



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI SASSARI**



**FACOLTA' DI AGRARIA**

**DIPARTIMENTO DI ECONOMIA E SISTEMI ARBOREI**

**DOTTORATO DI RICERCA IN  
"AGROMETEOROLOGIA ED ECOFISIOLOGIA  
DEI SISTEMI AGRARI E FORESTALI"**

**XX CICLO**

**INFLUENZE AMBIENTALI SULL'ACCRESIMENTO RADIALE  
NELLA QUERCIA DA SUGHERO**

**Coordinatore:  
Chiar.mo Prof. Pietro Deidda**

**Dottorando:  
Dott. Giovanni Deplano**

**Docenti Guida:  
Prof. Sandro Dettori  
Dott. Luigi Sedda**

**ANNO ACCADEMICO 2007-2008**

## Riassunto

Le conoscenze sull'accrescimento radiale della quercia da sughero, e in particolare sulla componente legnosa, e sull'influenza che su di esso esercita l'ambiente, sono scarse e, in genere, riconducibili ad ambienti iberici. Di contro, molto più numerosi risultano le ricerche e le informazioni sull'accrescimento del sughero e sui rapporti tra condizioni stazionali e qualità dello stesso. La maggior parte degli studi utilizza la correlazione tra l'accrescimento annuale e l'andamento termo pluviometrico di stazioni meteorologiche, mentre pochi sono quelli che lo mettono in relazione con i dati telerilevati da satelliti di seconda generazione.

Dunque questo studio si inserisce in un contesto poco esplorato. Lo scopo è stato quello di contribuire alle conoscenze degli effetti degli andamenti climatici sul sistema sughereta e fornire una base per delle ipotesi di modelli previsionali dell'accrescimento legnoso, anche allo scopo di sviluppare una metodica di riferimento e di facile ripetibilità.

Si sono, inoltre, stimata la dipendenza spazio-temporale del dato (accrescimento radiale del legno) e si è sviluppato un modello spazio-temporale che potrà essere successivamente utilizzato per la simulazione dei processi naturali.

Lo studio si è svolto nel quadriennio 2005 – 2008, periodo in cui sono state raccolte informazioni sulla distribuzione dei popolamenti di sughera e la disponibilità di dati climatici. Infine, definita l'area vocata allo studio, si è proceduto con la misurazione delle grandezze in esame; su queste si è effettuata l'analisi statistica e la simulazione previsionale per il periodo 2002 – 2007.

L'area di studio si trova in Sardegna (settore centrale), nei comuni di Nuoro e Benetutti, in località Sa Serra. Le coordinate del rettangolo che ne definisce i confini sono rappresentate dai punti Xmin (517'885 m) Xmax (520'885 m) Ymax (4'473'370 m) Ymin (4'470'370 m) WGS 1984 UTM Zone 32 Nord, che include una superficie totale di 9 Km<sup>2</sup> per l'analisi statistica, e di 25 Km<sup>2</sup> per la simulazione. Le quote sono comprese tra un minimo di 464 m e un massimo di 812 m s.l.m., con un'altitudine media di 725 m.

L'area ricade completamente in un complesso magmatico ercinico. I Suoli dominanti sono quelli derivanti dalla matrice granitica. In prevalenza l'area di studio è interessata da pendenze inferiori al 50%, la maggior parte della superficie -il 53%- è compresa tra il 6 e il 15%, seguito da pendenze tra il 15 e il 30%.

La struttura orizzontale e verticale delle foreste di sughera di Sa Serra denota che queste sugherete comprendono popolamenti in diverse fasi di sviluppo, dal novelleto alla perticaia, con un'importante presenza di popolamenti in fase giovanile.

Nei quattro anni di studio sono state rilevate le dimensioni di singoli individui, con diametri a petto d'uomo tra i 15 cm e i 30 cm, quali altezza, diametro a 1,30 m, dimensioni della chioma, incrementi legnosi annuali, spessore del sughero.

L'analisi statistica per la creazione di un modello predittivo degli incrementi legnosi per un'area di Sa Serra (Nuoro) ha compreso: la classificazione di alcune delle variabili statistiche (i valori dendro-ipsometrici per ogni pianta); il trattamento delle immagini satellitari MODIS per l'estrazione delle medie spazio-temporali relative a temperatura al suolo, contenuto di acqua e massa vegetazionale; la definizione dei campioni con alto errore (le piante per le quali la lettura degli incrementi ha una bassa accuratezza); simulazione Annealing per l'ottimizzazione del modello (selezione delle variabili) e dei dati (correzione dei valori affetti da alta incertezza).

Lo stesso modello ma riparametrizzato è stato utilizzato per produrre le previsioni per un'area vasta.

Utilizzando la correlazione di Pearson si è verificato che solo alcune piante presentano una correlazione significativa e superiore a 0.7 con alcuni dei parametri ambientali riferenti alla temperatura. Questo è determinato da un'alta variabilità tra pianta e pianta in parte compensata dal dato mediato infatti: la media degli incrementi per tutte le piante ha prodotto correlazioni significative con tutte le variabili legate alla temperatura pari a 0.83 con la media delle minime di Bitti; 0.90 con la media delle minime di Nuoro; 0.90 con la media delle massime di Bitti; e infine 0.75 con la media delle massime di Nuoro.

L'analisi della correlazione di Pearson dimostra che su larga scala gli incrementi medi di un campione di piante sono strettamente legati all'andamento termometrico. Singolarmente (per ogni pianta) questo legame è meno evidente, probabilmente per l'effetto prevalente dei fattori locali che non possono essere analizzati con statistiche classiche ma richiedono metodologie più complesse e informazioni ad alta risoluzione spaziale e temporale.

Le analisi con tecniche geostatistiche hanno portato a verificare che vi è una chiara correlazione con il contenuto di acqua del suolo, della temperatura diurna, e della biomassa (vigore vegetativo). Mentre gli incrementi sono correlati negativamente con le temperature notturne e l'Enhanced Vegetation Index. Il modello predittivo ha

permesso, infine, la produzione di mappe degli incrementi legnosi in scala annuale, biennale, e cumulativa (tutti gli anni).

E' di sicuro interesse quello che è accaduto nei quadranti sud-ovest e nord-est e in generale in tutta l'area. Infatti si può ben osservare, soprattutto nel quadrante sud-ovest, si ha un incremento generale degli accrescimenti legnosi che non sembra essere legato a particolari trend climatici. Le mappe biennali di incremento legnoso evidenziano un secondo effetto, quello di una sorta di ciclicità. Infatti si osserva che nel primo biennio considerato (2002 – 2003) l'area a sud-ovest era in fase di aumento degli incrementi. L'opposto si verifica nei due anni successivi (2004 – 2005), per poi riesplodere durante il biennio 2006 – 2007, il cui effetto medio è superiore a quello dei singoli anni. Gli effetti complessivi delle mappe per i 6 anni considerati, confermano l'aumento degli incrementi legnosi nel settore sud, di ordine inferiore rispetto a quello delle singole mappe annuali e biennali.

## Abstract

*The knowledge of the radial growth of the cork oak, particularly the wood component, and the influence the environment has on it, are incomplete and, generally, refer to the Iberian area. On the contrary, a lot of information and researches can be found on the growth of the cork and on the relationship between local conditions and quality of the same. Most studies use the correlation between the annual growth and the thermo-pluviometric trend of weather stations. Only few studies connect the annual growth with second generation remote sensing data.*

*This study can well be inserted in a context that has almost been unexplored. The purpose of it is to contribute to the knowledge of the effects of the climatic trends on the cork oak system and to furnish a base for hypotheses of prediction models related to the wood growth. It is also intended to develop a methodology of reference and of easy repeatability.*

*We also think to assess the space and time dependence of the data (radial wood growth) and to develop space-temporal models that can subsequently be used for the simulation of the natural process.*

*The study refers to the four-year period 2005 - 2008, during which the information on the distribution of the cork oak and the availability of climatic data has been collected. Defined the area of the study, we proceeded with the measurement of the data and with the statistic analysis and the prediction simulation.*

*The area of the study is located in the centre of Sardinia, in the municipal territories of Nuoro and Benetutti, called "Sa Serra". The area have vertices coordinates  $X_{min}$  (517'885 m)  $X_{max}$  (520'885 m)  $Y_{max}$  (4'473'370 m)  $Y_{min}$  (4'470'370 m) WGS 1984 UTM Zone 32 North, and covers an overall surface of 9 square kilometres for the statistic analysis and of 25 square kilometres for the simulation. The altitude ranges between a minimum of 464 and a maximum of 812 metres, with an average elevation of 725 metres.*

*The area is entirely located in a magmatic Hercynian complex. The dominant soil is originated by the granite matrix. For the most part the area of study is characterized by slopes below 50%. Most of the area - 53% - has an incline between 6 and 15%, followed by slopes between 15 and 30%.*

*The horizontal and vertical structure of the cork oak forest of "Sa Serra" includes different phases of development, from the early forest up to the phase of the pole forest with many groups of trees in a juvenile phase.*

*During the four years of study we have collected the measures of trees with diameter at breast height between 15 and 30 centimetres. We have surveyed their height, their diameter at 1.30 metres, the dimension of their crown, the annual increase of their wood and the thickness of their cork.*

*The statistic analysis has concerned: i) the classification of the statistic variables (the dendro-ipsometric values for every tree); ii) the treatment of the satellite images MODIS for the extraction of space- temporal variables related to temperatures at ground level, the water content and the mass vegetation; iii) the definition of the samples with a high possibility of error (the trees whose readings of increases has a low accuracy); iii) Annealing simulation for the optimization of the model (selection of the variables) and of data (correction of the values with high uncertainty).*

*A new model with different parameters (indicators) has been used to create the prediction model; ending we have made predictions for a vast area.*

*Using the Pearson correlation we have established that only some trees have a high correlation ( $>0.7$ ) with some of the environment parameters referable to the temperature. This is confirmed and mostly highlighted in the general data element, where the average of the increases for all the trees has produced high correlations with all the variables tied up with the temperature:*

*0.83 with the average of the lowest temperatures in Bitti;*

*0.90 with the average of the lowest ones in Nuoro;*

*0.90 with the average of the highest temperatures in Bitti;*

*0.75 with the average of the highest in Nuoro.*

*The analysis of the Pearson correlation of shows that, on a wide scale, the average increases of a sample group of trees are tightly tied to thermometric trend. This fact is less evident in relation to every single tree probably because of the prevailing effect of local factors that have been traced with more complex statistic methodologies applied to high-resolution space data.*

*The analysis with geo-statistics technique has brought to verify that there is a clear correlation with the content of water in the soil, with the daytime temperature, and with the biomass (vegetative vigor). While the increases, on the other hand, are negatively correlated with the night-temperatures and the Enhanced Vegetation Index. The results of the simulations have brought, finally, to the possibility to build prediction maps with annual, biennial and (combined) cumulative scale.*

*It is of sure interest what has happened in southwest and northeast zones and in general in the whole area. We can clearly observe a general increase of the wood*

*growth, especially in the southwest zone and the fact that this course doesn't seem to be tied up to particular climatic trends. The biennial maps of wood increase highlight a second effect, a sort of cyclicity. In fact we have observed that, in the first two years of the study (2002 - 2003) the southwest area was in a phase of rising of the increases. The opposite occurs in the two following years (2004 - 2005), and then it explodes again during the following two years (2006 – 2007), whose average effect is superior to that of the single years. The overall effects of the maps for the six considered years, confirm the rising of the wood increases in the south sector, of lower grade in comparison to that of the single annual and biennial maps.*

## INDICE

Riassunto.....	I
Abstract.....	IV
INDICE.....	VII
Premessa .....	1
FONDAMENTI TEORICI .....	2
Clima e crescita.....	2
Accrescimento longitudinale e diametrale.....	3
Gli anelli legnosi.....	6
Gli anelli legnosi delle querce .....	10
La misura degli incrementi nella crescita .....	11
La dendrocronologia.....	13
Il MODIS .....	15
L'analisi geostatistica: dipendenza spaziale dei dati rilevati .....	17
La teoria delle variabili regionalizzate.....	18
GLI ATTORI DELLA RICERCA.....	22
La quercia da sughero ( <i>Quercus suber</i> L.) .....	22
La Selvicoltura e la gestione delle foreste di quercia da sughero.....	24
Patologie della sughera e infestazioni entomatiche .....	27
Autoecologia della sughera.....	29
L'accrescimento nella quercia da sughero .....	31
L'AREA DI STUDIO: SA SERRA (NU) .....	33
La localizzazione .....	33
Geologia e pedologia .....	34
Pendenza .....	34
Il clima .....	34
Struttura del bosco .....	35
FINALITÀ E SUPPORTO DELLA RICERCA.....	37
MATERIALI E METODI .....	38
Struttura concettuale della ricerca.....	38
Struttura sperimentale della ricerca .....	38
La raccolta dei dati.....	39
La qualità e le caratteristiche dei dati .....	40
Scelta dell'area di studio.....	40
Metodo per la scelta dei punti.....	41
Selezione degli alberi candidati all'estrazione delle carote legnose.....	42
Prelievo, trattamento e lettura dei campioni .....	44
Analisi statistica.....	46
RISULTATI.....	54
Correlazione con dati SAR .....	54
L'autocorrelazione spazio-temporale .....	55
Correlazione con dati climatici ad alta risoluzione. I – Simulazione Annealing.....	59
Correlazione con dati climatici ad alta risoluzione. II – Modellizzazione. ....	61
Correlazione con dati climatici ad alta risoluzione. III – Predizioni. ....	62
DISCUSSIONI.....	69
CONCLUSIONI .....	72
<i>Ringraziamenti</i> .....	75
BIBLIOGRAFIA .....	76

VII



## **Premessa**

Lo studio è incentrato sull'influenza di diversi fattori ambientali sull'accrescimento radiale del fusto nella quercia da sughero.

Allo stato attuale sono ancora poche le ricerche riguardanti l'accrescimento del legno, mentre più numerose sono quelle sull'accrescimento e la qualità del sughero, che rappresenta l'80% della ricchezza prodotta da questa foresta quercina (Rossellò, 2006). Ancor meno sono quelle svolte nell'ambiente sardo.

In Sardegna la specie trova le condizioni più xeriche del suo areale, contesto che determina un accrescimento lento sia del legno che del sughero, ma con elevata qualità di quest'ultimo.

In letteratura sono riportati, per l'ambiente sardo, incrementi medi annui del legno compresi tra 4 e 8.4 mm, con elevata eterogeneità interannuale negli accrescimenti presumibilmente da imputarsi alla variabilità delle condizioni climatiche e, nei popolamenti attorno ai 30-40 anni, anche agli interventi selvicolturali (diradamenti). I valori più elevati si verificano in impianti con condizioni stazionali idonee e condotti con tecniche colturali intensive.

Gli accrescimenti medi annui del sughero variano tra i 3-4 mm, al primo anno, per mantenersi prossimi ai 2 mm nella parte finale del turno (9°-10° anno), denotando un andamento decrescente degli incrementi con rallentamento, o arresto, e conseguente formazione di uno strato di sughero più sottile e scuro.

Il presupposto dello studio è che per diverse classi di sviluppo le risposte degli accrescimenti radiali di legno e sughero siano differenti e che questi siano influenzati anche dalle condizioni climatiche locali.

Da notare che gli studi precedenti si sono concentrati sulla correlazione con i dati climatici, derivanti da stazioni termo pluviometriche di tipo tradizionale, mentre pochi sono gli studi che hanno un approccio con dati telerilevati.

L'obiettivo di questo studio è quello di descrivere la struttura spazio-temporale degli accrescimenti legnosi e di quantificare il suo contributo nella varianza totale del processo di accrescimento alla scala spaziale considerata.

## FONDAMENTI TEORICI

### Clima e crescita

A seconda delle condizioni ambientali le piante possono presentare numerosi e diversi adattamenti, temporanei o permanenti, di natura funzionale o morfologica, che possono influenzare sia l'aspetto dell'albero che dell'intero popolamento. Tra gli adattamenti più frequentemente osservati vi è l'intermittenza della crescita.

Le specie legnose poliennali di ambienti non tropicali manifestano la propria discontinuità con l'interruzione della crescita in alcuni periodi dell'anno.

La ciclicità nella crescita, legata alle modificazioni climatiche delle stagioni, è nata probabilmente come adattamento delle piante alle modificazioni ambientali ed è divenuta un modello evolutivo fortemente competitivo che ne ha determinato la diffusione.

Ne risulta che, rispetto a un modello di crescita lenta e continua presente in altre ere geologiche e oggi rinvenibile principalmente negli ambienti tropicali, uno sviluppo rapido e efficace durante le stagioni favorevoli con accumulo di sostanze di riserva che sosterranno la successiva crescita, alternato a un periodo di riposo, è risultato essere un "modello vincente".

La periodicità della crescita può essere modulata, nella sua espressione, dalle condizioni ambientali ma rimane sempre soggetta al controllo genetico. In molte specie le piante allevate in camera climatizzata con condizioni costanti e ottimali di luce, temperatura ecc., non crescono in modo continuo ma intermittente, alternando periodi di crescita e periodi di riposo. Geneticamente fissati sono i meccanismi di percezione, riconoscimento e misura quantitativa dei parametri ambientali (temperatura, fotoperiodo) che caratterizzano le diverse stagioni. Questi meccanismi consentono alle piante di sincronizzare le fasi del proprio ciclo biologico con il succedersi delle stagioni.

## Accrescimento longitudinale e diametrale

Al di fuori della fascia tropicale, l'arrivo della primavera segna l'inizio dell'attività vegetativa della pianta, processo controllato da meccanismi molto precisi: si ha la riattivazione dei due meristemi dell'albero: quello apicale (contenuto nelle gemme) e quello laterale (il cambio).

Il primo determina l'allungamento longitudinale del fusto con la distensione degli internodi e l'espansione delle bozze fogliari, il secondo la crescita diametrale, con la produzione di nuovi tessuti conduttori sia della porzione epigea che ipogea. Quest'ultima, in realtà, può attivarsi già dalla fine dell'inverno e da essa parte lo stimolo ormonale che mette in moto l'anello cambiale di fusto e rami.

Mentre la riattivazione completa del cambio necessita di tempi lunghi nelle Gimnosperme e nelle Angiosperme con legno a porosità diffusa, potendo protrarsi anche per settimane, nelle Angiosperme con legno a porosità anulare tale processo è molto più rapido, in quanto il cambio sembra che si riattivi simultaneamente in tutta la pianta e che le divisioni cambiali si possano già notare prima della schiusura delle gemme, quando, cioè, la gemma si è riattivata ma le giovani foglioline non sono ancora emerse dalle perule.

Le cause e i meccanismi alla base di questo comportamento non sono ancora stati chiariti, mentre il significato di tale fenomeno sembra essere il seguente: il trasporto della linfa nel legno a porosità anulare è il più veloce che si conosca, grazie all'elevato diametro delle trachee, (elevato alla base e molto ridotto verso l'apice del fusto), le quali, proprio a causa delle dimensioni e della velocità di flusso, sono le più vulnerabili da un punto di vista idraulico. Di conseguenza, è piuttosto comune, in queste specie, che ogni cerchia legnosa funzioni solo per un anno. Una rapida produzione, a primavera, di nuovi elementi conduttori è quindi necessaria per sostenere la crescita di germogli e nuove foglie.

Oltre che attraverso l'espansione delle bozze fogliari e la distensione degli internodi, la crescita longitudinale può realizzarsi attraverso differenti modelli, di cui i seguenti tre sono i più frequenti:

a) *“completamente predeterminato”*, nel senso che i componenti che costituiranno il ramo sono già tutti presenti durante la primavera all'interno della gemma. Il numero medio di bozze fogliari presenti nelle gemme di un albero nel periodo invernale è, in questo caso, pari al numero delle foglie sui rami alla fine della

stagione vegetativa. Nello specifico si verifica una distensione di quanto contenuto a livello abbozzo nella gemma (bozze fogliari e internodi) e si ha la formazione nell'apice di una nuova gemma terminale, con cessazione della crescita longitudinale per quella stagione vegetativa. La gemma apicale è destinata a germogliare e a diventare ramo l'anno successivo (fatta eccezione per le gemme così dette "pronte", che si sviluppano nell'anno di formazione). Le dimensioni finali che il ramo raggiungerà dipenderanno in gran parte dalle condizioni esterne, mentre il numero di "pezzi" (nodi, internodi e foglie) è stato deciso nell'anno di formazione della gemma e non è modificabile. Le specie caratterizzate da questo modello hanno un periodo di accrescimento longitudinale che va da alcune settimane ad alcuni mesi.

b) *"accrescimento longitudinale per flussi successivi"*, dove solo inizialmente la crescita segue le stesse modalità: la gemma diventa ramo e il suo apice riforma una gemma terminale. Dopo un intervallo di tempo di durata diversa nelle varie specie, questa gemma germoglia e diventa ramo, prolungando così il ramo precedente. Nel corso della stessa stagione vegetativa possono susseguirsi diversi flussi successivi di crescita, in genere via via più brevi e di dimensioni minori. Il ramo finale che ne deriverà porterà foglie di età diversa: le foglie basali, relative al primo flusso, hanno addirittura un anno in più delle successive, essendo state impostate nella gemma formatasi l'anno precedente.

c) anche nel terzo tipo, definito *"accrescimento longitudinale non completamente predeterminato"*, la fase iniziale è identica. Ma quando la gemma è diventata ramo, il suo apice meristematico non produce una nuova gemma, come nei due casi precedenti, bensì bozze fogliari che, senza soluzione di continuità, si distendono e diventano foglie adulte (e parallelamente vengono distesi gli internodi). Il ramo si allunga progressivamente per tutta la stagione vegetativa e non per onde successive separate da periodi di stasi, come nel tipo precedente. Anche in questo caso le foglie avranno età diverse a seconda della posizione sul ramo.

Le differenti modalità di accrescimento longitudinale si riflettono sull'attività del cambio. In linea generale, la crescita del primo tipo si accompagna alla formazione di cerchie a porosità anulare, nelle quali il legno primaverile è nettamente distinto dal legno estivo o tardivo. A questa tipologia appartengono le querce sempreverdi.

Il cambio produce legno primaverile nel periodo in cui è attiva la crescita longitudinale e legno tardivo dal momento in cui questa cessa con la formazione della gemma terminale. Questo significa che il cambio lavora per un periodo di tempo molto più lungo dell'apice meristemato (valori indicativi: 8 e 18 settimane rispettivamente per l'apice e il cambio).

Per stimolare la crescita per distensione e le attività di differenziamento agiscono almeno due gruppi di sostanze ormonali: le Auxine (IAA) e le Giberelline (GA), prodotte principalmente a livello dei meristemi in attività, soprattutto nelle giovani foglioline in crescita.

È ipotesi condivisa da molti che nel periodo primaverile le derivate cambiali siano capaci di una forte crescita per distensione (le grosse trachee del legno precoce) come conseguenza della presenza di giovani foglioline in attiva crescita, forti produttrici ed esportatrici di IAA e GA. Il massimo sviluppo di xilema e floema, si ha con la contemporanea presenza di Auxine e Giberelline. Terminato l'accrescimento longitudinale, la produzione di ormoni decresce così come la distensione delle derivate cambiali.

Sicuramente la realtà è un po' più complessa: rispetto alle foglie in crescita, quelle adulte producono quantità nettamente inferiori di ormoni stimolatori e, man mano che invecchiano, iniziano a produrre ormoni inibitori. Ormoni stimolatori e inibitori determinano le caratteristiche del legno, intervenendo sul diametro cellulare (stimolatori) e sullo spessore della parete (inibitori). Molti dati in proposito derivano da ricerche di laboratorio svolte su legno omoxilo, materiale sperimentale più semplice e omogeneo del legno eteroxilo. In condizioni naturali il maggior diametro delle tracheidi primaverili è sempre associato a un minor spessore della parete e viceversa nel legno tardivo. In condizioni sperimentali, variando concentrazione e rapporti degli ormoni stimolatori e inibitori somministrati, è possibile ottenere altre combinazioni, come lume cellulare ampio e parete spessa, lume piccolo e parete sottile.

In piante con accrescimento a flussi successivi dovrebbero formarsi più cerchi legnose nella stessa stagione di crescita. In molte piante l'intervallo fra un flusso e l'altro è abbastanza lungo, ed è accertato almeno nei rami in crescita. E' molto più raro, invece, che queste onde successive di crescita che interessano i rami dell'albero riescano a influenzare anche il tronco, determinandovi la formazione di "false cerchi".

## Gli anelli legnosi

Il legno delle conifere è detto “legno omoxilo” per l’omogeneità degli elementi che lo costituiscono, in gran parte fibrotracheidi, che svolgono sia la funzione di sostegno che di conduzione (Nardi Berti, 2006).

Nelle Conifere si possono distinguere due tipologie di legno. Nel primo si ha una transizione degli anelli netta tra il legno primaverile, o primaticcio, e quello tardivo. Quello primaticcio si forma in primavera e consiste in cellule larghe e ben formate, mentre il legno tardivo si forma da metà o nella tarda estate con cellule piccole dalle pareti inspessite. Questi legni hanno una banda scura (legno tardivo) che separa un anello dall’altro (Fig. 1).

