



DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELL'AMBIENTE FORESTALE E DELLE SUE RISORSE

**CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN
ECOLOGIA FORESTALE – XIX CICLO**

**PIANTAGIONI DA BIOENERGIA: SOSTENIBILITA'
PRODUTTIVA ED AMBIENTALE DI NUOVI CLONI
IBRIDI DI PIOPPA (*Populus spp.*)**

Settore Scientifico Disciplinare – AGR/05

Dottorando: Leonardo Mareschi

Firma _____

Coordinatore: Prof. Paolo De Angelis

Firma _____

Tutore: Prof. Giuseppe Scarascia Mugnozza Co-Tutore: Dr. Pierluigi Paris

Firma _____

Firma _____

Abstract.

Short rotation forestry (SRF) systems imply the use of fast growing hardwoods, with high planting density and harvesting cycle less than 10 years; this innovative system of plantation forestry is catalyzing a great attention as alternative to surplus food crops and to produce renewable energy in form of solid biofuels (wood chips and pellets) with higher sustainability, in terms of energetic and CO₂ balances, in comparison to liquid biofuels (bioethanol and biodiesel). The most outstanding commercial applications of the systems exist in USA, with poplars and willows, Sweden, UK and Poland with willows. In Italy, 6000 ha of SRF hybrid poplar plantations were established by farmers with public grants (Rural Development Plans 2001-2007). In the near future, profitability of SRF will depend on high yield and low cultural inputs, and on the ability of SRF plantations to provide environmental services such as reduction of carbon emission to the atmosphere, and biofiltering of polluted sites/waters (phytoremediation). The energetic efficiency of woody biofuels is strongly affected by N fertilization, making use of chemical fertilizers with very high energy production cost.

The aims of this study were: i) comparing survival, growth and yield of new cultivars of hybrid poplars clones according to two short harvesting cycles (1 versus 2 years) and to site fertility across northern Italy; ii) comparing Nitrogen (N) removal in the harvested biomass and its N use efficiency (NUE) among clones, sites and coppicing cycles.

Growth and above-ground dendromass yield of newly selected clones of hybrid poplars, specific for SRF, were evaluated on four years within a network of experimental fields established in spring 2003 across northern Italy. Annual rotation was applied in two experimental fields: Zinasco and Bigarello with a planting density of 14.000 trees ha⁻¹. Biannual rotation (planting density of 6000 trees ha⁻¹) was evaluated on three sites of low (Bigarello), medium (Vinovo) and high fertility (Mira). Soil preparation, weed control and plant water status were homogeneous across all sites. Nitrogen fertilization was applied only in Mira (200 and 100 Kg N ha⁻¹ in the third and fourth year, respectively). Each experimental plantation was mechanically harvested after every one or two years.

In all sites rooting of stem cuttings, at the end of the first season, was very high (more than 90%) for all clones, with the exception of Lux clone. Shoot survival after coppicing was also very high (more than 90%) for all clones and sites, with the exception for Lux clone and Zinasco, where annual coppicing without fertilization decreased dramatically stump vitality. Coppicing increased dramatically shoot density in the remaining sites, with a parallel decrease of stem dimensions.

The network of experimental plantations showed a strong yield variability in relation to the soil fertility, to fertilization management and rotation cycle, with a range of SRF newly selected clones of hybrid poplar performing better than traditional ones in medium and high site conditions.

In Bigarello, with limiting soil conditions, there were not significant difference among clone yields which varied from 5 (first rotation) to 7.5 (second rotation) Mg ha⁻¹ year⁻¹ in dry matter (dm). In medium and high fertility site of Vinovo and Mira, there was significant difference in clones yields, with the newly selected clones performing better than control clones (I214 and Lux). In Mira, mean yield increased from first to second biennial rotation cycle from 15 to 20 Mg dm ha⁻¹ year⁻¹. The three best clones, AF8, Monviso and 832.148.044, had an annual yield of 24, 23.5 and 22 Mg dm ha⁻¹, respectively.

N removal, and N percent concentration (%N) in the harvested dendromass were studied in the two biannual plantations of Bigarello and Vinovo, at the end of the first and second coppice rotations. A third plantation was studied in central Italy (Terni). We found that poplar shoot %N was negatively affected by stem diameter ($R^2=0.713^{**}$), being small shoots richer in %N than larger ones. N removal was strongly affected by dendromass yield and %N. This was higher in the branches than in the stem. Clone branchiness, the percentage of aboveground dendromass allocated to branches, and %N were positively correlated ($R^2=0.813^{*}$) in the most fertile site for the first biannual rotation. %N strongly increased from the first to the second rotation in both sites of northern Italy; this was due to the dramatic decrease of shoot dimension, as a consequence of the very strong increase of the shoot density after coppicing. N removal per each Mg of dry dendromass passed from 6 to 10 kg N from the first to the second rotation. In Vinovo more than 125 kg N ha⁻¹year⁻¹ was removed by the most productive clone during the second rotation. These values highlight the importance of judicious N fertilization in SRF poplar plantations, but also interesting potentiality of using them as biofilters for the disposal of nutrient rich wastewaters (phytoremediation). Linking SRF and phytoremediation can be a winning strategy for improving both the profitability and sustainability of using woody energy crops as appreciable sources of renewable bioenergy.

Riassunto

Le piantagioni legnose a corta rotazione (Short rotation forestry) implicano l'uso di latifoglie a rapida crescita in un sistema ad alta densità e turni di rotazione inferiori ai 10 anni. Questo innovativo sistema di piantagione ha suscitato l'interesse di istituzioni ed imprenditori per il loro possibile impiego in alternativa alle colture alimentari eccedentarie e per produrre energia da fonte rinnovabile sotto forma di biocombustibili solidi (cippato e *pellets*) con elevata sostenibilità, in termini di bilancio energetico e della CO₂, rispetto ai biocombustibili liquidi (bioetanolo e biodiesel).

Grandi applicazioni commerciali di questi sistemi sono presenti in USA, con l'uso di pioppi e salici, Svezia, Regno Unito e Polonia con salici. In Italia sono stati piantati 6000 ha di SRF con pioppi ibridi dagli imprenditori agricoli con l'ausilio di contributi pubblici (Piano di Sviluppo Rurale 2001-2007). Nel prossimo futuro, la redditività delle SRF dipenderà dalla elevata produttività, dalla necessità di *input* colturali e dalla possibilità delle SRF di fornire servizi ambientali, come la riduzione delle emissioni di CO₂ in atmosfera e biofiltraggio di siti inquinati o dei reflui (fitorimedio).

L'efficienza energetica dei biocombustibili solidi legnosi è strettamente legata alla fertilizzazione azotata, generalmente effettuata con l'utilizzo di fertilizzanti chimici che richiedono alti costi energetici di produzione. Gli obiettivi di questo studio sono stati:

- i) comparazione dell'attecchimento, sopravvivenza, crescita e produttività di nuovi cloni ibridi di pioppo in piantagioni raccolte con due lunghezze del turno (uno e due anni), in diverse condizioni di fertilità dei siti distribuiti nel nord Italia;
- ii) confronto dell'azoto (N) rimosso con la raccolta della biomassa e sua efficienza d'uso (NUE) dei cloni, nei siti e nei cicli di rotazione.

La crescita e la produzione di dendromassa legnosa epigea dei nuovi cloni ibridi di pioppo, selezionati specificatamente per la SRF, sono state valutate in una rete di piantagioni sperimentali impiantate nel 2003 nel nord Italia, per un arco temporale di quattro anni.

I modelli colturali adottati nelle piantagioni sono stati due:

Turno annuale e densità di piantagione di 14000 piante ha⁻¹ che è stato applicato nei siti di Zinasco e Bigarello.

Turno biennale e densità di piantagione di 6000 piante ha⁻¹, in una rete di campi sperimentali a bassa (Bigarello), media (Vinovo) ed alta fertilità (Mira).

La preparazione del suolo ed il controllo delle infestanti sono stati omogenei nei siti sperimentali. La fertilizzazione azotata è stata applicata solo a Mira (200 e 100 Kg ha⁻¹ nel

terzo e quarto anno, rispettivamente). Ogni piantagione sperimentale è stata raccolta meccanicamente ogni uno o due anni. In tutti i siti sperimentali l'attecchimento delle talee e la sopravvivenza dopo la ceduzione è stata alta (più del 90%) ad eccezione del clone Lux. La ceduzione incrementa nettamente la densità di fusti ad ettaro con un parallelo decremento della dimensione degli stessi.

La rete di piantagioni sperimentali mostra una grande variabilità della produttività in relazione alla fertilità del suolo, al regime di fertilizzazione ed al ciclo di rotazione, con una produttività maggiore dei nuovi cloni selezionati per SRF rispetto a quelli tradizionali, sia in condizioni di media che di alta fertilità. A Bigarello, con condizioni edafiche limitanti, non c'è stata una significativa differenza tra la produttività dei cloni, che varia da 5 (prima rotazione) a 7,5 (seconda rotazione) t ha⁻¹ anno⁻¹ in sostanza secca. Nei siti a media ed alta fertilità, le differenze della produttività dei cloni sono risultate significative ed i nuovi cloni selezionati producono maggior biomassa rispetto ai cloni di controllo (I214 e Lux). Nella piantagione di Mira la produzione media incrementa dal primo al secondo ciclo di rotazione biennale da 15 a 20 t ha⁻¹ anno⁻¹ di sostanza secca.

I tre cloni migliori a Mira, AF8, Monviso e 83.148.041 hanno prodotto rispettivamente una media annua di 24, 23.5 e 22 t ha⁻¹anno⁻¹.

Sono stati studiati l'N rimosso e la concentrazione percentuale (%N) nella biomassa legnosa epigea nelle due piantagioni a turno biennale di Bigarello e Vinovo alla fine del primo e del secondo ciclo di rotazione; è stata studiata inoltre una terza piantagione in centro Italia (Terni).

Abbiamo trovato che la %N nei fusti di cloni di pioppo è negativamente correlata al diametro degli stessi ($R^2=0.713^{**}$), essendo i polloni con diametro inferiore più ricchi in %N dei grandi. L'N rimosso è fortemente influenzato dalla produttività legnosa e dalla %N. Questa ultima è più alta nei rami che nei fusti. La ramosità dei cloni, cioè la percentuale di biomassa legnosa allocata sui rami e la %N, sono positivamente correlate ($R^2=0.813^{*}$) nel sito più fertile per la prima rotazione biennale. %N incrementa nettamente dal primo al secondo ciclo di rotazione in entrambe le piantagioni del nord Italia; questa evidenza è spiegabile con il deciso decremento della dimensione dei polloni come conseguenza dell'incremento della densità dei fusti in seguito alla ceduzione. L'N rimosso per ogni tonnellata di sostanza secca varia da 6 a 10 Kg N dalla prima alla seconda rotazione. A Vinovo più di 125 Kg N ha⁻¹ anno⁻¹ sono stati rimossi con la raccolta del clone più produttivo durante la seconda rotazione. Questi valori sottolineano l'importanza di una corretta fertilizzazione N nelle SRF di pioppo, ma anche interessanti potenzialità di utilizzo della SRF come biofiltro per l'assorbimento di

acque reflue ricche di nutrienti (fitorimedio). Il collegamento delle SRF ed il fitorimedio può essere una strategia vincente per migliorare sia la redditività che la sostenibilità dell'uso di piantagioni legnose da energia come apprezzabile risorsa di bioenergia rinnovabile.

INDICE

PARTE GENERALE

	Introduzione	1
	CAPITOLO 1 - GLOBAL CHANGE E BIOENERGIE	
1.1	Il contesto globale dello sviluppo della bio-energia. Accordi a livello globale ed europeo	4
1.2	Il quadro delle rinnovabili nel mondo	7
1.3	Il quadro delle rinnovabili in Europa	9
1.4	Il quadro delle rinnovabili in Italia	10
1.5	Definizione delle biomasse	14
1.5.1	<i>I Biocombustibili</i>	15
1.5.2	<i>Le coltivazioni energetiche</i>	15
1.6	Il potenziale della biomassa legnosa	18
1.7	Caratteristiche tecnologiche delle biomasse legnose per scopi energetici	22
1.7.1	<i>Le caratteristiche chimiche</i>	22
1.7.2	<i>Le caratteristiche fisiche</i>	23
1.7.3	<i>Le caratteristiche energetiche</i>	24
1.8	La filiera legno – energia	25
1.8.1	<i>Tecniche di condizionamento</i>	27
1.8.2	<i>L’essiccazione e lo stoccaggio</i>	27
1.8.3	<i>La cippatura</i>	27
1.8.4	<i>La densificazione</i>	30
1.9	I Processi di conversione energetica	31
1.9.1	<i>I processi termo-chimici</i>	31
1.9.1 a	<i>La combustione diretta</i>	32
1.9.1 b	<i>La combustione a griglia</i>	33
1.9.1 c	<i>La combustione a letto fluido</i>	34
1.9.2	<i>Pirolisi</i>	34
1.9.3	<i>Gassificazione</i>	35
1.9.4	<i>Liquefazione</i>	35
1.9.5	<i>I processi biochimici</i>	36

1.10	La cogenerazione	36
------	-------------------------	----

CAPITOLO 2 - PIANTAGIONI A BREVE ROTAZIONE (SRF) PER LA PRODUZIONE DI BIOMASSA

	Introduzione	37
2.1	Misure nazionali per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili	38
2.2	La riforma della PAC	41
2.3	La Short Rotation Forestry	43
2.4	Lo stato della ricerca in Italia	46
2.5	Sostenibilità ambientale e funzioni ecologiche delle colture dedicate a scopo energetico	47
2.5.1	<i>Influenza sul bilancio della CO₂</i>	49
2.5.2	<i>SRF e carbonio nei suoli</i>	50
2.5.3	<i>Biodiversità</i>	51
2.5.4	<i>Contributo al fitorimedio</i>	52
2.5.5	<i>Altri benefici</i>	53

CAPITOLO 3 - IL PIOPPO NELLA SRF

3.1	Il genere <i>Populus</i> L.	56
3.2	La pioppicoltura	58
3.3	I criteri di miglioramento genetico dei cloni di pioppo	59
3.4	I cloni di pioppo	60
3.5	La coltivazione di impianti di pioppo a ciclo breve	61
3.5.1	<i>La scelta del terreno</i>	61
3.5.2	<i>Tecnica di coltivazione</i>	63
3.5.3	<i>La raccolta</i>	65
3.5.4	<i>Stoccaggio</i>	67

PARTE SPERIMENTALE

CAPITOLO 4 – PIANTAGIONI A TURNO ANNUALE: ASPETTI PRODUTTIVI

	Introduzione	68
4.1	Materiali e Metodi	69

4.1.1	<i>Descrizione dei siti, dei cloni impiegati e della gestione delle piantagioni</i>	69
4.1.2	<i>Rilievi sperimentali</i>	72
4.1.2 a	<i>Stima della biomassa epigea</i>	72
4.1.2 b	<i>Analisi Statistica</i>	74
4.2	Risultati	74
4.2.1	<i>Piantagione di Bigarello (MN)</i>	74
4.2.2	<i>Piantagione di Zinasco (PV)</i>	80
4.3	Discussioni e conclusioni	85
4.3.1	<i>Attecchimento delle talee</i>	85
4.3.2	<i>Produzioni</i>	86

CAPITOLO 5 - PIANTAGIONI A TURNO BIENNALE, ASPETTI PRODUTTIVI E DENSITA' DEL LEGNO

	Introduzione	87
5.1	Materiali e metodi	87
5.1.1	<i>Descrizione dei siti, dei cloni impiegati e della gestione delle piantagioni</i>	87
5.1.2	<i>Rilievi sperimentali</i>	90
5.1.2 a	<i>Stima della biomassa epigea</i>	90
5.1.2 b	<i>La densità basale</i>	91
5.1.2 c	<i>Analisi Statistica</i>	92
5.2	Risultati	92
5.2.1	<i>Piantagione di Bigarello (MN)</i>	93
5.2.2	<i>Piantagione di Vinovo (TO)</i>	97
5.2.3	<i>Piantagione di Mira (VE)</i>	100
5.2.4	<i>La densità basale</i>	104
5.3	Discussioni e conclusioni	107
5.3.1	<i>Attecchimento delle talee</i>	107
5.3.2	<i>Produzioni</i>	108
5.3.3	<i>Densità basale e qualità della biomassa</i>	111

CAPITOLO 6 - BIOMASSE LIGNOCELLULOSICHE E ASPORTAZIONI DI AZOTO

	Introduzione	113
6.1	Materiali e metodi	115
6.1.1	<i>Descrizione delle piantagioni e cloni impiegati</i>	115
6.1.2	<i>Rilievi sperimentali</i>	117
6.2	Risultati	119
6.2.1	<i>Relazione tra le componenti della biomassa e percentuale di N</i>	119
6.2.2	<i>Percentuale di N nella biomassa legnosa in due raccolti successivi</i>	120
6.2.3	<i>Dinamica delle asportazioni in due raccolti successivi</i>	121
6.3	Discussione e conclusioni	124
6.3.1	<i>Asportazioni azotate delle SRF ed altre coltivazioni</i>	124
6.3.2	<i>La scelta del genotipo e del modello colturale in relazione allo scopo principale della piantagione SRF</i>	125
	 APPENDICE	 126
	BIBLIOGRAFIA	131
	RINGRAZIAMENTI	140

INTRODUZIONE

Sul cambiamento climatico del pianeta la comunità scientifica internazionale ha ormai raggiunto un sostanziale accordo. Allo stato attuale delle conoscenze scientifiche e sulla base dei più recenti studi dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), la maggior parte degli esperti concorda nel ritenere che l'atmosfera terrestre si stia riscaldando e che la causa principale di tale fenomeno sia l'effetto serra, espressione che indica la capacità di certi gas, quali l'anidride carbonica (CO₂), l'ossido d'azoto (N₂O), il metano (CH₄) ed altri gas d'origine industriale, di intrappolare il calore solare ed evitare che questo si allontani dall'atmosfera. In base a tali ipotesi la presenza dei gas-serra ha determinato, nel corso del secolo appena finito, un riscaldamento della temperatura media globale di circa 0,75°C (*Hansen et al., 2000; Hansen e Sato, 2001; Hansen et al., 2005*). A sostenere l'ipotesi dell'effetto serra sono richiamate le diverse fonti d'informazione in grado di documentare che dall'inizio dell'era industriale ad oggi la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera terrestre è passata da 280 parti per milione in volume (ppmv) a circa 375 ppmv (*Marland et al., 2005*), principalmente a causa delle attività umane (energia, trasporti, industria, edilizia, agricoltura). Secondo le previsioni più accreditate, potrà arrivare a valori di 540-970 ppmv alla fine del secolo in corso.

L'anidride carbonica (CO₂), uno dei principali composti del carbonio, è presente in natura in quattro grandi "serbatoi":

- La biosfera, nella quale il carbonio è presente nelle molecole organiche (lipidi, glucidi, ecc.) (3.100 miliardi di tonnellate o gigatonnellate Gt);
- Gli oceani, nei quali il carbonio è disciolto sotto forma di carbonati e bicarbonati (40.000 Gt);
- La geosfera, dove il carbonio si presenta essenzialmente sotto forma di calcare e di combustibili fossili (rispettivamente 40.000 e 12.000 Gt);
- L'atmosfera, dove il carbonio è presente sotto forma di CO₂ (600 Gt).

Questi serbatoi sono legati tra loro da importanti scambi che nel loro insieme costituiscono il "ciclo del carbonio". Gli organismi vegetali utilizzano la CO₂ atmosferica per produrre materia organica attraverso la fotosintesi clorofilliana, la quantità di carbonio così fissata ogni anno è notevole (100 Gt anno⁻¹) ed il carbonio è poi emesso dagli ecosistemi attraverso la respirazione di piante e animali. La CO₂ atmosferica entra negli oceani per diffusione e viene convertita in forme diverse; ad esempio viene fissata da alcuni

organismi che la utilizzano per costruire i propri gusci che, alla morte dell'animale, si depositano sul fondo degli oceani a formare vasti depositi di materiale calcareo. Gli organismi vegetali ed animali decomponendosi in condizioni anaerobiche hanno formato grandi depositi di combustibili fossili che ora utilizziamo sotto forma di carbone, petrolio e gas naturale.

In breve, la fotosintesi sottrae anidride carbonica all'atmosfera facendo passare il carbonio dall'ambiente abiotico agli organismi viventi. Da questi ultimi ritorna all'acqua o all'atmosfera attraverso la respirazione cellulare, la combustione e l'erosione. Il bilancio naturale del ciclo del carbonio, in assenza di attività dell'uomo, è pressoché in pareggio.

Il livello di CO₂ atmosferica ed il flusso di carbonio possono essere potenzialmente modificati attraverso cambiamenti nel carbonio immagazzinato nei combustibili fossili, nella biomassa vivente, nel suolo, nella lettiera forestale, legno e prodotti legnosi e attività di gestione dei suoli (*Schlamadinger e Marland, 1996*).

Metodo comune di espansione dei serbatoi di carbonio è attraverso il sequestro biologico mediante lo scoraggiamento della deforestazione, l'incoraggiamento della produzione forestale, la riforestazione, l'afforestazione di terreni abbandonati o degradati, il miglioramento della gestione dei suoli agricoli attraverso pratiche sostenibili (*Hughes e Benemann, 1997*). Oltre a questo, la gestione del carbonio della biosfera terrestre potrebbe realizzarsi attraverso la sostituzione dei combustibili fossili con biocombustibili (*Malhi et al., 2004*).

Va detto che più dell'80 % dell'energia commerciale consumata nel mondo deriva da combustibili fossili e che per ogni tonnellata di carbonio consumato, vengono emesse in atmosfera 3,7 tonnellate di CO₂ (calcolo basato sul rapporto tra il peso molecolare del Carbonio -12- e della CO₂ -44 -). Le concentrazioni di CO₂ nell'atmosfera continueranno ad aumentare, a meno che avvengano importanti cambiamenti nella politica di utilizzo dei combustibili fossili per fornire energia (*Hoffert et al. 1998*).

Per ridurre i rischi connessi con i cambiamenti ambientali, l'Italia, insieme agli altri paesi industrializzati, si è impegnata nell'ambito della Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici (*United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*, Rio de Janeiro, 1992), di cui il Protocollo di Kyoto è uno degli strumenti attuativi, a stabilizzare prima e ridurre poi le proprie emissioni di gas serra del 5,2% rispetto a quelle del 1990, entro il periodo 2008-2012.

Con il Protocollo i paesi firmatari si sono impegnati a ridurre, entro il 2008-2012, il totale delle emissioni di gas ad effetto serra rispetto ai livelli del 1990. Per l'Unione Europea la

riduzione è dell'8%, l'obiettivo per l'Italia è la riduzione del 6,5% rispetto ai livelli del 1990.

In questo momento si è compreso che i rischi derivanti dalle emissioni in larga scala di CO₂ mediante l'uso di combustibili fossili sono complessi, incerti ed hanno potenzialmente effetti seri sulla società umana e sugli ecosistemi.

Questi effetti sono spesso riassunti con il termine "*Global Warming*", ma ciò risulta riduttivo; infatti i cambiamenti della concentrazione di CO₂ in atmosfera, potranno cambiare non solo le temperature, ma anche molti altri processi della chimica della terra, della climatologia e dei processi biologici (*Lakner K.S. and Sachs J.D. 2005*).

Con la conferenza di Kyoto, appare evidente che il ricorso all'uso sempre più diffuso delle fonti di energia rinnovabili si impone come scelta decisiva per la riduzione ed il contenimento dei cosiddetti gas ad effetto serra (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆).

D'altra parte, la domanda di energia è destinata a crescere nei prossimi anni a causa del ritmo di sviluppo dei Paesi Emergenti e per l'aumento della popolazione mondiale. Alcune stime indicano che i consumi energetici mondiali potrebbero triplicare entro i primi decenni del 2000.

Il problema di fondo appare legato, oltre che alla reperibilità delle risorse energetiche (crisi nel rifornimento di gas metano dalla Russia nel 2006), agli effetti sull'ambiente di un loro uso incontrollato. Gli interventi tesi alla diffusione delle fonti di energia di tipo rinnovabile (FER) appaiono una scelta obbligata per i Paesi ad economia avanzata come pure per i Paesi Emergenti, caratterizzati da elevate curve di crescita della domanda energetica.

CAPITOLO 1 - GLOBAL CHANGE E BIOENERGIE

1.1 Il contesto globale dello sviluppo della bio-energia. Accordi a livello globale ed europeo

La convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici, adottata a New York nel maggio 1992 e siglata nell'ambito della Conferenza delle Nazioni Unite su Ambiente e Sviluppo (UNCED) tenutasi a Rio de Janeiro nel giugno dello stesso anno, costituisce uno dei trattati internazionali più significativi mai raggiunti in campo ambientale, sia per la portata delle decisioni politiche intraprese che per le conseguenti implicazioni di carattere economico.

Già da questa conferenza è stato riconosciuto alle foreste un ruolo fondamentale per l'equilibrio del clima; molto importanti sono le parti della Convenzione Quadro dedicate ai cambiamenti climatici e alla biodiversità.

Il ruolo è fondamentale perché le foreste hanno una funzione di riequilibrio del clima del nostro pianeta. Gli alberi hanno la preziosa proprietà di assorbire anidride carbonica, compensando l'emissione dei gas serra prodotti dalle attività umane: contribuiscono quindi a contenere l'effetto serra e le conseguenze ad esso collegate.

Inoltre il 90% delle specie animali e vegetali vive nelle foreste e anche tutelare la biodiversità

vuol dire preservare la capacità del pianeta di autoregolarsi.

Importante è infine il ruolo delle foreste per regolare il ciclo dell'acqua, grazie alla capacità di assorbire la giusta quantità di pioggia e di garantire un'alimentazione regolare dei corsi d'acqua sia in fase di siccità che di forti perturbazioni, oltre a quello di garantire stabilità al terreno sul quale crescono.

Per questi motivi è importante non solo una corretta gestione delle grandi e piccole aree verdi esistenti, ma anche la creazione di nuove.

La spinta politica innescata dagli accordi internazionali ha reso possibile a livello europeo la Dichiarazione di Madrid del marzo 1994, che ha posto come obiettivo dell'Unione Europea (UE) entro il 2010 la sostituzione del 15% del fabbisogno energetico comunitario con energia prodotta da fonti rinnovabili, tra le quali figurano le biomasse (nel 1994 l'energia primaria prodotta da fonti rinnovabili nell'UE era del 5,4% del fabbisogno energetico). L'obiettivo intermedio di produzione di energia da fonti rinnovabili entro il 2005 era pari al 10 % del fabbisogno energetico comunitario.

Seppur in modo alquanto generale, la prima tappa a favore dell'energia prodotta da fonti rinnovabili risale alla pubblicazione, nel novembre 1996, di un Libro Verde della Commissione europea "Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili" (COM (96) 576 del 20.11.1996), a cui è seguita una risoluzione del Parlamento europeo dell'anno successivo (PE 221/1398 def.). Il rappresentante dell'allora Europa dei 15, riconoscendo il ruolo che l'energia rinnovabile può avere per combattere l'effetto serra e contribuire alla sicurezza dell'approvvigionamento, auspicava, timidamente, la promozione di una strategia per un migliore impiego della biomassa agricola e forestale. Sebbene ancora a livello di "dichiarazione di intenti", la sensibilità delle istituzioni comunitarie si manifesta chiaramente con il Libro Bianco del 1997 (COM/97/0599 def.), in cui l'agricoltura viene definita "settore chiave" per il raddoppio della quota di energie rinnovabili nell'Unione europea. Il Libro Bianco UE sulle risorse Energetiche Rinnovabili ha previsto di ottenere nella UE entro il 2010 un tasso di produzione di energia primaria da fonti rinnovabili pari al 12%. A questo ambizioso obiettivo del Libro Bianco UE si aggiunge il Rapporto della Commissione per l'Agricoltura e lo Sviluppo Rurale del Parlamento Europeo che considerava il contributo dell'energia derivata da biomasse pari al 10%. In questo momento precedente a Kyoto, la soglia indicativa del 12 % veniva considerata un obiettivo politico minimo da mantenere a prescindere dagli impegni di riduzione delle emissioni di CO₂ che sarebbero stati fissati successivamente.

La Terza Conferenza delle Parti, l'organo decisionale con il compito di dare attuazione ai principi e agli impegni presi dagli Stati nell'ambito della Convenzione di Rio, ha adottato nel 1997 il Protocollo di Kyoto. Nel Protocollo i Paesi industrializzati si sono impegnati a ridurre, entro il 2008-2012, il totale delle emissioni di gas ad effetto serra almeno del 5,2 % rispetto ai livelli del 1990. Lo sforzo richiesto dal protocollo di Kyoto (vedi Figura 1.1) appare molto oneroso in termini economici e politici per essere affrontato solamente con una riduzione delle quantità di gas serra da parte dei paesi industrializzati e per questo sono stati previsti i cosiddetti meccanismi flessibili costituiti: dal commercio delle emissioni (*Trade Emission*), dai meccanismi di sviluppo pulito (*Clean Development Mechanisms*) e dalla realizzazione congiunta (*Joint Implementation*).

Con il primo meccanismo flessibile (*Trade Emission*), si consente agli stati di commerciare i diritti ad emettere gas serra (crediti di carbonio). Una società o una nazione che abbia conseguito una riduzione delle proprie emissioni serra, superiori al proprio obiettivo, potrà cedere tali crediti ad una società o una nazione che non sia in grado di abbattere i propri.

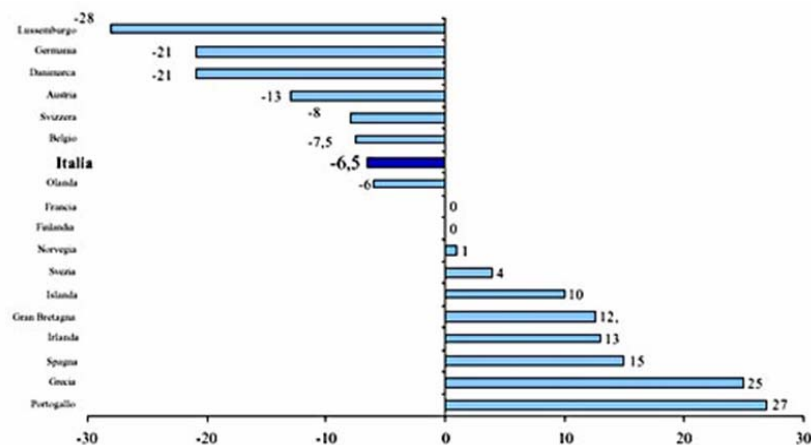


Figura 1.1: Impegni di riduzione per cento delle emissioni al 2010 rispetto al 1990 nella UE

I meccanismi della *Joint Implementation (JI) Clean Development Mechanisms (CDM)* sono concettualmente simili (Bettelheim e d'Oringy, 2004) e consentono di accreditare le riduzioni delle emissioni ottenute attraverso progetti di cooperazione tra paesi; tali progetti sono finalizzati alla riduzione delle emissioni attraverso la diffusione e l'impiego delle tecnologie più efficienti. Secondo la *JI* un organismo legale (pubblico o privato), individuato all'interno dei paesi dell'Allegato I, finanzia la riduzione o la rimozione delle emissioni di un altro paese dell'Allegato I, acquistando "unità di riduzione delle emissioni" (ERU, *Emission Reduction Unit*). Se il finanziamento avviene nei confronti di paesi non inseriti nell'Allegato I, si ricade nei CDM, acquistando "riduzioni di emissioni certificate" (CER, *Certified Emission Reduction*). Gli ERU ed i CER sono conteggiati ai fini della riduzione delle emissioni del paese finanziatore. Ad esempio possono essere realizzati generatori di energia alimentati a fonti rinnovabili. Lo scopo è quello di ridurre il costo complessivo d'adempimento degli obblighi, permettendo l'abbattimento delle emissioni dove è economicamente più conveniente.

Per meglio valutare le prospettive di sfruttamento delle FER delineate negli scenari, è utile ricordare che i paesi dell'Unione Europea hanno attribuito allo sviluppo di tali fonti un ruolo di rilievo per il raggiungimento dell'obiettivo della riduzione delle emissioni prevista dal Protocollo di Kyoto. Lo sviluppo delle FER assume inoltre un rilievo particolare anche nell'ottica di un rafforzamento della sicurezza dell'approvvigionamento energetico, contribuendo ad incrementare la quota di produzione energetica interna.

Già nel Libro Bianco della Commissione Europea (1997) veniva fissato per le FER l'obiettivo del raggiungimento di una quota pari al 12% dell'energia primaria totale consumata nell'Unione Europea (e al 22% del consumo totale di energia elettrica), cioè il

doppio del valore del 1995. L'obiettivo è stato poi confermato da una risoluzione del Consiglio europeo del 1998, dal Libro Verde sulla sicurezza dell'approvvigionamento energetico e più recentemente dalla direttiva sulla promozione dell'energia elettrica da fonti rinnovabili (direttiva 2001/77/EC).

La direttiva fissa per ogni Stato membro dei valori di riferimento circa gli obiettivi indicativi nazionali, da raggiungere entro il 2010, riguardo al contributo dell'energia elettrica prodotta da FER (rispetto al consumo totale lordo di energia elettrica). Tali obiettivi di sviluppo devono essere coerenti con il raggiungimento a livello UE, al 2010, di una quota della produzione totale di energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili pari al 22% (rispetto a circa il 16% attuale). La normativa di supporto adottata dagli Stati membri sembra avere contribuito a un incremento della quota di generazione delle fonti rinnovabili, anche se a un livello non ancora sufficiente al soddisfacimento degli obiettivi.

1.2 Il quadro delle rinnovabili nel mondo

Nel 2003 le fonti energetiche rinnovabili, con una produzione di energia pari a 1.404 Milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (Mtep), coprivano a livello mondiale il 13,3% dell'offerta totale di energia primaria, pari a 10.579 Mtep (fonte *International Energy Agency-IEA*). Nello stesso anno l'offerta di energia primaria nel mondo è stata soddisfatta per il 34,4% dal petrolio, per il 24,4% dal carbone, per il 21,2% dal gas naturale e per il 6,5% dal nucleare (Figura 1.2). Sul totale dell'energia prodotta da fonti rinnovabili le biomasse solide costituiscono la parte preponderante, con il 77,5% della produzione, grazie al diffuso utilizzo di biomasse non commerciali (soprattutto paglia, legno e rifiuti animali) nei Paesi in via di sviluppo (Figura 1.3).

Quasi il 90% della biomassa solida è prodotta e consumata, prevalentemente per il riscaldamento e la cottura dei cibi, nei paesi non-OECD (*Organizzazione per la Cooperazione Economica e lo Sviluppo*) in particolare nei Paesi in via di sviluppo del sud dell'Asia e dell'Africa sub-sahariana, mentre nei paesi più industrializzati si verifica un ricorso sempre più limitato a tale fonte per lasciare spazio a nuove forme di energia. Complessivamente, dal 1990 la produzione di energia da fonti rinnovabili è cresciuta ad un tasso annuo dell'1,8%, leggermente superiore al tasso di crescita annuo dell'offerta totale di energia primaria (TPES) che, nello stesso arco di tempo, è stato dell'1,6%.

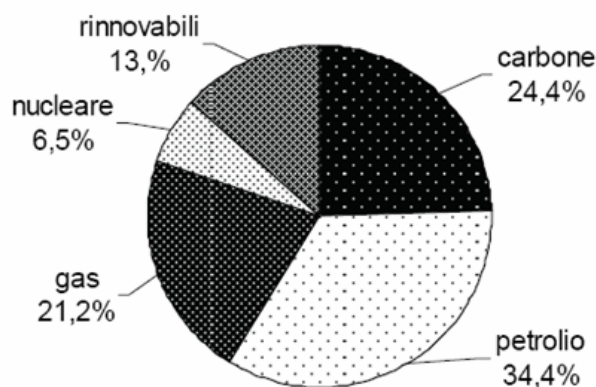


Figura 1.2: Offerta di energia primaria nel mondo; anno 2003. Fonte IEA *Renewables Information* 2005

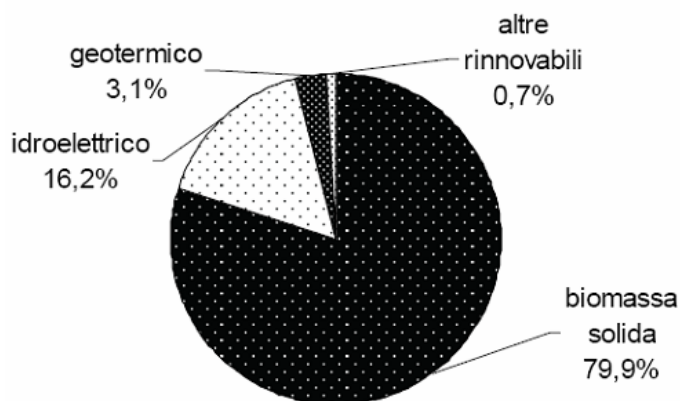
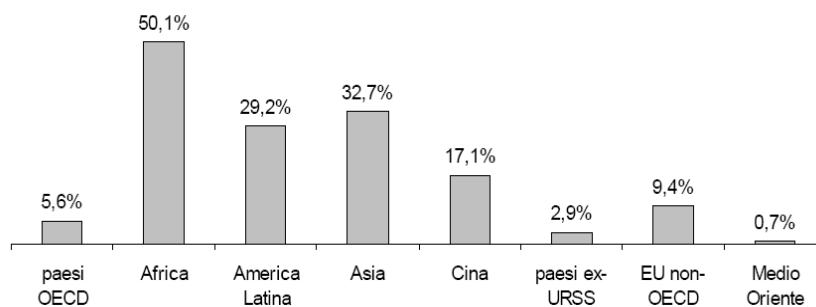


Figura 1.3: Produzione di energia da fonti rinnovabili nel mondo; anno 2003. Fonte IEA *Renewables Information* 2005

In ragione dell'elevato ricorso alla biomassa solida per usi energetici, i paesi non-OECD sono i maggiori utilizzatori delle fonti rinnovabili con una percentuale, nel 2003, pari al 78,3% della domanda totale di energia primaria.

D'altra parte i Paesi OECD forniscono solo il 21,7% delle rinnovabili a livello mondiale, mentre consumano il 51% dell'offerta mondiale di energia.

Di conseguenza, come si vede in Figura 1.4, mentre le rinnovabili rappresentano nei Paesi OECD solo il 5,6% della fornitura totale di energia, questa percentuale supera il 21,2% nei Paesi non-OECD e arriva al 50% nel continente africano.



Fonte: IEA Renewables Information 2005

Figura 1.4: Quota di rinnovabili per area sulla fornitura totale di energia. Anno 2003

1.3 Il quadro delle rinnovabili in Europa

L'energia è un settore chiave che contribuirà alla realizzazione degli obiettivi europei in materia di crescita, occupazione e sviluppo sostenibile. L'importanza capitale della politica energetica, per poter far fronte alle sfide della globalizzazione, è stata ribadita dai capi di Stato e di governo nell'ottobre 2005 (vertice informale svoltosi ad Hampton Court). La Commissione ha avviato il riesame della politica energetica finora condotta, che formerà l'oggetto di un Libro Verde incentrato su tre obiettivi: concorrenzialità, sviluppo sostenibile e sicurezza degli approvvigionamenti.

Le fonti energetiche rinnovabili non sono ancora pienamente sfruttate nei paesi dell'Unione Europea: il potenziale è considerevole, ma attualmente esse contribuiscono in maniera minima (meno del 6%) al consumo energetico globale EU. Si attende che possano crescere sensibilmente in futuro, anche per soddisfare gli impegni di protezione ambientale sia a livello europeo che mondiale e possano contribuire agli obiettivi di Kyoto e del Libro Bianco della CE, consistenti rispettivamente nella riduzione delle emissioni di gas serra di una quota pari all'8% tra il 2008 e il 2012 e nel raddoppio della quota dell'uso dell'energie rinnovabili dal 6% al 12%, nel bilancio energetico entro il 2010. Le fonti energetiche rinnovabili possono inoltre contribuire a ridurre la dipendenza dalle importazioni di energia, incrementando quindi la sicurezza della fornitura energetica, contribuire a creare nuovi posti di lavoro e favorire lo sviluppo locale. All'interno di questo scenario un ruolo fondamentale sarà sicuramente giocato dalla bio-energia.

Attualmente l'Europa copre il 50 % del suo fabbisogno energetico con le importazioni: di conseguenza il nostro benessere economico e sociale risulta molto vulnerabile agli eventi internazionali, senza contare che, con il declino dell'industria carbonifera e la resistenza del pubblico all'energia nucleare, la dipendenza dalle energie importate aumenta e, con

essa, il rischio di crisi di interruzione dell'approvvigionamento. Il Libro Verde sulla sicurezza dell'approvvigionamento energetico riporta che, se non si porrà alcun rimedio, entro il 2030 la dipendenza dell'Unione Europea dall'energia importata raggiungerà il 70%. Per questi motivi, la disponibilità di fonti energetiche rinnovabili interne e diversificate rappresenta una componente essenziale della strategia energetica europea.

L'Europa è all'avanguardia mondiale nella messa a punto delle tecnologie e dei sistemi di utilizzo delle fonti di energia rinnovabili, che però sono ancora poco sfruttate. Riconoscendo l'esistenza di questo problema, il Libro Bianco del 1997 sulle fonti energetiche rinnovabili ha dato un chiaro segnale politico e ha impresso l'impulso necessario, fissando un obiettivo indicativo: il raddoppio del contributo fornito dalle fonti rinnovabili per arrivare al 12 % del consumo energetico lordo europeo, entro il 2010. I produttori di energie rinnovabili sono spesso piccoli, con impianti diffusi su un ampio territorio, come le piccole centrali idroelettriche o gli impianti alimentati a biomassa, ubicati nei pressi di foreste e regioni agricole. È importante che questi impianti possano allacciarsi alla rete di distribuzione dell'energia elettrica a costi contenuti.

La direttiva impone agli Stati membri di garantire l'accesso ai produttori di energia elettrica verde, ai quali, se necessario, si può concedere un accesso prioritario. Per rendere possibile il conseguimento di questo obiettivo, gli operatori di rete devono stabilire norme eque e trasparenti sui costi di allacciamento alla rete e sulle modalità di ripartizione dei costi fra i produttori; queste norme non possono discriminare i produttori di energie rinnovabili.

1.4 Il quadro delle rinnovabili in Italia

Il decreto attuativo dell'E-Fer è il n. 387 del 29 dicembre 2003, che definisce fonti energetiche rinnovabili o fonti rinnovabili: le fonti energetiche rinnovabili non fossili (eolica, solare, geotermica, del moto ondoso, idraulica, biomasse, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas).

Nell'anno 2003 in Italia il fabbisogno di energia elettrica (319,7 TWh) è stato soddisfatto per il 67 % da impianti termoelettrici alimentati da combustibili fossili, per il 2% da impianti eolici, fotovoltaici e geotermici, per il 14% da impianti idroelettrici, per l'1% da biomasse ed infine per il 16 % da energia prodotta all'Estero. La produzione da fonte convenzionale è indispensabile per garantire all'Italia la copertura della maggior parte dei consumi, ma mantenendosi tale quota di generazione a livelli così elevati, non si

migliorano le condizioni ambientali in cui viviamo: da qui l'importanza di sviluppare le fonti rinnovabili che, oltre a ridurre la dipendenza dal petrolio, riducono i rischi di oscillazione dei prezzi legati alle fonti energetiche fossili.

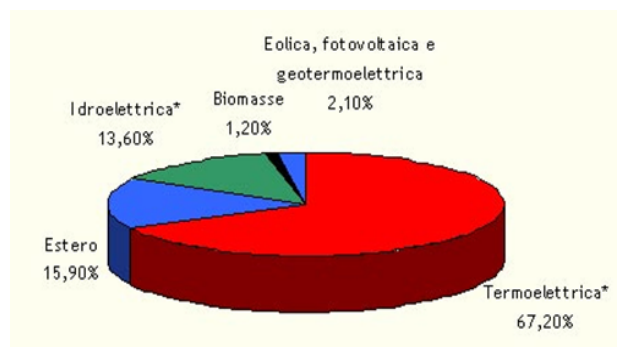


Figura 1.5. Composizione % dell'offerta di energia elettrica
 (*) % calcolata al netto dei servizi ausiliari e dei consumi per pompaggi [Fonte GRTN]

Infatti, considerando che l'Italia non dispone di combustibili fossili in quantità sufficiente a soddisfare il fabbisogno, è necessario acquistare le risorse sul mercato internazionale creando una ulteriore dipendenza dall'estero.

In tale contesto le fonti rinnovabili sono un valido aiuto per ridurre questa dipendenza. Oltre alla diversificazione delle fonti energetiche e lo sviluppo delle fonti rinnovabili, si pone quindi anche l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale. Infatti il nostro Paese, sottoscrivendo il protocollo di Kyoto, si è impegnato a ridurre le emissioni climalteranti entro il 2010 del 6,5% rispetto al 1990: tale obiettivo è confermato dalla direttiva europea 2001/ 77 / CE, recepita nel nostro ordinamento con il Decreto Legislativo del 29 / 12 / 03, n. 387 e potrà essere raggiunto mediante la convergenza di diverse iniziative, quali:

- riduzione delle emissioni degli impianti che garantiscono la copertura dei fabbisogni energetici
- incremento delle fonti rinnovabili con un maggior impegno nello sviluppo di tecnologie esistenti
- promozione dell'utilizzo dell'idrogeno
- forte impegno nell'incremento dell'efficienza e del risparmio energetico

Nel 2003 (fonte GRTN) la produzione di energia elettrica da impianti alimentati a fonti rinnovabili è stata pari a 47,7 TWh, evitando così 34 milioni di tonnellate di emissioni inquinanti di CO₂. Il maggior contributo alla produzione dei 47,7TWh da fonte rinnovabile proviene dalla produzione idroelettrica, che con i suoi 36,8 TWh supera il 77% del totale. Significativa è inoltre l'incidenza della geotermia (11,11 %) e di biomasse e rifiuti (8,8 %). L'eolico, pur con un'incidenza inferiore al 3%, è quello che ha mostrato negli ultimi anni il

maggiore incremento percentuale. Si noti che, per quanto riguarda l'idroelettrico, la maggior parte della produzione riguarda taglie di impianti superiore ai 10 MW.

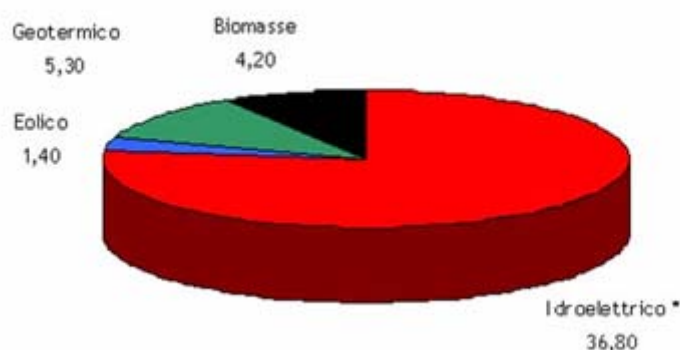


Figura 1.6: Produzione di energia lorda rinnovabile (TWh). Fonte GRTN

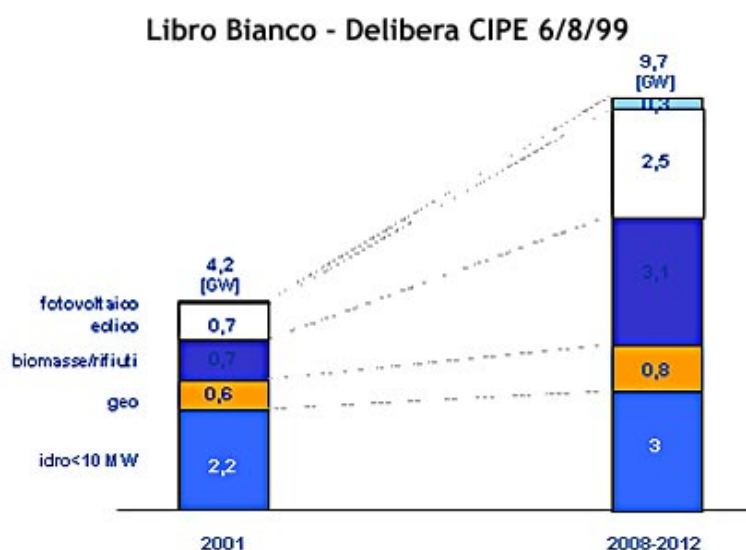


Figura 1.7: Previsioni di sviluppo delle rinnovabili

Lo sviluppo delle fonti rinnovabili ha due vincoli che ne impediscono una larga diffusione; il primo è legato alla disponibilità della risorsa, il secondo è la minore economicità delle rinnovabili rispetto alla fonte fossile convenzionale. Il primo vincolo è facilmente intuibile elencando quelle che sono le materie prime utilizzate per la produzione di energia da fonte rinnovabile: acqua, vento, sole, vapore geotermico. Diverso è il caso degli impianti alimentati a biomasse e rifiuti che possono essere considerate (se si eccettua la tipologia del combustibile) alla stregua delle centrali convenzionali.

Il Libro Bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili approvato dal CIPE nell'aprile 1999 ha stimato quelle che saranno le potenze installate al 2008-2012, prevedendo che l'idroelettrico raggiunga i 18.000MW, il geotermico 800MW, l'eolico

2.500MW, il fotovoltaico 200MW e le biomasse 3.100MW (vedi fig.1.7). Il secondo vincolo è realistico se non vengano considerati i costi delle esternalità, in tal caso, il costo di un KWh prodotto da fonte rinnovabile è maggiore di uno prodotto da fonte convenzionale, non tanto per l'incidenza del costo della fonte energetica primaria, generalmente nullo per le fonti rinnovabili ed elevato per le fonti convenzionali, bensì per le maggiori economie di scala che si possono ottenere con un impianto a fonte tradizionale. Tuttavia le esternalità implicano costi molto elevati per la società, dovuti all'impatto ambientale generato dal settore elettrico e sostanzialmente legate all'inquinamento atmosferico. Pertanto, nel caso in cui vengano considerate le esternalità il costo del Kwh prodotto da fonte rinnovabile diventa molto più competitivo. Fin qui abbiamo parlato di "energia rinnovabile" senza introdurre il termine "energia verde" che spesso viene usato inappropriatamente come un sinonimo della prima. Il sistema "100% energia verde" riconosce come "energia verde" l'energia rinnovabile che soddisfa anche criteri di sostenibilità. In quest'ottica si può definire "verde" ogni risorsa energetica che sia ritenuta sostenibile in quanto soddisfa i seguenti requisiti:

- la disponibilità deve essere continua ed indefinita ed il tasso di rinnovamento non deve essere inferiore a quello di utilizzo;
- deve avere impatti, estesi a tutto il ciclo di vita, accettabili sotto il profilo ambientale, sociale e sanitario;
- non deve essere dipendente da attività industriali che non siano intrinsecamente sostenibili.

Secondo le previsioni del Libro Bianco, (vedi Fig. 1.7) le FER che sono maggiormente suscettibili di incremento del loro contributo energetico sono le biomasse, l'eolico ed il fotovoltaico. Questo ultimo è stato recentemente oggetto di (DM 28/07/2005 previsto all'art. 7 comma 1 del D.Lgs 29/12/2003 n° 387, che definisce i criteri per l'incentivazione dell'energia elettrica prodotta da impianti fotovoltaici; il 6 febbraio 2006 è stato firmato il secondo decreto fotovoltaico che amplia e integra il DM 28/07/2005) forti incentivazioni che potranno determinarne un aumento consistente. Nel presente studio sarà trattata la produzione di biomasse da coltivazioni dedicate per scopi energetici.

1.5 Definizione delle biomasse

Molti sono i riferimenti normativi che indicano il significato del termine biomasse. Per non generare confusione, vengono riportate due delle più autorevoli. Una è quella della Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2001/77/CE del 27 settembre 2001 sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità, dove all'articolo 2, lettera b), le biomasse vengono così definite: "la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali ed animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali ed urbani". La definizione di biomasse risulta qui più ampia perché anche i rifiuti possono essere utilizzati come fonti energetiche purché gli Stati membri rispettino la normativa comunitaria vigente in materia di gestione dei rifiuti. Tale definizione è stata recepita dall'ordinamento italiano con il d.lgs. 387 del 29 dicembre 2003 in attuazione della Direttiva in questione.

L'altra importante definizione riguarda l'ambito di applicazione del DPCM , 8 marzo 2002, il quale stabilisce le caratteristiche merceologiche dei combustibili aventi rilevanza ai fini dell'inquinamento atmosferico nonché le caratteristiche tecnologiche degli impianti di combustione. Tra i combustibili consentiti vi è la legna da ardere ed il bio-diesel, dove all'allegato III, si individuano le biomasse combustibili per tipologia e provenienza:

- a) Materiale vegetale prodotto da coltivazioni dedicate;
- b) Materiale vegetale prodotto da trattamento esclusivamente meccanico di coltivazioni agricole non dedicate;
- c) Materiale vegetale prodotto da interventi selvicolturali, da manutenzione forestale e da potatura;
- d) Materiale vegetale prodotto dalla lavorazione esclusivamente meccanica di legno vergine e costituito da cortecce, segatura, trucioli, chips, refili e tondelli di legno vergine, granulati e cascami di legno vergine, granulati e cascami di sughero vergine, tondelli, non contaminati da inquinanti;
- e) Materiale vegetale prodotto dalla lavorazione esclusivamente meccanica di prodotti agricoli. Per le condizioni di utilizzo si cita la conversione energetica delle biomasse che può essere effettuata attraverso la combustione diretta, ovvero previa pirolisi o gassificazione.

A livello nazionale ricordiamo che la materia energia fa parte del Titolo V della costituzione e come tale è una materia concorrente Stato-Regioni. Con la legge n. 239,

approvata il 23 agosto 2004, il parlamento ha inteso affrontare la riforma ed il riordino del settore, definendo, in primo luogo, le competenze tra Stato e Regioni. Le biomasse considerate in questo lavoro sono quelle lignocellulosiche, in particolare quelle ottenute da coltivazioni dedicate per scopi energetici.

Attualmente questo tipo di coltivazioni possono anche essere indicate come Produzioni Energetiche di Origine Agricola (PAE). Infatti con il termine più generale di biomasse vengono inclusi materiali di scarto non certificabili e non solo agricoli. Quindi per PAE si intendono prodotti vergini o materiali agro forestali, provenienti da coltivazioni erbacee od arboree, destinati alla produzione di energia che meglio sappia valorizzarli.

1.5.1 I Biocombustibili

I biocombustibili per la produzione energetica derivano dalle biomasse di origine forestale, agricola e animale. Per quanto riguarda la destinazione delle biomasse per uso energetico si riporta in Tab.1.1 uno schema della FAO utilizzato per monitorare e gestire la produzione bioenergetica nell'ambito del WEP (Wood Energy Program).

Gruppi Principali	Produzione/Offerta	Utilizzazione/Domanda
BIOCOMBUSTIBILI FORESTALI	Legnosi diretti Legnosi indiretti Altri derivati del legno	Solidi: legna (legna da ardere, chips, segatura, pellets), carbone di legna Liquidi: “ <i>Black liquor</i> ”, metanolo, olio da pirolisi. Gassosi: prodotti di gassificazione e gas da pirolisi
BIOCOMBUSTIBILI AGRICOLI	Colture da energia Sottoprodotti agricoli Sottoprodotti da allevamento Sottoprodotti agro-industriali	Solidi: Paglie, gambi, gusci, bagasse, carbone da biocombustibili agricoli. Liquidi: etanolo, metanolo, oli vegetali, biodiesel, olio da pirolisi da biocombustibili agricoli Gassosi: biogas, gas da pirolisi da biocombustibili agricoli.
RIFIUTI URBANI	Frazione organica dei rifiuti urbani	Solidi: rifiuti solidi urbani Liquidi: olio da pirolisi da RSU Gassosi: biogas da discarica

Tabella 1.1: Classificazione dei biocombustibili (Fonte FAO, Wood Energy Program 2003)

1.5.2 Le coltivazioni energetiche

Una valida soluzione per l'approvvigionamento di biomassa ad uso energetico è la coltivazione dedicata di specie erbacee e legnose. Si tratta di colture su suoli agricoli,

alternative a quelle alimentari , ancora poco diffuse, che hanno tuttavia un elevato potenziale produttivo e che possono determinare notevoli benefici ambientali.

Il potenziale di queste coltivazioni è notevole, oltre che dal punto di vista biologico – colturale, anche perché vi è la necessità di trovare alternative al surplus di terre coltivate e la possibilità di utilizzare in modo economico le aree di recente marginalizzazione provenienti dall’abbandono della destinazione agricola.

Le colture erbacee annuali si caratterizzano perché rimangono nello stesso appezzamento per una sola stagione (girasole, colza, sorgo da fibra, Kenaf, canapa, ecc...). Le colture erbacee poliennali (canna comune, miscanto, panico, cardo, ecc...) e le colture legnose a breve rotazione (pioppo, salice, eucalipto, robinia ecc...) possono essere messe a dimora (tramite semi, talee, rizomi, ecc...) una sola volta all’inizio del ciclo di produzione, il quale può durare 10 -15 anni.

	SPECIE	CICLO DI PRODUZIONE	PRODOTTO INTERMEDIO	PRODOTTO TRASFORMATO
OLEAGINOSE	Colza	Erbacea annuale	Semi oleosi	Olio vegetale
	Girasole	Erbacea annuale	Semi oleosi	
	Soia	Erbacea annuale	Semi oleosi	
	Ricino	Erbacea annuale	Semi oleosi	
	Cartamo	Erbacea annuale	Semi oleosi	
ZUCCHERINE AMIDACEE	Barbabietola da zucchero	Erbacea annuale	Rizoma	Zuccheri/alcoli
	Sorgo zuccherino	Erbacea annuale	Granella	
	Topinambur	Erbacea poliennale	Tubercolo	
	Mais	Erbacea annuale	Granella	
	Frumento	Erbacea annuale	Granella	
LIGNO CELLULOSICHE	Kenaf	Erbacea annuale	Fibra	Legno e fibre sminuzzate Fascine di residui
	Canapa	Erbacea annuale	Fibra	
	Miscanto	Erbacea poliennale	Fibra	
	Canna comune	Erbacea poliennale	Fibra	
	Sorgo da fibra	Erbacea annuale	Fibra	
	Cardo	Erbacea poliennale	Fibra	
	Panico	Erbacea poliennale	Fibra	
	Robinia	Legnosa poliennale	Legno	
	Ginestra	Legnosa poliennale	Legno	
	Eucalipto	Legnosa poliennale	Legno	
	Salice	Legnosa poliennale	Legno	
	Pioppo	Legnosa poliennale	Legno	

Tabella 1.2: Specie utilizzabili per le coltivazioni energetiche e loro caratteristiche (Fonte ITABIA)

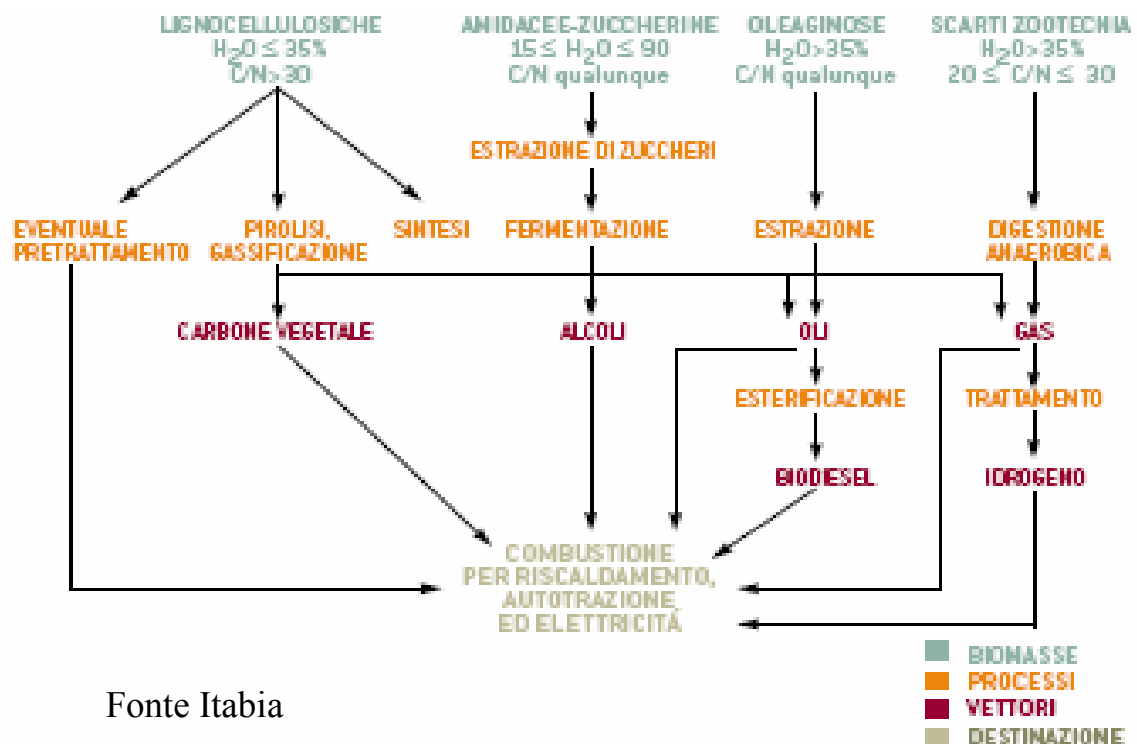
Le colture legnose poliennali si caratterizzano per la capacità di ricrescere dopo la ceduzione, per una elevata capacità produttiva di biomassa. Rispetto alle colture erbacee, queste sono meno esigenti in termini di lavorazioni del terreno ed interventi colturali; questo si traduce in un migliore rapporto tra input ed output energetici.

Un ulteriore vantaggio delle colture legnose rispetto alle altre riguarda le caratteristiche del prodotto che può essere suddiviso in tre categorie:

- Oleaginose
- zuccherine e amidacee
- lignocellulosiche

Il prodotto lignocellulosico può essere utilizzato tal quale una volta raccolto, mentre gli altri prodotti (frutti, semi, ecc...) danno prodotti differenziati da valorizzare adeguatamente con ulteriori passaggi costituenti le rispettive filiere.

Le filiere energetiche che possono risultare dai biocombustibili sono diverse e riportate nello schema sottostante.



Fonte Itabia

Figura 1.8: Schema delle principali filiere energetiche da biomassa

Il limite maggiore all'utilizzo di colture all'utilizzo delle colture erbacee nella produzione di calore ed elettricità è dovuto ad una minore efficienza di combustione se comparata con l'utilizzo di biomasse legnose (Samson, 1998), ma anche il minor peso specifico, il minor potere calorifico per unità di peso ed il maggiore contenuto di ceneri e di altri composti indesiderati in quanto corrosivi, quali il potassio (K), fosforo (P), o inquinanti quali zolfo (S), azoto (N), e cloro (Cl) (Kavalov, 2004).

La filiera che ci interessa in questo studio è quella delle biomasse lignocellulosiche.

1.6 Il potenziale della biomassa legnosa

Una caratteristica fondamentale delle risorse forestali è la loro multifunzionalità e la contemporanea capacità di offrire beni commerciali e servizi pubblici, spesso senza prezzo.

	% sul totale dei prelievi	
	2000	2050
Foreste primarie	22	5
Foreste secondarie a gestione irregolare o estensiva	14	10
Foreste secondarie gestite e ordinariamente utilizzate	30	10
Piantagioni industriali con specie autoctone	24	25
Piantagioni industriali a rapida crescita	10	50

Tabella 1.3: I prelievi di legname a livello mondiale per tipo di formazione forestale.

Fonte: Sedjo, 2001

Attualmente a livello mondiale il 34% dei prelievi di legname proviene da piantagioni (123,7 M ha, pari al 3,5 % della superficie mondiale). Questo dato indica che tale percentuale è elevata ed in continua crescita (Sedjo, 2001).

Secondo le previsioni riportate in tabella 1.3, nel 2050 il 75% dei prelievi proverrà dalle piantagioni. Benché tali dati siano stime gravate pertanto da grandi margini di incertezza, è da evidenziare che tutti i modelli revisionali predisposti a livello internazionale sottolineano il ruolo crescente delle piantagioni forestali in aree pianeggianti, facilmente meccanizzabili, nel soddisfare la domanda di legname (*Global Forest Products Model* (Zhu et al., 1999) – *European timber Trends and Prospects* (ECE/FAO, 1996)).

Queste previsioni sono confermate nel recente *report* del EEA, il quale prevede per l'Europa un progressivo incremento dell'agricoltura nella produzione di bioenergie.

Lo stesso rapporto prevede un forte incremento della disponibilità di suoli agricoli per coltivazioni dedicate a energia.

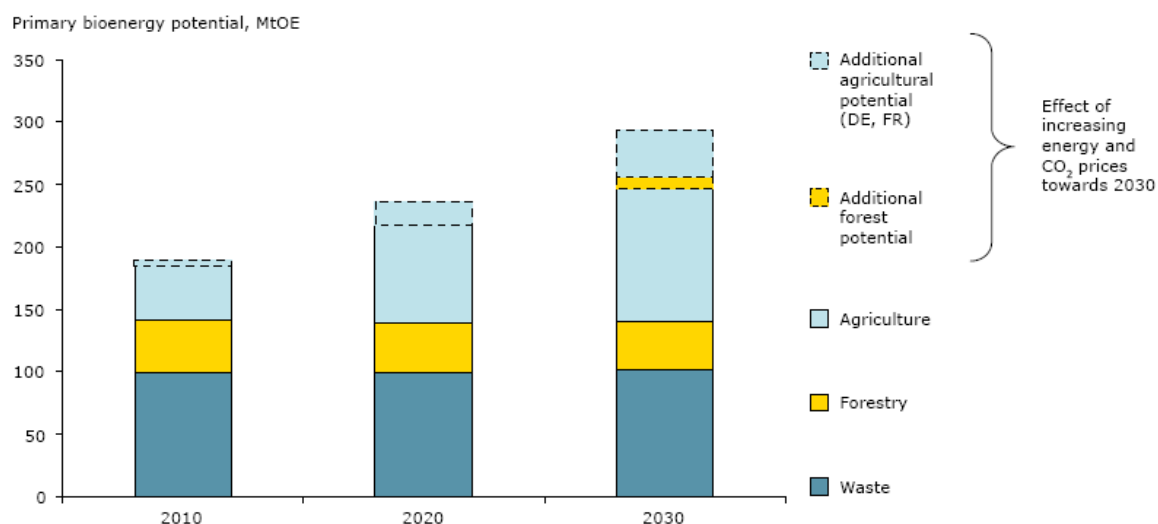


Figura 1.9: Incremento del potenziale della bioenergia in Europa tra i vari settori. Fonte EEA/06

	Austria	Belgium	Czech Republic	Denmark	Estonia	Finland	France	Germany	Greece	Hungary	Ireland	Italy	Latvia	Lithuania	Netherlands	Poland	Portugal	Slovakia	Slovenia	Spain	Sweden	United Kingdom	EU-14	New Member States (EU-8)	EU-22
2010	204	0	303	74	88	486	536	1 000	356	413	0	1 074	83	525	0	3 823	250	81	3	2 706	135	824	5 320	7 646	12 965
2020	266	0	314	0	154	299	1 000	2 000	298	512	0	1 786	144	882	0	4 321	169	140	16	2 582	168	1 118	6 484	9 686	16 170
2030	298	0	301	0	159	174	2 000	3 000	266	547	0	2 165	183	1 055	0	4 525	125	213	36	2 459	178	1 584	7 019	12 249	19 267

Tabella 1.4: Disponibilità di terreni agricoli per le colture dedicate da energia, nei diversi stati membri (1000ha) Fonte: EEA,2006

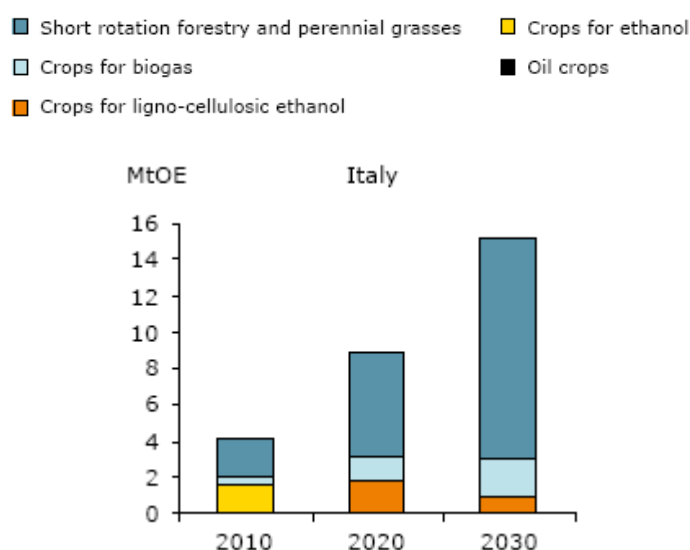


Figura 1.10: Produzione di energia da colture dedicate in Italia. Fonte EEA /2006

Tra le possibili coltivazioni, come mostrato nella figura 1.10., le *Short Rotation Forestry* sono quelle per le quali è previsto un incremento maggiore.

Quanto le piantagioni forestali siano in grado di cambiare il quadro dell'offerta in termini relativamente brevi, è ben testimoniato non solo dall'esperienza di alcuni grandi paesi extraeuropei (Cina, Cile, Nuova Zelanda, Sud Africa Argentina ecc...), ma anche da alcuni investimenti realizzati in alcune realtà europee (Irlanda, Scozia, Spagna, Portogallo). Anche nel nostro paese non va dimenticato che su 70 - 80.000 ha di superficie piantati a pioppo si concentra il 42,8 % della produzione di legname ad uso industriale (1,8 M mc nel 1999). Anche in termini di piantagioni effettuate, l'Italia ha dimostrato di recente una insperata capacità di intervento: con il Reg. 2080/1992 sono stati impiantati oltre 78.000 ha (superfici collaudate).

	2010				2020				2030			
	Agriculture	Forestry	Waste	Total	Agriculture	Forestry	Waste	Total	Agriculture	Forestry	Waste	Total
Austria	0.6	3.3	3.0	6.9	1.4	3.3	3.1	7.8	2.1	3.5	3.1	8.7
Belgium	0.1	0.1	2.1	2.3	0.1	0.1	2.1	2.3	0.1	0.2	2.0	2.3
Germany	5.0	6.3	14.9	26.2	13.7	5.3	14.8	33.8	23.4	4.8	15.0	43.2
Denmark	0.4	0.1	2.3	2.8	0.1	0.2	2.2	2.5	0.1	0.2	2.2	2.5
Spain	7.8	1.7	7.1	16.5	12.9	1.8	7.3	22.0	16.0	1.5	7.5	25.1
Finland	1.9	1.7	6.1	9.6	1.8	1.8	6.2	9.8	1.3	1.8	6.2	9.4
France	2.6	12.7	16.1	31.4	7.8	13.2	16.2	37.2	17.0	14.2	16.2	47.4
Greece	0.0	n.a.	1.6	1.6	1.7	n.a.	1.6	3.4	2.2	n.a.	1.7	3.8
Ireland	0.0	0.1	1.0	1.1	0.1	0.1	1.0	1.2	0.1	0.1	1.0	1.3
Italy	4.1	5.6	6.5	16.2	8.9	3.3	6.5	18.7	15.2	3.0	6.6	24.8
Luxembourg	n.a.	n.a.	0.0	0.0	n.a.	n.a.	0.0	0.0	n.a.	n.a.	0.0	0.0
Netherlands	0.2	0.1	2.4	2.6	0.5	0.1	1.6	2.2	0.7	0.2	1.6	2.4
Portugal	0.7	0.2	2.7	3.6	0.8	0.2	2.9	3.9	0.8	0.2	3.1	4.1
Sweden	0.6	2.2	8.9	11.7	1.1	2.4	9.5	13.0	1.4	2.4	9.7	13.5
United Kingdom	3.4	1.5	8.6	13.5	8.8	1.5	8.7	19.0	14.7	1.1	8.6	24.5
EU-15	27.2	35.7	83.3	146.2	59.8	33.2	83.7	176.6	95.0	33.3	84.7	213.0
Czech Republic	0.8	0.8	2.2	3.8	1.3	0.8	2.3	4.5	1.6	0.9	2.5	5.0
Cyprus	n.a.	n.a.	0.3	0.3	n.a.	n.a.	0.3	0.3	n.a.	n.a.	0.3	0.3
Estonia	0.4	0.2	0.9	1.5	1.1	0.2	0.9	2.2	1.3	0.2	1.0	2.6
Hungary	1.2	0.2	2.1	3.6	2.2	0.2	2.1	4.5	3.1	0.4	2.0	5.6
Lithuania	2.0	0.7	1.4	4.1	5.6	0.6	1.4	7.6	7.9	0.4	1.6	9.9
Latvia	0.4	0.6	0.3	1.3	1.0	0.6	0.2	1.9	1.5	0.6	0.3	2.4
Malta	n.a.	n.a.	0.05	0.05	n.a.	n.a.	0.05	0.05	n.a.	n.a.	0.04	0.04
Poland	14.5	2.0	7.3	23.8	24.1	1.5	7.4	33.0	30.4	1.2	7.8	39.3
Slovenia	0.0	1.3	0.5	1.8	0.1	1.1	0.5	1.7	0.2	1.0	0.5	1.8
Slovakia	0.2	1.0	1.0	2.2	0.6	0.9	1.0	2.4	1.2	0.9	1.5	3.6
New EU-10	19.5	6.8	16.0	42.4	36.0	5.9	16.2	58.1	47.3	5.7	17.5	70.5
EU-25	46.8	42.5	99.3	188.5	95.8	39.2	99.8	234.7	142.4	39.0	102.1	283.4
Net competition effect for forestry						2.1	- 0.8	1.3		16.2	- 6.3	9.9
EU-25	46.8	42.5	99.3	188.5	95.8	41.3	99.0	236.0	142.4	55.2	95.8	293.3

Tabella 1.5:Potenziale della bioenergia (in MtOE) dei diversi settori negli stati membri nel 2010, 2020, 2030.Fonte: EEA,2006

Per i grandi benefici che l'impiego di Fonti energetiche rinnovabili presenta, l'UE ha definito una politica orientata verso la riduzione degli sprechi energetici e l'incentivazione delle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER).

Nel Libro Bianco, istituito per lo sviluppo delle FER, si rileva l'importanza dell'agricoltura come settore cardine per la produzione delle biomasse ligno-cellulosiche.

L'Italia, nell'ambito della decisione del Consiglio dei Ministri dell'Ambiente dell'UE del 17 giugno 1998, si è impegnata a ridurre del 6,5% le proprie emissioni di gas serra rispetto al 1990, corrispondenti ad una riduzione di oltre 100 milioni di tonnellate equivalenti di CO₂.

La delibera CIPE del 19 novembre 1998 ha valutato in circa 20 milioni di tonnellate equivalenti di CO₂ la quota relativa alla produzione di energia da fonti rinnovabili, di cui circa 10 milioni dovrebbero essere imputati alla produzione di energia elettrica da biomasse.

Un'altra quota significativa, pari a circa 6 milioni di tonnellate equivalenti di CO₂, dovrebbe derivare dall'uso di circa 2 Mtep di biocombustibili, di cui 1,5 Mtep come biodiesel da coltivazioni oleaginose e 0,5 Mtep come etanolo, che potrebbero essere ottenuti da circa 0,75 Mt di alcol da miscelare come ETBE (al 47% di etanolo in peso) alla benzina.

Complessivamente, per la produzione dei biocombustibili dovrebbe essere necessario destinare a specifiche coltivazioni energetiche circa 1,6 milioni di ettari di superficie agricola da recuperare in gran parte dai terreni agricoli seminativi (circa 9 milioni di ettari). L'interesse dell'Italia verso lo sfruttamento delle biomasse è inoltre giustificato dalle seguenti ragioni:

- produzione energetica fortemente deficitaria: l'Italia importa oltre l'80% del suo fabbisogno energetico primario, di cui circa il 15% come energia elettrica;
- presenza di sottoprodotti e residui agricoli, agro-industriali e forestali, stimati in circa 24 milioni di tonnellate di sostanza secca per anno, da utilizzare in maniera ecologicamente corretta;
- eccedenza di superficie agricola destinata a coltivazioni alimentare, da utilizzare per coltivazioni energetiche e/o industriali;
- terreni agricoli abbandonati, pari a circa 3 milioni di ettari, con alto rischio di dissesto idrogeologico, su cui si dovrebbe procedere con una intensa politica di afforestazione;

- necessità di intervento di manutenzione e riconversione del patrimonio forestale, valutato in oltre 10,5 milioni di ettari tra bosco ed altre terre boscate (dati di prima fase dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi di Carbonio- IFNI);
- spopolamento di aree montane;
- alto tasso di disoccupazione.

1.7 Caratteristiche tecnologiche delle biomasse legnose per scopi energetici

Dal punto di vista energetico, le biomasse legnose possono essere considerate come energia radiante, trasformata dalle piante in energia chimica e stoccata sotto forma di molecole complesse (polimeri) ad alto contenuto energetico, grazie alla fotosintesi.

La CO₂ atmosferica trasformata in biomassa, mediante il processo fotosintetico, ha il potenziale di diventare una delle principali fonti globali di energia primaria durante questo secolo ed i sistemi di bioenergia moderni sono indicati per contribuire alla sostenibilità dei futuri sistemi energetici, sia nei paesi industrializzati così come nei paesi in via di sviluppo (*Hall DO, 1997*).

Le caratteristiche del combustibile che ci interessano in questa sede sono quelle chimiche, fisiche ed energetiche.

1.7.1 Le caratteristiche chimiche

I principali polimeri delle biomasse legnose sono la cellulosa, l'emicellulosa e la lignina.

La cellulosa è il principale componente del legno, del quale costituisce circa il 50 % del peso secco; in forma di microfibrille, essa è costituita da una catena lineare di monomeri (molecole di glucosio) con elevato grado di polimerizzazione. Essa è presente nella parete cellulare primaria e, soprattutto, secondaria, e conferisce al legno resistenza meccanica ed agli agenti chimici (*Browning, 1967; Timmell, 1986*).

L'emicellulosa (costituente dal 10 al 30% del legno) è un polisaccaride a basso peso molecolare, presente nella parete cellulare delle piante, negli spazi lasciati liberi dalla cellulosa. L'emicellulosa come la cellulosa è insolubile in acqua, ma al contrario di essa è solubile in soluzione acquosa alcalina (*Browning, 1967*).

La lignina è il costituente che differenzia il legno dagli altri materiali vegetali; essa è costituita da una miscela di polimeri fenolici a basso peso molecolare, la cui unità è il fenil- propano. Contenuta in percentuali che variano dal 20 al 30% del peso secco del

legno, la lignina è presente nella lamella mediana e nella parete cellulare, conferendo rigidità alla pianta.

Oltre ai tre componenti principali, nel legno sono presenti numerosi altri composti organici, localizzati nel lume della parete cellulare: terpeni, resine, grassi, gomme, zuccheri non strutturali, tannini, alcaloidi, cere ecc.... Una frazione importante del legno è costituita da composti inorganici (sali di calcio, magnesio, sodio, potassio, silicio, ecc...) che solitamente si ritrovano, in seguito alla combustione, nelle ceneri. La percentuale dei composti inorganici è variabile, ed è influenzata da diversi fattori (terreno, specie arborea, organo della pianta, ecc...). Ad esempio la componente inorganica passa dallo 0,4% della base del tronco al 7% delle foglie ed al 10 % della corteccia (*Hakkila, 1989*). Riguardo la sua composizione elementare, il legno, anche se vi sono variazioni tra i diversi tipi, è costituito quasi interamente da tre elementi: carbonio (49-51%), ossigeno (41-45 %), idrogeno (5-7%). A differenza di altri combustibili (quali ad esempio il carbone), esso contiene relativamente basse quantità di azoto, tracce di zolfo ed altri elementi minerali che vanno a costituire le ceneri (0,5 – 1,5 %).

Il rapporto percentuale tra i principali elementi influisce in maniera determinante sul valore del legno come combustibile: un alto contenuto di carbonio ed idrogeno determina un più alto potere calorifico, mentre elevate presenze di ossigeno, azoto e ceneri hanno un effetto opposto.

1.7.2 Le caratteristiche fisiche

Le caratteristiche fisiche del legno che hanno influenza sui processi di conversione energetica sono l'umidità e la densità basale.

L'umidità assume una significativa importanza perché, oltre ad agire sui meccanismi di combustione, ha un'influenza sulle caratteristiche chimiche del legno. La quantità di acqua nel legno è estremamente variabile: al momento del taglio può assumere valori diversi a seconda della specie, dell'età, della diversa parte della pianta considerata, della stagione. In genere si hanno valori più bassi di umidità nelle latifoglie, rispetto alle conifere, nelle parti basse rispetto alle parti alte della pianta, in estate rispetto all'inverno.

L'umidità esprime la quantità di acqua (libera e legata) presente nel legno, espressa come percentuale sia sul peso secco che sul peso fresco del legno; nel primo caso si esprime il tenore in acqua in rapporto alla sua massa anidra:

$$U (\%) = (P_f - P_s) / P_s \times 100$$

Nel secondo caso , invece, si valuta il tenore in acqua in rapporto al peso tal quale (Pf):

$$u (\%) = (Pf - Ps) / Pf \times 100$$

Dove Pf = Peso del legno allo stato fresco

Ps = Peso del legno allo stato anidro

La densità basale rappresenta un comune indicatore della qualità del combustibile legnoso.

$$DB = Ps / Vf$$

Dove DB = Densità basale

Vf = Volume del legno allo stato fresco

Essa si esprime in tonnellate al metro cubo e varia da 0,3 (o meno) a 0,7 t/m³ e ci esprime la quantità effettiva di legno (peso secco), effettivamente utilizzabile dall'industria. Questa varia in funzione della specie, del genotipo, dell'età, della parte della pianta e di altri fattori ancora (*Brown*, 1997).

1.7.3 Le caratteristiche energetiche

Un efficace indicatore del valore combustibile di un vettore energetico è rappresentato dal potere calorifico, che si definisce come la quantità di calore prodotta dalla combustione completa di un'unità di peso di un materiale. In genere si usa esprimere tale valore in Kcal/Kg oppure in Kj/Kg. Nel caso di combustibili liquidi e solidi, il contenuto energetico può essere espresso in relazione al volume (Kcal/l oppure Kcal/m³): dalla conoscenza del peso specifico o della massa volumica apparente (Kg/ m³) si può risalire al potere calorifico.

La determinazione del potere calorifico avviene a volume costante, all'interno di una bomba calorimetrica (Potere Calorifico Superiore, PCS); nella pratica, avvenendo la combustione a pressione costante, il vapor d'acqua proveniente dalla combustione dell'idrogeno e dell'acqua contenuta nel combustibile non è condensato e, di conseguenza, il calore di condensazione non è recuperato. Il numero di calorie risultante dalla combustione del legno è inferiore rispetto alla determinazione precedente di circa 300 Kcal/kg (Potere Calorifico Inferiore, PCI).

Il potere calorifico del legno varia notevolmente in funzione delle caratteristiche fisiche e della composizione chimica del materiale. Il PCI di una specie legnosa dipende dal suo contenuto in lignina (6000 Kcal Kg⁻¹), in cellulosa (4000 Kcal Kg⁻¹) e resina. A parità di peso, il legno di conifere ha un potere calorifico maggiore rispetto a quello delle latifoglie: ciò è dovuto alla presenza di resine e a più elevate quantità di lignina. Infatti, mentre per le

conifere si può raggiungere un PCI di 5000 Kcal/Kg, per le latifoglie il PCI non supera 4500 Kcal/Kg.

FONTE DI ENERGIA	PCI, Kcal/Kg
Latifoglie (20% d'umidità)	3400
Latifoglie (secco in stufa)	4540
Conifere (20% d'umidità)	3560
Conifere (secco in stufa)	4780
Paglia di frumento (10 % d'umidità)	3700
Carbone (10% d'umidità)	6500
Petrolio	10500
Diesel	10150
Butano	10900
Propano	11900
Metano	12000
Gas Naturale	8150
Elettricità	860 Kcal/KWh
Tabella 1.6 : Fonti di energia e Potere Calorifico Inferiore (PCI) Fonte: APAT 2003	

Nella tabella 1.6 sono presentati valori approssimativi del potere calorifico delle conifere e latifoglie con due diversi valori d'umidità e, per confronto, quelli di altre fonti energetiche. Le comparazioni tra combustibili, comunque, non possono basarsi unicamente sul PCI, ma devono tenere conto anche dell'efficienza della combustione, la quale è una misura della quantità di energia prodotta rispetto a quella consumata. Infatti, i processi di trasformazione da una forma di energia ad un'altra sono accompagnanti da perdita di energia, la cui entità varia con la risorsa energetica impiegata, con il tipo di conversione e le condizioni operative. Con i moderni sistemi a carbone e legno l'efficienza di produzione varia dal 60 all'80 % del PCI; per quelli a gas e petrolio è appena più alta, mentre per quelli ad elettricità è superiore al 90 %. L'elettricità si misura in Kilowattora (1 Kwh = 860 Kcal).

1.8 La filiera Legno - Energia

La filiera delle biomasse legnose è caratterizzata da una notevole complessità. Esistono molti tipi di materiali e molte tipologie di consumatori che entrano in questa filiera. Gli utilizzatori, infatti, secondo l'impiego del materiale legnoso e della loro dislocazione sul territorio, sono disposti a sborsare una diversa somma in denaro per acquistare legno. Questi si distinguono:

- tradizionali, che consumano legna da ardere in aree rurali e che possono spesso ricorrere a forme di autoproduzione;

- aree urbane o nelle seconde case in zone turistiche che generalmente, hanno una più alta disponibilità di reddito e comunque una più alta propensione a spendere per acquistare legno;
- imprese che consumano legna da ardere in attività connesse alla ristorazione;
- industrie del legno, comprese quelle che utilizzano i sottoprodotti e gli scarti di lavorazione del legno;
- centrali che producono energia e/o calore impiegando diverse tipologie di biomassa.

Visto che la legna da ardere derivante dal taglio dei boschi ha già un suo mercato, se si escludono i residui di lavorazioni industriali, le fonti di approvvigionamento di combustibile vegetale sono essenzialmente tre:

- piante di scarso valore, derivanti dal primo diradamento delle piantagioni di conifere e dallo sgombero dei materiali fluviali;
- ramaglie ed apparati radicali. Le prime costituiscono lo scarto delle utilizzazioni forestali convenzionali, dove rappresentano mediamente un 20-25 % del volume totale. A queste si aggiungono le ramaglie derivate dalla potatura di altre colture arboree: piantagioni forestali, colture agrarie e alberature stradali. Le radici si ottengono dal taglio finale delle piantagioni artificiali soprattutto quando occorre rimettere il terreno in coltura;
- materiale derivante dall'utilizzazione di piantagioni artificiali dedicate. Si tratta di piantagioni intensive con alta densità d'impianto governate a ceduo e tagliate ogni 1-5 anni, le cosiddette Short Rotation Forestry (SRF).

Potenzialmente, tutti i vegetali possono essere utilizzati come combustibile. In ogni caso, la scelta del tipo di combustibile è direzionata dal costo alla "bocca d'impianto". Ogni materia prima iniziale per renderla omogenea, deve essere sottoposta ad una trasformazione che può limitarsi ad una sommaria macinazione in campo (cippatura) fino a trasformazioni più o meno articolate (pellet, bricchette ecc...). Il prodotto che richiede minori input per la trasformazione e quindi minori costi è sicuramente il cippato.

Per liberare ed utilizzare l'energia contenuta nei materiali vegetali sono disponibili diverse tecnologie di conversione: alcune di queste costituiscono applicazioni ormai affidabili, economiche, comode e semplici nell'impiego, suscettibili di essere acquisite sia a livello individuale sia collettivo e industriale; altre invece sono ancora in fase di sviluppo.

1.8.1 *Tecniche di condizionamento*

Al momento di destinare le biomasse lignocellulosiche alla conversione energetica, queste richiedono trattamenti che sono variabili a seconda delle caratteristiche fisico-chimiche del combustibile e del tipo di impianto utilizzato.

1.8.2 *L'essiccazione e lo stoccaggio*

Successivamente alla fase di taglio, il materiale legnoso non può essere convenientemente utilizzato tal quale a causa della elevata percentuale di umidità che, come vedremo in seguito, negli impianti studiati si attesta generalmente tra il 50 ed il 60 % del peso fresco.

In queste condizioni gran parte dell'energia contenuta nel legno sarebbe utilizzata per liberare l'acqua, con ovvie e considerevoli perdite dell'efficienza di conversione energetica.

Una soluzione semplice ed economica per ridurre il tenore idrico del legno da bruciare è l'essiccazione per traspirazione (biologica). La perdita di umidità porta ad un aumento del potere calorifico del legno, che raggiunge il valore più alto con contenuti di umidità tra il 12 e 15%, oltre ad una maggiore stabilità del materiale.

1.8.3 *La cippatura*

Per cippato si intende il materiale che è ottenuto da un semplice processo di riduzione del materiale legnoso, chiamato sminuzzatura o cippatura, in elementi di piccole dimensioni, di vario tipo e forma (detti "particelle" o "chips"), tramite un'azione meccanica di taglio.

Con questa operazione si agevola notevolmente la movimentazione del materiale e l'alimentazione degli impianti.

Il materiale legnoso sotto forma di "chips" come detto precedentemente deve diminuire il suo contenuto di umidità. Questo obiettivo può essere raggiunto:

- Lasciando il materiale da cippare in cataste finché lo stesso abbia raggiunto contenuti di umidità tra il 25 ed il 40 %.
- Cippando il materiale contemporaneamente al taglio e stoccando lo stesso in cumuli presso l'azienda o l'industria. Lo stoccaggio del cippato pone dei problemi di perdita di materiale per i fenomeni di respirazione e fermentazione microbiologica, tanto

più intensi quanto più è profonda la massa stoccata, l'umidità del combustibile e la temperatura esterna.

Le caratteristiche fondamentali da considerare nell'impiego del legno a fini energetici sono, in ordine d'importanza, le seguenti:

l'umidità del materiale, che anche per gli impianti sviluppati per cippato umido non deve superare l'80-100 % del peso secco; le dimensioni delle particelle che devono essere omogenee e compatibili con il sistema di alimentazione della centrale termica (dimensioni standard 40 x 20 x 10 mm); la specie legnosa, da cui dipendono alcune caratteristiche della materia prima molto importanti ai fini energetici, quali la massa volumica e la presenza di estrattivi antiossidanti, resine, ecc. Va precisato che può essere utilizzato sotto forma di “chips” il legname di quasi tutte le specie.

Per un proficuo impiego del cippato come combustibile non è sufficiente individuare la specie legnosa e stabilire il contenuto di umidità, ma bisogna anche tenere conto delle caratteristiche particolari dell'assortimento cippato che non si riscontrano nel legname tondo.

La composizione indica quale provenienza ha il materiale legnoso, di quale specie si tratta e quali porzioni di albero sono state utilizzate.

Per quanto riguarda il legno prodotto nelle piantagioni o in bosco il cippato si può presentare sotto tre forme:

“cippato bianco”, derivante dalla sminuzzatura di solo legno, in altre parole di fusti o tronchetti preventivamente scortecciati;

“cippato marrone o con corteccia”, presentante un colore più scuro del precedente e, a parità di altre condizioni, una massa volumica leggermente superiore poiché la corteccia si frantuma in particelle di dimensioni più piccole e riempie parte degli interstizi fra i chips, dando origine ad un cumulo un po' più compatto;

“cippato verde”, contenente anche fogliame, ottenuto dalla riduzione in chips di piante intere, sempreverdi o di porzioni di chioma.

Il cippato è suddiviso in base alla sua lunghezza media in classi dimensionali. La granulometria del cippato, e ancora più la sua omogeneità, sono importanti ai fini dell'idoneità all'impiego negli impianti di riscaldamento automatici, in quanto particelle di dimensione e forma diversa possono causare inconvenienti al funzionamento del sistema di alimentazione della caldaia. Si parla di “cippato fine” quando i chips hanno lunghezza media pari a 10-20 mm e di “cippato grossolano”, per i chips di 50-70 mm. Le dimensioni ottimali per gli impianti termici ad alimentazione automatica sono le seguenti:

dimensione media: 40 x 20 x 10 mm (tolleranza 20 %);

dimensione massima 80 mm (1 % delle particelle fino a 220 mm);

particelle minute pari, al massimo, al 5 %.

Le dimensioni delle particelle, determinate dal tipo di cippatura e dallo strumento utilizzato influiscono sulla densità del materiale e sul tempo di essiccazione.

La massa volumica indica la massa dell'unità di volume apparente del cippato, ove il volume è costituito da quello delle singole particelle legnose e dagli spazi vuoti tra esse. L'unità di misura comunemente usata è il Kg m⁻³. La massa volumica apparente dipende sia dalla massa volumica delle particelle sia dalle loro dimensioni, le quali influenzano il grado di costipazione del cumulo. Per legname fresco di taglio, la densità del cippato ottenuto può variare fra 150-200 e 350-450 Kg m⁻³. I valori inferiori si riscontrano nel caso di specie a legno tenero come il pioppo e di particelle di grandi dimensioni. La densità varia anche in funzione dell'umidità del materiale legnoso, in altre parole più è alta l'umidità, maggiore sarà la massa volumica apparente.

L'umidità del cippato varia molto secondo la specie legnosa cui si fa riferimento. Questa influenza il potere calorifico e le possibilità di conservazione.

La caratteristica principale di un combustibile è il suo potere calorifico (Vedi tabella 2.1). Il cippato, come detto, non si trova normalmente allo stato anidro, ma ha un contenuto di umidità variabile. Anche la quota di corteccia ha la sua influenza, perché il potere calorifico di questa parte vegetale è molto basso, e quindi un'elevata percentuale di corteccia ha l'effetto di deprimere il potere calorifico totale di una massa. Per questi motivi per i materiali come il cippato, caratterizzati da una forte variabilità potenziale di composizione, si fa riferimento al contenuto energetico (CE) ricavato dal p.c.i. con una formula correttiva, che tiene conto dell'umidità della massa, espressa come percentuale sul tal quale:

$$CE = p.c.i. * (100 - U\%) / (100 - 0,025 * U\%)$$

Secondo questa formula, il CE del cippato diminuisce all'aumentare dell'umidità espressa in percentuale. Quando l'umidità del cippato è del 50 %, il suo CE diminuisce di circa il 23 %, rispetto a quello riscontrato nel cippato che ha il 20 % di umidità.

Le variazioni di contenuto energetico per unità di volume in funzione dell'umidità sono più contenute, rispetto a quelle riferite all'unità di peso. Infatti, in 1 m³ di cippato di legno con umidità del 50 % si ha una variazione del CE solo del 4 % rispetto a quello riscontrato con il cippato, con contenuto di umidità del 20 %.

I vantaggi dell'utilizzo del cippato sono i seguenti:

- prezzo d'acquisto ridotto;
- caricamento in caldaia completamente automatizzato;
- sfruttamento di arbusti e ramaglie non utilizzabili come legna da ardere.

Gli svantaggi sono invece dati da:

- elevati volumi di prodotto necessari, con relativi costi di trasporto e stoccaggio;
- costo d'acquisto del gruppo silos-alimentatore della caldaia (a meno di contributi pubblici);
- maggiore frequenza di operazioni di pulizia e smaltimento delle ceneri rispetto alle caldaie tradizionali.

1.8.4 La densificazione

Ai differenti livelli industriali della filiera legno sono prodotte ingenti quantità di residui legnosi di piccola granulometria (trucioli, segatura, polvere di legno ecc..) che non trovano una facile utilizzazione e, talvolta, pongono problemi di smaltimento.

La densificazione di questi materiali permette di ottenere un combustibile denso in forma di *pellets* (piccoli cilindri di 8-10 mm di diametro e 20-30 mm di lunghezza) e bricchette (a forma di saponetta o di cilindro con lunghezza tra 50 e 300 mm) utilizzabile all'interno del processo produttivo o vendibile ad altri utilizzatori. Ovviamente la densificazione è applicabile con successo su legno derivante da coltivazioni dedicate.

Pellets e bricchette sono caratterizzati da elevata densità energetica, stabilità ed uniformità delle dimensioni e bassa percentuale di umidità. Essi di conseguenza hanno minori costi di trasporto ed una maggiore facilità di immagazzinamento ed uso, migliore controllo e maggiore efficienza di combustione.

La densità di questi prodotti varia da 0,9 a 1,4 g/cm³, mentre la loro umidità può variare molto (generalmente 5 – 10 %). Il processo si articola in tre fasi: stoccaggio e preparazione del materiale, essiccazione, densificazione.

Per questa trasformazione il costo energetico richiesto si attesta intorno al 20% dell'energia contenuta nel materiale da densificare ed è comunque influenzata dalle caratteristiche fisico-chimiche del materiale e dal processo impiegato.

Il grande vantaggio del *pellet* è l'elevato potere calorifico, che è intorno ai 5 kWh/kg (18 MJ/kg, 4300 Kcal/Kg), decisamente superiore a quello degli altri combustibili legnosi.

Altri vantaggi del *pellet* sono il basso volume di ingombro ed il basso peso specifico che ne determinano la facilità di trasporto, stoccaggio ed utilizzo e la ridottissima emissione di sostanze inquinanti.

Gli svantaggi sono invece legati al costo di produzione e dal consistente quantitativo energetico impiegato dalle macchine pellettizzatrici.

1.9 I Processi di conversione energetica

I processi che consentono di convertire l'energia chimica contenuta nelle biomasse in altra forma di energia si possono dividere in due gruppi:

1. processi termo-chimici
2. processi bio-chimici

I primi impiegano le alte temperature per trasformare le biomasse direttamente in energia termica o produrre materiali e composti chimici ricchi di energia.

I processi biochimici trasformano le biomasse in composti chimici a più alta qualità energetica (principalmente biogas, alcoli e idrogeno) e comprendono la fermentazione aerobica, la fermentazione anaerobica, l'idrolisi acida e l'idrolisi enzimatica.

1.9.1 I processi termo-chimici

Gli impianti di combustione termochimica si basano sul processo di combustione, complessa reazione di ossido-riduzione, esotermica, consistente in una serie di reazioni fisiche e chimiche, nel corso della quale il carbone e l'idrogeno del combustibile reagiscono con l'ossigeno (comburente) per formare CO₂ e H₂O (prodotti di reazione) e liberare calore.

La combustione dei materiali lignocellulosici risulta estremamente complessa; volendo schematizzare, questa comporta tre stadi:

1. **Riscaldamento ed essiccamento del materiale.** In questa fase l'umidità del materiale legnoso è convertita in vapore e la temperatura sale a circa 200°C. Le reazioni fisiche prevalgono su quelle chimiche e la percentuale di umidità gioca un ruolo importante in termini energetici; il calore richiesto in questa fase aumenta all'aumentare

del contenuto di umidità, anche se essa, in una certa misura, favorisce la conducibilità termica dall'esterno al centro del combustibile solido (*Tillmann, 1981*)

2. Distillazione. Una volta che la temperatura ha raggiunto valori superiori a 200°C inizia la pirolisi a carico dell'emicellulosa e, successivamente, della cellulosa; la pirolisi della lignina prende avvio a temperature variabili tra 250 e 500°C (*Shafizadeh e Chin, 1977*). In questa fase assume importanza la dimensione del materiale, in quanto da esso dipende la ripartizione percentuale finale di gas, carbone e catrame. In genere le piccole pezzature portate a temperature elevate in breve tempo danno origine ad alte percentuali di prodotti volatili; al contrario, più grosse dimensioni del combustibile, temperature più basse e tempi più lunghi per raggiungere queste temperature favoriscono la formazione del carbone (*Wenzl, 1970*). I composti volatili, principalmente composti organici complessi, sono liberati come gas. Se è presente una sufficiente quantità di ossigeno, i composti volatili si combinano con esso, bruciano a 630°C e formano CO₂. In questo stadio una insufficiente quantità di aria riduce l'energia calorica e produce fuliggine e, se la temperatura è inferiore a 100°C, si deposita come catrame o causa emissioni di inquinanti e polveri sottili.

3. Reazioni della fase gassosa e reazioni di ossidazione del carbonio. Con la frammentazione dei prodotti della pirolisi si dà inizio alla catena di reazioni di questa fase. Attraverso innumerevoli reazioni di propagazione, il carbonio è fissato e rimosso come monossido di carbonio, bruciando con ossigeno per formare CO₂.

Una conoscenza approfondita dei processi di combustione è importante, perchè a partire da questa, è possibile manipolare il processo per indirizzarlo nelle direzioni volute, massimizzare l'efficienza termodinamica, diminuire la produzione di inquinanti, ridurre l'usura ed i guasti ed aumentare l'affidabilità degli impianti (*Vogel, 2003*).

A) *La Combustione diretta*

Il più antico metodo di conversione è rappresentato dalla combustione diretta, nel corso della quale il combustibile è bruciato in presenza di un eccesso di aria che ne assicura un'ossidazione completa. Diffusamente la combustione diretta è praticata con le tradizionali installazioni (fornelli, focolari in materiale refrattario, caminetti, stufe ecc...) per bruciare legna da ardere, la cui efficienza di combustione difficilmente raggiunge il 30% e per i quali non ci sono particolari problemi di tipo tecnico economico. Vi sono invece oggi sistemi che si differenziano da quelli tradizionali per la presenza di una camera di combustione e un sistema di convezione. Nella camera di combustione avviene la prima

fase della combustione ed il calore prodotto viene trasferito dalla fiamma alla sezione contenente il fluido utilizzatore; qui avviene la seconda fase della combustione e il calore dei gas caldi è trasferito per convezione al fluido contenuto nei tubi di scambio. In questo modo il calore assorbito può essere trasmesso in luoghi diversi da quello di produzione. Tali impianti sono in grado di raggiungere rendimenti termodinamici elevati, a volte superiori all'80%, in ragione di innovazioni tecnologiche introdotte negli ultimi anni e rese possibili da più approfondite conoscenze della dinamica della combustione.

Gli impianti possono essere di **piccole dimensioni** (al di sotto di 100.000 Kcal/h), destinati alle utenze domestiche e private. In questa categoria d'impianti, il combustibile legnoso utilizzato è generalmente di provenienza aziendale, di grossa pezzatura (tronchi, ramaglie provenienti dal bosco o da residui di lavorazione di coltivazioni agricole); sono caratterizzati dalla mancanza di sistemi di automazione delle operazioni e da rendimenti più bassi rispetto a quelli di potenza superiore. L'energia prodotta è prevalentemente usata per il riscaldamento di ambienti residenziali o di lavoro e per la produzione di acqua calda sanitaria.

Gli impianti di **medie e grandi dimensioni** (al di sopra di 100.000 Kcal/h e fino a qualche milione di Kcal/h) per usi collettivi ed industriali. Si tratta di dispositivi dotati di accorgimenti tecnologici maggiori rispetto ai piccoli, automatismi delle operazioni, maggiore sicurezza migliore qualità della combustione e rendimenti termodinamici più elevati. Le utenze sono rappresentate molto spesso da industrie di lavorazione del legno e del settore agroalimentare che dispongono di grosse quantità di scarti di lavorazione o da industrie di altri settori che possono acquistare il combustibile a costi contenuti. Attualmente si stanno comunque diffondendo usi di queste caldaie nell'ambito civile e residenziale. Questi impianti utilizzano polvere di legno, segatura, trucioli, *chips*, cortecce, refili di legno, vinaccia essiccata, sansa di olive, gusci di nocciole, lolla di riso, lignite, carbone, scarti di imballaggi o qualsiasi altro materiale lignocellulosico di umidità contenuta. L'energia prodotta è utilizzata per la produzione di acqua calda, aria calda o anche elettricità.

B) *La combustione a griglia*

È il sistema di combustione più diffuso, adatto sia negli impianti piccoli che in quelli di alta potenza. L'elemento principale è costituito dalla griglia, posta sul fondo della camera di combustione; la sua funzione è quella di separare la camera di combustione con il combustibile dal cinerario in cui si raccoglie la cenere. Essa è costituita da barre in acciaio

o ghisa, piene di aria o acqua. La griglia può essere inclinata ed in combinazione con una piana, fino al 60%. In questo caso il combustibile entra dalla sommità e subisce una essiccazione man mano che si avvicina agli strati più bassi dove interviene la combustione. Nel complesso gli impianti che utilizzano questi sistemi di combustione si caratterizzano per la possibilità di utilizzare combustibili con elevata umidità e disomogenei.

C) *La combustione a letto fluido*

Per gli impianti di grossa taglia, può essere usato questo tipo di combustione che consiste in un flusso di gas e sabbia calda che investe i *chips* di legno che subiscono rapidamente il processo di ossidazione. Un flusso d'aria dal basso verso l'alto mantiene in costante movimento un letto di sabbia, la cui funzione è quella di mantenere una temperatura uniforme all'interno dell'impianto. Inoltre, quando il combustibile subisce la pirolisi, la sabbia esercita un'azione di mescolio continuo e di abrasione sulle particelle legnose (di diametro inferiore a 10 mm), col risultato che le superfici esterne combuste vengono continuamente rimosse ed il materiale incombusto viene esposto ad ossidazione (*Hos et al, 1980*).

Tale sistema ha il vantaggio di una gassificazione più efficace, maggiore flessibilità sul tipo di combustibile e, data l'elevata temperatura dei gas in uscita, risulta bassa la quantità di composti condensabili e corrosivi. Si tratta di una tecnica di combustione in grado di usare combustibili umidi, secchi, ricchi di ceneri e di composti inorganici inquinanti. Le alte temperature che si raggiungono (900 – 1000°C) riducono le ceneri allo stato polverulento e limitano gli ossidi di azoto a valori inconsistenti (*Hakkila, 1989*).

1.9.2 *Pirolisi*

La differenza tra i processi di combustione è abbastanza sottile: essi sono estremamente variabili e flessibili, in relazione alla dimensione di alcuni parametri quali temperatura, tempo di permanenza della biomassa a una determinata temperatura, rapporto ossigeno – biomassa, presenza di alcuni catalizzatori ecc...La selezione dei parametri citati permette di stabilire le condizioni di trattamento del materiale e, conseguentemente dei prodotti finali (*Soltes e Milne, 1988*). Con il termine “pirolisi” si intende un processo di trasformazione termochimica che consiste in una degradazione a carico dei polimeri organici, e delle sostanze minerali del legno, sotto l'azione del calore ed in assenza di ossigeno, in cui l'olio pirolitico (bio-olio), liquido, è il prodotto principale rispetto al

carbone ed al gas che si formano nel corso dello stesso processo (<http://www.iea.org/pubs/proc/files/bioend/52p6tro.pdf>). Il bio olio è un liquido scuro, viscoso e può essere usato in sostituzione dei combustibili convenzionali in diversi tipi di applicazioni (caldaie, motori, turbine ecc...), ha un potere calorifico pari a circa il 40% di quello del gasolio se riferito a peso.

1.9.3 *Gassificazione*

La gassificazione è un processo termochimico di conversione di combustibili solidi (legna) in combustibili gassosi. Alcune peculiari proprietà chimico-fisiche delle biomasse lignocellulosiche, quali l'elevata volatilità, la spiccata reattività del carbonio, il basso contenuto di ceneri e di zolfo, le rendono particolarmente adatte al processo di gassificazione (*Hakkila, 1989*). Inoltre la gassificazione del legno, rispetto ad altri materiali, ha il vantaggio di poter essere condotta a temperature più basse, in minor tempo, con minori problemi di emissioni e corrosione delle pareti dell'impianto. La gassificazione è una forma di combustione che consiste in una prima fase di essiccazione del combustibile solido, a cui segue una parziale ossidazione, con formazione di prodotti pirolegnosi e residui carboniosi; successivamente ha luogo una rottura dei pirolegnosi e una complessa serie di reazioni, i prodotti risultanti dalla combustione di una parte dei pirolegnosi, l'ossigeno e i vapori d'acqua introdotti nel gasogeno (*Robert, 1984*). La composizione del gas prodotto varia in funzione del tipo di biomassa utilizzato, della temperatura e delle altre condizioni di processo.

1.9.4 *Liquefazione*

La liquefazione è un processo di conversione di combustibili solidi in combustibili liquidi. Diversi sono i processi di liquefazione fin qui sviluppati, distinti in base alle caratteristiche chimiche e fisiche dei differenti materiali; in particolare per le biomasse agricole, umide e ricche di zuccheri e amidi, vengono impiegati processi bio-chimici o bio-tecnologici; per le biomasse lignocellulosiche, invece, sono generalmente utilizzati procedimenti termochimici.

1.9.5 I processi biochimici

La produzione di combustibili liquidi quali l'etanolo e il metanolo a partire da materiali lignocellulosici è possibile grazie a processi fermentativi tradizionali e al determinante supporto delle biotecnologie (*McCloy e O'Conner,1998*). Le prospettive di fermentazione per la produzione di alcool a partire da materiali cellulosici o lignocellulosici consentono di ottenere prodotti che possono essere usati in alternativa ai combustibili fossili tradizionali o integrativi della benzina, ma anche come composti di partenza per la produzione di butilene ed etilene. La conversione della cellulosa in molecole ricche di energia, come l'etanolo, si può ottenere dalla idrolisi (acida ed enzimatica) della cellulosa in zuccheri, seguita dalla loro fermentazione in etanolo (*Kintisch,2001*).

1.10 La cogenerazione

Per cogenerazione si intende la possibilità di usare biomasse per la generazione combinata di elettricità e calore. Il processo di cogenerazione si propone di realizzare un più razionale uso dell'energia primaria rispetto ai sistemi separati di generazione. Un impianto finalizzato alla produzione di energia elettrica ha una efficienza di conversione energetica che può variare dal 20 % per gli impianti a vapore con basse prestazioni, al 60 % per i cicli combinati gas-vapore più recenti. Dal 40 all'80% dell'energia primaria utilizzata viene ceduta sotto forma di calore all'ambiente. In un impianto di cogenerazione, invece il calore prodotto dalla combustione non viene disperso, ma recuperato per gli altri usi. Grazie a questo sistema, l'efficienza di conversione energetica può raggiungere anche il 90%, con conseguente risparmio di energia primaria, diminuzione delle emissioni inquinanti e dei costi di produzione dell'energia (*Desideri, 2003*).

CAPITOLO 2 - PIANTAGIONI A BREVE ROTAZIONE (SRF) PER LA PRODUZIONE DI BIOMASSA.

INTRODUZIONE

Le politiche volte allo sviluppo della filiera delle biomasse legnose in qualità di fonti di energia rinnovabili (Fer) sono andate negli ultimi anni diversificandosi sia in termini di soggetti proponenti che per quanto riguarda le tipologie di sostegno. Tale processo di diversificazione è dovuto al fatto che lo sviluppo della filiera delle biomasse viene incontro ad un'ampia serie di esigenze (*Farinelli, 1998*):

- la parziale sostituzione di combustibili fossili con fonti rinnovabili e quindi la riduzione della dipendenza dall'estero per la più pesante voce passiva della bilancia commerciale italiana, vista anche l'attuale tendenza all'incremento dei prezzi dei combustibili fossili;
- i sistemi arborei destinati alla produzione legnosa possono fornire un grande contributo alla riduzione delle emissioni di gas serra assorbendo dall'atmosfera notevoli quantità di anidride carbonica (CO₂), immobilizzando il carbonio nella biomassa legnosa e nel suolo. L'impiego di biomasse legnose a fini energetici determina un bilancio di carbonio quasi nullo, ma ha effetti sostitutivi sul carbonio proveniente da fonti non rinnovabili;
- la diversificazione delle attività produttive in aree agricole, con lo sviluppo di coltivazioni non a fini alimentari, comporta la riduzione dei costi della politica di sostegno di coltivazioni eccedentarie e lo sviluppo di forme di autoproduzione di fonti energetiche con positivi impatti sui redditi degli imprenditori agricoli;

Nell'ambito di questi mutamenti dell'uso del suolo si prevede che un ruolo importante possa essere svolto dalle piantagioni forestali a turno breve (*Short rotation forestry - Srf*). Queste coltivazioni possono produrre infatti biomassa ligno-cellulosica in quantità e qualità tale da poter essere impiegata senza inconvenienti in ogni tipo di caldaia. In sintonia con questo, la politica agricola europea (PAC) prevede che sulla considerevole estensione del territorio comunitario sottratto alle colture agricole eccedentarie (*set aside*) sia possibile l'impianto di colture pluriennali destinate alla produzione di materie prime non alimentari. Il regolamento Ce n. 1782/2003, che introduce il regime unico di pagamento per le aziende agricole, garantisce un regime di sostegno a favore degli agricoltori che producono colture energetiche.

2.1 Misure nazionali per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili

Una prima risposta a livello nazionale alle esigenze di programmazione, definite nel Libro Bianco UE sulle Risorse Energetiche Rinnovabili (novembre 1997) e nel Protocollo di Kyoto (dicembre 1997), è il Programma Nazionale Energia Rinnovabile da Biomasse (PNERB) del giugno 1998, con l'obiettivo di promuovere l'uso di biomasse agro-zootecniche-forestali per la produzione di energia rinnovabile, in coerenza con gli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra concordati a Kyoto. Il PNERB contiene i necessari elementi chiave che evidenziano le prospettive per i mercati agricoli e per il miglioramento complessivo dell'ambiente. Tra gli elementi chiave del PNERB figura in primo luogo l'esigenza del nostro paese di arrivare a produrre 8-10 Mtep anno⁻¹ da biomasse entro il 2010-2012, concretizzando gli impegni assunti per motivazioni di carattere ambientale, di autonomia energetica, di sviluppo agricolo e rurale ed occupazionale.

Il primo strumento di attuazione del PNERB è stato il Programma Nazionale di Valorizzazione delle Biomasse Agricole e Forestali (PNVBAF) del giugno 1999; questo programma si propone come obiettivi lo sviluppo delle filiere agroenergetiche per l'ottenimento di biocombustibili solidi destinati ad usi elettrici e termici e di biocarburanti per l'autotrazione ed il riscaldamento.

Gli obiettivi del PNVBAF nel medio-lungo periodo sono quelli di contribuire al miglioramento della qualità dei terreni agricoli, della tutela della biodiversità, di favorire l'integrazione delle attività di ricerca mirando al rafforzamento della cooperazione internazionale ed a una comunicazione più incisiva. L'obiettivo a breve termine è nella definizione di alcune iniziative a livello dimostrativo riguardanti sia i biocombustibili che la bioelettricità.

Il Libro Bianco per la Valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili dell'aprile 1999, individua gli obiettivi e le strategie per lo sviluppo delle fonti di energia rinnovabile nel nostro paese ed adempie ad una specifica disposizione sulle "Linee Guida per le Politiche e Misure Nazionali di Riduzioni delle Emissioni dei Gas Serra" (Delibera CIPE 137 del novembre 1998). In particolare in questa delibera si imputa alla sola produzione di energia da FER un valore di riduzione delle emissioni di gas serra di 18-20 Mt di CO₂ nel periodo 2008-2012, mentre per le foreste tale valore viene prudentemente indicato in 0,7 Mt di CO₂.

L'adeguamento del quadro normativo con l'introduzione della legge n°448/98 sulla tassazione della produzione di biossido di carbonio (carbon tax), al fine di disincentivare l'uso di fonti energetiche fossili incrementando la tassazione a loro carico e rendendo più competitivo l'uso delle FER, ha proseguito il graduale processo di internalizzazione dei costi sociali della produzione energetica.

Con il Decreto Bersani (D.L.79/99), recante norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica in attuazione della direttiva europea 96/92 CE, come aggiornato dalla Legge 239/04 e dal d.lgs. 387/03, ha imposto l'obbligo agli operatori che immettono in rete più di 100 GWh/anno che almeno il 2% dell'elettricità provenga da impianti da fonti rinnovabili. Tale obbligo viene incrementato dello 0,35% a partire dal 2004 (art.4 comma 1 del D.Lgs. 387/2003). Ad ognuno di questi ultimi viene associato un certificato verde (CV) ogni 50 MWh/anno prodotti (la Legge 239 del 23/08/2004, Legge Marzano, ha ridotto a 50 MWh la taglia del "certificato verde", che in precedenza era pari a 100 MWh) . I certificati creati in questo modo hanno validità annuale, rinnovabile per otto anni ai fini dei riconoscimenti previsti dal Decreto Bersani e possono essere contrattati direttamente fra i proprietari degli impianti stessi e gli operatori interessati, oppure servendosi dell'apposito mercato creato dal Gestore del Mercato Elettrico (GME). Con la riforma del sistema elettrico anche il meccanismo della promozione dell'utilizzo delle fonti rinnovabili è stato profondamente modificato, con l'introduzione dell'obbligo per i produttori e gli importatori di energia elettrica di immettere nella rete di trasmissione energia "verde", cioè prodotta da **Impianti alimentati da fonti rinnovabili (Iafr)**. La normativa attuale ha assegnato al GRTN il compito di qualificare tali impianti di produzione, una volta accertato il possesso dei requisiti previsti. Possono ottenere la qualificazione, in base al decreto MICA 11/11/1999 e al successivo decreto MAP 18/3/2002, gli impianti entrati in esercizio successivamente al 1°aprile 1999 a seguito di nuova costruzione, potenziamento, rifacimento totale o parziale, riattivazione e gli impianti che operano in co-combustione entranti in esercizio prima del 1° aprile 1999. Sulla base dei requisiti previsti nel decreto MICA 11/11/1999 e nel successivo decreto MAP 18/03/2002 il Gestore della rete di trasmissione nazionale ha sviluppato una Procedura tecnica per la qualificazione Iafr, nella quale sono previste le modalità di presentazione delle domande e dei principali allegati tecnici. Successivamente una apposita Commissione di Qualificazione provvede all'esame della domanda e quindi al riconoscimento della qualifica Iafr.

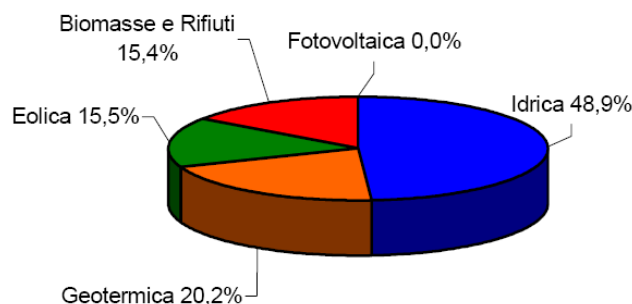


Figura 2.1 : Certificati Verdi emessi nell'anno 2004 (Fonte GRNT)

Un'altra certificazione a livello internazionale è costituita dai certificati RECS (*Renewable Energy Certificate System*): sono titoli che attestano la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile per una taglia minima pari a 1MWh e favoriscono la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile dagli impianti che altrimenti non avrebbero le condizioni economiche per continuare a produrre energia "verde". I certificati RECS sono distinti dall'erogazione fisica dell'elettricità e la loro emissione consente la commercializzazione dei certificati stessi anche separatamente dall'energia elettrica cui fanno riferimento. Mediante il loro consumo, l'acquirente finanzia l'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili testimoniando, pertanto, il suo impegno a favore dell'ambiente.

Rispetto alla normativa italiana relativa ai Certificati Verdi, i RECS risultano essere complementari in quanto rappresentano una forma alternativa di incentivazione per quegli impianti a fonte rinnovabile esclusi dal decreto ministeriale del novembre '99. Il progetto RECS è nato in ambito europeo per favorire lo sviluppo, sulla base di una certificazione standard, di un mercato volontario e internazionale di Green Certificate. Per quanto concerne l'attività svolta a livello di Unione Europea a sostegno delle fonti energetiche rinnovabili e delle biomasse, il principale atto normativo può essere individuato nella Direttiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, sulla promozione dell'energia elettrica, prodotta da fonti energetiche rinnovabili. Tale direttiva è stata recepita dal Governo italiano con il D.L. n. 387 del 19 dicembre 2003 DPMC. Inoltre, e relativamente alle sole biomasse, il più importante e recente atto normativo è costituito dal DPCM dell'8 marzo 2002 e dal successivo DPCM dell'8 ottobre 2004.

Obiettivo della direttiva E-FER, 2001/77/CE è la promozione attiva delle fonti energetiche rinnovabili per la produzione di energia elettrica, tenendo conto che nessuna forma energetica – carbone, petrolio o nucleare – è mai stata sviluppata senza il forte sostegno delle pubbliche autorità, anche se ci sono ovvi benefici nell'utilizzo delle rinnovabili,

poiché sono : pulite, sostenibili, rinnovabili e perché non contribuiscono all'accumulo dei gas ad effetto serra, gas che contribuiscono al cambiamento climatico; sicure, perché hanno la propria origine in Europa e non sono importate, riducendo pertanto la nostra dipendenza da eventi in altre parti del mondo.

2.2 La riforma della PAC

Con la riforma della Politica Agricola Comune le colture energetiche trovano un preciso posizionamento e nuovo vigore.

Per stimolare l'offerta di biomassa, la Comunità Europea, con la riforma della Politica Agricola Comune (PAC) attuata nel 2003 (Reg. CE n°1782/2003), ha svincolato il sostegno al reddito degli agricoltori alla produzione agricola; gli agricoltori possono quindi rispondere liberamente alla crescente domanda di colture energetiche. Con questa riforma l'imprenditore agricolo non "insegue" i sussidi più elevati e riceve, invece, un pagamento "unico" annuale calcolato tenendo conto dei diritti già percepiti negli anni 2000-2002. Scopo principale di tale pagamento unico aziendale è garantire una maggiore stabilità del reddito dell'agricoltore che può decidere cosa produrre adattando la sua offerta alla domanda di mercato.

Per beneficiare della singola erogazione finanziaria il nuovo sistema dispone che l'agricoltore rispetti le norme in materia di salvaguardia ambientale, di sicurezza alimentare e di protezione degli animali e s'impegni a mantenere la terra in buone condizioni agronomiche ed ambientali (ecocondizionalità).

I pagamenti dipendono dalla superficie: l'impresa che ha un diritto per un ettaro ammesso all'aiuto riceve la somma dell'importo fissato da tale diritto. Perciò il pagamento unico verrà erogato in base ai c.d. diritti all'aiuto abbinati ad un uguale numero di ettari ammissibili. Si determinano così:

- i diritti per ettaro, calcolati dividendo l'importo di riferimento (la media degli aiuti ricevuti nel triennio 2000-2002) per gli ettari ammissibili, ovvero per la media delle superfici destinate, nello stesso arco di tempo, alle attività agricole, escluse le colture permanenti (come la vigna), ortofrutticole e forestali;
- i diritti di ritiro, ovvero gli ettari sottoposti a set-aside obbligatorio (reg.1251/99) nel periodo 2000-2002 insieme con i relativi pagamenti determinano il titolo all'aiuto (calcolato dividendo l'importo medio su tre anni di ritiro per il numero medio su tre anni di ettari ritirati).

La determinazione del diritto di ritiro ed il pagamento corrispondente non esimono l'agricoltore dall'obbligo di "mettere a riposo" il terreno. Il pagamento, infatti, resta abbinato ad un obbligo di "rinuncia" alla produzione ed alla conservazione del terreno in buone condizioni agronomiche e ambientali.

Invece, non è soggetto all'obbligo di ritiro dalla produzione l'agricoltore che utilizzi le superfici in questione per le coltivazioni biologiche o per fornire materiale per la trasformazione all'interno della Comunità di prodotti non destinati principalmente per il consumo umano o animale. In più, qualora si tratti di colture pluriennali destinate alla produzione di biomassa sui terreni messi a riposo, gli Stati membri sono autorizzati a pagare l'aiuto nazionale fino al 50% dei costi connessi con la creazione di tali coltivazioni.

Come in precedenza sottolineato, tutti gli agricoltori potranno esigere pagamenti diretti indipendentemente dalla produzione e complementari al reddito. Tuttavia, sono previsti speciali regimi di sostegno per alcune categorie di prodotti, tra cui rientrano, appunto, le colture energetiche (le altre riguardano il frumento duro, le colture proteiche, il riso, la frutta a guscio, la patata da fecola, i prodotti lattiero caseari, le sementi, i seminativi, le carni ovine e caprine, le carni bovine e i legumi da granella, il cotone, il tabacco, il luppolo e l'olivicoltura).

In proposito, l'art. 88 del reg. 1782/2003 disciplina, tra gli "Altri regimi di aiuto" (Titolo IV del regolamento), quello destinato alle colture energetiche su terreni "normali", con premio specifico supplementare ed accoppiato.

È concesso, infatti, un aiuto comunitario di 45 euro per ettaro l'anno per le superfici destinate alle coltivazioni energetiche, per queste ultime intendendosi quelle essenzialmente destinate alla produzione di prodotti considerati biocarburanti, energia termica ed elettrica ricavata dalla biomassa. L'aiuto è concesso, con un limite di 1,5 milioni di ettari beneficiari in Europa, soltanto per le superfici la cui produzione forma oggetto di un contratto stipulato tra l'agricoltore e l'industria di trasformazione, salvo nel caso in cui la trasformazione sia effettuata dall'agricoltore stesso nell'azienda.

In sostanza, con questo regolamento l'Unione europea apre la strada a un nuovo concetto di attività agricola, svincolata da quella che finora ne è stata la missione principale: la produzione alimentare. L'imprenditore agricolo può ora decidere di produrre energia in via esclusiva e non più solo come attività residuale e di recupero rispetto alla tradizionale vocazione produttiva. L'opportunità offerta dalle disposizioni comunitarie è stata pienamente accolta dal legislatore italiano.

2.3 La *Short Rotation Forestry*

Una particolare attenzione alla *Short Rotation Forestry* su terreni agricoli potrebbe offrire la possibilità di rifornire l'industria forestale e le popolazioni di sufficienti risorse legnose nei paesi in via di sviluppo e di abbastanza combustibile nei paesi sviluppati, conservando al contempo le foreste naturali (*Christersson, 2005*).

La tipologia di arboricoltura da legno a turno breve prevede piantagioni di latifoglie a rapida crescita per la produzione di biomassa ad uso energetico, con meccanizzazione integrale della coltura.

Nell'ambito di questa tipologia vengono oggi comunemente distinti due diversi modelli colturali, uno che prevede l'impiego di densità di impianto di circa 1500-2000 piante ha⁻¹ con turni di 5-6 anni ed un secondo che prevede densità d'impianto superiori, variabili circa da 5.000 a 15.000-20.000 piante ha⁻¹ e turni di 1-3 anni. Nel primo caso l'obiettivo è normalmente la produzione di biomassa per cellulosa, nel secondo caso è la produzione di biomassa per energia (termica e/o elettrica).

A livello internazionale, applicazioni commerciali di colture forestali a ciclo breve (*SRF*) da energia si hanno principalmente in Svezia, dove sono una realtà dal punto di vista economico e produttivo (*Danfors et al., 1998*) e Danimarca dove la coltura è stata promossa sin dagli anni '70, con una seria e continuativa ricerca e mediante politiche incentivanti (contributi agli agricoltori e tasse sui combustibili fossili), per la valorizzazione energetica di tutte le biomasse, sia residue che da colture dedicate. In Nord America, Usa e Canada, alcune decine di migliaia di ettari sono già state piantate a partire dagli anni '80 soprattutto per un utilizzo industriale della biomassa, impiegando cloni a produttività molto elevata (*Scarascia Mugnozza et al., 1997*). In altri Paesi europei la *SRF* da energia è ancora a livello di ricerca (Gran Bretagna, Germania, Ungheria) o in fase dimostrativa, ad integrazione dei residui agroforestali (Gran Bretagna, Olanda).

Gli impianti a turno breve per la produzione di biomassa rappresentano una tipologia di arboricoltura da legno relativamente nuova per il nostro Paese. In Italia il modello colturale fino ad oggi maggiormente considerato è quello indirizzato alla produzione di materiale da impiegare come fonte energetica rinnovabile in alternativa ai combustibili fossili, nel quadro delle azioni finalizzate alla riduzione delle immissioni in atmosfera di "gas serra" ed in particolare di CO₂. Le potenzialità della *SRF* in questo contesto di grande attualità ed interesse sono state ben esplicitate in alcuni progetti e documenti prodotti in ambito nazionale.

In Italia le ricerche sulla Srf sono iniziate negli anni '80 (*Frison et al.,1990*) con piantagioni sperimentali e dimostrative di pioppo, robinia (*Robinia pseudoacacia*), eucalipti (*Eucalyptus spp.*) e salici (*Salix spp.*).

	Zona Fitoclimatica	Specie SRF
	Lauretum caldo	Eucalipti
	Lauretum freddo	Pioppi (irrig.)/Robinia
	Castanetum	Pioppi, Salici,Robinia

Tabella 2.1: Principali specie da SRF

Nel complesso, le informazioni attualmente disponibili su questo argomento evidenziano che il successo tecnico ed economico della forestazione a ciclo breve in Italia è ancora legato, in massima parte, alla contemporanea disponibilità dei seguenti fattori di natura sia tecnica che politica ed organizzativa (*Minotta, 2000*) come qualità del materiale d'impianto, terreni di buona o media fertilità, garanzie di conferimento del prodotto a prezzi remunerativi, congrui contributi pubblici.

E' importante sottolineare che queste attività dovrebbero essere avviate sulla base di una preliminare ed attenta pianificazione territoriale per raccordare adeguatamente dal punto di vista logistico le potenziali aree di produzione della biomassa con i potenziali centri di trasformazione energetica del prodotto; tenendo presente in questa fase anche la necessità di minimizzare l'impatto ambientale di queste ultime infrastrutture. Infatti, tra le diverse tipologie di arboricoltura da legno, la *SRF*, per le sue caratteristiche intrinseche (mancanza di tradizioni locali, rigidità dei moduli culturali, brevità dei cicli di produzione, modesto valore degli assortimenti ottenuti), è sicuramente quella che maggiormente necessita di un preventivo e stretto collegamento con l'industria utilizzatrice del prodotto legnoso realizzato. La possibilità di promuovere iniziative imprenditoriali di questo tipo, infatti, è subordinata anche alla diffusione di innovazioni tecnologiche legate alla meccanizzazione ed alla soluzione delle problematiche logistiche del territorio in cui si opera.

Si ribadiscono alcuni punti, tenendo conto dei problemi e delle prospettive per lo sviluppo della *SRF* nel nostro Paese, che dovrebbero essere prioritariamente considerati e

sostenuti in maniera coordinata per l'organizzazione del settore della forestazione a ciclo breve per la produzione di biomasse forestali:

- impianti su ampie superfici (energy farm) e meccanizzazione delle operazioni colturali (impianto e raccolta finale); riduzione degli oneri colturali, essenziale per ridurre la forbice attualmente esistente tra il costo globale di produzione e il prezzo che le industrie possono pagare per la biomassa legnosa;
- stimolo di accordi tra produttori al loro interno e tra produttori ed utilizzatori finali per il conferimento della biomassa;
- erogazione di benefici a sostegno del prezzo del prodotto e/o a parziale copertura dei costi colturali per favorire la redditività della coltura.

Solo con queste premesse e prospettive sarà possibile stimolare i proprietari a destinare alla forestazione a breve rotazione non solo i terreni marginali, che spesso non consentono di ottenere sufficienti rese produttive, ma anche parte di quei terreni di buona o discreta fertilità ubicati in pianura ed in bassa collina ed usualmente destinati alle colture cerealicolo-foraggiere.

Le diverse esperienze di ricerca condotte nel nostro Paese costituiscono sicuramente degli importanti punti di riferimento per iniziative future. Le produzioni sulle quali si basa la convenienza economica di questi moduli colturali indicano che la SRF, attualmente, non è remunerativa per le aziende agricole senza il contributo pubblico, ma nel calcolo economico è difficile attribuire un valore al ruolo che hanno queste piantagioni in termini di miglioramento dell'ambiente (riduzione emissioni di gas serra, biodiversità, fitodepurazione). Queste produzioni, inoltre, sono state ottenute con del materiale vegetale non selezionato appositamente per queste tipologie colturali e in numero ridotto e non sempre rappresentativo di località in cui la richiesta di biomasse da parte dell'industria diviene sempre più importante. Tutto ciò rende sempre più necessaria l'esigenza di condurre ulteriori esperienze sulla produttività delle specie più adatte e sul reperimento di materiale più idoneo alla SRF in relazione all'ambiente di coltivazione ed ai modelli colturali impiegabili.

Quindi, a fronte di richieste da parte dell'industria interessata all'utilizzazione di biomasse prodotte con moduli colturali a ciclo breve, il mondo della ricerca è in grado di fornire informazioni limitate sulle reali potenzialità produttive e, conseguentemente, sui costi di gestione di questi sistemi produttivi. La ricerca di base e la sperimentazione, in ogni caso, possono contribuire a migliorare le conoscenze sulle reali potenzialità produttive e sull'impatto ambientale di queste piantagioni in termini di assorbimento di carbonio.

L'analisi dei costi/benefici del sistema produttivo delle biomasse legnose a ciclo breve potrebbe fornire indicazioni realistiche per programmare l'approvvigionamento dell'industria e pianificare sul territorio la realizzazione di impianti di arboricoltura da legno finalizzati alla produzione di biomassa.

2.4 Lo Stato della ricerca in Italia

Secondo un'indagine recente sulla condizione della ricerca su SRF in Italia (Mezzalana, 2005), c'è una intensa attività su questo argomento, con molti istituti che lavorano a quasi tutti i settori della filiera produttiva delle SRF, dalla ricerca genetica del materiale vegetale agli usi finali della biomassa, dall'analisi economica del tornaconto di questo raccolto, all'impatto ambientale della coltura, includendo l'adattabilità degli alberi alla prevista alta concentrazione di CO₂ nell'atmosfera (Calzavara et al, 2003; Liberloo et al, 2004).

Gli ostacoli allo sviluppo ed i conseguenti obiettivi della ricerca sono chiaramente indicati nel Libro Bianco Nazionale, nel quale viene individuato il ruolo della ricerca nell'incremento della produzione di biomassa ed in particolare quello delle piantagioni arboree a ciclo breve. L'utilizzazione energetica di biomassa agricola e forestale in senso moderno trova oggi la sua limitazione maggiore nel costo di produzione della materia prima. Questa infatti incide sul costo di produzione finale dell'energia in misura preponderante rispetto al costo di trasformazione. Per abbassare i costi di produzione della biomassa agricola è necessario agire sulla massimizzazione delle produzioni unitarie per unità di superficie e di tempo.

Negli anni passati due ricerche a livello nazionale, il Progetto P.R.I.S.C.A. promosso dal M.i.P.A. ed il progetto Colture Energetiche promosso dall'E.N.E.L. Spa (AA.VV., 1997), hanno definito le specie, le varietà, le tecniche colturali idonee alla coltivazione di colture da biomassa, arboree ed erbacee, sia annuali che poliennali, per la produzione di energia. Si citano inoltre, la nota redatta da ITABIA - *Italian Biomass Association*- (1998) e le linee guida per le coltivazioni da biomassa a fini energetici (AA.VV., 1999) a cura del Gruppo di Coordinamento Italiano del progetto comunitario ALTENER-BIOGUIDE. Le diverse ricerche indicano i pioppi, i salici, gli eucalipti e la robinia come le specie arboree di maggior interesse nei diversi ambienti del nostro Paese per queste tipologie colturali. Si segnala, inoltre, l'attività svolta nell'ambito del progetto Cofin-MURST 1998-2000 sulla selezione di diverse specie e ibridi di pioppo per impianti a turno breve (Sabatti et al.,

2000) e la sperimentazione in corso con la robinia presso l'Istituto per l'Agroselvicoltura di Porano del CNR (*Paris et al.*, 1999). In relazione a ciò, alcune Regioni italiane (es. Lombardia ed Emilia-Romagna) hanno inserito determinate tipologie di SRF tra le azioni ammissibili a finanziamento pubblico ai sensi del Reg. CEE 2080/92 e del successivo regolamento per il sostegno dello sviluppo rurale 2000-2006, nell'ottica di quanto previsto da Agenda 2000.

Le diverse ricerche hanno consentito la stima preliminare delle soglie minime di produttività ottenibili, necessarie a valutare l'economicità di queste colture. Ad esempio queste per il pioppo, infatti, possono presentare ampie oscillazioni da 4-5 a più di 20 t ha⁻¹ anno⁻¹ di sostanza secca.

Il passo successivo sembra pertanto quello di proseguire specifici programmi di miglioramento genetico. Infatti le sperimentazioni sin qui eseguite hanno avuto come oggetto piante che non hanno mai subito un processo di selezione o che sono state selezionate per obiettivi spesso antitetici, ma comunque divergenti da quello della produzione di biomassa a utilizzo energetico.

2.5 Sostenibilità ambientale e Funzioni ecologiche delle colture dedicate a scopo energetico

Le biomasse occupano un posto di rilievo tra le fonti rinnovabili di energia, ma se ci soffermiamo sugli aspetti energetici, non possiamo cogliere interamente il potenziale di questa risorsa naturale.

L'impiego di colture dedicate ad uso energetico deve essere valutato oltre che dal punto di vista economico - produttivo anche da quello ecologico, prima di formulare un giudizio complessivo razionale in termini di sostenibilità.

Le implicazioni di carattere ambientale delle biomasse sono molteplici sia a livello globale che comprensoriale e aziendale (Vedi Tabella 2.2). Mentre a livello globale interessano alcuni aspetti quali gli effetti positivi dell'impiego delle biomasse a scopo energetico sul bilancio della CO₂, la riduzione di altre emissioni nocive nell'atmosfera, l'incremento della biodiversità ed il minore impiego di fonti non rinnovabili, a scala comprensoriale i benefici sono riferiti al territorio agricolo definito, come la conservazione del suolo, la salvaguardia delle risorse idriche, gli aspetti paesaggistici e l'impiego dei terreni marginali. A livello aziendale, infine, risultano esaltati gli aspetti relativi al bilancio economico delle colture, al mantenimento della fertilità del suolo ecc...

SCALA	RICADUTE SUL SISTEMA AGRO-FORESTALE
GALE	Bilancio della CO ₂ neutro Riduzione di altre emissioni Protezione/incremento della biodiversità Sviluppo di fonti rinnovabili
COMPENSORIALE	Conservazione del suolo Salvaguardia delle risorse idriche Aspetti paesaggistici Recupero terreni marginali
AZIENDALE	Nuove attività imprenditoriali Incremento dei redditi Possibilità di riconversione Mantenimento della fertilità

Fonte ITABIA: Le biomasse per l'energia e l'ambiente – Rapporto 2003

Tabella 2.2: Esternalità prodotte dall'impiego delle biomasse a scopo energetico

Aspetto	Valore	Motivazione
Erosione	A	Migliore copertura del suolo
Influenza sulla struttura del suolo	A	Migliore influenza app. radicali
Nutrienti-H ₂ O di falda	A	Significativa domanda di fertilità, buon <i>uptake</i> di elementi nutritivi; minore impiego di fertilizzanti
Esigenze idriche	B	Zona fitoclimatica ottimale
Pesticidi	A	Controllo delle infestanti al I° anno; buon controllo già dal II° anno
Biodiversità	A/B	Aspetto paesaggistico non sempre ottimale

Tabella 2.3 :Stima della pressione ambientale di una SRF di pioppo e/o salice

Fonte: (EEA Report 7/2006) modificato. A = basso rischio, B = medio rischio, C = alto rischio

La sostenibilità di queste coltivazioni, ovvero la possibilità di un utilizzo indefinito delle risorse limitando gli effetti negativi sull'inquinamento, mantenendo costanti le risorse naturali e garantendo la fruizione alle generazioni future, deve essere valutata in relazione ai molti aspetti che vengono implicati. Una sintetica stima del rischio della pressione ambientale di una SRF di *Salicaceae* viene riportata nella tabella 2.3.

2.5.1 Influenza sul bilancio della CO₂

A livello globale si è ormai riconosciuto al settore agroforestale un ruolo di primaria importanza nel regolare il ciclo del carbonio e quindi del bilancio della CO₂. Boschi e colture non alimentari possono contribuire più di qualsiasi altra fonte biologica ad una sottrazione netta di CO₂ atmosferica per effetto di un'azione combinata di immobilizzazione diretta (biomasse ed *humus*) e di sostituzione dei combustibili fossili. In risposta al *climate change*, vi è un crescente interesse verso l'aumento dello stoccaggio del carbonio negli alberi e nell'uso della biomassa degli alberi per la sostituzione dei combustibili fossili per minimizzare l'incremento della concentrazione atmosferica di CO₂, da parte degli scienziati, politici e governi (Baral e Guha, 2004).

Il carbonio stoccato nella materia organica è una delle maggiori componenti a livello mondiale e la distruzione delle foreste per utilizzi agricoli e la mancanza di una appropriata gestione degli incendi contribuisce per circa il 20-30% alle emissioni antropogeniche di CO₂ (Houghton, 1991).

L'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) definisce il sequestro di carbonio come un incremento del carbonio staccato in qualunque riserva non atmosferica. Ci sono due possibilità di utilizzo degli alberi per la riduzione delle emissioni di CO₂.

Nel primo caso il sequestro diretto del carbonio attraverso afforestazione e riforestazione che producono biomassa forestale, considerata un serbatoio di carbonio sottratto all'atmosfera con la fotosintesi e sequestrato per tempi più o meno lunghi nella biomassa legnosa o nel suolo.

Nel secondo caso l'utilizzo di biomassa legnosa viene usata per produrre energia in sostituzione dei combustibili fossili. In questo secondo caso il bilancio delle emissioni di CO₂ è pressoché nullo (se si esclude il combustibile tradizionale impiegato nel ciclo colturale e nel trasporto), in quanto viene rilasciata CO₂ a seguito della combustione la stessa quantità di anidride carbonica sequestrata dalla biomassa con la fotosintesi.

Il sequestro diretto di carbonio dall'atmosfera è considerato una misura temporanea di mitigazione, in quanto nelle piante vicine alla maturità ciò viene attenuato perché la respirazione inizia ad eguagliare o eccedere la produzione primaria. L'uso di biomassa per la sostituzione di combustibili fossili è invece considerato da diversi autori una misura di lungo termine, perché la raccolta e nuova piantagione in un dato luogo può essere in teoria ripetuta in perpetuo (Baral e Guha, 2004).

	PRODOTTO (t/ha ss)	Mtep	CO ₂ (Mt)	CARBONIO (Mt)
SEQUESTRO NELLE BIOMASSE	9,0		0,5	0,1
SEQUESTRO NELL'HUMUS	3,0+3,0		3,3	0,9
SOSTITUZIONE DI FONTI FOSSILI	7,2	4,5	12,2	3,3
TOTALE	9,0+3,0	4,5	16,0	4,3

Fonte PNVBFAF (1999)

Tabella 2.4: Stima della CO₂ sottraibile annualmente all'atmosfera da colture dedicate su 1,2 MHa

Marland e Shlamadinger comparano i due approcci e trovano che il sequestro diretto di carbonio è favorito in condizioni di ridotta crescita e ridotta efficienza di conversione, mentre la sostituzione di combustibili fossili è favorita in condizioni di elevata crescita ed alta efficienza di conversione.

2.5.2 SRF e carbonio nei suoli

Non meno importante aspetto da considerare è quello del sequestro della CO₂ nei suoli. E' stato infatti dimostrato come l'inserimento di coltivazioni dedicate alla produzione di biomassa nelle aree a rischio di degrado ed in quelle caratterizzate da semplificazione colturali (monoculture) può aumentare il carbonio stoccato nei suoli.

Le lavorazioni, anno dopo anno, contribuiscono ad abbassare marcatamente il contenuto di sostanza organica nel terreno, deteriorandone le proprietà fisiche, tanto da farle divenire sfavorevoli per una soddisfacente crescita delle colture. Dove i contenuti in sostanza organica sono più depressi, lo sviluppo radicale delle colture risulta impedito dalla struttura più compatta che si è originata, anche per gli effetti di pesanti macchine agricole.

La perdita delle ottimali condizioni strutturali del suolo, oltre ad influenzare negativamente l'accrescimento delle radici, ostacola il drenaggio, altera la disponibilità dei nutrienti e interagisce con la suscettibilità all'attacco di malattie.

Attraverso la sostituzione di una quota variabile di colture agrarie tradizionali con un'analogha superficie destinata a colture dedicate o meglio con *Short Rotation Forestry* SRF, viste le ridotte lavorazioni previste per questa tipologia di coltura, si può contribuire ad un miglioramento del contenuto di sostanza organica e della struttura dei suoli (soprattutto con l'impiego di specie a foglia caduca). Vari esperimenti di lungo termine

hanno dimostrato che il carbonio nel terreno si può accumulare con tassi medi di $0,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ e con valori massimi fino a $3 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ (Post e Kwon, 2000).

Nel caso la coltivazione riguardi specie erbacee annuali, come il sorgo, la destinazione a fini energetici della biomassa prodotta influisce in maniera decisamente meno marcata sul bilancio della CO_2 , rispetto alle SRF.

Si stima che una piantagione arborea da legno accumuli circa 10 t di Carbonio $\text{ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ nella biomassa, soprattutto nel fusto e nei rami e $0,4 \text{ t di C ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ nel terreno. Questi valori sono poi destinati ad aumentare ulteriormente poiché, come abbiamo visto la CO_2 sta aumentando nell'atmosfera aumentando così anche la fotosintesi degli alberi e il sequestro di carbonio dall'atmosfera (Scarascia Mugnozza et al., 2005). In tal caso, le piantagioni forestali a rapido accrescimento sono tra i sistemi agro-forestali più efficaci per l'assorbimento di gas serra e lo saranno ancor più in futuro poiché, come dimostrato in un recente progetto europeo, EUROFACE, coordinato dall'Università della Tuscia e dal CNR, simulando condizioni ambientali che si prevedono all'incirca per l'anno 2050, queste piantagioni aumenteranno di circa il 20-25% la loro capacità di produzione di biomassa e di sequestro del carbonio (Scarascia Mugnozza, 2006).

2.5.3 Biodiversità

Lo sviluppo su larga scala di piantagioni *Short Rotation Forestry* può apportare significativi cambiamenti nell'uso del territorio e potenzialmente alterare gli *habitats* per gli organismi biologici (Beyea, 1991-Ranney, 1994)

In generale si può affermare che l'introduzione di nuove specie da energia negli ordinamenti produttivi aziendali può determinare anche un incremento della biodiversità, contrastando la tendenza alla eccessiva semplificazione degli avvicendamenti colturali o addirittura alla monocultura. Tuttavia il livello di biodiversità delle colture da energia è ancora poco definita e può variare notevolmente a seconda che si tratti di SRF o di colture erbacee e quindi della rispettiva presenza di organismi (infestanti, insetti, uccelli, mammiferi e microrganismi), in rapporto alla dimensione dell'area coltivata ed all'interazione della coltura con il complesso circostante. In sintesi, il livello di biodiversità delle colture energetiche annuali è analogo a quello delle colture erbacee tradizionali (mais ecc...). Invece è stato rilevato che le SRF presentano una elevata biodiversità sia vegetale che animale, rispetto alle colture erbacee. E' ormai acclarato che la riduzione delle

lavorazioni che caratterizza l'impiego delle SRF arrechi minor disturbo alle specie selvatiche e ne migliori l'*habitat*.

Studi effettuati su scala ridotta mostrano influenze positive delle SRF per la fauna selvatica, ma va ricordato che specie differenti hanno esigenze ambientali diverse, perciò l'*habitat* creato positivo per una o più specie, può avere un effetto neutrale o negativo su altre specie (*Christian D.P. et al 1994*). I fattori che influenzano la diversità nella piantagione sono legati alla superficie occupata dalla stessa, dall'età e dalla struttura del popolamento (*Christian D.P. 1998*).

A livello di sistema colturale la biodiversità può risultare incrementata dal fatto che nelle colture da biomassa l'impiego di erbicidi è ridotto rispetto alle coltivazioni tradizionali. E' infatti accettabile una presenza di infestanti nelle colture da energia e queste possono incrementare la stabilità dell'agroecosistema, essendo spesso ospiti o intermediari di insetti, parassiti o cibo per altri organismi.

Inoltre, soprattutto con l'impiego di SRF, si può realizzare un ruolo di anello di congiunzione fra terreni seminativi e aree boscate. Tale anello costituirebbe anche un importante corridoio per la fauna autoctona. In diversi paesi europei sono stati osservati incrementi nella presenza di alcune specie selvatiche (capriolo, coniglio, lepre, fagiano), di notevole interesse anche ai fini faunistico-venatori.

Come descritto nella tabella 4.1, le esternalità positive delle piantagioni forestali a scopo energetico sono molte e tutte importanti.

2.5.4 Contributo al fitorimedio

A livello comprensoriale il contributo delle piantagioni a scopo energetico è la possibilità di questi sistemi di migliorare l'ambiente e contrastare l'inquinamento del terreno e dell'acqua attraverso l'estrazione, l'immobilizzazione e la degradazione di vari inquinanti. Le piante infatti, e soprattutto gli alberi, grazie al loro esteso e in alcuni casi, molto profondo apparato radicale, sono in grado di assorbire dal terreno acqua con le diverse sostanze in essa disciolte come nitrati e fosfati che, se presenti in dosi eccessive nelle acque di falda o in quelle superficiali, ne riducono la qualità aumentando il grado di inquinamento ambientale; d'altra parte, questi elementi possono essere addirittura favorevoli all'accrescimento della vegetazione, determinando anche un considerevole aumento della produttività finale di biomassa. Vi sono poi una serie di altre sostanze inquinanti del terreno e dell'acqua, purtroppo spesso presenti nei terreni agricoli, quali

pesticidi ed erbicidi, che pur non costituendo fattori essenziali di crescita per le piante possono essere da queste, in parte, assorbite, metabolizzate e disattivate ovvero trattenute dal terreno pervaso dal denso reticolo di radici della vegetazione soprastante; in questo modo i composti inquinanti non finiscono nei corsi d'acqua ma, anzi, con il tempo vengono degradati a molecole meno pericolose per l'ambiente (Scarascia Mugnozza 2006).

2.5.5 Altri benefici

Benchè i benefici maggiori si registrano soprattutto quando le colture poliennali da energia vengono proposte in sostituzione di colture arative annuali e di pascoli molto sfruttati o su terreni lasciati in “*set-aside*” poliennale o comunque su suoli molto degradati, anche in ambienti decisamente fertili, in un contesto produttivo basato su avvicendamenti colturali molto brevi, l'introduzione di SRF di pioppo ha evidenziato una notevole riduzione dei rischi di erosione e conseguentemente una decisa riduzione della perdita di nutrienti dal sistema (Joslin., 1997).

La introduzione di colture da biomassa a destinazione energetica in un sistema produttivo, in sostituzione delle colture tradizionali, sembra determinare una sostanziale riduzione degli impieghi di fitofarmaci e fertilizzanti con una conseguente riduzione dei rischi di inquinamento delle acque sia superficiali che profonde. E' inoltre unanimemente riconosciuto che le colture poliennali da energia costituiscono uno dei mezzi più efficaci per ridurre i rischi di erosione nelle aree in pendio e nelle aree pianeggianti sensibili; questo sia per la presenza pressoché continua della vegetazione sul terreno che è una valida e densa copertura del suolo, sia per l'incremento di sostanza organica che si registra negli strati superficiali del terreno e per l'effetto “*mulching*”, prodotto soprattutto per le SRF dalle foglie che annualmente ritornano al suolo, sia infine per l'opera di trattenimento meccanico delle masse terrose degli apparati radicali durante i periodi maggiormente piovosi dell'anno.

A **livello aziendale** le colture da energia, possono generare nuove attività imprenditoriali, migliorare il reddito e diversificare la produzione. Non vanno comunque dimenticati, anche a livello di singola impresa agricola, gli effetti positivi sul mantenimento della fertilità del suolo che l'introduzione di colture per energia può avere.

Affinché l'impiego delle biomasse a scopo energetico sia sostenibile dal punto di vista ecologico, è indispensabile individuare il rapporto tra l'energia complessivamente ottenuta

(output) come prodotto utile e quella non rinnovabile (input) consumata per ottenere quella produzione. Nell'energia immessa nel sistema produttivo viene computata sia quella relativa ai diversi mezzi tecnici impiegati (concimi, fitofarmaci, sementi, ecc...), sia quella consumata negli interventi e nelle lavorazioni meccaniche previste.

Bilancio Energetico	Colza ¹		Girasole ¹		Pioppo da S.R.F. ²	
	GJ ha ⁻¹	%	GJ ha ⁻¹	%	GJ ha ⁻¹	%
OUTPUT	69	100	79,1	100	188	100
INPUT COMPLESSIVO	21,7	100	28,3	100	19,1	100
- fase di campo;	16,1	72	21,6	76,3	18	94,2
- fase post-raccolta.	5,6	28	6,7	23,7	1,1	5,8
INPUT FASE DI CAMPO	16,1	100	21,6	100	18	100
- carburanti;	6,7	46	10,6	49	-	-
- concimi;	6,9	43,1	7	32,4	9,3	44,5
-difesa fitosanitaria;	0,3	2,3	1	4,6	1,1	5,3
- altro.	2,2	8,5	3	14	10,5	50,2
OUTPUT/INPUT	3,18		2,8		9,9	

Tabella 2.5: Bilancio energetico comparativo tra colture energetiche di origine agricola (biodiesel) e pioppo da "short rotation forestry" (SRF). Fonte: (1): Bona, 2001; (2): Balsari, Arioldi, 2002.

	SRF-A	SRF-B
Totale Input	16,3	11,1
Totale Output	415,2	323,5
Output/Input	25,5	29,3
Output-Input	399,0	312,4

Tabella 2.6: Bilancio energetico della SRF di pioppo (GJ ha⁻¹ anno⁻¹)
Fonte Quaderno ARSIA 6/2004 modificato.

Nella tabella 2.5 vengono comparati i bilanci energetici di due colture agricole (girasole e colza) da *biodiesel*, con quello di una SRF di pioppo. I risultati mostrano come il bilancio energetico (rapporto *output/input*) sia nettamente a favore della coltivazione legnosa, con un beneficio energetico tre volte superiore alle altre colture.

Per migliorare ancora questo importante rapporto, è necessario massimizzare le rese di biomassa per unità di superficie, con ridotti *input* energetici.

Rapporti *output/input* estremamente vantaggiosi vengono riportati nella tab. 2.6.

Da alcuni studi recentemente effettuati emergono risultati incoraggianti. Il bilancio energetico di una piantagione di pioppo *SRF* a Pisa condotto con alti (*SRF-A*) e bassi (*SRF-B*) input colturali evidenzia un rapporto Output/Input di 25,5 nel primo caso e di 29,3 nel secondo (tab.2.6)

CAPITOLO 3 - IL PIOPPO NELLA SRF

La famiglia delle *Salicaceae* è l'unica dell'ordine delle *Salicales*. A questa famiglia appartengono specie arboree e arbustive (compresi arbusti prostrati o nani, anche con fusto e rami ipogei) con foglie semplici, alterne, decidue. I fiori sono unisessuati e riuniti in amenti portati su piante sessualmente diverse. Vi sono due generi: *Salix* L. (salici) con circa 300 specie e *Populus* L. (pioppi) con una trentina di specie. Per lo più sono specie eliofile ed igrofile con spiccate caratteristiche di pionierismo.

3.1 Il genere *Populus* L.

Al genere *Populus*, come detto, appartengono una trentina di specie a portamento prevalentemente arboreo. Molti di questi sono alberi a rapido accrescimento che possono raggiungere anche dimensioni ragguardevoli; la loro chioma è arrotondata o allungata, hanno corteccia di colore variabile con la specie, liscia da giovane, con ritidoma anche molto solcato in piante adulte.

La ramificazione è monopodiale (eccetto che in *P. euphratica* in cui la gemma apicale abscinde) e marcatamente eteroclasica con brachiblasti molto caratteristici.

Le foglie sono caduche, alterne e spirali, semplici palminervie (più raramente penninervie). La lamina è ovaleggiante o triangolare con margine intero o dentato ed è frequentemente anfistomatica, cioè presenta gli stomi in entrambe le pagine fogliari. Il picciolo è più o meno lungo, spesso compresso lateralmente. Le stipule sono caduche. Vi è quasi sempre un forte eteromorfismo fra le foglie brachiblastali e quelle macroblastali.

Sono piante dioiche (ad eccezione di *P. lasiocarpa*). I fiori, in amenti pedunculati, appaiono sui rami dell'anno precedente prima delle foglie, mancano i nettari e l'impollinazione è anemofila. Gli amenti maschili sono di solito più brevi e più compatti di quelli femminili.

La fase adulta della pianta inizia precocemente, verso i 5-15 anni; il frutto è una capsula che di solito matura prima del pieno sviluppo delle foglie e che alla disseminazione si apre in 2-4 valve. I semi sono piccoli, ovoidali, arrotondati o acuti all'apice, muniti di numerosi peli sericei molto lunghi che in molte specie conferiscono loro un aspetto cotonoso. La loro germinabilità è elevata ma la facoltà germinativa dura solo poche settimane. Le plantule hanno cotiledoni epigei, piccoli, troncati o rotondeggianti alla base; le prime foglie sono ovali e la prima coppia è opposta.

Diverse specie hanno grande attitudine alla rizogenesi e si possono propagare per talea; inoltre per diversi pioppi è molto alta l'emissione di polloni radicali.

L'apparato radicale si allarga ampiamente producendo anche grosse radici laterali; si rende profondo grazie a numerose radici verticali se la falda o altri fattori non lo impediscono. Il legno dei pioppi è omogeneo, a porosità diffusa, in alcuni casi discolore; i raggi sono sottili e omocellulari nella maggior parte delle specie.

Il genere è diffuso prevalentemente nelle regioni temperate e fredde dell'emisfero settentrionale, ma si ritrova anche in regioni subtropicali, su suoli umidi o molto umidi. Sono specie esigenti in luminosità, pioniere e spesso costituiscono cenosi ripicole. Molti pioppi sono specie ad accrescimento rapido e sostenuto. Il loro accrescimento longitudinale è solo parzialmente determinato e la crescita libera può prolungarsi nel tempo fino all'autunno. Queste caratteristiche fanno dei pioppi un genere molto importante per la produzione del legname. Attualmente l'agricoltura si basa su cloni selezionati e si attua tramite propagazione agamica lasciando quella gamica alla diffusione naturale e alla ricerca.

Il genere *Populus* è suddiviso in 5 sezioni (*Gellini R., Grossoni P., 1997*):

Sezione *Turanga Bunge*. La gemma apicale abscinde. I fiori maschili hanno 8-12 stami. E' limitata ad una sola specie *P. euphratica* Oliv., un grosso arbusto che si ritrova su terreni salmastri dell'Asia Minore e dell'Egitto e della Mongolia. In maniera disgiunta è presente anche in Africa settentrionale fino al Marocco.

Sezione *Populus* (= *Leuce Duby*). La corteccia a lungo liscia e chiara può essere anche bianca. Presenta gemme spesso tomentose ma con resina scarsa o assente; la squama florale è lungamente ciliata mentre la capsula è stretta e lunga. E' presente in tutte le regioni temperate di tutto l'emisfero (compresa l'Africa settentrionale). Questa sezione viene a sua volta suddivisa in:

Sottosezione *Albidae* nella quale i rametti e le gemme sono biancastri e pelosi. L'eterofillia è marcata con foglie dei macroblasti tomentose e biancastre nella pagina inferiore con picciolo di sezione quasi circolare. Caratteristico è *P. alba* L..

Sottosezione *Trepidae* in cui i rametti e le gemme sono glabri o appena pubescenti. L'eterofillia è appena pronunciata con foglie tomentose solo al germogliamento. Il picciolo è molto appiattito. Si ricordano tra le specie *P. tremula* L., *P. tremuloides* Michx., *P. grandidentata* Michx..

Sezione *Aigeiros Duby*. La corteccia è fessurata mentre le gemme sono appuntite e resinose. Le foglie sono di forma deltoidale o romboidale, con il bordo traslucido, glabre e

verdi, con picciolo appiattito. E' presente in tutte le regioni temperate dell'emisfero nord. Tra le specie di questa sezione ci sono *P. nigra* L., *P. deltoides* Marsh..

Sezione *Leucoides* Spach. Le gemme sono grosse, coniche, non vischiose e poco profumate. Le foglie sono molto grandi (anche 30 cm), spesso cordate e senza eterofillia accentuata. E' presente in Cina e in Nord America. Tra le specie c'è *P. lasiocarpa* Oliv. pianta monoica.

Sezione *Tacamahaca* L.. Le gemme sono grosse, vischiose, molto profumate. Le foglie sono biancastre nella pagina inferiore, acute all'apice e più lunghe che larghe. Le foglie macroblastali con piccioli più corti di quelli delle foglie brachiblastali. Le ghiandole fogliari sono ben visibili. E' presente in Asia settentrionale e centrale ed in Nord America. Le specie più importanti sono *P. balsamifera* L., *P. trichocarpa* Torr. & Gray, *P. laurifolia* Ledeb., *P. koreana* Rehd., *P. maximowiczii* Henry, *P. ciliata*.

In Europa compresa l'Italia sono autoctone tre specie: il pioppo bianco (*P. alba*), il pioppo tremulo (*P. tremula*), il pioppo nero (*P. nigra*), più un'altra entità che è considerata ibridogena (*P. x canescens*). Oltre a questi taxa sono coltivate alcune specie esotiche e numerosi cloni ibridi ottenuti con impollinazione controllata.

3.2 La pioppicoltura

La pioppicoltura è una branca dell'arboricoltura da legno. E' una coltivazione specializzata di specie arboree per la produzione di legname che si inserisce nel normale ciclo produttivo dell'azienda agricola.

La forma più antica di coltivazione del pioppo è quella che in gergo è definita pioppicoltura "di ripa". Tale coltivazione si svolge in filari che possono trovarsi ai fianchi delle strade, dei canali e dei fiumi sfruttando questi spazi per produrre legno, frasca da foraggio, azione frangivento e anche ombra ed ornamento..

La pioppicoltura specializzata è un'attività più recente che implica l'impianto di pioppeti più o meno estesi, per produzione di legno con turni di 9-15 anni. Questo ordinamento produttivo richiede una notevole capacità nella coltivazione e nella scelta del materiale di impianto. Tale pioppicoltura ha come obiettivo l'ottenimento di una produzione qualitativa di legname. Alla fine del ciclo l'impianto può essere sostituito da altre specie o comunque rinnovato con un nuovo impianto.

Ultima delle coltivazioni di pioppo è quella degli impianti a breve rotazione per la produzione delle biomasse. Gli impianti hanno un ciclo di 1-5 anni che può essere reiterato

più volte, attraverso ceduzioni successive. Tali impianti hanno come scopo quello della produzione quantitativa del legname in tempi ridotti.

3.3 I criteri di miglioramento genetico dei cloni di pioppo

Nella omologazione e nella certificazione dei genotipi di pioppo di selezione recente si garantisce che ciascuna di loro corrisponda ad unica origine di propagazione vegetativa. Di seguito sono elencate alcune delle linee guida per il miglioramento dei cloni di pioppo (Bernetti G., 1995).

Il sesso: I cloni femminili hanno l'inconveniente della fruttificazione abbondante. Questa fruttificazione riduce la quantità di sostanza che è trasferita dalla pianta per l'accrescimento. Inoltre, per le specie ornamentali è sconsigliato l'uso dei cloni femminili perché i semi, contenuti in un pappo cotonoso, hanno una forte azione allergica. Questo carattere è poco interessante per le piantagioni a breve ciclo, perché la pianta rimane in un perenne stato giovanile.

La facilità di radicazione per talea legnosa: Alcune specie di pioppo hanno una bassa attitudine alla radicazione, ad esempio il pioppo bianco ed anche qualche clone di *P. deltoides*. Questo è un carattere che deve essere attentamente valutato per le piantagioni a breve rotazione che sono costituite con talee. Sarebbe utile che il clone selezionato presentasse elevate percentuali di radicazione nelle più svariate condizioni climatiche.

La prontezza dell'attecchimento a dimora: Consente una maggiore produzione e riduce gli attacchi di alcuni parassiti. Questo è un carattere sicuramente importante per le piantagioni a breve rotazione.

La resistenza ai patogeni: Molto importante è l'opera di selezioni di genotipi resistenti a patogeni, in particolar modo alle ruggini (*Melampsora spp.*)

Il fototropismo: E' un carattere molto importante per le produzioni di tipo tradizionale. Le piante non devono tendere ad incurvarsi alla ricerca della luce, perché altrimenti si danneggia la qualità del legno. I cloni più fototropici presentano, in filare, incurvamento alternativamente opposto. Nelle piantagioni, ai margini, le piante sono curve verso l'esterno, mentre internamente possono avere anche fusto sinuoso. Questo carattere per le piantagioni a breve rotazione non ha un grosso rilievo. Però possono essere importanti le riduzioni di produzione per un'eccessiva competizione per la luce, ovvero per un'eccessiva eliofilia delle piante.

Il portamento: E' un carattere molto importante nella pioppicoltura specializzata. I cloni preferiti sono quelli che hanno i rami disposti secondo dei palchi. Invece, i genotipi che hanno un portamento fastigiato sono molto più interessanti per impianti densi e per i filari. Dove gli impianti hanno un'elevata densità per il migliore sfruttamento dell'energia radiante, in linea di principio, sono migliori quei cloni che utilizzano di più lo spazio attraverso un elevato numero di rami.

La fenologia: E' un carattere importante per i possibili pericoli di danni da gelo, sia in autunno che in primavera.

La resistenza al vento: Dipende dalla resistenza dei rami e dei tronchi nonché dall'ancoraggio più o meno profondo delle piante nel terreno.

La rapidità di accrescimento: E' un carattere sicuramente molto importante per le piantagioni a breve rotazione. Questo carattere acquista importanza quando è massimo nella fase giovanile. Un grande guadagno genetico può essere ottenuto selezionando contemporaneamente per una rapida crescita giovanile ed un elevato indice di raccolta (*harvest index*), ovvero la percentuale di biomassa raccolta sul totale della biomassa (*Cannell et al. 1983; Magnussen et al. 1985*).

La qualità del legno: Carattere ottenibile a seconda dello scopo della piantagione. Infatti, se per le piantagioni specializzate si cerca di ottenere legno più adatto a topi per la sfogliatura, per le piantagioni a breve rotazione il carattere più interessante è la sua densità basale.

L'adattamento ai suoli e alle stazioni particolari: Sempre più importante per il modificarsi delle condizioni climatiche del nostro pianeta, la selezione di cloni capaci di tollerare situazioni difficili, come terreni con caratteristiche fisico-chimiche modificate, o la necessità di selezionare cloni idonei per il "fitorimedio".

3.4 I cloni di pioppo

I cloni di pioppo impiegati nella pioppicoltura specializzata delle pianure sono, generalmente, *P. x euramericana* (l'ibrido fra *P. deltoides* e *P. nigra*), più raramente, *P. x interamericana* (l'ibrido fra *P. deltoides* e *P. trichocarpa*) e *P. deltoides*.

Per quanto riguarda i cloni adatti alle piantagioni a breve rotazione, sino a qualche anno fa non esistevano dei cloni selezionati per questo scopo. L'attività di ricerca presentata in questo lavoro, mira proprio a verificare le potenzialità produttive di nuovi cloni selezionati, nell'ambito di una collaborazione tra soggetti privati (Alasia Franco Vivaì) e pubblici

(Istituto di Biologia Agroambientale e Forestale del Cnr; Dipartimento di Scienze dell'Ambiente forestale e delle sue risorse dell'Università della Tuscia).

3.5 La coltivazione di impianti di pioppo a ciclo breve

La corretta analisi e valutazione delle caratteristiche stazionali, la scelta del genotipo e la tecnica colturale, sono le azioni preliminari che permettono di migliorare le probabilità di successo di un impianto SFR. Il sistema colturale prevede i seguenti *steps* (Mitchell, 1999):

- Scelta del sito
- Caratterizzazione del sito
- Miglioramento
- Scelta del materiale d'impianto
- Spaziatura e disegno della piantagione
- Preparazione del sito
- Fertilizzazione, applicazione di reflui, controllo infestanti, irrigazione
- Raccolto ed eventuale stoccaggio

Vista la grande variabilità dei risultati produttivi, vi è comunque la necessità di migliorare le conoscenze per comprendere le produzioni potenziali delle SRF nelle diverse condizioni ambientali, con diverse intensità degli *input* colturali (irrigazioni, concimazioni, trattamenti ecc...) ed anche di conoscere le differenze del nuovo materiale impiegato nei riguardi delle potenzialità produttive.

3.5.1 La scelta del terreno

Le alte produttività delle piantagioni dipendono soprattutto da una ottimale combinazione delle condizioni fisiche del suolo, della disponibilità di acqua durante la stagione vegetativa, della disponibilità di nutrienti e dell'aerazione (Dickmann 2006). Nella scelta del terreno da destinare alla coltivazione del pioppo SRF bisogna tener conto dei fattori principali che influiscono sull'accrescimento delle piante, in particolare le caratteristiche fisiche, la disponibilità di acqua e di elementi nutritivi. Sono da ritenere idonei terreni profondi (70-100 cm), permeabili e caratterizzati da buona disponibilità idrica, con profondità ottimale della falda freatica di 100-150 cm. Sono invece da evitare i terreni con ristagno idrico superficiale. I terreni migliori sono quelli caratterizzati da tessitura sabbio-

limosa e sabbio-argillosa, non eccessivamente sciolti o compatti, con pH da sub acido a moderatamente alcalino. I terreni con eccesso di scheletro determinano una eccessiva permeabilità con conseguente scarsa disponibilità idrica soprattutto nel periodo estivo, mentre i terreni pesanti con elevati contenuti di argilla possono determinare condizioni di asfissia, sfavorevoli allo sviluppo delle radici (vedi foto 7.1).

I terreni ben strutturati consentono di limitare gli stress indotti da molti parassiti primari (*Marssonina brunnea*, *Melampsora spp.*) e di prevenire i danni causati da parassiti di debolezza (*Discosporium populeum*) o la comparsa di fisiopatie (“macchie brune”).



Figura 3.1: Impianto SRF su terreno pesante con problemi di ristagno idrico

I criteri per l'individuazione del livello attitudinale dei suoli alla coltivazione del pioppo sono riportati in tabella 7.1; in questa tabella viene ipotizzato che la coltivazione avvenga anche in condizioni non irrigue, che il clima locale non sia un fattore limitante e le caratteristiche fisiche dei suoli non siano modificabili con normali operazioni agricole (*Allegro et al., 2000*).

Caratteristiche podologiche (1)	Grado di importanza (2)	Grado di intensità delle limitazioni		
		Assenti o molto lievi (3)	Moderate (4)	Severe (5)
Tessitura (6)	***	Da media a grossolana	Da moderatamente fine a fine	-
Profondità utile alle radici (cm)	**	>50		<50
Disponibilità di ossigeno (8)	***	Buona o moderata	Imperfetta	Da scarsa a molto scarsa
Reazione pH	*	5,5-8,5	4,5-5,5	<4,5 e >8,5
Rischio di deficit idrico	*	Da assente a moderato		Da forte a molto severo
Salinità (EC ₅ mS/cm) (9)	***	<0,15	0,15 – 0,4	> 0,4
Calcare attivo (%)	***	< 6 %	6-10 %	> 10 %
Rischi inondazione (durata)	**	< 1 mese	> 1 mese	

Tabella 3.1: Grado di intensità della limitazione dei suoli alla coltivazione del pioppo. Fonte: *Allegro et al., 2000*

- (1) Riferite allo strato esplorabile dall'apparato radicale;
(2) * poco **mediamente *** molto importante;
(3) suoli che assicurano produzioni legnose in genere non inferiori all'80% di quella massima potenziale, senza particolari interventi colturali;
(4) i suoli di questa classe inducono riduzioni di produzione fino al 60% di quella massima e/o richiedere particolari pratiche colturali;
(5) suoli non destinabili ad uso pioppicolo;
(6) media: FS, F, FL, L; grossolana: S, SF; moderatamente fine: FA, FSA, FLA; fine: A, AS, AL;
(7) intesa come profondità a strati limitanti gli apparati radicali (es. orizzonti induriti, orizzonti di accumulo di carbonati, orizzonti argillosi impermeabili ecc...);
(8) buona: l'acqua è rimossa dal suolo prontamente; moderata: l'acqua è rimossa lentamente in alcuni periodi; imperfetta: l'acqua è rimossa lentamente ed il suolo è bagnato per lunghi periodi durante la stagione vegetativa; scarsa: e molto scarsa: il suolo è saturo periodicamente o per la maggior parte della stagione vegetativa;
(9) valori di conducibilità elettrica dell'estratto 1:5.

3.5.2 Tecnica di coltivazione

Il ciclo della *SRF* può essere schematizzato nella figura 3.2.

Dopo l'individuazione del terreno idoneo, le operazioni da eseguire nella fase di pre impianto comprendono i lavori preparatori principali (discissura e/o aratura) e lavori complementari (erpatura, fresatura ed estirpatura). La modalità di lavorazione principale da eseguire dipende chiaramente dal tipo di suolo che si trova. E' però importante che dove siano presenti suole di lavorazione o strati di argilla, si operi una discissura per ripristinare gli scambi idrici e gassosi dagli strati profondi a quelli superficiali del terreno.

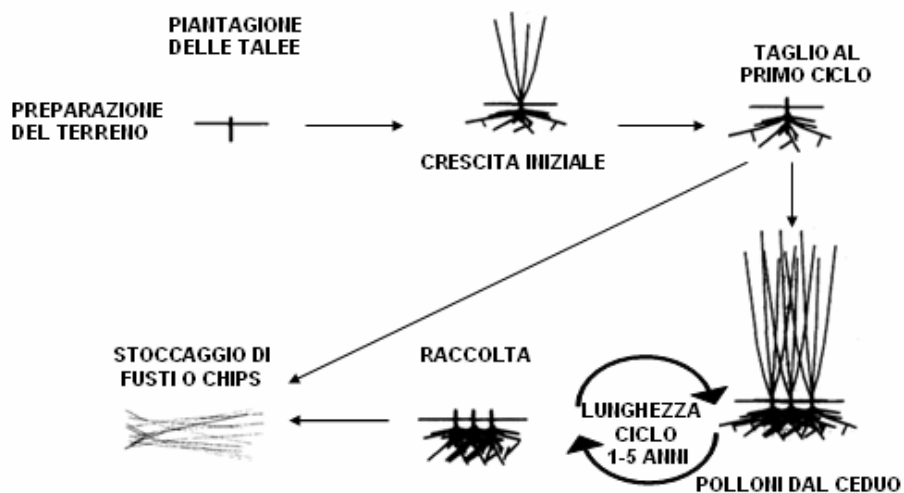


Figura 3.2: Schema del ciclo SRF del pioppo

Questa operazione dovrebbe essere seguita da una aratura superficiale. Il numero ed il tipo di lavorazioni secondarie variano a sua volta in funzione del tipo di terreno e dell'epoca di intervento. Una volta preparato il terreno ed il materiale di moltiplicazione, si procede al trapianto delle talee lunghe circa 20 cm, con l'ausilio di una trapiantatrice (Figura 3.3). L'impiego di un solo genotipo nella piantagione, aumenta notevolmente i rischi di fallimento della stessa in caso di attacco da parte di patogeni. Un metodo per ridurre il rischio di severi attacchi è l'uso di piantagioni multi-clonali (composte da *plots* monoclonali) (Deraedt and Ceulemans, 1998). Questo implica che devono essere piantati non solo i cloni più performanti, ma anche altri geneticamente differenti. Perciò la produzione massima ottenibile in quella area è ridotta, ma è il prezzo da pagare per ridurre il rischio di attacchi patogeni devastanti.



Figura 3.3: Trapiantatrice di precisione e talee impiegate

La messa a dimora delle talee è subito seguita da un trattamento diserbante antigerminello in preemergenza, ad eccezione di impianti eseguiti con telo pacciamante biodegradabile. La buona riuscita di queste prime operazioni determina generalmente il successo dell'impianto. Essendo questi impianti eseguiti su terreni agricoli con buona fertilità, non è necessario effettuare la concimazione nell'anno d'impianto, mentre la carenza di elementi nutritivi può divenire un fattore limitante negli anni successivi.

L'anno di impianto è particolarmente importante, pertanto il controllo delle infestanti mediante erpicature o fresature per evitare che le malerbe sovrastino i giovani getti di pioppo ed interventi di irrigazione di soccorso, devono essere eseguiti tempestivamente e scrupolosamente.



Figura 3.4: Erpicatura e fresatura nell'anno dell'impianto

Se il turno di taglio è annuale, alla ripresa vegetativa può essere necessario un trattamento disseccante localizzato sulle file o bine. Nel caso di turni più lunghi, lo sviluppo dei polloni già al secondo anno è tale da rendere agevole il controllo delle infestanti con semplici mezzi meccanici.

3.5.3 La Raccolta

Oltre ad ottenere elevate produzioni, per garantire una convenienza economica alle *SRF*, è necessario disporre di macchine per la raccolta che siano efficienti e poco costose.

Le tipologie di impianti che per ora possono essere raccolti con efficacia ed affidabilità, sono quelli a turno annuale e quinquennale.

Per gli impianti a turno annuale il cantiere ottimale appare quello proposto dalla *Claas* (vedi figura 3.5), mentre sui secondi è possibile utilizzare attrezzature forestali convenzionali, in quanto le dimensioni del materiale si avvicinano a quelle delle utilizzazioni forestali. La macchina *Claas* risponde adeguatamente alle esigenze di raccolta; questa è sostanzialmente una falciatrinciacaricatrice e funziona al meglio quando la coltura ha caratteristiche simili a quella del mais e dimensioni della superficie sufficientemente estese per evitare notevoli tempi morti. Questa macchina lavora bene in impianti a file binate i cui fusti hanno un diametro inferiore ai 6 cm (*Spinelli et al, 2006*) Nelle macchine forestali, invece, la produttività delle stesse aumenta proporzionalmente con le dimensioni della pianta. Sotto il profilo della raccolta, il modello a turno biennale, pur avendo le potenzialità di fornire risultati interessanti sotto vari aspetti, costituisce il caso più difficile.



Foto 3.5: Macchina semovente Claas per materiale di piccole dimensioni



Foto 3.6: Macchina raccoglitrice con testata semiportata Spapperi per impianti con turni maggiori o uguali a due anni

La taglia dei fusti, in questo caso è troppo elevata per l'impiego del collaudato sistema Claas ed al contempo troppo piccola per le attrezzature tipicamente forestali.

La raccolta avviene nei mesi autunno - invernali. La completa meccanizzazione di queste colture, soprattutto con materiale che supera gli 8-10 cm di diametro alla base, è ancora limitata dalla disponibilità di macchine efficaci, anche se in questo senso sono stati fatti notevoli passi avanti (vedi figura 3.6)

3.5.4 Stoccaggio

Gli impianti SRF sono raccolti in inverno, quando la richiesta di calore è massima, è pertanto possibile in alcuni casi avviare il cippato prodotto direttamente all'utilizzo finale, evitando così lo stoccaggio dello stesso. Esistono infatti caldaie in grado di utilizzare materiale anche molto umido. Ne caso in cui si debba conferire il prodotto ad una centrale elettrica, il fabbisogno di combustibile è esteso per tutto l'anno, determinando così la necessità di stoccare il combustibile. La cippatura determina un grande aumento della superficie del legno esposta all'attacco di vari microrganismi; i quali determinano una riduzione sino al 20% del prodotto. Per limitare l'attacco microbico, occorre agire sulle due principali variabili che lo determinano:

- Umidità del legname
- Quantità di superficie esposta.

Il pioppo allo stato fresco ha una percentuale di umidità riferita allo stato fresco del 50-60%, per cui il taglio e la cippatura in un unico passaggio producono materiale molto umido. Vi sono delle alternative che consistono nel tagliare i fusti e stocarli tal quali, effettuando la cippatura dopo un periodo di stagionatura all'aria e comunque subito prima dell'avvio in caldaia (*Spinelli et. al, 2006*). Evidentemente una filiera di raccolta che preveda anche lo stoccaggio è più complessa e richiede un maggiore sforzo organizzativo. Esistono però macchine in grado di produrre del pezzato in grado di resistere meglio all'attacco microbico e quindi di più agevole conservazione. Studi del CNR hanno dimostrato infatti che il pezzato si conserva meglio del cippato, sia perché presenta un rapporto superficie/volume minore, ma soprattutto perché forma cataste più aperte alla circolazione dell'aria, rendendo più difficili i fenomeni di fermentazione anaerobica (*Spinelli et. al, 2006*).

PARTE SPERIMENTALE

CAPITOLO 4 – PIANTAGIONI A TURNO ANNUALE: ASPETTI PRODUTTIVI

INTRODUZIONE

La crescente domanda di fonti energetiche alternative ha fatto sì che le SRF riscuotessero grande interesse. Questo tipo di coltivazione agroforestale impiega latifoglie a rapida crescita (*Populus*, *Salix*, *Eucaliptus* ecc...) soprattutto nella fase giovanile, con buona attitudine alla ceduzione, coltivate con cicli corti 1-5 anni, allo scopo di produrre biomassa a scopo energetico. Nella SRF il prodotto finale è quindi biomassa legnosa, pertanto la taglia e la forma degli alberi non sono aspetti di particolare importanza (Deraedt and Ceulemans, 1998). L'obiettivo principale è quello di produrre la massima quantità di biomassa per unità di area con il minimo *input* (fertilizzanti, lavorazioni ecc...) (Pellis et al., 2004). Oltre alla quantità di biomassa prodotta, l'attenzione va rivolta alla qualità della stessa, in ordine alla densità della biomassa ed al minor contenuto di corteccia possibile. Il genotipo impiegato, l'ambiente di coltivazioni e le pratiche colturali (distanza d'impianto, turno di raccolta, uso di erbicidi, pesticidi, irrigazioni e fertilizzanti) nel loro insieme determinano l'efficienza del sistema produttivo. Tra i generi comunemente impiegati nella SRF, il pioppo (*Populus*) con i suoi ibridi è quello che presenta buone caratteristiche di rapidità nella crescita giovanile, alta capacità fotosintetica, performance di crescita superiori ed elevata produzione di biomassa in una singola stagione di crescita e buona attitudine alla ceduzione. Per questi motivi e per la facilità di propagazione ed ibridazione, il pioppo è considerato una specie modello e un prototipo per queste ed altri tipi di piantagioni.

La ceduzione è un trattamento colturale capace di esaltare la produzione; alcuni dei principali vantaggi sono rappresentati dal mantenimento della porzione ipogea dopo il raccolto e dal semplice ed economico metodo di riproduzione agamica. Il turno breve riduce il rischio di decremento della crescita dovuto alla mortalità delle ceppaie, a malattie o schianti da vento (Pontailier et al, 1999). Inoltre, il fatto che le risorse non sono allocate negli organi di riproduzione per diversi anni dopo la ceduzione comporta benefici alla produzione della biomassa. La produzione legnosa dei fusti per unità di area si è visto essere massimizzata attraverso la ceduzione delle piante nel loro secondo o terzo anno di crescita (Dickmann et al, 1996).

Molti studi sono stati fatti sulla produttività di impianti sperimentali durante il primo o secondo ciclo di rotazione, (*Frison et al, 1990; Schenone, 1997; AA VV, 2004; Facciotto et al, 2006*), ma molto meno si conosce sulla sostenibilità di ceduazioni ripetute del pioppo.

Il prosieguo della sperimentazione in atto potrà dare utili informazioni sulla capacità di sopravvivenza delle ceppaie e quindi sulla potenziale durata della piantagione. È bene precisare che in passato la gran parte delle ricerche condotte in Italia sulla *Srf* hanno usato cloni di pioppo tradizionali. Nelle recenti sperimentazioni invece, sono stati testati nuovi cloni più adatti al modello colturale *Srf*, in grado di esprimere elevate *performance* produttive in condizioni di elevata densità e turni di ceduazione estremamente ravvicinati.

- **Gli obiettivi di questo lavoro sono i seguenti.**

1. Confrontare la biomassa epigea di nuovi cloni in *short-rotation* per entrambi i modelli colturali durante i quattro cicli vegetativi nella rete di piantagioni, in modo da poter individuare quelli più adatti alla *srf*.
2. Confronto del modello colturale a turno annuale con quello a turno biennale.
3. Confronto della qualità della biomassa ottenibile nei due modelli colturali.

4.1 Materiali e Metodi

4.1.1 Descrizione dei siti, dei cloni impiegati e della gestione delle piantagioni

Per verificare le potenzialità produttive di nuovi cloni selezionati, è stata realizzata nell'area padanoveneta una rete di impianti sperimentali. I nuovi cloni analizzati sono stati messi a confronto con alcuni dei cloni già presenti sul mercato e iscritti al Registro nazionale dei cloni forestali. La Rete sperimentale è stata realizzata nell'ambito di una collaborazione tra soggetti privati (Alasia Franco Vivai) e pubblici (Istituto di biologia agroambientale e forestale del CNR; Dipartimento di scienze dell'ambiente forestale e delle sue risorse dell'Università della Tuscia; Ersaf Lombardia). Nella primavera del 2003 sono state realizzate in Nord Italia diverse piantagioni sperimentali di cloni di pioppo per la produzione di biomassa, con turni di ceduazione annuali o biennali. