3-4 anni, si misurano e si confrontano.

Allungamenti dell'ultimo anno o degli ultimi anni molto ridotti rispetto a quello degli anni precedenti indicano evidentemente un declino o la presenza di un problema.

All'interno del ramo si individueranno, oltre ai nodi delle aree ben definite simili a un nodo ma molto più pronunciate che rappresentano il passaggio da un anno all'altro. Si misurano le distanze tra un settore e l'altro e si ha l'accrescimento che si è verificato in quella stagione.

Si possono fare confronti tra medie semplici o elaborazioni più complesse per determinare la significatività statistica dei rilievi.

Bisogna tener presente che alcune specie come il pioppo e il salice emettono le foglie scolarmente durante le prime fasi della stagione vegetativa, mentre altre come castagno, olmo, quercia solo al momento della germogliazione primaverile. Perciò è necessario porre la massima cura per non scambiare una foglia costituzionalmente piccola, con una appena emessa.

E' indispensabile valutare strutture confrontabili, rami situati alla stessa altezza, appartenenti alla stessa branca, con analoga esposizione.

### **3.2.1 Trasparenza della chioma**

Percentuale di spazi vuoti nella chioma fogliata dell'albero indipendentemente dalla causa. La valutazione della trasparenza è determinata dalla densità delle foglie presenti. Il concetto di "trasparenza" è differente da quello di "perdita di foglie" per cui tale parametro deve essere valutato basandosi esclusivamente su standard assoluti corretti mediante standard fotografici. Un'elevata trasparenza non implica di per sé un giudizio negativo della pianta: alberi con crescita sostenuta possono avere chiome molto trasparenti. La procedura operativa adottata è la seguente:

- a) delimitazione della chioma valutabile e contouring della chioma fogliata da valutare mediante una linea ipotetica che segue il profilo determinato dagli apici dei rami e rametti (Ferretti et.al.1994)
- b) attribuzione del valore di trasparenza in ragione del rapporto vuoti/pieni esistente all'interno della figura così delimitata.

Metodo di valutazione adottato:  
 Schema guida per la stima della trasparenza del fogliame (da Eichhorn et al., 1998).

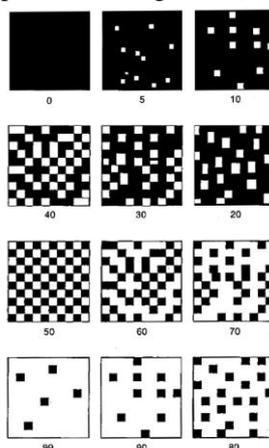


Figura 9 La trasparenza è valutata secondo classi del 5% con riferimento a degli standard proposti (0 = pianta che non lascia passare luce; 100 = pianta morta)

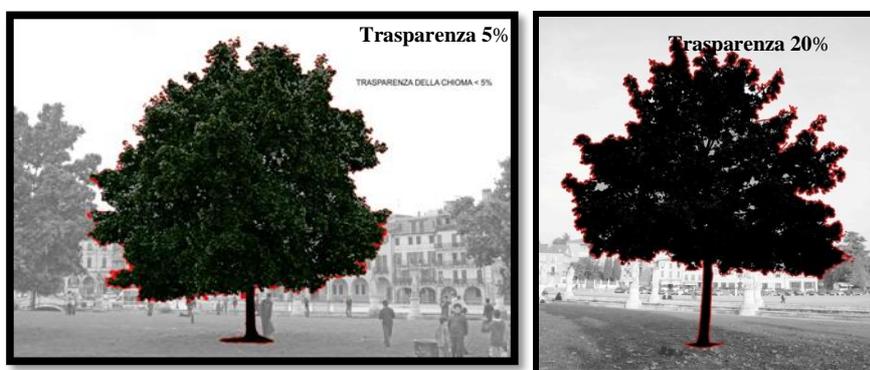


Foto 11 -12 (Strazzabosco-Luison)

### 3.3 Presenza e stato dei rami epicormici

Se una pianta per qualsiasi ragione perde gran parte dei germogli apicali, il numero delle foglie presenti sulla chioma diminuisce e ciò favorisce la penetrazione dei raggi solari in settori profondi della parte epigea. In queste zone che vengono progressivamente illuminate, anche in considerazione del mutato equilibrio ormonale e della perdita della funzione di cima, iniziano a germogliare le gemme avventizie le quali originano i rami epicormici. Quando le chiome si richiudono essi vanno incontro a rapidi processi di degenerazione e non sono più visibili. Se l'alterazione continua, però essi assumono un maggior vigore e importanza poiché l'albero affida loro parte della fotosintesi clorofilliana indebolendo le aree sovrastanti e portando un incremento del loro declino. Bisogna quindi, in prima istanza, valutare la presenza di rami epicormici tenendo sempre presente che è necessario confrontare rami situati alla stessa altezza, appartenenti alla stessa branca, con analogo esposizione. Se sono presenti rami epicormici si può individuare anche il momento della loro comparsa analizzando il numero dei nodi e calcolandone l'età, la loro presenza sulle branche principali o

sul tronco indica che la pianta è in uno stadio avanzato di deperimento tale fatto è ancora più preoccupante e deve essere maggiormente tenuto in considerazione se questi si trovano al colletto della pianta.

### 3.3.1 Avanzamento del callo di cicatrizzazione

Osservando il callo di cicatrizzazione si notano ai suoi bordi delle linee che assomigliano a una piccola incrostazione o costolatura. Queste zone rappresentano gli accrescimenti annuali e nelle piante vigorose raggiungono la dimensione di 1-3 cm all'anno. Dal loro incremento si valuta perciò lo stato energetico della pianta.



Foto 13 incrementi callo

E' indispensabile confrontare strutture analoghe quali stessa branca, stessa altezza del tronco, ecc. ponendole a confronto con una pianta ritenuta normale che ha subito il taglio alla stessa epoca.

### Dendrocronologia

Per valutare le condizioni vegetative degli individui vengono impiegate tecniche di analisi dendrocronologiche che effettuano lo studio degli incrementi legnosi annuali attraverso la misurazione delle grandezze anulari e dell'analisi dei loro caratteri fisionomici e morfo-anatomici (Corona E.1984). Tali indagini si compiono su carote legnose di 0,5 cm di diametro prelevate dal fusto dell'albero con un succhiello di Pressler a circa 80-90 cm dal suolo. I campioni così ottenuti vengono fissati su adeguati supporti (cartone ondulato, legno, ecc.), levigati con carte abrasive con grana progressivamente più fine allo scopo di rendere più leggibile il materiale. Effettuata questa operazione si passa alla misurazione della dimensione degli anelli che può essere eseguita a mano con un righello provvisto di nonio o nei casi in cui si richieda maggiore precisione, con un adeguato dispositivo ottico-meccanico che è collegabile ad un computer provvisto di un software particolare in grado di elaborare i dati.

Quest'ultimo metodo è naturalmente il più preciso ma qualora non fosse disponibile si possono usare anche i primi due.

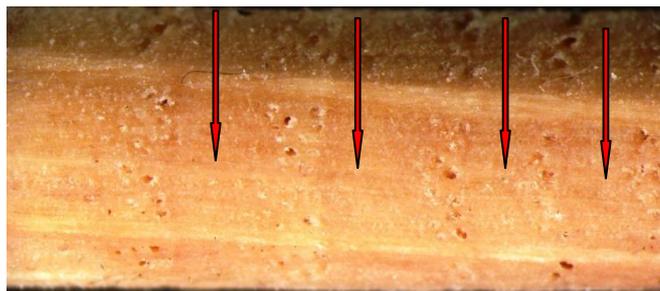


Foto 14 misurazione anelli di crescita(Strazzabosco)

Analizzando l'ampiezza annuale degli anelli si possono individuare le varie fasi dell'accrescimento(foto 14) e metterle in connessione con gli stress idrici o ambientali(Tomazello F.2001) che la pianta ha dovuto affrontare in corrispondenza di anni con periodi estivi particolarmente scarsi di precipitazione, con temperature eccessivamente alte, variazioni del livello della falda, attacchi di patogeni, fenomeni competitivi, disturbi antropici di natura varia, inquinamento, ecc. Questa misura per essere interpretabile deve essere sempre correlata alle indagini climatiche sopra illustrate. Sono disponibili anche dati di riferimento che attraverso un apposito software possono dare una interpretazione molto precisa, specie per specie, degli andamenti degli anelli.

#### 3.4 Apparato ipogeo

##### Perdita delle radici e numero di ramificazioni laterali

Spesso il declino della chioma è legato alla decadenza dei segmenti fini dell'apparato radicale. Per tale motivo è indispensabile conoscere oltre alla situazione dell'apparato epigeo anche quello delle radici ed in modo particolare dei segmenti fini. Osservando attentamente le radici di dimensioni comprese tra 0,2 mm e 30 mm infatti si possono evidenziare anticipatamente le situazioni di degrado. Per valutare lo stato dell'apparato ipogeo è necessario eseguire uno scavo in varie zone sotto l'area di insidenza della chioma, mettere in luce e osservare direttamente le radici considerando la presenza di quelle laterali e valutando lo stato di quelle fini assorbenti. Superata questa fase e qualora si volessero effettuare osservazioni più circostanziate si procede eseguendo scavi a distanza prestabilite dal tronco, escludendo i primi 3 cm di suolo, effettuando prelievi di un volume noto di terreno, contenente radici, sulle quali verranno eseguite in laboratorio le analisi più accurate. Il campione dovrà essere posto in acqua corrente lasciandolo riposare per 2 ore, i segmenti presenti dovranno essere lavati, prelevati a caso (il campione deve essere stabilito a seconda della situazione) e quindi ritagliati in dimensioni uguali. Sui segmenti così ottenuti saranno contate con una lente di ingrandimento o meglio allo stereo microscopio a 10-40X le cicatrici derivanti dalla caduta di radici che si evidenziano attraverso la formazione di una lesione circolare e il numero delle ramificazioni laterali.



Foto n°15 massa radicale lavata



Foto n°16 radici pronte per analisi



Foto n°17 analisi allo stereoscopio

### 3.4.1 Analisi della lunghezza radicale

Questa misurazione difficilmente riesce a dare una valutazione assoluta sulla lunghezza degli apparati radicali ma può servire per dare un raffronto tra due entità: una sana e una deperente. Perché il confronto sia valido bisognerà analizzare due piante della stessa età allevate in condizioni analoghe. Dovranno essere effettuati accurati prelievi e la valutazione sarà effettuata seguendo alcuni metodi noti in letteratura.

### 3.5 Micorizzazione

Gli apparati radicali delle piante arboree sono assoggettati a complesse relazioni con i microorganismi del suolo. Tra queste, probabilmente le più importanti sono quelle mutualistiche con i funghi micorrizici. Si tratta di relazioni simbiotiche, da cui traggono benefici entrambi i soggetti. La micorizzazione è di particolare importanza per le piante che vivono in ambienti estremi, su terreni poveri di nutrimento. L'importanza delle micorrize non si riduce soltanto all'ottimizzazione dell'assorbimento di acqua e nutrienti dal terreno a vantaggio della pianta. Le ectomicorrize, ad esempio, interferiscono positivamente sulla salute della pianta; il loro interesse è perciò crescente anche nell'ambito della patologia vegetale. Nella medesima pianta si possono normalmente riscontrare oltre venti diversi morfotipi micorrizici, nonché popolazioni batteriche (es. azotofissatori) e in diverso stadio di sviluppo. Ogni pianta, interagendo contemporaneamente con numerose specie fungine, non solo simbiotiche, ma anche saprofitiche e parassitiche, deve essere in grado di riconoscere e differenziare la propria risposta. Nel caso della simbiosi micorrizica le interazioni pianta-fungo sono meno specifiche e meno studiate rispetto a quello tra pianta e funghi patogeni. Tuttavia, alcuni aspetti risultano oggi meglio conosciuti. L'instaurarsi di un rapporto ectomicorrizico prevede reciproche trasformazioni, codificate geneticamente, che coinvolgono il rilascio e il riconoscimento di segnali chimici e la regolazione nella produzione di proteine ed enzimi. La struttura diviene così complessa ed integrata, conseguenza di una sequenza programmata di modificazioni nella parete radicale o nell'organizzazione cellulare del fungo e della pianta; è favorito, così, l'affermarsi di un nuovo modello metabolico regolato geneticamente.

Lo sviluppo dell'ectomicorrizzazione è regolato inizialmente da molecole che si trovano nella rizosfera e che vengono secrete, sia dal fungo che dalle radici fini. Si tratta di segnali specifici, cioè caratteristici di determinate specie botaniche e fungine. E' conosciuta, ad esempio, la capacità di alcune specie fungine di sintetizzare fitormoni (auxine); queste sostanze stimolano la produzione di un maggior numero di apici

radicali, e quindi avvantaggiano la penetrazione del simbionte nella radice. In altri casi, si è dimostrato che essudati radicali sono in grado di favorire la germinazione di spore fungine, l'accrescimento e la modificazione delle ife. A loro volta, le ife fungine sono in grado di interagire con batteri "associati", che favoriscono la simbiosi e la colonizzazione della radice ospitante ("*helper bacteria*") (Garbaye J.1994). Un sistema radicale micorrizzato presenta evidenti differenze rispetto a radici non micorizzate. Le "ife emananti" si sostituiscono in parte alle radici assorbenti della pianta, estendendosi e addentrandosi nel terreno in maniera capillare, spesso spingendosi ben oltre la rizosfera. Ne è così accresciuta la capacità di assorbimento e di mobilitazione di acqua e nutrienti, a beneficio dell'accrescimento della pianta che diviene anche meno suscettibile all'attacco di patogeni e meno esposta a stress (Frey K. 2007). Ai fini pratici, ciò che avviene normalmente nei suoli forestali potrebbe essere favorito anche nei suoli interessati dalle piante impiegate per il verde pubblico e privato (Mosca E.2007). E in parte, già qualcosa già si è iniziato a fare. Di seguito si riporta un elenco con le specie fungine oggi maggiormente utilizzate per inoculare artificialmente le giovani piante.

- *Laccaria laccata*
- *Pisolithus tinctorius*
- *Hebeloma crustuliforme*
- *Suillus bovinus*
- *Tuber* sp.
- *Cantarellus* sp.
- V.A.M. (*Glomus* sp.) – per piante da frutto o ornamentali o medicinali

In definitiva, i vantaggi ottenibili dalla micorrizzazione sono i seguenti:

- acquisizione di nutrienti presenti in forme normalmente non disponibili per le piante (ad esempio azoto e fosforo nei composti organici);
- capacità di abbattere la presenza di sostanze inquinanti o tossiche (es.composti fenolici e metalli) del suolo;
- protezione dagli stress idrici;
- protezione nei confronti di funghi parassiti e nematodi;
- produzione di fitormoni;
- contributo al miglioramento della struttura del terreno;
- influenza nella popolazione microbica del suolo;
- benefici dovuti alla produzione di fitormoni;
- accumulazione di nutrienti;

- costituzione di reti nutrizionali
- supporto per i semenzali fornito dalle reti di ife nel terreno;
- trasferimento di nutrienti dalle piante morte a quelle vive;
- influenza sulla successione ecologica dei vegetali;
- maggiore attecchimento nei trapianti, con riduzione dello stress post-trapianto

Il fungo simbiote trae dalla pianta carboidrati e essudati radicali, e la possibilità di sopravvivere. Queste specie fungine, infatti, in genere non possiedono la capacità di vivere autonomamente: non sono capaci di aggredire e degradare la sostanza organica vivente, come invece i funghi parassiti, e nemmeno la sostanza organica morta, come i saprofiti. Si tratta di un rapporto antichissimo, non molto diverso da quello presente nei licheni. Le specie fungine, oltre ad essere più o meno legate ad alcune specie o famiglie botaniche, sono sensibili alle condizioni fisiche e soprattutto chimiche del terreno, in particolare al pH. Nella maggior parte dei casi prediligono ambiente acido o sub acido, ambienti in genere diffusi a livello della rizosfera. Ma la presenza delle varie comunità micorriziche è fortemente condizionata dalla copertura vegetale, divenendo ottimale in condizioni di media copertura e buona ossigenazione della rizosfera (Causin R.1996).

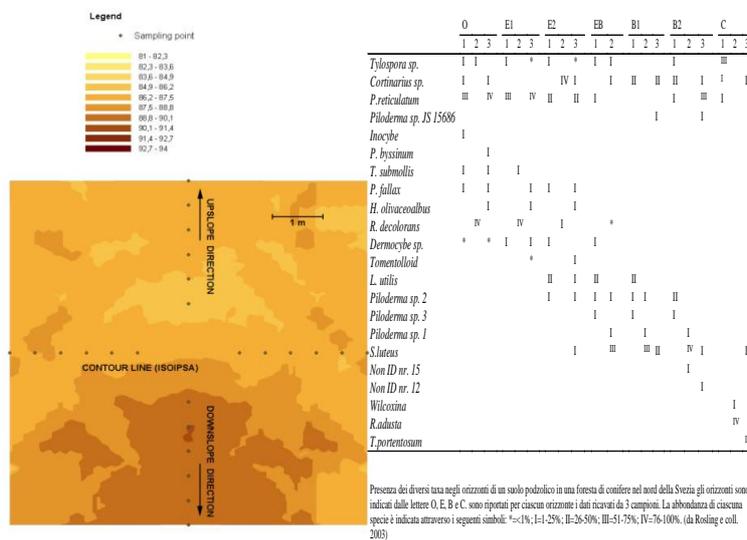
### 3.5.1 Presenza di micorrize in funzione della copertura vegetale

SPECIE	% copertura				
	6%	12%	23%	49%	76%
<i>Pino silvestre</i>	Molto scarsa	Scarsa	Media	Massima	decescente
<i>Abete rosso</i>	Molto scarsa	Scarsa	Media	Massima	decescente



Foto 18 Apici radicali micorrizati (Montecchio-Scattolin)

Le diverse specie micorriziche hanno anche una varia distribuzione spaziale, come desumibile dalla tabella



che segue :

Figura 10 (da Scattolin Bozzon Montecchio)

E, inoltre, varia nel tempo, durante le stagioni:

SPECIE	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
<i>Cortinarius anomalus</i>	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓
<i>Lactarius quietus</i>	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓
<i>Byssocorticium atrovirens</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
<i>Cenococcum geophilum</i>				✓	✓		✓	✓	✓	✓

<i>Tomentella sp.</i>				√	√			√	√	√
<i>Piloderma sp.</i>				√						
<i>Hebeloma sp.</i>		√	√	√	√	√	√	√	√	√
<i>Laccaria amethystina</i>										√
<i>Russula nigricans</i>										√
<i>Clavulina cristata</i>	√	√	√							√
<i>Boletus sp.</i>		√	√	√	√					√

Anche l'efficienza della simbiosi varia nel tempo. Recenti ricerche hanno messo in evidenza la valenza della comunità micorriziale quale indicatore della salute delle piante in ambito forestale (L. Montecchio, E. Motta, S. Mutto Accordi, 2008). Nel caso di deperimenti, specie ectomicorriziche utili e competitive, ma meno resistenti anche a bassi livelli di stress possono venire sostituite da specie più tolleranti, ma meno competitive, innescando un circolo vizioso che porta la pianta ad un progressivo deperimento. L'adozione di questo tipo di indagini richiede però modalità di campionamento condivise, e la capacità di riconoscere le specie presenti, tra cui molte non ancora descritte. Le prospettive circa l'impiego di questo tipo di analisi potranno permettere comunque una più completa ed oggettiva valutazione dello stato fitosanitario della pianta, come integrazione alle valutazioni dei parametri ecologici e fisiologici (Scattolin L. 2008)

### 3.6 Indagini fisiologiche

Giudicare la vitalità delle piante utilizzando solamente i parametri morfologici è utile ma non sempre permette di individuare completamente lo stato di una pianta e la comparsa di sintomi iniziali premonitori di una malattia.

In molti ambienti sia di ricerca che legati al mondo operativo è nata quindi la necessità di avere a disposizione dei metodi facilmente utilizzabili per ottenere dati obiettivi sul comportamento delle piante e sulla loro vitalità.

Tra i metodi classici fino ad ora utilizzati l'analisi chimica del terreno o delle foglie è in grado di dare dati attendibili sulla composizione chimica e sulla disponibilità delle sostanze nutritive ma non riesce a fornire utili ed accurate informazioni sulla fisiologia della pianta che può essere influenzata oltre che dalle carenze nutritive anche dalla siccità, dal compattamento del suolo, dagli eccessi idrici, dall'inquinamento atmosferico, dal vento, ecc.

Si sono quindi nel tempo affermate tecniche che prendono in esame i fattori fisiologici ritenuti più importanti. Per l'apparato epigeo essi sono la fotosintesi studiata attraverso il monitoraggio della riflettanza spettrale e della fluorescenza della clorofilla e il potenziale idrico degli aghi e dei germogli, per quello ipogeo è invece la perdita dei soluti.

### 3.6.1 Apparato epigeo

#### Test di fluorescenza della clorofilla

La fluorescenza della clorofilla studiata attraverso la interpretazione del fotosistema II fornisce risultati affidabili sullo stato di salute o di stress della pianta (Sighicelli M. 2010), di un tessuto o di singole cellule poiché esso è considerato uno dei punti sensibili degli effetti dello stress. Tra i metodi più usati sono quelli portatili che utilizzano uno strumento in grado di misurare, attraverso degli analizzatori di gas all'infrarosso, l'anidride carbonica incorporata da una determinata porzione di tessuto.

Nelle indagini di campagna dove sono richieste maneggevolezza e rapidità si usa comunemente il PEA (Plant Efficiency Analyzer) (Bussotti F. 2012) il quale è un fluorimetro a eccitazione continua che permette di misurare accuratamente la cinetica dell'induzione alla fluorescenza quando un elemento fotosintetizzante viene sottoposto a una forte illuminazione dopo un periodo di adattamento al buio.

Lo strumento è in grado di fornire normalmente i parametri della fluorescenza:

F<sub>0</sub> – Fluorescenza al momento 0 [Quando il Q<sub>a</sub> (Plastoquinone Electron Acceptor Pool) è completamente ossidato] – E' il valore riferito all'inizio dell'illuminazione, che viene calcolato direttamente dallo strumento, tramite un algoritmo utilizzato per costruire la retta di regressione tra i punti registrati nei primi momenti di esposizione alla luce.

F<sub>m</sub> – Fluorescenza massima – [Quando il Q<sub>a</sub> (Plastoquinone Electron Acceptor Pool) è completamente ridotto] - valore riferito al massimo della fluorescenza, che viene calcolato direttamente dallo strumento.

F<sub>v</sub> – Fluorescenza variabile – valore riferito ai punti intermedi tra F<sub>0</sub> e F<sub>m</sub> della fluorescenza, che viene calcolato direttamente dallo strumento.

F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> – massimo di efficienza del fotosistema II.

Oltre a questi dati forniti direttamente dallo strumento è possibile scaricare su un computer tutte le tracce della fluorescenza, comprese nei punti dell'intervallo di misura tra F<sub>0</sub> e F<sub>m</sub> e attraverso appositi software che permettono il calcolo di differenti tipi di espressioni biofisiche quale l'indice di vitalità, le fluttuazioni fenologiche, ecc. è possibile individuare l'indice della performance fotosintetica (PI) e il test JIP usando l'analisi OJIP.

### 3.6.2 Potenziale idrico degli aghi o dei germogli

L'acqua assorbita dalle radici viene trasportata sulle foglie dove traspira sotto forma di vapore. Ciò provoca una depressione che attira le colonne del liquido circolante che si muove verso l'alto attraverso una serie di vasi costituiti da piccole cellule interconnesse tra loro.

In questo modo la soluzione presente nello xilema si trova sottotensione e quando le radici non sono in grado di assorbire una sufficiente quantità di acqua la tensione aumenta e provoca problemi all'interno della pianta.

Lo stato dell'acqua all'interno della pianta viene tradizionalmente interpretato come potenziale idrico che è la misura dell'energia libera dell'acqua presente nei vasi in relazione a quella dell'acqua pura ed è costituito

dalla sommatoria del potenziale dovuto all'osmosi, allo stato delle pareti cellulari, alla pressione idrostatica e all'effetto della gravità.

$$\Psi_{TOT} = \Psi_s + \Psi_m + \Psi_p + \Psi_g$$

$\Psi_s$  = deriva dal potenziale osmotico e dipende dal numero di molecole presenti in soluzione.

$\Psi_m$  = deriva dall'acqua che aderisce o viene adsorbita dalle pareti ed è perciò in relazione alle sostanze non solubili.

$\Psi_p$  = deriva dalla pressione idrostatica ed è posto in relazione alla pressione atmosferica e al turgore delle cellule.

$\Psi_g$  = deriva dall'effetto dovuto alla gravità che spinge l'acqua verso il basso.

Il potenziale idrico si misura in mega pascal MPa che si ottiene dividendo l'energia per il volume di una mole di acqua.

$$1 \text{ MPa} = 0.018 \text{ MJ mol}^{-1}$$

L'acqua si muove dalle zone a più alto potenziale idrico verso quelle a minore potenziale.

Le differenze di potenziale tra il suolo, le radici, il sistema xilematico, le foglie, le pareti cellulari e gli spazi intracellulari sono relativamente bassi e compresi in linea di massima nell'intervallo tra  $-0.3 \text{ MPa}$  e  $-0.8 \text{ MPa}$ .

Il potenziale idrico è invece di gran lunga maggiore nel passaggio tra gli stomi e l'atmosfera. In questo caso infatti raggiunge i  $-95.2 \text{ MPa}$  costituendo la maggiore fonte dell'energia necessaria per la traspirazione.

Il potenziale idrico di una pianta si misura attraverso la camera a pressione nella quale si inserisce una foglia appena raccolta alla quale è stato tagliato il picciolo con una lama affilata, si applica una pressione fino a che non si verifica la fuoriuscita dell'acqua in corrispondenza del taglio del picciolo.

La tensione si esprime in valori negativi ed è più alta maggiore è lo stress ossia il deficit idrico dell'acqua presente nel tessuto.

### 3.7 Apparato ipogeo

Perdita di soluti dalle radici

Per eseguire la valutazione della perdita di soluti dalle radici è necessario avere un campione rappresentativo di 250-500 mg di radici fini. Queste devono essere state raccolte, lavate in acqua fredda e immediatamente riposte in recipienti chiusi contenenti acqua distillata che devono essere mantenuti al buio a  $20^\circ\text{C}$  per 24 ore.

Superata questa fase i contenitori vengono agitati accuratamente e la salinità della soluzione viene saggiata con un conduttimetro.

Le radici vengono quindi poste in stufa a  $110^\circ\text{C}$  per 10 minuti dopodiché vengono lasciate a temperatura ambiente e inserite in acqua deionizzata sulla quale verranno effettuate ulteriori misure di conduttività. Quest'ultimo dato viene considerato quello di conduttività massima, viene riportato a 100 e il valore della prima misurazione si esprime come percentuale di quest'ultima. All'interno della pianta è preferibile effettuare almeno 4 misurazioni.

Le piante sono sottoposte alle condizioni ambientali e agli effetti degli organismi che in alcuni casi possono comportarsi da agenti di malattia.

Si definisce malattia una serie di risposte delle cellule o dei tessuti all'intervento di un organismo patogeno o di fattori ambientali sfavorevoli che si estrinsecano in cambiamenti della forma o delle funzioni che possono portare al deperimento o alla morte di parte o dell'intera pianta.

I vegetali reagiscono normalmente alla presenza delle alterazioni attraverso modificazioni che possono comparire sulla chioma, sul tronco e sulle radici e che costituiscono le manifestazioni esteriori dell'alterazione denominate sintomi.

Le più comuni modificazioni si possono verificare attraverso:

- cambiamenti di colore della chioma;
- disseccamenti di foglie, rami o branche;
- morte di foglie o di porzioni di rami o branche;
- comparsa di malformazioni;
- deviazione dallo sviluppo normale ;
  - necrosi corticali (cancri);
  - necrosi di tessuti e di organi;
  - presenza di essudati;
  - variazioni della consistenza e della struttura di foglie, germogli, rami, branche, tronco, radici ;
  - variazioni della consistenza meccanica dei tessuti legnosi ;

### **3.8 Cambiamenti di colore della chioma**

Il cambiamento di colore è la caratteristica più evidente e compare più rapidamente tra tutti i sintomi che si verificano sulla chioma delle piante.

Tale modificazione è sostanzialmente aspecifica, si verifica in quasi tutte le alterazioni e può essere paragonata alla febbre per gli animali a sangue caldo.

Inoltre il cambiamento di colore delle foglie è fisiologico in autunno per conifere e latifoglie caducifoglie e in primavera per la perdita periodica dei segmenti fotosintetizzanti in quelle sempreverdi.

Dal punto di vista sintomatologico la denominazione ricorrente è quella di clorosi e viene definita come la perdita del colore verde per mancanza o per distruzione della clorofilla. La clorosi può assumere varie forme e viene più specificatamente indicata con altre denominazioni: albinismo, eziolamento, giallume, mosaico, screziatura .

I cambiamenti di colore possono coinvolgere anche le sezioni non fotosintetizzanti del lembo fogliare, in questo caso si può verificare la comparsa di argentatura, piombatura, arrossamento

### 3.8.1 Disseccamenti di foglie, rami o branche

Si definisce disseccamento il rapido avvizzimento di vaste zone del fogliame, dei germogli, dei rami o delle branche.

Costituisce la disidratazione completa di un organo in seguito alla necrosi dei tessuti. Se tale alterazione perdura può coinvolgere anche le parti legnose provocandone la morte. Il sintomo anche in questo caso ha un carattere fondamentalmente a specifico e può avere origine locale o sistemica. Nel primo caso è legato alla necrosi corticale di rami o di branche, nel secondo a fenomeni di trasporto idrico originatesi nell'apparato ipogeo o epigeo. Non ha quindi un carattere diagnostico specifico ma è utile per individuare il sito primario dell'alterazione che permetterà nella maggioranza dei casi di riconoscere l'agente causale della malattia.

Tipici sintomi che si possono inquadrare in questo raggruppamento sono, l'apoplessia, l'allessatura, l'appaesimento, l'avvizzimento, la filloptosi, l'oligofillia e il deperimento.

### 3.8.2 Comparsa di malformazioni

Si definisce malformazione qualsiasi accrescimento di organi in forma anomala che possono dare origine a masse ipertrofiche e iperplastiche che portano alla neoformazione di organi tondeggianti e di vario colore nelle parti ipogee ed epigee .

Esse possono essere dovute a forme virali, batteriche, fungine, insetti, acari, nematodi, ecc. Particolare importanza possono avere in certe situazioni le malformazioni indotte da diserbanti ormonici che con la loro azione provocano la totale modificazione della zona generatrice del lembo fogliare e di altre parti le quali risultano normalmente quasi irriconoscibili.

Malformazioni particolari sono quelle che si verificano in presenza di cavità interne provocate dalla carie. In questo caso è importante notare che il tronco e le branche cave all'interno possono assumere una conformazione di tipo tondeggiante e a botticella che è assolutamente anomala e contrasta con il normale sviluppo dell'organo colpito. Ciò può indirizzare le ricerche sulla causa della malformazione nella deficienza strutturale interna anche in assenza di sintomi esterni evidenti. Caso tipico del marciume basale o della carie causata da *Heterobasidion*.

Tipici sintomi sono: bollosità, , ipertrofia , nanismo , gigantismo , lenticellosi e, rosetta , scopazzo, fasciazione, tubercolo,tumore , galla.

### 3.8.3 Deviazione dallo sviluppo normale

E' un'interruzione del getto apicale che provoca uno squilibrio nei rapporti ormonali e modifica lo sviluppo della pianta che ha gravi problemi per recuperare la sua architettura.

Necrosi di tessuti e di organi

Si riferisce alla comparsa di aree più o meno ampie e scure conseguente alla morte più o meno rapida delle cellule e alla degenerazione del protoplasto. Essa si può verificare su un complesso di cellule e un intero organo, in questo caso si definisce generalizzata o può essere limitata a poche cellule e si definisce localizzata.

Può essere provocata da svariatissime cause e dovuta a funghi, batteri, virus, insetti, acari, nematodi, ecc. La necrosi può essere definita in vario modo in relazione:

- al sito in cui si localizza: germogli ,cuore , midollo, gemme , nervature, corticale) ecc..
- ai tessuti colpiti: colenchimatica, parenchimatica, vascolare, floematica.
- agli agenti patogeni che la provocano: batteri, funghi, insetti , sole

Necrosi corticale

Particolare rilevanza possono assumere le necrosi, degli organi legnosi esterni quali la corteccia, il cambio e le prime porzioni dello xilema, che si manifestano con depressioni, disseccamento del tessuto, fessurazioni, distacco parziale del periderma, che normalmente prendono il nome di cancro

Il cancro può essere definito in vario modo in relazione:

- all'entità del tentativo di cicatrizzazione e alla perdita di tessuto corticale - cancro aperto o chiuso
- all'organo colpito - cancro dell'innesto, dello stelo, corticale, rameale, radicale
- alla pianta colpita - cancro del castagno, cancro del cipresso, cancro del larice , cancro del platano, ecc.
- all'agente causale - fungino, batterico , ecc.
- al suo aspetto - cancro carbonioso, cancro nero, cancro a bersaglio , cancro resinoso.

### **3.8.4 Presenza di essudati e incrostazioni**

Le piante emettono, degli essudati liquidi contenenti sostanze più o meno dense che normalmente si rapprendono quando giungono in contatto con l'aria. Tali emissioni sono caratteristiche di grandi gruppi di specie vegetali. Le conifere infatti emettono resina, le drupacee gomma, le fagaceae derivati del tannino. Tali flussi sgorgano all'esterno attraverso soluzioni di continuità e derivano dalla lisi delle cellule parenchimatiche provocata da cause biotiche quali funghi, batteri, artropodi, ecc ed abiotiche

Essi possono comparire in molte parti della pianta e indicano la presenza di alterazioni in alcuni casi anche molto gravi quali il mal dell'inchiostro i marciumi radicali, le gommosi parassitarie ecc. ,

Un particolare tipo di essudato può essere considerata la melata che è l'emissione di sostanze zuccherine che può essere fisiologica in caso di eccessi di calore o parassitaria per la presenza di insetti.

Su di essa si sviluppano numerosi organismi fungini che si accrescono saprofitariamente e provocano la comparsa di masse miceliari nere e fuliginose che incrostano le foglie e le superfici degli organi aerei e prendono perciò il nome di fumaggini.

### **3.8.5 Variazioni della consistenza e della struttura di foglie, germogli, rami, branche, tronco, radici**

La variazione della consistenza è chiamata in termini generali marciume che può essere meglio definito dalla consistenza che assume il tessuto a seguito della trasformazione.

Essa è dovuta a svariatissime cause fra le quali le più comuni sono le malattie di natura batterica e fungina.

Marciume molle – Perdita di consistenza di un tessuto che diviene molle ed umido.

Mummificazione – Modificazione di un frutto che disidratandosi assume minori dimensioni e una consistenza di tipo legnoso.

Carie – Trasformazione dei tessuti compatti tipicamente quelli legnosi, che si trasformano in elementi fragili, friabili e inconsistenti.

Allessatura - Particolare variazione della consistenza dei tessuti fogliari o dei germogli dovuta a sbalzi termici particolarmente rilevanti.

### **3.9 Stato fitosanitario dell'apparato ipogeo**

Si valuta prelevando campioni di apparato radicale a una profondità di circa 5-20 cm e a una distanza di circa 0,5 metri dal colletto della pianta.

Le radici vengono chiuse in sacchetti di plastica e al termine del rilievo in campo, immerse in acqua per 6 ore in modo tale da ammorbidire il terreno ed eliminarne i residui più grossolani.

Esse vengono successivamente lavate lasciandole in acqua corrente per una notte e successivamente poste in acido ossalico  $3 \times 10^{-3}$ , quindi risciacquate e dopo aver aggiunto nuovamente la stessa sostanza alla medesima concentrazione, poste per 12 ore in oscillatore a bassa velocità.

Questa operazione viene eseguita molto delicatamente per evitare rotture, danneggiamenti o perdite degli apici.

Contemporaneamente viene eseguito uno studio per accertare l'assenza di patogeni all'apparato radicale che potrebbero altrimenti falsare i dati ottenuti.

Infine, le radici di ciascuna pianta vengono conservate in sacchetti di plastica bucherellati e posti in contenitori riempiti con idoneo fissativo e tenuti in frigorifero a 4°C, fino al momento dell'osservazione.



## Capitolo IV

### 4 La formazione di radici

La formazione di radici avviene non solo dietro l'apice radicale, oltre la zona di distensione, ma anche su tessuti secondari. Uno studio recente ha confermato che la formazione di radici primarie su strutture secondarie rappresenta un evento comune, in condizioni normali (American Journal of Botany 89(9): 1361–1372. 2002. “*the formation of adventitious roots on root axes is a widespread occurrence in field-grown dicotyledonous plants*” di DOMINICK J. PAOLILLO, JR. AND RICHARD W. ZOBEL).

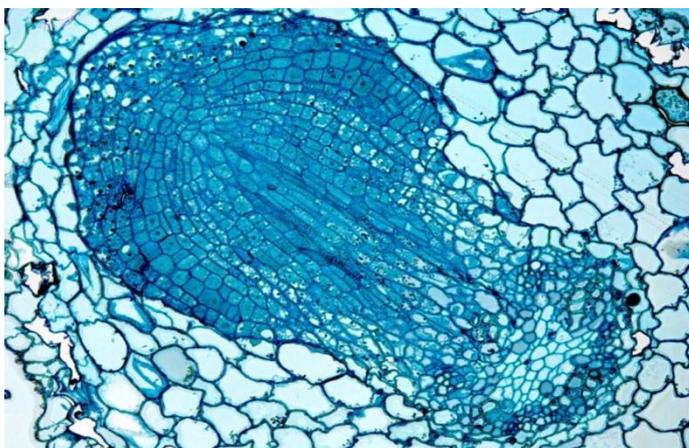


Foto 19 Sviluppo di radice laterale su radice in struttura primaria, per proliferazione delle cellule del periciclo, in

Lo studio riguarda la diagnosi delle caratteristiche anatomiche delle radici “avventizie” su 22 specie dicotiledoni appartenenti a 12 famiglie diverse e nove ordini distanti filogeneticamente tra di loro. Queste radici svolgono un ruolo importante per il metabolismo della pianta.

Studi recenti e meno recenti (Jones, 1943; Reynolds, 1975; Burke and Raynal, 1994; Fahey and Hughes, 1994; Eissenstat, Wells and Yanai, 2000; Gill and Jackson, 2000; Norby and Jackson, 2000; Baker et al., 2001) ribadiscono il concetto che una larga parte delle radici laterali del sistema radicale è normalmente persa senza contribuire alla ulteriore crescita del sistema radicale. Le radici in struttura primaria compongono la parte assorbente del sistema radicale. Con la crescita vi è il passaggio alla struttura secondaria, in cui avvengono mutamenti anatomici (Esaù, 1965) che ne riducono la capacità di assorbimento dal suolo (Kramer, 1983; Mac Fall, Johnson e Kramer, 1991; Escamilla e Comerford, 2000).

La formazione di radici primarie su tessuti secondari è un evento comune in condizioni normali questo studio ha effettuato la diagnosi delle caratteristiche anatomiche delle radici “avventizie” su 22 specie dicotiledoni appartenenti a 12 famiglie diverse e nove ordini distanti filogeneticamente tra di loro perché queste radici possono svolgere un ruolo importante per il metabolismo della pianta. Recenti e più datati studi (Jones, 1943; Reynolds, 1975; Burke and Raynal, 1994; Fahey and Hughes, 1994; Eissenstat, Wells and Yanai, 2000; Gill and Jackson, 2000; Norby and Jackson, 2000; Baker et al., 2001) stabiliscono il concetto che una larga parte

delle radici laterali del sistema radicale è normalmente perso senza contribuire alla ulteriore crescita del sistema radicale. Le radici in struttura primaria compongono la parte assorbente del sistema radicale, perché nella crescita passando a struttura secondaria subiscono cambiamenti anatomici (Esaù 1965) che riducono la capacità di assorbire dal suolo, anche se le radici in crescita secondaria mantengono “ridotte” capacità di assorbire acqua e sostanze nutritive (Kramer 1983; Mac Fall, Johnson e Kramer 1991; Escamilla e Comerford 2000) la domanda che ci poniamo è da dove viene la nuova popolazione di radici assorbenti ?

La risposta a questa domanda è come sappiamo la crescita dei meristemi apicali principali e secondari e sul periciclo di vecchie radici preesistenti nel tessuto primario che avviene la produzione di nuove radici. Studi recenti e meno recenti (Jones, 1943; Reynolds, 1975; Burke and Raynal, 1994; Fahey and Hughes, 1994; Eissenstat, Wells and Yanai, 2000; Gill and Jackson, 2000; Norby and Jackson, 2000; Baker et al., 2001) ribadiscono il concetto che una larga parte delle radici laterali del sistema radicale è normalmente perso senza contribuire alla ulteriore crescita del sistema radicale. Le radici in struttura primaria compongono la parte assorbente del sistema radicale. Con la crescita vi è il passaggio alla struttura secondaria, in cui avvengono mutamenti anatomici (Esaù, 1965) che ne riducono la capacità di assorbimento dal suolo (Kramer, 1983; Mac Fall, Johnson e Kramer, 1991; Escamilla e Comerford, 2000).

Una radice di questo tipo può essere definita “ accidentale “ perché la sua origine contrasta con la formazione di radici formatesi su tessuti primari del periciclo. L’uso del termine accidentale si adatta ad una definizione “ampia” di radici di radici avventizie come quella data da Hayward 1938 da Esaù 1965 e da Fahn 1990, pur non escludendo nessuna applicazione del termine in questo studio ci riferiremo solo su radici in struttura primaria che hanno origine da radici “parentali” in struttura secondaria. L’importanza delle radici avventizie per la comprensione della “strategia” del sistema radicale è evidente nella loro reiterazione. E una questione di interesse generale stabilire se la popolazione di radici assorbenti (idrotropiche) dipenda dalla proliferazione di meristemi apicali, tessuti in struttura primarie o secondaria o da entrambi. Pensiamo che la presenza di radici “avventizie sia di gran lunga sottostimata. Questa valutazione deve essere corretta perché le radici avventizie forniscono maggiore potenzialità di assorbimento intorno a radici che sono in crescita secondaria. Crediamo che le radici avventizie che si formano su assi in crescita secondaria avvenga in molte specie nel loro habitat naturale. La letteratura sottolinea la presenza di radici avventizie durante la rigenerazione dell’apparato radicale dopo allagamento e conseguente necrosi per ipossia dell’apparato assorbente (Kozlowsky 1984) o per la potatura (Wilcox 1955 Bogar e Smith 1965) Tuttavia radici avventizie si formano naturalmente su radici carnose di stoccaggio di *Pastinaca sativa* (Warning 1934) e in *Daucus carota* (Esaù 1940; Thibault 1946) come parte normale del modello di ramificazione. In *Medicago sativa* (Jones 1943) le radici avventizie sono state studiate per tutta la stagione di crescita. In questo studio le radici di piante diverse sono state esaminate per stabilire la reiterazione radicale su assi in struttura secondaria che è diffusa anche in condizioni che non prevedano situazioni di ipossia come l’allagamento. Lo scopo del nostro lavoro è quello di stabilire oltre ogni ragionevole dubbio che “normalmente si generano nuove radici su assi in crescita secondaria e mostrare come la loro presenza può essere diagnosticata utilizzando interpretazioni anatomiche. Crediamo che si debba distinguere tra radici di diversa origine quando studiamo schemi di radicamento.

Questo studio evidenzia caratteristiche generali delle radici “avventizie” e si occupa di esempi concreti per meglio comprendere le generalizzazioni.

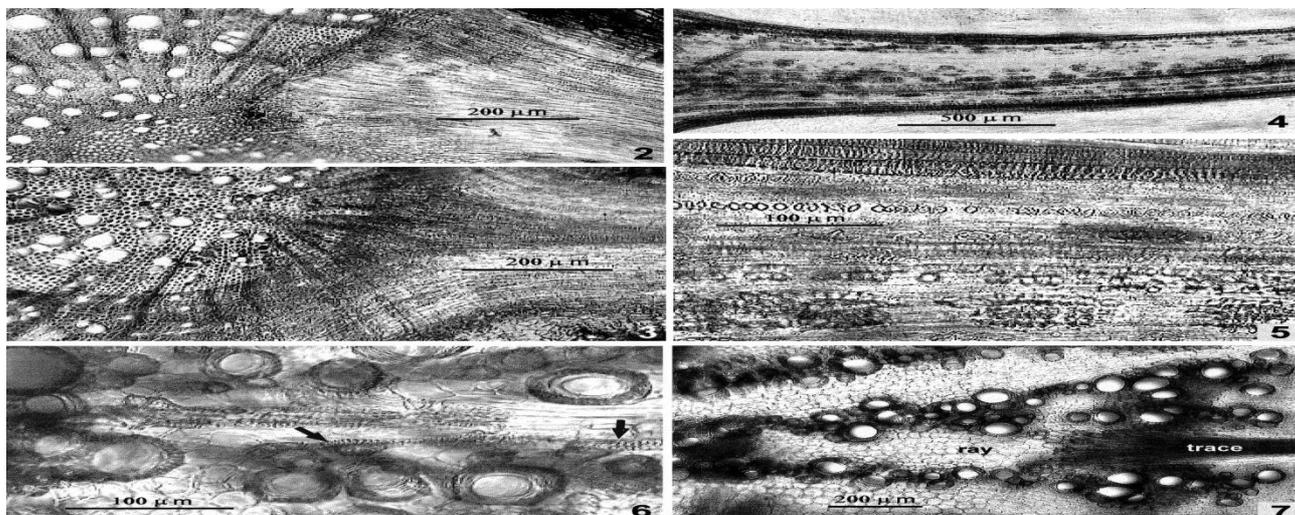


Fig. 2-7. Aspetti di tracce ramo. 2. Sezione trasversale dell'asse radice Acero che mostra l'inserimento del ramo della radice a destra. La radice laterale si formata nel pericycle della radice dei parentale perché l'inserimento dell'asse della radice laterale penetra nel cilindro legnoso dell'asse dei genitori. 3. Radice laterale accidentale di Acero attaccato a destra per completare l'anello di xilema secondario in asse parentale, con una interfaccia ampia che non penetra nel cilindro legnoso del asse dei parentale. Come nel caso di fig. 2, il cambio vascolare degli assi sono completamente integrati. 4. Traccia complessa di radice nella sezione radiale dell'asse parentale frammentazione degli elementi xilema all'interno del tracciato, a causa dell'estensione radiale della traccia con elementi vascolari periferici intatti. 5. Simile a fig.4, a maggiore ingrandimento. Diversi gradi di distruzione e diversi modelli di ispessimenti xylary muro elemento si verificano in luoghi diversi nella traccia. 6. Unione dello della traccia xilematica al centro dell'asse (estrema sinistra) Frammentazione limitata di elementi xilematici in questa parte del tracciato a causa della limitata l'espansione radiale dello xilema secondario. Alcuni legami all'inizio di xilema secondario sono visibili (freccie). Xilema da altre parti della traccia in sezioni adiacenti. 7. Traccia di radice accidentale nella sezione trasversale uniti alla parte opposta

del xilema secondario parentale in asse. La suddivisione del pannello di xilema secondario nella direzione l'esterna (da sinistra a destra) indica che il raggio si è formato attraverso la conversione delle iniziali assiale nel cambio vascolare.

Questa sezione illustra le caratteristiche anatomiche per la diagnosi di radici avventizie su assi a struttura secondaria e crea il contesto per valutare la possibilità di rigenerazione di radici avventizie Abbiamo pochi elementi per illustrare queste caratteristiche perché nella letteratura consultata vengono descritti con disegni approssimativi e descrizioni piuttosto che con fotografie.

1. Quando si forma una radice laterale la traccia può essere osservata fino allo xilema da dove si è originata (Esaù 1965, Byrne, Pesacreta e Fox 1997; Fahn 1990)
2. Quando una radice laterale è inserita sul'asse parentale il suo sistema vascolare confluisce con il sistema vascolare di origine (Byrne, Pesacreta e Fox 1977) pertanto la stratificazione di una nuova crescita mantiene inalterato il collegamento con il cambio vascolare secondario di origine. L'inserimento della radice laterale sullo xilema secondario del cambio vascolare parentale è a forma di V in sezione e si estende fino alla regione xilematica di origine.

3. Una traccia di radice laterale persiste per un lungo periodo di tempo, su una radice legnosa, l'asse parentale in crescita secondaria estende nella crescita la connessione con la traccia in relazione all'intensità e alla durata della vita della vecchia radice laterale sul cambio vascolare parentale e con la parziale distruzione dello xilema della radice laterale la traccia sarà riparata (ingrossandosi) con continui aggiunte di elementi vascolari compensando così la distruzione Thibault 1946 ha descritto questa caratteristica nella carota
4. Le tracce ingrossate delle radici laterali rimangono di solito intatte e sono connesse nello xilema secondario di origine. Nelle tracce ingrossate all'interno dei tessuti parentali è evidente in una parte apprezzabile della stessa una crescita in relazione con l'espansione radicale dei tessuti secondari di origine (Thibault 1946)
5. Nuovi elementi dello xilema vengono aggiunti lungo la traccia che mantiene la connessione sul cambio parentale secondario inoltre elementi aggiunti nella parte distale della traccia originano una deformazione
6. Se una radice avventizia ha la sua traccia i suoi elementi xilematici sono collegati con il sistema vascolare parentale
7. In *Pastinaca* sp. e in *Daucus carota* è stato riferito che le tracce formate nel periciclo parentale persistono nonostante la perdita delle radici laterali. Queste tracce persistenti delle radici avventizie che si formano superficialmente al sistema vascolare parentale, sono tese e riparate durante la crescita secondaria dell'asse parentale

Inoltre quando si trovano tracce ingrossate che originariamente servivano una radice formata nel periciclo il collegamento con lo xilema parentale rimane visibile. Per precisione una traccia ingrossata che serve più radici verrà indicata come traccia complessa questa oltre a mostrare la distruzione e la sostituzione degli elementi vascolari nella parte distale forma più primordi alla fine della traccia.

Le 22 specie prese in considerazione da questo lavoro sono distribuite in 12 famiglie diverse e distanti su un albero filogenetico per evitare correlazioni. La maggior parte delle radici osservate possono essere correlate come radici fini con ca. 0,5 mm di diametro, tuttavia è stato osservato che su radici legnose possono svilupparsi lateralmente avventizie che possono raggiungere lo sviluppo delle radici parentali, però le proporzioni di tali radici e la loro persistenza non è stata valutata (Paolillo e Zobe 2002)

Le radici avventizie rivelano l'inserimento su tracce di precedenti radici. Sulle 22 specie analizzate è stata valutata la profondità dell'inserimento sulle vecchie tracce fino all'osservazione delle stesse sul tessuto secondario parentale. Nelle analisi effettuate si sono evidenziate più radici laterali attraverso le sezioni di tracce diverse che penetrano i diversi strati dello xilema secondario di origine. La comparsa di tracce con origine di più radici laterali è una caratteristica delle radici non legnose. Sono state osservati diversi gradi di deformazione nei componenti dello xilema con tracce che si trovano in prossimità una dell'altra suggerendo che si tratta di radici di diversa età. Tra le tracce delle radici perse alcune sono collegate ai tessuti vascolari secondari parentali, alcune mostrano interruzione dei tessuti di conduzione non compensata con l'aggiunta di nuovi tessuti (fig.15). Indicando che è trascorso un periodo relativamente lungo dalla perdita della radice laterale senza stimolo di elaborazione di tessuti all'interno della traccia. L'immagine di una radice legnosa laterale ha fornito un modello per la diagnosi anatomica se la radice laterale era allineata con un raggio

dell'asse parentale è legata all'asse parentale da una larga base, questa situazione contrasta con la forma a V dell'inserimento di una traccia costituita nel periciclo parentale.

Inoltre Wilcox 1968 segnala la reiterazione di radici avventizie su cicatrici di radici laterali su *Pinus resinosa* Bogart e Smith riferiscono che dalle rimozione di una radice laterale si sono formate sopra e sotto la cicatrice di abscissione nuove radici su assi secondari di *Pseudotsuga menziesii*.

#### Radici avventizie associate a tracce complesse

Tracce complesse di vecchie radici laterali si sono ramificate alle estremità distali per formare fasci vascolari(vedi foto 8) tracce che sono entrate nelle radici avventizie reiterate sulla parte distale della traccia parentale. Alcune di queste tracce sono interrotte perché le presunte tracce della radice abscissa non sono più funzionali. Le caratteristiche anatomiche per tracce complesse si sono rinvenute anche in tracce che non si sono ingrossate e ramificate. Lo xilema di molte tracce complesse può essere seguito fino allo xilema parentale. La perdita di elementi degradati dello xilema non più funzionale in una traccia rende incerta l'identificazione tranne che il collegamento allo xilema parentale(fig.4,5). Con il tempo si aggiungono elementi vascolari lungo la traccia complessa partendo dalla periferia fino al sistema vascolare secondario parentale così le parti più periferiche fino allo xilema parentale e integrandosi al sistema vascolare di origine unendo così le parti periferiche al sistema vascolare parentale(fig.8/9). I primordi delle radici osservate delle radici osservate nel corso di questo studio erano posti sia nella zona esterna adiacente al cambio vascolare parentale o appena sotto il periderma. Questi eventi confermano che una radice accidentale ha una traccia unica il suo primordio si è formato nel cambio vascolare e che la formazione di più radici all'estremità è compatibile con una localizzazione della radice con i primordi pertinenti.

#### Relazioni spaziali tra le radici avventizie

Si potrebbe essere portati a sostenere che tracce preesistenti abbiano influenzato la posizione di nuove tracce. Bogart e Smith 1965 riferiscono che i raggi sono importanti per la formazione di radici avventizie originatisi in risposta alla potatura delle radici. La situazione suggerita nella fig.3 in cui il raggio nel quale si è formata la radice non è di grandi dimensioni perché nell'asse xilematico secondario parentale non ci sono raggi di grandi dimensioni. Si può concludere che l'associazione dei raggi e tracce laterali riflettono in larga misura il coordinamento durante lo sviluppo senza rilevare però causa-effetto. Per esempio raggi di grandi dimensioni formati in coordinazione con radici nel periciclo, la persistenza del raggio nel tessuto vascolare secondario potrebbe essere condizionata dalla persistenza della traccia della radice laterale. Allo stesso modo la formazione di radici multiple da una traccia singola potrebbe essere condizionata da situazioni endogene(ormonali) ed esogene (ossigenazione) che possono condizionare il processo.

Una panoramica sulla formazione delle radici avventizie

La letteratura sulle reiterazioni di radici avventizie su assi radicali offre sufficienti elementi per indagare il fenomeno (Esaù 1934, Kozlowski ) è molto diffusa oltre che in situazioni di ipossia temporanea o di potatura di radici. come è possibile vedere nella scheda sotto. Tracce complesse aumentate con le sovrapposizioni di elementi vascolari che supportano all'estremità la formazione di nuove radici. Molte nuove radici si sono sviluppate su cicatrici di radici abscisse. Una traccia che si è formata su una radice persistente la stessa può essere convertita in una traccia complessa alla perdita della radice laterale e una traccia complessa può

produrre più radici ripetutamente ; pertanto l'asse parentale può formare radici accidentali continuamente utilizzando il cambio vascolare esterno per formare primordi radicali sia con o senza tracce complesse in radici legnose o semilegnose. Le tracce di radici avventizie possono sparire o persistere ed essere convertite in tracce complesse.

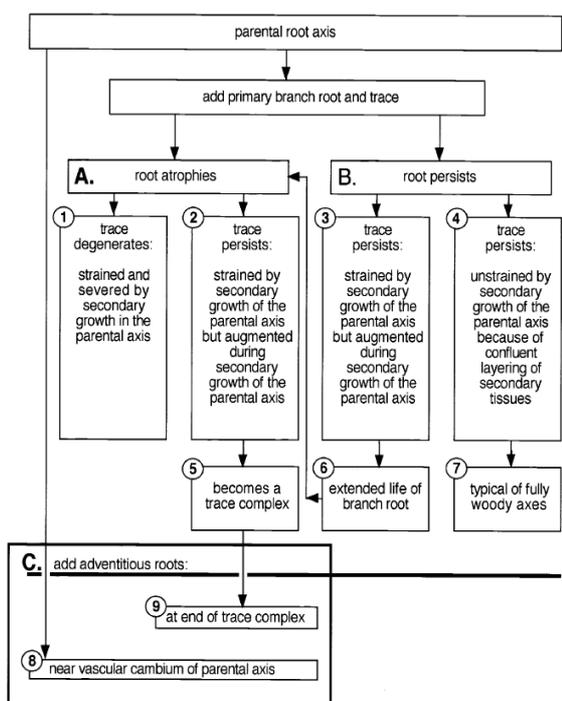


Figura 11 Diagramma di flusso generalizzato dello sviluppo delle ramificazioni dall'asse radicale principale; si mostrano gli alternativi destini delle radici e delle loro tracce, e la relazione del loro sviluppo all'originarsi di radici avventizie.

In radici legnose l'aumento di una traccia di radici laterali si realizza nel cambio vascolare integrato nel cambio vascolare integrato al cambio vascolare parentale in modo che la traccia presenta soluzione di continuità . la capacità diffusa nelle radici di reiterazione di nuove radici laterali può essere considerata innata per la rigenerazione reiterativa di tessuti.

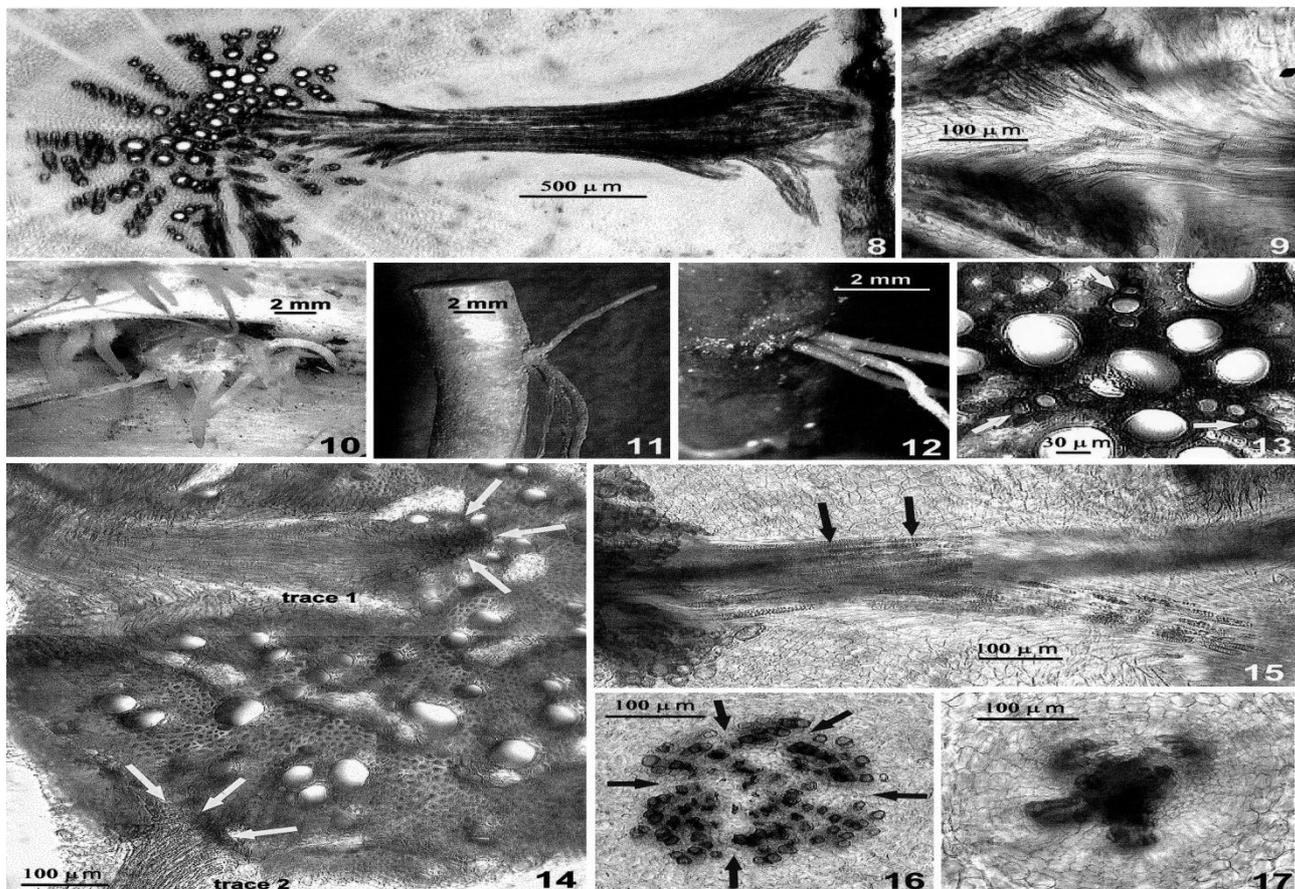


Fig. 8-17. Aspetti delle radici, le tracce del ramo laterale, e i complessi traccia. 8. Notevole aumento del complesso traccia in sezione trasversale dell'asse della radice laterale persa prima della reiterazione di nuove radici. La ramificazione cospicua del complesso traccia nella parte distale (a destra) continua in sezioni adiacenti. Le proiezioni belle del complesso traccia verso il centro dell'asse parentale sono disposti in modo che luoghi più periferici nel complesso traccia si legano ai più giovani strati di xilema secondario. La maggior parte della lunghezza del complesso traccia è inserita all'interno del floema secondario dell'asse dei genitori. 9. Sezione trasversale di erba medica mostrando attaccamento di nuove tracce alla periferia della xilema secondario dell'asse dei parentale. Questa sezione mostra l'attaccamento dei componenti più giovani della traccia, che coinvolgono elementi più anziani (quelli a sinistra), continuando nella traccia delle sezioni adiacenti. 10. Due gruppi di radici laterali sulla superficie della radice parentale. 11. Ramo radici in gruppo sulla superficie della radice parentale di erba medica. 12. Radici laterali in gruppo sulla superficie della radice parentale di dente di leone. 13. Sezione trasversale della corona *Vicia sativa*, mostrano xilema primario esarca incorporato in xilema secondario. I tre poli protoxylema sono indicati da frecce. 14. Sezione trasversale di un settore della radice parentale. Traccia 1 penetra verso il centro dell'asse, traccia 2 attribuisce va alla periferia. Le frecce indicano il termine distale delle tracce, come confermato nelle sezioni. La traccia periferici (traccia 2) non viene mostrata esattamente nel suo piano mediano. 15. Gruppo di tracce in sezione trasversale dell'asse dei parentale di dente di leone. Le tracce mostrano diversi gradi di tensione accumulata, gli elementi xilematici della traccia in alto nella foto sono intatti (frecce, la traccia prosegue a destra in sezioni adiacenti), mentre quelle nella traccia diretta in basso a destra nella foto sono in gran parte distrutte. Quest'ultima traccia serviva una radice, e la distruzione della traccia non veniva compensata con l'aggiunta di nuovi elementi xilematici. 16. traccia complessa nella sezione tangenziale dell'asse dei parentale di pastinaca mostra disposti a raggiera elementi tracheali e tessuti circostanti. Un sistema rudimentale di raggi è presente (frecce). Sezioni seriali verso l'interno mostrano che i settori della xilema visto da qui partono come unità che si collegano a vari strati di xilema secondario del asse parentale. Verso l'esterno i segmenti non corrispondono alle radici singolo ramo. 17. Aumento della traccia di, nella sezione tangenziale dell'asse parentale. L'organizzazione dei tessuti traccia è simile a quella in figura. 16. I segmenti della traccia xilematica visto in questa sezione si legano a diversi strati di xilema secondario dell'asse parentale. Una sola radice laterale ramo era unita alla traccia.

La radice avventizia reiterata sul callo di abscissione di una precedente radice può diventare persistente e legnosa; le radici avventizie svolgono un ruolo importante per il sostegno la sostituzione e ampliamento di radici fini nel suolo Pritehard e Roger 2000 sottolineano l'importanza di radici laterali nella dinamica della popolazione delle radici. In genere fattori ambientali stimolano la reiterazione e sono influenzati dai processi termici, disponibilità nutrienti, stress salini, stress da pascolo, e dalla concentrazione di CO<sub>2</sub> ( Snapp e Shennon 1992 Smucker 1993 Fahay e Hughes 1994 Dawson Greystom e Paterson 2000 Eissenstat, Pozzi e Yanai 2000 Gill e Jackson 2000 Narby e Jackson 2000 Pritehard e Roger 2000. I meccanismi cellulari alla base della produzione di radici laterali rispondono a fattori ambientali Pritehar e Roger 2000. Chiaramente i fattori che influenzano invece la crescita sono fattori ormonali. Trattandosi di risposte opportunistiche su disponibilità di risorse che però richiedono di essere sensibilizzate. V'è osservato inoltre che la rigenerazione e l'estensione della massa radicale non richiedono cambiamenti catastrofici né la perdita di radici. E' chiaro però che situazioni che consentono o provocano la formazione di radici laterali devono essere diffuse nel suolo come anche che la crescita di nuove radici avviene a spese della fitness degli assi parentali inoltre una radice accidentale può diventare persistente perché dà possibilità alle piante di ristrutturare il proprio apparato radicale reindirizzando la crescita primaria .

Concludendo la capacità di reiterazione di radici laterali è diffusa e può essere considerata una capacità innata, la radice reiterata avventizia può diventare persistente e legnosa svolgendo un ruolo importante per l'ampliamento e la sostituzione delle radici idrotropiche nel suolo.

La produzione di nuove radici avviene dunque dai meristemi apicali principali e dal periciclo di quelli secondari, in corrispondenza della traccia di vecchie radici esistenti nel tessuto primario.

Si tratta di radici queste ultime che potremmo chiamare avventizie. L'importanza di queste radici diviene cruciale per la comprensione della "strategia" di reiterazione del sistema radicale. È fondamentale stabilire se la popolazione di radici assorbenti (idrotropiche) dipenda dalla proliferazione di meristemi apicali in struttura primaria, da porzioni in struttura secondaria o da entrambi. È ritenuto che le radici avventizie che si originano su assi in crescita secondaria siano una condizione comune a molte specie nel loro habitat naturale. La letteratura sottolinea la presenza di radici avventizie durante la rigenerazione dell'apparato radicale, dopo allagamento e conseguente necrosi per ipossia dell'apparato assorbente (Kozlowsky, 1984) o a seguito di potatura (Wilcox, 1955; Bogar e Smith, 1965). Quindi si tratta di una reazione, come nel tentativo di ripristinare la funzionalità radicale, dopo che l'apparato radicale stesso ha subito un danneggiamento. Ma la reiterazione radicale su assi in struttura secondaria è diffusa anche in condizioni in cui non vi sia ipossia.



Foto 20 Anche il taglio delle radici produce come risposta la produzione di nuove radichette, come tentativo da parte della pianta di ripristinare la funzionalità radicale dopo aver subito un danneggiamento. (By Edward F. Gilman, professor Department of Environmental

Uno degli obiettivi del presente lavoro è proprio di verificare la rigenerazione di radici su assi in crescita secondaria e confermare come la loro presenza possa essere diagnosticata utilizzando interpretazioni anatomiche.

## **4.1 Verifiche sperimentali**

### **4.1.1 Formazione di una radice in struttura primaria**

#### **4.1.2 Materiale e Metodi**

Si sono prelevati su una radice in struttura primaria frammenti di radici di circa 1-2mm. Si è proceduto alla fissazione dei campioni in Glutaraldeide 4% a 4°C per 2 ore.

Sono stati effettuati tre lavaggi consecutivi in Tampone Cacodilato di Sodio 0,1M, successivamente si è proceduto alla POST-FISSAZIONE a 4°C in Tetrossido di Osmio 1% per 2 ore.

Tre lavaggi consecutivi in Tampone Cacodilato di Sodio 0,1M.

Disidratazione in concentrazioni crescenti di Acetone (20% - 30% - 50% - 70% - 90%) per 40 minuti ciascuna. Successivo passaggio in Acetone Assoluto (100%) per tutta la notte (overnight).

Inclusione progressiva in miscela Resina Epossidica Durcupam ACM e Acetone nella seguente modalità:

Resina al 20% per 1 ora e 30 minuti a 40°C;

Resina al 30% per 2 ore a 40°C;

Resina al 50% per 2 ore a 40°C;

Resina al 70% per tutta la notte a 40°C

Inclusione in Resina Pura (100%) per 2 ore a 40°C.

Polimerizzazione: posizionamento dei campioni in formelle di silicone con resina pura a 40°C per 24 ore e successivamente a 60°C per 72 ore

NOTA: Composizione di Resina Pura Durcupam ACM:

A/M - resina 10 ml

B - indurente 32 ml

D - elasticizzante 12 ml

C - acceleratore 0,8 ml

Taglio dei campioni in sezioni semifine con Ultramicrotomo Reichert-Jung

Allestimento vetrini per le osservazioni al microscopio ottico e colorazione del materiale con AZUR II 0,1%

### 4.1.3 risultati

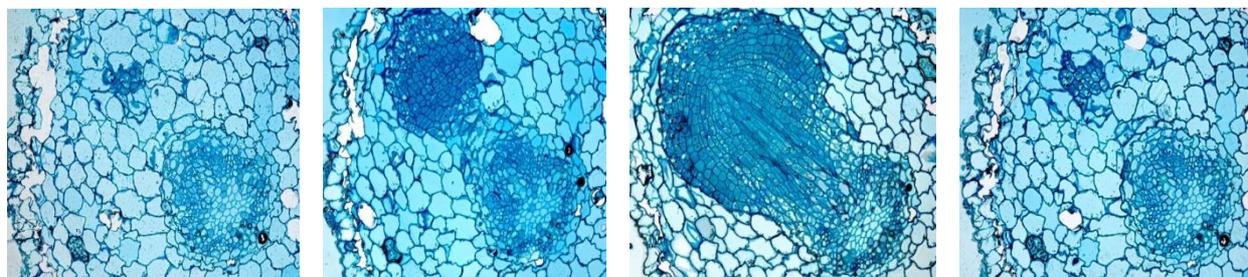


Foto 21-22-23-24- La radice si forma a partire dal cilindro centrale creando così una traccia (Strazzabosco L. Fanchin J)

## 4.2 Traccia di radice dopo la perdita dell'asse laterale

### 4.2.1 Materiale e Metodi

Si sono prelevati su una radice in struttura primaria frammenti di radici di circa 1-2mm. Si è proceduto alla fissazione dei campioni in Glutaraldeide 4% a 4°C per 2 ore.

Sono stati effettuati tre lavaggi consecutivi in Tampone Cacodilato di Sodio 0,1M, successivamente si è proceduto alla POST-FISSAZIONE a 4°C in Tetrossido di Osmio 1% per 2 ore.

Tre lavaggi consecutivi in Tampone Cacodilato di Sodio 0,1M.

Disidratazione in concentrazioni crescenti di Acetone (20% - 30% - 50% - 70% - 90%) per 40 minuti ciascuna. Successivo passaggio in Acetone Assoluto (100%) per tutta la notte (overnight).

Inclusione progressiva in miscela Resina Epossidica Durcupam ACM e Acetone nella seguente modalità:

Resina al 20% per 1 ora e 30 minuti a 40°C;

Resina al 30% per 2 ore a 40°C;

Resina al 50% per 2 ore a 40°C;

Resina al 70% per tutta la notte a 40°C

Inclusione in Resina Pura (100%) per 2 ore a 40°C.

Polimerizzazione: posizionamento dei campioni in formelle di silicone con resina pura a 40°C per 24 ore e successivamente a 60°C per 72 ore

NOTA: Composizione di Resina Pura Durcupam ACM:

A/M - resina 10 ml

B - indurente 32 ml

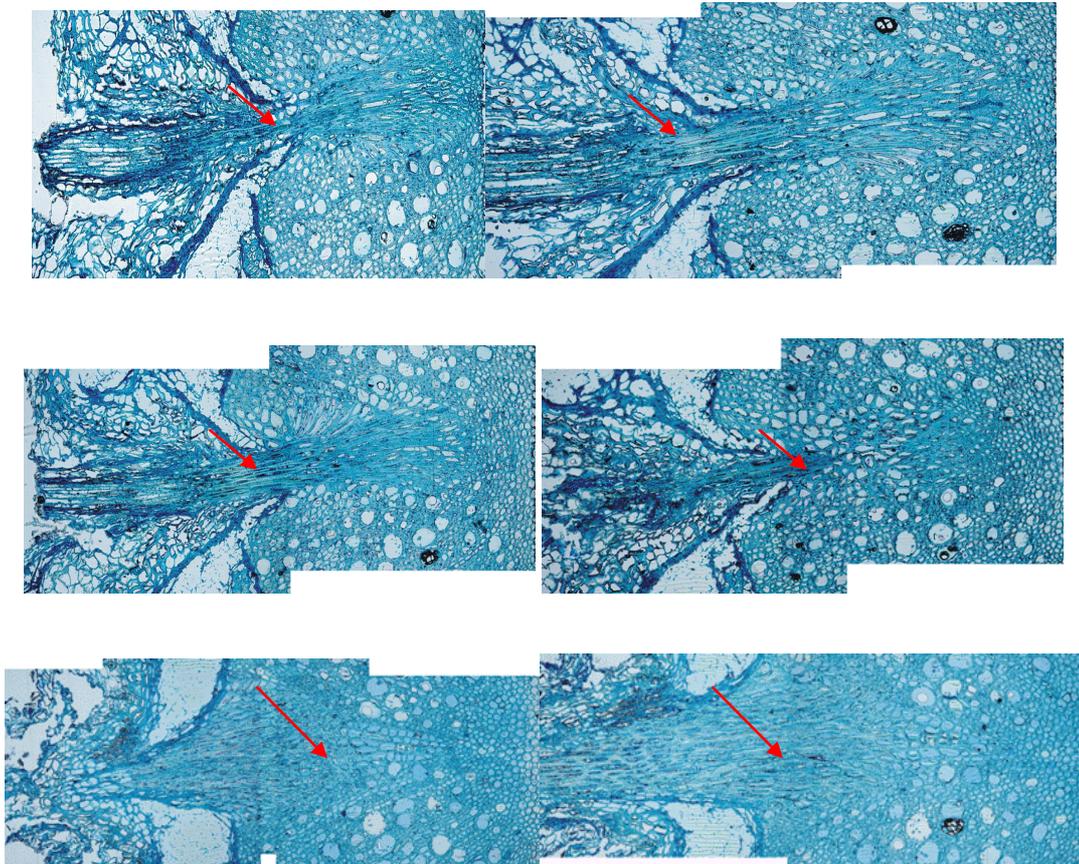
D - elasticizzante 12 ml

C - acceleratore 0,8 ml

Taglio dei campioni in sezioni semifine con Ultramicrotomo Reichert-Jung

Allestimento vetrini per le osservazioni al microscopio ottico e colorazione del materiale con AZUR II 0,1%

#### 4.2.2 Risultati



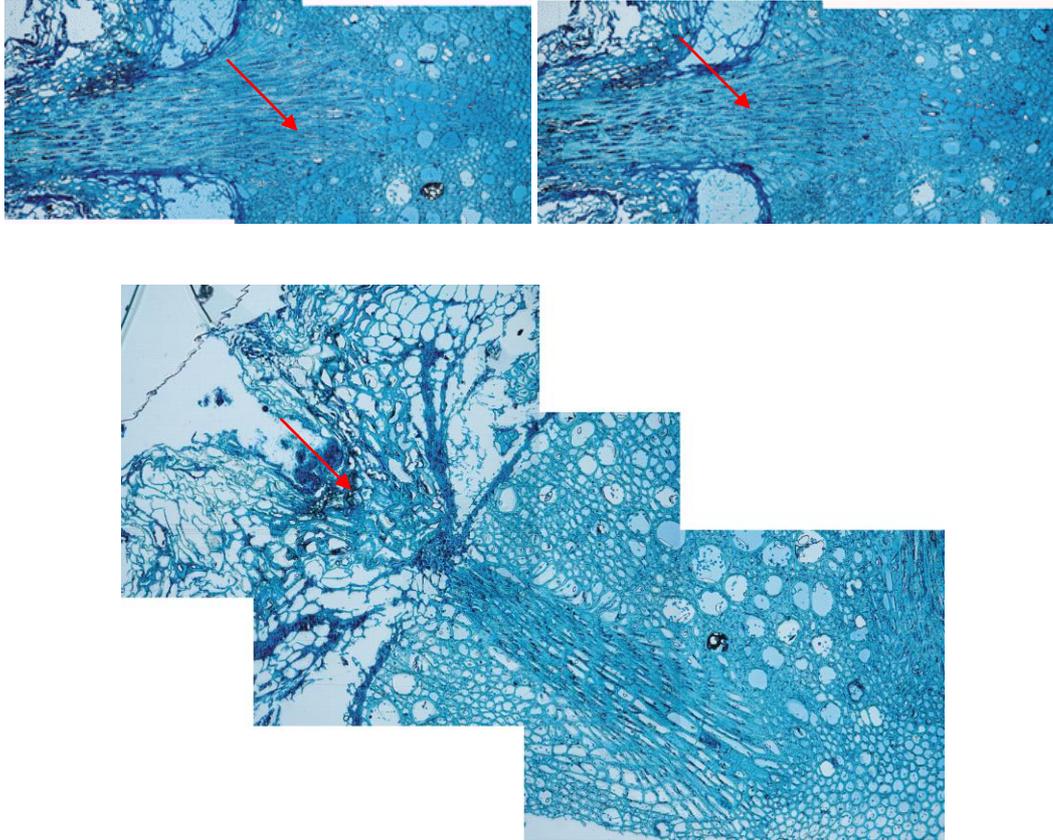


Foto 25-26-27-28-29-30-31 tracce di radice abscissa laterale( Fanchin jenny e Luigi Strazzabosco9

Come è possibile vedere all'interno della radice rimane una traccia collegata al cilindro centrale e questa traccia parte dal callo di abscissione della radice laterale persa

### 4.3 Tracce in tessuto vascolare parentale con aggiunta di tessuti xilematici

#### 4.3.1 Materiali e metodi

Sono state prelevate alcune radici in struttura secondaria sul piatto radicale di un ciliegio radicato a fronte della stecca n°1 di agripolis. Le radici prelevate sono state lavate in acqua corrente in laboratorio, sono stati selezionati alcuni segmenti di 10 cm di lunghezza. Si sono posti in beuta con acqua demineralizzata e sono stati lasciati in acqua per 48 ore.

Sono stati ridotti a segmenti di 5 cm e posti in microtono dove si sono fatte alcune sezioni posti su un vetrino e colorate con safranina.

I vetrini sono stati posti al microscopio ottico e fotografati.

### 4.3.2 Risultati

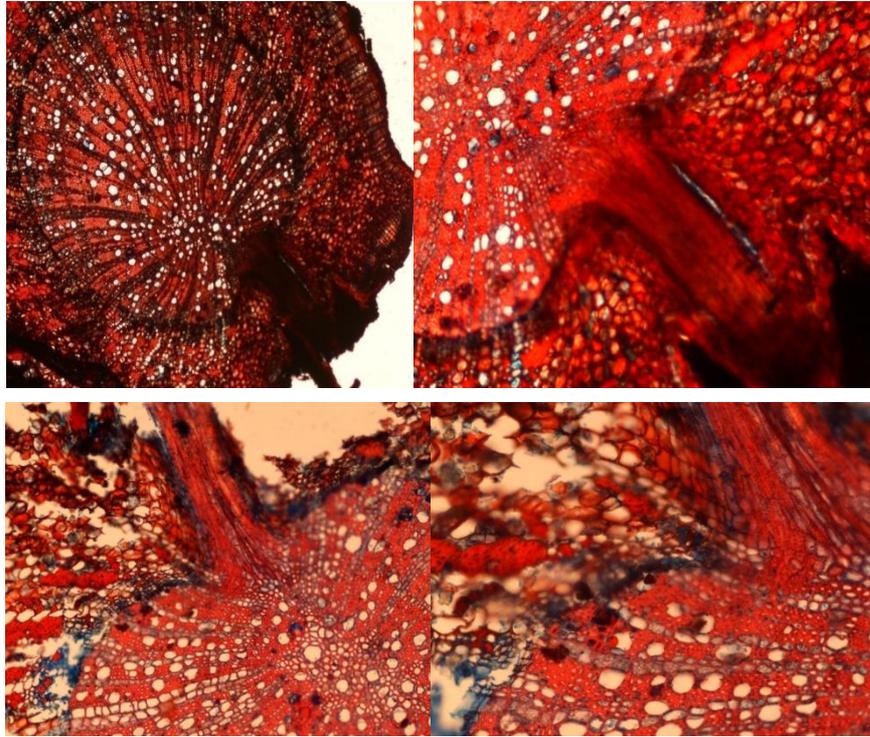


Foto 32-33-34-35 formazione di radici avventizie: radice di ciliegio con traccia inserita nel tessuto vascolare parentale secondario, con aggiunta di tessuti xilematici che si aggiungono lungo la traccia complessa partendo dalla periferia fino al sistema vascolare secondario parentale così le parti più periferiche fino allo xilema parentale e integrandosi al sistema vascolare di origine unendo così le parti periferiche al sistema vascolare parentale. (foto di A. Crivellaro e L. Strazzabosco).

La radice laterale si forma nel periciclo della radice parentale; l'inserimento dell'asse della radice laterale penetra nel cilindro legnoso dell'asse "parentale". Tutte le nostre ricerche confermano la letteratura internazionale sappiamo che la traccia della radice rimane evidente anche per più anni.

La radice laterale lascia una traccia ben evidente che può rimanere visibile anche per anni dopo la perdita dell'asse laterale



# Capitolo V

## 5 La Rizosfera del piatto radicale

Se la letteratura consultata e le osservazioni effettuate confermano che in radici in struttura secondaria le tracce di abscissione di rami laterali rimangono presenti e collegate con il cilindro centrale e da queste si possono reiterare nuove radici in struttura primaria, che ricordiamo sono in grado di assorbire soluti. Perché nel piatto radicale normalmente se non in presenza di stress endogeni o esogeni non si formano nuove radici e l'albero reitera nella ricrescita le radici dal colletto?

Questo capitolo è dedicato ad aspetti spesso ignorati o sottovalutati, ma purtroppo cruciali per la vita dell'albero. La pubblicazione del prof. Zucconi, relativa al problema conosciuto più o meno propriamente come "stanchezza del terreno", propone concetti che ritengo fondamentali per comprendere correttamente i fenomeni e i problemi che riguardano le piante veterane.

Soprattutto in ambiente urbano i problemi più frequenti "al piede" e negli strati interessati dalle radici degli alberi riguardano le cattive condizioni fisico-meccaniche del suolo, dovute a compattazione, a ristagno idrico, impermeabilizzazione dello strato superficiale (asfaltatura, pavimentazione, cementificazione ...); ma anche aspetti chimici e biologici, come la presenza di sostanze inquinanti, l'impoverimento di sostanza organica, di flora microbica e di nutrienti. Ma per le piante annose, anche in contesti più favorevoli, si assiste comunque ad un progressivo degrado del suolo, più spesso conosciuto come "stanchezza del terreno".

In realtà la stanchezza del terreno è solamente parte di una più generale alterazione del suolo, che può manifestarsi o meno sulla pianta, e che implica eventi diversi e non necessariamente correlati.



(Figura 12 da Zucconi – Brunzini 1996, modificata).

La stanchezza del terreno è componente di un più globale sistema di comunicazione allelopatica tra organismi, e rappresenta una condizione di inospitalità del terreno correlata all'accumulo di residui della pianta.



Figura 13 (Da: Zucconi – Brunzini – '96, modificata)

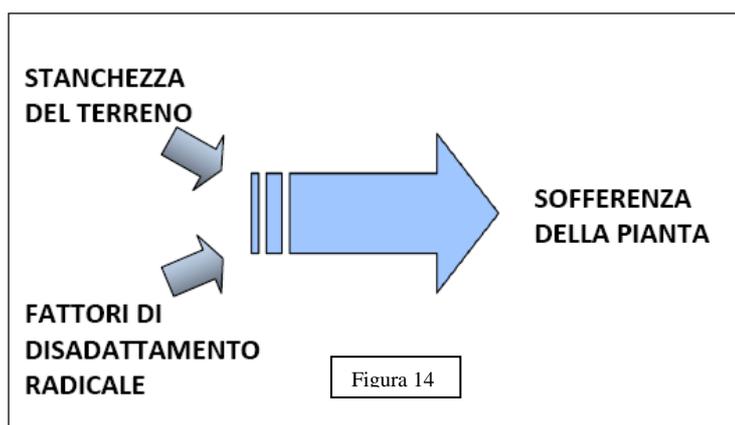


Figura 14

L'esistenza di stanchezza del terreno rappresenta una condizione necessaria ma non sufficiente.

Affinché la pianta ne soffra; quando ciò avviene è per il concorso di fattori di disadattamento radicale (Zucconi, 2001). L'apparato radicale è comunque un sistema tutt'altro che statico e indifferenziato: è caratterizzato piuttosto da complessità, plasticità e dinamicità ben maggiori a quella dell'apparato epigeo della pianta.

L'assorbimento radicale esaurisce rapidamente gli elementi nutrizionali disponibili, riducendo l'utilizzabilità del substrato. Gli elementi nutritivi si diffondono ad una velocità inferiore a quella dell'assorbimento radicale, per cui le radici si devono muovere incessantemente alla loro ricerca; da qui la formazione di nuove radici assorbenti, e l'abbandono di quelle obsolete.

Le condizioni del terreno sono sempre diverse, fisicamente e chimicamente (stratificazioni, matrice pedologica, nel tempo).

Una simile variabilità ambientale richiede quindi una differenziazione continua delle caratteristiche e del funzionamento delle radici perché esse possano risultare efficienti ....(Zucconi 2003).

Una componente fondamentale della difformità del terreno è la presenza di sostanze allelopatiche, responsabili delle relazioni tra radici, e capaci di influenzarne l'organizzazione territoriale e la ricerca di substrati. Queste sostanze influenzano anche il controllo dei patogeni e dei parassiti, la divisione dei territori tra diverse specie e loro rizocenosi infine, le allelopatie permettono di riaccederci alla stessa stanchezza del terreno, che ne rappresenta un caso particolare, associato ai cambiamenti biomici indotti nel terreno dal processo colturale.

Va tenuto conto però che il rinnovo radicale è un processo dispendioso. Tutto ciò si traduce in un costo energetico per la pianta. A sua volta "Il rinnovo invecchia il suolo", generando distrofia per la radice e aumentando l'esigenza di terreno nuovo in cui "operare".

L'apparato radicale presenta una differenziazione morfologica motivata dalle diverse attività che nell'insieme svolge: assimilazione, trasporto e sostegno.

Possiamo così distinguere più tipi di radici, che Zucconi (2003) così denomina:

- **radici assorbenti**, responsabili dell'acquisizione e dell'assimilazione dei nutrienti;
- **radici esploratrici**, con il compito di individuare nuovi spazi in cui poter assorbire;
- **radici portanti**, che raccordano le estremità assorbenti tra loro (radici di supporto) e con la chioma (radici scheletriche), sostenendo la pianta

-

#### **Le radici assorbenti**

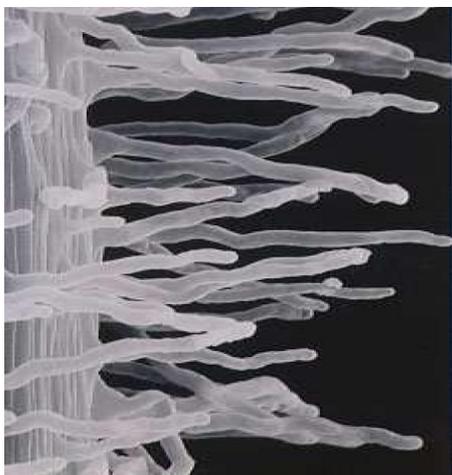


Foto 36 (Nalin G.) Hanno un ruolo paragonabile a quello delle foglie rispetto a rami e branche, dovendo posizionare le superfici attive in modo efficace e in relazione all'ambiente. È doveroso ricordare che il capillizio

Le radici esploratrici. Spesse circa 2 mm, e caratterizzate da rapido accrescimento, una volta individuata una nicchia di terreno favorevole ramificano rapidamente, producendo radici assorbenti. L'esaurimento delle riserve nutrizionali stimola la formazione di nuove radici, con un continuo ricambio delle reti assorbenti.

Si può quindi osservare che solo una minima parte delle radici (e della pianta) divengono permanenti; tra queste vi sono le componenti con funzione scheletrica.



Foto 37 Nuove radici sviluppatasi rapidamente a seguito di ossigenazione e rinnovamento del terreno, e quindi con ripristino di condizioni favorevoli (L. Strazzabosco).

Le radici assorbenti occupano in maniera esclusiva un territorio discreto di terreno (nicchia) che possono condividere con microorganismi rizosferici, ma non con altre radici.

La delimitazione tra apparati radicali, anche in monoculture, è evidente (“fase territoriale”, in cui vi è uno sfruttamento esclusivo del proprio territorio).

Il comportamento diviene particolarmente critico per le piante adulte, il cui apparato radicale si trova confinato per decenni tra spazi occupati da altre piante limitrofe.

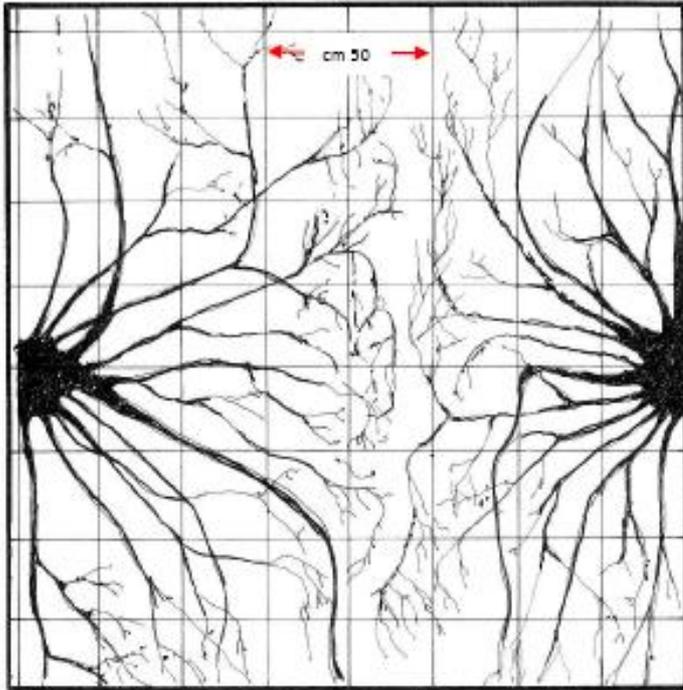


Figura 15 (Da: Baldini 1976, adattato e ridisegnato).

Ciò è reso possibile da una “marcatura chimica”, dovuta ad emissione di escreti radicali, capaci di segnalare ad altri organismi la presenza. Questo sistema di comunicazione allelopatica è dovuta a fattori definiti primari (Fattori Allelopatici Primari o FAP).

Ciò evita inutili competizioni e genera ordine nell’assorbimento (le competizioni tra radici per l’occupazione del substrato sono comunque intense, ma si esercitano nell’appropriazione del territorio).

Questi messaggi forniscono indicazioni per percorsi diversi, e comporta una migliore efficacia nello sfruttamento del suolo.

Le radici assorbenti occupano in maniera esclusiva un territorio discreto di terreno (nicchia) che possono condividere con microorganismi rizosferici, ma non con altre radici.

La delimitazione tra apparati radicali, anche in monoculture, è evidente (“fase territoriale”, in cui vi è uno sfruttamento esclusivo del proprio territorio).

Il comportamento diviene particolarmente critico per le piante adulte, il cui apparato radicale si trova confinato per decenni tra spazi occupati da altre piante limitrofe.

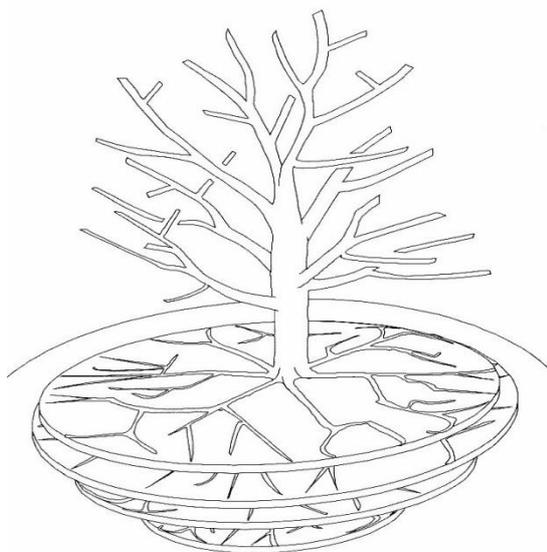


Figura 16 (Da: Baldini 1976, adattato e ridisegnato).

Il processo di assorbimento invecchia il territorio, creando condizioni repulsive per le radici stesse, che non possono proseguire in esso attività assorbente. Per cui si assiste ad una temporaneità del “comportamento territoriale”, definita “fase territoriale transitoria”. Tal evento aggiunge ulteriori input al comportamento radicale.

Le dimensioni dell'apparato radicale possono variare in rapporto alle difficoltà e alle opportunità che esso incontra. Si può assistere, perciò, ad una “crescita compensativa” delle radici, per garantire una adeguata e costante funzione anche in condizioni non ottimali del suolo.

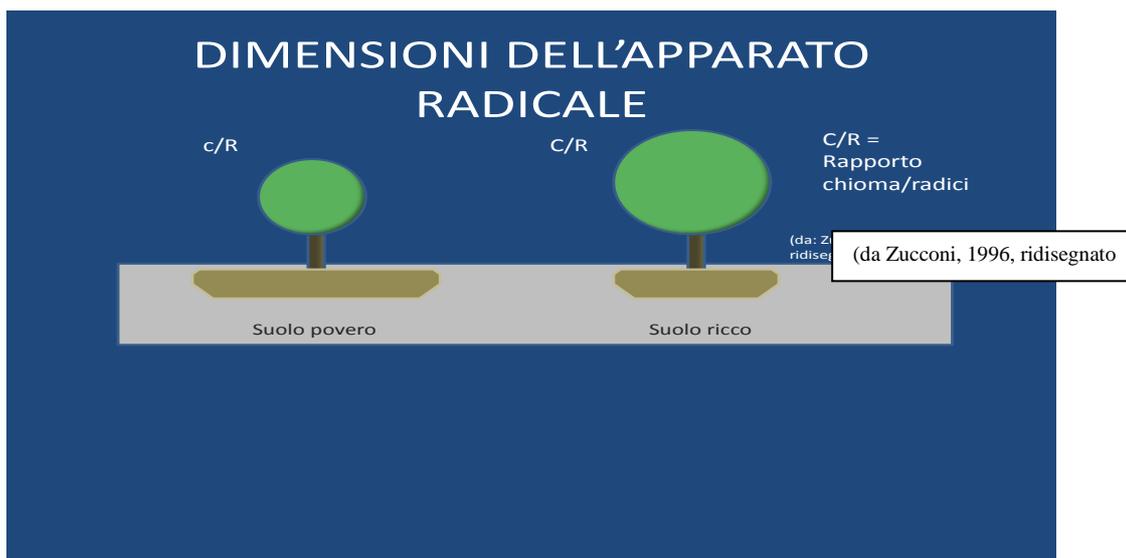


Figura 17 Crescita compensativa delle radici, in grado di bilanciare le disponibilità delle risorse del suolo. Ne consegue un rapporto aereo/radicale direttamente proporzionale alla fertilità (da Zucconi, 1996, ridisegnato)

## **5.1 La micro - migrazione radicale.**

Quando una radice esploratrice entra in un territorio libero, vi genera una rete di capillari assorbenti. L'estensione delle superfici assorbenti consente alla pianta di assorbire i nutrienti presenti in concentrazioni limitate e in forme non sempre solubili. Da qui la necessità di una grande efficienza nell'assorbimento e di una elevata mobilità. La continua estensione dei terminali assorbenti, guidata dalla sensibilità chemiotropica della radice stessa, costituisce una millimetrica migrazione (micro - migrazione). Tale migrazione è più evidente e significativa in terreni poveri, mentre si riduce in suoli ben dotati o concimati.

La progressione migratoria è proporzionale all'assorbimento richiesto dalla chioma, ed è massimo nella pianta in crescita. La micro - migrazione conduce alla formazione di una "corona" di radici assorbenti, collegate al fusto mediante una raggiera di radici scheletriche, con distribuzione che ricorda quella della chioma. Lo stesso processo genera una cavità priva di radici assorbenti all'interno dell'apparato radicale (cavitazione). Questa progressione contribuisce a creare un ancoraggio (supporto meccanico) sempre più esteso.

Nella cavità che si viene a formare, cessato l'assorbimento radicale, un po' alla volta viene ripristinato il livello di nutrienti minerali, grazie ad equilibri di scambio e alla mineralizzazione dei residui organici. Tale rinnovata disponibilità non è però accompagnata da un ritorno dei terminali assorbenti dell'apparato radicale medesimo, i quali continuano la loro progressione verso l'esterno. Si tratta, in definitiva, di una estensione unidirezionale (centrifuga).

La "propulsione centrifuga" della corona risponde infatti ad una sua incompatibilità ad assorbire nei territori precedentemente utilizzati (repulsione di origine allelopatica).

## **5.2 I FAS**

L'escrezione da parte della radice di vari prodotti, i residui radicali abbandonati (accumulo di residui) e la massa microbica che si sviluppa, liberano cataboliti che pervadono l'ambiente, con attività tossica per le radici (funzione allelopatica indiretta), che cresce in rapporto al loro accumulo e si esercita attraverso i prodotti del loro catabolismo, definiti Fattori Allelopatici secondari (FAS); i FAS si aggiungono agli escreti radicali (FAP) responsabili della esclusività dell'uso della nicchia.

FAP e FAS sono prodotti complementari, che si caratterizzano in fasi successive del rapporto radici/suolo e per le loro azioni.

## **5.3 Rinnovo del terreno e ricolonizzazione radicale**

La presenza di FAS comporta l'inutilizzabilità del proprio territorio all'interno della cavità (inutilizzazione), invasa dai propri residui. (In effetti, nessun organismo vivente sopporta i propri residui).

N.B.: il rinnovo del terreno all'interno della cavità favorisce infatti la ri-colonizzazione da parte delle radici della pianta stessa. La centrifuga della corona assorbente non rappresenta, dunque, una tendenza

predeterminata della radice: la pianta potrebbe formare radici assorbenti in qualunque territorio, purché favorevole



Foto 38 Reiterazione di nuove radici, all'interno della cavità radicale, a seguito della asportazione del terreno e della sostituzione con substrato poroso (Strazzabosco L.)

L'allelopatia è un meccanismo di relazione tra organismi basato sullo scambio di segnali chimici (sostanze chimiche o allelosostanze), che costituisce un sistema di comunicazione e organizzazione del bioma. Ne deriva un sistema comunicativo che ciascun organismo è in grado di interpretare, riconoscendo tramite i segnali la propria posizione e quella degli altri organismi, e la correlabilità delle funzioni reciproche.

Ciascun organismo cambia comportamento in rapporto alle condizioni che percepisce dagli altri, e a seguito di ciò varia anche i messaggi che emette, inserendosi nella dinamica globale di un sistema capace di uno sviluppo integrato di funzioni correlative.

I microrganismi tellurici sono parte integrante di questo sistema di comunicazione, in cui si inseriscono comportandosi in accordo ai segnali della pianta ed emettendone essi stessi (es. FAS).

L'esistenza contemporanea di eupatie e di dispatie organizza il corteggio (l'associazione delle cenosi). Questo avvantaggia l'umificazione, che è favorita dalla diversità della provenienza dei residui, e permette al processo complessivo di raggiungere un livello avanzato di organizzazione omeostatica, con stabilità per l'intero sistema.

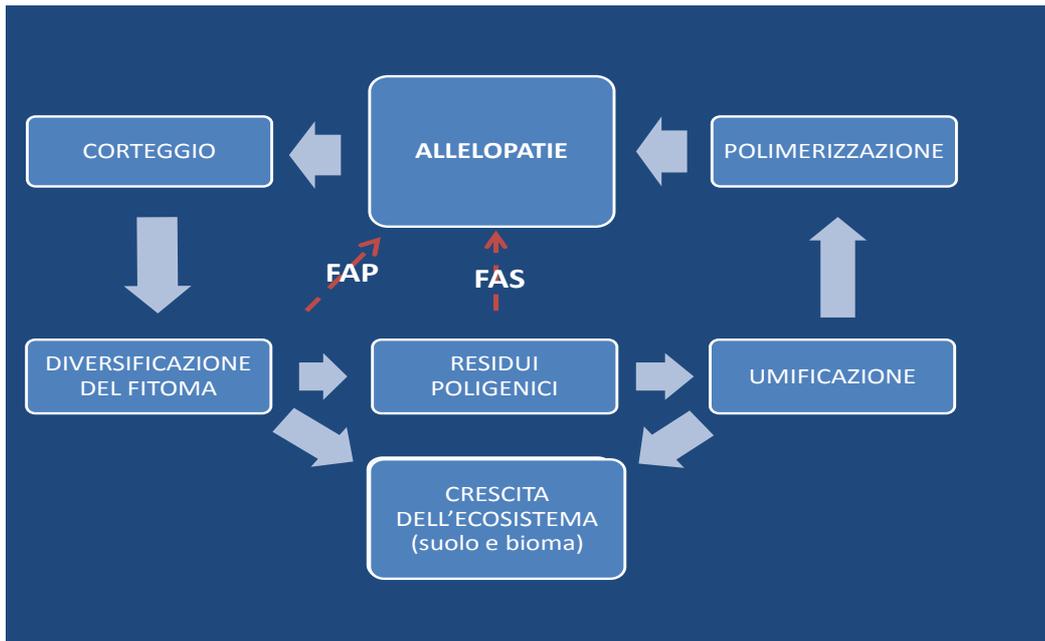


Figura 18 (Da: Zucconi – Brunzini, 1996, ridisegnato)

#### Sappiamo che:

- Da cicatrici di radici perse si formano nuove radici anche da assi in crescita secondaria, possono queste radici rappresentare una quota importante dell'apparato radicale raggiungendo le dimensioni dell'asse dal quale si sono originate riattivando l'assorbimento su radici che hanno perso o ridotto tale capacità
- La reiterazione di radici avviene naturalmente in risposta a stress ma anche da stimoli endogeni o esogeni quali stimoli ormonali, in risposta alla riduzione di CO<sub>2</sub> e all'aumento di O<sub>2</sub>.
- La rigenerazione di radici avviene a spese della fitness degli apparati radicali e la risposta qualitativa, e quantitativa dipende dalle riserve metaboliche
- La persistenza delle radici reiterate è legata alla permanenza delle condizioni nella rizosfera ottimali per la funzionalità radicale.



Scopertura dell'apparato radicale con la tecnica dell'Air-spade®: La tecnica utilizzata è basata sull'erogazione di aria compressa tramite un compressore da cantiere e permette di effettuare scavi senza arrecare alcun danno ai capillari. Lo scavo viene effettuato grazie ad un getto supersonico d'aria compressa (~2000 km/h) che penetra nei macropori del terreno creando delle fratture nel suolo. Le radici (che non hanno questo tipo di struttura) restano invece completamente illese



Rigenerazione dell'apparato radicale dopo 30 gg



Su un segmento di cm 17 si sono sviluppate oltre 100 radici in struttura primaria da calli dovuti alla perdita di assi laterali

## Capitolo VI

### 6. INDICE DI REATTIVITÀ ALL'OSSIGENAZIONE

Viene effettuato ponendo in una camera umida segmenti di radici di vario diametro, della lunghezza di cm 10 in assenza di luce e contando, dopo 8 giorni dall'inizio della prova, la comparsa di nuovi abbozzi o il numero degli abbozzi di radici laterali degenerate che manifestavano segni di callo e quindi capacità di reagire.

Assente	Assenza di calli nelle cicatrici delle radici degenerate
Molto debole	Presenza di calli sullo 0 – 10% delle cicatrici delle radici degenerate.
Debole	Presenza di calli sul 10-20 % delle cicatrici delle radici degenerate.
Media	Presenza di calli tra il 20% e il 50% delle cicatrici delle radici degenerate
Forte	Presenza di calli su più del 50 % delle cicatrici delle radici degenerate.





Quale è il periodo migliore per rigenerare le radici?

Quanto la rigenerazione influenza la fitness dell'albero?

Quali sono i parametri quantitativi e qualitativi per individuare la sostenibilità della rigenerazione, la prima parte delle nostre prove pur con un esperimento statistico poco potente ha voluto verificare se esiste una relazione continua tra diametro delle radici e risposta alla reiterazione di assi laterali in struttura primaria su assi laterali in struttura secondaria

## Capitolo VII

### 7 .Relazione tra diametro delle radici e periodo della prova di ossigenazione

#### Introduzione

Le prove sono state eseguite su radici prelevate da piante monumentali presenti all'interno del parco ottocentesco di Villa Giulia, a Loreggia (PD). Il parco e la villa sono entrambi oggetto di interventi di riqualificazione. Gli interventi di salvaguardia e recupero del patrimonio arboreo prevedono preliminari rilievi e analisi a carico dei singoli esemplari, come approccio alla corretta definizione degli interventi da eseguire.

Le piante incluse tra quelle monumentali, presenti all'interno del parco della Villa sono numerose. Tra queste compaiono tre Cipressi calvi (*Taxodium distichum* Richard), una *Magnolia grandiflora* L., un tiglio (*Tilia platyphyllos* Scop.), un *Cedrus atlantica* Carrière e due maestosi Aceri campestri (*Acer campestre* L.). Di seguito: immagini delle piante da cui si sono prelevati i campioni.



44 alberi monumentali di villa Giulia (Strazzabosco)

#### 7.1 Materiali e metodi

##### RAPPORTO SUI PRELIEVI DEI CAMPIONI RADICALI E LE OPERAZIONI SUCCESSIVE

Le prove sono state eseguite su radici di *Taxodium d.*, di *Magnolia g.*, di *Acer c.* e di *Tilia p.*

I prelievi sono stati eseguiti in tre momenti successivi: il 26 novembre 2011, il 16 dicembre 2011 e il 4 maggio 2012. In quest'ultimo caso si sono raccolti campioni di radice solamente dall'esemplare di *Magnolia grandiflora*.

I campioni sono stati prelevati a una distanza dal fusto compresa fra i 2 e i 4 metri (distanza ampiamente inclusa nella proiezione della chioma). La profondità cui sono state prelevate le radici è variata da un minimo di cinque a un massimo di 12 cm.

**Campionamento del 26 novembre 2011.** Il suolo al momento del prelievo si presentava in stato di tempera; sotto l'esemplare di magnolia il suolo risultava, privo di vegetazione legnosa o erbacea, con residui di foglie in diverso grado di decomposizione, soffice nell'orizzonte organico e in quelli immediatamente sottostanti. Nel caso dell'Acero campestre, collocato su un lieve rialzo del suolo e a pochi metri dal fosso perimetrale, il suolo si presentava coperto da edera. Essendovi nelle immediate vicinanze altre piante (abeti, bambù, ecc.) si è prestata attenzione a non prelevare porzioni di radice appartenenti a queste ultime specie. Il terreno si presentava discretamente soffice, ma con un contenuto di sostanza organica apparentemente inferiore a quello della magnolia.

Il tassodio da cui si sono prelevate le radici è prossimo all'esemplare di acero, anch'esso adiacente al fosso perimetrale a nord. Al momento del prelievo il terreno al piede si presentava ricoperto da uno strato di foglie e rametti e all'apparenza soffice, con tenori di argilla e di sostanza organica superiori a quelli dei casi precedenti.

I campioni di radice sono stati lavati in acqua corrente fredda, e conservati in frigorifero alla temperatura di circa 4 °C, fino al 29 novembre, giorno in cui si sono eseguite le osservazioni e si sono posti a reagire i campioni.

**Osservazioni e preparazione dei campioni alla reazione.** Il successivo 29 novembre i campioni sono stati nuovamente lavati, al fine di allontanare eventuali residui rimasti. Si sono poi isolate porzioni radicali di diametro compreso mediamente fra i 4 e gli 8 millimetri e della lunghezza di 8 centimetri. Per ciascuna specie si sono preparate cinque scatole Petri (sei per il *Taxodium*), ognuna con 3 porzioni di radice. In seguito i campioni sono stati sottoposti ad accurate osservazioni, eseguite all'ingranditore stereoscopico, per valutarne la presenza di cicatrici di abscissione su vecchie ferite originatesi a seguito della morte di precedenti radici assorbenti, nonché la presenza di primordi di nuove radici.

N.B. i campioni prelevati dal taglio sono stati successivamente esclusi dalla prova, e usati solo per valutare eventuali significativi discostamenti nel comportamento all'ossigenazione.

I campioni sono stati poi preparati per la reazione ("rigenerazione"). Per favorire la permanenza di condizioni di umidità, e contemporaneamente evitare il contatto troppo diretto con l'acqua, il fondo delle scatole è stato ricoperto da due fogli di carta bibula e un sottile strato di laterlite (*Agrileca*), inumidita. Le scatole, sigillate con *Parafilm*, sono state poste in ambiente privo di luce, alla temperatura di 20 °C.

**I rilievi sui campioni posti a reagire.** Sui medesimi campioni si sono in seguito eseguite le osservazioni in due distinti momenti: il primo in data 7 dicembre, il secondo in data 14 dicembre.

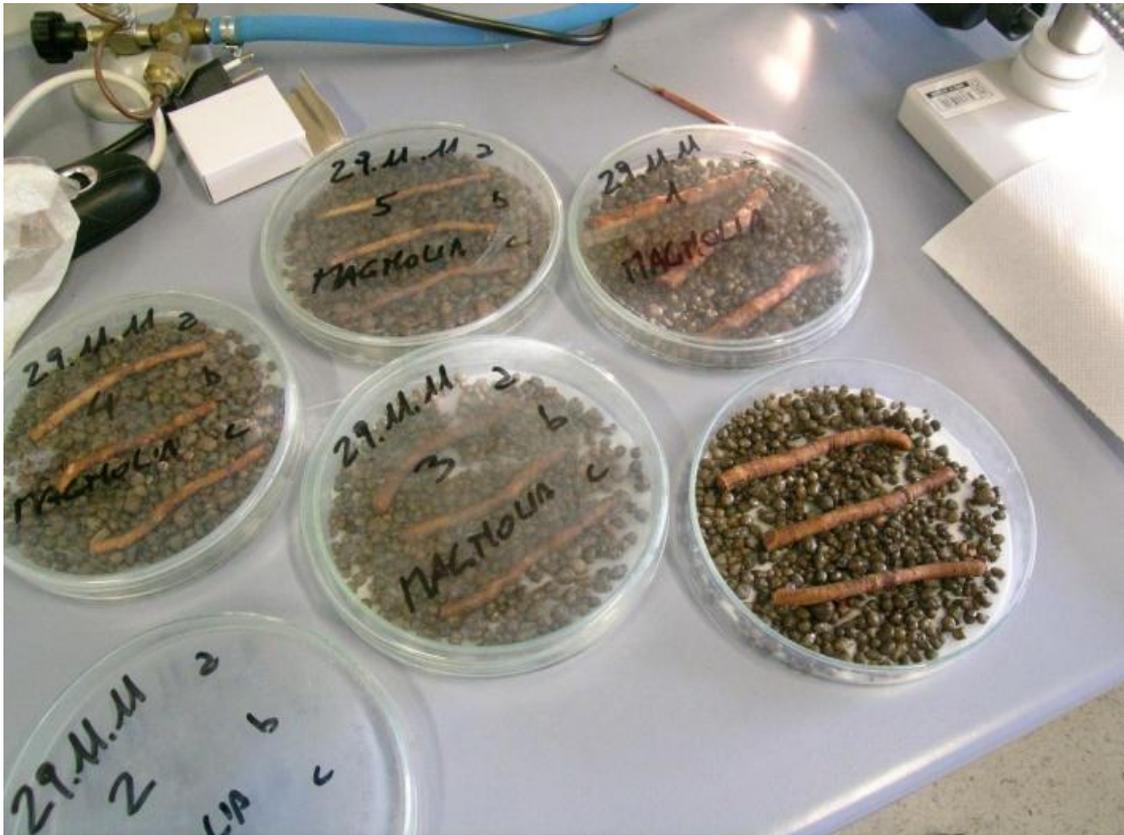


Foto 46. I campioni di radice preparati per la prova di rigenerazione radicale a seguito di ossigenazione.

ESITI DEI RILIEVI E DELLA PROVA

campioni raccolti il 26/11/11 - messi a reagire il 29/11/11

SPECIE	N° scatola	diam. Radici mm	n° ferite + abbozzi radicali	1° + 2° rilevamento
<b>Taxodium disticum</b>	1	a	5,0	8 7
		b	5,5	4 1
		c	5,4	15 7
	2	a	5,5	7 8
		b	5,3	7 4
		c	5,1	10 8
		d	5,0	10 4
	3	a	3,5	12 8
		b	3,4	7 1
		c	4,1	6 3
	4	a	4,3	20 1
		b	4,1	19 3
		c	3,8	14 3
	5	a	5,2	26 4
		b	5,5	30 7
		c	5,6	20 14
	6	a	6,0	22 7
		b	5,0	15 2
		c	5,5	17 5

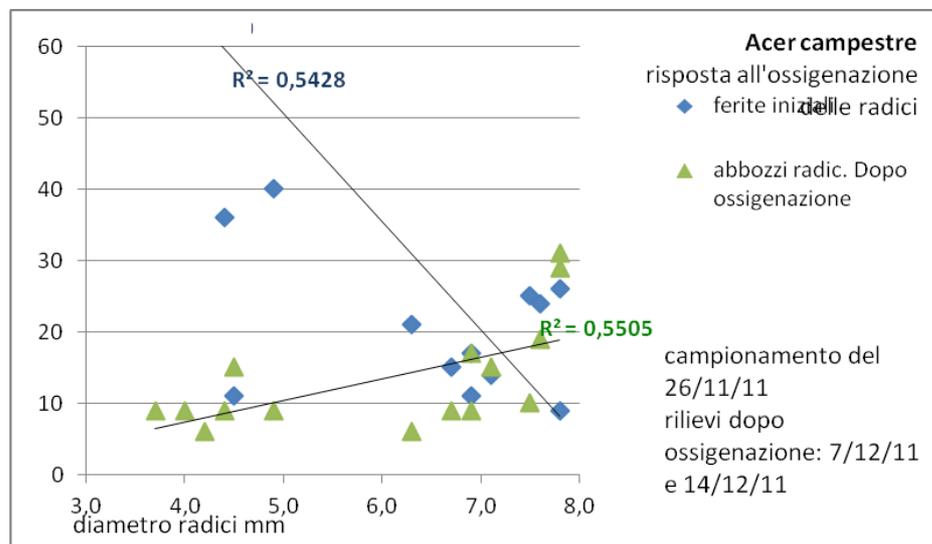
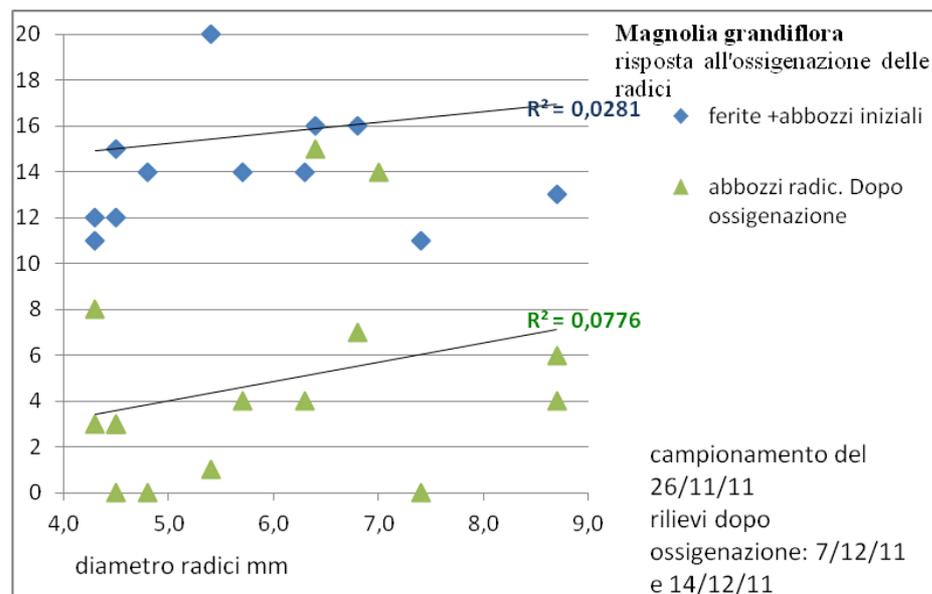
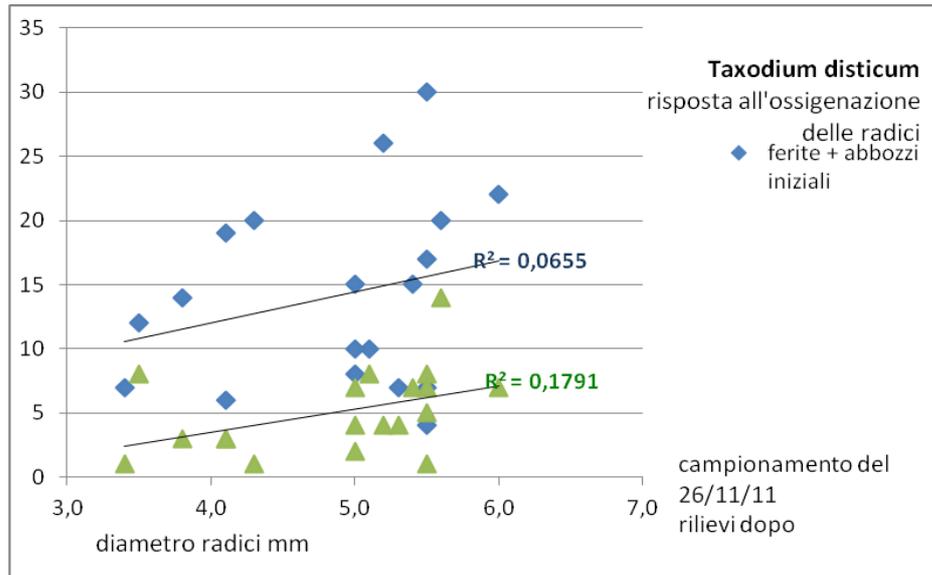
campioni raccolti il 26/11/11 - messi a reagire il 29/11/11

<b>SPECIE</b>	<b>N° scatola</b>		<b>diam. Radici mm</b>	<b>n° ferite + abbozzi radicali</b>	<b>1° + 2° rilevamento</b>
<b>Magnolia grandiflora</b>	1	a	7,4	11	0
		b	8,7	21	6
		c	8,7	13	4
	2	a	7,0	22	14
		b	6,8	16	7
		c	6,4	16	15
	3	a	6,3	14	4
		b	5,7	14	4
		c	5,4	20	1
	4	a	4,3	12	8
		b	4,8	14	0
		c	4,5	12	0
	5	a	4,3	11	3
		b	4,5	15	3
		c	4,5	24	3

campioni raccolti il 26/11/11 - messi a reagire il 29/11/11

<b>SPECIE</b>	<b>N° scatola</b>		<b>diam. Radici mm</b>	<b>n° ferite + abbozzi radicali</b>	<b>1° + 2° rilevam.</b>
<b>Acer campestre</b>	1	a	7,8	9	29
		b	7,1	14	15
		c	6,9	11	9
	2	a	6,9	17	17
		b	6,7	15	9
		c	6,3	21	6
	3	a	7,5	25	10
		b	7,8	26	31
		c	7,6	24	19
	4	a	4,9	40	9
		b	4,4	36	9
		c	4,5	11	15
	5	a	4,2	81	6
		b	4,0	107	9
		c	3,7	92	9

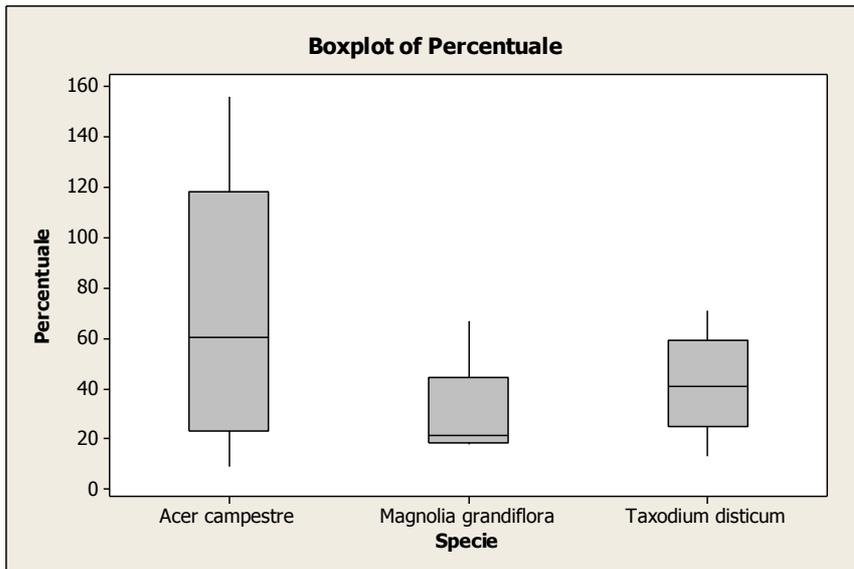
**Grafici ed elaborazione statistica dei dati raccolti**



Al fine di una più approfondita analisi dei dati potremmo valutare la percentuale di risposta all'ossigenazione riferita alla media dei diametri radicali di ciascun campione:

<b>Specie</b>	<b>Diametro medio radici</b>	<b>Ferite + abbozzi radicali iniziali</b>	<b>Abbozzi radicali generati</b>	<b>Percentuale risposta</b>
Taxodium disticum	5,30	27	15	55,56
	5,23	34	24	70,59
	3,67	25	12	48,00
	4,07	53	7	13,21
	5,43	76	25	32,89
	5,50	49	14	28,57
Magnolia grandiflora	8,27	45	10	22,22
	6,73	54	36	66,67
	5,80	48	9	18,75
	4,53	38	8	21,05
	4,43	51	9	17,65
Acer campestre	7,27	34	53	155,88
	6,63	53	32	60,38
	7,63	75	60	80,00
	4,60	87	33	37,93
	3,97	279	24	8,60

**Boxplot of percentuale**



ANOVA. Domanda: la media delle percentuali di abbozzi (y) varia in funzione della specie (x)?

**One-way ANOVA: Percentuale versus Specie**

Source	DF	SS	MS	F	P
Specie	2	4067	2034	1.63	0.234
Error	13	16245	1250		
Total	15	20312			

S = 35.35    R-Sq = 20.02%    R-Sq(adj) = 7.72%

Individual 95% CIs For

Mean Based on

Level	N	Mean	StDev	Pooled StDev
Acer campestre	5	68.56	55.58	(-----

---\*-----)



## Regression Analysis: Percentuale versus Diametro radice

The regression equation is

$$\text{Percentuale} = -28.7 + 13.4 \text{ Diametro\_radice}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-28.72	34.95	-0.82	0.425
Diametro_radice	13.445	6.104	2.20	0.045

S = 32.8243    R-Sq = 25.7%    R-Sq(adj) = 20.4%

R2 molto basso, quindi non vi è regressione

### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	5228	5228	4.85	0.045
Residual Error	14	15084	1077		
Total	15	20312			

### Unusual Observations

Obs	Diametro_radice	Percentuale	Fit	SE Fit	Residual
7	8.27	22.22	82.43	18.41	-60.21
					-2.22R
12	7.27	155.88	68.99	13.23	86.90
					2.89R

R denotes an observation with a large standardized residual.

## **RAPPORTO SUI PRELIEVI del 16/12/11 E LE OPERAZIONI SUCCESSIVE**

Campionamento del 16.12.11.

Eseguito il secondo prelievo, a carico delle medesime piante arboree.

I campioni di radice sono stati prelevati:

da c.a 2,5-4 m dal colletto per la magnolia

da c.a 2 a 3 m dal colletto per l'acero c.

da c. 2 a 3,5 m dal colletto per il tassodio.

Profondità delle radici estratte: da 3 a 12 cm c.a.;

Condizioni del terreno: quasi ottimale per la magnolia (umido, ma non fangoso), fangoso, adesivo per l'Acero c., umido ma non fangoso per il tassodio.

I campioni sono stati lavati in acqua corrente e conservati in frigorifero (a 4 ° C fino al 20.12.11).

Successivamente sono stati analizzati (osservazioni all'ingranditore stereoscopico) e sottoposti a medesimo trattamento, per la prova di "rigenerazione". Altri campioni preparati allo stesso modo sono stati posti a temperatura ambiente (esterna), in luogo riparato, cioè in condizioni di temperatura analoghe a quelle delle radici delle piante in parco (testimone).

### **ESITI DEI RILIEVI E DELLA PROVA**

**campioni raccolti il 16/12/11 - messi a reagire il 20/12/11**

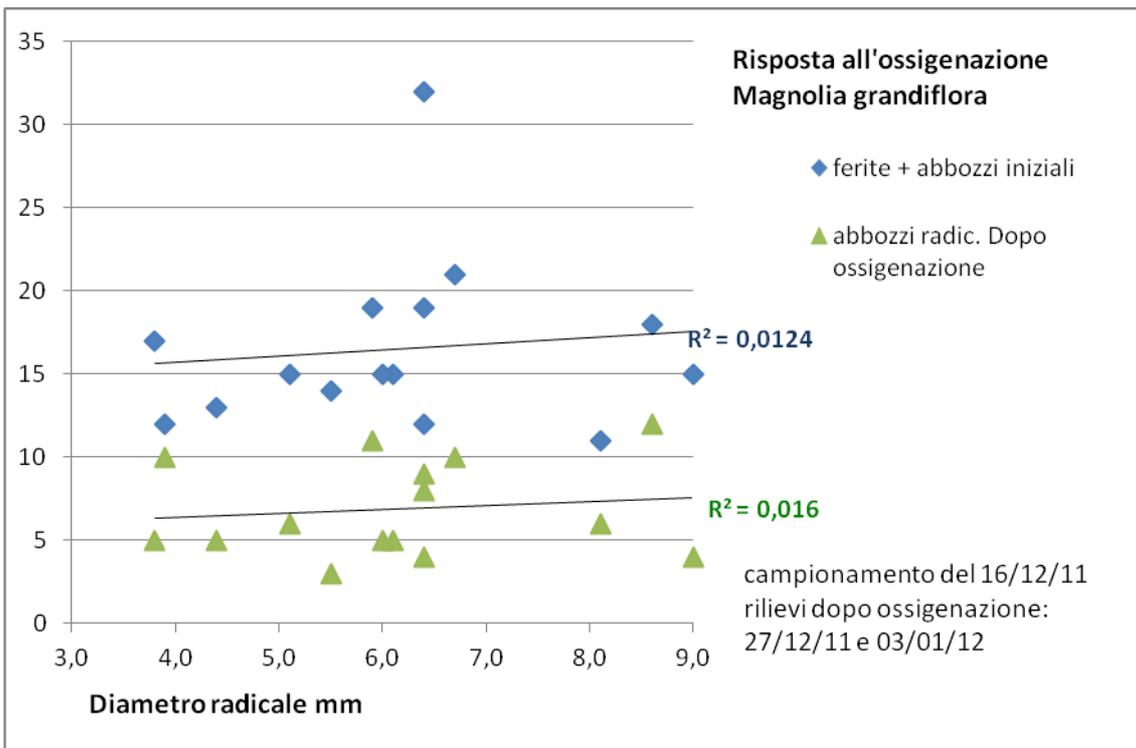
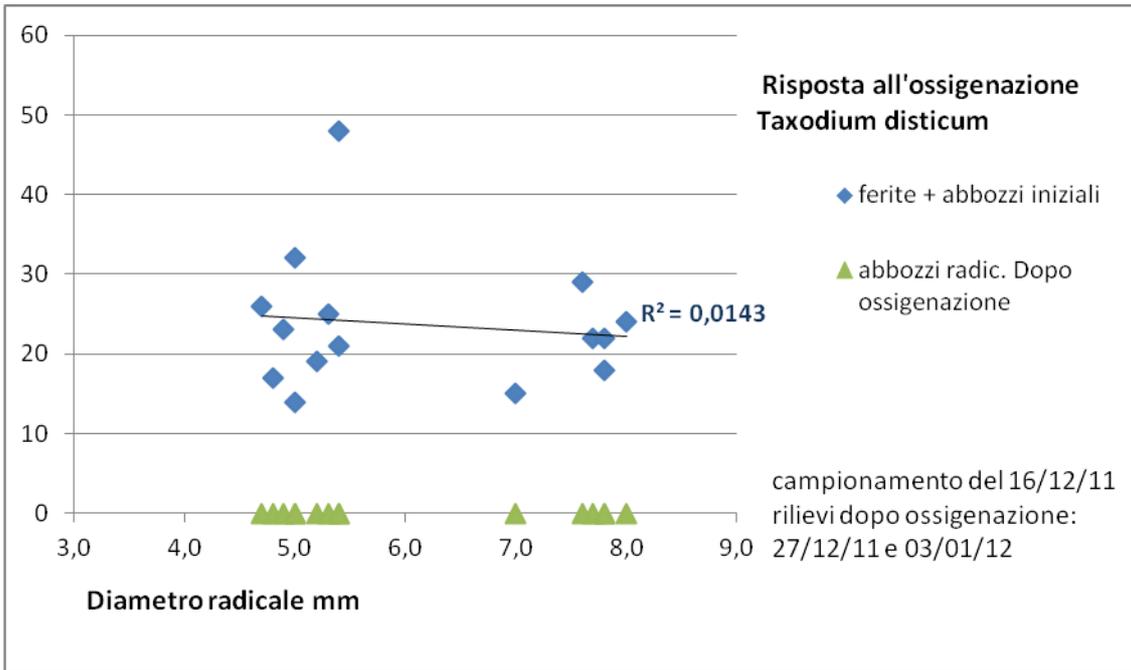
<b>SPECIE</b>	<b>N° scatola</b>		<b>diam. Radici mm</b>	<b>n° ferite + abbozzi iniziali</b>	<b>abbozzi dopo ossigenazione</b>
<b>Taxodium disticum</b>	1	a	7,7	22	0
		b	8,0	24	0
		c	7,8	18	0
	2	a	5,0	32	0
		b	4,8	17	0
		c	4,9	23	0
	3	a	5,0	14	0
		b	5,2	19	0
		c	4,7	26	0
	4	a	7,6	29	0
		b	7,0	15	0
		c	7,8	22	0
	5	a	5,4	21	0
		b	5,3	25	0
		c	5,4	48	0

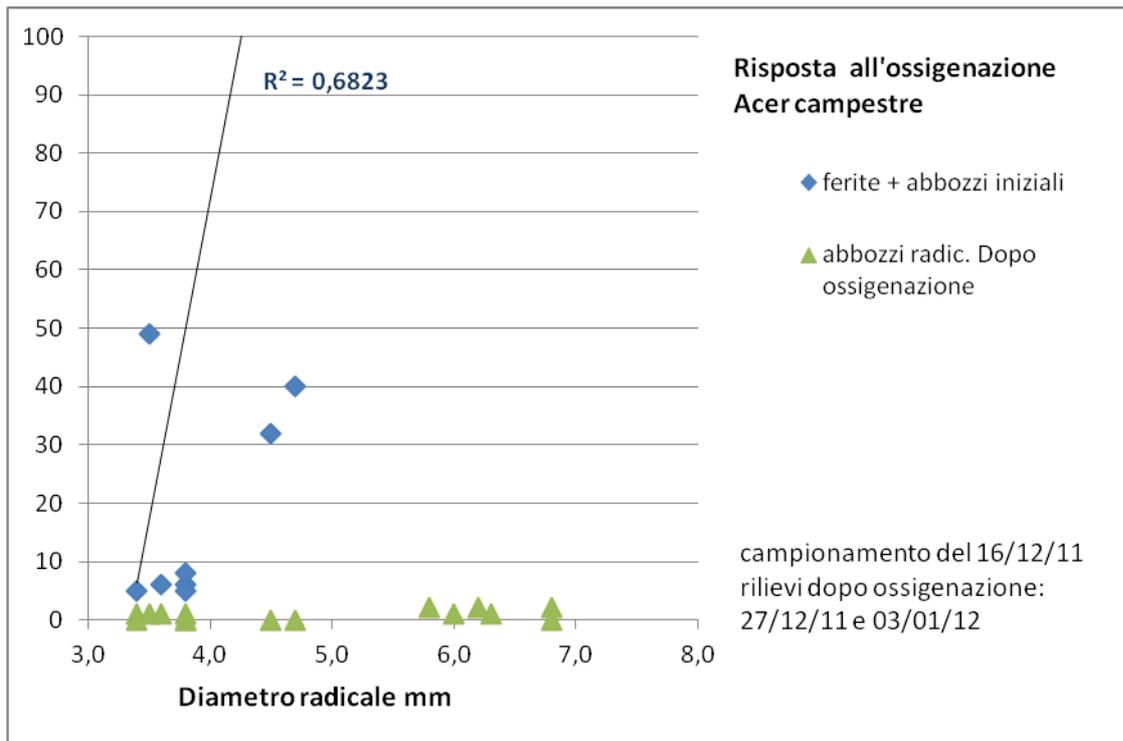
SPECIE	N° scatola		diam. Radici mm	n° ferite + abbozzi iniziali	abbozzi dopo ossigenazione
<b>Magnolia grandiflora</b>	1	a	3,8	17	5
		b	4,4	13	5
		c	3,9	12	10
	2	a	6,4	32	9
		b	5,1	15	6
		c	5,5	14	3
	3	a	6,4	12	4
		b	6,1	15	5
		c	6,0	15	5
	4	a	8,1	11	6
		b	9,0	15	4
		c	8,6	18	12
	5	a	6,4	19	8
		b	6,7	21	10
		c	5,9	19	11

campioni raccolti il 16/12/11 - messi a reagire il 20/12/11

SPECIE	N° scatola		diam. Radici mm	n° ferite + abbozzi iniziali	abbozzi dopo ossigenazione
Acer campestre	1	a	3,4	156	1
		b	3,8	6	0
		c	3,5	49	1
	2	a	3,4	5	0
		b	3,8	8	0
		c	3,6	6	1
	3	a	6,3	356	1
		b	6,0	360	1
		c	6,8	390	2
	4	a	6,2	400	2
		b	5,8	450	2
		c	6,8	175	0
	5	a	3,8	5	1
		b	4,7	40	0
		c	4,5	32	0

**Grafici ed elaborazione statistica dei dati raccolti**





### 7.3 Risultati

#### Analisi dell'Indice di Correlazione di Pearson e Welch Two Sample t-test

I risultati sono stati inoltre analizzati con il coefficiente di correlazione di Pearson  $R^2 = r^2$ ; sull'asse delle X è stato posto il diametro delle radici da 3 a 8-10 mm e sulle Y la risposta all'ossigenazione.

Sulla prima analisi, effettuata il 26-11-2011 non si è osservata correlazione significativa (correlazione molto debole) tra il diametro e la risposta all'ossigenazione:

$R^2 = 0,0136$  per *Taxodium disticum*,

$R^2 = 0,0567$  per *Magnolia grandiflora*

$R^2 = 0,0092$  per *Acer campestre*.

La seconda analisi effettuata il 27-12-2011 ha dato un risultato simile:

$R^2 = 0,0077$  per *Taxodium disticum*,

$R^2 = 0,0076$  per *Magnolia grandiflora*,

$R^2 = 0,1894$  per *Acer campestre*.

Pertanto anche se effettuato su un test poco potente possiamo affermare che: **la relazione continua tra diametro e risposta non è correlabile come tra epoca di reiterazione**

Materiali e Metodi

# Capitolo VIII

## 8 LA PROVA IN ASSENZA DI OSSIGENO

### 8.1 Introduzione

Può sorgere però il dubbio che la risposta rigenerativa da parte delle radici possa essere provocata non dall'ossigenazione, ma piuttosto dalla stimolazione costituita dallo stress per il taglio delle radici. Poi, il fatto che si verifichi una risposta da parte di apparati radicali anche in seguito a periodi di sommersione, ovvero di ipossia, possono legittimare ulteriori dubbi in proposito. Per fugare ogni incertezza si è così deciso di effettuare una prova in assenza di ossigeno, ovvero ponendo i campioni di radice in ambiente saturo di CO<sub>2</sub>.

Si è così effettuata una valutazione con tre repliche in blocchi contrapposti. Il campione di radici della medesima pianta è stato suddiviso in due parti: una parte da destinare all'ossigenazione e una parte da sottoporre ad ambiente saturo di CO<sub>2</sub>.

#### 8.1.1 Materiali e Metodi

La prova è avvenuta il 4 maggio 2012, dopo aver prelevato i campioni di radici unicamente dall'esemplare monumentale di *Magnolia grandiflora* (una delle tre piante da cui si erano prelevati campioni nelle precedenti occasioni). Portati al laboratorio dell'Istituto di Patologia dell'Università, si è prontamente provveduto alle fasi preparatorie e alla prova.

Previo lavaggio in acqua fredda corrente, si è preparato il campione, costituito da segmenti di radice di 8 cm. Il campione è stato poi suddiviso in due sub-campioni: il primo da destinare all'ossigenazione (testimone), il secondo da sottoporre ad ambiente anossico.

Anche in questo caso, su ogni segmento di radice si sono effettuate le preliminari osservazioni per verificarne la presenza di cicatrici su ferite di abscissione di precedenti radici assorbenti.

Il campione per l'ossigenazione è stato quindi posto, come nei precedenti casi, in scatole Petri, con substrato costituito da *Agrileca inumidita* (n° 3 ripetizioni, con n° 5 porzioni di radice ciascuna).

Le porzioni di radice da sottoporre alla prova in assenza di ossigeno sono state invece messe in bottiglie PET trasparenti da 1,5 litri (n° 5 segmenti di radice per ogni bottiglia). Sul fondo di ognuna delle 3 bottiglie si è sistemata la laterlite e c.a 300 ml di acqua distillata. Dalle bottiglie si è poi fatta fuoriuscire quanta più aria possibile, mediante schiacciamento delle stesse. Di seguito è stata introdotta la CO<sub>2</sub>. Questa fase merita una particolare descrizione.

Descrizione del procedimento. Per rendere possibile l'introduzione della CO<sub>2</sub> ed il mantenimento del volume di gas all'interno di ogni bottiglia, si è ideato e realizzato un apposito "tappo-valvola": nei tappi di ogni bottiglia si è praticato un foro, della dimensione adatta per inserirvi una valvola recuperata da camere d'aria di bicicletta. Mediante la vite che sta alla base di ognuna delle valvole, e impiegando del comune nastro di Teflon (Tetrafluoroetilene), si è assicurata poi la perfetta tenuta del tappo-valvola. Le bottiglie sono state, in

pratica, “gonfiate” con CO<sub>2</sub> a circa 2 Atm, pressione corrispondente a circa 5,2 grammi di CO<sub>2</sub> per bottiglia. La CO<sub>2</sub> è stata insufflata mediante una bomboletta dotata di apposito erogatore regolabile. Tutti i campioni sono stati posti al buio, a temperatura pressoché costante di c.a 20°C.

Il primo rilievo è stato eseguito a una settimana dal prelievo e trattamento, in data 11/05/12. Dalle osservazioni si è potuto constatare un progresso nella proliferazione di nuovi tessuti radicali sui campioni con funzione di testimone, mentre nei campioni posti in CO<sub>2</sub> non si è notato alcun segnale in questo senso. Sono state aperte due delle tre bottiglie, al fine di poter osservare gli sviluppi a distanza di più giorni sulla terza bottiglia. Gli abbozzi preformati, presenti in suddetti campioni, hanno evidenziato addirittura una regressione. All’apertura delle bottiglie si è avvertito odore di alcol, segno delle fermentazioni in atto.

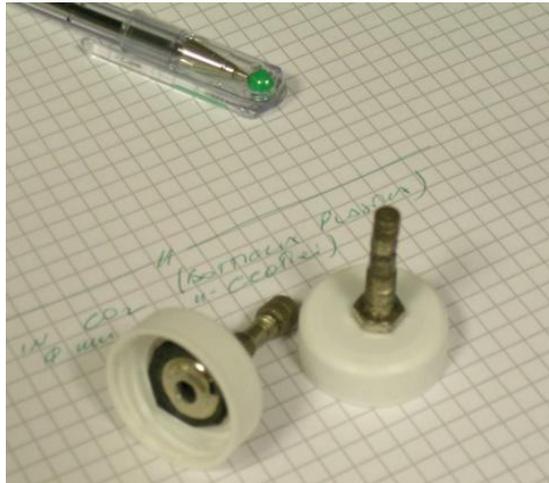
Il secondo rilievo è stato eseguito il 25 maggio. Nella bottiglia rimasta chiusa i campioni si presentavano imbruniti, con tessuti all’apparenza molli; dalla bottiglia esalava un caratteristico odore di alcol. Gli abbozzi radicali preesistenti sono apparsi bloccati o regrediti. Non vi si sono rilevate tracce di sviluppi fungini (ambiente anaerobico). Nelle bottiglie aperte (e poi richiuse) nella precedente occasione, si è notato, invece, sviluppo di micelio fungino.

Nelle scatole Petri i segmenti di radice (testimone) hanno, invece confermato una reazione positiva all’ossigenazione, con un significativo sviluppo di abbozzi radicali.

Segue documentazione fotografica.



Campioni (segmenti) di radice: a sinistra una delle scatole con il testimone; a destra, una delle tre bottiglie con il campione in CO<sub>2</sub>.



Particolare dei tappi modificati ad hoc per consentire di chiudere in modo sicuro le bottiglie, e di inserirvi la CO<sub>2</sub>



Alle bottiglie schiacciate (per fare fuoriuscire l'aria) è stata insufflata la CO<sub>2</sub>, mediante una bomboletta e apposito erogatore regolabile.

Campioni a confronto, con evidenziata (ultima colonna) la percentuale di risposta in termini di abbozzi radicali sviluppati

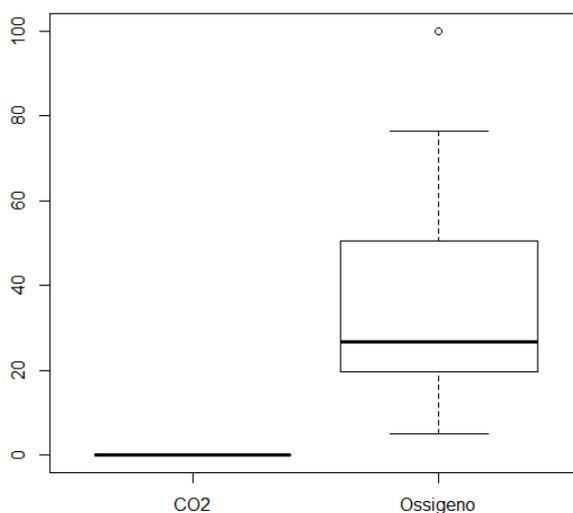
<b>Trattamento</b>	<b>N° scatola/bottiglia</b>	<b>diam. Radici mm</b>	<b>n° ferite radici precedenti</b>	<b>n° primordi di radice</b>	<b>1° rilevamento. 11/05</b>	<b>Percentuale abbozzi effettivi</b>
Ossigeno	1	8.8	17		10	<b>58.8</b>
Ossigeno	1	5.6	20		1	<b>5</b>
Ossigeno	1	6.7	17		3	<b>17.6</b>
Ossigeno	1	4.0	18		2	<b>11.1</b>
Ossigeno	1	5.2	10		13	<b>130</b>
Ossigeno	2	5.7	20		5	<b>25</b>
Ossigeno	2	4.7	14		4	<b>28.57</b>
Ossigeno	2	5.0	14		8	<b>57.1</b>
Ossigeno	2	4.4	15		4	<b>26.6</b>
Ossigeno	2	4.1	16		1	<b>6.25</b>
Ossigeno	3	4.8	16		7	<b>43.75</b>
Ossigeno	3	5.3	14		3	<b>21.4</b>
Ossigeno	3	4.7	17		13	<b>76.47</b>
Ossigeno	3	5.5	16		6	<b>37.5</b>
Ossigeno	3	5.8	17		4	<b>23.5</b>
CO2	1	4.3	16	4	4	<b>0</b>
CO2	1	5.9	18	5	5	<b>0</b>
CO2	1	4.3	19	3	3	<b>0</b>
CO2	1	5.3	14	2	1	<b>0</b>
CO2	1	5.5	17	8	4	<b>0</b>
CO2	2	6.6	33	4	3	<b>0</b>
CO2	2	6.2	25	3	3	<b>0</b>
CO2	2	6.2	20	3	2	<b>0</b>
CO2	2	5.3	21	7	4	<b>0</b>

CO2	2	5.6	16	5	4	0
CO2	3	7.3	24		0	0
CO2	3	6.5	26		0	0
CO2	3	5.3	20		0	0
CO2	3	5.0	19		0	0
CO2	3	5.3	17		0	0

NOTE. I campioni di radice sono stati raccolti il giorno 04/05/12; entro due ore dalla raccolta sono stati lavati, analizzati e posti a reagire.

I campioni impiegati come testimone sono stati posti in atmosfera normale (ossigenazione), in scatole Petri con Agrileca, e umidità relativa prossima al 100%. I campioni messi a reagire in assenza di ossigeno sono stati collocati all'interno di bottiglie in PET trasparenti, con Agrileca, acqua e CO2.

Tutti i campioni sono stati posti al buio, alla temperatura pressoché costante di 20° C.



#### Welch Two Sample t-test

data: Percentuale abbozzi by Trattamento  
 $t = -5.1555$ ,  $df = 14$ ,  $p\text{-value} = 0.000146$   
 alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0  
 95 percent confidence interval:  
 -50.87197 -20.98019  
 sample estimates:  
 mean in group CO2 mean in group Ossigeno  
 0.00000 35.92608

Poiché  $p < 0.05$  le due medie sono significativamente diverse.

## 8.2 Risultati



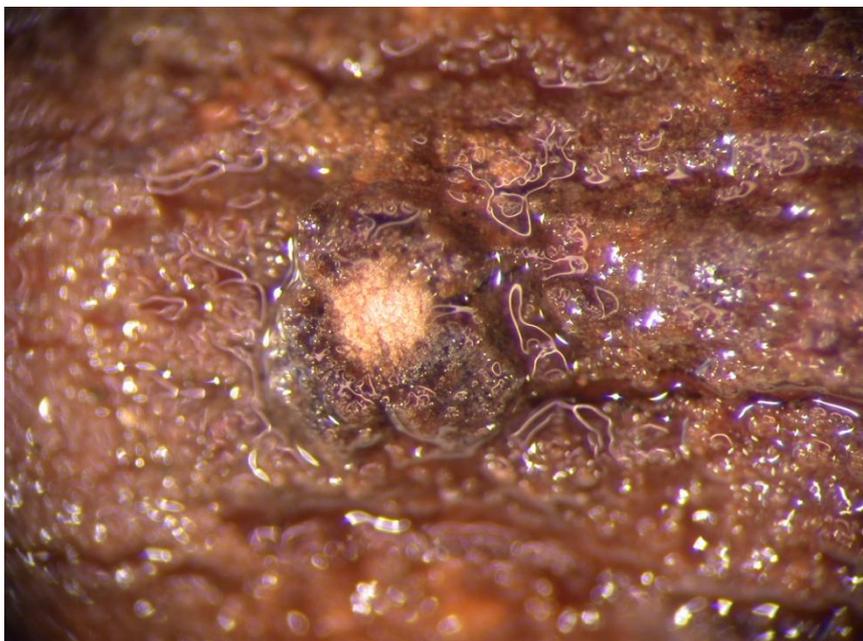
A



B

Foto 50-51 Esito del trattamento: A = campione in ossigenazione; B= campione in CO<sub>2</sub>

Dalle immagini: a sette giorni dal trattamento, nel campione A si osserva il progresso nella proliferazione dei nuovi tessuti radicali, sviluppatasi a partire da una cicatrice di abscissione di vecchia radice assorbente; Nel campione B, un abbozzo preformato, con visibili le cellule delle radichette, è rimasto “bloccato” o, in altri casi, si è avuta regressione.



C



D

Foto 52-53 Dopo 21 giorni, su campioni posti in assenza di ossigeno (= in CO<sub>2</sub>);

L'immagine C mostra un particolare di un abbozzo preesistente sul campione aperto il 25 maggio (a 21 giorni dal trattamento): non vi è risposta "rigenerativa"; i primordi sono fermi o in regressione, mentre i tessuti della radice mostrano segni di disfacimento.

Nell'immagine D, si vede una porzione di radice posta in CO<sub>2</sub>, e successivamente esposta all'aria (per il controllo) e richiusa in bottiglia: Il micelio fungino invade l'intero segmento.

La risposta si è avuta dunque solo nell'ossigenazione, mentre nessuna risposta si è osservata nelle bottiglie sature di CO<sub>2</sub> (R<sup>2</sup> = 2E-06 conferma il risultato). Anche in questo caso non sembra esservi significativa correlazione fra risposta all'ossigenazione e diametro delle radici.

**La prova dà dunque conferma che la presenza di ossigeno è condizione necessaria alla reiterazione radicale.**

Sono quindi escluse queste variabili dipendenti ed è confermato il ruolo dell'ossigenazione nella generazione di nuove radici; l'esito è per altro compatibile con il nostro progetto di ricerca, che vuole dimostrare come la **risposta della reiterazione radicale sia piuttosto correlata al livello di amidi nelle radici.**

- La posizione della radice rispetto alla pianta (distanza dal fusto e dalle branche principali)

Sulla valutazione dello stato energetico della pianta e della radice (contenuto in riserve metaboliche, cioè prevalentemente amido), e le possibili correlazioni con la risposta da parte della pianta agli stimoli rigenerativi si sono poi concentrate le successive ricerche.



Foto 54 Particolare ingrandito di primordi di radice (Magnolia g.) su asse in struttura secondaria, a seguito di ossigenazione, sviluppatasi in corrispondenza di cicatrici di precedenti radici.

## Capitolo IX

### 9 Analisi dell'amido su tessuti legnosi

Tenuto conto dell'importanza che riveste il contenuto di amido nei tessuti legnosi, in quanto correlato alla condizione energetica della pianta, si è deciso di affrontare questo aspetto ricercando un metodo idoneo alla determinazione. È stato così costituito un gruppo di ricerca formato da Chandra Bellasio, Alessio Fini, Luigi Strazzabosco, Francesco Ferrini e Sergio Mutto Accordi. Il metodo è stato adattato per analisi dell'amido su radici legnose. L'obiettivo della ricerca è stato anche quello di individuare un protocollo di valutazione su base colorimetrica.

In altre parole, tenendo conto della colorazione che l'amido contenuto nei tessuti legnosi assume a seguito di trattamento, mettere in relazione tale contenuto con la risposta all'ossigenazione. In questo modo, associando un intervallo cromatico alla quantità di amido presente. Una tale prova si presterebbe idealmente anche per determinazioni "in campo".

Molti metodi per l'analisi di amido in legno sono state presentate negli ultimi cinque decenni. La disponibilità di amilasi termostabile, con una vasta attività di pH ha permesso lo sviluppo di veloci protocolli standardizzati, ben consolidata nel settore alimentare e dei mangimi. la descrizione del test per l'amido totale e carboidrati non strutturali in legno.

Questo lavoro ha partire da metodi commerciali (Sigma STA 20 e Megazyme K - TSTA) è stato utilizzato nella determinazione del tenore di amido in legno.

La particolare struttura del legno limita e rende non precisi le prestazioni di tali metodi.

Qui viene proposto un protocollo migliorato per l'analisi amido in legno.

Il protocollo è rivelata veloce (fino a 35 campioni al giorno con ulteriori miglioramenti), per essere più precisi, preciso e stabile rispetto ai metodi commerciali, ma ha recuperato il 27% e il 13% più amido senza aumento interferenze.

L'amido è il principale carboidrato di riserva nei tessuti legnosi (Gupta e Kaur 2000), ma il suo contenuto è relativamente basso, rispetto agli alimenti e ai mangimi, essendo generalmente tra il 3 e l'8% su base secca. La maggior parte dei metodi per la determinazione del tenore di amido sono stati sviluppati sugli organi vegetali non lignificati come frutta, parti floreali o radici fini (Rodrigo, Rivas et al. 1997). I metodi disponibili per l'analisi di amido hanno molte caratteristiche in comune e possono essere brevemente riassunti come composto da cinque fasi disposte in modi diversi da autori diversi, per una rassegna dettagliata si veda Rose et al. (1991)

I. Separazione e rimozione di carboidrati solubili dalla matrice legno. Il solvente usato in questa fase è o etanolo 80% o una miscela di metanolo, cloroformio e acqua.

II. Gelatinizzazione dei granuli di amido. I granuli di amido gelatinizzato sono gonfi, e permettono una

rapida successiva scissione , ma non la solubilizzato né l'idrolizzazione . Generalmente questa seconda fase è ottenuta mediante un trattamento con calore , con o diluito KOH . In molti casi è stato accoppiato con il passo precedente : gli zuccheri vengono solubilizzati in etanolo caldo .

III . Idrolisi di amido in glucosio , che può essere ottenuta sia mediante una soluzione acida (35 % acido perclorico , o 1 M HCl o 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> , secondo protocolli diversi , vedere Rose et al. (1991) , Ebell (1969) , MacRae ( 1974) , o utilizzando una combinazione di enzimi . In questo caso , la conversione quantitativa di amido o destrina di glucosio viene sempre eseguita da amiloglucosidasi , che potrebbe essere utilizzato da solo ( Ashworth , Stirm et al. 1993) o preceduto da un pretrattamento con  $\alpha$  - amilasi per rompere l'amido in destrine e velocizzare la successiva digestione amiloglucosidasi . la disponibilità di amilasi termostabile dalla fine degli anni '80 ha permesso la gelatinizzazione con trattamento amilasi in tampone acetato caldo ( 100 ° C ) ( Batey 1982) .

IV . Ad un certo punto della procedura l'amido deve essere selezionato per idrolisi tra tutti i carboidrati strutturali . Alcuni metodi di trattamento acido comportano l'isolamento di amido per precipitazione, questi metodi sono stati complessivamente considerati non abbastanza selettivi e in grado di stimare correttamente il totale carboidrati non strutturali in legno ( Ebell 1969 . Macrae , Smith et al 1974; Rose , Rose et al . 1991; Kozloski , Rocha et al 1999) . La specificità superiore di enzimi hanno guadagnato sempre più favori , così i più recenti metodi sono tutti a base di enzimi

V . L'analisi del glucosio e i metodi chimici che sono stati ampiamente utilizzati includono la tecnica iodometrica del rame (Greub e Wedin 1969) e il metodo anthrone ( Bailey 1958; Chow e Landhausser 2004) . Tuttavia , le condizioni di idrolisi lieve dei metodi enzimatici ( quindi si evita un uso di acidi concentrati durante l'idrolisi ) , consentono in questa fase di utilizzare un altro metodo enzimatico . Il più diffusi comportano una reazione catalizzata da perossidasi in cui il glucosio viene ossidato in acido gluconico con produzione quantitativa di acqua ossigenata . H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> è a sua volta utilizzato per ossidare un colorante (orto - dianisidina o 4 - amynoantipyrine ) in un'altra reazione enzimatica catalizzata quantitativa. La complessità del legno aggiunge sfide all'analisi , infatti , la bassa quantità di amido è ' nascosta in una matrice di polisaccaridi strutturali e questi tendono a sedimentare sul fondo delle provette e allontanarsi dai granuli di amido dalla soluzione di saggio idrolizzate . A causa della bassa specificità , i metodi con acido non sono considerati adatti per matrici di legno ( Ebell 1969 Macrae , Smith et al 1974 . Rose, Rose et al 1991; . . Kozloski , Rocha et al 1999) . Diversi metodi a base di enzimi , sono stati pubblicati negli ultimi 3 decenni , ma ognuno di loro ha qualche aspetto che non permette un protocollo veloce per le analisi di routine . Il metodo proposto da Haissig ( 1979) prevede procedure lunghe e noiose purificazione , che non sono più necessari con la disponibilità di enzimi puri. Altri propongono lunghe digestioni enzimatiche ( Rasmussen e Henry 1990; Wang , Yuan et al 1997; . Kozloski , Rocha et al 1999 . ) Che per la riduzione di tempo potrebbe essere sostituito con una digestione veloce. Hendrix (1993 ) esegui una digestione a due fasi che richiede diverse condizioni di pH , richiedendo così una regolazione del pH tra le due fasi di idrolisi . Altri protocolli , purtroppo , sono troppo poche informazioni per consentire una replica precisa ( Macrae , Smith et al 1974 . Ashworth , Stirm et al 1993 . Jones , Urban et al 1999. ) . Chow e Landhausser pubblicato un metodo molto

completo per l'analisi di amido in legno (Chow e Landhausser 2004), ma gli enzimi citati non sono più disponibili nel catalogo Sigma ([www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com)), mentre alcuni passaggi del protocollo, come la regolazione del pH, gelatinizzazione con KOH, e l'uso di fenolo, non sono più necessari in quanto i protocolli per alimenti e mangimi non sono interessati. Infatti, i protocolli di saggio amido per l'industria alimentare sono evoluti molto velocemente negli ultimi anni, non solo a causa dell'introduzione di amilasi puri e termicamente stabile, che permettono di evitare una gelatinizzazione separata con KOH, seguito da neutralizzazione, ma anche enzimi che avere un'ampia attività pH, permettendo così l'uso di un singolo buffer per i due digestioni (Megazyme 2009; Sigma - Aldrich 2010). Questi metodi hanno molti meriti come la standardizzazione e l'affidabilità di enzimi e sostanze chimiche, la disponibilità di tutorial e sostegno, la velocità del test. tutti i metodi sono veloci. E possibile saggiare fino a 35 campioni al giorno compresa la preparazione, pulizia e calcoli. Ci sono ragioni sufficienti per ritenere che l'ottimizzazione e la ripetizione di routine potrebbe consentire di elaborare 50 campioni al giorno, compresi i calcoli. L'accuratezza è stata saggiata utilizzando standard a differenti concentrazioni di amido e il calcolo della deviazione individuale dal valore vero, che era la concentrazione di amido nella norma (1,25, 2,5, 5, 10 e 100%). l'errore assoluto dei tre metodi espressi in percentuale. Sigma è seguita a concentrazione più elevata che il 5% di amido, quando l'errore era inferiore al 5%. Megazyme eseguito male ad ogni concentrazione, dal momento che l'errore era superiore al 19% in qualsiasi concentrazione. Il metodo proposto eseguito bene sulle norme in cui l'errore era compresa tra 0,16 e 0,35%. Completezza della digestione è stata valutata tramite il confronto tra metodi. media globale dei 28 campioni. Metodo Megazyme rilevato 13% più amido di Sigma, mentre il metodo proposto rilevato il 27% più amidi del Sigma. Interferenze sono stati rilevate eseguendo la digestione sulla pectina e cellulosa. Nessuno dei tre metodi ha rilevate una notevole quantità di amido né di pectina né in cellulosa. La precisione è stata determinata solo sulla Sigma che è il metodo proposto, dal momento che in difetto di sufficiente precisione il protocollo Megazyme stato scartato. La determinazione ha comportato la ripetizione del test sugli stessi campioni per 5 volte (Sigma). Per ciascuno dei 28 campioni il coefficiente di variazione è stato calcolato e rappresentato 5 (Sigma) e sul metodo proposto. Per il metodo Sigma 50% dei campioni (secondo quartile) aveva meno che il 13% di CV mentre per il metodo proposto 50% dei campioni aveva meno di 6,2% CV. Lo spostamento verso destra dei punti nel grafico del metodo proposto (figura 6) è coerente a quanto visto in figura 2, cioè c'era un rilevamento di amido con questo metodo rispetto al Sigma. Per riassumere la precisione dei due metodi post hoc LSD prova è stata eseguita per  $P = 0,05$ . Il test produce un meno significativo diverso da utilizzare nel confronto coppia. LSD di Sigma era 0,857, il che significa che in un confronto coppia due contenuto di amido ( $w/w$  su una base per cento) che differivano più di 0,857 devono essere considerati significativamente differenti. Allo stesso modo, LSD del metodo proposto era 0,564 il che significa che il contenuto di amido differenti più di LSD sono significativamente diversi. Il metodo proposto è un miglioramento dei metodi pubblicati per il dosaggio dell'amido in legno in quanto consente una determinazione più semplice e veloce, mentre migliora i metodi commerciali per alimenti e mangimi settore perché si è dimostrato più accurato, preciso e stabile. Per questi motivi potrebbe servire come un proxy per determinare gli effetti a lungo termine sulle riserve vegetali. Il protocollo usato ha dimostrato di essere veloce (fino a 35 campioni al giorno con ulteriori miglioramenti fino



Le schede di rilievo



SISTEMA INFORMATIVO - SCHEDA DEI SOGGETTI ARBOREI

Codice 01

**DATI RILEVAMENTO** Rilevatore Luigi Strazzabosco Data 26/10/2012  Nuovo  Aggiornamento

**LOCALIZZAZIONE SOGGETTO**

Tipo di area verde Verde pubblico stradale  Centrale  Periferica Tipo di impianto  Isolato  Gruppo  Filare

**CARATTERISTICHE DEL SOGGETTO**

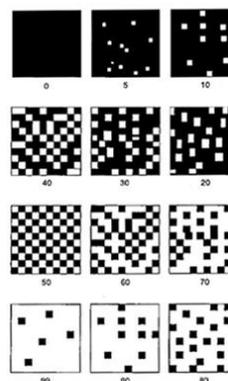
Specie (comune) Magnolia Specie (scien.) *Magnolia grandiflora* L.  
 Diametro Ad 1,30 M (cm) 74,5 Altezza (m) 18,5 Altezza 1° Palco (m) 3 Diametro della chioma (m) 8 Governo  Monocormico  Policormico  
 Posizione Sociale  Dominante  Codominante  Dominato  Sottoposto Struttura  Forma naturale  Forma obbligata  Pianta capitozzata

**TRASPARENZA DELLA CHIOMA**



Trasparenza chioma rilevata  
 = 10 %

Metodo di valutazione adottato:  
 Schema guida per la stima della trasparenza del fogliame (da Eichhorn et al., 1998).



**ANALISI DI LABORATORIO**

Prova di colorazione all'amido



Risposta all'ossigenazione (%)  
 = 38 %

**DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**



**NOTE**

Empty text box for notes.



Codice 05

**DATI RILEVAMENTO** Rilevatore Luigi Strazzabosco Data 26/10/2012  Nuovo  Aggiornamento

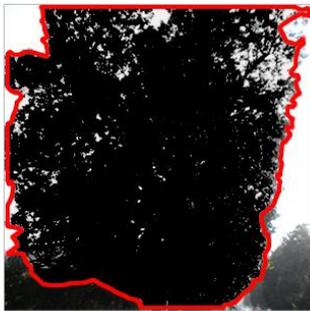
**LOCALIZZAZIONE SOGGETTO**

Tipo di area verde Verde pubblico stradale  Centrale  Periferica Tipo di impianto  Isolato  Gruppo  Filare

**CARATTERISTICHE DEL SOGGETTO**

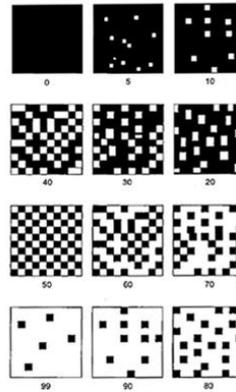
Specie (comune) Magnolia Specie (scien.) *Magnolia grandiflora* L.  
Diametro Ad 1,30 M (cm) 63,5 Altezza (m) 18,5 Altezza 1° Palco (m) 4 Diametro della chioma (m) 6 Governo  Monocormico  Policormico  
Posizione Sociale  Dominante  Codominante  Dominato  Sottoposto Struttura  Forma naturale  Forma obbligata  Pianta capitozzata

**TRASPARENZA DELLA CHIOMA**



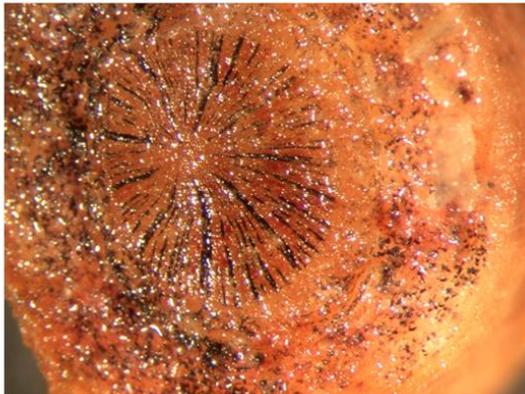
Trasparenza chioma rilevata  
= 20 %

Metodo di valutazione adottato:  
Schema guida per la stima della trasparenza del fogliame (da Eichhorn et al., 1998).



**ANALISI DI LABORATORIO**

Prova di colorazione all'amido



Risposta all'ossigenazione (%)  
= 52 %

**DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**



**NOTE**

Empty box for notes.



Codice 14

**DATI RILEVAMENTO** Rilevatore Luigi Strazzabosco Data 26/10/2012  Nuovo  Aggiornamento

**LOCALIZZAZIONE SOGGETTO**

Tipo di area verde Verde pubblico stradale  Centrale  Periferica Tipo di impianto  Isolato  Gruppo  Filare

**CARATTERISTICHE DEL SOGGETTO**

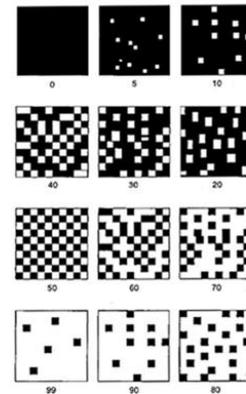
Specie (comune) Magnolia Specie (scien.) *Magnolia grandiflora* L.  
 Diametro Ad 1,30 M (cm) 77 Altezza (m) 19 Altezza 1° Palco (m) 4,5 Diametro della chioma (m) 6 Governo  Monocormico  Policormico  
 Posizione Sociale  Dominante  Codominante  Dominato  Sottoposto Struttura  Forma naturale  Forma obbligata  Pianta capitolata

**TRASPARENZA DELLA CHIOMA**



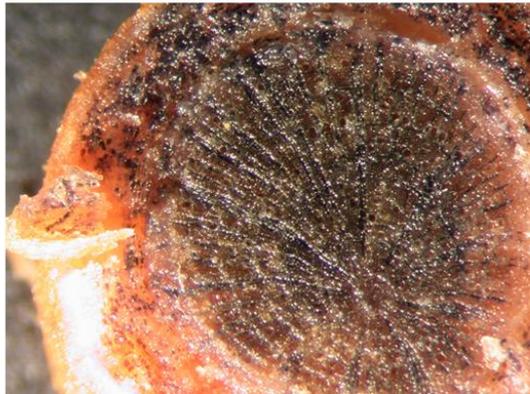
Trasparenza chioma rilevata  
 = 13 %

Metodo di valutazione adottato:  
 Schema guida per la stima della trasparenza del fogliame (da Eichhorn et al., 1998).



**ANALISI DI LABORATORIO**

Prova di colorazione all'amido



Risposta all'ossigenazione (%)  
 = 80 %

**DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**



**NOTE**

Dalle immagini contenute nelle schede di rilevamento e analisi il contenuto di amido appare ben evidenziato dalla colorazione più o meno intensa del cerchio della sezione. Il colorante utilizzato (iodo-ioduro di potassio) imprime una colorazione progressivamente più scura, proporzionalmente all'aumento del contenuto di amido nei parenchimi della radice. È chiaro, quindi, che una pianta dotata di riserve energetiche adeguate è in grado di affrontare meglio un intervento di ossigenazione, ottenendo una migliore risposta in termini di reiterazione radicale. (Va comunque ricordato che lo stato energetico di una pianta, definito da Askenasi come “energia potenziale della pianta”, varia nel corso dell'anno, come dimostrato da Priestly, con picchi critici che corrispondono al termine della fogliazione (primavera) e alla caduta delle foglie autunnale. Nel rilievo sono state riportate ulteriori informazioni, relative a dati dendrometrici e alle condizioni della chioma, riferite alla “trasparenza” della stessa; quest'ultimo parametro può essere in qualche modo rapportabile alle condizioni vegetative della pianta; tale indagine, come già ricordato, può fornire indicazioni sulle condizioni di benessere e salute di una pianta, qualora correlate e affiancate ad altri parametri vitali.

Ossigenazione radici Magnolia campione 20 alberi 26/10/2012						
N°	Diam.o mm	Lunghezza cm	cicatrici	% reiterazione		%
				ferite	rigenerazione	
1a	11	10,1	23			
1b	7	10,2	20	60	23	38,33333
1c	12	10	17			
2a	6	10	19			
2b	5	10,1	19	62	13	20,96774
2c	11	11,3	24			
3a	7	10,5	14			
3b	6	12,4	25	58	27	46,55172
3c	11	12,1	19			
4a	6	9,1	16			
4b	11	12	17	51	35	68,62745
4c	10	9,5	18			
5a	3	9,1	19			
5b	10	12	27	88	46	52,27273
5c	5,5	9,5	42			
6a	7	11	21			
6b	6	10,2	18	58	13	22,41379
6c	6	11	19			
7a	6	9,2	12			
7b	6	10	17	47	34	72,34043
7c	11	9,2	18			
8a	10	11,2	19			
8b	10	10,4	46	78	53	67,94872
8c	5	11,3	13			
9a	10	10,2	6			
9b	10	9,3	13	29	23	79,31034
9c	5	10,4	10			
10a	5	10,2	7			
10b	5	11,2	14	34	9	26,47059
10c	5	8,6	13			
11a	11	10	9			
11b	7	10,2	14	27	21	77,77778
11c	8	9,4	4			
12a	9	9,4	12			
12b	7	10,9	8	32	7	21,875
12c	7	11,1	12			
13a	5	11,3	20			
13b	6	12,4	17	53	19	35,84906
13c	10	10,5	16			
14a	5	12,1	16			
14b	8	9,5	16	45	36	80
14c	8	10,1	13			
15a	6	10,4	28			
15b	7	10,3	16	53	23	43,39623
15c	6	8,8	9			
16a	5	9,4	19			
16b	5,5	10,4	20	50	19	38
16c	9	11,7	11			
17a	7	10,3	17			
17b	6	10,8	20	57	16	28,07018
17c	6	11,1	20			
18a	5	9,4	25			
18b	4	9,5	8	44	30	68,18182
18c	4	9,2	11			
19a	9	9,7	14			
19b	5	9,8	17	43	36	83,72093
19c	8,5	9,2	12			
20a	9	8,8	13			
20b	6	9,3	11	45	37	82,22222
20c	5,5	9,5	21			

## Analisi amido

Day	REPLICATES	SAMPLE	STARCH
1	1	M1	10.176
1	1	M2	13.604
1	1	M3	9.076
1	1	M4	11.071
1	1	M5	8.909
1	1	M6	22.216
1	1	M7	11.876
1	1	M8	5.597
1	1	M9	13.919
1	1	M10	10.127
1	1	M11	9.945
1	1	M12	10.733
1	1	M13	16.078
1	1	M14	19.352
1	1	M15	17.775
1	1	M16	16.923
1	1	M17	11.906
1	1	M18	12.726
1	1	M19	13.566
1	1	M20	15.980
1	1	IS	5.047
1	2	IS	4.955
1	3	IS	4.953
2	2	M1	10.860
2	2	M2	15.643
2	2	M3	10.281
2	2	M4	12.445
2	2	M5	10.313
2	2	M6	25.608
2	2	M7	13.387
2	2	M8	6.465
2	2	M9	15.400
2	2	M10	11.536
2	2	M11	10.864
2	2	M12	11.392

2	2	M13	16.485
2	2	M14	19.643
2	2	M15	19.227
2	2	M16	17.960
2	2	M17	12.876
2	2	M18	13.008
2	2	M19	16.535
2	2	M20	16.554
2	4	IS	4.916
2	5	IS	4.851
2	6	IS	4.762

Analysis of variance

Variate: STARCH

Source of variation d.f. s.s. m.s. v.r. F pr.

Day stratum 1 13.0485 13.0485 35.72

Day.\*Units\* stratum

SAMPLE 20 1056.8477 52.8424 144.64 <.001

Residual 24 8.7683 0.3653

Total 45 1078.6645

Tables of means

Grand mean 12.5548

SAMPLE	IS	M1	M10	M11	M12
mean	4.9139	10.5179	10.8316	10.4045	11.0629
rep.	6	2	2	2	2
s.e.	0.2468	0.4274	0.4274	0.4274	0.4274

SAMPLE	M13	M14	M15	M16	M17
mean	16.2814	19.4979	18.5010	17.4415	12.3908
rep.	2	2	2	2	2
s.e.	0.4274	0.4274	0.4274	0.4274	0.4274
SAMPLE	M18	M19	M2	M20	M3
mean	12.8673	15.0503	14.6237	16.2671	9.6781
rep.	2	2	2	2	2
s.e.	0.4274	0.4274	0.4274	0.4274	0.4274
SAMPLE	M4	M5	M6	M7	M8
mean	11.7582	9.6110	23.9122	12.6316	6.0312
rep.	2	2	2	2	2
s.e.	0.4274	0.4274	0.4274	0.4274	0.4274
SAMPLE	M9				
mean	14.6596				
rep.	2				
s.e.	0.4274				

Minimum standard error of difference 0.4935  
Average standard error of difference 0.5939  
Maximum standard error of difference 0.6044

Least significant differences (at 5%)

1	*				
2	1.0186	*			
3	1.0186	1.2475	*		
4	1.0186	1.2475	1.2475	*	
5	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	*
6	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
7	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
8	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
9	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
10	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
11	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
12	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
13	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
14	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475

15	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
16	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
17	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
18	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
19	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
20	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
21	1.0186	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
1	2	3	4	5	

6	*				
7	1.2475	*			
8	1.2475	1.2475	*		
9	1.2475	1.2475	1.2475	*	
10	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	*
11	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
12	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
13	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
14	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
15	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
16	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
17	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
18	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
19	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
20	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
21	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
6	7	8	9	10	

11	*				
12	1.2475	*			
13	1.2475	1.2475	*		
14	1.2475	1.2475	1.2475	*	
15	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	*
16	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
17	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
18	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
19	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
20	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475
21	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475

11	12	13	14	15					
16	*								
17	1.2475	*							
18	1.2475	1.2475	*						
19	1.2475	1.2475	1.2475	*					
20	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	*				
21	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475	1.2475				
16	17	18	19	20					
21	*								
21									

Minimum least significant difference 1.019  
Average least significant difference 1.226  
Maximum least significant difference 1.247

Nella tabella dei risultati presento due ripetizioni di magnolia e sei ripetizioni di internal standard. Le prime 23 misure sono state fatte il primo giorno e le successive il secondo giorno.

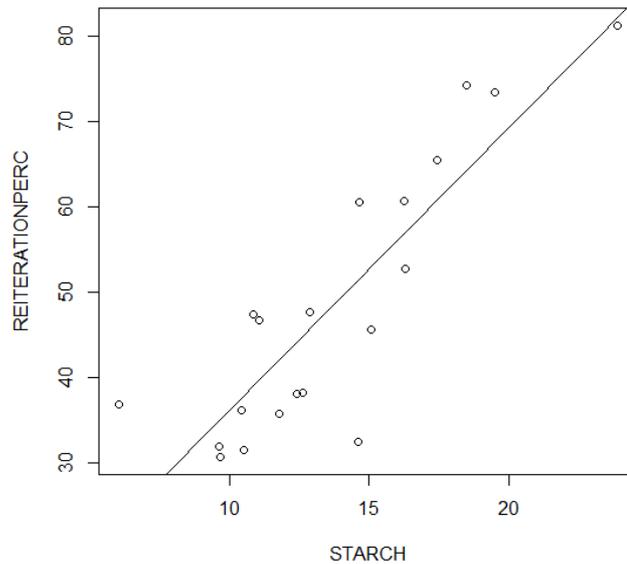
Le ripetizioni sono sufficienti perché l'errore standard della media è molto contenuto. I doppi sono esattamente sovrapposti. Come anche dimostrato dallo standard interno.

I valori sono espressi in g/100g peso secco

le medie vanno dal 6 g/100g di M8 fino a 23 di M6 quindi i campioni sono molto differenziati e si prestano molto bene a fare il tipo di correlazione proposta.

Correlazione

plot(REITERATIONPERC~STARCH)



```
# Creazione del modello di regressione
mod<-lm(REITERATIONPERC~STARCH)
summary(mod)
```

```
Call:
lm(formula = REITERATIONPERC ~ STARCH)
```

```
Residuals:
    Min     1Q   Median     3Q     Max
-18.920 -6.000 -1.088  6.189 13.849
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.9788     6.4072   0.465  0.648
STARCH      3.3125     0.4485   7.385 7.5e-07 ***
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 8.111 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.7519, Adjusted R-squared: 0.7381
F-statistic: 54.55 on 1 and 18 DF, p-value: 7.504e-07
```

Risultati

Pertanto esiste una correlazione lineare tra amido e risposta alla rigenerazione la successiva analisi per valutare la correlazione tra risposta colorimetrica e amido

SAMPLE	STARCH	REITERATIONPERC	VALUTATION
M1	10.518	31.50684932	1
M2	14.6235	32.5	1
M3	9.6785	30.68181818	1
M4	11.758	35.71428571	1
M5	9.611	31.94444444	1
M6	23.912	81.25	3
M7	12.6315	38.20224719	1
M8	6.031	36.80555556	1
M9	14.6595	60.52631579	2
M10	10.8315	47.36842105	1
M11	10.4045	36.20689655	1
M12	11.0625	46.66666667	1
M13	16.2815	52.77777778	2
M14	19.4975	73.46938776	3
M15	18.501	74.19354839	3
M16	17.4415	65.51724138	2
M17	12.391	38.0952381	1
M18	12.867	47.61904762	1
M19	15.0505	45.56962025	2
M20	16.267	60.6557377	2

- class 1 : < 14.65 gr of starch over 100 gr of dry matter
- class 2: between 14.65 and 18 gr of starch over 100 gr of dry matter
- class 3 : > 18 gr of starch over 100 gr of dry matter

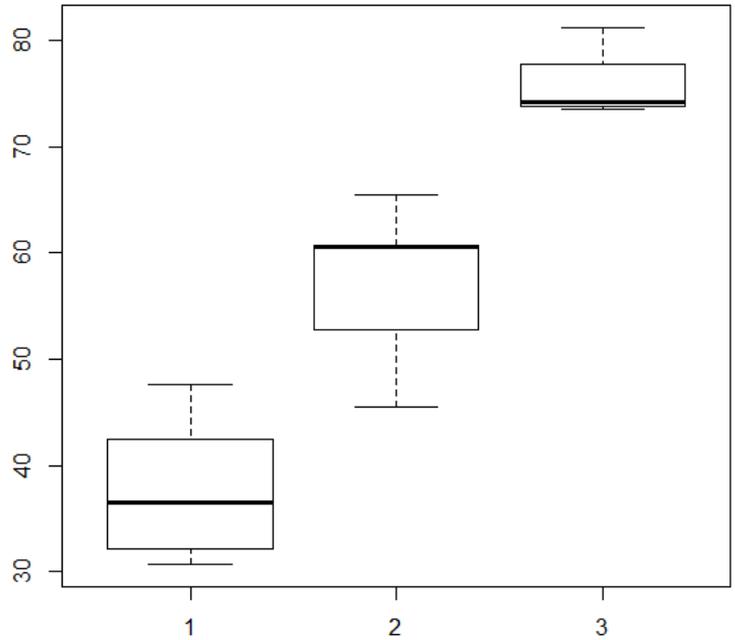


Classe 1

Classe 2

classe 3

Classe 1	Classe 2	classe 3
----------	----------	----------



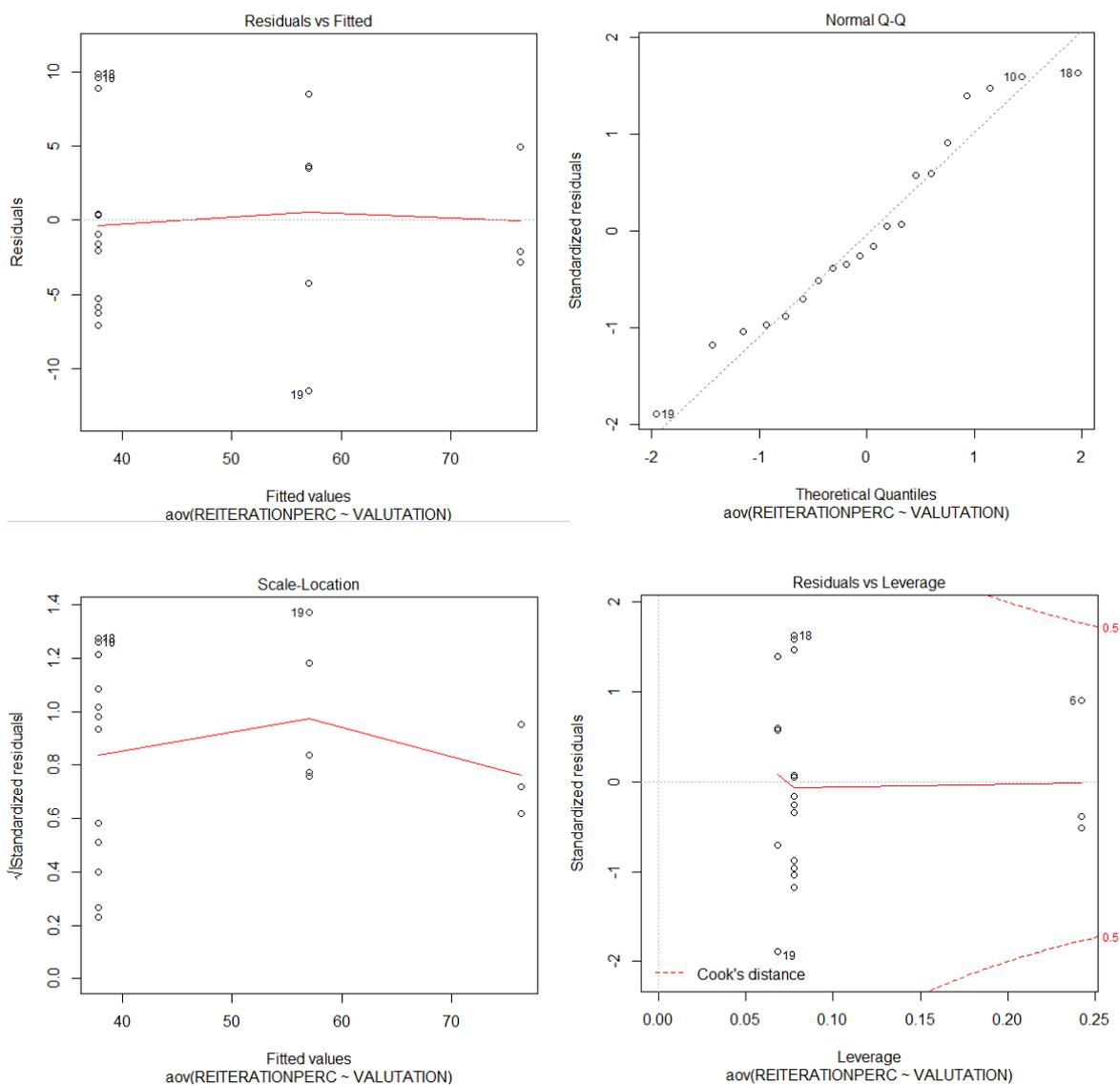
```
mod<-aov(REITERATIONPERC~VALUTATION)
```

```
summary(mod)
```

```
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
VALUTATION 1 4061  4061 102.8 7.22e-09 ***
Residuals 18  711    40
```

```
---
```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 # Residui:
```



## 9.2 Conclusioni

L'analisi con ANOVA ( $p\text{-value} 7.22e-09$ ) conferma la relazione tra colore e classi di amido ed la relazione diretta tra amido e risposta all'ossigenazione .

L'individuazione delle classi su base colorimetrica ci permette pertanto anche se per via sommaria e preliminare una valutazione dello stato metabolico anche in cantiere.



# Capitolo X

## 10 La Valutazione Biomeccanica “Orebla un metodo

### 10.1 Introduzione

Il cedimento degli alberi, sia in foresta che nell'ambiente urbano, costituisce un problema di rilevante interesse per le implicazioni di rischio di danni che esso comporta se il cedimento influisce su persone, cose o attività dell'uomo (Smiley et al., 2011; SIA 2013), come pure per i danni economici (perdita di risorse legnose) ed ambientali (induzione dell'erosione) che esso può comportare (Gardiner e Quine, 2000). La valutazione di stabilità degli alberi è quindi quella pratica che si è recentemente sviluppata, con tecniche diverse da adottare nelle varie situazioni, proprio al fine di studiare, prevedere e contenere il fenomeno del cedimento degli alberi. Accanto all'analisi di tipo visuale (Hayes, 2001; Lonsdale, 1999; Mattheck e Breloer, 1998; Sani, 2008a), basata su tecniche ed assunti fisiomorfologici, strutturali e fitopatologici, si sono in questi ultimi anni sviluppate molte tecniche di indagine che fanno ricorso a modelli biomeccanici o a strumentazioni variamente complesse e comunque finalizzate a stimare, direttamente o indirettamente, la capacità di resistenza di un albero sulla base di alcune proprietà dei tessuti legnosi interni. Numerosi sono i lavori che illustrano e confrontano fra loro queste tecniche, sia sul piano della sperimentazione scientifica che su quello della applicazione professionale e che delimitano le finalità e l'applicabilità dell'analisi modellistica e/o strumentale (Nicolotti et al., 2003; Wang e Allison, 2008; Sani, 2012).

Tuttavia, dal punto di vista puramente professionale e con riferimento alle tecniche più comunemente utilizzate, occorre segnalare come la maggior parte dei metodi analitico-strumentali oggi in uso per la valutazione di stabilità degli alberi sono basati su assunti empirici non supportati da evidenze scientifiche, come ad esempio, l'indice  $t/r$  (Mattheck e Breloer, 1998) o il SIA/SIM (Wessolly e Erb, 1998), oppure sono troppo complessi per essere utilizzati nell'arboricoltura pratica (Foret et al., 1999; Gaffrey e Kniemeier, 2002; Gardiner et al., 2000; Peltola e Kellomaki, 1993; Spatz e Bruechert, 2000).

Anche le varie tecniche strumentali proposte, come le tomografie soniche ed elettriche ed in particolare le prove di sollecitazione, di tipo statico o dinamico, costituiscono un settore di particolare interesse e sviluppo sia in campo scientifico che professionale. Sono infatti stati proposti numerosi contributi scientifici finalizzati non solo a individuare il comportamento degli alberi nel corso del cedimento, ma anche a studiare le tecniche e la strumentazione più appropriata per questo tipo di studi. Tuttavia, nonostante lo sforzo profuso, queste tecniche non risultano ancora essere chiaramente codificate nella loro procedura e soprattutto i risultati conseguiti appaiono spesso estremamente controversi. In pratica, nonostante l'interesse e l'attenzione verso di esse e nonostante il costo che esse richiedono per essere applicate, le informazioni ottenute da queste tecniche

non sembrano ancora fornire informazioni soddisfacenti. D'altra parte, viene sempre di più richiesta una metodologia di valutazione di stabilità che superi l'approccio empirico-pratico fin qui dominante, per mezzo di un nuovo paradigma valutativo maggiormente basato su dati e informazioni oggettive e ripetibili, robustamente correlate in modo chiaro con la propensione al cedimento che un albero detiene nella peculiare situazione in cui si trova a vegetare. Si è quindi sentita la necessità di sviluppare una metodologia avente la finalità eminentemente pratica di consentire la valutazione di stabilità di un albero sulla base di criteri e metodi analitici e strumentali sufficientemente corroborati dal punto di vista scientifico, ma comunque di complessità limitata e tale da poter essere utilizzati nell'ambito dell'attività pratica di valutazione e gestione degli alberi. Ciò in quanto l'approccio puramente visuale, sia pure se integrato dalle tradizionali metodologie di analisi strumentale, ci è sembrato insufficiente per addivenire ad una valutazione di stabilità sufficientemente approfondita, in particolare per quegli alberi di grande valore ornamentale, storico o paesaggistico. Qui si propone quindi un nuovo metodo, implementato su Excel® e denominato Orebla, che è stato costruito proprio con l'obiettivo di fornire un aiuto nel processo diagnostico che sta alla base della valutazione di stabilità e come strumento utile per verificare l'opportunità e l'efficacia delle scelte colturali perseguibili per la cura e la conservazione degli alberi.

## **10.2 Orebla**

Orebla cerca di riprodurre la situazione reale in cui si trova l'albero, mediante una modellazione di forma e dimensioni dei vari organi, per poi utilizzare un approccio biomeccanico per la stima di alcune variabili significativamente correlate con la propensione al cedimento. Nel fare questo, vengono utilizzate le informazioni derivanti dall'analisi strumentale, in modo da perseguire il maggior livello possibile di oggettività del procedimento diagnostico.

Tale approccio analitico integra, ma non sostituisce, la valutazione visuale dell'albero eseguita con i metodi tradizionali oggi in uso (Sani, 2008a; Sani, 2012), in quanto sono solo tali metodiche che individuano, con modalità diverse, la presenza e l'estensione di difetti strutturali o di patologie degenerative nel tessuto legnoso. L'analisi modellistica e l'approfondimento strumentale, tramite una stima delle sollecitazioni esercitate in casi concreti (stima approssimata a causa dell'anisotropia della struttura legnosa, della complessità strutturale dell'albero e dell'altrettanto complessa interazione con la dinamica del vento), permette una individuazione puntuale e orientativa del fattore di sicurezza "reale", mediante il rapporto fra variabili significative dal punto di vista biomeccanico. In sostanza la valutazione di stabilità degli alberi è e deve rimanere una pratica diagnostica, basata su criteri il più possibilmente oggettivi ma comunque condizionata dal ruolo, dalle funzioni e dal valore dell'albero nel contesto in cui vegeta, dalla sua aspettativa di vita e dalla possibilità di scelte colturali che si possono su di esso adottare.

Qui di seguito si descriverà prima il modello Orebla nei suoi vari componenti, quindi si forniranno alcuni cenni sulle tecniche strumentali più complesse che possono essere applicate e che costituiscono la base empirica conoscitiva per la costruzione di un modello il più possibile aderente alla realtà, infine si

esemplificheranno alcuni esempi pratici al fine di individuare i limiti, le potenzialità ed i possibili sviluppi futuri di questa metodica.

### **10.3 La modellazione dell'albero**

Qualunque strumento analitico che si prefigge l'obiettivo di determinare le condizioni di stabilità di un albero mediante un'analisi biomeccanica delle forze che possono verificarsi nel corso del processo di sollecitazione e di cedimento della pianta, deve in via prioritaria sviluppare un metodo di rappresentazione della forma e delle dimensioni dell'albero in modo tale da poter stimare le possibili forze in gioco. Si tratta quindi di modellizzare l'albero in modo tale da poterne calcolare le dimensioni, la massa e le altre variabili necessarie per la stima delle sollecitazioni. Questa modellazione della forma dell'albero può avvenire ricorrendo a tecniche e metodologie variamente complesse:

- Metodi sintetici per approssimazione, in cui l'albero è assimilato a figure geometriche semplici di cui si può determinare facilmente il volume o la massa. Si tratta di metodi che semplificano molto la forma dell'albero e non sono quindi adatti per l'uso pratico ma solo per indagini di tipo orientativo. Pur tuttavia alcune forme geometriche tipo sono utilizzate per la rappresentazione della forma della chioma anche in metodi complessi.
- Metodi analitici-empirici assai laboriosi, con i quali l'albero è suddiviso in piccole parti e viene misurato in dettaglio, ricostruendo successivamente la forma precisa dei diversi organi e misurando il relativo peso. Si tratta di metodi molto laboriosi, utilizzabili nell'ambito della ricerca ma inapplicabili sul piano dell'Arboricoltura pratica.
- Metodi analitici, in cui l'albero viene rappresentato ricorrendo ad un sistema di equazioni che cercano di simulare il processo di accrescimento (Prusinkiewicz e Runions, 2012) o altri aspetti significativi della fisiologia degli alberi. Si tratta di metodi estremamente complessi, di recente introduzione, il cui uso è rivolto prevalentemente al campo dell'analisi morfofunzionale e non trovano applicazione in ambito pratico, proprio a causa della eccessiva complessità e dello sforzo computazionale che richiedono.

Nell'arboricoltura pratica è quindi necessario riferirsi a metodi del secondo tipo, che non siano troppo semplicistici nella interpretazione della forma degli alberi ma nemmeno eccessivamente complessi e dispendiosi per la numerosità delle variabili da acquisire. Questo tipo di approccio comporta una certa approssimazione nella rappresentazione dell'albero e questa approssimazione si ripercuote nella stima delle sollecitazioni e dei cedimenti. L'obiettivo è evidentemente quello di contenere tale approssimazione entro i limiti dell'incertezza comunque insita in ogni metodo di valutazione.

La modellazione dell'albero è stata quindi realizzata in Orebla suddividendo la pianta nelle sue componenti fondamentali e costruendo per ciascuna di esse un sistema di stima o misura. Qui di seguito si descrive la struttura del modello così come è stata suddivisa nei diversi organi.

### 10.3.1 Il tronco dell'albero

Fra le varie forze che entrano nel processo di cedimento vi è anche il peso proprio dell'albero che determina una spinta gravitazionale che può essere anche molto significativa in particolare per alberi inclinati. Gran parte della spinta gravitazionale esercitata da un albero è dovuta al peso del tronco. Il peso del tronco è determinato dalla sua forma. Quest'ultima viene studiata integrando una funzione di profilo, cioè un'equazione o un sistema di equazioni che spiegano l'andamento della variazione del diametro (o del raggio) al variare dell'altezza dell'albero. Una disamina datata ma abbastanza esaustiva sui diversi tipi di funzioni di profilo è rintracciabile in Sani (1992).

A fini pratici, la più semplice e largamente utilizzata funzione di profilo per la modellazione del tronco, implementata in Orebla, è la:

$$r(h_i) = r_b * z^\alpha$$

dove  $r(h_i)$  [m] è il raggio del tronco all'altezza  $h_i$ ,  $r_b$  [m] è il raggio alla base,  $z = 1 - h/H$  [m] ed  $\alpha$  [-] è il coefficiente di rastremazione. Il raggio alla base può essere o misurato, o calcolato con la:

$$r_b = dbh / 2 * TR$$

dove  $dbh$  [m] è il diametro a petto d'uomo e  $TR$  [-] è il rapporto fra il diametro a petto d'uomo e quello alla base, misurato con esclusione della svasatura basale (Sani, 2007).

Poiché il valore di  $\alpha$  fornisce informazioni in merito alle modalità di accrescimento del tronco (Niklas, 1992), è possibile scegliere fra una serie di valori: adottando  $\alpha = 0.5$  ci poniamo in condizioni di accrescimento che prevede l'omogeneità della tensione,  $\alpha = 0.67$  (2/3) implica omogeneità elastica,  $\alpha = 1$  determina una omogeneità geometrica. È altresì possibile utilizzare un profilo con valori intermedi:  $\alpha = 0.58$  corrispondenza stress-elastica e  $\alpha = 0.83$  corrispondenza elastico-geometrica.

È possibile applicare anche una funzione di profilo in condizioni di omogeneità elastica (Scatter e Kucera, 2000) che tiene conto della profondità della chioma:

$$r(h_i) = dbh / 2 * (1 - 2 * h_i / (H + hbc))^{1/3} \quad \text{per } h_i < hbc$$
$$r(h_i) = dbh / 2 * (1 - hbc^2 / H^2)^{-1/3} * (1 - h_i / H)^{2/3} \quad \text{per } h_i > hbc$$

dove  $hbc$  [m] è l'altezza di base della chioma.

In Fig. I.1 è riportato l'andamento della funzione di profilo implementata in Orebla, per valori diversi del coefficiente di rastremazione, in un caso di esempio.

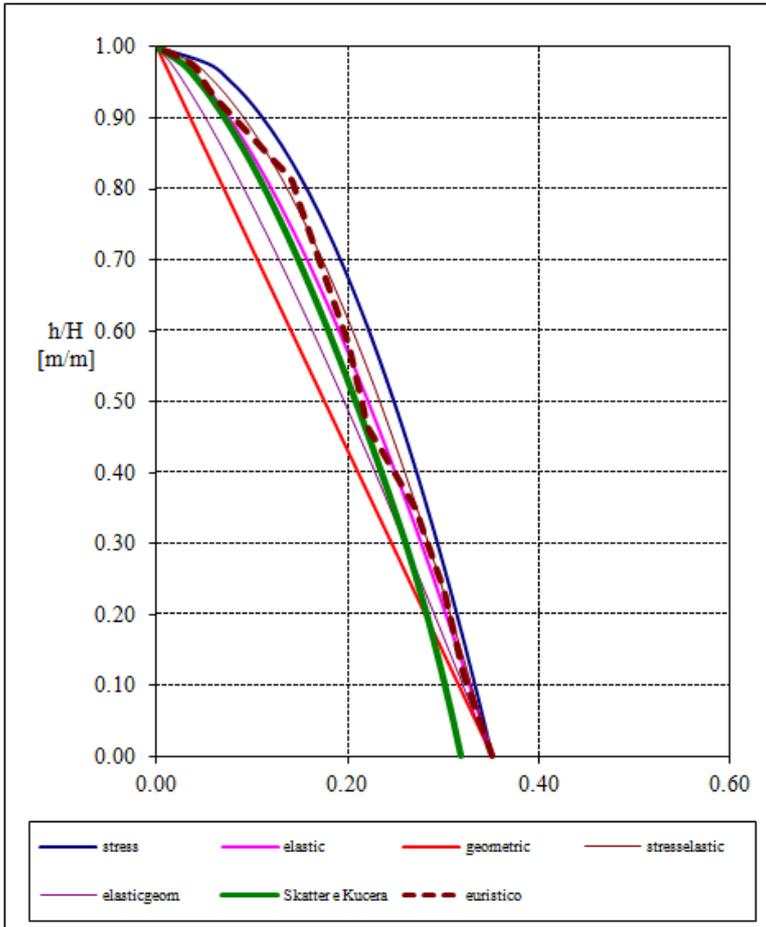


Fig. 1.1 funzioni di profilo del tronco

Determinato il profilo del tronco il calcolo del suo volume  $V_{tr}$  [m<sup>3</sup>] può avvenire per semplice integrazione della I.1 o ricorrendo alla cubatura per sezioni (La Marca, 2004):

$$V_{tr} = \int_0^l v_t(h_i) = \int_0^l \frac{\pi}{4} (r_{i-1} + r_{i+1})^2 \cdot l_i$$

dove  $v_t(h_i)$  [m<sup>3</sup>] è il volume del toppo all'altezza  $h_i$ ,  $r_{i-1}$  e  $r_{i+1}$  sono i raggi del tronco all'altezza  $h_{i-1}$  e  $h_{i+1}$  mentre  $l_i$  è la lunghezza del toppo uguale a  $h_{i+1} - h_i$ .

La massa del tronco  $M_{tr}$  [kg] è determinata mediante la:

$$M_{tr} = V_{tr} \cdot (\rho_l - \rho_a)$$

dove  $\rho_l$  [kg/m<sup>3</sup>] è la densità media del legno allo stato fresco, relativo alla specie considerata.

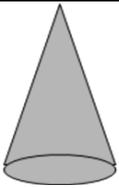
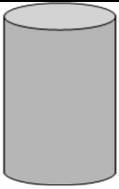
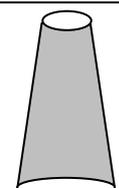
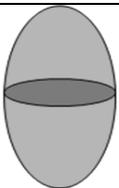
La forza peso del tronco  $P_t$  [N] è infine data da:

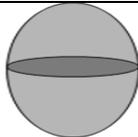
$$P_{tr} = M_{tr} \cdot g$$

con  $g$  [m/s<sup>2</sup>], costante gravitazionale pari 9.8067.

### 10.3.2 La chioma

La stima accurata della forma della chioma costituisce un aspetto di particolare importanza nella valutazione biomeccanica della stabilità di un albero, in quanto sono proprio le dimensioni di questa struttura che determinano in gran parte la quantità di vento o di neve e quindi la sollecitazione, che si riflette sugli organi di sostegno dell'albero e sulla zolla radicale. A favore della sicurezza è opportuno considerare la superficie della chioma nella sua massima esposizione possibile e cioè assumendo, nel caso della interazione con il vento, che la situazione critica (in termini di intensità) si manifesti proprio ortogonalmente alla superficie più ampia che la chioma può offrire, indipendentemente dal suo orientamento e da quello dei venti dominanti. Si individua cioè la superficie più ampia che l'albero può opporre al vento e quella diventa, tout court, la superficie di esposizione della pianta. La misura di tale superficie può avvenire ricorrendo a tecniche diverse. In vari casi la proiezione della chioma sul piano viene approssimata ad una figura geometrica simile, di superficie facilmente misurabile, come il triangolo o il cerchio. Nella Tab. 1.1 sono riprodotte alcune forme classiche e le formule per calcolarne la superficie ed il volume.

	$A = D * L / 2$  $V = \pi / 12 * D^2 * L$
	$A = D * L$  $V = \pi D^2 / 4 * L$
	$A = (D + d) * L / 2$  $V =$
	$A = D * L / 2$  $V = 4/3 * \pi * [(D + L)/4]^3$
	$A = ?$  $V = (0,606 - 0,002 * D) * L * D^2$

	$A = \pi / 8 * D^2$
	$A = \pi / 4 * D^2$ $V = \pi / 6 * D^3$

Tab. I.1: formule di riferimento della superficie A e del volume V, dall'alto verso il basso, per il cono, il cilindro, il tronco di cono, l'ellissoide, l'uovo, il duomo e la sfera. Nelle formule, D è il diametro e L la lunghezza della figura.

Questo modo di misurare la superficie è ovviamente rapido ma molto approssimato, per cui è corretto utilizzarlo solo nell'ambito di indagini di tipo inventariale, dove è necessario elaborare una notevole mole di dati in tempi ristretti e con limitate risorse economiche per ogni albero.

Se è necessario acquisire informazioni più precise, la chioma può essere fotografata, quindi si scontorna il profilo e se ne misura la superficie ricorrendo ad appositi programmi, oppure con il metodo dei punti o quello delle pesate. Naturalmente questo metodo presuppone che la chioma sia ben visibile da un punto sufficientemente distante e nella sua massima espressione, che è quella che si vuole misurare. Inoltre occorre anche tenere in considerazione che la fotografia, comunque eseguita, è un po' distorta, in funzione della distanza e dell'altezza da cui viene eseguita. Abbiamo cioè un errore che è tanto maggiore quanto più siamo vicini all'albero.

Un ulteriore metodo di stima della superficie della chioma che, sia pure con una certa approssimazione, permette di modellarla abbastanza accuratamente anche allorquando non è possibile fare una fotografia chiara dell'albero, e che ha anche il pregio di avere una efficace e rapida misura della distribuzione della superficie alle varie altezze è stato recentemente proposto (Sani et al., 2012). In questo metodo la chioma, in condizioni di calma di vento, viene modellizzata ricorrendo ad un insieme di 4 funzioni esponenziali del tipo:

$$r_i = r_b * (1 - r_0)^{h_i}$$

dove  $r_i$  [m] è il raggio della chioma all'altezza  $h_i$  e  $r_0$  [-] è un coefficiente di forma variabile per le 4 funzioni. Le funzioni modellano rispettivamente la porzione inferiore sinistra o destra (dove  $r_b$  è  $r_{mcsx}$ ,  $r_{mcdx}$  = raggio di massima espansione della chioma sul lato sinistro o destro e  $r_0$  = parametro di normalizzazione fra l'altezza di base della chioma ( $h_{bcsx}$  e  $h_{bcdx}$  [m]) e quella di massima espansione della chioma ( $h_{mcsx}$  e  $h_{mcdx}$  [m]) sul lato sinistro o destro). In questo modo è possibile simulare abbastanza fedelmente la forma di chiome, o meglio la forma della superficie di massima esposizione di chiome, anche notevolmente disomogenee.

Le 4 funzioni di profilo consentono poi, in modo agevole, di determinare la superficie di massima esposizione

della chioma (Ach [m<sup>2</sup>]), il volume per sezioni alle diverse altezze, e quello totale mediante somma del volume afferente alla relativa parte della chioma.

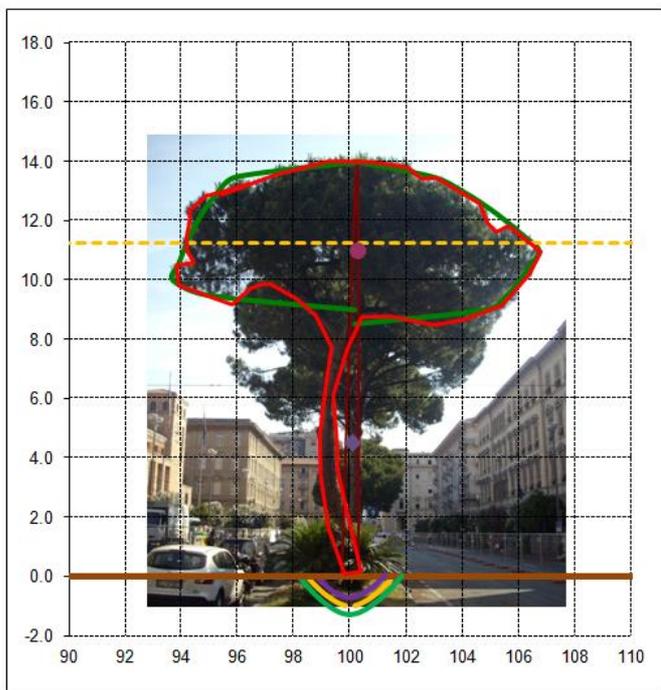


Fig. 15.14: La simulazione della superficie della chioma con il metodo Orebla

Occorre comunque sempre ricordare che la scelta, come superficie di riferimento della chioma, di quella rappresentata su un piano orizzontale, non tiene conto della superficie degli organi interni, rami e foglie, che di molto aumenta il valore di riferimento. Nella tabella I.1 sono riportate le principali formule di geometria dei solidi, con le relative superficie e volume. Se la chioma dell'albero è approssimabile ad un solido di forma geometrica semplice o componibile da figure geometriche semplici, non è quindi difficile calcolarne il volume. Nel caso si ricorra ad una superficie "reale", la misura del volume non può avvenire che per suddivisione della figura geometrica in un numero il più possibile elevato di strisce orizzontali, nella loro approssimazione ad un anello sferico e quindi nella somma dei diversi volumi così misurati. L'operazione, non difficile ma laboriosa, è di solito eseguita nei programmi di analisi modellistica degli alberi appena più sofisticati. Ciò che interessa nell'analisi modellistica degli alberi finalizzata alla loro stabilità, tuttavia, non è tanto il volume, quanto piuttosto la massa e quindi il peso della chioma. Vi sono molti modi per stimare la massa della chioma. Il più semplice e speditivo è certamente quello di attribuire un valore in percentuale rispetto alla massa del tronco, misurato o stimato con tecniche dendrometriche.

$$P_{ch} = P_{tr} * \%P_{tr}$$

In linea di larga massima il peso della chioma può aggirarsi intorno al 20%, con valori anche di molto inferiori, per chiome leggere e poco ramificate, fino ad oltre il 100% del peso del tronco, per chiome molto ramosi. Con un po' di pratica si riesce a stimare questo dato in modo sufficientemente accettabile.

Altrimenti si stima dendrometricamente il peso di tutti i rami per poi aggiungere solo una percentuale del loro peso relativa alla massa delle foglie:

$$Pch = Prm * \%Prm$$

Un ulteriore metodo, assai più brigoso, consiste nello stimare il peso suddividendo la parte fogliare da quella legnosa. Il peso delle foglie Pfg [N] è calcolato moltiplicando la superficie fogliare del toppe Sfg [m<sup>2</sup>], che dipende dalla sua forma, per il coefficiente di massa superficiale Mfg [kg/m<sup>2</sup>] (il peso delle foglie per m<sup>2</sup> di superficie fogliare) per il coefficiente di trasformazione superficie-superficie CSS (la superficie fogliare totale per m<sup>2</sup> di superficie fogliare esterna della chioma).

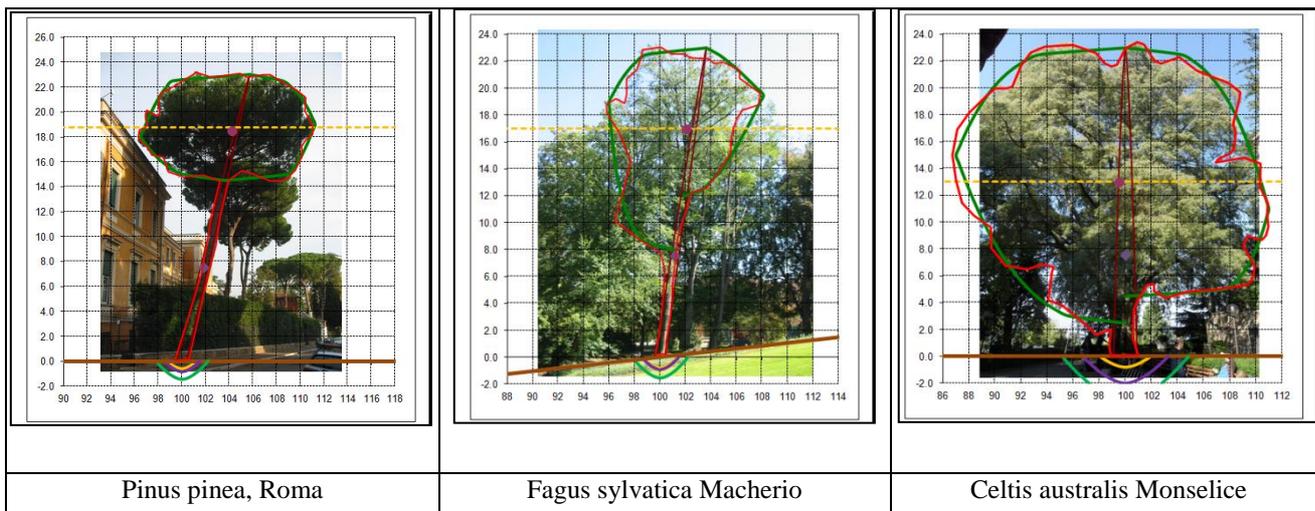
$$Pfg = Sfg * Mfg * CSS * g$$

La stima della forza peso dei rami Prm [N] è in funzione della percentuale rispetto alla massa del tronco:

$$Prm = Mtr * RsuT * g$$

dove RsuT [-] è il rapporto fra peso dei rami e peso del tronco. La stima del peso con modalità analoghe a quelle seguite per il tronco richiede uno sforzo non tanto computazionale quanto di rilevamento delle variabili troppo consistente rispetto alla maggiore accuratezza conseguibile. La forza peso della chioma è quindi determinata dalla somma dei valori afferenti ai rami e alle foglie.

$$Pch = (Prm + Pfg)$$



### 10.3.3 Eccentricità

L'inclinazione dell'asse del tronco dell'albero rispetto alla normale passante per il centro del colletto costituisce un difetto strutturale frequente. Il tipo di inclinazione del tronco e le cause che la determinano, possono essere molto diverse, come pure gli effetti che l'inclinazione determina nei confronti della stabilità del soggetto arboreo che la manifesta (Smiley, 2005). Le tipologie standard di inclinazione sono quella lineare, la sciabolatura e l'arcuatura ma non mancano certamente morfologie sinuose anche particolarmente complesse. In ogni caso l'inclinazione del tronco e quindi l'eccentricità fra il centro del colletto e quello alle diverse altezze lungo l'albero, determina una forza gravitazionale tanto maggiore quanto maggiore è la distanza fra i due centri.

L'eccentricità del tronco alle diverse altezze  $E_{tr}(h_i)$  [m] è misurata ricorrendo alla:

$$E_{tr}(h_i) = h_i * \text{TAN}(I_{tr}) * (h_i/H) - r_b$$

dove  $I_{tr}$  [°] è l'angolo rispetto alla normale formato dal tronco fra il colletto e l'altezza del tronco o l'altezza totale e  $r_b$  [m] è il raggio alla base.

L'eccentricità del tronco, ma anche la diversa lunghezza dei rami nelle varie direzioni, determina l'eccentricità della chioma, cioè il disassamento di questa rispetto al centro del colletto. Questo spostamento del peso provoca una forza gravitazionale che, per chiome pesanti e molto sbilanciate o a bandiera, può risultare assai considerevole.

L'eccentricità della chioma  $E_{ch}(h_i)$  [m] rispetto alla normale passante per il colletto viene prudenzialmente misurata rispetto alla superficie di massima esposizione della chioma: il valore dello spostamento è quindi dato, alle varie altezze, dalla posizione della mediana fra i raggi della chioma calcolati:

$$Ech(h_i) = ASS (r_{mcdx}(h_i) - r_{mcsx}(h_i)) / 2$$

dove  $Ech(h_i)$  [m] è il centro di gravità della chioma all'altezza  $h_i$ ,  $r_{mcdx}(h_i)$  e  $r_{mcsx}(h_i)$  [m] sono rispettivamente il raggio della chioma sul lato destro e su quello sinistro. A questo valore si aggiunge poi l'eccentricità del fusto a quell'altezza.

Le formule precedenti misurano l'eccentricità del tronco e della chioma in calma di vento. La spinta del vento, però, determina una ulteriore inclinazione, che si somma alla precedente e che dipende, dinamicamente, dalla velocità del vento, dalla forma dell'albero e dall'elasticità del materiale costituente. Lo spostamento dovuto al vento, in termini di deviazione orizzontale dalla normale alle diverse altezze, cioè la freccia  $f(h_i)$  [m], è misurata ricorrendo alla formulazione (Belluzzi, 2001):

$$f(h_i) = 3 / 5 * (Sw * h_i^3) / (E * J_{max})$$

dove  $Sw$  [N] è la spinta del vento,  $h_i$  [m] è l'altezza lungo il fusto,  $E$  [MPa] è il modulo di elasticità e  $J_{max}$  [m<sup>4</sup>] è il momento di inerzia alla base del tronco, che dipende dalla forma della sezione e, per un cilindro, vale  $\pi * r_i^4$ .

#### 10.3.4 Il contributo della forma del colletto alla sezione resistente

Il momento di inerzia è una proprietà che si basa sulla forma della sezione radiale di una trave e definisce il contributo che la forma geometrica della sezione fornisce alla resistenza alla flessione della trave stessa. Si calcola sommando, per tutta l'area  $A$  della sezione, il prodotto di ogni piccola areola infinitesimale ( $dA$ ) per il quadrato della distanza fra l'areola e il centro geometrico (o asse neutro) del fusto:

$$I = \int d^2 dA$$

Appare chiaro che il momento di inerzia  $I$  non dipende per nulla dalle proprietà del materiale ma solo dalla forma della sezione esaminata (quindi è uguale per una trave di acciaio o di legno) e che il suo valore, in un albero, aumenta esponenzialmente con l'accrescimento in quanto aumenta con il quadrato della distanza dall'asse neutro e con la superficie della sezione.

Il modulo di resistenza permette di sintetizzare in un unico valore il contributo formale dato dalla distanza dall'asse neutro e dalle dimensioni della sezione, ed è la variabile che "entra" a far parte dei modelli di analisi della sollecitazione. Non è difficile passare dal momento di inerzia al modulo di resistenza. Ad esempio, poiché per un cerchio il momento di inerzia è:

$$I = \frac{\pi}{4} R^4 = \frac{\pi}{64} D^4$$

unendo avremo:

$$W = \frac{\pi}{4} R^3 = \frac{\pi}{32} D^3$$

modulo di resistenza di figure geometriche

Le formule di calcolo del modulo di resistenza per sezioni radiali di alberi che possono essere approssimate a un cerchio o ad una ellisse, in sezione sana o in presenza di una cavità rigorosamente centrale, sono indicate in Fig. 10.33.

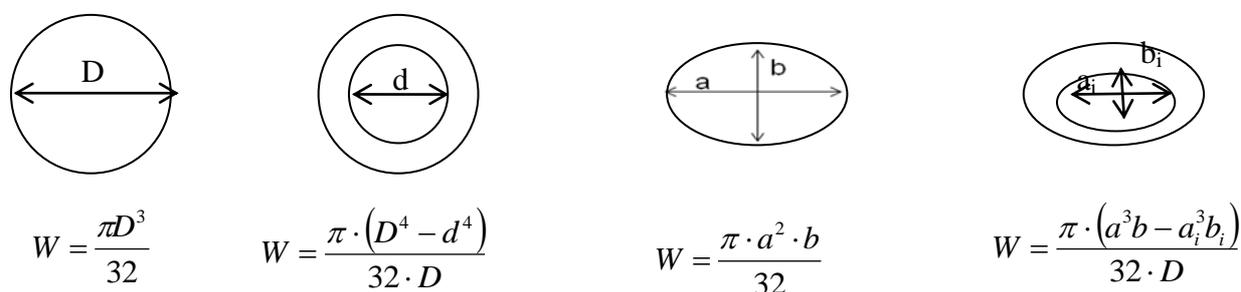


Fig. 10.33: formule per la misura del modulo di resistenza di una sezione circolare o ellittica, senza e con cavità centrale.

Si noti che, nel caso dell'ellisse, si possono avere due (in realtà infiniti) moduli di resistenza diversi a seconda che si consideri come asse neutro l'asse maggiore o quello minore. Appare chiaro che per la valutazione di stabilità di un albero si debba individuare quel modulo di resistenza della sezione critica che risulta minore di tutti, in quanto presumibilmente sarà esso a risultare il più critico. Poiché il momento di inerzia è tanto maggiore quanto maggiore è la distanza di una particella legnosa dall'asse neutro del tronco, è abbastanza facile individuare la posizione dell'asse neutro più critico in quanto sarà quella posizione per la quale, ortogonalmente ad essa, l'ampiezza del tronco è minima (Fig. 10.34).

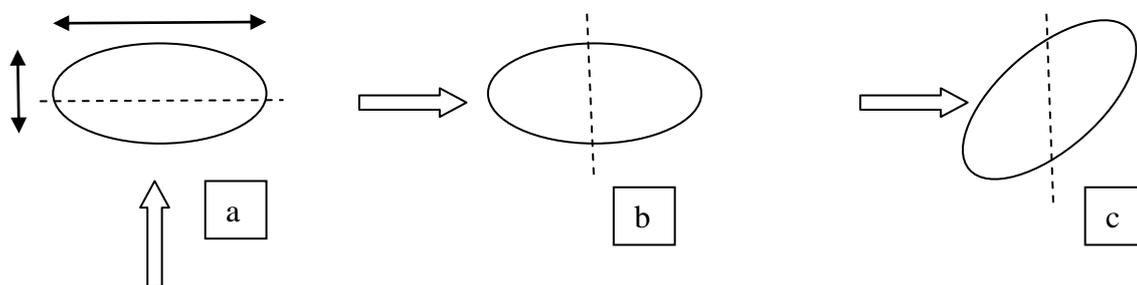


Fig. 10.34: data un'ellisse di  $D = 3$  cm e  $d = 1.5$  cm, se l'asse neutro è lungo  $D$  (caso a), il modulo di resistenza è  $0,66$  cm<sup>3</sup>. Questa è la situazione più critica. Nel caso b, in cui l'asse neutro coincide con  $d$ , il modulo di resistenza è  $1,32$  cm<sup>3</sup>. Vi sono poi altri infiniti moduli di resistenza intermedi fra questi due valori,

a seconda di come si pone l'asse neutro (caso c). La freccia indica la direzione della sollecitazione (ad esempio il vento prevalente).

momento di inerzia di figure complesse

In presenza di superfici planimetriche complesse, il momento di inerzia (e quindi il modulo di resistenza) può essere calcolato ricorrendo a programmi o applicazioni largamente disponibili (anche in Autocad®), oppure con il metodo dei riquadri. Con tale metodo (Fig. 10.35), acquisita la planimetria della sezione di misura, si calcola il fattore di scala. Se, ad esempio, l'immagine ha raggio 9 cm e il diametro dell'albero in quel punto è 100 cm, il fattore di scala è  $9:100=1:x$  per cui  $x=100/9=11.11$  cm. A questo punto si riporta sull'immagine una griglia a maglia quadrata di lato  $l$  noto, il più piccolo possibile nei limiti del livello di precisione che si desidera ottenere, e la si sovrappone alla sezione del tronco in scala. Come abbiamo detto poco sopra, una certa importanza riveste il modo in cui la griglia viene sovrapposta alla sezione del tronco: poiché la sollecitazione critica può avvenire da qualunque direzione, l'obiettivo è quello di determinare l'asse neutro relativo alla forma più critica. Si tratta cioè di valutare, anche empiricamente, qual è la direzione della sollecitazione che "incontra" meno legno e cioè quella coincidente con il diametro più piccolo, in quanto tale direzione darà il momento di inerzia minore. Se, invece, si ritiene che una direzione specifica sia più sollecitata di altre, perché queste ultime sono magari ben protette da altri alberi o edifici, si può evidentemente misurare il momento di inerzia rispetto a quella sezione. Nella scelta del posizionamento si può, o meglio si deve, tenere conto della presenza di legno di reazione, quale indicatore di sollecitazioni peculiari. Una volta sovrapposta la griglia tenendo conto di queste considerazioni si calcola, per ogni quadratino "coperto" dalla planimetria (cioè interno ad essa), il valore afferente a quella riga, come suo contributo al momento di inerzia della sezione. Tale valore, per la prima fila di quadrati, sopra e sotto l'asse neutro è dato dal prodotto dell'area (12) per il quadrato della distanza ( $l/2$ ) per cui è:

$$I = \int d^2 dA = l^2 \cdot (l/2)^2 = 0.25 \cdot l^4$$

Il contributo dei quadratini pieni posti sulla seconda riga sopra e sotto l'asse è:

$$I = \int d^2 dA = l^2 \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot l\right)^2 = 2.25 \cdot l^4$$

Il contributo dei quadrati sulle terze righe vale  $6.25 l^4$ , di quelli sulle quarte righe vale  $12.25 l^4$  e di quelli sulla  $n$ -esima riga vale  $[1/2 + (n-1)]^2 \cdot l^4$ . I quadratini interessati solo in parte vanno a sommarsi per la parte relativa, stimata sinteticamente, al totale di riga. Una volta stimati i quadratini "pieni" presenti su ogni riga e moltiplicati per il relativo contributo, è sufficiente sommare il valore ottenuto per ogni riga per avere una buona stima del momento di inerzia, tanto più accurata quanto più i quadratini sono di piccole dimensioni

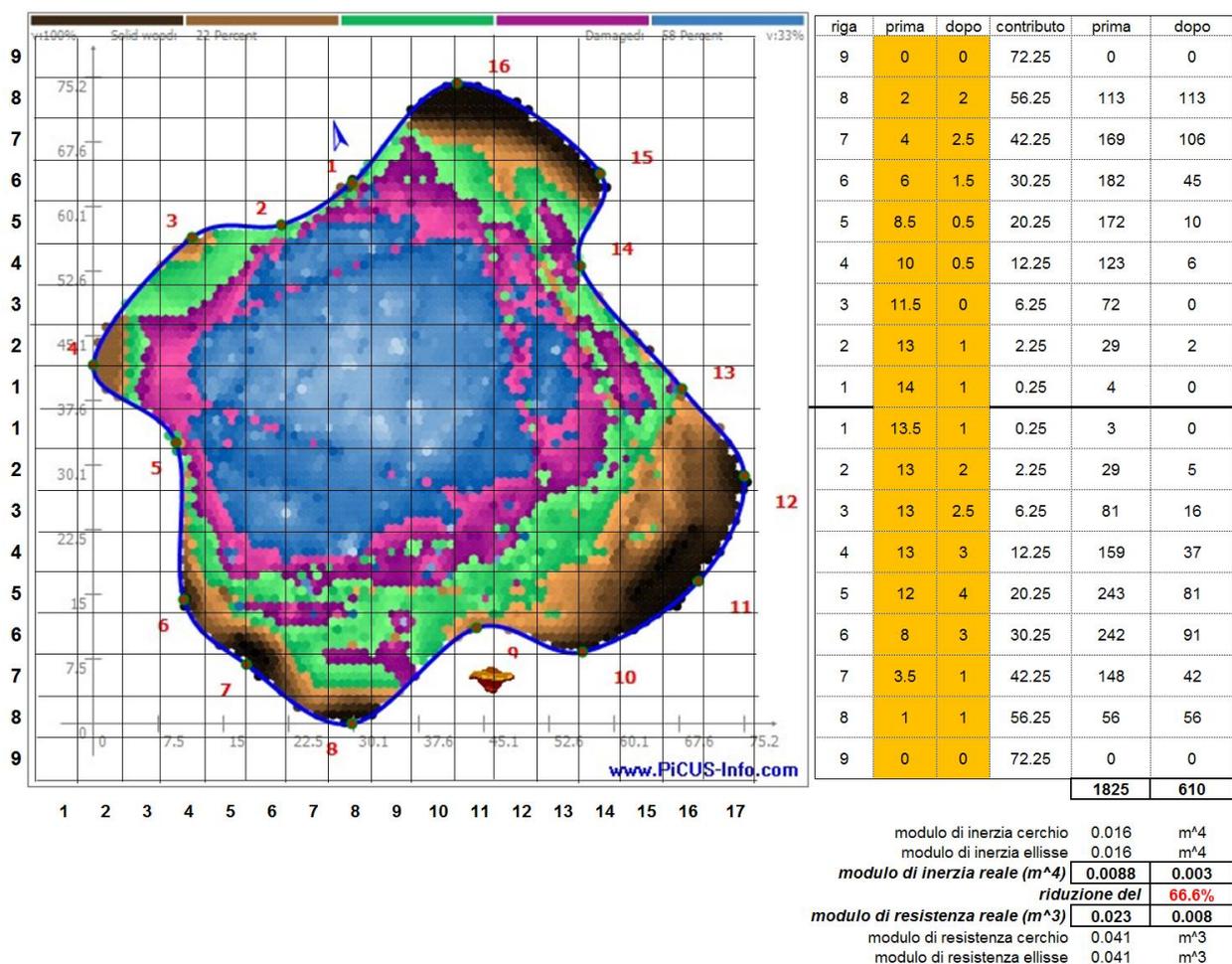


Fig. 10.35: il metodo dei riquadri per il calcolo del momento di inerzia. Nella rappresentazione tomografica della sezione si assume arbitrariamente che l'area marrone sia "sana" e che le aree in colore verde, rosso o blu siano degradate e quindi non apportino alcun contributo al modulo di resistenza effettivo della sezione esaminata.

Questo metodo può essere utilizzato anche per stimare la riduzione del momento di inerzia determinata dalla presenza di carie o cavità che hanno danneggiato i tessuti legnosi interni. Si può infatti prima stimare il momento di inerzia del perimetro formato dalla sezione dell'albero considerata come integra, quindi ad esso si sottrae il contributo al momento di inerzia dato dalle zone a legno degradato o che non forniscono più una sufficiente resistenza meccanica alla sollecitazione. Disponendo di una tomografia sonica attendibile, è quindi facile ottenere non solo il momento di inerzia della sezione esaminata priva di difetti (superficie sottesa dalla riga blu in fig. 10.33) ma anche il momento di inerzia della sezione nelle condizioni in cui si trova, con evidenziata la zona soggetta a degradazione legnosa. È appunto sufficiente escludere dal conteggio i quadratini in cui la tomografia evidenzia la presenza di legno a bassa diffusione sonica, quindi presumibilmente degradato (ad esempio. le zone blu e rosse in Fig. 10.35), e, magari, contare parzialmente quelle zone che si presentano presumibilmente in una fase iniziale di degradazione (come le zone verdi in Fig. 10.35) per ottenere alla fine il valore del momento di inerzia in sezione degradata reale, da confrontare con quello in sezione sana.

### 10.3.5 Il modellazione del carico da neve

Le precipitazioni solide che possono persistere sull'albero per un certo tempo, e quindi costituire un carico aggiuntivo significativo dal punto di vista della stabilità, sono il ghiaccio e la neve. Nell'ambito della valutazione di stabilità degli alberi interessa solo l'effetto gravitazionale di questi fenomeni, mentre si rimanda ai testi specialistici per un approfondimento degli effetti e delle interazioni fisiologiche di queste forme di precipitazione.

La neve costituisce spesso un importante carico aggiuntivo, in quanto può determinare il cedimento strutturale di un albero, sia per ribaltamento della zolla, sia per rottura del tronco o dei rami. Ciò può accadere sia in alberi ben bilanciati, a causa del notevole aumento del peso determinato dalla neve che si deposita sui rami e fra gli aghi (per le conifere), sia in alberi inclinati e/o con chioma asimmetrica, dove l'aumento del peso dovuto al depositarsi della neve incrementa in modo sensibile l'eccentricità del carico e quindi la sollecitazione. Il punto di applicazione di questa forza, se intesa unitariamente, è individuabile nel baricentro della chioma. Tuttavia il carico da neve non deve essere sopravvalutato in quanto, in presenza di vento, la neve tende a staccarsi dalla chioma e depositarsi al suolo. Concretamente, il carico aggiuntivo della neve deve essere considerato presente solo fino ad una velocità del vento pari a 10 m/s, per poi annullarsi oltre tale valore. La neve costituisce quindi un carico gravitazionale pericoloso sui rami di minori dimensioni già danneggiati o, per l'albero intero, quando si verifica in un momento in cui il terreno non è gelato ma anzi è "allentato" dall'acqua caduta in precedenza. A questo proposito si ricordi come in Nord Europa si registrano prevalentemente cedimenti della zolla in estate e cedimenti del tronco in inverno, proprio in virtù della rigidità indotta dal terreno gelato. Diversamente la formazione di ghiaccio sui rami (galaverna) non si riduce con l'aumentare dell'intensità del vento e quindi spesso determina rotture o cedimenti significativi.

La stima del carico di neve su un albero (Sani, 2008) è particolarmente complessa, in quanto dipende strettamente dalla sua architettura, che è assai difficile da modellizzare in modo chiaro e semplice, e dalla natura intrinsecamente dinamica del fenomeno, in quanto il carico di neve dipende dalla temperatura, dalle condizioni della neve, dal vento che agisce sul manto nevoso e da altre variabili ancora. Nel processo di modellazione del fenomeno si può assumere diverse semplificazioni, necessarie per rendere possibile un'analisi efficace del problema, ed ottenere soluzioni senz'altro approssimate ma chiare e coerenti. In primo luogo si assume che il carico agisca in direzione verticale, determinando quindi, in sostanza, una sollecitazione di compressione e sia perciò riferito alla proiezione orizzontale della superficie della chioma.

Carico unitario della neve  $q_0$  [kN/m<sup>2</sup>]

Dato un evento nevoso, la massa della neve  $m_n$  [kg] che perviene a terra nell'unità di superficie è:

$$m_n = h_n * \rho_n$$

dove:

$h_n$  [m] è l'altezza della neve caduta così come registrata nella stazione meteo di riferimento o misurata a terra in campo aperto,  $\rho_n$  [kg/m<sup>3</sup>] è la densità media della neve. Il carico unitario  $q_0$  [kN/m<sup>2</sup>], cioè la forza esercitata dalla neve per unità di superficie, è quindi:

$$q_0 = \rho_n \cdot h_n$$

dove:

$g$  [m/s<sup>2</sup>] è l'accelerazione di gravità che vale approssimativamente 9.8.

Densità della neve  $\rho_n$  [kg/m<sup>3</sup>]

La densità della neve dipende dalle condizioni di umidità e temperatura potendo variare, indicativamente, da 100 a 600 kg/m<sup>3</sup> in relazione al suo grado di trasformazione. Neve fresca, molto soffice e asciutta, può quindi avere un peso anche di 6 volte inferiore rispetto a neve bagnata e completamente trasformata. Come si ricorderà, l'acqua allo stato liquido, alla densità massima che si verifica a 4°C di temperatura, ha un valore di densità assoluta pari a 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Carico della neve  $Q_n$  [kN]

Il carico della neve  $Q_n$  [kN] sulla chioma, cioè la effettiva forza esercitata dal manto nevoso che si deposita sull'albero, può essere valutata ricorrendo a formulazioni che modellano la problematica a diversi livelli di approssimazione. In sostanza, la relazione generale che può essere assunta per la determinazione del carico della neve è fornita dalla seguente espressione:

$$Q_n = q_0 \cdot EAI_{ch} \cdot CF \cdot CE \cdot CT$$

dove:

$EAI_{ch}$  [m<sup>2</sup>] è l'effettiva area di insidenza della chioma "vista" dalla neve,

$CF$  è il coefficiente di forma,

$CE$  è il coefficiente di esposizione,

$CT$  è il coefficiente termico.

Area di insidenza della chioma  $EAI_{ch}$  [m<sup>2</sup>]

L'area di insidenza della chioma è data dalla proiezione di tutta la chioma su un piano parallelo a quello di campagna e passante per il colletto. In realtà l'effettiva area di insidenza della chioma dipende dalla direzione del vento e cioè, in sostanza, dall'angolo che questo forma con la normale all'albero.

$$EAIch = AIch * \cos(\alpha)$$

Coefficiente di forma CF [-]

Il coefficiente di forma determina la quota parte di neve che rimane sulla chioma in rapporto alla quantità di neve caduta. Esso dipende dalla densità della chioma, dalla densità e forma dei rami e dalla densità, forma e capacità di immagazzinamento delle foglie. Analiticamente il coefficiente di forma è quindi individuato dalla seguente espressione:

$$CF = Cth * Crm * Cfg$$

dove:

Cth è il coefficiente di densità della chioma che dipende dalla sua porosità  $\alpha$  [%]. Questo contributo può essere euristicamente determinato mediante la:

$$Cth = 1 / (1 + e^{-0.1 * (\alpha - 50)})$$

Crm è il coefficiente che tiene conto dell'architettura morfologica dei rami e che dipende dal loro angolo di inserzione, dalla densità e dalle dimensioni. Assumendo (Xiao et al., 2000) che i rami hanno forma lineare e che la loro inclinazione rispetto allo zenith è normalmente distribuita, per cui è  $N(u, \sigma^2)$  dove  $u$  è la media e  $\sigma$  è la deviazione standard, i rami possono essere divisi in due gruppi. Il primo gruppo (Rdrip) riguarda quei rami che presentano un angolo inferiore a  $45^\circ$  o maggiore di  $135^\circ$ ; per essi il flusso di neve tende preferenzialmente a non depositarsi sul tronco ma a cadere quindi al suolo. L'altro gruppo raccoglie invece i rami (Rintercept) il cui angolo di inserzione è fra  $45^\circ$  e  $135^\circ$ , nei quali la neve tende invece ad essere intercettata. Determinata o stimata quindi la media e la deviazione standard dei rami, è possibile sapere (ricorrendo alla funzione di distribuzione normale, che è disponibile su tutti i fogli elettronici) la percentuale di rami afferente ai due gruppi. Avendo a disposizione una stima dello Stem Area Index (SAI [-]) e delle dimensioni dei rami, assumendo che anche questi si distribuiscono normalmente rispetto alla media, è quindi possibile determinare il coefficiente di riduzione della quantità di neve che può depositarsi.

$$Crm = SAI * Rintercept * rmed2 * \tan \alpha$$

Per quanto riguarda le foglie, se presenti, è possibile seguire un procedimento analogo, determinando così il coefficiente Cfg in funzione della percentuale di foglie in grado di intercettare il flusso della neve. Si deve in tal caso tenere conto, oltreché dell'angolo di inserzione e delle dimensioni, anche della rugosità della foglia e della sua "rigidità".

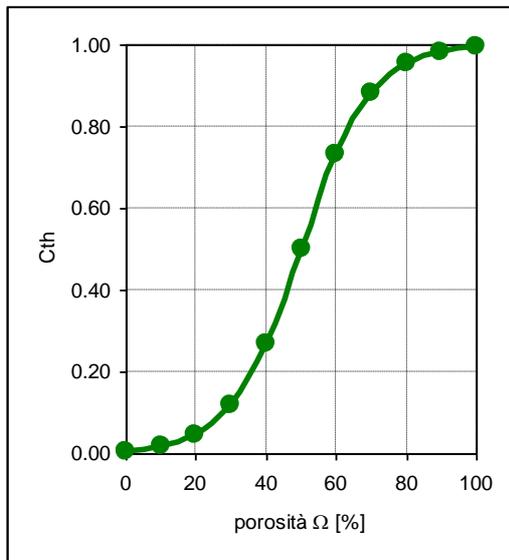


Fig. II.1: il coefficiente di densità della chioma in funzione della porosità

Quello presentato è un modello analitico non particolarmente complesso ma che comunque richiede una serie di dati normalmente non disponibili nella pratica professionale. In tal caso è quindi necessario ricorrere a metodi semplificati, di maggiore approssimazione, in cui il coefficiente di forma può essere stimato ricorrendo alla Tab. 6.2 ed interpolando i casi intermedi.

descrizione	CF
Chiome o ramificazione tabulare densa con vegetazione fogliare fitta e appressata (es. pino domestico con code di leone vigorose)	0.7
Chiome ovoidali con ramificazione variamente inclinata, chiome piramidali con ramificazione orizzontale di breve lunghezza	0.5
Chiome piramidali con ramificazione grossa tendenzialmente assurgente, reiterazioni verticali, scarsi rami fini	0.3
Alberi privi di vegetazione con abbondante ramificazione di grosse dimensioni, in posizione suborizzontale rispetto al piano campagna	0.1

Tab. II.2: coefficiente di forma consigliato per diverse tipologie di chioma

## Coefficiente termico Ct [-]

Il coefficiente termico può essere utilizzato per tenere conto della riduzione del carico della neve a causa del suo scioglimento per il calore prodotto dall'albero. Normalmente, in particolare per la valutazione del carico massimo, tenuto conto che questo si verifica quasi sempre immediatamente al termine dell'evento nevoso, sarà opportuno utilizzare  $C_t = 1$ .

## Coefficiente di esposizione CE [-]

Il coefficiente di esposizione deve essere utilizzato per modificare il valore del carico della neve in copertura, in funzione delle caratteristiche specifiche dell'area in cui si trova l'albero. Nella tabella 6.3 si riportano i coefficienti consigliati nell'Eurocodice (2005) per le diverse classi di morfologia del luogo di vegetazione.

morfologia	descrizione	CE
battuta dai venti	aree pianeggianti non ostruite, esposte su tutti i lati, senza costruzioni o alberi più alti	0.8
normale	aree in cui non è presente una significativa rimozione della neve a causa del vento, della morfologia o di alte costruzioni o alberi	1
riparata	aree più basse del terreno circostante o accerchiate da costruzioni o alberi più alti	1.2

Tab. 6.3: coefficiente di esposizione consigliato per diversi ambienti

## Effetto del vento

In presenza di vento, come detto si manifesta una riduzione della neve depositatasi sull'albero in misura proporzionale all'intensità del vento, ma limitatamente a velocità inferiori a circa 10 m/s. Oltre questo limite, sostanzialmente, la neve è stata praticamente asportata completamente dal flusso del vento. Si può quindi modellizzare questo fenomeno ricorrendo ad una relazione che esprima questa condizione.

## Interazione neve - albero

Nella pratica professionale può accadere che sia necessario determinare se il cedimento derivante da un evento nevoso deve essere considerato come un caso imprevedibile o meno. In tal caso è necessario determinare in primo luogo quale sia il cosiddetto carico critico e cioè il valore del carico unitario critico della neve che può verificarsi ordinariamente in un dato luogo (e che quindi deve essere prevedibile). Questo è calcolabile ricorrendo alla analisi degli eventi notevoli.

Carico critico. Disponendo di una quantità sufficiente ed affidabile di dati nivometrici, mediante le consuete indagini statistiche (§ 2.7), non è difficile determinare il carico critico della neve, dato un tempo di ritorno coerente con il ciclo di vita dell'albero nell'ambiente in cui esso si trova. In mancanza di specifiche indagini statistiche, il carico unitario critico di neve sulla chioma può essere determinato ricorrendo ad una procedura analoga a quella individuata nell'Eurocodice (2005), attraverso il ricorso ad un valore di riferimento del carico di neve al suolo. In questo caso il valore di  $q_0$  è:

$$q_0 = q_{ref}(TR)$$

Dove  $q_{ref}(TR)$  [kN/m<sup>2</sup>] è il carico di riferimento della neve sulla chioma, ottenuto mediante la seguente espressione:

$$q_{ref}(TR) = \alpha_{TR} * q_{ref0}$$

Dove  $\alpha_{TR}$  [-] è il coefficiente di scalatura per l'opportuno tempo di ritorno ed è dato da:

$$\alpha_{TR} = 0.275 * (1 - 0.5 * \ln(-\ln(1 - 1/TR)))$$

mentre  $q_{ref0}$  [kN/m<sup>2</sup>] è il valore del carico di riferimento di base e viene dedotto con la Tab. 6.4.

Valore del carico di neve al suolo $q_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ] per stazioni a quota inferiore a 1500 m s.l.m.			
Altitudine di riferimento (m):	$as \leq 200$	$200 < as \leq 750$	$as > 750$
Zona I Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Veneto, Abruzzo, Marche, Molise	1.6	$1.60 + 3 * [(as - 200) / 1000]$	$3.25 + 8.5 * [(as - 750) / 1000]$
Zona II Liguria, Toscana, Umbria, Lazio, Campania (provincie di Caserta, Benevento, Avellino) Puglia (provincia di Foggia)	1.15	$1.15 + 2.6 * [(as - 200) / 1000]$	$2.58 + 8.5 * [(as - 750) / 1000]$
Zona III Campania (provincie di Napoli, Salerno), Puglia (esclusa la provincia di Foggia), Basilicata, Calabria, Sardegna, Sicilia	0.75	$0.75 + 2.2 * [(as - 200) / 1000]$	$1.96 + 8.5 * [(as - 750) / 1000]$

Tab. 6.4: determinazione del carico di riferimento di base per la neve secondo la procedura Eurocodice (2005).

Ad esempio per Firenze abbiamo che  $q_{ref0} = 1,15$  per cui, assumendo un tempo di ritorno di 50 anni (come di fatto ci si comporta nelle prove di trazione controllata), abbiamo che:

$$q_{ref}(TR) = 0,8 \times 1,15 = 0,93 \text{ kN/m}^2$$

Una nevicata di 25 cm con neve fresca che quindi pesa  $250 \text{ kg/m}^3$  avrà un carico al suolo, per la 6.1 e la 6.2, di:

$$q_0 = 0,25 \times 250 \times 9,8 = 0,61 \text{ kN/m}^2$$

Quindi inferiore al carico critico, per cui l'evento deve essere considerato di natura ordinaria e cioè prevedibile (Sani e Marasco, 2007). Si deve quindi ammettere che l'evento nevoso verificatosi (e quindi la quantità di neve depositata sull'albero) presenta un tempo di ritorno inferiore al ciclo di vita dell'albero, per cui ne deve essere previsto il possibile accadimento e quindi gli effetti che da esso possono derivarne.

## 10.5 modellazione del vento

Gli effetti del vento condizionano tutte le principali fasi del ciclo di vita dell'albero e, assai frequentemente, determinano o comunque favoriscono infine il cedimento della struttura arborea. Tenuto conto della pervasività dell'azione del vento sugli alberi, ogni intervento, forma di cura o azione di conservazione che si intende "somministrare" a questi organismi non può prescindere dalla relazione che tali atti avranno nei confronti del vento e delle dinamiche fra vento e alberi stessi. Risulta quindi necessario individuare tecniche colturali che tengano prioritariamente conto degli effetti del vento (Gilman et al., 2008; Kane e Clouston, 2008; Smiley e Kane, 2006) e, a monte, metodi di valutazione analitica in grado di descrivere quantitativamente, nel modo migliore possibile, la relazione fra vento e alberi (James, 2003; James et al., 2006).

Nonostante vi siano diversi studi che affrontano, sotto vari aspetti, le problematiche derivanti dall'interazione fra vento e alberi (Ancelin et al., 2004; Baker & Bell, 1992; Baker, 1997; Blackburn & Petty, 1988; Blennow & Sallnas, 2004; Chiba, 2000; Cucchi et al., 2005; de Langre, 2008; England et al., 2000; Fredericksen et al., 1993; Gaffrey & Kniemeier, 2002; James, 2003; James et al., 2006; Kane & Clouston, 2008; Kerzenmacher & Gardiner, 1997; Miller, 2005; Milne, 1991; Peltola, 1993; Peltola, 1995; Peltola, 2006; Roodbaraky et al., 1994) si è ancora ben lontani dal comprendere la complessità di tale fenomeno, in particolare per ciò che riguarda il pericolo di cedimento della struttura arborea causato o facilitato dall'azione del vento. Tuttavia sono stati proposti diversi modelli, sia di tipo concettuale che analitico, finalizzati non solo a descrivere il fenomeno dell'interazione fra vento e alberi ma soprattutto a individuare modalità di analisi da utilizzare

nella pratica della valutazione di stabilità (Alaoui Solimani et al., 1999; Baker, 1995; Gardiner et al., 2000; Spatz & Bruechert, 2000; Sterken, 2005; Wessolly & Erb, 1998).

Ai fini della valutazione di stabilità degli alberi, il vento interessa per l'energia, in termini di forza o di pressione, con cui esso interferisce con le strutture arboree, potendone provocare il danneggiamento o, addirittura, il cedimento integrale. Le forze (o pressioni) che nascono su un corpo investito dal vento (nel nostro caso su un albero), dipendono fortemente dalla forma dell'oggetto e possono avere sia segno positivo (pressioni), che negativo (depressioni). Inoltre si determina una complessa interazione fra il fluido e la struttura, che rende particolarmente difficoltoso l'approccio analitico (Borri & Pastò, 2006).

#### Profilo della velocità del vento

All'interno dello strato limite, la velocità media del vento varia con l'altezza secondo un andamento che può essere efficacemente approssimato ricorrendo ad una funzione iperbolica. Tralasciando i modelli di estrema raffinatezza e complicazione (Mortensen et al., 2002), il profilo del vento e cioè la variazione della sua velocità in funzione dell'altezza dal piano campagna  $[v(z), \text{m/s}]$  è in campo aperto calcolato (Monteith, 1973) ricorrendo alla:

$$v(z) = \frac{v_f}{k} \cdot \ln\left(\frac{z-d}{z_o}\right)$$

in cui  $v_f$  [m/s] è la velocità di frizione, data dal rapporto fra le tensioni di taglio  $\tau$  [N/m<sup>2</sup>] sulla superficie e la densità dell'aria  $\rho_a$  [kg/m<sup>3</sup>],  $k$  [-] è la costante di Von Karman ( $\approx 0.4$ ),  $d$  [m] è l'altezza del piano di deformazione e  $z_0$  [m] è il coefficiente di rugosità aerodinamica (in campo aperto i valori sono fra 0.04 e 0.06 H). All'interno di questo profilo tipo della velocità media, la turbolenza modifica localmente in modo assai complesso e dinamico, la velocità del flusso del vento (Fig. 6.20).

Una relazione esponenziale più semplice, che fornisce risultati sostanzialmente analoghi, è la:

$$v(h_i) = (h_i / h_z)^r \cdot v_o$$

in cui  $v_o$  [m/s] è la velocità del vento assunta come riferimento e misurata all'altezza  $h_z$  [m] mentre  $r$  [-] è l'indice di rugosità della superficie che varia in relazione alla tipologia di uso del suolo (0.16 in campo aperto, 0.28 in campagna, 0.4 per la città). I valori dipendono dal rapporto di temperatura fra città e zone esterne e dal grado di stabilità dell'aria.

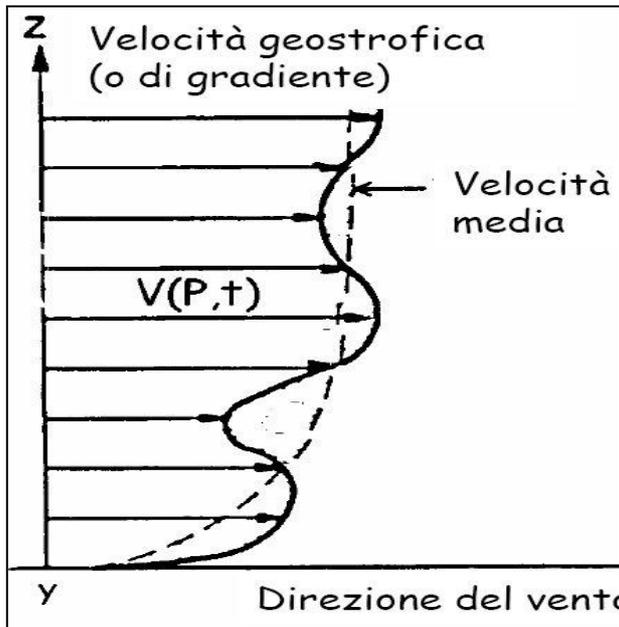


Fig. 6.20: profilo della velocità del vento al variare dell'altezza (AA.VV., 2007)

In ambienti forestali, con chiome più o meno dense, il profilo del vento può assumere un andamento decrescente dalla cima dell'albero verso la base della pianta, che viene talora rappresentato (Niklas & Speck, 2001) da una relazione sempre esponenziale ma di forma diversa rispetto alla 6.14:

$$v(h_i) = v_t * \exp( c * (h_i / H - 1) )$$

in cui  $v_t$  è la velocità, calcolata con la 6.14, all'altezza totale dell'albero  $H$  [m] e  $c$  [-] è un coefficiente che può variare fra 1 per coperture rade e 5 per coperture dense.

Tuttavia, la misura della velocità del vento eseguita con anemometri posti a diverse altezze all'interno della chioma ha evidenziato un andamento del profilo del vento non linearizzabile e molto variabile in situazioni diverse, in quanto dipendente sia dalle caratteristiche del sito di vegetazione, quali densità e copertura (Peltola et al., 1999), sia dalle proprietà aerodinamiche dell'albero (Niklas, 1999). Per questa ragione, a fini pratici, si ricorre spesso anche, semplificando, ad un profilo di vento costante:

$$v(h_i) = v_o$$

e ad un profilo basato sull'assunto che la variazione della velocità in funzione dell'altezza è minima nei pressi della cima dell'albero (per la sua capacità di riorientare la forma), quindi diventa consistente in prossimità della zona centrale della chioma, più densa ma anche più "rigida", per poi decrescere di nuovo nella porzione

inferiore dell'albero (zona del tronco nudo). Quest'ultimo andamento è assimilabile ad una logistica inversa e può quindi essere interpretato mediante la relazione:

$$v(h_i) = 1/(1+e^{-a*(h/H-b)}) * v_0$$

in cui  $h/H$  [m/m] è l'altezza normalizzata mentre i coefficienti  $a$  (che determina la "ripidità" della curva) e  $b$  (che determina il punto di flesso) sono individuati euristicamente in funzione della profondità della chioma (Sani e Pettinà, 1994).

Infine sono state utilizzate anche due funzioni quadratiche, più semplici; una, con andamento simile alla 6.15, idonea per alberi vegetanti in formazioni dense (Niklas e Spatz, 2000):

$$v(h_i) = v_t * (1 - h / H)^2$$

ed una più simile:

$$v(h_i) = v_t * (1 - h / H)^{1/2}$$

Nella Fig. 6.21 è illustrato il profilo del vento per le sette funzioni in un caso specifico.

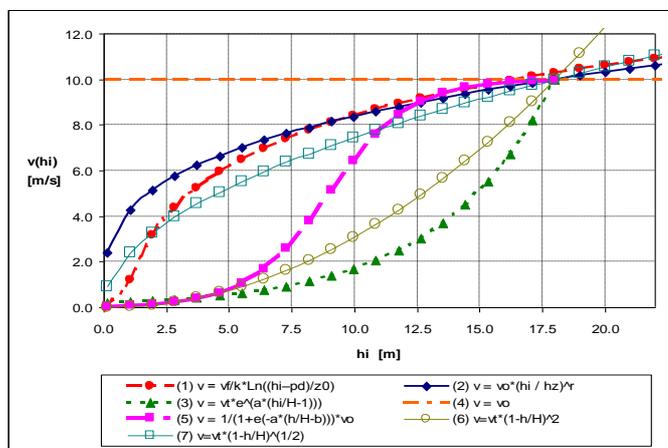


Fig. 6.21: modelli del profilo  
cui è:

6.13):  $v_f = 1.28$  m/s,  $k = 0.4$ ,  $d = 0$  m,  $z_0 = 0.72$  m;

6.14):  $v_0 = 10$  m/s,  $h_z = 18$  m,  $r = 0.3$ ;

6.15):  $v_t = 10$  m/s,  $c = 4$ ,  $H = 18$  m;

6.16):  $v_0 = 10$  m/s;

6.17):  $v_0 = 10$  m/s,  $H = 18$  m,  $a = 11$ ,  $b = 0.5$ ;

6.18) e 6.19):  $v_t = 10$  m/s,  $H = 18$  m.

andamento dei 7  
del vento nel caso in

## Analisi della forzante eolica

Ai fini pratici, ciò che interessa nello studio del vento, è la stima della forzante eolica che interagisce con la struttura che si deve progettare (per un manufatto) o con l'albero. Questa valutazione può essere eseguita ricorrendo a due grandi gruppi di metodologie. Si può seguire un metodo diretto, mediante stima in galleria del vento. In questo caso si riproduce, secondo criteri appropriati di scalatura (cioè nel rispetto del teorema di Buckingham) il manufatto che si intende costruire, quindi si applica un vento coerente con il vento medio del sito in cui il manufatto verrà costruito, per poi misurare gli effetti della forzante eolica sulla struttura. Purtroppo questo metodo non è applicabile per gli alberi, sia in quanto non possono essere spostati in galleria del vento tanto facilmente, sia in quanto per essi non è possibile ricorrere a estrapolazioni ottenute su alberi di piccole dimensioni. Esistono comunque numerosi studi che simulano l'albero o la foresta ricorrendo a modelli in miniatura di forma e materiali con proprietà paragonabili a quelle degli alberi. Si tratta, in ogni caso, di applicazioni di interesse scientifico, almeno per il momento con modeste ricadute a livello pratico.

Il metodo quasi statico o per fattori singoli costituisce il criterio metodologico di valutazione della forzante eolica di più largo utilizzo nella pratica ingegneristica ed il solo che, almeno per ora, ha trovato riscontro e applicazione anche per quanto riguarda lo studio dell'interazione fra vento ed alberi. Questo metodo è applicato, secondo modalità diverse nelle varie nazioni, dalla maggior parte dei Paesi, ed è stato codificato da autorità sovranazionali come la UE, per l'Europa. Con tale metodo l'interazione del vento sull'oggetto viene stimata ricorrendo ad opportuni indici e formule che stimano separatamente gli effetti macrometeorologici, quelli relativi all'ambiente e quelli locali relativi al sito in cui si trova l'oggetto da valutare. In Europa questo metodo è codificato nell'Eurocodice (ECS, 2005) e viene applicato in tutti i paesi seguendo un'architettura comune e, al suo interno, un approfondimento degli indici utilizzati sulla base di criteri che variano da nazione a nazione.

Occorre tuttavia sottolineare che il ricorso a questa metodologia di valutazione della forzante eolica non è esaustivo di tutti i possibili casi. Infatti, sono escluse dalla valutazione gli effetti del vento sulle vibrazioni torsionali degli oggetti esaminati (talora significative sugli alberi) o su quelle dovute alla turbolenza trasversale, o anche vibrazioni diverse da quella fondamentale (possibili specie in presenza di consolidamenti statici). Sono cioè trascurate le forze radenti di superficie e le componenti trasversali e azimutali della velocità del vento. Inoltre, la valutazione si riferisce ai sistemi climatici temperati e non tiene conto, nella sua forma canonica, di eventi particolari come tornado o fenomeni di funnelling (incanalamento del vento nelle valli) o venti catabatici (venti di caduta tipici di certe regioni montuose), oppure ancora dei temporali molto intensi e localizzati che possono verificarsi nella stagione estiva al di fuori del regime ciclonico tipico. Questi fenomeni, se si verificano, esulano dalla valutazione del carico del vento effettuata con questa metodologia, per cui, se si ritiene possibile il loro verificarsi, si deve per lo meno assumere un fattore di sicurezza maggiore.

Qui di seguito si espone la procedura italiana, così come adattata e applicata nel software Orebla per la stima del carico del vento.

Stima della velocità base di riferimento del vento

La velocità base di riferimento  $v_b$  [m/s] del vento è la variabile che definisce la distribuzione geografica della ventosità rispetto ad una esposizione standard. È quindi la base per la valutazione della velocità di progetto in un dato sito ed è definita come:

la velocità media del vento su un intervallo di 10 minuti con un rischio annuale di eccedenza di 0,02, indipendentemente dalla direzione, ad un'altezza dal suolo di 10 m, su un terreno pianeggiante in aperta campagna e tenendo conto degli effetti dell'altitudine.

In mancanza di specifiche indagini statistiche nel luogo di vegetazione dell'albero,  $v_b$  è stimabile, per l'Italia, con l'espressione:

$$v_b = v_{b,0} \quad \text{per } a_0 \leq a_0$$

$$v_b = v_{b,0} + k_a (a_s - a_0) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m slm}$$

dove:

$v_{b,0}$   $a_0$   $k_a$  sono parametri forniti nella tabella seguente e dipendono dalla regione in cui si trova l'albero (Tab. 6.7),

$a_s$  è l'altitudine [m] sul livello del mare del sito di radicazione.

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$	$a_0$ [m]	$k_a$ [1/s]
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (esclusa provincia di Trieste)	25	1000	0.010
2	Emilia Romagna	25	750	0.015
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (escluso provincia di Reggio Calabria)	27	500	0.020
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0.020
5	Sardegna (a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'isola di Maddalena)	28	750	0.015
6	Sardegna (a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'isola di Maddalena)	28	500	0.020
7	Liguria	28	1000	0.015
8	Provincia di Trieste	30	1500	0.010
9	Isole (escluso Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0.020

Tab. 6.7: zone climatiche d'Italia per quanto riguarda l'ambiente eolico

Per altitudini superiori a 1500 m si può fare riferimento alle condizioni locali di clima ed esposizione, al fine di aumentare i valori di  $v_b$  sulla base di adeguate indagini, in particolare in prossimità di vette o crinali. Il valore di  $v_b$  così ottenuto deve essere moltiplicato ancora per il coefficiente di direzione  $c_{dir}$ , che tiene conto della direzione del vento, e per il coefficiente di stagionalità  $c_{season}$ . Il valore raccomandato per entrambi i

coefficienti, salvo casi particolari, è comunque pari all'unità per cui sono di scarso significato pratico nell'ambito della valutazione di stabilità degli alberi.

$$v_b = v_{b,o} \cdot c_{dir} \cdot c_{season}$$

Come si può notare la velocità di riferimento così individuata è una vera e propria velocità di progetto cui fare riferimento in mancanza di dati specifici relativamente al sito in esame. Per tale ragione essa è molto prudentiale, in quanto costituisce appunto la base di riferimento con cui si devono costruire manufatti anche di una certa importanza. Questa procedura quindi, laddove applicata agli alberi, risulta essere molto conservativa, in quanto basata su criteri assai prudentiali. Tende quindi a sovrastimare la pericolosità derivante dalla forzante eolica. Un ulteriore aspetto da considerare riguarda il fatto che la velocità così individuata ha, sul piano concettuale, una probabilità di eccedenza pari a 0.02, quindi corrispondente ad un tempo di ritorno di 50 anni. Questo tempo di ritorno è senz'altro congruo anche per la stima della forzante eolica nei confronti degli alberi. Tuttavia è possibile, in certi casi, ridurre o aumentare il tempo di ritorno prescelto, modificando la velocità di base, per mezzo della 6.22.

$$C_{prob} = ((1-0.2 \cdot \ln(-\ln(1-1/PR)))/(1-0.2 \cdot \ln(-\ln(0.98))))^{0.5}$$

Dove PR sono gli anni assunti come periodo di ritorno.

Stima della velocità media del vento

La stima della velocità media del vento  $v_m$  [m/s] ad un'altezza  $z$  sopra il terreno, deve essere determinata ricorrendo alla velocità di riferimento  $v_b$  corretta in funzione delle condizioni climatiche del luogo di stazione e dalle variazioni del vento con l'altezza dovute alla rugosità del terreno e all'orografia. è cioè:

$$v_m(z) = v_b \cdot c_r(z) \cdot c_o(z)$$

dove:

$c_r(z)$  è il coefficiente di rugosità, che tiene conto della variazione della velocità del vento con la quota per l'effetto della rugosità del terreno;

$c_o(z)$  è il coefficiente orografico, che tiene conto della variazione della velocità del vento dovuta agli ostacoli quali colline, scarpate, edifici, ecc.

Con questa relazione si determina la velocità media di riferimento da utilizzare come dato di base per la progettazione, la verifica o il collaudo di una struttura investita dal flusso del vento medio caratteristico della zona.

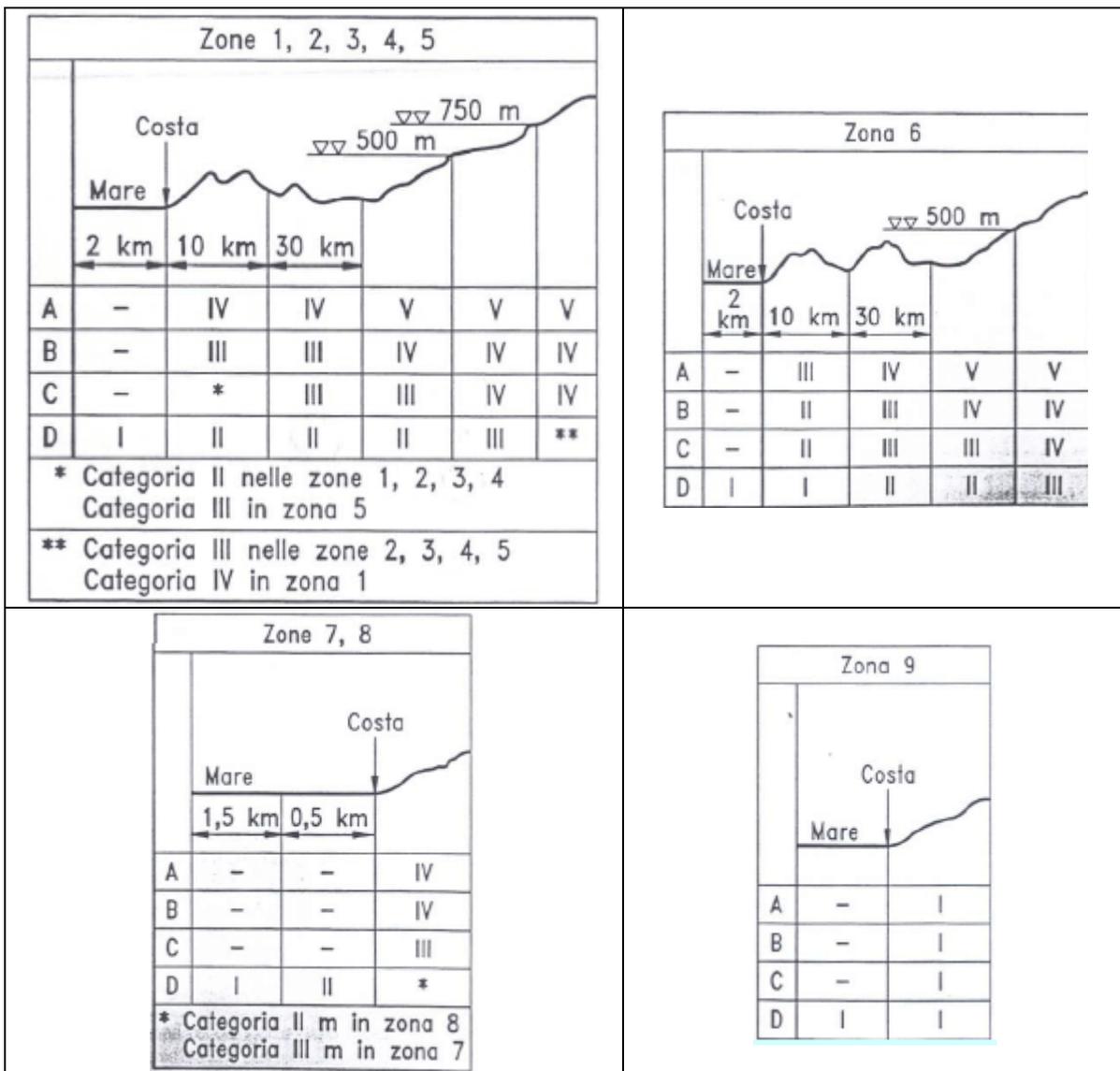
## Coefficiente di rugosità

Il coefficiente di rugosità  $cr(z)$  tiene conto della variabilità della velocità media del vento nel sito di vegetazione. La variazione della velocità media è dovuta al grado di rugosità del terreno nella direzione del vento considerata. In pratica, la velocità del vento viene ridotta in ragione dell'attrito radente che la massa d'aria "trasportata" dal vento (il vento è la massa d'aria che si sposta!) subisce scorrendo lungo la superficie terrestre. Se la superficie è liscia, come il mare, la sua velocità sarà ridotta solo di poco, mentre quando il vento incontra superfici rugose (un prato, una foresta, una città con edifici bassi, una grande città con grattacieli), la velocità tende progressivamente a diminuire o meglio la variazione della velocità del vento in funzione dell'altezza è minore.

In mancanza di analisi specifiche, la categoria di esposizione del sito è determinata in funzione della posizione geografica del sito di radicazione della classe di rugosità del terreno così come definita nelle tabelle seguenti ed in relazione alle zone d'Italia precedentemente definite. Nelle fasce entro i 40 km dalla costa delle zone 1, 2, 3, 4, 5 e 6 la categoria di esposizione è indipendente dall'altitudine del sito.

Classe di rugosità del terreno	Descrizione
A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media supera i 15 m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbano, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni, ...) aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	Aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose, superfici innevate op ghiacciate, mare, laghi, ...)
L'assegnazione della classe di rugosità non dipende dalla conformazione topologica del sito. La situazione che contraddistingue la classe da scegliere deve infatti permanere intorno all'oggetto esaminato non meno di 20 volte la sua altezza.	

Tab. 6.8: classi di rugosità del territorio in relazione all'uso del suolo prevalente.



Tab. 6.9: tabelle per la determinazione della categoria di esposizione del sito.

Una volta ottenuta la categoria di esposizione del sito di radicazione dell'albero, è possibile determinare il coefficiente di rugosità:

Categoria di esposizione del sito di radicazione	KT	z0 [m]	zmin [m]
I	0.17	0.01	2
II	0.19	0.05	4
III	0.20	0.10	5
IV	0.21	0.30	8
V	0.22	0.70	12

Tab. 6.10: categorie di esposizione e parametri di riferimento

$$c_r(z) = k_T \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad \text{quando } z \geq z_{\min}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{quando } z < z_{\min}$$

dove:

$z_0$  è la lunghezza di rugosità del sito di interesse, che può essere interpretata come la dimensione caratteristica dei vortici che si generano per effetto della frizione dell'aria in moto sul suolo,

$k_T$  è un fattore di terreno, proporzionale alla velocità di attrito,

$z_{\min}$  è la quota minima sopra il terreno, entro la quale la velocità del vento può essere considerata costante.

Il valore di  $k_T$  è calcolato con la:

$$k_T = 0.19 \left( \frac{z_{o,I}}{z_{o,II}} \right)^{0.07}$$

I coefficienti  $z_0$ ,  $z_{o,II}$  e  $z_{\min}$  dipendono dalla categoria di terreno ed i valori di riferimento sono indicati nella tabella 6.10. Se gli elementi che vanno a formare la rugosità del terreno sono molto fitti e dello stesso ordine di grandezza, allora il flusso del vento è traslato verso l'alto, come accade sopra una foresta densa. Analiticamente si introduce l'altezza media della rugosità fitta ( $d$ ) nella espressione del coefficiente di rugosità:

$$c_r(z) = k_T \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right)$$

#### Coefficiente orografico

In normativa si dispone che il coefficiente orografico deve essere preso in considerazione qualora l'orografia del terreno incida per oltre il 5% sulla velocità del vento. Esistono alcune procedure standardizzate (qui non riportate per sinteticità) per misurare l'aumento della velocità del vento che colpisce l'oggetto studiato (nel nostro caso l'albero), nel caso in cui questo si trovi sulla sommità di una collina o di una scarpata oppure se, nelle sue vicinanze, sono presenti manufatti o altri alberi. Alcune metodologie di stima della forzante eolica, riportate in software per la prova di trazione controllata, individuano questo contributo mediante l'attribuzione di una percentuale basata su criteri euristici.

## Pressione del vento

La manifestazione dell'effetto del vento, più che dalla sua velocità, è data dalla pressione che esso esercita sugli oggetti che si frappongono al flusso dell'aria. Nota la velocità di riferimento del vento  $v_b$  [m/s] del luogo in cui sorge la struttura (l'albero), la pressione cinetica di riferimento  $q_b$  [N/m<sup>2</sup>] è calcolata con la:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho_a v_b^2$$

dove

$\rho_a$  [kg/m<sup>3</sup>] è la densità dell'aria che viene convenzionalmente assunta pari a 1.25. In realtà la densità dell'aria varia sensibilmente al variare della temperatura e della pressione (vedi Tab. 6.11).

Temperatura ° Celsius	Temperatura ° Fahrenheit	Densità kg/m <sup>3</sup>	Contenuto massimo di acqua kg/m <sup>3</sup>
-25	-13	1,423	
-20	-4	1,395	
-15	5	1,368	
-10	14	1,342	
-5	23	1,317	
0	32	1,292	0,005
5	41	1,269	0,007
10	50	1,247	0,009
15	59	1,225 *)	0,013
20	68	1,204	0,017
25	77	1,184	0,023
30	86	1,165	0,030
35	95	1,146	0,039
40	104	1,127	0,051
*) densità dell'aria secca alla pressione atmosferica standard a livello del mare a 15° C			

Tab. 6.11: densità dell'aria a pressione atmosferica standard

Anche nel caso della pressione è possibile scomporre la pressione in una componente media appunto la pressione cinetica di riferimento e in una componente derivante dalla raffica, che determina la pressione cinetica di picco  $q_p(z_e)$  [N/m<sup>2</sup>]. Tale pressione è data dall'espressione:

$$q_p(z_e) = q_b C_e C_p C_d$$

dove

$q_b$  è la pressione cinetica di riferimento,

$C_e$  è il coefficiente di esposizione,

$C_p$  è il coefficiente di forma,

$C_d$  è il coefficiente dinamico.

Forza del vento

La forza del vento  $F_w$  [N] che agisce su una struttura è data dal prodotto della pressione unitaria del vento in ogni punto della struttura per la superficie di riferimento. Complessivamente essa è quindi determinata ricorrendo alla:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot A_{ref}$$

dove:

$c_s c_d$  è il fattore strutturale,

$c_f$  è il coefficiente di forza,

$q_p(z)$  è la pressione alla velocità di picco all'altezza di riferimento  $z_e$  (vedi § 13.1)

$A_{ref}$  è l'area di riferimento della struttura.

L'area di riferimento della struttura investita dal vento  $A_{ref}$  [m<sup>2</sup>] è la superficie di esposizione della chioma in calma di vento. Nel caso degli alberi è opportuno fare riferimento alla superficie di massima esposizione, comunque misurata ortogonalmente rispetto all'asse del fusto. In prima approssimazione la chioma degli alberi viene assimilata a figure geometriche semplici quali il triangolo (per gli abeti), il cerchio o l'ellisse. Altrimenti la superficie della chioma può essere misurata mediante tecniche fotogrammetriche (Lindsey & Bassuk, 1992) oppure ricorrendo al metodo precedentemente proposto.

Il fattore strutturale  $c_s c_d$  tiene in conto gli effetti dell'azione del vento dovuti alla non simultaneità della pressione dovuta alla velocità di picco sulla superficie ( $c_s$ ) insieme agli effetti dovuti alle vibrazioni della struttura dovuti alla turbolenza ( $c_d$ ).

La procedura dettagliata per il calcolo del fattore  $c_s c_d$  è data dall'espressione:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot g \cdot I_v(z) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 2 \cdot g \cdot I_v(z)}$$

dove :

ze è l'altezza di riferimento per la determinazione del fattore strutturale e, per gli alberi, corrisponde al baricentro di massa della chioma,

g è il fattore di picco, definito dal rapporto fra il valore massimo della porzione fluttuante della risposta e la sua deviazione standard,

Iv è la intensità di turbolenza,

B2 è il fattore di risposta che tiene in conto della mancanza di correlazione della pressione sulla struttura,

R2 è il fattore in risposta della risonanza che dipende dal modo di vibrare della struttura.

La componente quasi-statica della risposta [B2] può essere quantificata attraverso la seguente formula:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \left[ \frac{b+h}{L_i(z_{eq})} \right]^{0.63}}$$

dove:

b e h sono la larghezza e l'altezza della chioma dell'albero mentre Li(zeq) è la scala integrale della turbolenza alla quota di riferimento e rappresenta le dimensioni della raffica media del vento. Può essere calcolata usando l'espressione:

$$L(z) = L_t \cdot \left( \frac{z}{z_t} \right)^\alpha \quad \text{per } z \geq z_{min}$$

$$L(z) = L(z_{min}) \quad \text{per } z < z_{min}.$$

Il fattore di picco [g] può essere calcolato con la:

$$g = \sqrt{2 \ln(\nu T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \ln(\nu T)}}$$

dove T=600 secondi è il tempo su cui è mediata la velocità di riferimento del vento mentre  $\nu$  è definito come segue:

$$\nu = \sqrt{\frac{\nu_o^2 Q_o^2 + n_{1,x}^2 R_x^2}{Q_o^2 + R_x^2}}$$

in cui  $n_{1,x}$  è la frequenza di vibrazione della struttura nella direzione del vento, cioè lungo la x, e  $\omega_0$  è la frequenza attesa delle azioni di raffica su strutture rigide. In ogni caso, nel campo usuale dei valori, il fattore di picco varia fra 3 e 4.

Il fattore di risposta in risonanza  $R_2$  può essere determinato con la:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L \cdot R_h \cdot R_b$$

dove  $\delta$  è lo smorzamento aerodinamico,  $S_L$  è la funzione di densità spettrale,  $R_h$  e  $R_b$  sono le funzioni di ammettenza aerodinamica (ECS, 2005).

#### IV modellazione del suolo

Sebbene il sistema radicale possa diffondersi ampiamente nel terreno assumendo morfologie complesse, ai fini della valutazione della stabilità al ribaltamento, l'osservazione di cedimenti verificatisi a carico di diverse specie ed in diverse situazioni autorizza a modellizzare la zolla radicale efficace (cioè la parte di sistema radicale che svolge una funzione prioritaria di ancoraggio e che può subire il cedimento) come una calotta sferica di limitata estensione. Dato il raggio della zolla  $R_z$  [m], (che può essere la variabile da stimare), l'altezza della zolla  $H_z$  [m] è stata valutata mediante la:

$$H_z = R_z \cdot \tan(\alpha \cdot \pi / 180)$$

dove  $\alpha$  [°] è l'angolo di attrito interno del materiale costituente.

Il volume della zolla radicale  $V_z$  [m<sup>3</sup>] è quindi dato da:

$$V_z = (2/3 \cdot \pi \cdot R_z^3 \cdot ((H_z + R_z) / 2)^3)$$

la stima della massa della zolla avviene suddividendola nei suoi costituenti. La massa delle radici  $M_{rad}$  [kg] è stimata con la:

$$M_{rad} = V_z \cdot \rho_{rad} \cdot \%_{rad}$$

dove  $\rho_{rad}$  [kg/m<sup>3</sup>] è la densità del legno delle radici mentre  $\%_{rad}$  è la percentuale di volume della zolla occupata dalle radici; analogamente la massa del suolo  $M_{sol}$  [kg] è stimata con la:

$$M_{sol} = V_z \cdot \rho_{sol} \cdot \%_{sol}$$

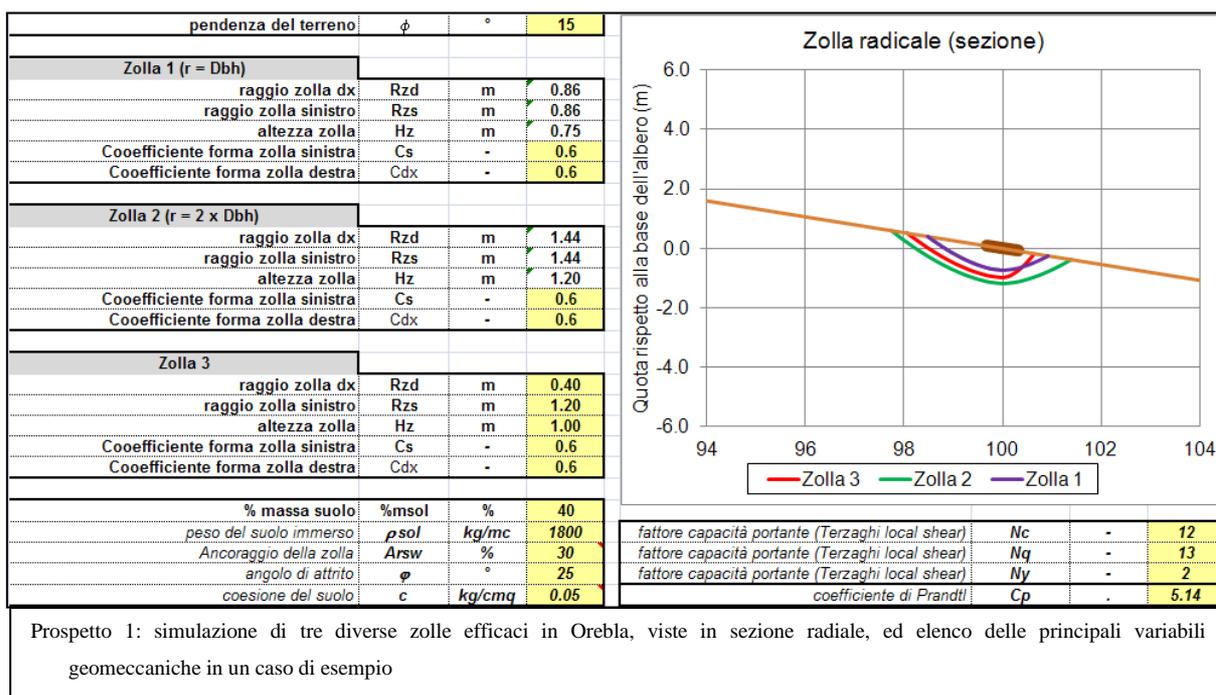
dove  $\rho_{sol}$  [kg/m<sup>3</sup>] è il peso del terreno (tenuto quindi conto della eventuale presenza di acqua) mentre  $\%_{sol}$  è la percentuale di volume della zolla occupata dal suolo. Infine il peso della zolla  $P_z$  [N] è dato da:

$$P_z = M_z \cdot g \quad \text{con} \quad M_z = M_{rad} + M_{sol}$$

Riguardo alle dimensioni della zolla il metodo Orebla è in grado di selezionare tre tipologie di zolla radicale efficace intendendo per essa quella porzione di terreno e radici delimitata dalla zona in cui avviene il processo di ribaltamento e che quindi a questo si oppone in via prioritaria (Sani, 2011a), scelte in funzione delle dimensioni dell'albero e delle principali proprietà geomeccaniche del terreno, come pure dei limiti fisici determinati dalla presenza di ostacoli o scavi effettuati in prossimità dell'albero. La zolla 1 e la zolla 2 hanno dimensione radiale pari

al diametro a petto d'uomo dell'albero (zolla 1) e al doppio di tale valore (zolla 2). Queste dimensioni sono state scelte in quanto, dalla letteratura disponibile e dalle osservazioni dei cedimenti, risulta che la zolla efficace per la resistenza al ribaltamento, cioè quella parte che, in caso di cedimento tende a ribaltarsi, presenta dimensioni che di solito oscillano fra questi due valori. Tuttavia in Orebla è anche possibile costruire una zolla (zolla 3) che tenga conto di limitazioni peculiari, come la realizzazione di uno scavo in prossimità dell'albero.

Ad esempio, nel prospetto 1 si possono osservare le 3 tipologie di zolla efficace, dove la zolla 3 simula una situazione in cui si prevede di realizzare (o si pensa sia stato realizzato) uno scavo in prossimità dell'albero.



### 10.5 verifica al ribaltamento

La necessità di studiare il comportamento meccanico del sistema radicale e della zolla è quindi pressante (Coutts, 1983; Ennos, 1995; Danjon, 1999) e ciò ha determinato lo sviluppo di modelli che cercano di simulare il comportamento di questa porzione del sistema arboreo. Alcuni approcci sono stati sviluppati per rispondere a problematiche specifiche (Coutts, 1986; Peltola & Kellomaki, 1993; Gardiner et al., 2000), altri

sono più generalizzabili (Blackwell et al., 1990; Soulimani et al., 1991), però non sempre sono applicabili nel contesto dell'attività professionale,

Il Fattore di Sicurezza FSrib [-] che deve essere individuato per la verifica al ribaltamento è costituito dal rapporto fra il momento delle forze stabilizzanti ed il momento delle forze ribaltanti il sistema oggetto di studio.

Per un albero, le forze ribaltanti sono date dalla spinta del vento e dal peso della porzione di pianta che insiste esternamente all'area determinata dalla zolla radicale. Le forze stabilizzanti sono invece date dal peso della porzione di albero che insiste all'interno dell'area della zolla radicale, cui si aggiunge il peso della zolla stessa. In termini analitici e con riferimento alla Fig. 1, avremo che:

$$FSrib = Fstab / Frib$$

dove

$$Fstab = (Ftr+ + Fch+ + Fz) / Arsw$$

e

$$Frib = Fw + Ftr- + Fch-$$

in cui il simbolo + o - all'apice indica se la porzione di fusto ricade internamente o esternamente al punto esterno della zolla radicale.

Il valore di Ftr [N\*m] è dato da:

$$Ftr = Ptr * HBtr$$

mentre Fch [N\*m] vale

$$Fch = Pch * HBch$$

e Fw [N\*m] vale

$$Fw = Fwch + Fwtr = Swch * HBch + Swtr * HBtr$$

mentre Fz [N\*m] vale:

$$Fz = Pz * Rz$$

Infine il coefficiente Arsw [%] rappresenta la porzione della capacità di ancoraggio totale della zolla radicale che è assicurata dal peso della zolla stessa (Coutts, 1986).

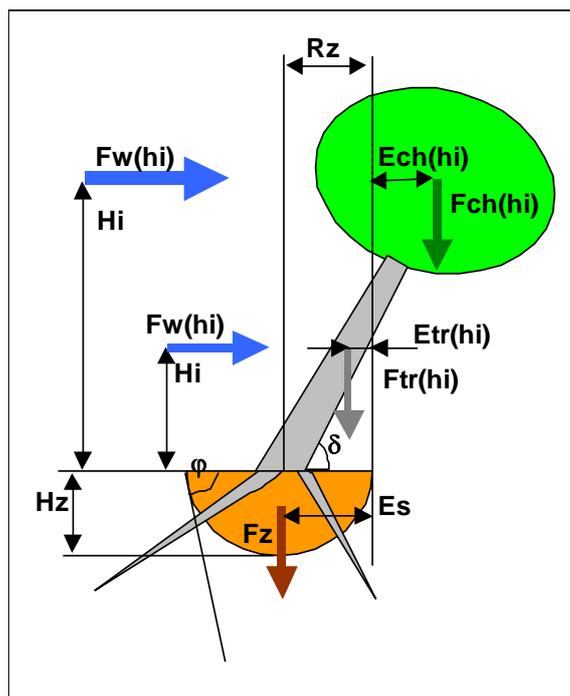


Fig. 1: Verifica al ribaltamento. Schema delle forze in gioco.

## 10.6 Verifica allo schiacciamento

Il Fattore di Sicurezza  $FS_{sch}$  [-] che deve essere individuato per la verifica allo schiacciamento è costituito dal rapporto fra il momento delle forze resistenti ed il momento delle forze opprimenti. è quindi:

$$FS_{sch} = F_{res} / F_{opp}$$

Le forze opprimenti  $F_{opp}$  [N/m] sono date dalla spinta del vento e dal peso dell'albero nella sua interezza. Il loro valore è:

$$F_{opp} = (F_{tr} + F_{ch} + F_w)$$

Le forze resistenti  $F_{res}$  [N/m] sono invece date dalla capacità portante del terreno e dalla resistenza allo schiacciamento delle radici:

$$F_{res} = F_s / Ar_{st}$$

dove

$$F_s = Q_r * \frac{\pi}{2} * R_z^2 * g * \sqrt{(R_z^2 + (1/3 * R_z)^2)}$$

Il valore di  $Q_r$  [kg/m<sup>2</sup>], cioè la capacità del terreno di assorbire la sollecitazione dovuta al peso proprio e a quello aggiuntivo senza che si verifichino sollecitazioni e deformazioni nella zolla, è determinato ricorrendo all'espressione formulata per una fondazione circolare (Terzaghi & Peck, 1984). Avremo:

$$Q_r = 1.2 * c * N_c + \gamma_{sol} * H_z * N_q + 0.6 * \gamma_{sol} * R_z * N_{\alpha}$$

dove:

$c$  [kg/m<sup>2</sup>] è la coesione del suolo,

$\gamma_{sol}$  [kg/m<sup>3</sup>] peso del terreno immerso,

$N_c, N_q, N_{\alpha}$  [-] fattori di capacità portante calcolati ricorrendo alla formulazione del Terzaghi local shear in modo tale da tenere conto, cautelativamente, della possibile rottura in terreni molto compressibili,

$Arst$  [%] un coefficiente che rappresenta la porzione della capacità di ancoraggio totale della zolla radicale che è assicurata dalla resistenza allo schiacciamento delle radici (Coutts, 1986).

## 10.7 Verifica allo slittamento

Lo slittamento lungo la superficie del piano campagna è un caso che generalmente si verifica solo in presenza di movimenti franosi. Si tratta quindi di una forma di cedimento che esula dalle problematiche tipiche dell'arboricoltura in ambito ornamentale urbano. Tuttavia, un albero ubicato al margine di una scarpata stradale può essere talora soggetto ad una forma di cedimento riconducibile a questa modalità. La verifica di stabilità allo scorrimento lungo la base della zolla radicale è determinata dal rapporto fra la somma delle forze resistenti e la somma delle forze agenti nella stessa direzione. Lo slittamento può avvenire per la spinta del terreno lungo il piano di posa della zolla radicale. Tale spinta è contrastata da una reazione che dipende dal peso dell'albero, dal peso della zolla radicale e dal coefficiente di attrito  $\mu$  [-] fra la zolla radicale ed il terreno sottostante. Avremo quindi:

$$FS_{slip} = [(P_{tr} + P_{ch} + P_{sol}) * \cos \alpha * \mu + (F_w + S_{sol}) * \cos \alpha + (P_{tr} + P_{ch} + P_{sol}) * \sin \alpha]$$

dove  $\alpha$  [°] è l'angolo di inclinazione del piano di posa della zolla radicale e  $\beta$  [°] è l'angolo di inclinazione del versante. Il coefficiente di attrito  $\mu$  [-] è generalmente determinato assumendo che:

$$\mu = \tan \frac{2}{3} \varphi$$

dove  $\varphi$  [°] è l'angolo di attrito interno del terreno. La spinta del terreno  $S_{sol}$  [N], secondo Coulomb è data da:

$$S_{sol} = 0.5 * \gamma_{sol} * H_z^2 * K_a$$

dove:

$\gamma_{sol}$  = peso specifico del terreno [kg/m<sup>3</sup>]

$H_z$  = altezza della zolla [m]

$K_a$  = coefficiente di spinta attiva del terreno [-], determinato, secondo Rankine, con la:

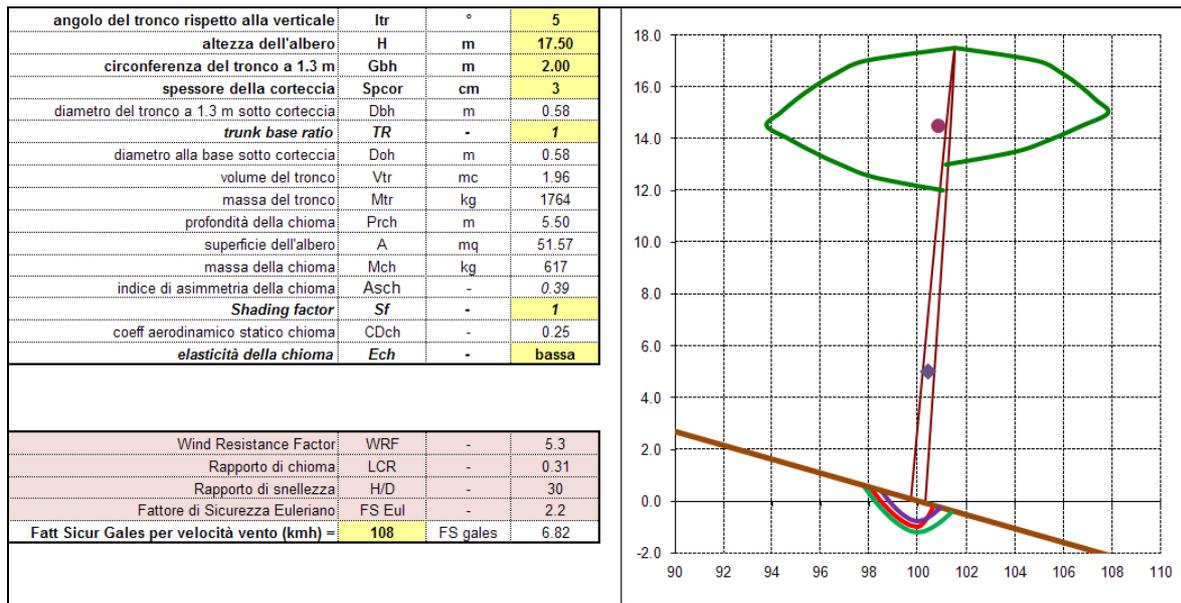
$$K_a = \tan^2 (45^\circ - \varphi/2)$$

# Capitolo IX

## 11 Applicazione

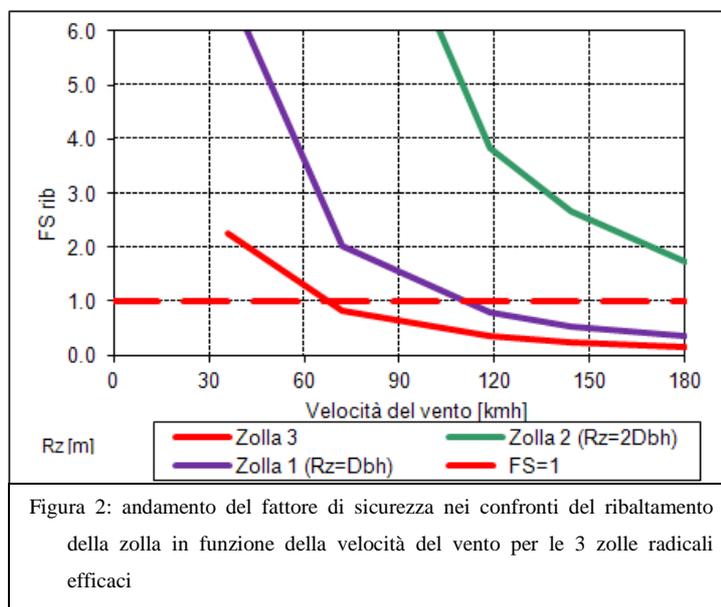
L'applicazione del modello per la verifica al ribaltamento permette di stimare come varia il fattore di sicurezza al variare della velocità del vento e delle dimensioni della zolla, una volta attribuitole un valore di capacità di ancoraggio. Concretamente è quindi possibile stimare la velocità del vento critica in una data situazione, per poi confrontare il dato con le informazioni meteorologiche afferenti a quel sito. Oppure è possibile assumere una velocità del vento massima, una velocità oltrepassata la quale cioè il fenomeno meteorologico è da considerarsi eccezionale (Sani & Marasco, 2007) e per ciò stesso non "gestibile" in sede di valutazione, e determinare per essa le dimensioni minime che la zolla deve avere per essere in grado di contrastare la forza del vento. Sarà più semplice così verificare se la zolla necessaria è presente o meno anche ricorrendo a verifiche empiriche.

Qui di seguito si riportano alcuni esempi. Nel prospetto relativo alla pianta, il grafico di sinistra in basso riporta la variazione del fattore di sicurezza nei confronti del ribaltamento della zolla al variare della velocità del vento per tre zolle radicali di dimensioni definite. Le zolle 1 e 2 si basano sulle dimensioni dell'albero (sono cioè funzione del diametro a petto d'uomo e dell'angolo di natural declivio del terreno); la zolla 3 può invece essere costruita manualmente e può presupporre una limitazione dovuta a scavi o altre anomalie. Anche in questo caso è possibile quindi, avendo in mente la velocità critica di riferimento indicata nell'analisi del vento, individuare la maggiore o minore propensione al cedimento dell'albero, confrontando tale velocità con quella in cui la curva relativa alla variazione del fattore di sicurezza interseca l'ordinata relativa all'unità per le dimensioni di zolla prescelta. In pratica si può stimare quale dovrebbe essere la zolla efficace minima per garantire la stabilità dell'albero. Il grafico di destra del prospetto è più complesso, in quanto le diverse curve rappresentano diverse velocità del vento. Nel caso l'albero sia perfettamente sano (non vi sia cioè carie o cavità del legno che riduce la forma della sezione basale esaminata), lungo l'asse delle ordinate è possibile desumere, per interpolazione fra le diverse curve di velocità, quale sia la velocità che presuppone la rottura ( $FS=1$ ) o quale sia la velocità soglia ( $FS = 1,5$ ), per poi confrontare tali valori con quello della velocità critica di riferimento. Nel caso l'albero sia affetto da carie o da degenerazione dei tessuti in misura tale da ridurre la sezione basale resistente (quella esaminata), conoscendo la percentuale di riduzione del momento di inerzia è possibile stimare il relativo fattore di sicurezza, sempre al variare della velocità del vento.



Prospetto 2: simulazione della forma dell'albero in Orebale e lista delle principali variabili dendrometriche in un caso di esempio

La verifica al ribaltamento della zolla è eseguita mediante la stima di un Fattore di Sicurezza FSrib [-] dato dal rapporto fra i momenti delle forze stabilizzanti sulle forze ribaltanti. Queste ultime sono date dalla spinta del vento e dal peso della porzione di pianta che insiste esternamente all'area determinata dalla zolla radicale efficace, mentre le forze stabilizzanti sono date dal peso della porzione di albero che insiste all'interno dell'area della zolla radicale, cui si aggiunge il peso della zolla stessa. Nel caso di esempio (Fig. 2), l'analisi modellistica ci induce a ritenere che questa forma di cedimento risulta altamente improbabile, per lo meno in presenza di zolle radicali efficaci non danneggiate. Infatti, una zolla di raggio pari a 2 volte il diametro a petto d'uomo (zolla 2) conserva un fattore di sicurezza superiore a 2 anche per velocità del vento elevatissime. Una zolla efficace di raggio ampio quanto il diametro del tronco (zolla 1) consegue un fattore di sicurezza = 1 (quindi la rottura) per velocità intorno a 115 km/h, mentre la zolla con simulazione del taglio delle radici ad una distanza di 0.4 m (zolla 3), registra una velocità critica intorno a 70 km/h. Questi valori, come detto, devono essere confrontati con la massima velocità del



vento che può verificarsi dove l'albero vive, in un periodo di tempo corrispondente all'aspettativa di vita, o al turno tecnico, dell'albero stesso.

Il fattore di sicurezza nei confronti della possibile rottura del tronco alla base è dato dal rapporto fra il modulo di rottura e lo sforzo flettente dovuto alla spinta del vento. Si assume cioè una forma di cedimento flessionale, mentre altre forme di cedimento saranno implementate in successive versioni del programma. Orebla determina la variazione del fattore di sicurezza al variare della velocità del vento sia in condizioni di tronco sano (0% di riduzione del momento di inerzia) che per sezioni basali danneggiate. In pratica, disponendo di una stima della riduzione del momento di inerzia dovuta alla presenza di una carie (il metodo dei riquadri è inserito all'interno del programma, oppure si può ricorrere ad applicativi disponibili in Autocad®), è possibile osservare come si riduce il fattore di sicurezza all'aumentare della percentuale di sezione interessata da una carie o cavità, o comunque da un processo degenerativo del tessuto legnoso.

Nell'esempio (Fig. 3), l'analisi modellistica evidenzia che il fattore di sicurezza rispetto a questa forma di cedimento scende al di sotto del valore 2 (soglia che definisce il passaggio verso condizioni di pericolosità elevata), per velocità critiche notevoli, intorno a 130 km/h per l'albero in sezione sana. Tuttavia una riduzione del modulo di inerzia del 20% (vedi freccia gialla), implica un livello di pericolosità elevata anche per velocità del vento intorno ai 115 km/h, compatibile con i valori raggiunti dalle raffiche più forti in presenza di venti molto intensi.

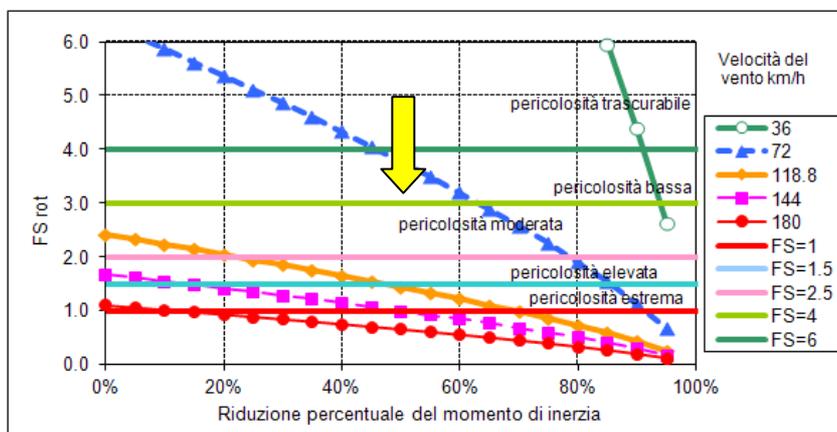


Fig. 3: andamento del fattore di sicurezza nei confronti della rottura del tronco alla base in funzione della percentuale di riduzione del modulo di inerzia, per diverse velocità del vento (spiegazioni nel testo)

Il cedimento del terreno per carichi di compressione assiale è una forma di rottura forse meno frequente, a parte certe specie come il pino domestico, ma più complessa. Pur tuttavia il carico aggiuntivo statico assiale

dovuto alla neve che si deposita sulla pianta può costituire un problema di cui si deve tenere conto nella valutazione di stabilità. Questa eventualità è valutata, in Orebla, ricorrendo ad un modello geomeccanico del terreno e cioè secondo il metodo delle strisce di Prandtl (Terzaghi e Peck, 1984). Come si vede dalla figura 4, l'effetto del carico aggiuntivo dovuto alla neve, se consideriamo che esso si verifichi su un terreno sciolto e allentato dall'acqua, appare estremamente efficace e devastante, in quanto capace di ridurre in modo molto sensibile il fattore di sicurezza.

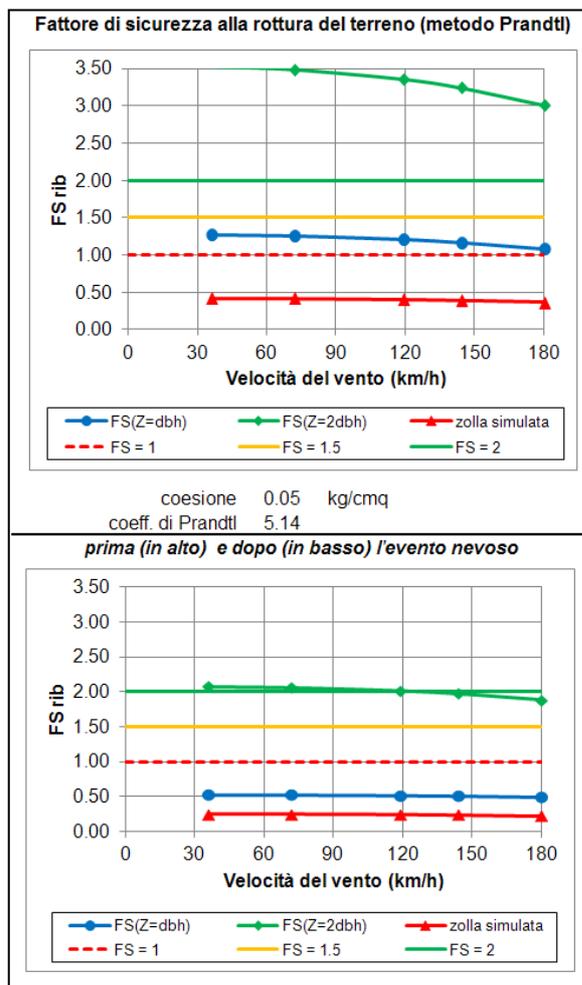


Fig. 4: andamento del fattore di sicurezza nei confronti della rottura del terreno (punzonamento) per diverse velocità del vento. Nel grafo in alto si ipotizza la situazione attuale mentre, in quello in basso, il verificarsi di un carico aggiuntivo come un evento nevoso critico (spiegazioni nel testo)

Lo slittamento della zolla è un caso che generalmente si verifica in presenza di movimenti franosi; si tratta quindi di una forma di cedimento rara in ambito ornamentale urbano. La verifica di stabilità allo scorrimento lungo la base della zolla radicale è determinata dal rapporto fra la somma delle forze resistenti e la somma delle forze agenti nella stessa direzione. Lo slittamento può avvenire per la spinta del terreno lungo il piano di posa della zolla radicale, contrastata da una reazione che dipende dal peso dell'albero, della zolla radicale e dal coefficiente di attrito. Orebla fornisce anche una verifica di questa possibile forma di cedimento nei termini della riduzione del fattore di sicurezza con l'aumentare della spinta del vento (Fig. 5).

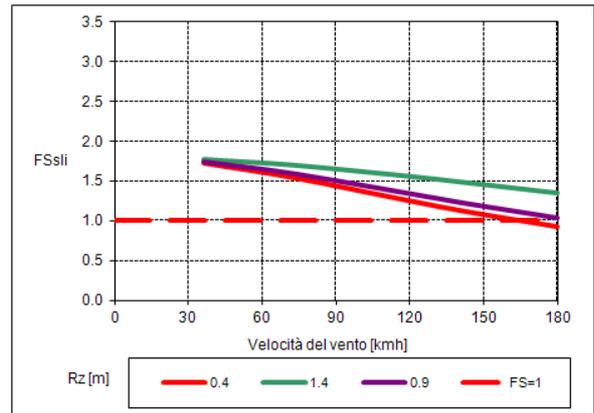


Fig. 5: andamento del fattore di sicurezza nei confronti dello slittamento della zolla per diverse velocità del vento (spiegazioni nel testo)

La verifica di stabilità nei confronti della rottura del tronco in quota è particolarmente complessa in quanto essa dovrebbe essere realizzata mediante una modellazione molto fine della struttura arborea. In prima approssimazione Orebla fornisce alcuni indici di riferimento come il rapporto di snellezza, il Wind Resistance Factor (Sterck e Bongers, 1998), il fattore di sicurezza euleriano (Niklas e Spatz, 2012) ed il Live Crown Ratio (Prospetto 2).

Orebla consente tuttavia anche di stimare la sollecitazione indotta dalla forzante eolica lungo l'altezza dell'albero, mediante una procedura di distribuzione del carico e tenendo conto di equazioni del profilo del vento diverse, in relazione alle condizioni al contorno in cui si trovano a vegetare gli

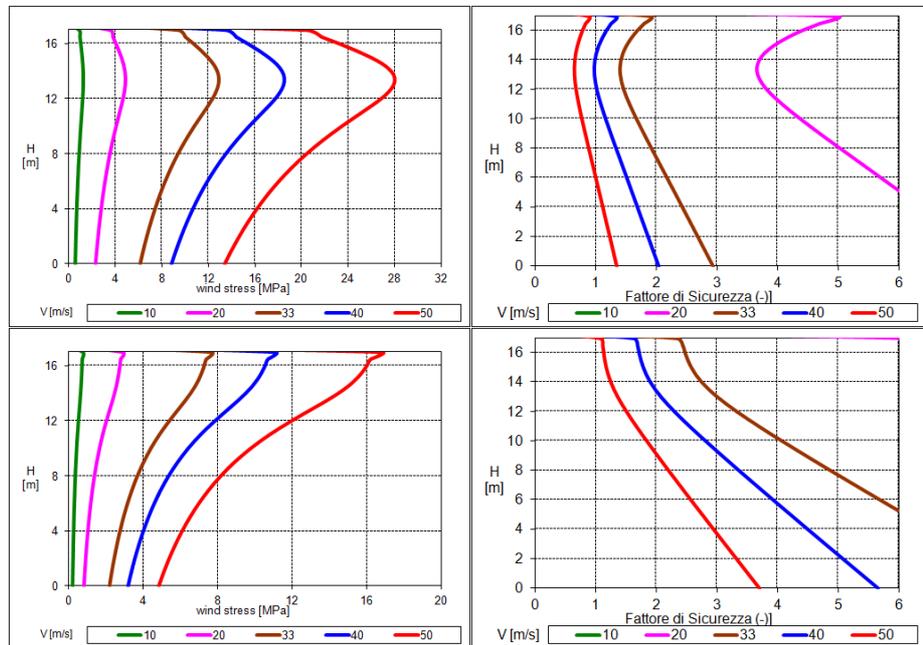


Fig. 6: variazione della sollecitazione dovuta al vento (a sinistra) e del relativo fattore di sicurezza (a destra) in funzione dell'altezza dell'albero, per due diverse espressioni della variazione della velocità del vento (spiegazioni nel testo)

alberi. In Fig. 6 si può osservare come varia la sollecitazione indotta dalla forzante eolica (wind stress) ed il conseguente fattore di sicurezza, al variare della velocità del vento, lungo l'altezza dell'albero, adottando il consueto profilo iperbolico dell'equazione di Monteith (in alto) oppure riferendosi ad una equazione proposta (Niklas e Speck, 2001) per gli ambienti forestali a copertura quasi completa (in basso).

Orebla permette anche la simulazione di interventi di potatura, verificandone gli effetti nei confronti della stabilità. È infatti possibile modificare forma e dimensioni della chioma, in modo tale da simulare gli effetti di un dato intervento di potatura, verificando come variano tutti i fattori di sicurezza fin qui esposti prima e dopo l'intervento ipotizzato. Come si vede (figura 7), anche una piccola riduzione delle dimensioni della chioma può determinare una modifica, talora sostanziale, dei fattori di sicurezza e quindi permette di assumere decisioni più ponderate in merito agli interventi colturali da prescrivere.

Gli esempi qui riportati illustrano, sia pur schematicamente, come l'analisi modellistica costituisca un valido strumento di ausilio nell'ambito della valutazione di stabilità degli alberi in quanto, pur lontana dal fornire soluzioni del tutto oggettive e inequivocabili, indirizza il percorso logico svolto dal valutatore nel corso del processo diagnostico da lui svolto, stimolando una visione più completa dell'albero e la verifica del più ampio spettro possibile di interpretazioni dei problemi che l'albero manifesta e delle soluzioni che è possibile proporre.

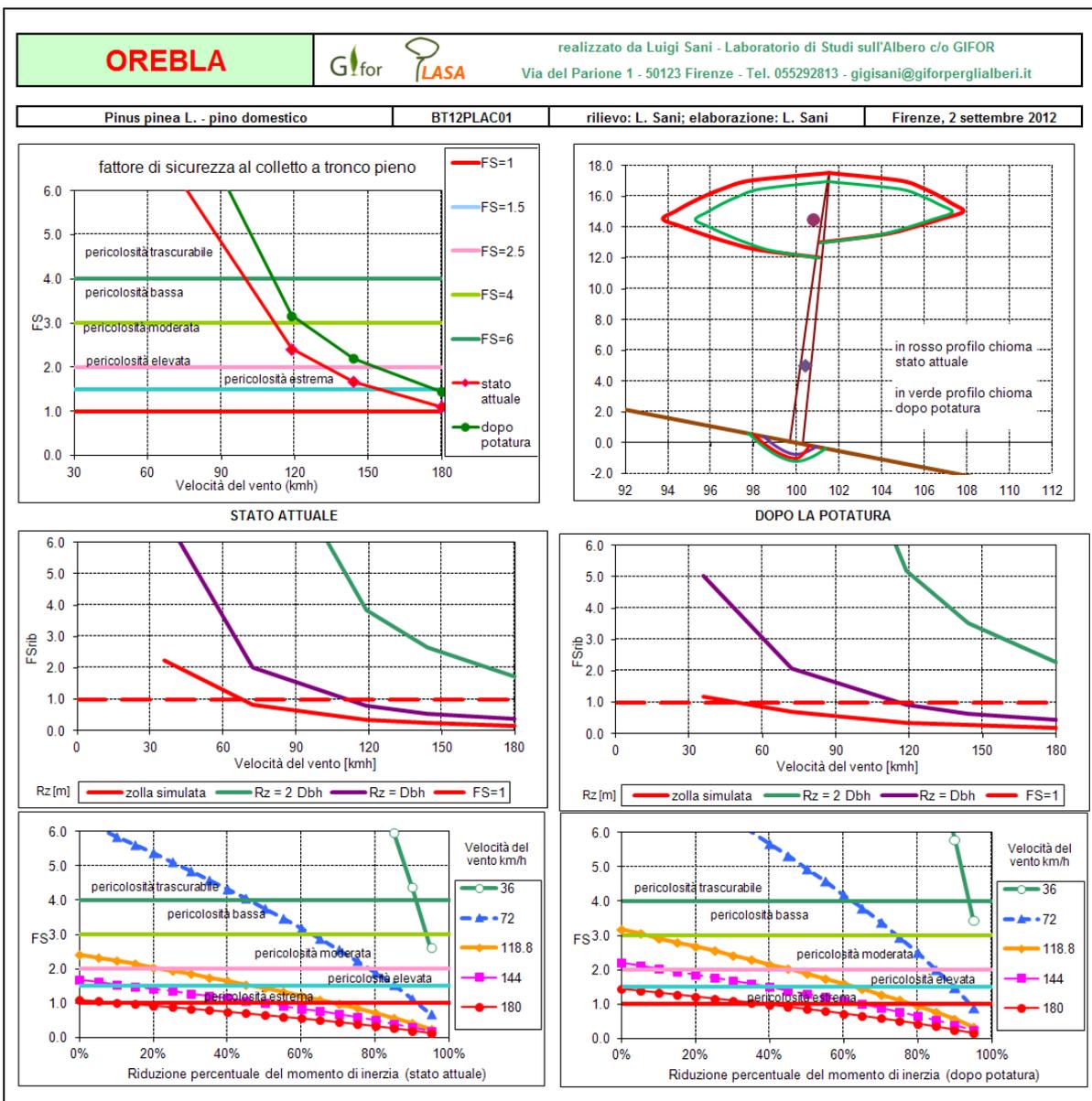


Fig. 7: simulazione di un intervento di riduzione della chioma e conseguente variazione dei fattori di sicurezza nei confronti della rottura del tronco al colletto e del ribaltamento della zolla (spiegazioni nel testo)

## 11.1 OREBLA E PULLING TEST

La prova di trazione controllata è una procedura di valutazione della stabilità degli alberi sviluppata in campo forestale da molto tempo per scopi diversi, introdotta in tempi relativamente recenti nell'ambito dell'Arboricoltura Ornamentale e finalizzata a determinare, con la minore approssimazione possibile, la potenzialità al ribaltamento della zolla radicale o la rottura del fusto determinando, al tempo stesso, la velocità

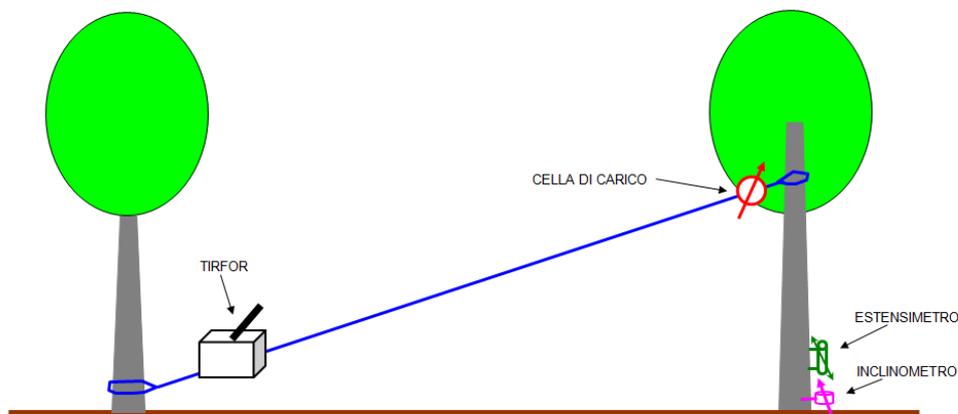
critica del vento che potrebbe determinare tali accadimenti. La prova di trazione controllata (vedi schema allegato) consiste nel sottoporre l'albero ad una sollecitazione di trazione semistatica per mezzo di un tirfor, collegato ad un punto di ancoraggio fisso, e nel misurare la relazione che sussiste fra la forza esercitata e le sollecitazioni indotte sull'albero. Le sollecitazioni studiate sono l'inclinazione della zolla radicale, misurata mediante il posizionamento di inclinometri in prossimità del colletto, e l'allungamento delle fibre, misurato attraverso estensimetri posizionati ad una certa altezza lungo la superficie esterna del tronco. Al fine di non danneggiare la capacità di resistenza meccanica dell'albero, la sollecitazione esercitata sull'esemplare deve essere contenuta entro certi limiti prefissati, ma comunque in modo tale da poter determinare, sulla base del rapporto sforzo-deformazione misurato, il carico critico di rottura o sradicamento dell'albero. Una volta determinata la forza critica che implica la rottura del tronco o il ribaltamento della zolla radicale è possibile, mediante l'approntamento di un'analisi modellistica dell'albero, determinare la velocità critica massima per mezzo della formula comunemente utilizzata per la stima della forza del vento su un oggetto:

$$M_{rib} = \rho_i (F_{wi} * H_i)$$

dove:

$$F_{wi} = \frac{1}{2} * \rho * C_d * A_i * v_i^2$$

in cui  $M_{rib}$  è il momento ribaltante critico,  $H_i$  è l'altezza lungo la chioma,  $F_w$  è la spinta del vento,  $\rho$  è la densità dell'aria,  $A$  è la superficie di esposizione della chioma e  $C_d$  è il coefficiente aerodinamico, che tiene conto della sollecitazione aeroelastica indotta dall'interazione fra albero e vento.



Per quanto concerne il valore del fattore di sicurezza (e quindi anche il valore della velocità critica dalla quale esso viene desunto) ottenuto dalla prova di trazione controllata, è necessario precisare che esso è il frutto, oltreché di una relazione fra elasticità della struttura legnosa e rottura della stessa che non è perfettamente univoca, dell'applicazione con criterio deterministico di valori univoci alle variabili condizionanti. In realtà alcuni di tali valori (come la superficie di massima esposizione della chioma o l'altezza del baricentro della chioma) sono di relativamente facile determinazione mentre altri, (in particolare il coefficiente aerodinamico o il fattore di turbolenza) sono sostanzialmente sconosciuti. Nella pratica tali coefficienti sono quindi stimati

sulla base dell'esperienza (cercando di mantenersi in condizioni di maggior sicurezza) e pertanto i risultati desunti dalla loro applicazione non devono essere considerati come un dato assolutamente preciso, ma piuttosto come una grandezza di riferimento delle più probabili condizioni in cui l'albero si trova.

#### Modalità di elaborazione ed analisi dei dati

Le prove di trazione e l'analisi modellistica sono uno strumento di analisi complesso e articolato, di non facile lettura per i non addetti ai lavori. Al fine di rendere più facilmente comprensibile i grafici e le tabelle che forniscono i risultati delle prove effettuate, si danno qui alcune schematiche indicazioni sulle modalità di elaborazione e analisi del dato ottenuto.

Per quanto riguarda la prova di trazione controllata, gli strumenti forniscono una serie di informazioni riprodotte in forma grafica. Nei grafici è rappresentato l'andamento della relazione forza applicata-inclinazione (a sinistra in alto) e forza applicata-allungamento (a sinistra in basso) in funzione del tempo, negli specifici punti di misura. Quindi, al centro, sono rappresentati l'andamento della forza applicata in funzione dell'inclinazione (per la zolla radicale) e dell'allungamento (per il tronco). Il grafico in alto a destra riporta l'andamento percentuale delle relazioni forza-deformazione della zolla, confrontandola con il momento ribaltante critico desunto dall'analisi del vento, effettuata secondo la metodologia Eurocodice per l'Italia. In pratica, con l'analisi del vento, si individua il momento ribaltante (e quindi la velocità del vento ricavabile aritmeticamente) associato alla velocità di riferimento individuata per l'area in esame e tenuto conto delle condizioni in cui si trova l'albero. Tale velocità è, sostanzialmente, la "velocità di progetto", e cioè non tanto quella a cui avviene il cedimento, quanto quella che determina un momento ribaltante che deve essere tollerato, con sufficiente sicurezza, dalla struttura in esame. Il grafico in basso a destra riporta l'andamento percentuale delle relazioni forza-allungamento del tronco, confrontandola con il limite elastico presunto per la specie in esame. In questo modo si individua un fattore di sicurezza nei confronti del ribaltamento o della rottura. Quanto maggiore sarà il fattore di sicurezza, tanto maggiore sarà la fiducia nelle condizioni di stabilità dell'albero. Nella pratica, qualora il fattore di sicurezza sia desunto facendo riferimento al carico di rottura (o ad un suo surrogato), si considera come limite minimo di sicurezza un valore del fattore pari a 1,5 (linea verde). Ciò significa che allorquando il fattore di sicurezza scende al di sotto di 1,5, l'oggetto di studio non può più essere considerato "sicuro" nel senso che la sua propensione al cedimento è diventata significativa. Allorquando si usa una velocità di progetto, il margine di sicurezza è già implicito nel calcolo della forzante critica per cui è sufficiente che il fattore di sicurezza superi l'unità. Il grafico di riepilogo della prova di trazione controllata riporta i dati in modo diverso e permette quindi di analizzarli secondo un'angolazione diversa, che si riferisce ad un diverso metodo di calcolo. Si rappresenta la variazione del fattore di sicurezza al variare della velocità del vento sia per la rottura del tronco alla base (spezzata marrone), sia per il ribaltamento della zolla al variare della velocità del vento (spezzata blu) e tenendo conto dell'inclinazione dell'albero (spezzata viola). In questo caso si può verificare quale potrebbe essere la velocità

critica teorica alla quale avviene il cedimento, in quanto sarà prossima a quella ove il fattore di sicurezza è pari a 1. Qui un certo margine di sicurezza, e cioè un fattore pari o superiore a 1,5 rispetto alla velocità massima riscontrata nel sito in esame, è evidentemente opportuno. La rappresentazione della prova termina con un breve commento ed un diagramma che illustra il posizionamento dei sensori e della linea di tiro. Tale posizionamento permette di evidenziare la presenza di sollecitazioni torsionali, o meglio una risposta asimmetrica dell'albero. Tale risposta può essere dovuta a cedimenti localizzati, come quando viene a mancare una parte dell'apparato radicale.

Qui di seguito si illustra un caso di esempio di come il metodo Orebla si integra con le informazioni desunte dalla prova di trazione controllata.

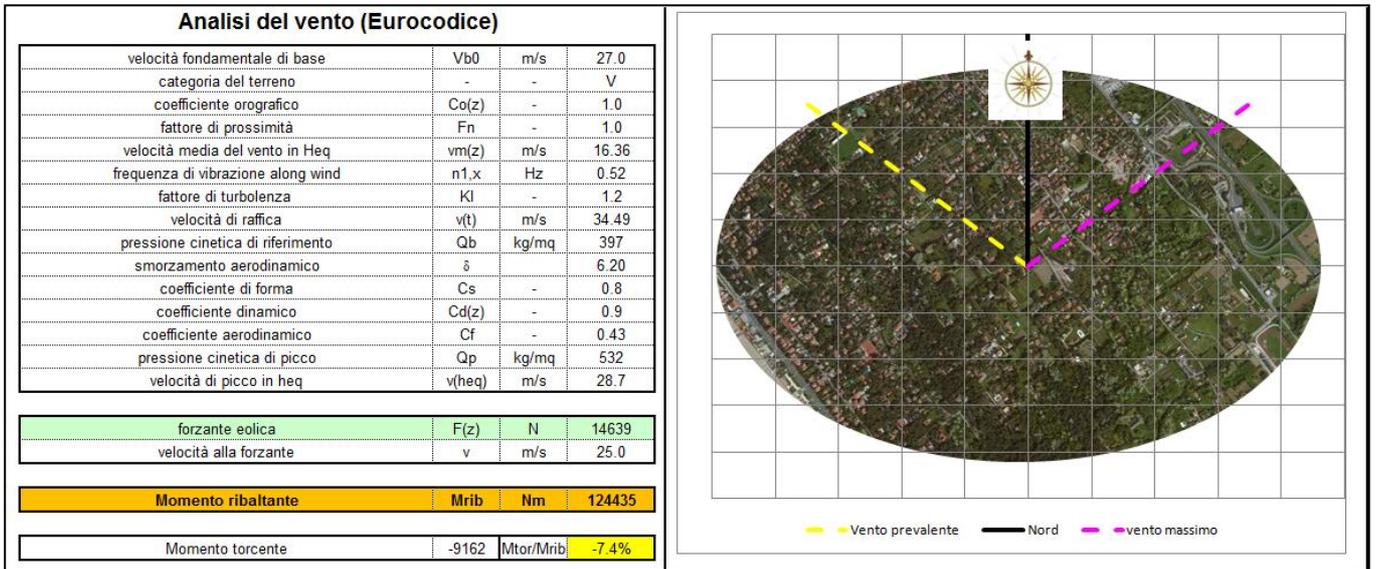
## Tiglio n° 18



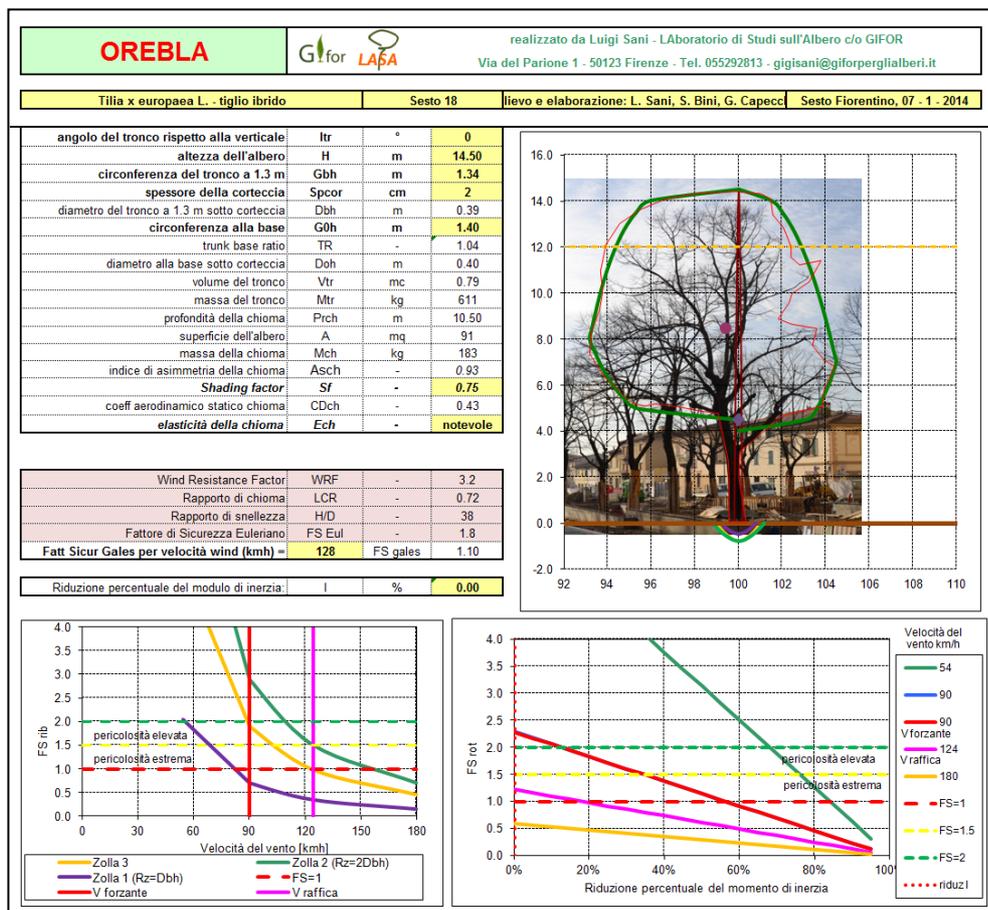
Le condizioni del sito di radicazione sono pessime a causa del terreno alterato dai lavori. Il colletto è regolare. Il sito di vegetazione è protetto. Il fusto rastremato con lesioni da potatura. La ramificazione è ad inserzione debole, e caotica, con lesioni da potatura. La chioma è capitozzata.



## Analisi del vento

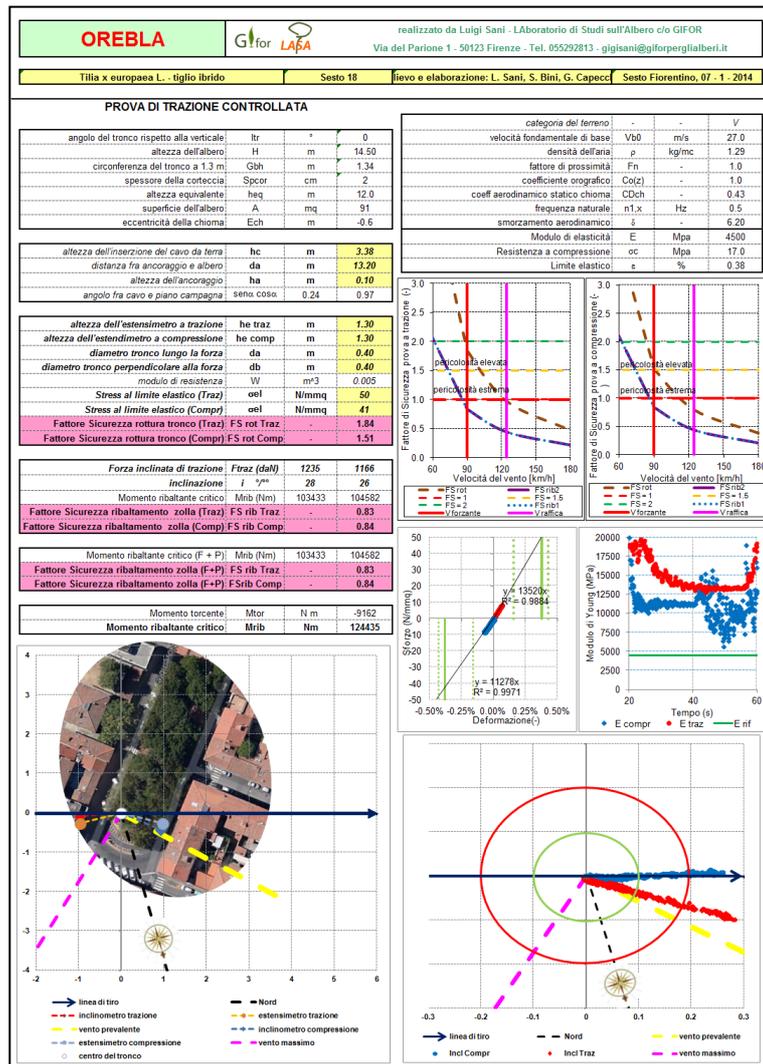
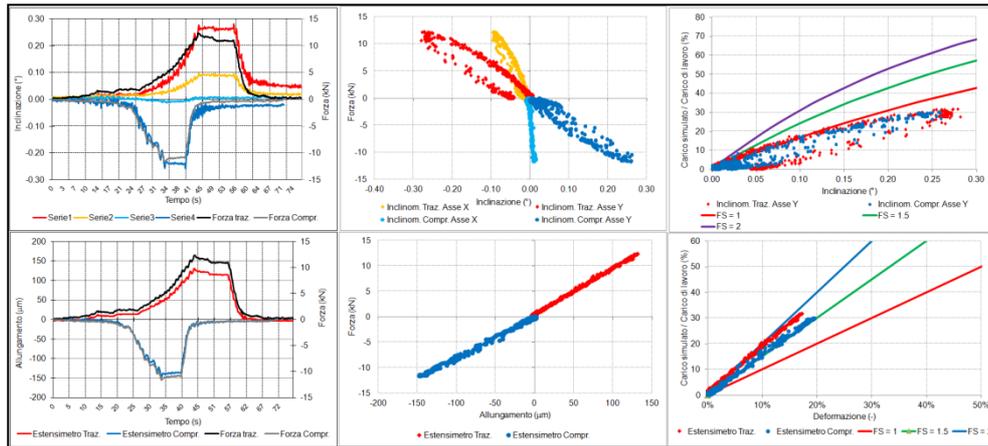


## Analisi modellistica



Commento:l'analisi modellistica teorica non evidenzia peculiari segni di criticità strutturale se non per zolle radicali efficaci di ridotte dimensioni (zolla 1, di raggio ampio quanto il diametro a petto d'uomo). La propensione al cedimento per rottura del tronco alla base è anch'essa improbabile se non per sezioni basali danneggiate, in cui il modulo di inerzia è ridotto del 50% rispetto alla sezione teorica sana. Tale eventualità non si riscontra nella realtà.

Prova di trazione con inclinometri (in alto) ed estensimetri (in basso) paralleli alla linea di tiro



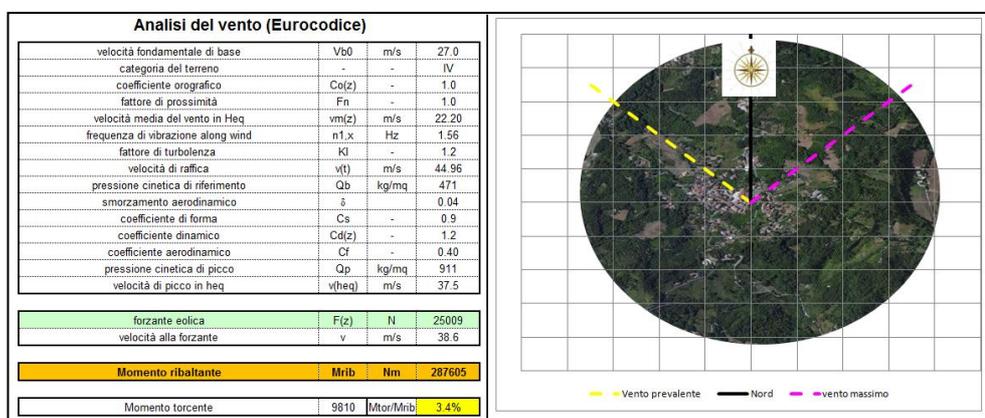
Commento: la prova di trazione ha evidenziato una grave situazione di criticità per quanto riguarda la propensione al ribaltamento della zolla che risulta evidentemente danneggiata. Il fattore di sicurezza si colloca al di sotto dell'unità per cui la pianta è da considerarsi pericolosa e quindi da abbattere.

Arpaise - Platano n° 1



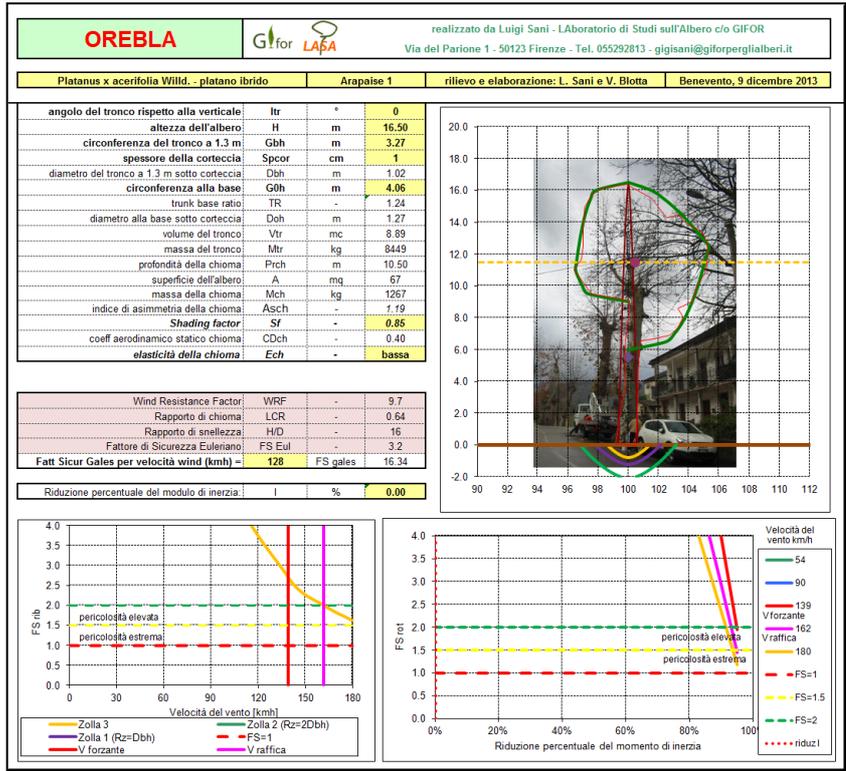
Le condizioni del sito di radicazione sono scadenti per la presenza di asfalto sino in prossimità del colletto, per la compattazione del substrato e per la limitazione ed il danneggiamento della zolla efficace. L'apparato radicale è fortemente danneggiato e con carie estesa. Il colletto è fortemente danneggiato, con tessuto bruciato e con carie estesa non ben compartimentata. Il sito di vegetazione è moderatamente esposto. Il fusto è regolare ma con carie interna diffusa. Il castello è danneggiato con carie evidente. La ramificazione è avventizia, vegetante su capitozzi a inserzione debole, su sedi di taglio cariate. La chioma è asimmetrica e mal conformata.

### Analisi del vento

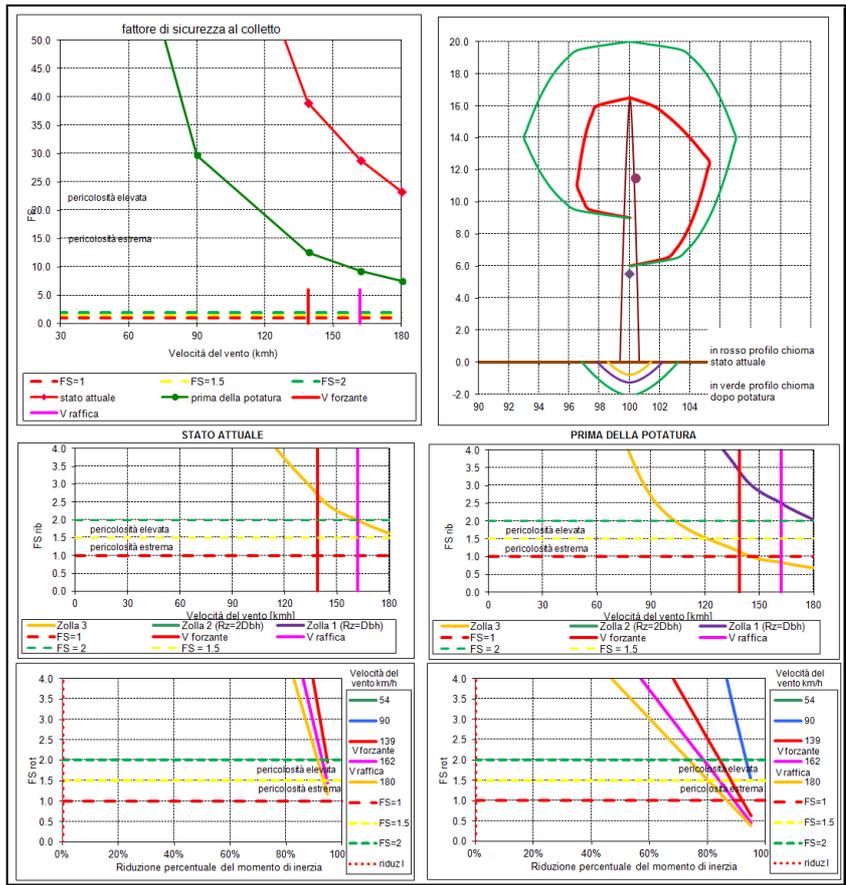


# Analisi modellistica

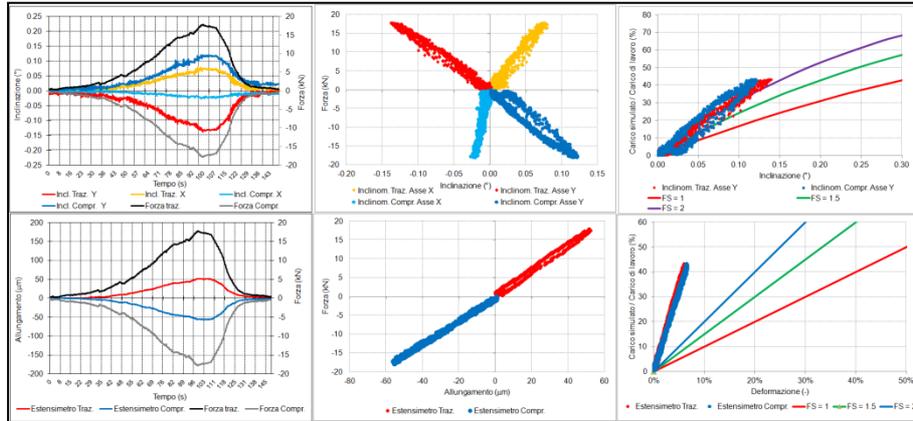
Commento: come si osserva dai grafici, l'analisi modellistica non evidenzia peculiari segni di criticità dal punto di vista geometrico-strutturale, nemmeno per zolle radicali efficaci estremamente limitate o per sezioni basali fortemente danneggiate. Ciò è dovuto al bassissimo rapporto di snellezza, che dipende dal naturale incremento diametrico del platano, possibile anche in alberi fortemente e ripetutamente capitozzati.



Nella simulazione qui a lato si può verificare invece come, fra un intervento di capitozzatura ed il successivo, l'albero può raggiungere dimensioni tali da rendere possibile il ribaltamento della zolla nelle condizioni reali di danneggiamento e riduzione delle dimensioni del sistema radicale.



Prova di trazione con sensori paralleli alla linea di tiro



**OREBLA** G for LARA  
 realizzato da Luigi Sani - Laboratorio di Studi sull'Albero c/o GFOR  
 Via del Parione 1 - 50123 Firenze - Tel. 055292813 - gigitani@geforpergallber.it

Platanus x acerifolia Willd. - platano ibrido Arapaise 1 rilievo e elaborazione: L. Sani e V. Blotta Benevento, 9 dicembre 2013

### PROVA DI TRAZIONE CONTROLLATA

angolo del tronco rispetto alla verticale	tr	°	0
altezza dell'albero	H	m	16,50
circonferenza del tronco a 1,3 m	Ch1,3	m	3,27
spessore della cortecchia	Spccr	cm	1
altezza equivalente	heq	m	11,5
superficie dell'albero	A	m <sup>2</sup>	67
eccentricità della chioma	Ech	m	0,4

altezza dell'inserzione del cavo da terra	hc	m	7,50
distanza fra ancoraggio e albero	da	m	22,00
altezza dell'ancoraggio	ha	m	0,50
angolo fra cavo e piano campagna	simc	cos	0,30 / 0,95

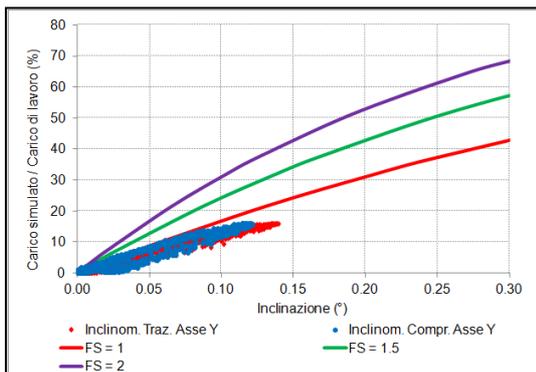
altezza dell'estensimetro a trazione	he traz	m	1,50
altezza dell'estensimetro a compressione	he comp	m	1,65
diametro tronco perpendicolare alla forza	db	m	1,00
modulo di resistenza	W	m <sup>3</sup>	0,092
Stress al limite elastico (Traz)	σel	N/mm <sup>2</sup>	22
Stress al limite elastico (Compr)	σel	N/mm <sup>2</sup>	20
Fattore Sicurezza rottura tronco (Traz)	FS rot Traz	-	7,07
Fattore Sicurezza rottura tronco (Compr)	FS rot Comp	-	6,43

Forza inclinata di trazione	F <sub>traz</sub> (daN)	1785	1785
inclinazione	i (°)	14	12
Momento ribaltante critico	M <sub>rib</sub> (Nm)	604947	687260
Fattore Sicurezza ribaltamento zolla (Traz)	FS rib Traz	-	2,10
Fattore Sicurezza ribaltamento zolla (Compr)	FS rib Comp	-	2,39

Momento torcente critico	M <sub>traz</sub>	Nm	1810
Momento ribaltante critico	M <sub>rib</sub>	Nm	267405

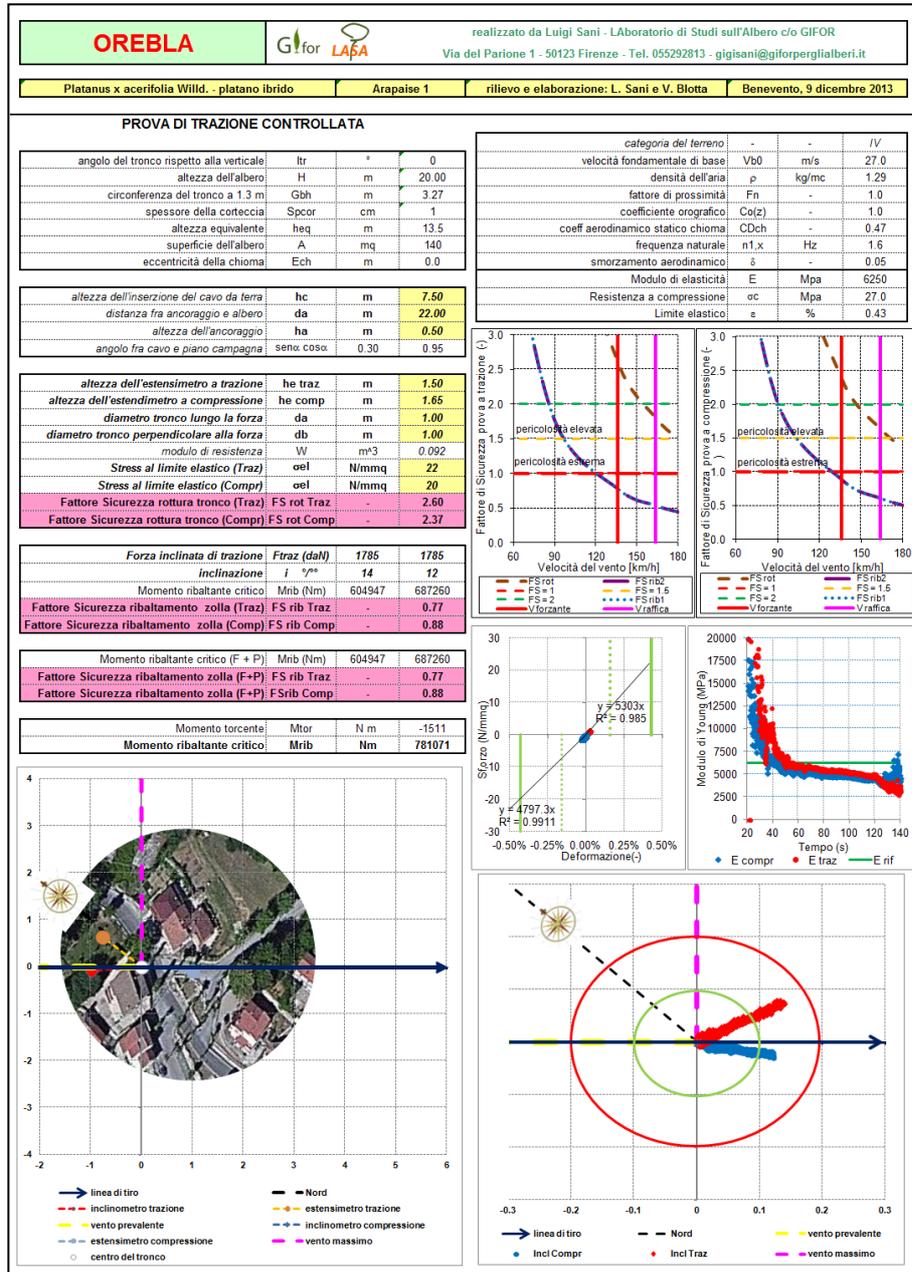
catagoria del terreno	-	-	IV
velocità fondamentale di base	V <sub>b0</sub>	m/s	27,0
densità dell'aria	ρ	kg/m <sup>3</sup>	1,29
fattore di prossimità	F <sub>a</sub>	-	1,0
coefficiente orografico	C <sub>o(z)</sub>	-	1,0
coeff aerodinamico statico chioma	C <sub>Dch</sub>	-	0,40
frequenza naturale	n <sub>1,x</sub>	Hz	1,6
smorzamento aerodinamico	ξ	-	0,04
Modulo di elasticità	E	Mpa	6250
Resistenza a compressione	σ <sub>c</sub>	Mpa	27,0
Limite elastico	σ <sub>e</sub>	%	0,43

The complex block contains several graphs and diagrams. On the left, a graph shows 'Carico simulato / Carico di lavoro (%)' vs 'Inclinazione (°)' for FS=1, 1.5, and 2. In the center, a diagram shows the tree's position and the direction of the pull force. On the right, there are graphs for 'Fattore di Sicurezza prima e dopo trazione (%)' vs 'Velocità del vento (km/h)' and 'Modulo di resistenza (N/mm²)' vs 'Deformazione (ε)'. A circular diagram at the bottom right shows the tree's orientation and the pull force direction.



Commento: la prova di trazione, come spesso accade per platani di grandi dimensioni della base, non ha evidenziato una situazione di evidente criticità. Il fattore di sicurezza si colloca ancora in un campo ottimale, cioè intorno o superiore a 2. Tuttavia, se si analizza il risultato della prova ipotizzando l'albero nel momento immediatamente precedente alla potatura, quindi con dimensioni della chioma di molto maggiori, otteniamo

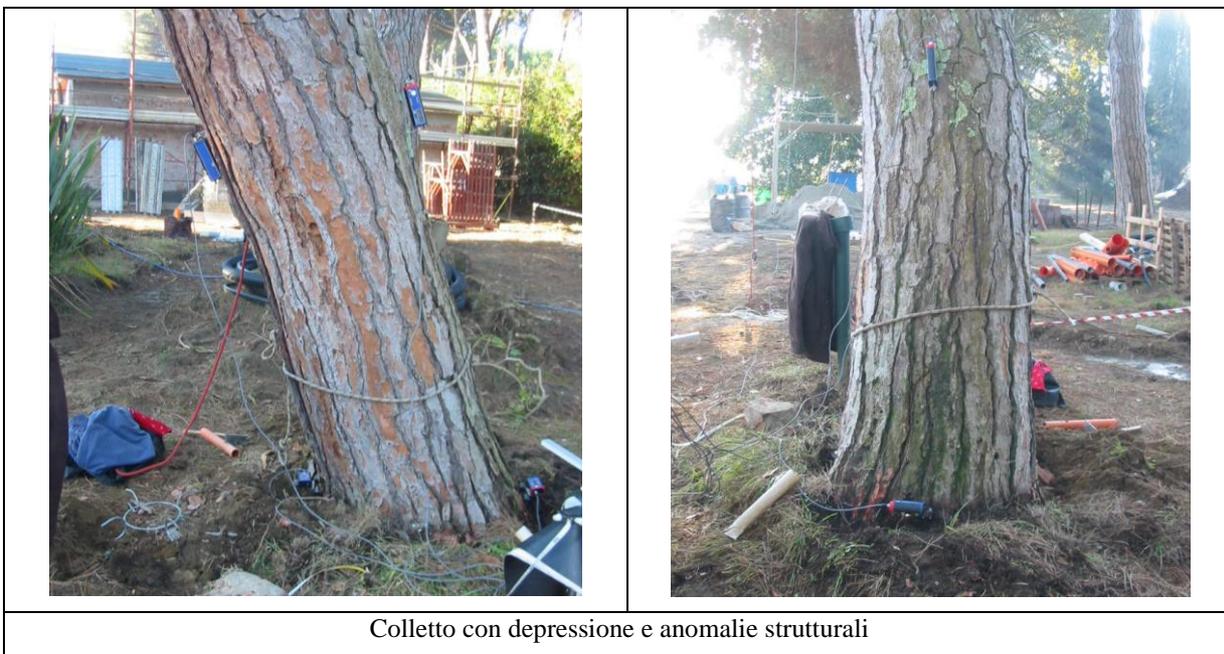
(vedi grafi qui a lato e sotto) un livello di pericolosità critico al verificarsi della forzante eolica di progetto.



Pino n° 1



Le condizioni del sito di radicazione sono mediocri a causa del terreno alterato dai lavori. Il colletto è asimmetrico, con depressione sul lato compresso. Il sito di vegetazione è protetto. Il fusto è molto inclinato e rastremato ma con carico sbilanciato in alto (end loading). La ramificazione è ben equilibrata. La chioma è moderatamente vigorosa.

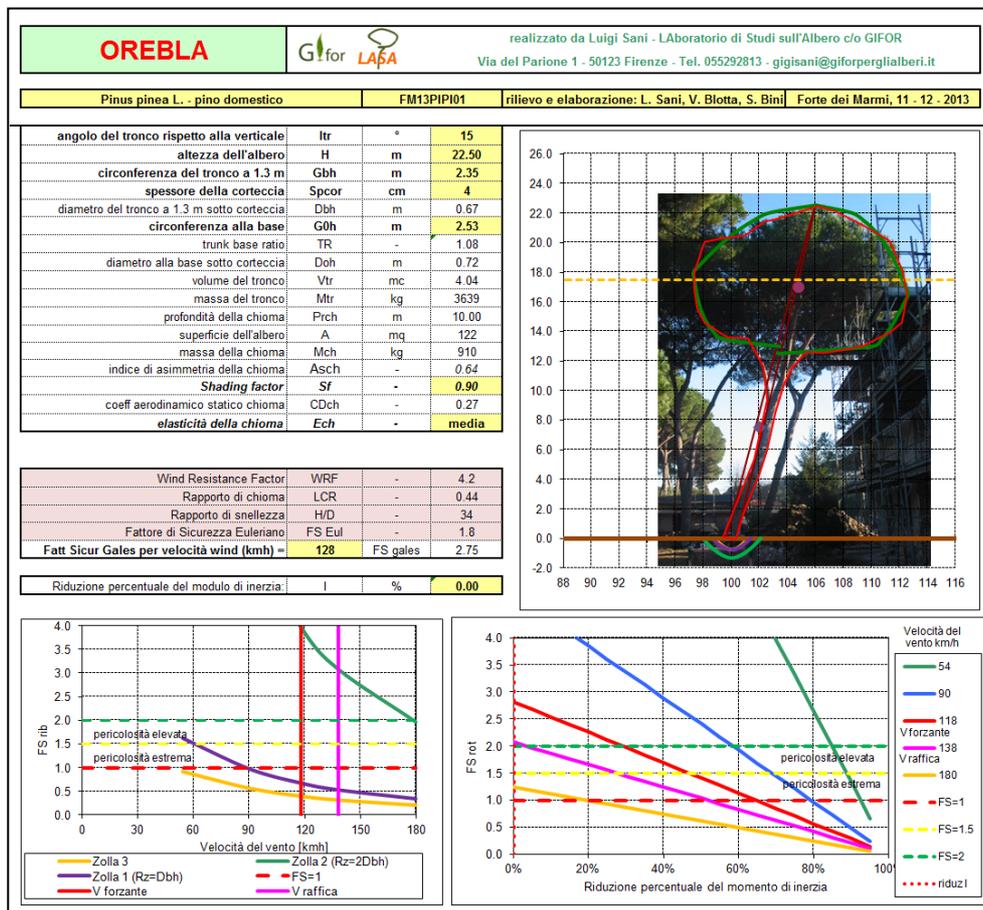


Colletto con depressione e anomalie strutturali



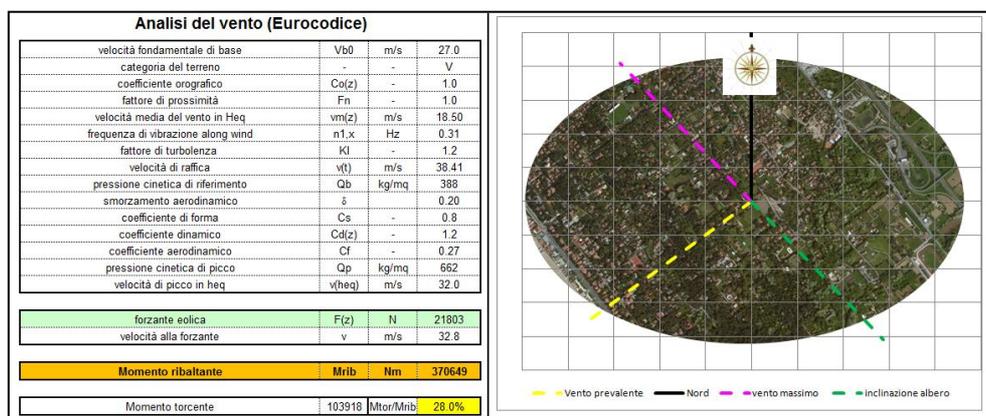
Chioma ancora ben compatta e protetta

Analisi modellistica

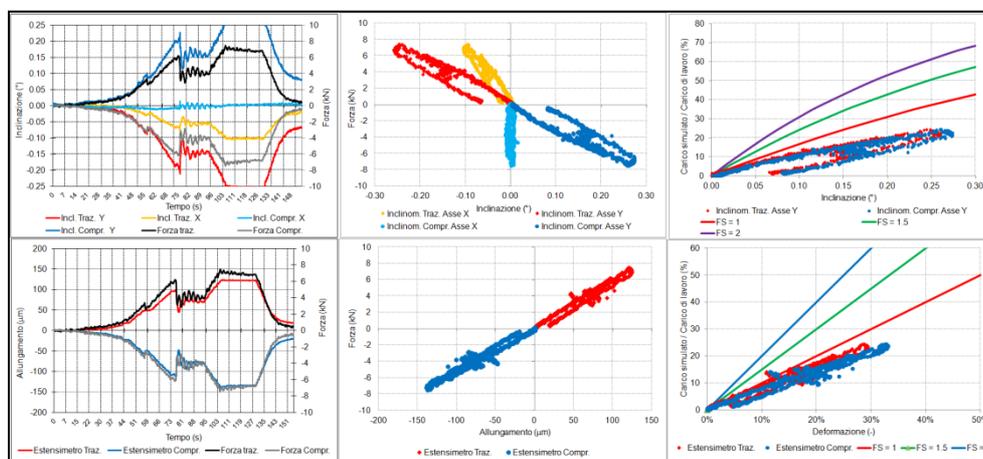


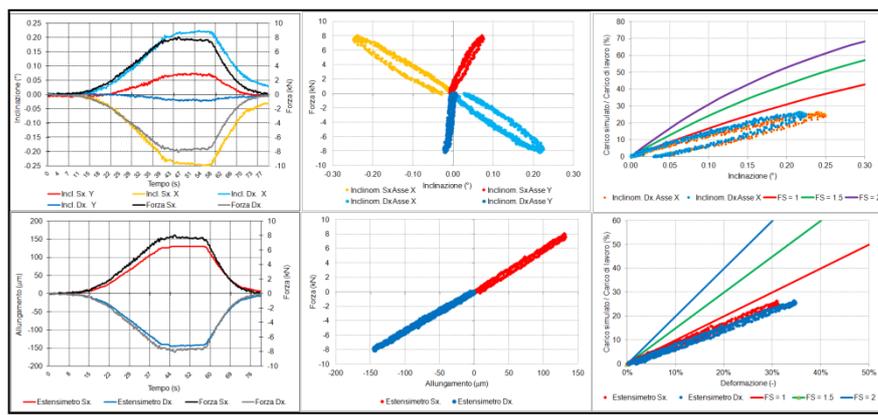
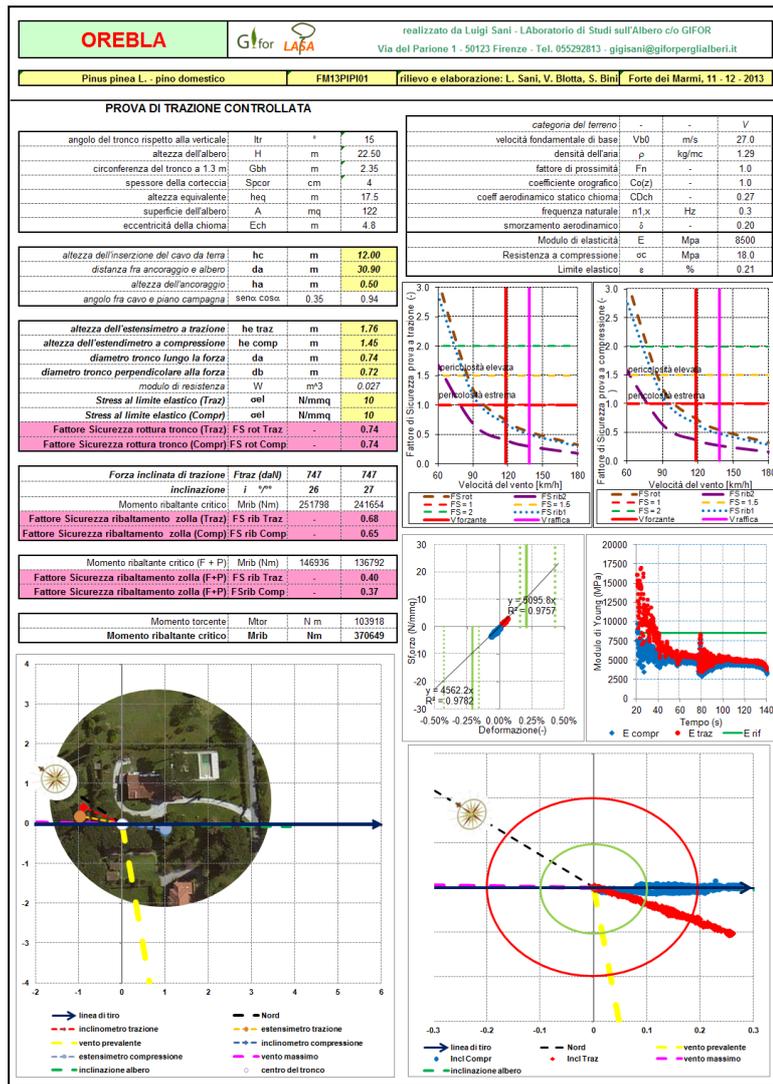
Commento:l'analisi modellistica teorica evidenzia peculiari segni di criticità strutturale per zolle radicali efficaci anche di non ridotte dimensioni (zolla 2, di raggio ampio quanto il diametro a petto d'uomo). La propensione al cedimento per rottura del tronco alla base è invece prevedibile solo per sezioni basali danneggiate, in cui il modulo di inerzia è ridotto del 50% rispetto alla sezione teorica sana. Tale eventualità non si riscontra nella realtà.

### Analisi del vento

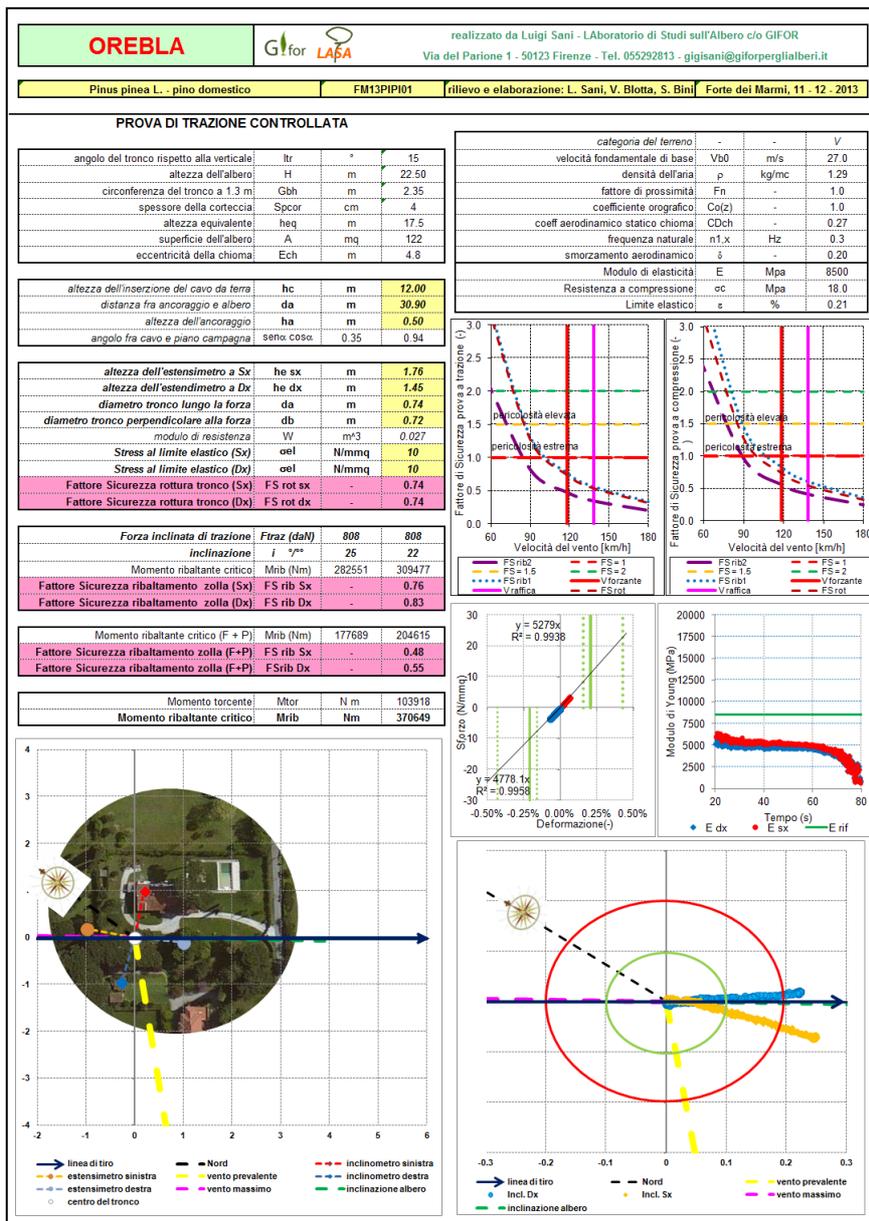


Prova di trazione con inclinometri (in alto) ed estensimetri (in basso) paralleli alla linea di tiro





Prova di trazione con inclinometri (in alto) ortogonali ed estensimetri (in basso) paralleli alla linea di tiro



Commento: la prova di trazione ha evidenziato una grave situazione di criticità sia per quanto riguarda la propensione al ribaltamento della zolla che per la rottura del tronco. Il fattore di sicurezza si colloca al di sotto dell'unità per cui la pianta si avvale sensibilmente delle condizioni di protezione degli alberi vicini.

## BIBLIOGRAFIA

Achim A., Ruel J.C., Gardine B.A., Laflamme G. e Meunier S. (2004). Modelling the vulnerability of balsam fir forests to wind damage. *Forest Ecology and Management* 204: 35–50.

Ancelin P., Courbaud B. e Fourcaud T. (2004). Development of an individual tree –based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest Ecology and Management* 203: 101–121.

Anfodillo T, 2005. Invecchiamento e senescenza negli alberi: nuove evidenze e nuove domande. *Forest@* 2 (4): 316-318. [online] URL: <http://www.sisef.it/>

Anfodillo T, Carrer M, Fior C, Rossi S. 2006 Convergence tapering in different woody. *New Phytologist* 169

Angiosperm Phylogeny Group (1998). An ordinal classification for the families of flowering plants. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 85: 531–553.

Baker C.J. (1995). The development of a theoretical model for the windthrow of plants. *Journal of Theoretical Biology* 175: 355–372.

Baker C.J. (1997). Measurements of the natural frequencies of trees. *Journal of Experimental Botany* 48: 1125–1132.

Baker III T.T., Conner W.H., Lockaby B.G., Santurf J.A. e Burke M.K. (2001). Fine root productivity and dynamics on a forested floodplain in South Carolina. *Soil Science Society of America Journal* 65: 545–556.

Barlow P.W. (1986). Adventitious roots of whole plants: their forms, functions and evolution. In: Jackson M.B. (Eds), *New root formation in plants and cuttings*, 67–110. M. Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands.

Barlow P.W. (1994). The origin, diversity and biology of shoot-borne roots. In: Davis T.D. e Haissig B.E. (Eds), *Biology of adventitious root formation*, 1–23. Plenum Press, New York, New York, USA.

Belluzzi O. (2001). *Scienza delle Costruzioni*. Zanichelli, Bologna.

Bellocchi G, Maestrini C. 2002 Principi di modellizzazione della crescita e dello sviluppo di specie arboree  
Riv. di Agron, 2002 - sipeaa.it

Blackburn P., Petty J.A. e Miller K.F. (1988). An assessment of the static and dynamic factors involved in  
windthrow. *Forestry* 61: 29–43.

Blakesley D. (1994). Auxin metabolism and adventitious root formation. In: Davis T.D. e Haissig B.E. (Eds),  
*Biology of adventitious root formation*, 143–154. Plenum Press, New York, New York, USA.

Blennow K. e Sallnäs O. (2004). WINDA – a system of models for assessing the probability of wind damage  
to forest stands within a landscape. *Ecological Modelling* 175: 87–99.

Bloomfield J, Vogt K, Warge PM. 1996. Tree root turnover and senescence. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi  
U, editors.  
*Plant roots: The hidden half*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker. pp. 363–381.

Bogar G.D. e Smith F.H. (1965). Anatomy of seeding roots of *Pseudotsuga menziesii*. *American Journal of  
Botany* 52: 720–729.

Bond BJ-2000 Agerelated changes in photosynthesis of woody. *Trend in Plant. Sciences* 5: 349-353

Boke N.H. (1979). Root glochids and root spurs of *Opuntia arenaria* (Cactaceae). *American Journal of  
Botany* 66: 1085–1092.

Borri C. e Pastò S. (2006). *Lezioni di Ingegneria del Vento*. Firenze University Press. Pp. 222.

Brudi E. (2002). Trees and statics: an introduction. *Arborist News* 11: 28–33.

Brudi E. e Van Wassenae P. (2001). Trees and Statics: non-destructive failure analysis. In: Smiley E.T. e  
Coder K.D. (Eds), *Tree Structure and Mechanics conference proceedings: How trees stand up and fall down*.  
October 2001, Savannah, GA. International Society of Arboriculture, Champaign IL pp. 53-70.

Burke M.K. e Raynal D.J. (1994). Fine-root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil* 162: 135–146.

Bushamuka V.N. e Zobel R.W. (1998a). Maize and soybean tap, basal and lateral root responses to a stratified acid, aluminum-toxic soil. *Crop Science* 38: 416–421.

Bushamuka V.N. e Zobel R.W. (1998b). Differential genotypic and root type penetration of compacted soil layers. *Crop Science* 38: 776–781.

Bussotti, F., Kalaji, M. H., Desotgiu, R., Pollastrini, M., Łoboda, T., Bosa, K., & Kalaji, M. H. (2012). *Misurare la vitalità delle piante per mezzo della fluorescenza della clorofilla* (Vol. 137). Firenze University Press.

Byrne J.M., Pesacreta T.C. e Fox J.A. (1977). Development and structure of the vascular connection between the primary and secondary root of *Glycine max*. *American Journal of Botany* 64: 946–959.

Causin, R., Montecchio, L., & Accordi, S. M. (1996). Probability of ectomycorrhizal infection in a declining stand of common oak. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 53, No. 2-3, pp. 743-752). EDP Sciences.

Chen J., Wu D., Witham F.H., Heuser C.W. e Aerteca R.N. (1996). Molecular cloning and characterization of auxin-regulated genes from mungbean hypocotyls during adventitious root formation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 121: 393–398.

Connor K, Lanner R. 1990. Effects of tree age on secondary xylem and phloem anatomy in stem of GreatBasin, Bristlecone pine (*Pinus longeva*). *American Journal of Botany* 77: 1070-1077

Corona, E. "Dendrocronologia: principi e applicazioni." Atti del seminario "Dendrocronologia, principi e applicazioni"(Verona, 14 e 15 novembre), Verona (1984): 7-32.

Chiba Y. (2000). Modeling stem breakage caused by typhoon in plantation *Cryptomeria japonica* forests. *Forest Ecology and Management* 135: 123–131.

Coutts M.P. (1986). Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry* 59: 173–197.

Cullen S. (2002). Trees and wind: wind scales and speeds. *Journal of Arboriculture* 28: 237–242.

Dawson L.A., Grayston S.J. e Paterson E. (2000). Effects of grazing on the roots and rhizosphere of grasses. In: Lemaire G., Hodgson J., de Moraes A., Nabinger C. e Carvalho F. (eds.), *Grassland ecophysiology and grazing ecology*, 61–84. CAB International 2000, Wallingford, Oxon, UK.

De Klerk G.-J., Van Der Krieken W. e De Jong J.C. (1999). The formation of adventitious roots: new concepts, new possibilities. *In Vitro Cellular and Developmental Biology–Plant* 35: 189–199.

Dell B., Kuo J. e Thomson G.J. (1980). Development of proteoid roots in *Hakea obliqua* R. Br. (Proteaceae) grown in water culture. *Australian Journal of Botany* 28: 27–37.

Drew M.C. (1975). Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. *New Phytologist* 75: 479–490.

Enquist B.J. 2002. Universalscaling in three vascular plant allometry: toward a general quantitative theory linking form and functions from cells to ecosystems. *Tree Physiology* 22: 1045-1064

Enquist B.J. 2003. Cope Rule and evolution of long distance transport in vascular plant: allometric scaling biomasspartitioning and optimization. *Plant Cell and Environment* 26: 151-161

Esau K. (1940). Developmental anatomy of the fleshy storage organ of *Daucus carota*. *Hilgardia* 13: 175–226.

Esau K. (1965). *Plant anatomy*, 2nd ed. John Wiley and Sons, New York, New York, USA.

Escamilla J.A. e Comenford N.B. (2000). Phosphorous and potassium uptake by woody roots of twelve-year-old slash pine trees. *Forest Ecology and Management* 129: 153–166.

European Committee for Standardization (2005). *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions*. EN 1991-1-4 : 2005.

Fahey T.J. e Hughes J.W. (1994). Fine-root dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest. *Journal of Ecology* 82: 533–548.

Fahn A. (1990). *Plant anatomy*. Pergamon Press, Oxford, UK.

Fernandez G. (1999). *La parola agli alberi*. Claudio Gallone Editore – Milano

Ferretti M, Cenni E, Cozzi A. 1994. Indagini sulle condizioni dei boschi. Coerenza e confrontabilità dei dati sulla trasparenza delle chiome degli alberi in Italia [Lombardia]. *Monti e Boschi agri.fao.org*

Fini A. (2011). Le micorrize: tipi e funzioni. *Il Verde Editoriale*, Milano ACER 4: 95–97.

Fini A. e Sani L. (2011, 2012). La valutazione di stabilità degli alberi. *ACER* 1/2011 43-47, *ACER* 5/12 87-89, *ACER* 6/2012 75–76.

Flesh T.K. e Wilson J.D. (1999). Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. II. Relating measured tree sway to wind statistics. *Agricultural and Forest Meteorology* 93: 243–258.

Foret G., Soulimani A.A., Laurecot J.L. e Boussat H. (1999). A software for the evaluation of the wind stability of trees: CILVA. *International Symposium on Urban Tree Health. ISHS Acta Horticulturae* 496. ?

Franco A.C. e Nobel P.S. (1990). Influence of root distribution and growth on predicted water-uptake and interspecific competition. *Oecologia* 82: 151–157.

Fraser A.I. (1962). The soil and roots as factors in tree stability. *Forestry* 35: 117–127.

Fredericksen T.S., Hedden R.L. e Williams S.A. (1993). Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress. *Canadian Journal of Forestry Research* 23: 1760–1765.

Frey-Klett, P., Garbaye, J. A., & Tarkka, M. (2007). The mycorrhiza helper bacteria revisited. *New Phytologist*, 176(1), 22-36.

Gaffrey D. e Kniemeier O. (2002). The elasto-mechanical behaviour of Douglas fir, its sensitivity to tree-specific properties, wind and snow loads and implications for stability - a simulation study. *Journal of Forest Science* 2: 49–69.

Gardiner B.A. (1995). The interactions of wind and tree movement in forest canopies. In: Coutts M.P. e Grace J., *Wind and Trees*. Cambridge University Press. Cambridge.

Gardiner B.A., Peltola H. e Kellomaki S. (2000). Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling* 129: 1–23.

Gardiner B.A. e Quine C.P. (2000). Management of forest to reduce the risk of abiotic damage – a review with particular reference to the effects of strong wind. *Forest Ecology and Management* 135: 261–277.

Gardiner B.A., Stacey G.R., Belcher R.E. e Wood C.J. (1997). Field and wind tunnel assessment of the implication of respacing and thinning for tree stability. *Forestry* 70: 233–252.

Garbaye, J. (1994). Tansley review no. 76 helper bacteria: a new dimension to the mycorrhizal symbiosis. *New phytologist*, 128(2), 197-210.

Gill R.A. e Jackson R.B. (2000). Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147: 13–31.

Gilman E., 2005. Department of Environmental Horticulture University of Florida  
<http://hort.ufl.edu/woody/planting>

Gromcke C. e Ruck B. (2008). Aerodynamic modeling of trees for small-scale wind tunnel studies. *Forestry* 81: 243–258.

Gross G. (1987). A numerical study of the airflow within and around a single trees. *Boundary-Layer Meteorology* 40: 311–327.

Guitard D.G.E. e Castera P. (1995). Experimental analysis and mechanical modeling of wind-induced tree sways. In: Coutts M.P. e Grace J., *Wind and Trees*. Cambridge University Press. Cambridge.

Haissig B.E., Davis T.D. e Riemenschneider D.E. (1992). Researching the controls of adventitious rooting. *Physiologia Plantarum* 84: 310–317.

Haller J.M. (1990). Aerodynamic features of the tree. *Journal of Arboriculture* 16: 244–252.

Hassinen A., Lemettinen M., Peltola H., Kellomaki D. e Gardiner B.A. (1998). A prism based system for monitoring the swaying of trees under wind loading. *Agricultural and Forest Meteorology* 90: 187–194.

Hayes E. (2001). *Evaluating tree defects*. Safetrees. Rochester, NY.

Hayward H.E. (1938). *The structure of economic plants*. Macmillan, New York, New York, USA.

Hedden R.L., Fredricksen T.S. e Williams S.A. (1995). Modelling the effect of crown shedding and streamlining on the survival of loblolly pine exposed to acute wind. *Canadian Journal of Forestry Research* 25: 704–712.

Holbo H.R., Colbett T.C. e Horton P.J. (1980). Aeromechanical behavior of selected Douglas-fir. *Agricultural Meteorology* 21: 81–91.

Huck M.G., Hoogenboom G. e Peterson C.M. (1987). Soybean root senescence under drought stress. In: Taylor H.M. (Eds.), *Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics*, 109–121. American Society of Agronomy Special Publication no. 50. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Hutchison K.W., Singer P.B., Mcinnis S., Diaz-Salaz C. e Greenwood M.S. (1999). Expansins are conserved in conifers and expressed in hypocotyls in response to exogenous auxin. *Plant Physiology* 120: 827–831.

Jackson M.B. (1986). *New root formation in plants and cuttings*. M. Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands.

Jackson M.B. e Drew M.C. (1984). Effects of flooding on growth and metabolism of herbaceous plants. In: Kozlowski T.T. (Eds.), *Flooding and plant growth*, 47–128. *Physiological ecology*. Academic Press, Orlando, Florida, USA.

Jacobs M.R. (1936). The effect of wind on trees. *Australian Forestry* 1: 25–32.

James K.R. (2003). Dynamic loading of trees. *Journal of Arboriculture* 29: 165–171.

James K.R., Haritos N. e Ades P.K. (2006). Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany* 93: 1522–1530.

Johnson A.S. (2001). Drag, drafting and mechanical interactions in canopies of the red alga *Chondrus crispus*. *Biological Bulletin* 201: 126–135.

Jones F.R. (1943). Growth and decay of the transient (noncambial) roots of alfalfa. *Journal of the American Society of Agronomy* 35: 625–634.

Kane B. e Clouston P. (2008). Tree pulling tests of large shade trees in the genus *Acer*. *Arboriculture and Urban Forestry*, 34: 101–109.

Kausch W. (1965). Beziehungen zwischen Wurzelwachstum, Transpiration und CO<sub>2</sub>-Gaswechsel bei einigen Kakteen. *Planta* 66: 229–238.

Kerzenmacher T. e Gardiner B. (1998). A mathematical model to describe the dynamic response of a spruce tree to the wind. *Trees* 12: 385–394.

Kevers C., Hausman J.F., Faivre-Rampant O., Evers D. e Gaspar T. (1997). Hormonal control of adventitious rooting: progress and questions. *Journal of Applied Botany* 71: 71–79.

Kozlowski T.T. (1984). Responses of woody plants to flooding. In: Kozlowski T.T. (Eds.), *Flooding and plant growth*, 129–163. *Physiological ecology*. Academic Press, Orlando, Florida, USA.

Kramer P.J. (1983). *Water relations of plants*. Academic Press, New York, New York, USA.

Körner C. 2003 Carbon limitation in trees. *Journal of Ecology*.91: 4-17

Körner C, Asshoff R, Bignucolo O, Hattenschwiler S., Keel S., Pelaez-Ried S. Pepin S. Siegwolf R. Zotz G. 2005. Carbon flux and growth in 8 mature deciduous forest trees exposed to elevated CO<sub>2</sub>. *Science* 309: 1360-1362

Köch G., Sillet S., Jennigs G., Davis S. 2004. The limit to tree height. *Nature* 428: 851-854

Lanner R., Connor K. 2001. Does bristlecane pine senesce? *Experimental Gerontology* 36: 675-685

La Marca O. (2004). *Elementi di Dendrometria*. Pàtron Editrice, Bologna. Pp. 520.

Lauenroth W.K., Sala O.E., Milchunas D.G. e Lathorop R.W. (1987). Root dynamics of *Bouteloua gracilis* during short-term recovery from drought. *Functional Ecology* 1: 117–124.

Lavers G.M. (1969). *The strength properties of timbers*. Forest Products Research Laboratory, Princes Risborough, London, England.

Lobis V., Brudi E., Maresi G. e Ambrosi P. (2002). Valutazione della stabilità degli alberi. Il SIA (Statics Integrated Assessment) ed il metodo SIM (Statics Integrated Method). *Sherwood* 78: 41–46.

Lonsdale D. (1999). *Principles of Tree Hazard Assessment and Management*. Research for Amenity Trees N° 7. Forestry Commission. TSO.

Lundstrom T., Jonas T., Stockli V. e Ammann W. (2007). Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root-soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiology* 27: 1217–1227.

Macfall J.S., Johnson G.A. e Kramer P.J. (1991). Comparative water uptake by roots of different ages in seedlings of loblolly pine (*Pinus taeda*, L.). *New Phytologist* 119: 551–560.

Mattheck C. e Breloer H. (1994). *The body language of trees: a handbook for failure analysis*. Research for amenity trees 4, HMSO, Londra.

Mattheck C. e Breloer H. (1998). La stabilità degli alberi. Fenomeni meccanici e implicazioni legali dei cedimenti degli alberi. Il verde editoriale, Milano.

Mattheck C., Bethge K. e Tesari I. (2006). Shear effect on failure of hollow trees. *Trees – structure and Function* 20: 329–333

Mayer H. (1987). Wind induced tree sways. *Trees* 1: 195–206.

Mayhead G.J. (1973a). Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agricultural Meteorology* 12: 123–130.

Mayhead G.J. (1973b). Sway periods of forest trees. *Scottish Forest* 27: 19–23.

McCulloh K.A. e Sperry J.S. (2005). Pattern in hydraulic architecture and their implication for transport efficiency. *Tree Physiology* 25: 257–267.

Mencuccini M. Martinez-Vitalta J. Vanderklein D., Hamid H., Karataki E., Lee S. Michiels B. 2005 Size mediated ageing reduce vigour in trees. *Ecology Letters* 8: 1183-1190

Meunier S., Ruel J.C., Laflamme G. e Achim A. (2002). Comparative resistance of white spruce and balsam fir to overturning. *Canadian Journal of Forestry Research* 32: 642–652.

Midgley J. 2003. Is bigger better in plants? The hydraulic cost of increasing size in tree: *Trend in Ecology and Evolution*. 18: 5-6

Milne R. (1991). Dynamics of sways *Picea sitchensis*. *Tree Physiology* 9: 383–399.

Milne R. e Blackburn P. (1989). The elasticity and vertical distribution of stress within stems of *Picea sitchensis*. *Tree Physiology* 5: 195–205.

Moore J.R. (2000). Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. *Forest Ecology and Management* 135: 63–71.

Moore J.R. e Gardiner B.A. (2001). The stability of Radiata pine and Douglas-fir in New Zealand. *New Zealand Journal of Forest Science* 31: 208–223.

Moore J.R., Gardiner B.A., Blackburn G.R.A., Brickman A. e Maguire D.A. (2005). An inexpensive instrument to measure the dynamic response of standing trees to wind loading. *Agricultural and Forest Meteorology* 132: 78–83.

Moore J.R. e Maguire D.A. (2004). Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. *Trees* 18: 195–203.

Moore J.R. e Maguire D.A. (2005). Natural sway frequencies and damping ratios of trees: influence of crown structure. *Trees* 19: 363–373.

Motta R, Maunaga Z Berretti R., Castagneri D. 2008 La Riserva forestale di Lom (Repubblica di Bosnia Erzegovina) *Forest@-Journal* [sisef.it](http://sisef.it)

Mosca, E., Montecchio, L., Scattolin, L., & Garbaye, J. (2007). Enzymatic activities of three ectomycorrhizal types of *Quercus robur*/i L. in relation to tree decline and thinning. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(11), 2897-2904.

Nalin G. (1998). “L’ambiente, il paesaggio, il giardino”, lezioni di ecologia, botanica e gestione del verde. F.lli Corradin Ed., Padova.

Nicoll B.C., Achim A., Mochan S. e Gardiner B.A. (2005). Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. *Canadian Journal of Forestry Research* 35: 2360–2367.

Nicoll B.C. e Ray D. (2005). Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. *Tree Physiology* 16: 899–904.

Niklas K.J. (2000). Computing factor of safety against wind-induced tree stem damage. *Journal of Experimental Botany* 51: 797–806.

Niklas K.J. e Spatz H.C. (2000). Wind-induced stresses in cherry trees: evidence against the hypothesis of constant stress levels. *Trees* 14: 230–237.

Niklas K.J., Molina-Freaner F., Tinoco-Ojanguren C. e Paolillo J.R.. (2002). The biomechanics of *Pachycereus pringlei* root systems. *American Journal of Botany* 89: 12–21.

Niklas K.J. e Spatz H.C. (2012). *Plant Physics*. The University of Chicago Press, Chicago.

Niklas K.J. e Speck T. (2001). Evolutionary trends in safety factors against wind-induced stem failure. *American Journal of Botany* 88: 1266–1278.

Nobel P.S. (1988). *Environmental biology of agaves and cacti*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Nobel P.S. (1994). Root-soil responses to water pulses in dry environments. In: Caldwell M.M.e. Pearcy R.W (Eds.), *Exploitation of environmental heterogeneity by plants*, 285–304. Academic Press, San Diego, California, USA.

Nobel P.S. e Sanderson J. (1984). Rectifier-like activities of roots of two desert succulents. *Journal of Experimental Botany* 35: 727–737.

Nola P., Carrer M., Motta R., Urbinati C. (2005). Ricerche dendrologiche dalle Alpi all'Aspromonte - *Informatore Botanico Italiano*, vol. 37.

Norby R.J. e Jackson R.B. (2000). Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist* 147: 3–12.

Oliver H.R. e Mayhead G.J. (1974). Wind measurements in a pine forest during a destructive gale. *Forestry* 47:185–195.

Oliver M.J., Mukherjee I. e Reid D.M. (1994). Alteration in gene expression in hypocotyls of sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings associated with derooting and formation of adventitious root primordia. *Physiologia Plantarum* 90: 481–489.

Paolillo D, Zobel R. 2002. The formation adventitious root on root axes is a widespread occurrence in field-grown dicotyledonous plants. *American Journal of Botany* 89(9): 1361–1372. 2002

Peltola H. (2006). Mechanical stability of trees under static loads. *American Journal of Botany* 83: 1501–1511.

Peltola H. e Kellomäki S. (1993). A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pine at stand edge. *Silva Fennica* 27: 99–111.

Peltola H., Kellomäki S., Hassinen A. e Granander M. (2000). Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 135: 145–153.

Peltola H., Kellomäki S., Hassinen A., Lemettinen M. e Aho J. (1993). Swaying of trees as caused by wind: analysis of field measurements. *Silva Fennica* 27: 113–126.

- Peltola H., Kellomäki S., Vaisanen H. e Ikonen V.P. (1999). A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single tree and stands of Scots pine, Norway spruce and birch. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 647–661.
- Peltola H., Nykänen M.L. e Kellomäki S. (1997). Model computations on the critical combination of snow loading and wind speed for snow damage of Scots pine, Norway spruce and Birch sp. at stand edge. *Forest Ecology and Management* 95: 229–241.
- Petty J.A. e Swain C. (1985). Factors influencing stem breakage of conifers in high wind. *Forestry* 58: 75–85.
- Petty J.A. e Worrel R. (1981). Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow. *Forestry* 54: 115–128.
- Pritchard S.G. e Rogers H.H. (2000). Spatial and temporal deployment of crop roots in CO<sub>2</sub>-enriched environments. *New Phytologist* 147: 55–71.
- Prusinkiewicz P. e Runions A. (2012). Computational models of plant development and form. *New Phytologist* 193: 549–569.
- Reid D.M. e Bradford K.J. (1984). Effects of flooding on hormone relations. In: Kozlowski T.Y. (Eds.), *Flooding and plant growth*, 195–219. *Physiological ecology*. Academic Press, Orlando, Florida, USA.
- Reynolds E.R.C. (1975). Tree rootlets and their distribution. In: Torrey J.G. e Clarkson D.T. (Eds.), *The development and function of roots*, 163– 177. Academic Press, London, UK.
- Rudnicki M., Mitchell S.J. e Novak M.D. (2004). Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for three conifer species. *Canadian Journal of Forestry Research* 34: 666–676.

Rudnicki M., Silins U., Liefferd V.J. e Josi G. (2001). Measure of simultaneous tree sways and estimation of crown interaction among a group of trees. *Trees* 15: 83–90.

Saboki E., Usha K. e Singh B. (2012). Pathogenesis Related (PR) Proteins in Plant Defense Mechanism. In: Méndez-Vilas A., *Science against microbial pathogens: communicating current research and technological advances*. Formatex Research Center, pubblicato online.

Sani L. (2008a). Valutazione integrata dell'albero. Manuale ad uso pratico per il rilevamento delle condizioni vegetative, fitosanitarie e di stabilità degli alberi in ambito urbano. Nicomp L.E., Firenze.

Sani L. (2008b). Valutare il carico aggiuntivo della neve su un albero. *Arbor* 24: 37–40.

Sani L. (2009). Che aria tira. *Acer* 1: 47–51.

Sani L. (2011a). Non c'è due senza tre. *Acer* 1: 43–47.

Sani L. (2011b). Valutazione di stabilità degli alberi. Approccio metodologico all'analisi strumentale. *Sherwood* 179: 17–22.

Sani L., Lisci R., Moschi M., Sarri D., Rimediotti M., Vieri M. e Tofanelli S. (2012). Preliminary experiments and verification of controlled pulling tests for tree stability assessment in Mediterranean urban areas. *Biosystems Engineering* 112: 218–226.

Saunderson S.E.T., England A.H. e Baker C.J. (1999). A dynamic model of the behaviour of Sitka spruce in high winds. *Journal of Theoretical Biology* 200: 249–259.

Scattolin, L., Montecchio, L., Mosca, E., & Agerer, R. (2008). Vertical distribution of the ectomycorrhizal community in the top soil of Norway spruce stands. *European journal of forest research*, 127(5), 347-357.

Sellier D., Brunet Y. e Fourcaud T. (2008). A numerical model of tree aerodynamic response to a turbulent airflow. *Forestry* 81: 279–296.

Sellier D. e Fourcaud T. (2005). A mechanical analysis of the relationship between free oscillation of *Pinus pinaster* Ait. saplings and their aerial architecture. *Journal of Experimental Botany* 56: 1563–1573.

Shigo A.L. (1989a). A new tree biology.

Shigo A.L. (1989b). *New Tree Health*.

Shigo A.L. (1989c). *Trees pruning: a worldwide photo guide*. Shigo and Trees Associates, Durham, NH.

Shigo A.L. (1991). *La moderna arboricoltura, compendio, uno studio dei sistemi di cura degli alberi e dei loro associati*. ISA Italia, Varese.

Sighicelli, M. (2010). Impatto degli stress biotici e abiotici sulla risposta fotochimica delle piante: analisi d'immagine dell'emissione di fluorescenza della clorofilla.

Smucker A.J.M. (1993). Soil environment modifications of root dynamics and measurement. *Annual Review of Phytopathology* 31: 191–216.

Shigo A, Marx H, Carroll D-1977. Compartmentalization of decay in trees - [arbtalk.co.uk](http://arbtalk.co.uk)

Shigo A. 1986 -new tree biology: facts, photos, and philosophies on trees and their problems and proper care. [cabdirect.org](http://cabdirect.org)

Shigo A - 1991 Modern arboriculture: a systems approach to the care of trees and their associates.- [cabdirect.org](http://cabdirect.org)

Shinozaki K, Yoda K, Hozumi K, Kira 1964. A quantitative analysis of plant form—the pipe model theory: I. Basic Analyses [ci.nii.ac.jp](http://ci.nii.ac.jp)

Snapp S.S. e Shennan C. (1992). Salinity effects on root growth and death dynamics of *Lycopersicon esculentum*. *New Phytologist* 121: 71–79.

Soltis D.E., Soltis P.S., Chase M.W., Mort M.E., Albach D.C., Zanis M., Savolainen V., Hahn W.H., Hoot S.B., Fay M.F., Axtell M., Swensen S.M., Prince L.M., Kress W.J., Nixon K.C. e Farris J.S. (2000). Angiosperm phylogeny inferred from 18S rDNA, rbcL, and atpB sequences. *Botanical Journal of the Linnean Society* 133: 381–461.

Spatz H.C. e Bruechert F. (2000) - Basic biomechanics of self-supporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree. *Forest Ecology and Management* 135: 33–44.

Sterck F.J. e Bongers F. (1998). Ontogenetic changes in size, allometry and mechanical design of tropical rain forest trees. *American Journal of Botany* 85: 266–272.

Terzaghi K. e Peck R.B. (1984). *Geotecnica*. Utet, Torino.

Thibault M. (1946). Contribution à l'étude des racines de carotte. *Revue Generale de Botanique* 53: 434–460.

Tomazello Filho, M., Botosso, P. C., & Lisi, C. S. (2001). Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. *Indicadores Ambientais: Conceitos e Aplicações*. EDUC, COMPED, INEP, São Paulo, 117-143.

Von Guttenberg H. (1941). Der primäre Bau der Gymnospermenwurtzel. In: Linsbauer K., Tischler G. e Pascher A. (Eds.), *Handbuch der Pflanzenanatomie*. Band 8. II. Abteilung, 3. Teil: Samenpflanzen. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Germany.

Walters D. e Heil M. (2007). Costs and trade-offs associated with induced resistance. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 71, 3–17.

Warning W.C. (1934). Anatomy of the vegetative organs of the parsnip. *Botanical Gazette* 96: 44–72.

Watson G. (2008). Discoloration and decay in severed tree roots. *Arboriculture and Urban Forestry* 34: 260-264.

Weinhold L. (1967). Histogenetische Studien zum Grenzwurzelproblem. *Beiträge zur Biologie der Pflanzen* 43: 367–454.

Wessoly L. e Erb M. (1998). *Baum Statik, Baum Kontrolle*. Patzer Verlag., Berlin - Hannover.

West G. Brown J. Enquist B. 1999. A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature* 400: 664-667

Wilcox H.E. (1955). Regeneration of injured root systems in noble fir. *Botanical Gazette* 116: 221–234.

Wilcox H.E. (1968). Morphological studies of root of red pine *Pinus resinosa*. I. Growth characteristics and patterns of branching. *American Journal of Botany* 55: 247–254.

Wood C.J. (1995). Understanding wind forces on trees. In: Coutts M.P. e Grace J., *Wind and trees*. Cambridge University Press, Cambridge. Pp. 133–164.

Tyree M. Ewers F. 1991 *The hydraulic architecture of trees and other woody plants* *New Phytologist*,

Zucconi L. (2003). *Declino del suolo e stanchezza del terreno*. Pitagora ed. Bologna, Bologna.