Un secondo tipo di legno è quello in cui la transizione tra legno tardivo e primaverile è graduale; si può, comunque, avere la banda scura del legno tardivo a separare i due anelli consecutivi (Fig. 2).

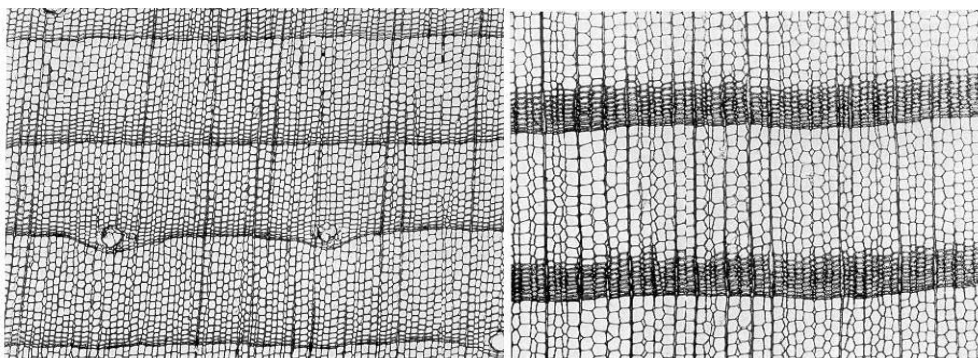


Figura 1

Figura 2

Figura 1 - La foto al microscopio di larice dell’ovest (*Larix occidentalis*) mostra la netta transizione del legno tardivo con la banda scura più netta (da Maeglin, 1979)

Figura 2 - La foto al microscopio di pino strobo (*Pinus strobus*) mostra la graduale transizione del legno tardivo (da Maeglin, 1979)

I legni delle Latifoglie, paragonati a quelli delle conifere, presentano una maggiore varietà nella struttura in quanto si ha una specializzazione delle cellule a svolgere le diverse funzioni -i vasi per la conduzione, le fibre con funzione meccanica, oltre alle cellule parenchimatiche e secrete- ma comunque si ha la stessa divisione dei tipi di anelli di base (Nardi Berti, 2006). Gli alberi con anelli tipici (con anello poroso) sono le querce, l’olmo, il frassino. Questi legni hanno grandi vasi

nel legno primaverile, mentre nel legno tardivo gli stessi appaiono di calibro inferiore (Fig. 3).

L'identificazione delle cerchie in alcune Angiosperme dipende dagli stessi elementi descritti nelle Gimnosperme: la presenza, all'interno della cerchia, di un "legno primaverile", più adatto al trasporto, e di un "legno estivo", a funzione prevalentemente meccanica, di sostegno. Si tratta di legno "eteroxilo" con le trachee (gli elementi più adatti al trasporto) concentrate nel legno primaverile.

I legni con questa struttura vengono detti "a porosità anulare" perché i pori (le trachee) sono localizzati in una sola zona anulare all'interno della cerchia nel legno primaverile. In altre Angiosperme le trachee, così come gli altri tipi cellulari del legno, sono distribuiti uniformemente in tutto lo spessore della cerchia; legni simili vengono detti a "porosità diffusa", in cui i vasi hanno taglia uniforme. Ne consegue che il passaggio tra anello primaticcio e tardivo è molto meno marcato (Fig. 4).

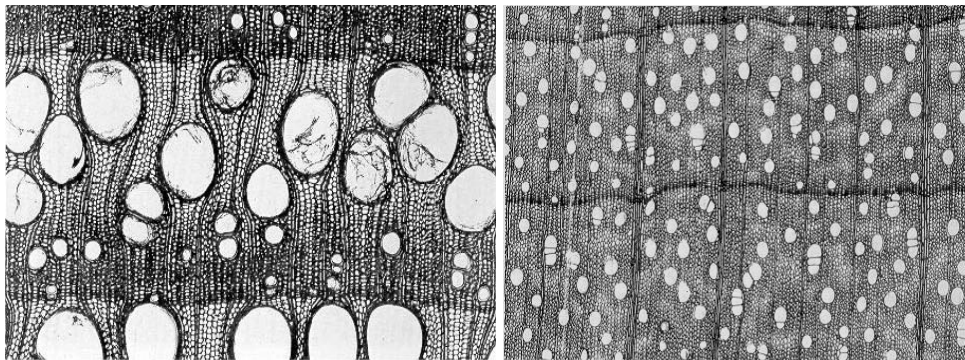


Figura 3

Figura 3 - *Fraxinus transilvanica*, tipico esempio di latifolia ad anelli porosi (Maeglin, 1979)

Figura 4

Figura 4 - Frassino da zucchero (*Acer saccharum*) presenta un legno a porosità diffusa (Maeglin, 1979)

È di fondamentale importanza conoscere le differenze di base per i diversi tipi quando si voglia determinare la crescita degli anelli. In genere nelle conifere con netti anelli di transizione e nelle latifoglie con anello poroso si ha poca difficoltà nella determinazione dell'anello. Maggiori difficoltà si incontrano con le conifere con transizione graduale e nelle latifoglie con anelli porosi diffusi (Maeglin, 1979).

Per riconoscere gli anelli legnosi risulta di fondamentale importanza usare delle tecniche di preparazione dei campioni di cui si riportano alcuni esempi.

Innanzitutto, per una corretta osservazione al microscopio o con la lente di ingrandimento, è necessario ravvivare la superficie di taglio o di estrazione con una lama ben affilata o meglio con una lametta da barba (Nardi Berti, 2006), ma molto

più agevole e veloce per la preparazione delle carote risulta essere la fresatura con carta vetrata da legno con granulometria decrescente (Leal, 2008).

Molte tecniche in passato sono state provate per aiutare a migliorare la visione dei confini degli anelli, il loro conteggio e misurazione. Di seguito se ne riporta un breve elenco in ordine di complessità.

Maeglin (1969) prevede l'applicazione di gesso molle strofinato sul campione e successiva leggera pulizia, una nuova levigazione e lettura con retroilluminazione a luce naturale, usando una lente di ingrandimento.

Vihrov (1959) suggerisce di strofinare con glicerina la carota e di contare immediatamente il numero degli anelli. Per la quercia, il pioppo tremulo e il frassino, raccomanda due o tre trattamenti a 30-40 minuti di intervallo.

Trujillo (1975) afferma che per migliorare la lettura delle carote di pioppo tremulo i campioni devono essere levigati, passati in stufa e asciugati con una soluzione al 4% di pentachlorophenol in kerosene o alcol minerali, quindi passati di nuovo in stufa.

Ostermann (1957) nota che immergendo i campioni di legno di faggio, attentamente levigati, in una soluzione con 6 parti di acido nitrico e 4 parti d'acqua, si registra un miglioramento nel conteggio degli anelli.

Holz (1959) riporta un gran numero di altri possibili trattamenti. Questi includono esposizione della carota di legno a fumi di ammoniaca su una fiamma a luce incandescente; la colorazione del legno e successiva scarificazione con cartavetrata finché si arriva al legno tardivo naturale, dove si osserva che il legno primaticcio ha assunto un colore di tonalità differente; immersioni di breve periodo in acido solforico concentrato seguito da un risciacquo in acqua e successivo ammollo durante la notte in una soluzione al 10 per cento di idrossido di potassio o di sodio. L'ultimo trattamento è particolarmente valido, secondo Holz, per faggio, quercia, betulla, e pioppo. Si ha un miglioramento nella lettura se viene aggiunto alla soluzione del colorante.

Per l'albero della gomma e pioppo giallo (due dei generi più difficili per il conteggio gli anelli), Patterson (1959) descrive un trattamento che prevede phloroglucinol, in una soluzione all'1%, in alcol etilico a 95° e una soluzione al 50% di acido cloridrico. Bisogna immergere prima le carote nel phloroglucinol per 1 minuto, poi nell'acido, approssimativamente per un altro minuto, e poi si sciacqua con acqua. Quando le carote cominciano a diventare rosse bisogna avviare il conteggio o la misurazione, utilizzando una leggera luce fluorescente.



La tecnica più valida e comunque meno dispendiosa, se non si ha a che fare con specie particolari o difficili da leggere, risulta essere quella di una levigatura molto accurata delle superfici di lettura. Per la sughera Leal (2008) suggerisce che può essere più agevole e veloce per la preparazione dei campioni la fresatura con carta vetrata da legno con granulometria decrescente.

Un problema nella fase di lettura può essere dato dalla presenza di “falsi anelli”: quelli tipici si formano quando l'albero si trova in condizioni di stress che determinano la momentanea riduzione della crescita radiale, che riprenderà non appena possibile. Questo causa un cambiamento nell'anatomia di legno che, appunto, forma una sorta di secondo anello annuale. Un altro caso è dovuto alla comparsa di bande che sembrano anelli; ne sono esempi quelli discussi da Beaufait e Nelson (1957) per il *Taxodium distichum* (L.) Rich. (Cipresso Calvo) in cui i falsi anelli possono confondere in fase di sia quando si conta che di misurazione dell'anello.

Dunque modelli di crescita normali danno luogo alla comparsa di cellule di legno tardivo alla fine di un anello annuale, cui segue una separazione netta al passaggio al legno primaverile dell'anello seguente. Un falso anello presenterà una transizione graduale nella dimensione dei vasi, come se fosse del legno tardivo, si avranno vasi di sezione minore nelle più grandi cellule a parete sottile (Fig. 5).

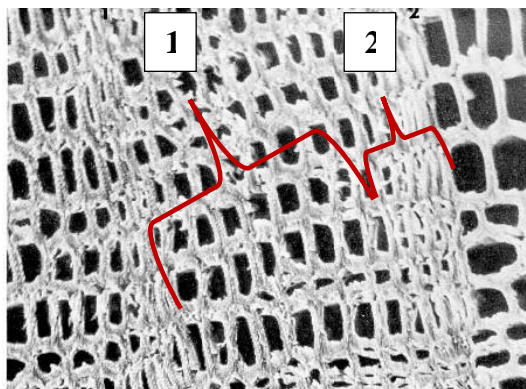


Figura 5 - Falsi anelli in *Juniperus virginiana* (da Maeglin, 1979 modificato)

1 falso anello con cambiamento graduale nelle dimensioni

2 reale confine dell'anello con cambiamento graduale nelle dimensioni; all'esterno si nota la netta transizione con l'anello primaverile

In condizioni di aridità o con alberi sottoposti a stress con crescita molto lenta, si possono avere degli anelli incompleti. Questo avviene quando l'anello non si forma completamente attorno al cilindro dell'albero.

I falsi anelli annuali non possono essere identificati con un solo campione di legno, ma sono necessari diversi campioni.

## **Gli anelli legnosi delle querce**

Le querce presentano legni con raggi midollari multiseriati, grandi, ben visibili a occhio nudo. In base alla struttura del legno possiamo distinguere querce bianche e rosse, entrambe caducifoglie, caratterizzate da un legno ad anello poroso con vasi grandi tipici del legno primaticcio, e querce sempreverdi.

Tra le specie che appartengono alle querce bianche ci sono la Farnia e il Rovere, che presentano un durame di color marrone scuro che scurisce col tempo; hanno vasi primaverili evidenti anche ad occhio nudo, organizzati in un cerchio poroso e grandi raggi che danno luogo, nelle sezioni longitudinali- radiali, alle specchiature (strisce biancastre lucenti). Appartengono a questo primo gruppo anche la Roverella e il Cerro.

Alle querce rosse appartengono specie originarie del Nord America; il legno presenta vasi primaverili di sezione ovale, poche tille e scarsi vasi autunnali, più grossi dei precedenti.

Al terzo gruppo appartengono il leccio e la sughera: il primo presenta un legno caratterizzato da durame rosso bruno e un albarno più chiaro, raggi midollari evidenti e anelli di accrescimento scarsamente distinguibili. (Nardi Berti, 2006). La sughera presenta anelli legnosi privi di anello poroso ben differenziato, molto spesso, caratteristica che ne rende difficile la distinzione, raggi evidenti; il legno primaverile ha vasi di grandi dimensioni che si riducono gradualmente al passaggio verso il legno tardivo, nel successivo anello primaverile i vasi sono da subito ben visibili (Giordano, 1981).

## La misura degli incrementi nella crescita

Abbiamo visto come la semplice conta del numero degli anelli di accrescimento sia una tecnica complessa che richiede un pre-trattamento dei campioni. Ancor più complessa e complicata è la determinazione dello spessore degli anelli, ovvero dell'incremento legnoso annuo, per il quale è in genere necessario l'utilizzo di tecnologie avanzate e costose.

Si usano diversi modi per misurare gli anelli legnosi, sia con metodi semplici che con apparecchiature che ne facilitano il compito: da una semplice riga ai micrometri che danno misure molto accurate e precise.

Per la maggior parte degli scopi è sufficiente avere carote, o rotelle di legno, ben levigate e un righello; l'utilizzo di una lente d'ingrandimento o di un microscopio binoculare può aiutare ad avere una misura abbastanza "soddisfacente" dell'incremento.

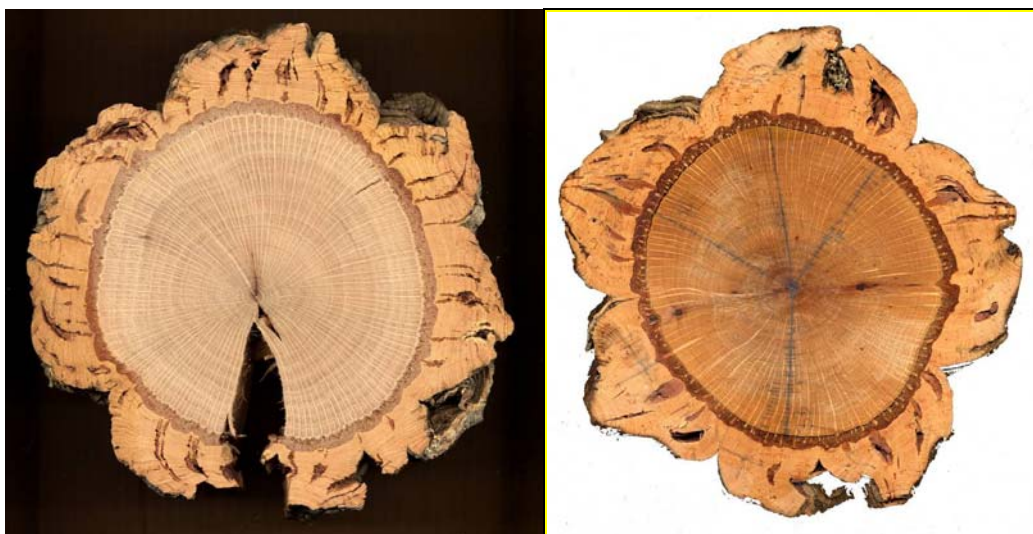


Figura 6 – Sezione trasversale di un fusto di sughera in cui sono evidenti anelli di accrescimento e raggi midollari e, a destra, rotella su cui sono stati conteggiati gli anelli di crescita con righello e lente di ingrandimento

Fra le apparecchiature meccaniche per misurare l'incremento, solamente tre saranno menzionate. La prima è l'Addo-X, un'apparecchiatura fabbricata in Svezia, composta da una piattaforma mobile su un'asta che si sposta passando sotto un microscopio fisso.

L'accuratezza nella misura è di 0.1, 0.2, o 0.01 mm con cambi di passo diversi e ricollocabili (Spurr, 1957).

L'altro strumento è il microscopio “duplice-lineare”. Questa apparecchiatura ha una piattaforma e un microscopio movibili. Entrambi, come con l'Addo-X, si muovono su un'asta accoppiata a un micrometro. Possono essere fatte due misurazioni simultanee. L'accuratezza dell'apparecchiatura è superiore a quella dello strumento precedente e pari a 0.001 mm (Maeglin, 1979).

Uno strumento di recente costruzione è il LinTab (Fig. 7), dotato di una piattaforma mobile che scorre su una barra, e di un microscopio fisso. Possono essere fatte misurazioni molto precise con accuratezza di 0.001 mm; lo strumento è associato a un software che gestisce le letture. Possiede inoltre dei moduli che permettono la *interdatazione*, di cui diremo in seguito, delle letture eseguite (Rinn Tech, 2003); è stato usato recentemente anche in studi sugli accrescimenti legnosi di specie della vegetazione mediterranea (Cherubini et al., 2003).



Figura 7 - LinTab, sistema completo

## La dendrocronologia

Il ramo delle scienze forestali che si occupa dello “studio dei problemi relativi alla determinazione del volume o di altri parametri di alberi in piedi, di boschi o di tronchi atterrati” (AA.VV., 1980) è chiamato dendrometria; una sua particolare applicazione è la dendrocronologia, finalizzata alla datazione di piante o loro parti.

Si basa su uno specifico comportamento biologico, durante la stagione vegetativa (tra la primavera e l'autunno nelle regioni a clima temperato) il fusto delle piante arboree nella parte esterna si accresce in diametro. Il legno primaverile è caratterizzato dalla presenza di vasi di grosso calibro ma dalle pareti sottili, per facilitare il passaggio della linfa, che sostengono la crescita: tale struttura determina una colorazione del legno visibilmente più chiara. Alla fine del periodo vegetativo, con il rallentamento della crescita e la necessità di un maggior sostegno dei tessuti, si sviluppa il legno estivo (o tardivo) che è caratterizzato da vasi con diametro minore e ispessimento delle pareti, per tale ragione si presenta più scuro.

I due tipi di legno sono solitamente ben riconoscibili anche ad occhio nudo e si presentano come una successione di anelli chiari e scuri nella sezione trasversale del tronco. L'ampiezza di tali anelli cambia in relazione a una miriade di fattori, principalmente legati alle variazioni climatiche che si possono presentare nelle stagioni.

Nella Dendrocronologia si assume che alberi della stessa specie, a parità di condizioni climatiche, presentano analoghe variazioni negli spessori anulari corrispondenti ai medesimi anni. È possibile rappresentare graficamente (in diagrammi) le sequenze anulari di diversi anni, organizzate in curve dette dendrocronologiche. I diagrammi di alberi appartenenti alla stessa specie, cresciuti nelle stesse condizioni climatiche e nella stessa area, e vissuti un numero adeguato di anni, possono essere confrontati; tale processo si chiama «interdatazione» (*cross-dating*). Il procedimento permette, attraverso un sistema di concatenazioni successive che utilizzano campioni di legno progressivamente più antichi, di realizzare delle ampie cronologie dette «cronologie standard» (Pezzo, 2006).

Queste ultime servono come punto di riferimento per la datazione di campioni lignei di cui si ignori l'epoca d'origine.

Le specie arboree che meglio si prestano agli studi dendrocronologici sono il pino, l'abete, il larice e le querce (Dorigatti, 1999).

Numerosi lavori riguardanti le tecniche dendrocronologiche hanno utilizzato la standardizzazione per isolare il contributo del clima, rimuovendo tutti quei fattori fuorvianti come la variabilità individuale dell'albero.

Attraverso strumenti statistici è possibile ricavare i dati mancanti delle curve di crescita degli anelli legnosi ottenendo così una curva di riferimento, con cui si possono correggere gli errori delle curve reali (Fritts, 1976).

È possibile ottenere una standardizzazione attraverso l'uso di vari software ad esempio l'ARTSAN. Si è visto che, utilizzando questo software, la curva esponenziale negativa è quella che meglio ha funzionato con gli alberi che provenivano da luoghi aperti dove la crescita è poco disturbata. (Cook e Briffa, 1990b).

Studi recenti hanno usato approcci dendroclimatologici per stimare quali parametri climatici influenzino la crescita di alberi di sughera in produzione, in soprassuoli a bassa densità, utilizzando, come indici statistici, le correlazioni di Pearson (Costa, 2001).

Anche Leal (2008) utilizza le correlazioni di Pearson per analizzare le relazioni tra la cronologia degli anelli legnosi e la serie temporale delle variabili del clima (media temperature mensili e sommatoria delle precipitazioni mensili da settembre dell'anno precedente ad ottobre dell'anno corrente). Nello stesso studio è applicato un modello di regressione lineare per valutare la miglior dipendenza dal clima degli indici studiati.

## II MODIS

Nel descrivere e predire i cambiamenti negli accrescimenti delle specie vegetali può essere necessario monitorare lo stato della vegetazione e studiare alcuni parametri chiave, come ad esempio gli attributi strutturali e funzionali. Essi sono influenzati da molti fattori tra i quali le condizioni microclimatiche, edafiche, e quelle determinate dalla stessa comunità vegetale.

L'analisi delle immagini multispettrali sta assumendo un peso sempre maggiore per lo studio fisionomico strutturale della vegetazione. Per il presente studio è stato scelto l'utilizzo delle immagini satellitari ad alta risoluzione prodotte dall'elaborazione dei segnali raccolti dal MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Il MODIS è un sensore installato su due satelliti della NASA, che ogni giorno percorre vaste porzioni della Terra (cicli di 8 e 16 giorni) fornendo dati con un'alta sensibilità radiometrica (12 bit) in 36 bande spettrali con lunghezze d'onda da 0.4 fino a 14.4  $\mu\text{m}$ : 11 nel visibile, 9 nell'infrarosso vicino (NIR), 4 nell'infrarosso medio (MIR), 6 nell'infrarosso termico (TIR) e 6 nel infrarosso lontano. Le prime due bande (rosso e infrarosso vicino) sono acquisite alla risoluzione nominale di 250 m, le successive 5 bande alla risoluzione di 500 m e, infine, le ultime 29 bande hanno una risoluzione di 1000 m.

In particolare è stato utilizzato il MODIS versione 4, con una risoluzione temporale di 8 giorni e una spaziale di 250 m. I valori della riflettanza sono corretti rimuovendo la distorsione causata dall'angolo della visuale e dalla tessitura della superficie. Altri dati forniti dall'Università del Montana contengono 7 anni di evapotraspirazione stimata con un intervallo di 8 giorni e con 0.5 gradi di risoluzione; il protocollo è stato sviluppato per combinare le informazioni delle stazioni meteorologiche e i prodotti MODIS per la vegetazione (Scharlemann et al., 2008)

Tra gli indici ricavabili dal MODIS, quindi, ci sono la temperatura diurna della superficie (LSTD) e quella notturna (LSTN); l'infrarosso medio associato al contenuto di acqua, (MIR); l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e l'EVI (Enhanced Vegetation Index).

L'indice di vegetazione NDVI (Normalised Difference Vegetation Index; (Tucker, 1979) è l'indice di verde più comunemente usato nel remote sensing. Esso utilizza la radianza (o la riflettanza) del canale del rosso e del canale del NIR attorno ai 860 nm. Il primo è localizzato nella zona di massimo assorbimento della clorofilla, mentre il secondo è localizzato nel plateau di alta riflettanza, dovuto alle componenti

della parete cellulare. L'indice, quindi, è correlato con la presenza (densità) di biomassa verde. L'NDVI ha alcune limitazioni: risente delle condizioni atmosferiche (Holben, 1986), della saturazione dei suoi valori (Lillesaeter, 1982) ed è sensibile all'effetto background del suolo (Huete, 1987). L'NDVI è dato dalla combinazione tra la banda del rosso (correlata con l'assorbimento della luce da parte della clorofilla) e la banda dell'infrarosso vicino (legata a densità e struttura della vegetazione). L'NDVI si ottiene dall'espressione (Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$$

Per ottimizzare i segnali della vegetazione, minimizzando il disturbo del background e dell'aerosol è stato sviluppato l'indice EVI (Liu & Huete, 1995) la cui equazione è:

$$EVI = G \frac{NIR - red}{L + NIR + C_1 * red - C_2 * blue}$$

dove  $C_1$  e  $C_2$  sono dei coefficienti usati per correggere lo "scattering" dell'aerosol nella banda del rosso con l'uso della banda del blu,  $L$  è il fattore di correzione del disturbo provocato dal suolo.

La banda del blu viene principalmente utilizzata per la correzione atmosferica delle immagini e può, quindi, essere impiegata per migliorare la risposta basata sulle bande del rosso e del NIR (Xiao et al., 2004).

L'NDVI riesce a rispondere meglio in diverse condizioni rispetto all'EVI, soprattutto nelle radure e in generale dove non si ha una copertura della vegetazione elevata. Infatti, Matsushita et al. (2007) hanno verificato che l'EVI è più sensibile alle condizioni topografiche di NDVI, e che in caso di copertura continua del soprassuolo, l'EVI tenda a stimare meglio la massa legnosa.



## **L'analisi geostatistica: dipendenza spaziale dei dati rilevati**

Tra le tecniche di analisi statistica che mettono in relazione i dati misurati su una determinata area e la loro dipendenza spazio-temporale, abbiamo la geostatistica (o più specificatamente la "geostatistica spazio-temporale").

Quando si effettua una descrizione spazio-temporale delle informazioni ci si attende di poter ottenere:

1. stime locali;
2. il miglior uso di tutta l'informazione spazio-temporale (autocovarianza spazio-temporale) attraverso una sua modellizzazione;
3. la stima statistica della struttura e dell'errore (distinguibile sia nella dimensione spaziale che in quella temporale, che in quella integrata);
4. la valutazione (peso) dell'informazione.

Nella geostatistica classica si assume che le variazioni siano continue nello spazio e nel tempo (stazionarietà), e quindi prive di un qualunque trend. Nelle tecniche moderne di geostatistica (Christakos, 2000) si è in grado di riportare il sistema alle condizioni di stazionarietà previa rimozione del trend.

Le tecniche geostatistiche (Armstrong, 1989; Soares, 1993) comprendono tutta una serie di processi analitici più o meno automatizzati come la variografia, la correionalizzazione, il kriging, il cokriging, la simulazione geostatistica fuzzy (Panneton et al., 2001) e così via.

La geostatistica, fornendo gli strumenti per l'analisi della variazione spaziale e spazio-temporale, ha trovato una forte applicazione nelle scienze della Terra, ad esempio nel reperimento degli idrocarburi fossili (Dubrule e Damsleth, 2001), nello studio degli inquinanti (Di Mucci, 2003), delle risorse minerarie (Journel e Huijbregts, 1978), delle risorse idriche (Garen et al., 1994), del suolo (Webster, 1984) e della geologia (Carr et al., 1984) più in generale. Ma numerosi sono gli esempi anche nel campo ecologico, forestale e in ambienti mediterranei (Roberto et al., 2002; Nanos et al., 2004; Sedda, 2005).

Un concetto fondamentale è che al modello deterministico della statistica classica, viene preferito il modello stocastico che consente non solo la stima dei valori incogniti, ma anche di determinare l'accuratezza di tale stima. Infatti i dati di base sono considerati non come elementi rigidi ma come una delle possibili realizzazioni del processo in studio (processo stocastico).

## La teoria delle variabili regionalizzate

La geostatistica si basa sulla teoria delle variabili regionalizzate (*Regionalized Variable Theory*), sviluppata da Matheron nel 1965. La sua origine è ispirata ad una serie di studi svolti da autori differenti a partire della prima decade del novecento come: l'analisi di correlazione tra produzioni vegetali di parcelle adiacenti condotti da Mercer e Hall (1911); la definizione della varianza come somma di due componenti, una correlata e l'altra casuale (non prevedibile), condotta da Student (1914) suggerendo l'utilizzo della deviazione standard; l'elaborazione dell'ottimo interpolatore (*kriging*) da parte di Kolmogorov (1941); la determinazione empirica della dipendenza spaziale della concentrazione dell'oro nel minerale di Krige (1951); l'analisi della dipendenza spaziale su una parcella forestale a opera di Matern (1960). Recentemente è stata combinata con tecniche spazio-temporali e bayesiane (Diggle et al., 1998; Christakos, 2000).

La geostatistica è una teoria che permette di descrivere in maniera quantitativa la variazione spaziale (e spazio-temporale) e di utilizzarla per:

- a) l'inferenza statistica classica (processo conoscitivo);
- b) il processo di stima per la produzione di carte tematiche;
- c) la pianificazione razionale degli schemi di campionamento.

La statistica classica assume che il valore atteso di una data proprietà  $z$  (del suolo, della vegetazione, ecc...), ad una locazione  $x$  all'interno dell'area di campionamento, sia dato da una funzione del tipo:

$$z(x) = m + e(x) \quad 1$$

dove  $m$  è la media della popolazione (valore atteso di  $z$ ) e  $x$  è una variabile casuale, spazialmente non correlata, che rappresenta una misura del grado di dispersione dei valori attorno alla media. Tali deviazioni, inoltre, sono considerate distribuite normalmente con media 0 e varianza  $s^2$ . I comuni test statistici permettono di saggiare la significatività delle differenze fra le medie relative alle singole unità campionarie.

Le procedure statistiche classiche assumono, dunque, che la variazione all'interno di un'unità sia distribuita casualmente; in realtà le proprietà ambientali sono delle variabili continue, per cui non è irragionevole aspettarsi che esse varino secondo la distanza vettoriale di separazione, almeno per quei punti di campionamento compresi all'interno di una data area di influenza.

Ne segue, pertanto, che il modello classico è inadeguato per scopi di interpolazione poiché non assume una dipendenza spaziale (e tanto meno spazio-temporale) fra i singoli campioni (approccio deterministico).

I metodi della geostatistica (approccio stocastico) suppongono che esista una correlazione spaziale (spazio-temporale) fra i campioni e che le relazioni possano essere espresse in termini di distanze relative fra i punti e non in funzione delle loro posizioni assolute nelle due o tre dimensioni ( $x, y, t$ ).

Per dipendenza spazio-temporale si intende quella proprietà della variabile in studio per cui è molto probabile che valori in punti campionari vicini, rispetto alle distanze nello spazio e nel tempo, risultino più simili di altri posti a distanze maggiori; in altre parole si assume che i valori dell'attributo oggetto di studio non siano distribuiti casualmente, ma risultino correlati (autocorrelazione). Gli attributi che variano in questo modo sono detti "variabili regionalizzate".

Questa proprietà non deve essere considerata un fattore di disturbo ineliminabile (*noise*), perché la sua conoscenza consente di migliorare le stime (e da un punto di vista pratico per esempio di ridurre i costi di campionamento). Adottando questa visione della realtà, vengono a cadere i presupposti fondamentali della statistica classica (casualità e indipendenza dei dati).

Secondo la teoria delle variabili regionalizzate, estesa al contesto spazio-temporale, la variazione di una qualunque proprietà può essere espressa come la somma di tre componenti principali:

1. una componente deterministica, relativa a un valore medio costante o a una variazione graduale a lungo raggio, generalmente descritta da un polinomio (trend);
2. una componente casuale correlata nello spazio e nel tempo;
3. un rumore (*white noise*) o errore residuo non correlato nello spazio e nel tempo.

La formula [1], nel caso spazio-temporale, può essere estesa nella forma seguente:

$$Z(x_i)_{s,t} = m(x_i)_{s,t} + \varepsilon'(x_i)_{s,t} + \varepsilon_{s,t}$$

Dove tutti i termini sono riferiti ad una specifica posizione nello spazio e nel tempo. Rispetto alla [1], al trend spazio-temporale ( $m(x)$ ) si aggiungono due componenti dovute alla scomposizione della variabile casuale  $e(x)$ ;  $\varepsilon'(x_i)$  che rappresenta l'autocorrelazione spazio-temporale, locale e  $\varepsilon_{s,t}$  il termine di errore, indipendente, con media zero e varianza  $\sigma^2$ .

Se la componente casuale fosse assente, il fenomeno potrebbe essere descritto dal solo trend ed essere rappresentato da una funzione matematica (processo esclusivamente analitico-deterministico).

La valutazione di  $\varepsilon'(x_i)$  è un problema essenzialmente geostatistico. Nel caso univariato viene utilizzato il variogramma, mentre in quello multivariato il covariogramma. Il variogramma è quindi il cuore del processo geostatistico. Di seguito ne viene riportata la formulazione matematica, per il solo caso spaziale. L'estensione a quello temporale è facilmente ottenibile per estensione del variogramma a due dimensioni (spazio e tempo).

Considerata una variabile  $Z$ , funzione di posizione  $x$  ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), misurata in due punti ( $x_1, x_2$ ), separati da una distanza  $h$ , e i cui valori sono  $z(x_1)$  e  $z(x_2)$ , la relazione tra i due valori può essere definita attraverso la loro varianza:

$$\gamma^2 = \left\{ z(x_1) - \bar{z} \right\}^2 + \left\{ z(x_2) - \bar{z} \right\}^2 = \frac{1}{2} \{ z(x_1) - z(x_2) \}^2$$

dove  $\bar{z}$  è la media generale. La quantità  $\gamma^2$  è la varianza per il sito, nota anche come semivarianza, perché altro non è che la metà del quadrato della differenza tra i due valori.

In geostatistica le distanze di separazione tra i punti vengono definiti lag e indicati con  $h$ .

Se lo generalizziamo all'intero set di dati, nel quale si suppone ci siano  $m$  coppie di comparazione,  $m(h)$ , la media della semivarianza al dato intervallo (lag o  $h$ ) è:

$$\bar{\gamma}^2(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \left\{ z(x_i) - z(x_i + h) \right\}^2$$

Questa formula considera la semivarianza in funzione dello spazio e come nella statistica classica, questo concetto può essere esteso all'intera popolazione. La semivarianza, infine, in geostatistica è chiamata variogramma o semivariogramma.

L'applicazione della teoria delle variabili regionalizzate assume, nell'ipotesi di stazionarietà intrinseca, che la semivarianza fra due locazioni dipenda unicamente dal modulo e non dalla direzione del vettore distanza ( $h$  o lag).

Nella geostatistica spazio-temporale sono stati proposti diversi approcci per il calcolo del lag (Porcu et al., 2007). Uno di questi, ma anche il più diffuso, è quello che considera il tempo allo stesso modo delle distanze lungo gli assi delle  $x$  e delle  $y$ . In questo caso si utilizza la distanza Euclidea:

$$h = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (t_1 - t_2)^2}$$

## GLI ATTORI DELLA RICERCA

### La quercia da sughero (*Quercus suber* L.)

La quercia da sughero è un albero che mediamente è alto 10-15 m (Camarda, 1982), ma può raggiungere i 20 m (Gellini, 1997) con diametri del fusto sino a 1.5 m. Il tronco difficilmente dritto si ramifica presto e porta i rami disposti irregolarmente.

La sughera è una quercia sempreverde diffusa nell'ovest del bacino mediterraneo e nelle regioni atlantiche adiacenti, presente soprattutto nella Penisola Iberica, in Italia, Francia e Africa Settentrionale. In Italia la si ritrova principalmente in Sardegna e Sicilia, localmente nelle coste tirreniche e in Puglia (Camarda, 1982). È ben conosciuta per la produzione di sughero (Costa, 2002; Gellini, 1997).

La quercia da sughero preferisce i climi temperato-subumidi, oceanici con temperature miti e discreta piovosità, secondo la classificazione di Pavari-De Phillippis tipica della sotto zona media del Lauretum (Gellini, 1997). Vive nei settori con maggiore piovosità e con i seguenti intervalli di temperatura: medie annue fra un massimo di 18°C e un minimo di 13.3°; mese più caldo 23-27°C; temperature minime non inferiori a -10°C; massime anche superiori ai 40°C, nell'Africa settentrionale anche 51°C.

Le principali limitazioni, per quanto riguarda le temperature, sono quelle invernali; la media delle temperature minime del mese più freddo non deve essere inferiore a 0°C, con medie del mese più freddo di 6°C nelle stazioni più aride e di 2°C in quelle subumide.

Le quote sono in genere sotto gli 800 m ma negli areali subumidi la specie è presente sino a 1'200 per arrivare a quote molto maggiori in Marocco (tab. 1).

Preferisce i terreni profondi, freschi, sabbiosi, derivati da scisti graniti trachiti; sporadicamente vegeta anche in terreni carbonatici, purché decalcificati.

Paese	Portogallo	Spagna	Algeria	Marocco	Italia	Tunisia	Francia
Fonte	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>
Tmnass	> -10	> -10	> -10	> -10	> -10	> -10	> -10
Tmxass	51	51	> 50	50.3	> 40	51	NR
Tmmc	24-26	24-26	24-26	24-26	23-27	24-26	NR
Tmmf	> 4	> 2	5.4	4-5	> 2.3	> 4	NR
Tma	13-18	13-20	13-17	17-18.3	13-18	13-18	13-17
Quota	0-1'100	0-1'300	0-1'500	600-2'300	0-800	0-1'500	0-700
Pra	> 450	> 400	600-1'400	440-600	450-1'500	> 450	> 600
Pre	NR	50 - 150	NR	NR	50-100	NR	NR

Tabella 1 Caratterizzazione climatica dell'areale della quercia da sughero: temperatura minima assoluta (Tmnass); temperatura massima assoluta (Tmxass); temperatura media mese più caldo (Tmmc); temperatura media mese più freddo (Tmmf); temperatura media annuale (Tma); quota; precipitazione annuale (Pra); precipitazione estiva (Pre).

Fonti citate: a) Viera Natividade (1950), Montoya Oliver (1988), Bellarosa (2000), Dettori et al., (2001); b) Montoya Oliver (1988), González Adrados et al. (1991), González Adrados (1992), Pérez Latorre et al. (1993), Montero e Cañellas (2003); c) Montoya Oliver (1988), Bouldjedri (1992), Bellarosa (2000); d) Montoya Oliver (1981 e 1988), Messat (1992), Bellarosa (2000); e) Mondino e Bernetti (1998), Cornellini e Putrella (2000), Dettori et al., (2001), A.A.V.V. (2002), Caridi e Iovino (2002); f) Montoya Oliver (1988), Mongi Ben (1992); g) Bellarosa (2000), BRL (2002), Cantat e Piazzetta (2005). Da Sedda (2005)

## **La Selvicoltura e la gestione delle foreste di quercia da sughero**

Le sugherete sono delle formazioni forestali fortemente influenzate dalla gestione umana, il cui interesse è volto soprattutto alla produzione del sughero utilizzato prevalentemente nell'industria del tappo, ma ultimamente anche per la produzione di pannelli per isolamento sia acustico che termico, di pavimentazioni, ma anche di solette o tacchi per le scarpe e vari articoli di artigianato, ecc.

Tutto questo ha fatto sì che nel tempo vi fosse notevole interesse sugli studi relativi all'accrescimento dell'intera pianta e del sughero, nonché alla qualità di quest'ultimo, anche rispetto ai fattori ambientali; comunque è da precisare che la letteratura riporta diversi studi sul sughero mentre minori sono quelli riguardanti il materiale legnoso (Pilar, 1997).

La quercia da sughero è una specie di interesse forestale edificatrice di sistemi silvicoli che, per quanto di rado "naturali", risultano fondamentali per il paesaggio e l'ambiente di molte aree mediterranee e, in particolar modo, della Sardegna. È una specie che contribuisce alla formazione di popolamenti temporanei che l'uomo rende permanenti attraverso le cure colturali, assicurando la costante copertura del suolo poiché l'utilizzazione del bosco prevede l'estrazione del sughero ma non l'asportazione del soprassuolo arboreo. Il potere isolante del sughero e la vigorosa capacità di rinnovarsi per polloni consentono alla sughereta di reagire ai frequenti incendi e di partecipare alle associazioni vegetali pirofite.

Gli ecosistemi forestali a sughera sono originati e assecondati dalle attività umane per le molteplici funzioni che svolgono, tra cui la produzione di sughero, legname e ghiande per l'alimentazione animale. La sughera è una specie fondamentale per le peculiari proprietà tecniche del suo prodotto principale (il sughero), difficilmente emulabili dall'industria: basso peso specifico, elasticità, flessibilità, resistenza alla compressione, capacità di isolamento termico, impermeabilità, resistenza all'attrito.

La sughera garantisce una copertura costante del suolo, assicurando un continuo assorbimento di carbonio; poiché, inoltre, i materiali sottratti al bosco (sughero) non sono destinati ad essere bruciati se non dopo che la fase produttiva si è conclusa, il carbonio è dunque fissato per tempi lunghi. A tal fine può considerarsi una specie ottimale nel calcolo dei crediti di carbonio (United Nations, 1998).



La sughera, quale specie forestale, assolve inoltre a compiti di regimazione delle acque, contenimento dell'erosione e mantenimento della biodiversità.

È grazie all'uomo che questa specie riesce ad avere i suoi spazi anche là dove altre specie risulterebbero ecologicamente più competitive: il leccio in Sardegna, la quercia delle Canarie nel Nord Africa, il pino marittimo in Corsica, ecc.

Sotto il profilo gestionale le sugherete della Sardegna sono inquadrabili come:

*sistemi silvani*, alti fusti, puri e misti, dove il sughero rappresenta una quota significativa del reddito ed eventuali attività pastorali a bassissimo carico non compromettono la densità del bosco;

*sistemi silvopastorali*, alti fusti, puri e misti, dove la redditività deriva dal sughero e da attività zootecniche estensive; la rinnovazione, difficile a causa del pascolamento, è in larga parte agamica;

*sistemi agrosilvani*, pascoli arborati sovrastanti un piano erbaceo formato da colture agrarie dove la modesta qualità del sughero e la mancata organizzazione spazio-temporale delle decortiche compromettono la redditività della componente arborea caratterizzata dall'assenza di rinnovazione.

Il futuro dei sistemi silvopastorali e di quelli agrosilvani è incerto a causa di due fattori principali. Il primo concerne il loro sviluppo come sistema agro-pastorale all'interno delle condizioni socio-economiche locali e della politica agricola complessiva dell'UE. Il secondo riguarda la stabilità di ecosistemi transitori, fragili di fronte ai pesanti turbamenti di origine antropica e ai cambiamenti climatici a lungo termine causati, per esempio, dall'aumento della CO<sub>2</sub> atmosferica.

La vegetazione forestale dell'area mediterranea si è co-evoluta col pastoralismo portando a formazioni capaci, entro certi limiti, di tollerare la pressione di pascolamento, gli incendi e i tagli non sempre razionali. La foresta di sughera si presta a queste forme di agro-selvicoltura perché la chioma rada della sughera consente lo sviluppo della cotica erbosa degli erbai autunno-vernini realizzati dall'azienda zootecnica. La struttura del bosco è, quindi, condizionata dal pastoralismo, mentre l'alimentazione della pecora da latte o del bovino da carne si avvantaggia, nei momenti critici -estate e pieno inverno- della presenza di frasca fresca e ghiande ad alto valore nutritivo.

La stabilità è fortemente influenzata dall'eccessivo pascolamento attuato in queste formazioni che ha portato ad una estrema semplificazione della cenosi con la

riduzione del numero degli alberi ad ettaro, un impoverimento dello strato erbaceo, la riduzione di diverse specie arbustive, che tra l'altro costituivano un ospite alternativo per gli insetti defogliatori della sughera e le nicchie naturali dei loro predatori.

Nel passato la scarsa attenzione da parte delle normative UE, rivolte soprattutto a sostenere le attività agricole, e la mancanza di concretezza della politica comunitaria forestale (peraltro all'interno di una politica ambientale) hanno influito generalmente in modo negativo sul processo di copertura e recupero vegetazionale delle sugherete. A fronte di questa riduzione delle superfici sughericole (e di quelle destinate a imboschimenti e rimboschimenti) si è osservato, a livello mondiale, un aumento costante della domanda di sughero sino al 2000, quando la concorrenza svolta dalle chiusure alternative ha arrestato un trend sino ad allora positivo (Rossellò, 2006).

Ultimamente normative regionali, quali il Piano Paesaggistico Regionale (L.R. 8/2004), hanno introdotto forme di tutela che inseriscono le sugherete tra le aree caratterizzate da un'utilizzazione agro-silvo-pastorale estensiva che conservano ancora elementi di elevata specificità e una buona consistenza di biodiversità di pregio. Si tratta in particolare di boschi naturali, con aspetti di macchia con diverse tipologia e struttura.

In questo contesto in Sardegna la sughericoltura rappresenta una delle poche forme di selvicoltura in grado di supportare un processo di filiera, in considerazione anche del livello tecnologico raggiunto dall'industria di trasformazione del sughero che vanta una tradizione di lungo periodo.

## Patologie della sughera e infestazioni entomatiche

Attualmente uno degli elementi che più incide sul bosco a sughera, è una complessa manifestazione patologica nota come “*deperimento delle querce*”, o “*oak decline*” (Franceschini, 2006). Nel corso degli ultimi anni, si è registrato un numero crescente di segnalazioni di sughere colpite da manifestazioni diverse quali stentata vegetazione, precoce caduta delle foglie, disseccamento delle branche, marciume radicale, deterioramento del legno e, nei casi più gravi, perdita degli alberi. Diversi studi hanno messo in evidenza che il deperimento non è legato ad un solo motivo, bensì all'interazione tra diversi fattori biotici e abiotici. Tra questi ultimi un ruolo centrale è stato assegnato alla variazione del regime pluviometrico, osservato in tutto l'emisfero settentrionale nell'ultimo ventennio; soprattutto le specie a bassa e media tolleranza alla siccità ne avrebbero sofferto: roverella, sughera, leccio e quercia coccifera in ordine di tolleranza crescente. Altri fattori colturali rilevanti sono individuati in un'eccessiva densità dei popolamenti, nell'insufficiente livello di fertilità stazionale, nel sovrapascolamento, nell'erronea esecuzione delle estrazioni e nel mancato svolgimento delle normali cure al bosco fino al suo completo abbandono. A tutto ciò si aggiunge l'azione devastante del fuoco e degli organismi patogeni, basti pensare che sono state descritte oltre 400 specie fungine, almeno 100 delle quali patogene (Dettori et al., 2001)

Tra le avversità entomatiche che attaccano le sugherete, assumono notevole rilievo alcune specie di Lepidotteri defogliatori. La conseguenza degli attacchi, nel tempo, è la diminuzione della qualità del sughero ma soprattutto della quantità, valutabile fino al 60% in anni di defogliazione totale e in misura minore quando la defogliazione è parziale. Nonostante le piante reagiscano con una nuova emissione di foglie, la massa fogliare originaria viene ricostituita solo gradualmente e l'effetto del danno, anche se in misura decrescente, si manifesta anche durante i 2-3 anni successivi. I numerosi studi sull'argomento hanno evidenziato la presenza, nelle sugherete, di oltre 300 specie di insetti, di cui 34 strettamente legate alla quercia da sughero. La gran parte di esse, se considerate singolarmente, non ha la capacità di provocare danni apprezzabili. Solo alcune specie rivestono importanza fitopatologica, in quanto possono determinare la defogliazione totale di interi comprensori forestali. La *Lymantria dispar* L. (Limantride), ad esempio, in Sardegna è capace di raggiungere elevate densità determinando la defogliazione totale di

migliaia di ettari di sugherete. La *Malacosoma neustria* L. (Lasiocampide), che mostra fluttuazioni di tipo periodico con cicli di circa 9 anni, è un insetto polifago che crea notevoli danni all'apparato fogliare delle piante. Un altro insetto è la *Tortrix viridana* L. (Tortricide), che manifesta invece fluttuazioni di tipo temporaneo intervallate da lunghi periodi di latenza; sulla sughera gli attacchi questo insetto sono contenuti, così come quelli di un altro defogliatore, l'*Euproctis chrysorrhoea* L. (Dettori et al., 2001).

## Autoecologia della sughera

La quantità e la qualità delle produzioni di sughero dipendono essenzialmente dalle caratteristiche genetiche dell'individuo e dalla sua morfologia (la porosità e lo spessore del sughero diminuiscono procedendo verso la porzione apicale dell'albero o del ramo), ma sono fortemente influenzate anche dall'ambiente di crescita e dalla struttura della formazione vegetale di appartenenza.

Lo spessore del sughero ("calibro") cresce con l'umidità e la temperatura media dell'aria; l'incremento quantitativo secondo Gonzalez Montero (2004). è di solito accompagnato da una più elevata qualità del prodotto. L'ottimo viene raggiunto in suoli fertili, profondi e ben drenati, in genere in inceptisuoli e alfisuoli (Pérez Latorre et al, 1993) mentre le quote alle quali si hanno le migliori *performance* sono quelle comprese tra i 300 e i 600 m (Montero e Cañellas, 2003; Corona et al, 2005).

In uno studio condotto sulle sugherete della fascia litoranea del Marocco con clima semiarido e su quelle dell'altopiano centrale della regione nord africana a clima subumido (Montoya Oliver, 1988), si è osservato che nel secondo caso l'eterogeneità pedologica non si traduceva in differenze importanti nella vegetazione. Gli effetti mesoclimatici e la roccia madre avevano effetti molto più percettibili. Al contrario, il clima semiarido permetteva una migliore lettura degli effetti del suolo che sono, come è noto, tanto più evidenti quanto più la specie si trova prossima ai limiti climatici.

La riduzione della percentuale di sabbia in favore del limo e, secondariamente, la riduzione del volume utile di suolo tendono a far prevalere la componente dell'*oleo-lentiscetum*, così come avviene in particolari condizioni in coincidenza di un incremento di pH o dello stato termico del suolo (Charco, 1999). Quando il volume totale di suolo disponibile è sufficiente, a parità di litologia e clima, la qualità vegetativa della sughera migliora con il contenuto di sabbia anche nei climi semiaridi, a conferma della preferenza per i suoli ben areati.

Secondo alcuni autori come Brito do Santos (1980) e Orgeas e Bonin (1996), la produzione di sughero è positivamente correlata con le precipitazioni e con la concentrazione di diversi elementi nel suolo come il boro, il potassio e l'azoto. Altre analisi hanno evidenziato un'assenza di correlazione significativa tra la nutrizione minerale e la qualità del sughero (Courtois e Masson, 1999), anche se è

opinione comune il contrario, (ad esempio, Sanna (1946) relaziona positivamente la qualità alla sterilità del suolo).

Dettori et al. (1996), infine, trovano una correlazione negativa tra qualità del sughero e profondità del suolo.

Rispetto alla temperatura, la quercia da sughero arresta l'attività vegetativa con una temperatura minima media inferiore ai 3°C (Montoya Oliver, 1988). Temperature al di sotto dei -5°C causano danni irreversibili alle foglie (BRL, 2002). I semi sono particolarmente sensibili alle gelate (AA.VV., 2001; Cantat e Piazzetta, 2005).

Per quanto riguarda la pioggia, qualche autore pone come limite inferiore tollerato dalla specie il valore di 400 mm all'anno (Vieria Natividade, 1951; Zeller, 1957; Gonzales Adrados et al, 1991), mentre altri lo stimano superiore ai 500. In condizioni di scarsa piovosità la rigenerazione è difficile e la pianta produce poco sughero (Montero e Cañellas, 2003) con fase di recupero post-decortica più lunga e complicata. L'optimum di accrescimento si realizza con precipitazioni annue tra i 600 e gli 800 mm. C'è da considerare che alti valori di precipitazione annuale incidono sui rapporti di competitività, favorendo indiscriminatamente tutte le specie vegetali.

La sughera rifugge dalla salsedine, per questo motivo è poco presente in prossimità del mare nei versanti esposti ai venti salini (un'eccezione è il litorale laziale e le scogliere calabre). Rifugge, inoltre, anche dalle aree in cui si ha un manto nevoso stabile (Bouldjedri, 1992).

Studi sugli effetti della radiazione sulla fenologia della quercia da sughero mostrano che le porzioni di chioma esposte ad alti valori di radiazione presentano accrescimento e produzione di biomassa più marcati. L'altezza della chioma risulta meno chiaramente relazionata con la luce. Gli autori concludono affermando che l'altezza della chioma rispetto all'accrescimento è un fattore secondario nei sistemi dove le chiome non subiscono influenze dalla vicinanza di altri alberi; questo è tipico dei sistemi agrosilvani quali i *montados* (Portogallo), le *dehesas* (Spagna) e quelli agrosilvopastorali della Sardegna (Oliveira et al., 1993).

## L'accrescimento nella quercia da sughero

L'accrescimento vegetativo delle piante è influenzato da numerosi fattori interni ed esterni. Tra i fattori esterni si menziona il clima e le perturbazioni quali malattie, incendi e azioni umane. Sono stati elaborati diversi modelli per la definizione delle interazioni dei diversi fattori ambientali sulla formazione degli anelli di accrescimento (Fritts, 1976). Questi modelli si basano su parametri ecofisiologici determinati sperimentalmente (Cambini, 1974; Zeraia, 1981; Caritat, 1988).

Le differenze che si incontrano nello spessore degli anelli di accrescimento di una stessa pianta dipendono dalle variazioni di temperatura e piovosità nel tempo (Ephrat, 1971); le stesse possono essere evidenziate tramite le curve di accrescimento radiale che permettono di apprezzare l'evoluzione dell'albero durante il ciclo vitale.

Gli anelli legnosi della sughera seguono lo schema visto per le angiosperme prive di anello poroso, spesso attraversato in direzione radiale dai raggi parenchimatici (Fig. 8). In sezione trasversale al fusto l'anello presenta nel legno primaverile vasi ben evidenti e a dimensione decrescente, sino ad avere un passaggio netto a misure dimensionali molto ridotte nel legno tardivo; il successivo anello primaverile presenta subito anelli con vasi di dimensione cospicua. Questo consente di eseguire, con sufficiente rapidità e precisione, sia il conteggio che il dimensionamento degli anelli annuali (Giordano, 1981).



Figura 8 – Porzione di tronco di sughera in sezione trasversale con evidenti anelli di diversa ampiezza

Leal et al. (2008) in uno studio su un totale di 30 alberi di sughera di 30 anni circa, mai sottoposti a decortica, di buona vitalità e buone condizioni fitosanitarie, trovano che gli accrescimenti annui risultano essere in media di 2.5 mm, variando da un minimo di 0.78 mm ad un massimo di 5.76 mm.

Costa et al. (2002) hanno misurato mensilmente l'accrescimento diametrico di alberi di sughera tra due decortiche successive attraverso l'utilizzo di dendrometri.

L'accrescimento medio era di 0.93 mm per anno, con una forte variabilità interannuale; subito dopo la demaschiatura si è avuto un accrescimento massimo con 1.44 mm, negli anni successivi l'ampiezza degli anelli decresceva sino a 0.41 mm alla fine del turno. In questo studio l'andamento stagionale dell'accrescimento mostrava il massimo a fine primavera - inizio estate, con decremento notevole in piena estate. Altri studi confermano questo comportamento (Gourlay, 1995; Gonzales Adrados e Gourlay, 1997; Oliveira, 2001). Altri Autori dimostrano che esiste una relazione tra decortica e dimensione dei vasi nel legno per gli alberi giovani, cosa che non  dimostrata per quelli adulti (Leal et al., 2008).

La variazione radiale dell'ampiezza degli anelli e della densit del legno  stata studiata in Portogallo, in giovani sughere non demaschiate (30-40 anni) e in alberi adulti (37-60 anni). Il legno delle sughere  molto denso con una variazione all'interno degli anelli piuttosto bassa. La densit dei componenti decresce dal midollo alla corteccia, molto rapidamente nei primi 15 anelli (anni) e solo leggermente in seguito. La crescita  molto alta nei primi 30 anni con una media di 4.2 mm (Knapic, 2007). Esperienze che hanno interessato questo argomento sono state condotte anche in Sardegna dalla ex Stazione Sperimentale del Sughero; un esempio  il lavoro di Ruiu et al.(1996) svolto in una sughereta in piena produzione del nord Sardegna in cui era stato misurato un accrescimento radiale generale (comprensivo di sughero e legno) tra i 1.9 e i 3.3 mm/anno. Valori decisamente superiori e intorno 9 mm/anno sono stati registrati nell'impianto sperimentale del Monte Grighine, nei primi sei anni di vita delle sughere (Sedda, comun. pers).



## L'AREA DI STUDIO: SA SERRA (NU)

### La localizzazione

L'area della sperimentazione si trova in Sardegna (settore centrale), nei comuni di Nuoro e Benetutti, (circa il 90% in comune di Nuoro), in località Sa serra. Le coordinate che ne definiscono i confini sono rappresentate dai punti Xmin (516'885 m) Xmax (519'885 m) Ymax (4'472'370 m) Ymin (4'469'370 m) WGS 1984 UTM Zone 32 Nord, interessando una superficie totale di 9 Km<sup>2</sup>.

Le quote sono comprese tra il minimo di 464 e un massimo di 812 m s.l.m., mentre l'altitudine media è di 725 m (Fig. 9).

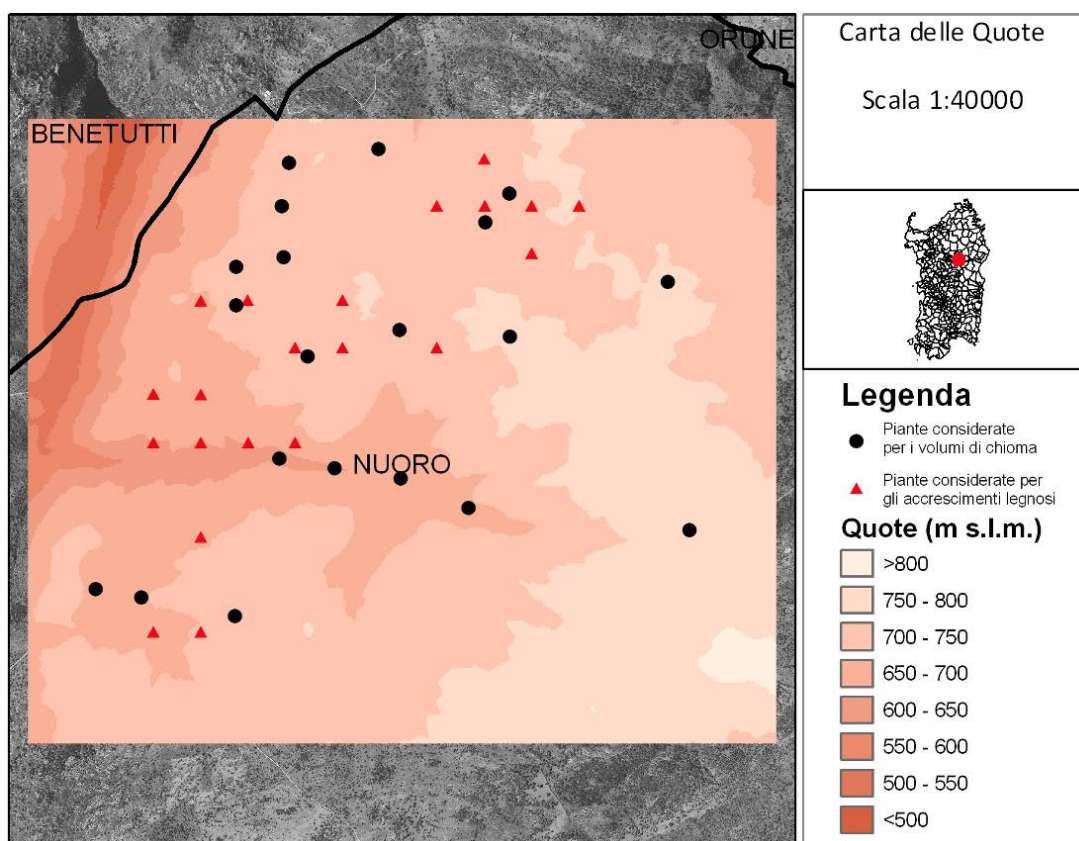


Figura 9 - Distribuzione altimetrica nell'area di studio e punti campionari

## **Geologia e pedologia**

L'area ricade completamente in un complesso magmatico ercinico. La fonte del dato geologico è il Foglio 194 della Carta geologica d'Italia, scala 1:100'000. I Suoli dominanti sono: Leptic Cambisols, Eutric Cambisols, Dystic Cambisols, Litic Leptosols, Dystic Leptosols, Eutric Leptosols, Eutric Fluvisols e Haplic Fluvisols (Madrau, 2006).

## **Pendenza**

Le pendenze, e le relative classi, sono state calcolate a partire dal Modello Digitale del Terreno attraverso l'uso del software ArcGis 9.2. utilizzando la funzione "Slope" di 3D Analyst che calcola l'inclinazione tra i limiti della cella di dimensione predefinita dall'operatore. Il prodotto finale, in questo caso, è un grid di 10x10 m (poiché il DTM è di 10x10 m) dove ad ogni cella è associata la pendenza in percentuale. In seguito questo tematismo è stato trasformato, da un formato raster in uscita, in un tematismo poligonale, per meglio rappresentare le diverse classi, e avere un dato sulle superfici interessate dalle diverse classi (ESRI, 2002).

In prevalenza l'area di studio è interessata da pendenze inferiori al 50% e la maggior parte della superficie -il 53%- è compresa tra il 6 e il 15%, seguita da pendenze tra il 15 e il 30%. La distribuzione spaziale delle classi di pendenza e le relative percentuali di distribuzione sono meglio mostrate nella figura 10.

## **Il clima**

Nell'area di studio non sono presenti stazioni di rilevamento dei dati climatici, ma il Servizio Agrometeorologico Regionale della Sardegna (SAR) ha nei territori contermini diverse stazioni agrometeorologiche: quelle più vicine, e con i dati più completi, sono ubicate in prossimità di Nuoro e Bitti, a circa 7.9 e 16.3 Km, rispettivamente, la dal centro dell'area di studio.

Il SAR ha fornito i dati relativi al periodo 1997 - 2007. La temperatura media annua di questi ultimi dieci anni è stata di 13.4°C per la stazione di Bitti e di 14.0°C per Nuoro.

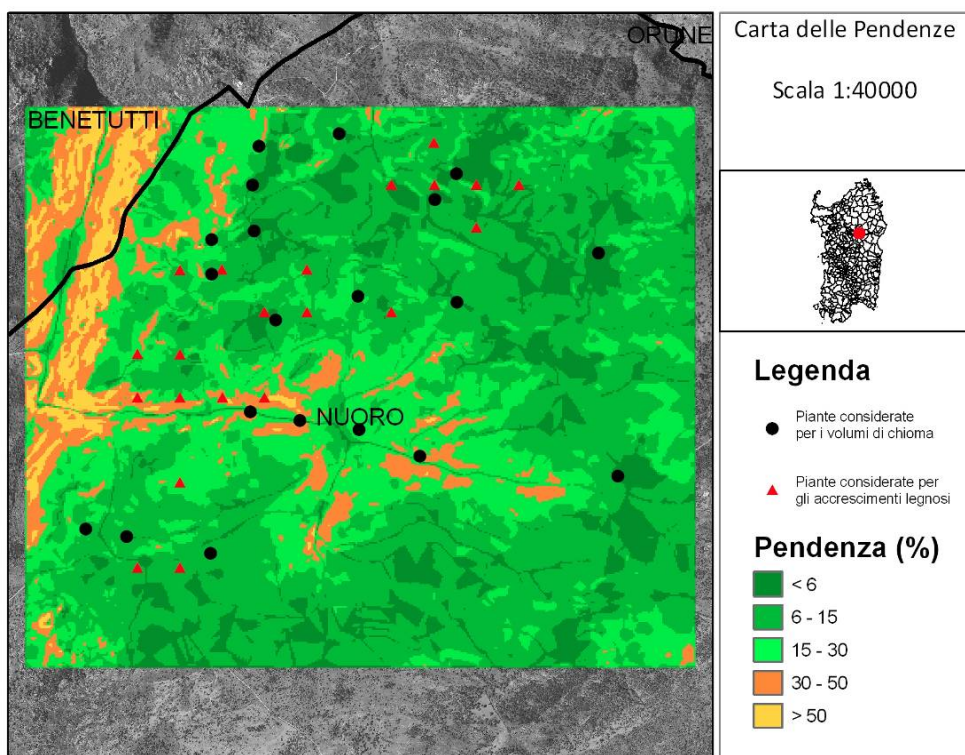


Figura 10 - Distribuzione delle classi di pendenza nell'area di studio

La media delle precipitazioni totali annue, nel periodo di riferimento 1997-2007, è stata di 639.6 mm per la stazione di Bitti e di 619.8 mm per Nuoro. Le temperature massima e minima assoluta sono state rispettivamente di 38.8°C (luglio 2005) e -6.6°C (gennaio 1999) per la stazione di Bitti, e di 43.8 (luglio 2007) e -9.9°C (gennaio 1999) per Nuoro. Pur essendosi registrati degli estremi considerevoli, raramente si sono avute minime inferiori a 0°C tra aprile e giugno del decennio considerato.

### Struttura del bosco

Il soprassuolo è composto principalmente da una sughereta specializzata, in alcuni tratti mista con leccio e roverella. Il bosco misto si riscontra nella porzione meridionale, a tratti privo di sughera; questo tipo di bosco ricopre circa il 10% dell'area di studio. La sughereta specializzata compare quando ci si sposta nel settore settentrionale, che interessa la maggior parte dell'area, circa il 90%; nel settore centrale si riscontra un piccolo nucleo di roverella.

La densità della sughereta non è uniforme poiché strutture a bassa densità si alternano con soprassuolo piuttosto densi.

Dal database originale di precedenti studi su quest'area (Progetto Suberex Interreg III, 2008) è stato possibile avere una conoscenza sufficientemente dettagliata della struttura della sughereta. La struttura orizzontale e verticale delle foreste di sughera di Sa Serra denota che queste comprendono popolamenti in diverse fasi di sviluppo: dal novelleto alla perticaia, con un'importante presenza di popolamenti in fase giovanile (Fig. 11).

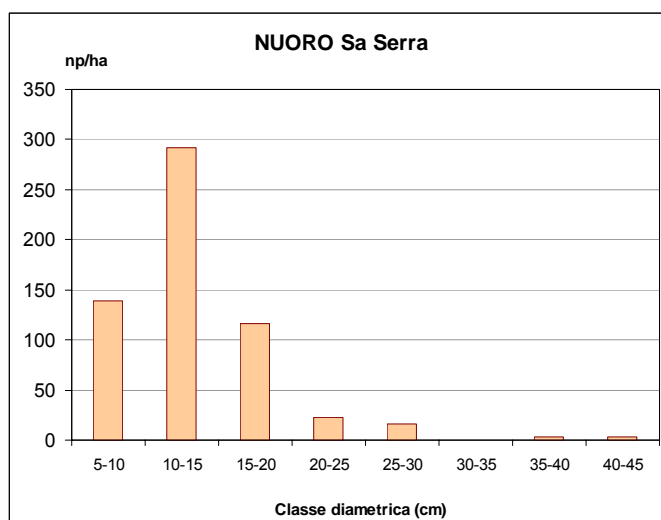


Figura 11 - Distribuzione delle classi diametriche

La relativa curva ipsometrica dell'intero set di dati (Fig. 12) appare ben distribuita, specialmente dopo l'eliminazione del dato anomalo (*outlier*) rappresentato dall'unico individuo della classe 35.

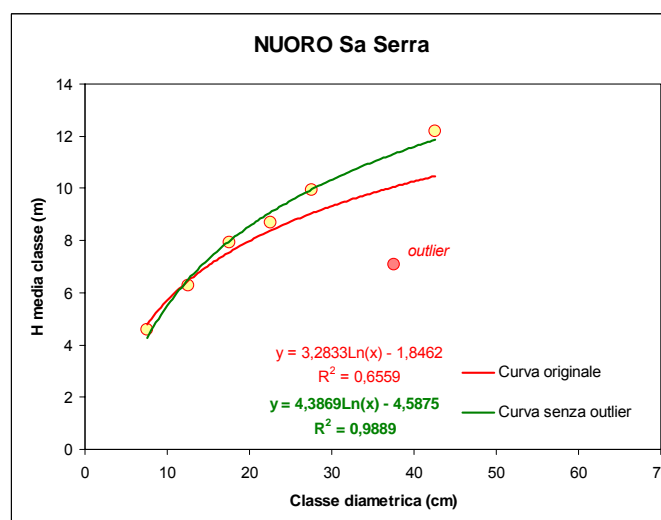


Figura 12 - Curve isometriche, con e senza *outlier*

## **FINALITÀ E SUPPORTO DELLA RICERCA**

Obiettivo dello studio è contribuire alle conoscenze degli effetti degli andamenti climatici sul sistema sugherete e fornire una base per ipotesi di modelli previsionali sugli accrescimenti legnosi, anche allo scopo di sviluppare una metodica di riferimento e di facile ripetibilità.

Al fine di utilizzare tutta l'informazione proveniente dai dati, il modello è implementato con la funzione rappresentante la dipendenza spazio-temporale del dato (accrescimento radiale del legno), in modo da definire l'effetto di tutte le componenti (quello deterministico dei fattori fissi, con quello stocastico dei fattori random) e lo sviluppo di modelli spazio-temporali che possano essere successivamente utilizzati per la simulazione dei processi naturali.

Lo studio, inoltre, potrà essere di ausilio alla pianificazioni degli interventi di forestazione per aree in cui si disponga di congrue serie climatiche, attraverso le quali stimare i possibili accrescimenti da cui dipendono i piani di gestione dei sistemi naturali e delle piantagioni a quercia da sughero.

## MATERIALI E METODI

Il tema di ricerca si colloca nell'ambito delle discipline della selvicoltura, auxologia e climatologia, applicate a un sistema silvopastorale al fine di modellizzare l'accrescimento legnoso della sughera alla variazione annuale delle condizioni climatiche.

### Struttura concettuale della ricerca

La ricerca, di carattere multidisciplinare, ha richiesto conoscenze e studi riguardanti la climatologia, la fitoclimatologia, l'agrometeorologia, l'auxologia (auxonomia e auxometria, per lo studio degli incrementi di massa e di volume del legno) e la tecnologia del legno e del sughero. Per le analisi statistiche è stato necessario supportare la statistica tradizionale, deterministica, con quella geostatistica, ad approccio stocastico.

### Struttura sperimentale della ricerca

La ricerca si articola nelle seguenti fasi:

- ⇒ Individuazione dell'area più "vocata" per lo studio
- ⇒ raccolta dei dati necessari per la caratterizzazione bio-climatica dei principali comparti sughericoli regionali, identificazione delle grandezze bio-fisiche che caratterizzano l'area di studio
- ⇒ analisi della struttura del popolamento
- ⇒ individuazione degli alberi candidati all'analisi dell'accrescimento radiale
- ⇒ analisi dell'accrescimento radiale del legno attraverso il dendrocronografo (modello LinTab) con l'ausilio del software TSAP–Win Professional;
- ⇒ realizzazione di un database legato a un sistema informativo geografico;
- ⇒ analisi statistica dei dati e modellizzazione dei fenomeni misurati.

I dati in input sono raggruppabili come:

- ⇒ fattori ambientali: temperatura dell'aria, precipitazioni, pendenza ed esposizione, ecc;
- ⇒ informazioni selvicolturali: forma di governo, forma di trattamento, età, sistema di gestione;
- ⇒ dati legati alla specie: accrescimenti legnosi, spessore del sughero, altezza dell'albero, classe diametrica, dimensione della chioma;

- ⇒ documentazioni cartografiche digitali: fotografie aeree, carta ecopedologica, carta dei suoli, carta dell'uso del suolo, modello digitale del terreno (fonte: RAS), immagini satellitari MODIS (fonte: TALA – Università di Oxford).

### La raccolta dei dati

Il campionamento dei dati sulla specie si è svolto dal 2005 al 2008.

I valori di diametro sono stati misurati a 1.3 m di altezza attraverso un cavalletto dendrometrico con precisione di 0.5 cm, l'altezza con ipsometro ad ultrasuoni (modello Vertex III), con una precisione di 10 cm. Lo spessore del sughero con uno “*Spessimetro a boccia mobile bloccabile*” messo a punto per l'occasione (Fig. 11), questo permette attraverso la punzonatura della corteccia sino ad arrivare al legno di avere, con l'ausilio di un calibro una precisione prossima al millimetro.



Figura 13 - “Spessimetro a boccia mobile bloccabile”

Ogni pianta è stata identificata geograficamente attraverso l'utilizzo di un palmare a cui era collegato un GPS a 32 canali. Il GPS è stato “fissato” al bordo della pianta commettendo un errore stimato di  $\pm 2$  m, le coordinate geografiche sono state, inoltre, verificate attraverso foto aeree georiferite.

Per quanto riguarda l'estrazione dei campioni di legno si è utilizzato il *Succhiello di Pressler*, questo permette attraverso un asta metallica vuota al centro (circa 5 mm) e una vite auto filettante e l'ausilio di estrattore, di avere porzioni di tronco di diversi centimetri.

## La qualità e le caratteristiche dei dati

Le misure effettuate sull'albero sono espresse in centimetri con una precisione di  $\pm 0.5$  cm per il diametro e di  $\pm 10$  cm per le altre grandezze. Lo spessore del sughero è misurato in millimetri con precisione di  $\pm 1$  mm. Per la misura dell'anello legnoso, eseguita con il LinTab e relativo software, la precisione è di 0.01 mm.

## Scelta dell'area di studio

Il protocollo sperimentale prevedeva la selezione di un'area in cui eseguire tutte le misure necessarie allo scopo prefissato dalla ricerca. Per tale motivo si sono innanzitutto individuati, a livello regionale, i territori a vocazione sughericola di maggiore interesse sia a livello economico che ambientale, ma soprattutto con caratteristiche funzionali allo studio quali disponibilità di dati climatici e differenti tipologie di sughereta. La scelta è stata sviluppata sulla base di informazioni derivate dall'UDS Regionale (RDM, 2003) e dalla rete di rilevamento agro-climatico del Servizio Agrometeorologico Regionale, utilizzato in una prima fase come riferimento climatico; un altro criterio di scelta è stato rappresentato dalla disponibilità di studi pregressi sulle aree candidate, come quelli derivanti dal "Progetto Suberex III" già citati in precedenza. Il tutto è stato fatto con l'ausilio di un programma GIS (ArcGis 9.2), che incrociando spazialmente le diverse informazioni ha permesso di scegliere un'area al centro della Sardegna, più precisamente nel territorio tra Nuoro e Benetutti chiamato "Sa Serra".

A scala locale si è scelta un'area priva di elevate pressioni antropiche capaci di "indebolire" la relazione "pianta vs clima"; questa è stata individuata nell'azienda di Testone (circa 400 ha)

È stato, inoltre, necessario avere a disposizione una serie climatica sufficientemente lunga e coerente con l'area di studio. Tali informazioni sono state richieste in base alla vicinanza all'area di studio prescelta e alla copertura del dato climatico, cercando di evitare le stazioni con lacune nei dati. Questo al fine di avere un confronto con altre metodiche pregresse.

Si sono richiesti e ottenuti i dati climatici delle stazioni agrometeorologiche del S.A.R. più vicine, nel nostro caso quelle di Nuoro e Bitti. I dati di partenza sono le precipitazioni mensili e le temperature massime e minime mensili, per il periodo 1998-2007.



Successivamente si è verificata la disponibilità dei dati MODIS, ottenuti dal dataset TALA dell'Università di Oxford, database in attività dal 1993; i dati come NDVI-EVI, ecc. sono risultati disponibili per 6 anni (2002-2007). La copertura spaziale di questo database è globale; ne consegue che non si ha il problema della copertura spaziale puntiforme riscontrabile per le stazioni termopluviometriche.

### **Metodo per la scelta dei punti**

Una volta individuata l'area rispondente ai criteri citati, si è scelta la metodica per l'individuazione delle piante da cui estrarre i campioni di legno. Le informazioni di partenza sono state:

1. L'area di studio in formato raster con un passo della griglia 250 x 250 m
2. L'Uso del Suolo (RDM, 2003), scegliendo le aree dove la sughereta contribuisse in misura determinante alla copertura
3. La Rete infrastrutturale
4. La Fotogrammetria digitale.

Con l'utilizzo del grigliato raster 250 x 250 m si sono ottenuti 1.600 punti campionari posti al centro delle singole celle.

Non tutte le aree erano coperte da sughera, così incrociando il precedente dato e l'UDS 2003, con solo copertura di sughera -corretto con la verifica a terra- si è arrivati a 645 campioni; di questi ultimi si è fatta un'ulteriore selezione escludendo quelli troppo vicini al bordo del poligono individuato dall'UDS, ovvero alla rete stradale o, comunque, ad elementi che potessero essere di disturbo come bacini idrici, caseggiati, ecc..

Per tutti i punti rimasti si è scelto di realizzare un intorno di 25 m di raggio in cui verificare la presenza, o meno, di uno o più alberi di sughera, da cui poter estrarre "la carota di legno" con il *Succhiello di Pressler*. Si è così arrivati a 426 punti di campionamento che interessavano una superficie di analisi di 100 km<sup>2</sup>. Una serie di incendi che si sono verificati nelle annate di studio, in particolare l'ultimo nel luglio 2007 sviluppatosi su circa 10'000 ettari, hanno percorso gran parte della superficie individuata e danneggiato gravemente molti degli alberi prescelti.

La superficie di analisi finale si è, pertanto, ridotta a 9 km<sup>2</sup> con 35 possibili punti di campionamento.

## **Selezione degli alberi candidati all'estrazione delle carote legnose.**

Al fine di ridurre ulteriormente l'influenza di fattori estranei allo studio considerato, si è scelto di stabilire un protocollo per la selezione di alberi dalle caratteristiche comuni.

Il criterio principale è stato quello di selezionare alberi in giovane età con il diametro minimo a petto d'uomo superiore a 15 cm, ma inferiore a 30, non ancora privati del sughero di prima formazione (demaschiatura). Questo perché è stata dimostrata l'influenza positiva dell'estrazione del sughero sulla crescita diametrica dell'albero (Oliveira, 2002; Leal, 2008). Difficilmente, se non per errore, viene estratto il sughero su alberi con circonferenza a "petto d'uomo" (1.30 cm) inferiore ai 60 cm, in quanto le normative vigenti obbligano che la prima estrazione venga fatta a dimensioni superiori o almeno uguali a questa soglia (L.R 4/94). Talvolta, invece, sono rilasciati alberi con dimensioni maggiori, e per questo si è scelta la soglia di 30 cm di diametro massimo a 1.30 cm.

Un altro criterio è stato lo stato sanitario che doveva essere buono, con assenza di evidenti sintomatologie fitosanitarie.

Dalle osservazioni condotte dal Dipartimento Protezione delle Piante dell'Università di Sassari (Luciano e Lentini, 2007) non risultano, per l'area indagata, attacchi di *Limantria dispar* nel periodo 1999-2007, mentre si è rilevato un forte numero di ovature nel 1998. Un attacco di *Malacosoma neustria* ha comportato una notevole defogliazione nel 2003. Comunque nell'area si effettuano regolarmente trattamenti a base di *Bacillus thuringiensis* (Bt), per il controllo dei lepidotteri defogliatori.

Altro parametro preso in considerazione è stato la posizione sociale degli alberi, con esclusione di quelli dominati.

Il numero definitivo di piante individuate è risultato pari a 21. Anche se il numero di campioni è obiettivamente esiguo, il numero di valori che si andranno effettivamente ad utilizzare, determinato dal prodotto fra gli anni in analisi (6) e le piante (21), è in genere considerato sufficiente per un'area campionaria omogenea e per le statistiche utilizzate (Webster e Oliver, 2001).

Le misure effettuate per gli alberi delle celle di 250 x 250 m sono elencate e descritte nella tabella 2.

Tabella 2 – Misure effettuate sugli alberi delle celle di 250 x 250 m

GRANDEZZA RILEVATA	UNITA' DI MISURA	DESCRIZIONE DEL RILIEVO	STRUMENTO UTILIZZATO
Specie		La specie rilevata	
Altezza	Metri	Altezza dell'albero misurato	Ipsometro ad ultrasuoni; per piccole altezze l'asta metrica.
Diametro a 1.30	Centimetri	Rilevamento attraverso due misurazioni ortogonali, ad 1.30 m da terra, per ciascuna pianta.	Cavalletto dendrometrico,
Spessore sughero	Millimetri	Misurazione ad 1.30	Spessimetro per sughero
Altezza corona	Metri	Altezza dal piano di campagna dell'inserzione della prima branca	Asta metrica o Vertex III
Altezza di inserzione della chioma	Metri	Misurazione della distanza tra base del fusto e il ramo più basso della chioma.	Asta metrica
Copertura di chioma	Metri quadri	Misurazione dell'asse maggiore e di quello minore come proiezione della chioma a terra.	Decametro
Dati ancillari		Esposizione, altitudine, tipologia di vegetazione a contorno (solo in caso di sostanziale diversità con il contesto dell'area di analisi)	

## **Prelievo, trattamento e lettura dei campioni**

### *Estrazione e trasporto dei campioni*

L'estrazione delle carote è avvenuta all'altezza di 1.30 m, con il *succhiello di Pressler*, seguendo al massimo quanto suggerito dalle pubblicazioni (Grissino-Mayer, 2003) e dal manuale di utilizzo, agendo nei punti di contatto del cavalletto dendrometrico durante la misurazione dei diametri. L'estrazione è avvenuta nell'autunno-inverno del 2007 in piena stagione di riposo. Su tutte le piante si sono estratti due campioni.

Una volta estratte le carote legnose da ogni albero candidato, si è proceduto alla collocazione delle stesse su un supporto di cartone; "le onduline" di cartone hanno le dimensioni ideali per il trasporto e la conservazione. Su ogni porzione di cartone è stato scritto un codice numerico e le coordinate geografiche, per meglio identificare le carote al momento della misura degli incrementi legnosi in laboratorio.

### *Preparazione delle carote legnose*

Una volta portate in laboratorio, le carote sono state essiccate all'aria per diversi giorni, quindi levigate con carta-veltrata a diversa grana di finezza, applicando lo schema dalla più grossa alla più fine. Le granulometrie variavano da 80 a 320, quest'ultima indispensabile per avere la levigatura migliore.

La levigatura naturalmente è avvenuta nella sezione trasversale del fusto dell'albero.

### *Lettura delle carote levigate*

Sulle carote levigate sono state in seguito effettuate le misure dendrografiche con il sistema completo LINTAB (*Tablet*) e TSAP-Win Professionals (*software*), della RinnTech (RinnTech, 2003) che ha permesso di ottenere buone letture con una precisione del centesimo di millimetro. Le letture sono state eseguite e registrate attentamente secondo lo schema sottostante:

- apertura del file di registrazione sul software TSAP e registrazione dei dati dell'albero a cui apparteneva la "carota legnosa";
- posizionamento del campione sopra il tavolo scorrevole al di sotto del microscopio e verifica preliminare sulla possibile bontà della lettura;
- individuazione dell'estremità da cui partire con la misurazione (anello più esterno)

- lettura del campione, dopo riconoscimento ai diversi ingrandimenti degli anelli legnosi, con direzione dalla corteccia verso il midollo.
- salvataggio del file in versione Heidelberg di default, e come Matrice.

#### *Problemi nella lettura dei campioni.*

Di norma la separazione dei singoli anelli era ben evidente; si era, inoltre, certi dell'anno di partenza della lettura che per tutti gli alberi era il 2007. Un certo grado di incertezza si è manifestato quando si sono eseguite le letture degli anelli successivi, in quanto è molto difficile individuare i falsi anelli nelle singole carote. I falsi anelli, quando presenti, sono probabilmente dovuti a eterogeneità nell'andamento termo-pluviometrico; meno probabili quelli dovuti all'attacco di fitofagi quali la *Limantria dispar* e la *Malacosoma neustrium*, per i motivi citati in precedenza.

Per la maggior parte dei campioni è stato possibile effettuare almeno due letture per il confronto del numero di anelli individuati; con questa procedura si è ridotta la possibilità di avere letture anomale.

In prima analisi gli accrescimenti sono stati valutati per tutti gli anelli, e sulla base di questi si sono potute classificare le piante come correttamente datate o non correttamente datate (differenza fra somma degli accrescimenti e diametro sotto scorza maggiore di 1 cm).

La definizione della precisione di datazione è un importante fattore che verrà preso in considerazione nella modellizzazione. Infatti per le piante non correttamente datate sarà considerato un fattore correttivo, il cui uso si è dimostrato efficace in altre metodologie (Warren, 1980; Caritat et al., 1996).

Le analisi hanno considerato gli incrementi legnosi per il decennio che va dal 1998 al 2007, per i quali si ha la serie storica più completa dei dati forniti dal SAR per le stazioni meteorologiche di Nuoro e di Bitti; per le analisi più avanzate basate sulle immagini MODIS è stato considerato un periodo di sei anni, dal 2002 al 2007.

## Analisi statistica

L'analisi statistica si è svolta in sei fasi:

1. statistiche generali;
2. correlazione con i dati climatici su larga scala;
3. analisi dell'autocorrelazione spazio-temporale;
4. ottimizzazione dei dati (simulazione Annealing);
5. modellizzazione dei dati di accrescimento con i valori MODIS (modello misto non lineare);
6. predizioni.

### *Le statistiche generali (o riassuntive)*

Le statistiche generali permettono di valutare la variabilità dei dati e come essi sono distribuiti. Per questo motivo, alle classiche misure di posizione (media, minimo, massimo) e di dispersione (varianza) si sono affiancate quelle di simmetria (Skew e Curtosi). Nel caso di distribuzioni fortemente asimmetriche è necessaria la trasformazione del dataset per ricondurlo ad una distribuzione normale, sulla quale sono basate la gran parte delle metodologie statistiche. Una delle trasformazioni più comuni, per la sua flessibilità ed efficacia, è quella proposta da Box e Cox (1964). In realtà si tratta di una famiglia di trasformazioni in grado di convertire un set di  $n$  osservazioni con forte asimmetria in un set di  $n$  osservazioni indipendenti distribuite normalmente e con una varianza costante. La trasformazione si basa su un parametro  $k$  opportunamente scelto. Le osservazioni trasformate  $y^{(k)}$  sono ottenute dal seguente sistema:

$$y^{(k)} = \log(y) \text{ for } k=0$$
$$y^{(k)} = (1/k) * ((y^k) - 1) \text{ for } k \neq 0$$

### *Correlazione con dati climatici su larga scala*

I dati meteorologici SAR purtroppo derivano da due sole stazioni (Bitti e Nuoro). I valori, quindi, non sono spazializzati e non attribuibili specificatamente alla posizione dei punti campionari. Per questo motivo, i dati SAR sono stati utilizzati per osservare l'effetto delle medie annuali dei principali parametri climatici sugli accrescimenti delle singole piante (dato locale) e sulla media degli accrescimenti (la

media per ogni anno degli accrescimenti delle piante in studio) (dato generale). Il parametro utilizzato è il coefficiente di correlazione di Pearson (Hair Jr. et al, 1998).

Nel caso del dato locale gli incrementi della pianta  $p$  sono stati correlati con le seguenti variabili climatiche rilevate nelle stazioni di Bitti e Nuoro: precipitazioni cumulate nel periodo Ottobre – Febbraio (per l'influenza che esse hanno sulla ripresa vegetativa nella primavera successiva (Leal, 2008); precipitazioni annue; medie annue delle temperature minime e massime. Nel caso del dato generale, le stesse variabili climatiche sono state correlate con le medie degli incrementi annuali di tutte le piante.

### *L'analisi dell'autocorrelazione spazio-temporale*

Per covarianza spazio-temporale intendiamo la forma di correlazione esistente tra il parametro (o i parametri) in studio e le dimensioni dello spazio e del tempo (Cressie e Huang, 1999). Può essere modellata con una singola o una combinazione di diverse strutture matematiche, tra le quali le più comuni sono l'esponenziale, la sferica e la Matern (Cressie, 1993); comunque scelte dopo un'analisi preliminare dell'autocorrelazione ovvero del variogramma (variografia) (Webster e Oliver, 2001).

L'analisi dell'autocorrelazione spazio-temporale dei dati di accrescimento si è basata sull'iniziale visualizzazione della covarianza, calcolata come inverso del variogramma (covarianza sperimentale). Sulla base della forma della covarianza è stata scelta un'opportuna curva-funzione (covarianza teorica) in grado di modellare la covarianza sperimentale. La bontà del modello di covarianza teorica è stata testata attraverso gli errori del modello finale. Il processo di perfezionamento della covarianza teorica è dunque un processo iterativo, in cui le modifiche alla curva del variogramma vengono apportate in relazione all'errore finale del modello nel quale la covarianza teorica viene applicata (Christakos, 1992).

## L'ottimizzazione dei dati (simulazione Annealing);

La simulazione Annealing (Geman e Geman, 1984; Farmer, 1992; Deutsch e Journel, 1998; Goovaerts, 1997) fu sviluppata inizialmente come un algoritmo d'ottimizzazione, tuttavia è anche adatta a generare delle realizzazioni che siano condizionate ad assumere proprietà predeterminate e incorporate nella funzione obiettivo. L'idea base è quella di perturbare lo stato iniziale (il modello con i parametri iniziali) gradualmente, in modo che siano riprodotte particolari proprietà statistiche di uno stato assunto come riferimento o la minimizzazione (massimizzazione) del valore iniziale della funzione obiettivo.

Questo approccio presenta il notevole vantaggio di risultare molto flessibile, potendo produrre realizzazioni che soddisfano diversi tipi di informazioni; l'inconveniente è che può procedere molto lentamente, nel caso in cui si vogliano perseguire più obiettivi contrastanti. Il segreto per il successo di una tale applicazione è di riuscire a giudicare molto rapidamente la qualità dello stato ottenuto fra due perturbazioni e di decidere se conservare o meno la perturbazione.

In questo contesto la procedura Annealing è stata applicata al modello misto non lineare (NLM). Complessivamente il modello NLM è stato utilizzato due volte: la prima con la simulazione Annealing in modo da ottimizzare alcuni parametri; la seconda per la modellizzazione delle variabili e per la produzione delle predizioni (vedi punti successivi).

Il modello non-lineare misto applicato è quello di Lindstrom e Bates (1990):

$$y_{ij} = f(\varnothing_i, x_{ij}) + e_{ij}$$

dove  $y_{ij}$  è il valore atteso nel punto spazio-temporale  $j$  per il campione  $i$ ;  $x$  è il vettore contenente i valori della variabile dipendente;  $f$  è una funzione non-lineare che lega i valori osservati a un insieme di parametri indicati con  $\varnothing_i$  e  $e_{ij}$  è, infine, il rumore ovvero l'errore distribuito secondo una normale. Nella sua configurazione più semplice, il modello è costituito da fattori fissi (paragonabili alle variabili indipendenti di un modello generale lineare o non-lineare) e fattori random (ovvero le variabili di raggruppamento della varianza residua, con le quali si cerca di "spiegare" quest'ultima) (Box et al., 1994).

Dati  $r$  il numero dei punti nello spazio e nel tempo,  $p$  il numero delle variabili per i fattori fissi e  $q$  quello dei fattori random,  $\varnothing$  è un vettore parametri che varia da campione a campione:



$$\varnothing_i = A_i\beta + B_i b_i$$

dove:  $\beta$  è un vettore di lunghezza  $p$  contenente i parametri dei fattori fissi;  $b$  è un vettore di lunghezza  $q$  contenente i parametri per i fattori random;  $A$  e  $B$  sono le matrici di dimensioni  $r \times p$  (fattori fissi) e  $r \times q$  (fattori random) rispettivamente.  $b$  è assunto come normalmente distribuito.

In presenza di un'autocorrelazione spazio-temporale il modello assume la seguente forma (Yan et al., 2007):

$$y_{ij} = f(\varnothing_i, x_{ij}) + Z_i + e_{ij}$$

in cui  $Z$  è il vettore, di lunghezza pari a  $r$ , catturante la correlazione spazio-temporale.  $Z$  ha una distribuzione normale multivariata con media 0 e covarianza determinata dal co-variogramma.

Il modello viene risolto attraverso il metodo del *maximum likelihood* (ML) ovvero di verosimiglianza. Si tratta essenzialmente di un approccio analitico, in cui il sistema di equazioni (parametri incogniti) è risolto secondo quei valori che massimizzano il logaritmo della funzione non-lineare (Anderson et al., 1986).

Una volta descritto il modello (NLM), possiamo entrare nel dettaglio della simulazione Annealing adottata. Prima di tutto occorre definire sei elementi:

- le variabili scelte nel NLM;
- i parametri variabili ad ogni interazione;
- la funzione obiettivo;
- l'algoritmo di simulazione;
- la procedura di raffreddamento del sistema;
- la funzione di terminazione della simulazione (criterio Metropolis).

L' NLM è composto dai seguenti fattori fissi: i dati satellitari estratti dalle immagini MODIS, ovvero le temperature alla superficie diurna (LSTD) e notturna (LSTN), il valore nell'infrarosso medio (MIR) e due indici di vegetazione (NDVI e EVI). I fattori random, invece, sono variabili categoriali quali: la classe diametrica, la classe ipsometrica, la classe volumetrica di chioma e la classe diametrica sotto-

scorza; infine, la classe di quota è stata scelta come variabile esplicativa della varianza residua spaziale.

La classificazione dei fattori random secondo tre classi si è basata sui valori riportati in tabella 3, ottenuti considerando quartili equo-proporzionali (ovvero intervalli di misura con un eguale numero di campioni).

Tabella 3. Sistema di classificazione delle variabili in tre gruppi.

Parametro	Range	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Altezza	4.1 – 7.5 m	< 5.0 m	5.1 m – 6.0 m	> 6.1 m
Diametro 1.30	18 – 30 cm	< 22.5 cm	22.6 cm – 27.5 cm	> 27.6 cm
Diametro sotto scorza	11.8 cm – 20.0 cm	< 15.0 cm	15.1 cm – 17.0 cm	> 17.1 cm
Volume di chioma	22 m <sup>3</sup> - 88 m <sup>3</sup>	< 30 m <sup>3</sup>	31 m <sup>3</sup> - 60 m <sup>3</sup>	> 61 m <sup>3</sup>
Quota	366 m – 805 m	< 625 m	626 m -710 m	> 711 m

Durante la simulazione, si sono alterate le seguenti quattro variabili:

- i. variabile di raggruppamento della varianza residua; ad ogni perturbazione questa variabile è scelta tra le quattro possibili: classe diametrica, classe ipsometrica, classe di diametro sotto scorza, classe di volume di chioma;
- ii. due variabili di aggiustamento dell'errore nella valutazione delle coordinate spaziali (errore del GPS);
- iii. una variabile di correzione degli incrementi relativa ai campioni con alto contenuto di errore (errata datazione).

Come già chiarito in precedenza, si è ritenuto alto l'errore quando la differenza tra la somma degli incrementi e il valore del diametro sotto-scorza era superiore a 1 cm (13 piante su 19).

La funzione obiettivo (O) della simulazione Annealing è composta dalla radice quadrata della somma quadratica tra il *Deviance Information Criterion* (DIC) e la differenza tra valori predetti e reali. Il DIC è utilizzato come misura della bontà del modello in relazione alla sua complessità, in genere applicato per analisi Bayesiane di tipo gerarchico (Ward, 2008). E' una statistica proposta da Spiegelhalter et al.

(2002), che si basa sulla devianza nelle predizioni rispetto all'effettivo numero di parametri del modello.

La funzione obiettivo è in definitiva calcolata ad ogni interazione come:

$$O = DIC + \sqrt{\left( \text{originali} - \text{predetti} \right)^2}$$

Nel processo di simulazione sono accettati prevalentemente (come descritto più avanti a riguardo del raffreddamento) i valori che minimizzano  $O$  fino allo 0.

L'algoritmo della simulazione è basato sul Criterio Metropolis ( $CM$ ). Due stati (definiti da due interazioni successive) sono comparati secondo una funzione esponenziale (Goovaerts, 1997). Per cui, data l'interazione  $m$  si avrà:

$$CM_m = \exp(-(O_m - O_{m-1})/T)$$

dove  $CM$  è il valore del criterio,  $O$  la funzione obiettivo e  $T$  la temperatura del sistema. Il valore attuale della funzione obiettivo è accettato quando è inferiore a quello della precedente interazione. Nel caso, invece, che il valore attuale della funzione obiettivo sia superiore a quello precedente, il  $CM$  viene comparato con un valore estratto casualmente da una distribuzione uniforme con minimo 0 e massimo 1; se quest'ultimo è inferiore al  $CM$ , allora il valore attuale di  $O$  è accettato. Questo permette di accogliere anche valori della funzione  $O$  che risultino maggiori rispetto ai precedenti, permettendo di sfuggire da minimi locali (Deutsch e Journel, 1998).

La temperatura precedentemente definita consente di regolare il numero di valori accettati che presentano incrementi nella funzione obiettivo. Infatti al decrescere della temperatura è sempre meno probabile che un valore superiore sia accettato. Il sistema che consente di abbassare la temperatura è fondato sul numero di iterazioni. Ogni  $n$  iterazioni, il sistema viene raffreddato. Da un punto di vista pratico, si eseguono diverse prove preliminari in modo da definire la temperatura migliore e l'intervallo della sua decrescita.

La funzione di terminazione del processo è quella definita da Kirkpatrick et al. (1983), ovvero il sistema si considera stabilizzato quando non si hanno variazioni

della funzione obiettivo per un numero di iterazioni pari a tre volte quello necessario per abbassare la temperatura. A questo punto si dice che il sistema è “congelato”.

Da un punto di vista operativo tutti i parametri del modello sono stati fatti variare secondo le rispettive distribuzioni definite a priori:

- i. normale, con media pari all'attuale incremento e varianza pari a 5 per il fattore correttivo degli incrementi;
- ii. uniforme, con minimo 0 e massimo 10 metri per la variabile di aggiustamento delle coordinate;
- iii. uniforme per la scelta della variabile di raggruppamento della varianza (ad ogni iterazione una sola viene scelta tra le quattro proposte).

Riassumendo, lo stato iniziale viene modificato sequenzialmente, “perturbando” o riassegnando un valore ad ogni variabile, secondo la distribuzione dei valori scelta a priori. Una perturbazione è accettata se abbassa la funzione obiettivo, ovvero la differenza media al quadrato della somma tra un indice di bontà del modello (DIC) e le differenze tra valori predetti e misurati per un dato numero di punti scelti casualmente. Non tutte le perturbazioni che innalzano la funzione obiettivo, tuttavia, sono rifiutate: il successo del metodo dipende dal “lento raffreddamento” del processo, che è controllato da una funzione della “temperatura” che diminuisce col tempo. Più alta è la “temperatura” (o il parametro di controllo), maggiore è la probabilità che una perturbazione sfavorevole sia accettata. All’inizio, dunque, più perturbazioni non favorevoli sono accettate: lo scopo di tale strategia è di evitare la rapida convergenza a minimi locali. La simulazione si arresta quando la realizzazione si è “congelata”, ovvero quando ulteriori perturbazioni non abbassano significativamente la funzione obiettivo o quando quest’ultima ha raggiunto un minimo predeterminato. Il risultato finale preserva alcune caratteristiche statistiche della configurazione iniziale: ripetendo l’algoritmo, facendo variare la configurazione d’inizio, si ottiene un insieme di realizzazioni ugualmente probabili.

## **La modellizzazione**

Al termine di una prima fase in cui il modello è stato simulato seguendo una tecnica Annealing, è stato possibile correggere le coordinate e gli incrementi, e definire quale variabile abbia la maggiore influenza (in altre parole “spiega meglio”) sulla varianza dei residui.

Lo stesso modello NLM utilizzato nell'Annealing, ma riparametrizzato, è stato applicato con i nuovi valori per la realizzazione di un modello predittivo.

L'utilizzo di questo modello ha l'obiettivo di superare alcune delle problematiche e di semplificare i modelli dendrocronologici utilizzati in passato (Caritat et al., 1996; Costa et al., 2002) che al trattamento degli incrementi facevano seguire solo un'analisi della correlazione con fattori climatici (valori di temperatura e precipitazione da stazioni meteorologiche). Oggigiorno, la presenza di tecnologie più avanzate consente di utilizzare modelli complessi, multi-parametrici e di combinare in un'unica funzione il pre-trattamento dei dati con il modello vero e proprio.

## **Predizioni**

Il modello predittivo realizzato nella precedente fase è stato utilizzato per ottenere delle predizioni annuali (dal 2002 al 2007), bi-annuali (2002-2003, 2004-2005, 2006-2007) e globale (2002-2007), su un'area più vasta rispetto a quella dei soli campioni. Le informazioni necessarie per la predizione sono organizzate in una griglia dove ad ogni nodo sono associati i valori di LSTN, LSTD, MIR, NDVI, EVI, classe di quota e classe di chioma. Quest'ultima è, infatti, la variabile che ha un maggior peso nei residui. È stata spazializzata (in modo da avere un dato puntuale riferito all'intera superficie considerata nelle predizioni), considerando le classi di chioma delle piante carotate, più quelle di 20 ulteriori piante prese nell'area in esame. La tecnica di spazializzazione utilizzata è il kriging (Webster e Oliver, 2001), che ha permesso di ottenere una mappa dei valori crudi della variabile. I valori sono stati successivamente classificati nei tre gruppi considerati (tab. 3).

## RISULTATI

La trattazione dei risultati seguirà le fasi analitiche della ricerca: correlazione con dati climatici a larga scala; autocorrelazione spazio-temporale; analisi con dati climatici ad alta risoluzione. Le statistiche generali saranno trattate nelle prime tre parti dei risultati.

### Correlazione con dati SAR

Il dataset inizialmente era composto da 21 piante. Due di esse sono state scartate perché le carote legnose erano di lettura incerta.

Solo per alcune piante sono stati identificati e misurati gli ultimi 17 anelli (1990 – 2007), mentre per la maggior parte di esse si è riusciti a risalire sino a 10 – 11 anni prima (dal 1997 – 1998 al 2007). Questo perché durante l'estrazione alcune carote di legno si spezzavano, o non raggiungevano il centro del fusto; in definitiva solo per 6 alberi si dispone della intera sezione radiale.

Si posseggono, comunque, valori degli incrementi legnosi per gli anni corrispondenti alle serie storiche del SAR (1997 - 2007). Come già accennato, le due stazioni si trovano piuttosto distanti dall'area indagata e non permettono uno studio su microscala; in altre parole, non è possibile correlare i dati puntuali, concernenti gli incrementi, con quelli climatici derivati dalle due stazioni.

I risultati mostrano che solo 5 piante su 19 presentano una correlazione significativa e superiore a 0.7 con alcuni dei parametri ambientali relativi alla temperatura. Per il dato generale, la media degli incrementi ha confermato, con più alta significatività, le correlazioni con tutte le variabili legate alla temperatura: 0.83 con la media delle minime di Bitti; 0.90 con la media delle minime di Nuoro; 0.90 con la media delle massime di Bitti; e infine 0.75 con la media delle massime di Nuoro. I valori indicano una diretta correlazione (positiva), ovvero, gli incrementi legnosi crescono al crescere della temperatura massima e di quella minima.

L'analisi della correlazione di Pearson dimostra che su larga scala gli incrementi medi di un campione di sughere sono strettamente legati all'andamento termometrico. Singolarmente questo legame è meno evidente, presumibilmente per l'effetto prevalente dei fattori locali, i quali saranno analizzati attraverso metodologie statistiche più complesse applicate a dati ad alta risoluzione spaziale.

## L'autocorrelazione spazio-temporale

Lo studio della covarianza spazio-temporale è la fase preliminare di tutte le analisi geostatistiche. In questa ricerca si sono considerati gli incrementi annuali dal 2002 al 2007 delle 19 piante georeferite. I sei anni sono stati scelti perché corrispondenti alla serie temporale disponibile delle immagini MODIS.

Prima di analizzare l'autocorrelazione è necessario valutare ogni possibile scostamento del dataset dalla distribuzione normale, vista l'alta sensibilità di questo tipo di analisi verso dati distribuiti asimmetricamente.

Le statistiche generali riguardanti gli incrementi durante i sei anni in analisi e per tutte le piante sono riportate nella tabella 4.

Tabella 4 - Principali statistiche degli incrementi annuali ( $\text{mm} \cdot 10^{-2}$ ) del legno nei 19 campioni considerati per gli anni dal 2002 al 2007.

<b>Statistiche</b>	<b>Dati originali</b>	<b>Dati trasformati</b>	<b>Dati corretti</b>
Minimo	120.00	6.61	75.38
Massimo	984.00	15.68	946.80
Media	406.90	11.36	399.59
Deviazione standard	184.92	1.91	200.87
Mediana	369.25	11.39	324.65
Skew	0.85	-0.01	0.60
Curtosi	0.19	2.52	0.11

I valori originali sono stati trasformati in modo tale da assumere le caratteristiche di una distribuzione normale. Nelle figure 14 e 15 si possono osservare le differenze nella distribuzione del dataset non trasformato con quello trasformato.

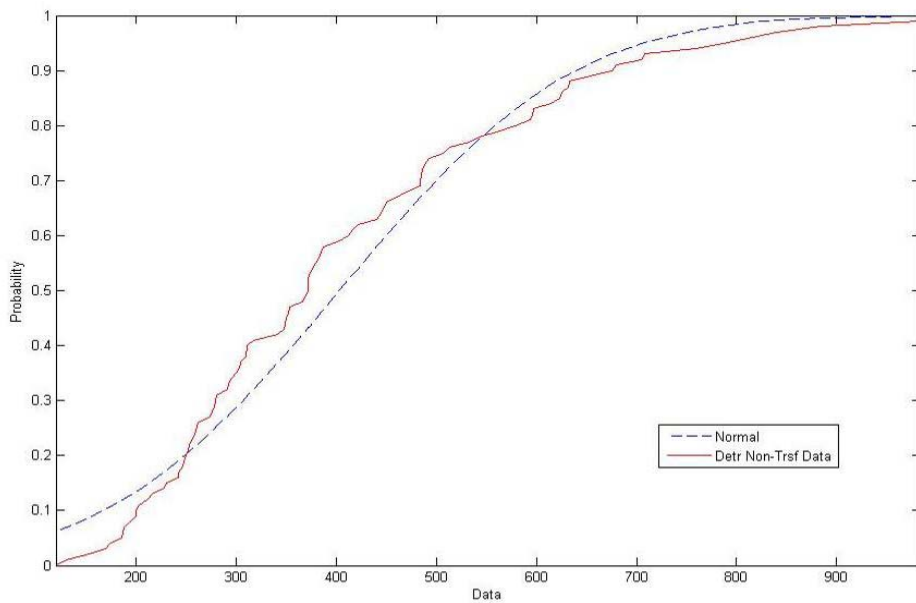


Figura 14 - Raffronto tra una distribuzione normale e i dati originali.

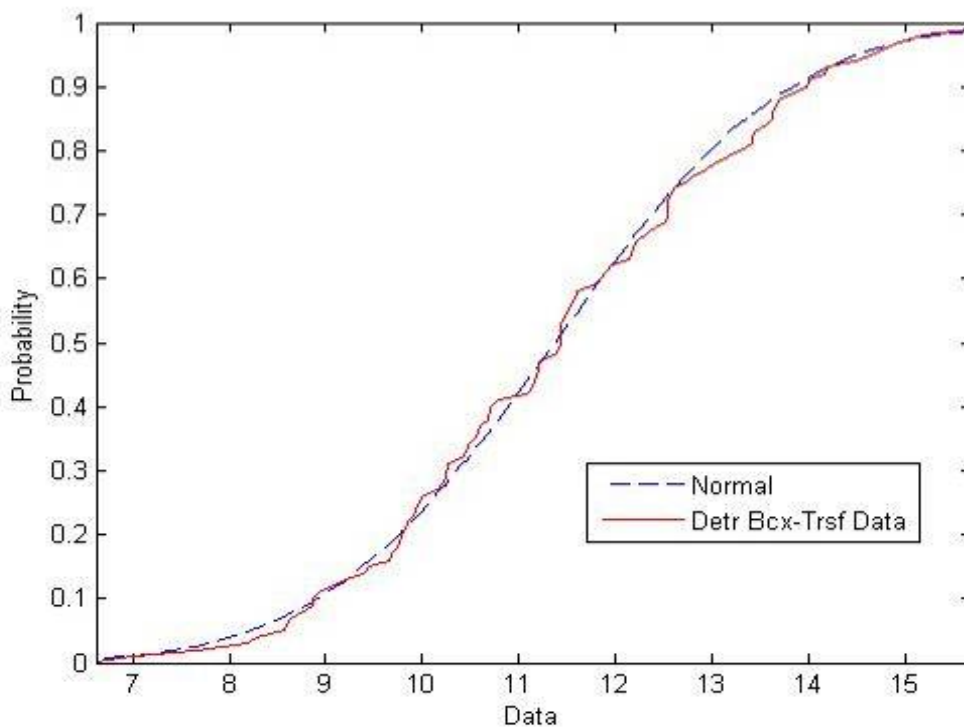


Figura 15 - Raffronto tra una distribuzione normale e i dati trasformati.

Come si osserva dal confronto tra le due figure, i dati trasformati (Fig. 15, tab 4 colonna 2) si approssimano meglio alla curva della normale di riferimento. La trasformazione e' stata realizzata attraverso il metodo Box-Cox (Box e Cox, 1964).



Successivamente alla trasformazione, i dati sono stati testati per l'autocorrelazione spazio-temporale. È stato creato un modello sperimentale di covarianza spazio-temporale, considerando come range spaziale la massima distanza tra le piante (2'750 m), e come range temporale 6 anni (Figg. 16, 17 e 18).

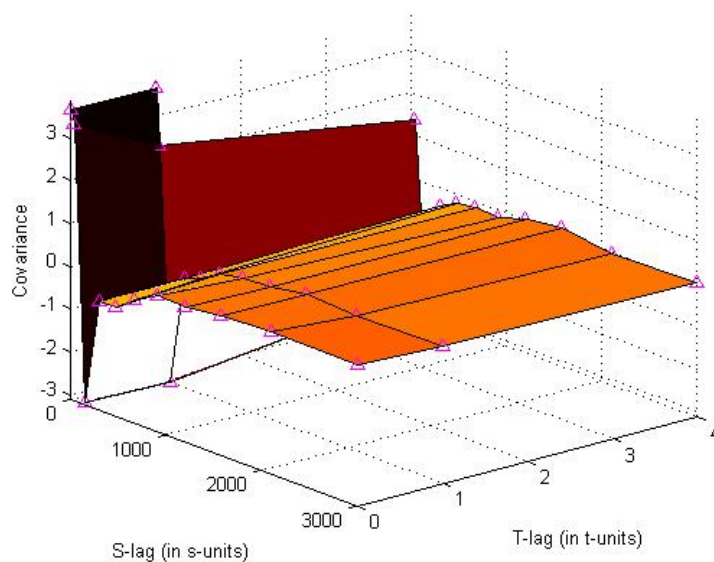


Figura 16 - Covarianza spazio temporale nelle direzioni N-S

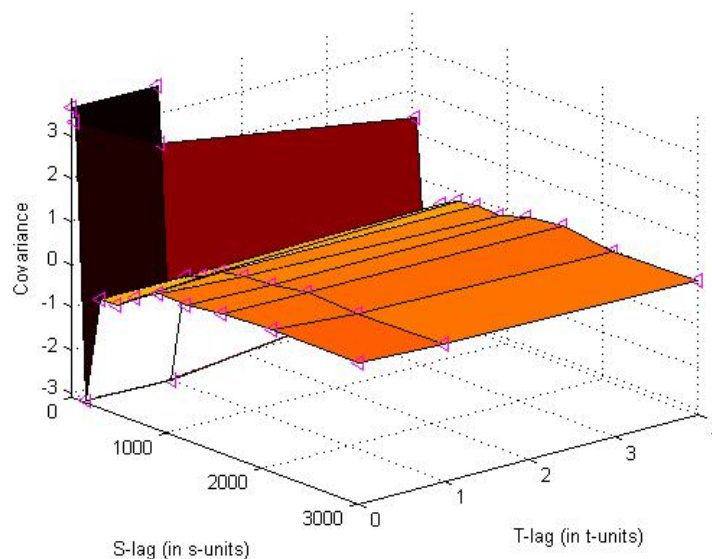


Figura 17 - Covarianza spazio temporale nelle direzioni E-O

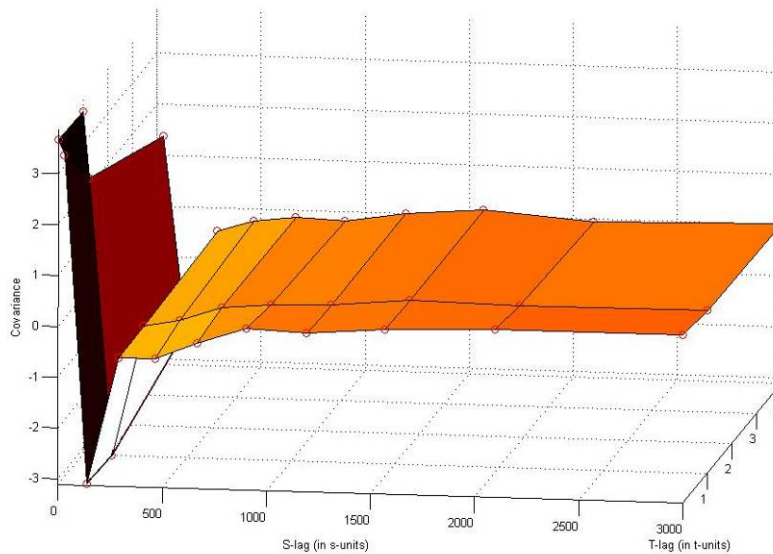


Figura 18 - Covarianza spazio temporale in tutte direzioni

Dal raffronto delle tre figure si può osservare che non esiste nessuna disomogeneità spazio-temporale nel senso che il fenomeno ha la stessa forma in tutte le direzioni. Inoltre, è presente un “effetto buco” (Webster e Oliver, 2001) intorno a 100 m e 1 anno. In genere è determinato dal campionamento e si verifica per mancanza di valori al di sotto di una distanza fissa (in questo caso 200 m nello spazio e 1 anno nel tempo).

La covarianza sperimentale è stata modellata utilizzando un modello esponenziale sia per le dimensioni spaziali che per quella temporale, con parametri di 300 m per il range spaziale ( $r_s$ ) e 4 anni per quello temporale ( $r_t$ ) (Fig. 19 ).

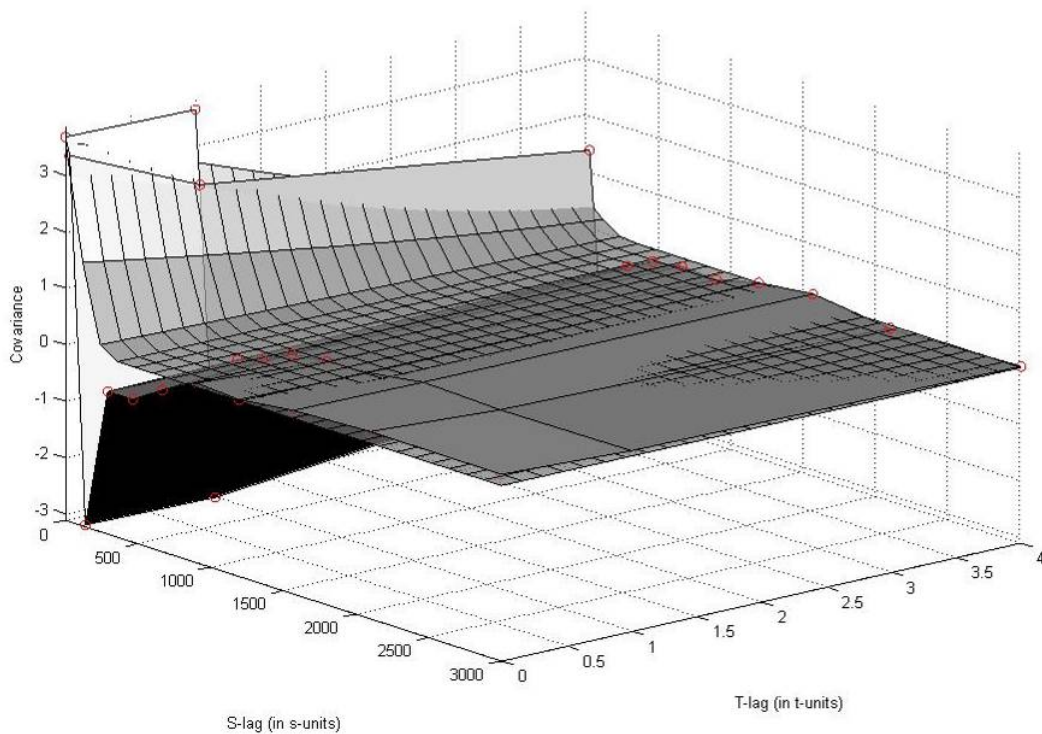


Figura 19 - Immagine tridimensionale della covarianza sperimentale (superficie uniforme) e modello applicato di covarianza teorica (grigliato).

La formulazione matematica della covarianza teorica è la seguente:

$$Ct = \sigma^2 \left[ \exp\left(\frac{3 ds}{rs}\right) \exp\left(\frac{3 dt}{rt}\right) \right]$$

Dove per ds si intende la distanza euclidea lungo lo spazio e dt quella lungo la dimensione temporale.

### **Correlazione con dati climatici ad alta risoluzione. I – Simulazione Annealing.**

Una volta definito il modello di covarianza spazio temporale i dati sono stati inseriti in una procedura di simulazione Annealing,

Per giungere al suo completo congelamento il modello è stato ripetuto per 20'000 volte (Fig. 20).

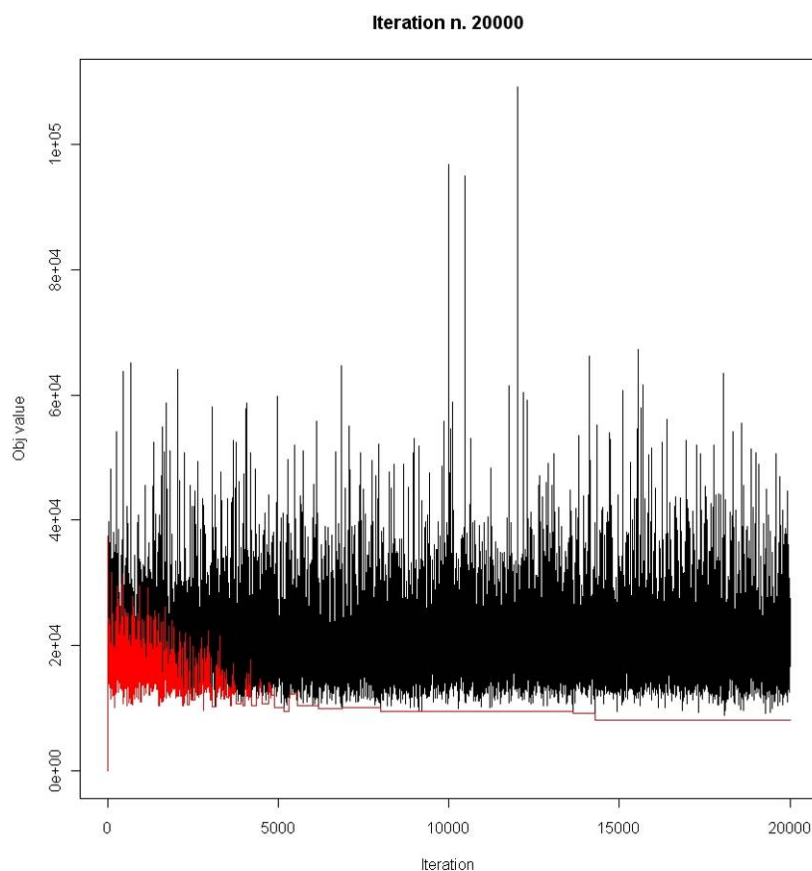


Figura 20 - Simulazione Annealing: il valore attuale della funzione obiettivo, (linea nera), rispetto alla sua ottimizzazione (linea rossa).

La simulazione ha permesso la riduzione della funzione obiettivo di quasi il 60% del valore iniziale. Inoltre ha promosso come variabile esplicativa degli effetti random la classe di volume di chioma, alla quale corrispondono i più bassi valori di funzione obiettivo.

In tabella 4, 3° colonna, sono riportate le statistiche relative ai dati corretti rispetto alla simulazione Annaelling, in altre parole gli incrementi corretti attraverso l'uso di una variabile normale con media pari al valore originale dell'incremento e varianza pari a 5.

Dalla tabella 4 (prima e terza colonna), si evince una sostanziale maggiore omogeneità dei dati corretti rispetto ai valori originali, nel senso di una ridotta varianza e asimmetria seppur con un incremento dell'intervallo di range.

## Correlazione con dati climatici ad alta risoluzione. II – Modellizzazione.

Il modello non-lineare misto applicato prevede come variabile dipendente gli incrementi annuali corretti; come variabili indipendenti, o fattori fissi, l' LSTN, LSTD, MIR, NDVI e EVI; come fattore random la classe del volume di chioma; e infine come funzione di stabilizzazione della varianza spaziale, la classe di quota.

Di seguito sono riportati i principali parametri e coefficienti ottenuti con il modello NLM (tabella 5)

Tabella 5. Parametri, coefficienti e significatività del modello misto spazio-temporale applicato agli incrementi legnosi.

<b>Parametro</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Significatività</b>
Intercetta	2·251.54	<0.001
Beta-MIR	2·294.69	<0.001
Beta-LSTD	16.94	<0.001
Beta-LSTN	-30.75	<0.001
Beta-NDVI	2·198.81	<0.001
Beta-EVI	-132.64	<0.001
DIC	173.50	

I valori dei coefficienti sono direttamente proporzionali alla grandezza fisica delle variabili. In ordine il range per MIR, LSTD, LSTN, NDVI e EVI è: 0.058 – 0.116, 274.59 – 295.33, 272.84 – 282.44, 0.57 – 0.75, 0.22 – 0.38.

E' chiaro l'effetto positivo del contenuto di acqua, della temperatura diurna, e della biomassa (vigore vegetativo). Mentre gli incrementi sono correlati negativamente con le temperature notturne e l'EVI. La distinzione tra il comportamento dell'NDVI e dell'EVI nel modello non è chiaro. Possiamo sicuramente affermare, da un punto di vista prettamente statistico, che la maggiore variabilità nei valori dell'EVI rende questo parametro meno esplicativo dell'NDVI, e addirittura porta a valori di correlazione negativi.

Complessivamente il modello ha un buon valore di DIC, se comparato con i possibili valori ottenuti durante la simulazione Annealing.

Il coefficiente negativo della temperatura notturna, ottenuto in fase di modellizzazione, e la correlazione positiva con le minime, espresso in fase di

correlazione di Pearson, non sono in antitesi. Infatti, temperature notturne alte contribuiscono ad uno stato di stress della pianta, mentre le temperature minime rappresentano estremi in fase di riposo vegetativo della pianta. In ultima analisi le temperature notturne risultano mediamente più alte rispetto alle temperature minime, riducendo il range in cui queste giocano un ruolo positivo nella stessa pianta.

### Correlazione con dati climatici ad alta risoluzione. III – Predizioni.

Il modello è stato utilizzato per spazializzare gli incrementi su una superficie 25 km (5 x 5 km). I dati MODIS ad ogni nodo della griglia sono stati estratti dal dataset TALA (così come avvenuto per quelli relativi alle 19 piante in studio); quelli di quota dal modello di elevazione digitale (Fonte DESA) e quello di classe di volume di chioma da un ulteriore campionamento di 20 alberi di stessa classe diametrica nella medesima area (Fig. 21).

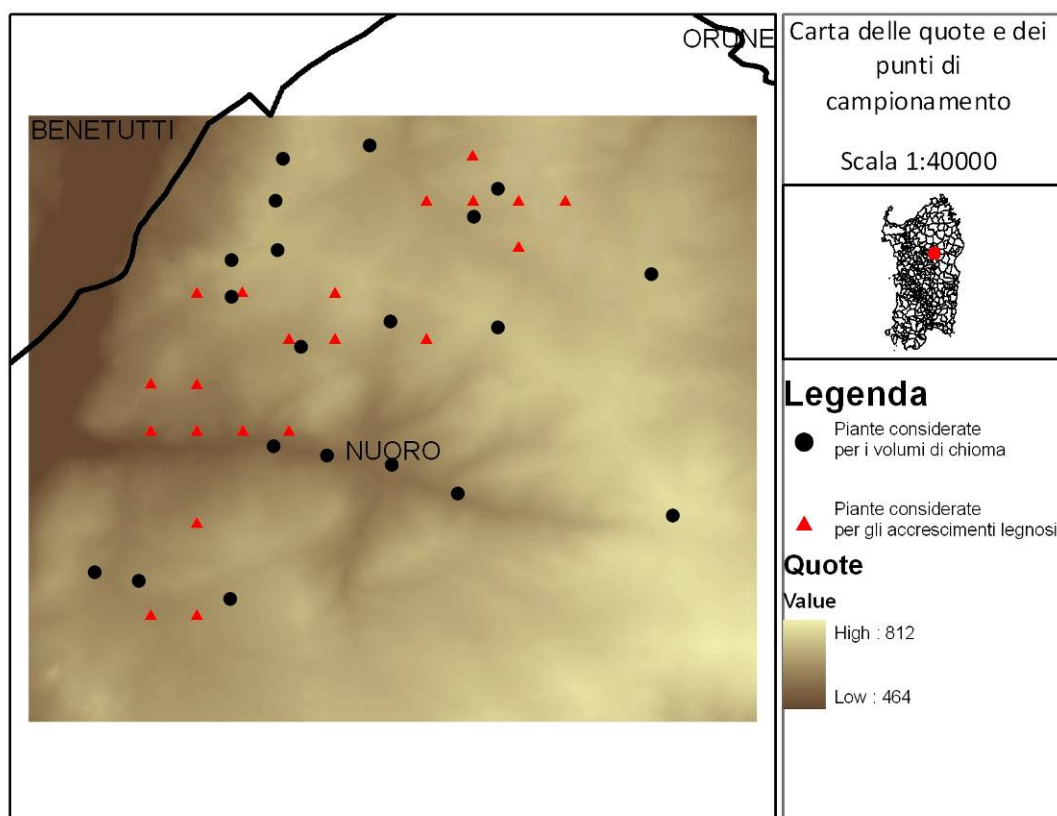


Figura 21. Area di studio e campionamenti (sfondo: DEM)

I volumi di chioma delle 20 piante campionate, a cui sono assommate le 19 originali, sono stati spazializzati attraverso la procedura del kriging. Il variogramma sperimentale per il volume di chioma è stato creato con 7 lag spaziali di 450 m. Il variogramma teorico per la modellazione del variogramma sperimentale è un modello sferico con varianza non spazialmente correlata (nugget) di 12.5, varianza spazialmente correlata (sill) di 1'236 e range di 774.96 m (Fig.22).

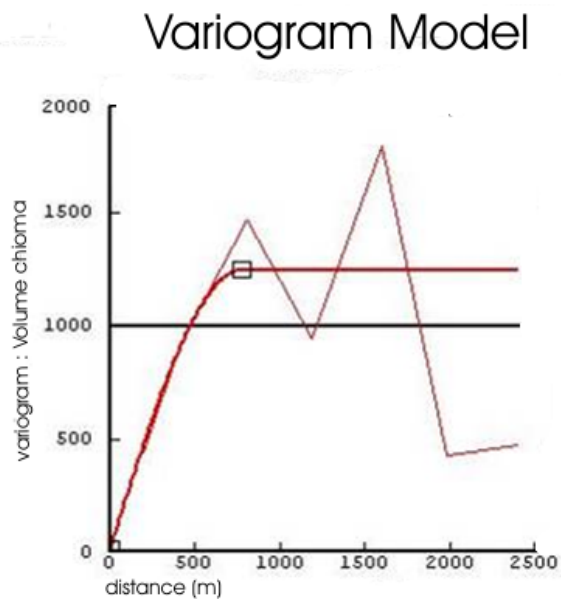


Figura 22. Variogramma sperimentale (linea sottile) e teorico (linea spessa) per il volume di chioma delle 39 piante (20 delle quali provenienti dal nuovo campionamento).

La *cross validation* è la metodologia più comune per testare il variogramma. Si tratta di rimuovere un dato alla volta e di stimarlo attraverso i restanti. L'errore medio nella differenza tra originali e stimati è di 0.25 con una deviazione standard di

1.00.

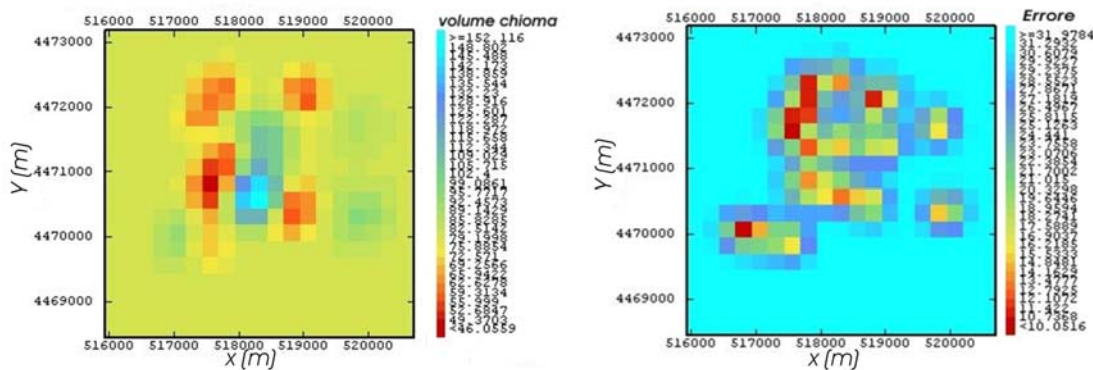


Figura 23. Spazializzazione del volume di chioma per l'area vasta. Sulla sinistra le stime e sulla destra la mappa di errore associato alle stime.

Le mappe di kriging del volume di chioma sono mostrate nella figura 23. Ovviamente le migliori stime sono quelle dei punti in cui il dato è campionato (colori caldi sulla mappa di destra). Complessivamente l'errore ottenuto è accettabile e varia tra il 10 e 20%.

Attribuite le classi di chioma ai valori di volume di chioma ed estratti ad ogni nodo della griglia, il modello spazio-temporale non-lineare misto è stato applicato per le predizioni.

Nella pagina seguente (Fig. 24) sono riportate le mappe annuali, dal 2002 al 2007, degli incrementi legnosi per l'area di 5 x 5 km.

E' di sicuro interesse quello che sta succedendo nei quadranti sud-ovest e nord-est (tralasciando le informazioni provenienti dal quadrante sud-est, in cui non ci sono campioni), e in generale in tutta l'area. Infatti si può ben osservare un incremento generale degli accrescimenti legnosi, soprattutto nel quadrante sud-ovest. In prima analisi, se si osservano le medie annuali dei vari parametri calcolati attraverso le immagini MODIS, questo andamento non sembra essere legato a particolari trend climatici (tabella 6)



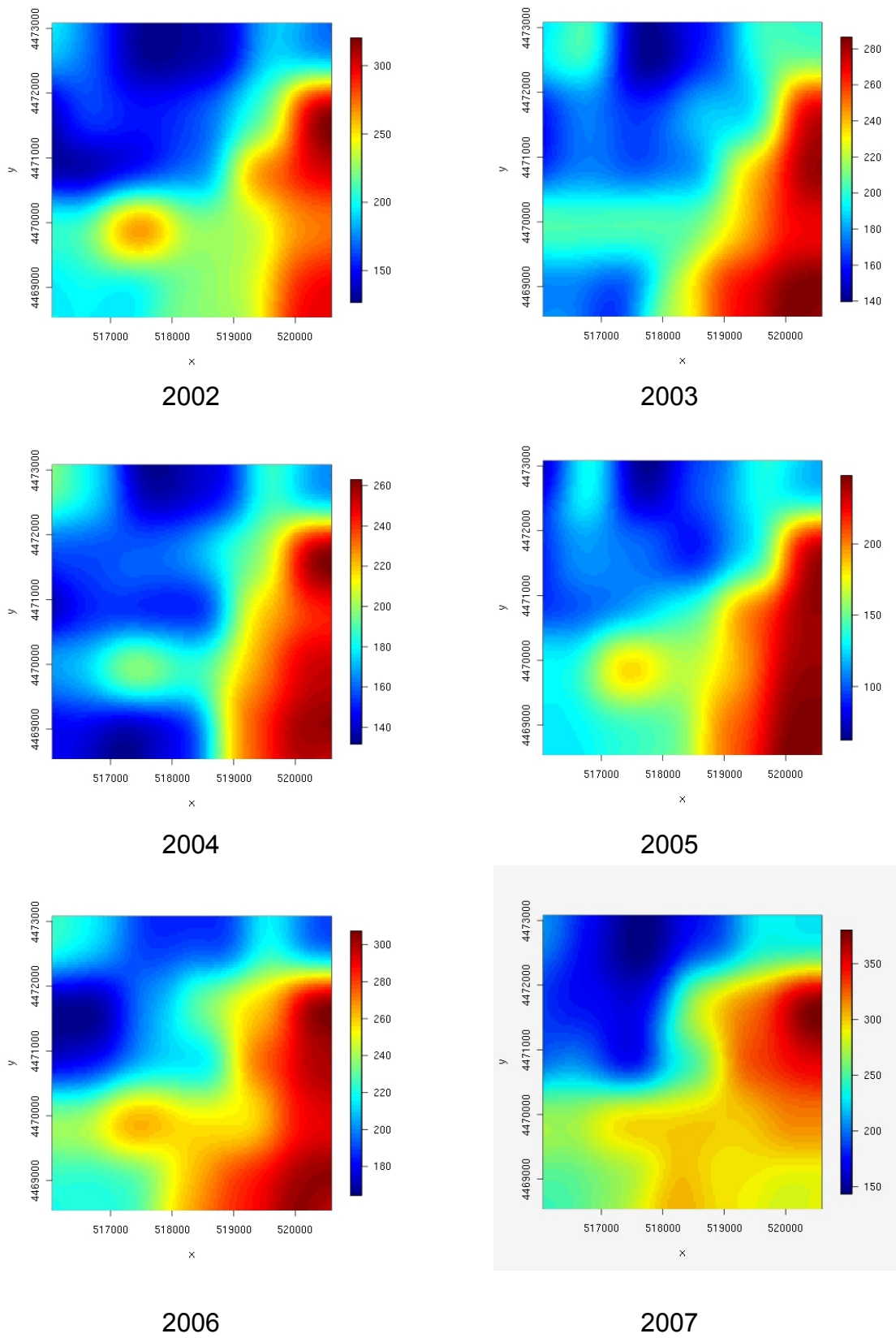


Figura 24. Mappe annuali degli incrementi legnosi per l'area vasta.

Tabella 6. Medie annuali delle variabili estratte dalle immagini MODIS. In parentesi i valori medi relativi al settore sud dell'area.

Anno	MIR	LSTD	LSTN	NDVI	EVI
2002	0.09 (0.09)	293.75 (293.63)	281.49 (281.22)	0.66 (0.67)	0.32 (0.33)
2003	0.10 (0.10)	295.15 (295.09)	281.79 (281.52)	0.64 (0.65)	0.32 (0.33)
2004	0.09 (0.09)	291.10 (290.75)	279.57 (279.36)	0.64 (0.65)	0.30 (0.32)
2005	0.10 (0.09)	293.53 (293.34)	280.55 (280.40)	0.61 (0.63)	0.29 (0.30)
2006	0.09 (0.08)	294.04 (293.88)	281.78 (281.53)	0.68 (0.69)	0.34 (0.35)
2007	0.06 (0.06)	277.40 (277.83)	273.49 (273.30)	0.72 (0.73)	0.34 (0.36)

Le mappe biennali di incremento legnoso (Fig. 25) evidenziano un secondo effetto, quello di una sorta di ciclicità. Infatti si osserva che nel primo biennio considerato (2002 – 2003) l'area a sud-ovest era in fase di aumento degli incrementi. L'opposto si verifica nei due anni successivi (2004 – 2005), per poi riesplodere durante il biennio 2006 – 2007, il cui effetto medio è superiore a quello dei singoli anni (Fig. 24, 2006 e 2007).

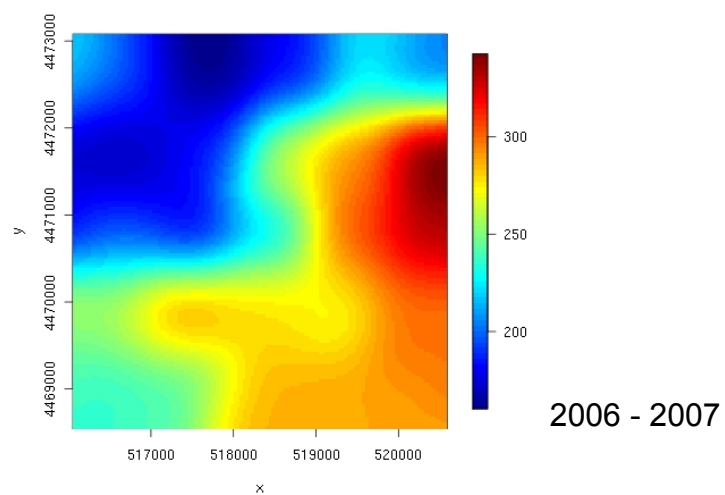
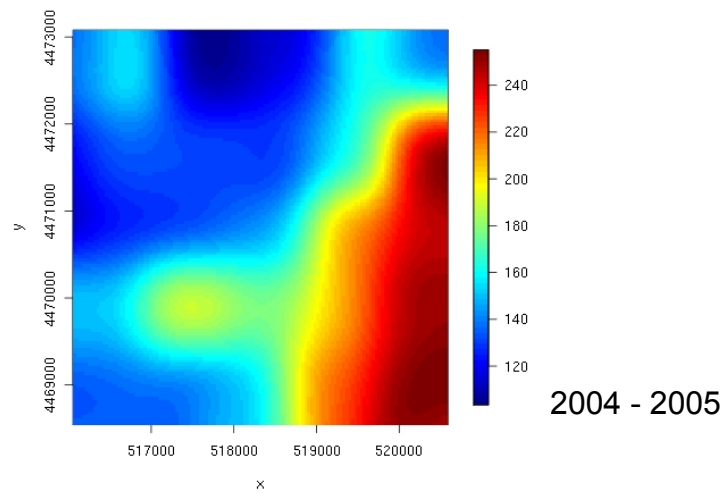
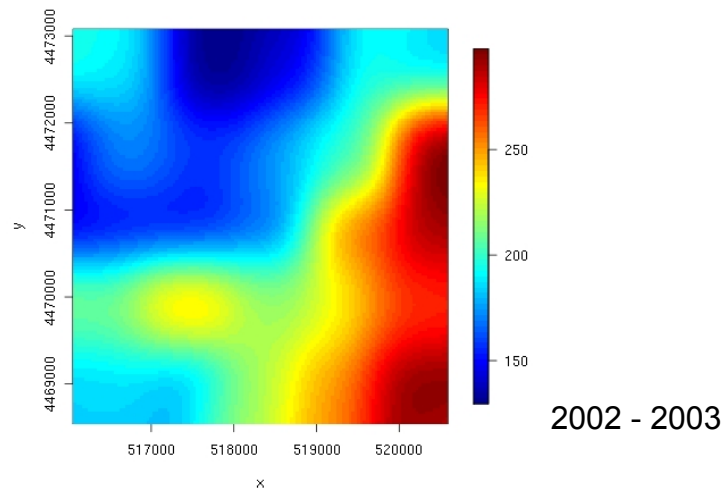


Figura 25. Mappe biennali dell'incremento legnoso per l'area vasta.

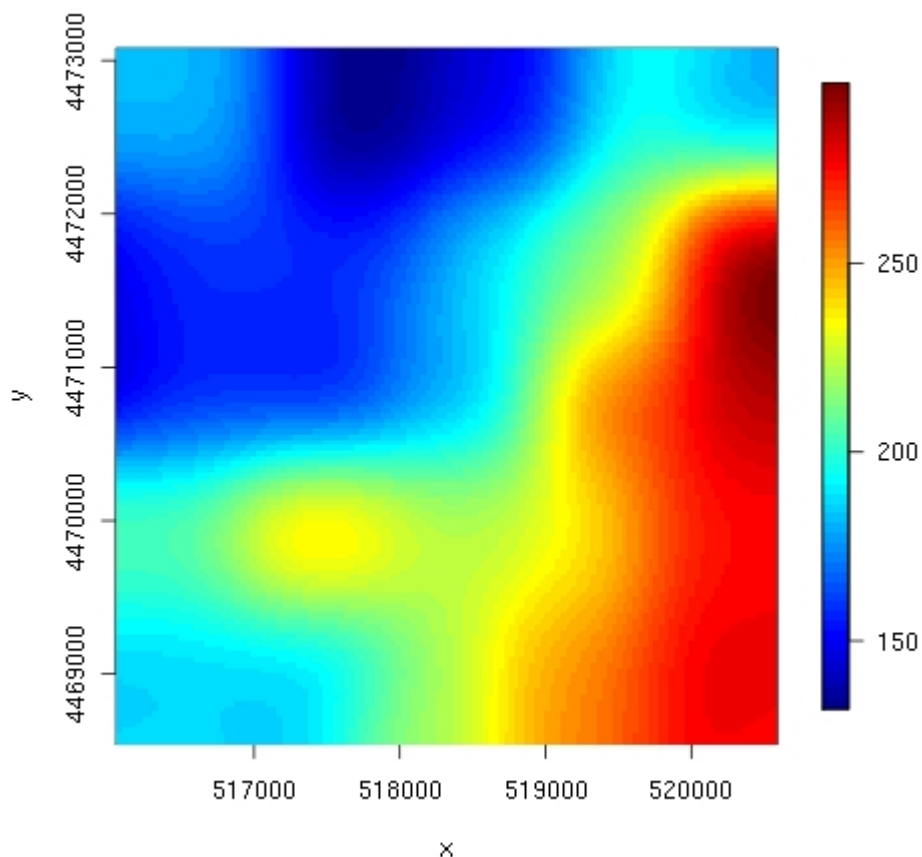


Figura 26. Mappa complessiva degli incrementi legnosi tra il 2002 e 2007 nell'area vasta

In figura 26 si riporta la mappa degli effetti complessivi nella variazione spazio-temporale degli incrementi legnosi. Parliamo di effetti complessivi e non medi, perché la mappa è costruita non mediando i valori per i 6 anni, ma considerando tutta l'informazione disponibile nei sei anni. Per cui la mappa (così come quelle biennali) deve essere letta come “il prodotto attuale di ciò che è avvenuto nel passato”. L'informazione che ne emerge è la conferma dell'aumento degli incrementi legnosi nel settore sud, di ordine inferiore rispetto a quello delle singole mappe annuali (Fig. 24, 2007) e biennali (Fig. 25, 2006 – 2007).

## DISCUSSIONI

Gli incrementi legnosi nella quercia da sughero, come molti altri parametri biologici e ambientali, mostrano una chiara autocorrelazione spazio-temporale. Il risultato è in accordo con precedenti ricerche (Paulo, 2002) ma diverge da quello di altri lavori, come per esempio quello di Sánchez-González e colleghi (2006) per una sughereta in Andalusia. Questi ultimi utilizzano modelli empirici e semi-empirici per valutare la correlazione spaziale dell'incremento diametrico, considerano i valori dopo demaschiatura e senza nessun parametro ambientale da correlare. Questi due elementi possono spiegare l'alto effetto random nei loro modelli.

Nella presente ricerca, invece, si dimostra la potenzialità di modelli complessi che integrano serie di variabili ambientali, e che riducendo l'errore, permettono di definire con maggiore chiarezza la natura dell'autocorrelazione spazio-temporale.

I parametri della funzione di autocorrelazione (range spaziale di 300 m e range temporale di 4 anni) sono fortemente influenzati dal sistema di campionamento realizzato, e per questo sono un indice, e non una certezza, di una variazione su piccola scala spaziale e su media scala temporale dell'accrescimento legnoso. In altre parole, l'analisi indica che spazialmente l'incremento legnoso ha una continuità inferiore rispetto a quella che si verifica nel tempo, a causa sicuramente, della presenza di un numero maggiore di fattori limitanti lungo lo spazio (il suolo). Sarà necessario, quindi, un campionamento più largo e intenso lungo la scala spaziale e più duraturo lungo la scala temporale, per definire in modo più accurato i parametri della covarianza spazio-temporale. In questo modo, inoltre, si risolverà il problema dell' "effetto buco" presente nella covarianza sperimentale, che causa dei valori negativi che non possono essere modellati nella covarianza teorica, determinando una più larga varianza non spazialmente correlata, e quindi un' inferiore accuratezza del modello.

Il fattore di correzione degli incrementi è risultato estremamente efficace nell'abbassamento dell'errore nelle stime finali. Gli errori nelle letture possono essere dovuti alla presenza di falsi anelli e alta porosità le cui cause possono essere ricercate nell'andamento pluviometrico non regolare e, con minori probabilità, nell'attacco di entomofagi.

L'effetto opposto rilevato nel comportamento di NDVI e EVI come fattori fissi nel modello spazio-temporale non-lineare, è un altro dei risultati che andrebbero investigati maggiormente. L'EVI è un indice di vegetazione creato per migliorare i valori ottenuti dall'NDVI. E' estremamente efficace nelle aree ad alta densità di vegetazione, mentre può risultare meno accurato in quelle a bassa densità e con topografia complessa. In questo contesto, la sughereta si presenta con una struttura prevalentemente a gruppi e su un terreno a morfologia scoscesa, fattori che hanno determinato un'elevata variabilità dei dati EVI che, mantenendo un maggiore dettaglio (rispetto a quelli dell'NDVI), descrivono componenti della superficie (e non più solo della biomassa) inversamente correlate all'incremento legnoso.

Il tipo di relazione che lega l'NDVI all'incremento legnoso è simile a quella determinata dal MIR (tab. 5), spiegabile nella relazione esistente tra turgore fogliare e contenuto di acqua nel suolo (Nardini et al., 1999).

Una migliore comprensione dei risultati ottenuti con le predizioni annuali, biennali e generali (dell'intero arco temporale considerato) è possibile attraverso l'analisi della struttura della sughereta. In riferimento alla figura 27, composta dalle immagini dei quadranti dell'area (due tipologie per quella Nord-est, una per quella Nord-ovest e una per quella Sud), si può notare come nel settore Nord-est si abbia prevalentemente la presenza di sugherete pure di 250 alberi ad ettaro, e ampi tratti di sughereta con piante sporadiche (circa 100 alberi ad ettaro). In questo contesto si sono avuti gli accrescimenti più bassi, potenzialmente prodotti da una scarsa competizione, una maggiore aridità (strutture complesse e dense permettono di avere il suolo più umido grazie alla maggiore copertura esercitata dalle chiome), e a condizioni edafiche non ottimali.

Nel settore Nord-ovest si trova una sughereta pura, raramente formazioni miste con roverella e leccio in singoli esemplari o a piccoli gruppi. Simile e a tratti con maggiore densità arborea è il settore Sud. In questi quadranti si sono registrati gli incrementi maggiori con tasso crescente (Fig. 26), che possono essere motivati con la maggiore densità del popolamento arboreo e condizioni microclimatiche più equilibrate.

Gli effetti complessivi degli incrementi biennali (Fig. 25) hanno mostrato che durante il biennio 2006-2007 c'è stato un alto tasso di accrescimento. Un'ulteriore analisi sugli avvenimenti antropici-ambientali avvenuti nell'area in questi due anni potrebbe definire nuove variabili da inserire nel modello.





Nord



Nord-Ovest



Sud

Figura 27. Il bosco di quercia da sughero campionato.

## CONCLUSIONI

Lo studio persegue due obiettivi principali: contribuire alla conoscenza degli effetti di alcuni parametri ambientali sul sistema sughereta; fornire una base metodologica di facile ripetibilità per modelli previsionali degli accrescimenti legnosi della specie.

La tradizionale statistica deterministica, applicata con l'analisi della correlazione di Pearson, ha evidenziato un legame, per l'insieme dei dati incrementali, col solo andamento termometrico, mentre ricerche precedenti avevano rilevato risposte significative anche con l'andamento pluviometrico annuale (Costa, 2001) e/o stagionale (Costa, 2002). La risposta meno evidente che si è ottenuta a livello di singolo albero è imputabile al prevalere di fattori locali; questo ha confermato la necessità di utilizzare metodi statistici di tipo stocastico (geostatistica) applicati a dati ad alta risoluzione spaziale.

In tal senso, una volta testata l'assenza di disomogeneità spazio-temporale, è stato definito il modello di covarianza e i dati sono stati sottoposti a una procedura di simulazione Annealing che ha promosso come variabile esplicativa degli effetti random la classe di volume di chioma.

L'applicazione del modello non lineare misto tra gli incrementi annuali corretti e i dati satellitari derivati dal MODIS ha evidenziato un chiaro effetto positivo per il contenuto d'acqua e il vigore vegetativo della biomassa, e confermato la positiva influenza delle temperature diurne.

L'adozione di modelli complessi, che integrano serie di variabili ambientali e riducono efficacemente l'errore, ha consentito di verificare che, nell'area di indagine, gli incrementi legnosi hanno una maggiore continuità nel tempo piuttosto che nello spazio; gli effetti della disomogeneità del suolo e della struttura del soprassuolo, nel caso in studio, hanno pesato maggiormente rispetto alla variazioni dell'andamento climatico riscontrate nell'arco dei 6 anni testati.

Il modello predittivo ha fornito risposte differenti negli incrementi in aree caratterizzate da diversa densità e composizione specifica, avvalorando l'ipotesi che la struttura stessa della sughereta influenzi gli accrescimenti dei



singoli individui. In assenza di informazioni sulla profondità dei suoli, i maggiori accrescimenti della zona a più alta densità possono essere attribuiti a condizioni microclimatiche ed edafiche più equilibrate, grazie alla copertura esercitata dalle chiome, in accordo con quanto rilevato da Gallardo et al (2000) nel caso delle Dehesa.

Già a questo livello preliminare, il modello basato su dati satellitari MODIS potrebbe risultare più rispondente delle tradizionali metodiche basate su osservazioni meteorologiche puntuali e spazialmente discontinue, contesto che rende spesso i modelli poco coerenti con le dinamiche spazio-temporali del fenomeno studiato e con l'effettivo andamento climatico.

In sintesi, i risultati hanno permesso non solo di definire l'andamento degli accrescimenti nell'area, ma anche di riconoscere le variabili ad esso associate e con una certa probabilità anche alcune variabili non direttamente analizzate ma che sembrano influenzare gli andamenti incrementali, come la densità arborea e il suolo.

L'elevata multifunzionalità dei boschi di sughera è rafforzata dalla valenza economica dei sistemi forestali che li comprendono, paragonabile a quella dell'arboricoltura da legno. In tal senso il modello proposto diviene un utile strumento di supporto alle decisioni dei pianificatori in materia di riforestazione e gestione forestale che, fornendo informazioni spazialmente dettagliate sulla vocazionalità, consenta di pianificare interventi a diverso grado di specificità. Considerando la distribuzione spaziale degli accrescimenti legnosi e le variabili legate al clima, in base ai dati ottenuti dal modello, possiamo affermare che le aree in cui gli incrementi legnosi previsti sono alti sono quelle maggiormente vocate. Questo significa che il modello se potenziato, potrebbe essere un'interessante alternativa alle metodiche proposte sino ad oggi, basate su variabili puntuali derivate da stazioni meteo (Hidalgo, 2007), che rendono spesso tali modelli poco coerenti con l'effettivo andamento climatico nello spazio. Infatti è noto che il microclima è influenzato da numerosi fattori tra cui, non trascurabile, la topografia. Un altro aspetto che può avere una certa variabilità a livello spaziale è rappresentato dalle

caratteristiche pedologiche del suolo, pertanto sarà necessario introdurre l'utilizzo all'interno del modello ad un grado di dettaglio sufficiente e tale da aumentarne la precisione e l'efficacia.

L'utilizzazione di modelli che tengono conto della variabilità spaziale dell'informazione climatica integrata con l'informazione topografica e pedologica, è stata proposta come un valido supporto alle decisioni in materia di scelte selvicolturali a larga scala (Hidalgo, 2007); il modello predittivo spazio temporale qui adottato si presta anche all'impiego su scala locale e a breve-medio periodo.

Attraverso lo studio longitudinale che ha analizzato i dati nel tempo, è stato possibile rilevare come un evento legato al clima possa avere ripercussioni sull'accrescimento della pianta e quindi sulla produzione di legno negli anni successivi. Le informazioni ottenute possono rivelarsi utili per capire quale sia l'andamento di crescita delle piante nel tempo. Se si disponesse di serie temporali più lunghe e l'esatta localizzazione di aree con diversa produttività nello spazio, la prospettiva futura potrebbe essere la gestione della superficie forestale preesistente pianificando sia misure di recupero, sia azioni volte a favorire e valorizzare aree con andamenti di crescita migliori.

La disponibilità di un più ampio set di informazioni, sia spaziali che temporali, sull'accrescimento legnoso e del sughero (variabile quest'ultima di più semplice e speditiva determinazione), getta le basi per l'applicazione della metodica nel campo della pianificazione forestale con l'obiettivo di distinguere le aree con una maggior valenza produttiva da quelle con importanza prevalentemente paesaggistica e di protezione. Inoltre, in presenza di dati previsionali sul cambiamento globale del clima, il modello potrebbe permettere di delineare le future *performance* delle foreste di sughera.

Infine il modello potrà dare un apporto per la valutazione del contributo delle formazioni forestali a sughera al sequestro di carbonio, in accordo con i protocolli internazionali sul cambiamento climatico.

## ***Ringraziamenti***

*Una profonda gratitudine va alle persone che hanno contribuito alla nascita e alla realizzazione di questo lavoro: il Prof Sandro Dettori per il continuo supporto e la fiducia dimostrata, il Dr. Luigi Sedda per il notevole contributo alle scelte metodologiche e l'amico Gigi per la spinta motivazionale al continuo miglioramento, la dott.ssa Mariarosario Filigheddu per la pazienza e l'aiuto dato negli anni.*

*Un ringraziamento va agli Enti e alle persone che hanno contribuito alla ricerca e raccolta dei dati: il Dipartimento di Economia e Sistemi Arborei dell'Università di Sassari, il Department of Zoology dell'Università di Oxford, il Servizio Agrometeorologico Regionale per la Sardegna (nelle persone di Giuliano Fois, Michele Fiori e Simona Canu), il signor Sebastiano Secchi dell'Azienda agrituristica Testone.*

*Voglio ringraziare, inoltre, le persone e tutti gli amici che hanno contribuito a quest'avventura in particolare: Vincenzo Zappia, Marcello Cillara, Luca Mercenaro, Antonello Falqui, Gesuino Bosu e i colleghi di Dottorato.*

*Ringrazio, infine, Roberta per avermi spinto negli anni a realizzare questa impresa.*

## BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 2001. Propagazione per seme di alberi e arbusti della flora mediterranea. Handbook ANPA, Roma.
- AA.VV., 1980. Terminologia Forestale. C.N.R. A.I.S.F. Roma.
- Anderson B.M., Anderson T.W., Olkin I., 1986. *Maximum likelihood estimators and likelihood ratio criteria in multivariate components of variance*. Annals of Statistics, 14: 405-417.
- Armstrong M., 1989. *Geostatistics*. Kluwer, Dordrecht.
- Beaufait W.R., Nelson T.C., 1957. *Ring counts in second-growth Baldcypress*. Journal of Forestry, 58, 8: 588.
- Bouldjedri Y., 1992. *Les suberaies algeriennes*. Simposio Mediterraneo Sobre Regeneracion del Monte Alcornocal. Merida, Montargil, Siviglia, 1992. IPROCOR.
- Box G.E.P., Cox D.R., 1964. *An analysis of transformations*. J. R. Stat. Soc. Ser. B, 26, 2: 211-252.
- Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., 1994. *Time series analysis: forecasting and control*. Holden-Day.
- Brito do Santos J., 1980. *A cortica amadia e os problemas da sua qualidade*. Convención Mundial del Corcho, Madrid.
- BRL-Compagnie d'aménagement Bas-Rhône-Languedoc, 2002. *Guide de subericulture des Pyrenees-orientales*. Institut Méditerranéen du Liège.
- Camarda I., Valsecchi F., 1982. Alberi e arbusti spontanei della Sardegna. Ed. Gallizzi, Sassari, 159-161.
- Cambini A., 1974. Effetti della defogliazione anticipata sull'accrescimento della quercia da sughero (*Quercus suber* L.). Stazione Sperimentale del Sughero. Memoria 39. Sassari.
- Cantat R., Piazzetta R., 2005. *La levée du liège*. Institut Méditerranéen du Liège.
- Caritat A., 1988. *Crecimiento longitudinal del alcornoque: segmentos y hojas*. Scientia Gerundensis 14.
- Caritat A., Molinas M., Gutierrez E., 1996. *Annual cork-ring width variability of Quercus suber L. in relation to temperature and precipitation (Extremadura, southwestern Spain)*. Forest Ecology and Management, 86: 113-120.
- Carr J.R., Bailey R.E., Deng E.D., 1984. *Use of indicator variograms for an enhanced spatial analysis*. Mathematical Geology 17(8): 797 – 811.
- Dr. Giovanni Deplano –Titolo: Influenze ambientali sull'accrescimento radiale nella quercia da sughero  
Tesi di Dottorato in Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali  
Università degli Studi di Sassari**

- Charco J., 1999. *El bosque mediterráneo en el norte de África. Biodiversidad y lucha contra la desertificación*. Ediciones Mundo Arabe e Islam, Madrid.
- Cherubini P., Gartner B.L., Tognetti R., Braker O.U., Schoch W., Innes J.L., 2003. *Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from mediterranean climates*. Cambridge Philosophical Society. Biol. Rev., 78:119-148.
- Christakos G., 1992. *Field models in Earth sciences*. Academic Press, San Diego.
- Christakos G., 2000. *Modern spatiotemporal geostatistics*. Oxford University Press, New York, US.
- Cook E.R., Briffa K., 1990. *Data Analysis*. In: Cook E.R., Kairiukstis L.A. (eds) *Methods of dendrochronology: applications in environmental science*. Kluwer, Dordrecht, pp. 97-162.
- Corona P.M., Dettori S., Filigheddu M.R., Maetzke F., Scotti R., 2005. *Site quality evaluation by classification tree: an application to cork quality in Sardinia*. European Journal of Forest Research, 124, 1: 37-46.
- Costa A., Pereira H., Oliveira A., 2001. *A dendroclimatological approach to diameter growth in cork-oak adult trees under cork production*. Trees, 15: 438-443.
- Costa A., Pereira H., Oliveira A., 2002. *Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production*. Forest Ecology and Management, 175: 239 – 246.
- Courtois M., Masson P., 1999. *Relations entre la qualité du liège, sa composition minérale et la composition minérale des feuilles du chêne liège (Quercus suber L.)*. Ann. For. Sc., 56: 521-527.
- Cressie N., 1993. *Statistics for spatial data*. Wiley, NY, 900 pagg.
- Cressie N., Huang H.C., 1999. *Classes of nonseparable, spatio-temporal stationary covariance functions*. Journal of the American Statistical Association, 94, 448: 1330-1340.
- Dettori S., Falqui A., Filigheddu M.R., Manchinu M., Mannoni S., 1996. *Influenze genetiche e ambientali sulla qualità del sughero sardo*. Atti del "2<sup>nd</sup> International Symposium on Cork". Pavia, 12-14 Settembre
- Dettori S., Filigheddu M.R., Gutierrez M., 2001. *La coltivazione della quercia da sughero*. Università degli Studi di Sassari. Tipografia TAS, Sassari.
- Deutsch C.V., Journel A.G., 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, NY.
- Diggle P., Tawn J., Moyeed R., 1998. *Model-based geostatistics (with discussion)*. Applied Statistics 47, Part 3, 299–350.

- Di Mucci G., 2003. Metodologie innovative per la modellizzazione della variabilità spaziale dei parametri ambientali. Applicazione di strumenti matematici, statistici e informatici, implementati sui sistemi G.I.S. Tesi di Laurea, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Politecnico di Bari.
- Dorigatti S., Pezzo M.I., 1999. Studi dendrocronologici in Italia: un aggiornamento. *Ann. Mus. civ. Rovereto*, 13:143-161.
- Dubrule O., Damsleth E., 2001. *Achievements and challenges in petroleum geostatistics*. Petroleum Geoscience v.7.
- Ephrat Y., 1971. *Periderm development and the annual rhythm of phellogen and cambial activity in Quercus suber and Quercus calliprinos*. Tesi di Master, Università di Tel-Aviv.
- ESRI, 2002. *ArcGis 3D Analyst: three-dimensional visualization, topographic analysis and surface creation*. ESRI White Paper.
- Farmer C., 1992. *Numerical rocks*. In: P. King (ed.), *The mathematical generation of reservoir geology*. Clarendon Press, Oxford.
- Forteleoni C., 1992. *Gestión y regeneración de los alcornocales*. Atti del Seminario Internazionale Franco-Hispano-Italo-Luso sobre la gestión de los sistemas forestales mediterraneos. Madrid 15-19 Giugno.
- Franceschini A., Nieddu S., Deriu L., Linaldeddu B.T., Ruiu P.A., 2006. Incidenza del deperimento della quercia da sughero e comunità fungine endofitiche in sugherete della Sardegna centrale. In: *Ricerca e Sughericoltura - Risultati di un triennio d'indagini nelle sugherete della Provincia di Nuoro*, pp. 67-76.
- Fritts H.C., 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London.
- Gallardo A., Rodriguez-Saucedo J.J., Covelo F., Fernandez-Ales R., 2000. *Soil nitrose heterogeneity in a Dehesa eco system*. *Plant and Soil*, 222, 1-2: 71-82.
- Garen D.C., Johnson G.L., Hanson C.L., 1994. *Mean areal precipitation for daily hidrology modeling in mountainous region*. *Water Resources Bulletin* 30, 3: 481-491.
- Gellini R., Grossoni P., 1997. *Botanica Forestale*. Vol. 2 Angiosperme. CEDAM, 135-141.
- Geman S., Geman D., 1984. *Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images*. *IEEE Trans. PAMI*, 6, 6: 721-741.
- Giordano G., 1981. *Tecnologia del legno*. UTET, 1: 244.
- González-Adrados J.R., Gourlay I.D., 1997. *Applications of dendrochronology to Quercus suber L*. European Conference on Cork Oak and Cork. Lisbona 5-7 Maggio.

- González Adrados J.R., Elena Rosselló R., Tella Ferreiro G., 1991. *Atlas del Alcornoque en Extremadura*. Consejería de Agricultura y Comercio, Junta de Extremadura.
- Gonzalez Montero J.A., 2004. *Variación de la producción de corcho en cantidad y calidad en la Comunidad de Extremadura*. Tesi di dottorato, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Montes, Università Politecnica di Madrid.
- Goovaerts P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Gourlay I., 1995. *The effect on wood increment and growth ring analysis of cork-oaks (Quercus suber L.) after cork extraction*. Workshop European Research on cork-oak. Lisbon 18-19 October.
- Grissino-Mayer H.D., 2003. *A manual and tutorial for the proper use of an increment borer*. *Tree-ring Research*, 59,2: 63-79.
- Hair Jr. J.F., Anderson R.E., Tatham R.L., Black W.C., 1998. *Multivariate data analysis*. Prentice Hall.
- Hidalgo P.J., Marín J.M., Quijada J., Moreira J.M., 2007. *A spatial distribution model of cork oak (Quercus suber) in southwestern Spain: A suitable tool for reforestation*. *Forest Ecology and Management*. (article in press).
- Holben B.N., 1986. *Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data*. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1383-1622.
- Holz D., 1959. *Increasing the color contrast in annual rings on cross-sections and increments cores*. *Arch. Forstw*, 8, 8: 743-749
- Huete A.R., 1987. *Soil influence in remote sensed vegetation-canopy spectra*. In: Elachi C. (Ed.) - *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*, Wiley-Interscience, New York, pp. 107-141.
- Journel A.G., Huijbregts C.J., 1978. *Mining geostatistics*. Academic Press, New York.
- Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P., 1983. *Optimization by simulated annealing*. *Science*, 220, 4598: 671-680.
- Knapic S., Louzada J.L., Leal S., Pereira E., 2007. *Radial variation of wood density components and ring width in cork oak trees*. *Ann. For. Sc.*, 64: 211-218.
- Kolmogorov A.N., 1941. *The local structure of turbulence in an incompressible fluid at very large Reynolds numbers*. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 30: 301-305.
- Krige D.G., 1951. *A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand*. Master's thesis, University of Witwatersrand.

- Leal S., Nunes E., Pereira H., 2008. *Cork oak (Quercus suber L.) wood growth and vessel characteristics variations in relation to climate and cork harvesting*. European Journal Forest Research, 127: 33-41.
- Lillesaeter O., 1982. *Spectral reflectance of partly transmitting leaves: laboratory measurements and mathematical modeling*. Remote Sensing of Environment, 12: 247-254.
- Lindstrom M.J., Bates D.M., 1990. *Nonlinear mixed effects models for repeated measures data*. Biometrics 46: 673-687.
- Liu H.Q., Huete A.R., 1995. *A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33: 457-465.
- Luciano P., Lentini A., 2007. *Microbiological control of lepidopterous defoliators in Sardinian cork oak forests*. Insect Pathogens and Insect Parasitic Nematodes IOBC/wprs Bulletin, 30, 1: 165-168.
- Madrau S., Deroma M.A., Loi G., Baldacini P., 2006. *Il database pedologico georeferenziato e la Carta dei Suoli della Sardegna*. Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Nucleo Ricerca Desertificazione. Università degli Studi di Sassari. Sassari.
- Maeglin R. R., 1979. *Increment Core. How to Collect, Handle, and Use Them*. United States Department of Agriculture, Forest Service. General Technical Report FPL 25.
- Maeglin R.R., 1969. *Simplified determination of age on increment cores*. North Logger, 18, 5: 23
- Matern B., 1960. *Spatial variation*. Springer Verlag, New York, USA.
- Matheron G., 1965. *Les variables régionalisées et leur estimation*. Masson, Paris.
- Matsushita B., Yang W., Chen J., Onda Y., Qiu G., 2007. *Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-Density Cypress Forest*. Sensors, 7: 2636-2651
- Mercer W.B., Hall A.D., 1911. *The experimental error of field trails*. Journal of Agricultural Scientist, 4: 107-132.
- Montero G., Cañellas I., 2003. *El alcornoque. Manual de reforestación y cultivo*. Coedición Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), Edition Mundi-Pressa. Madrid.
- Montoya Oliver J.M., 1988. *Los Alcornocales*. Publication by Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.



- Nanos N., Calama R., Montero G., Gil L., 2004. *Geostatistical prediction of height/diameter models*. Forest Ecology and Management, 195: 221-235.
- Nardi Berti R., 2006. La struttura anatomica del legno ed il riconoscimento dei legnami italiani di più corrente impiego. CNR – IVALSIA. Firenze.
- Nardini A., Logullo M.A., Salleo S., 1999. *Competitive strategies for water availability in two Mediterranean Quercus species*. Plant, Cell and Environment, 22: 109-116.
- Natividade Vieira J., 1951. *Subericultura*. Ministério da Agricultura e Alimentação Direcção-General das florestas. Lisboa.
- Oliveira G., Martins-Loução M.A., Correia O., 2001. *The relative importance of cork harvesting and climate from stem radial growth of Quercus suber L.* Ann. For. Sc., 59: 439-443.
- Oliveira G., Werner C., Mertens C., Correia O., 1993. *Influencia de la posición de la copa sobre la fenología y la relaciones hídricas del alcornoque (Quercus suber L.)*. Congreso Forestal Español. Pontevedra 14-18 Giugno.
- Orgeas J., Bonin G., 1996. *Variabilité des nutriments foliaires de Quercus suber L. dans différentes situations écologiques dans le massif des Maures (Var, France), et relations avec la production de liège*. Annales de Science Forestier, 53: 615-624.
- Orgeas J., Ourcival J.M., Bonin G., 2002. *Seasonal and spatial patterns of foliar nutrients in cork oak (Quercus suber L.) growing on siliceous soils in Provence (France)*. Plant Ecology, 164: 201-211.
- Ostermann W., 1957. *Bringing out the rings on beech increment cores*. Holz-Zbl., 83, 120: 1459.
- Panneton B., Brouillard M., Piekutowski T., 2001. *Integration of yield data from several years into a single map*. In Atti "Third European Conference on Precision Agriculture" v. 1, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France.
- Patterson A.E., 1959. *Distinguishing annual rings of diffuse porous tree species*. Journal of Forestry, 57, 2: 126.
- Paulo M.J., 2002. *Statistical sampling and modelling for cork oak and eucalyptus stands*. Tesi di dottorato. Wageningen University, Olanda.
- Pérez Latorre A.V., Nieto Caldera J.M., Cabezudo Artero B., 1993. *El alcornocal ed Andalucía. Comportamiento ecológico, fitocenología, fenomorfología, regeneración postfuego, usos y conservación*. Congreso Forestal Español. Pontevedra 14-18 Giugno.
- Pezzo M.I., 2006. *Datate il legno con la Dendrocronologia. Tetto & pareti in legno*, I, 1: 68-72.

- Pilar Sanchez J., 1997. *Breve estudio bibliometrico de la investigacion sobre el corcho*. European Conference on Cork Oak and Cork. Lisboa 5-7 May.
- Porcu E., Mateu J., Bevilacqua M., 2007. *Covariance functions that are stationary or nonstationary in space and stationary in time*. *Statistica Neerlandica*, 61, 3: 358-382.
- RDM Progetti, 2003. *La carte di uso del suolo in scala 1:25.000 della Regione Sardegna*. Cagliari: Regione Autonoma della Sardegna, Cagliari.
- Rinn Tech 2003. *TSAP-Win Professional, Quick Reference*. Version 0.30. www.rinntech.com.
- Roberto S.R., Farias P.R.S., Bergamin Filho A., 2002. *Geostatistical analysis of spatial dynamics of citrus variegated chlorosis*. *Fitopatologia Brasileira*, 27: 599-604.
- Rosselló M.E., 2006. *Struttura del mercato del sughero e Codice di comportamento per la trasformazione (C.E.Liège –Systecode)*. *Alla Ricerca della Qualità nella Filiera Sughero-Vino*: 45-58.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C., 1974. *Monitoring the vernal advancements and retrogradation (green-wave effect) of nature vegetation*. NASA/GSFC Final Report, Greenbelt MD.
- Ruiu P.A., Pampiro F., Pintus A., 1996. *Studio degli accrescimenti radiali delle sugherete in Sardegna*. Stazione Sperimentale del Sughero della Regione Autonoma della Sardegna, Collana Biologica n. 7.
- Sánchez-González M., del Río M., Canellas I., Montero G., 2006. *Distance independent tree diameter growth model for cork oak stands*. *Forest Ecology and Management*, 225: 262-270.
- Sanna A., 1946. *La Sughera in Sardegna, dalla preistoria ai nostri giorni*. Primo manuale italiano sulla coltivazione e sfruttamento della sughera. Stamperia L.I.S., Sassari
- Scharlemann Jörn P.W., Benz D., Hay S.I., Purse B.V., Tatem A.J., Wint G.R.W., Rogers D.J., 2008. *Global data for ecology and epidemiology: a novel algorithm for temporal fourier processing MODIS Data*. *PLoS ONE*, 3, 1: 1408.
- Sedda L., 2005. *Studio della struttura della variabilità spaziale dei diametri di un giovane impianto di quercia da sughero*. Tesi di Dottorato. Sassari
- Soares A., 1993. *Geostatistics Tróia '92*. Kluwer, Dordrecht.
- Spiegelhalter D.J., Best N.G., Carlin B.P., van der Linde A., 2002. *Bayesian measures of complexity and fit (with discussion)*. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 64: 583-640.
- Spurr S.H., 1957. *Recording micrometer*. *Forest Science*, 3, 1: 66.

- Student (William Sealy Gosset), 1914. *The elimination of spurious correlation due to position in time or space*. Biometrika, 10: 179-180.
- Trujillo D.P., 1975. *Preparing aspen increment cores for ring counts*. Journal of Forestry, 73, 7: 428.
- Tucker C.J., 1979. *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*. Remote Sensing of Environment, 8: 127-150.
- United Nations, 1998. *Protocol to The United Nations Framework Convention On Climate Change*.
- Vihrov V.E., 1959. *A simple method of displaying annual rings*. Lesn. Hoz. Oxford cat. Of World For Lit., 12, 12: 73.
- Ward E.J., 2008. *A review and comparison of four commonly used Bayesian and maximum likelihood model selection tools*. Ecological Modelling 211: 1-10.
- Warren W.G., 1980. *On removing the growth trend from dendrochronological data*. Tree-Ring Bulletin, 40: 35-44.
- Webster R., 1984. *Elucidation and characterization of spatial variation in soil using regionalized variable theory*. Geostatistics for natural resources characterization Part II, Dordrecht, Reidel.
- Webster R., Burgess T.M., 1984. *Sampling and bulking strategies for estimating soil properties in small regions*. Journal of Soil Science, 35: 127-140.
- Webster R., Oliver M.A., 2001. *Geostatistics for environmental scientists*. Wiley.
- Xiao X., Zhang Q., Braswell B., Urbanski S., Boles S., Wofsy S., Moore B., Ojima D., 2004. *Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data*. Remote Sensing of Environment, 91: 256-270.
- Yan J., Cowles M.K., Wang S., Armstrong M.P., 2007. *Parallelizing MCMC for Bayesian spatiotemporal geostatistical models*. Stat Comput, 17: 323-335.
- Zeller W., 1957. *Sobre la significación ecológica de la presencia del Quercus suber en Cataluña*. Publicaciones del Instituto de Biología Aplicada, 26: 87-94.
- Zeraia L., 1981. *Essai d'interprétation comparative des données écologiques, phenologiques et de production subero-ligneuse dans les forêts de chêne-liège de Provence et d'Algerie*. Faculté des Sciences et Techniques St Jerome. Aix-Marseille.

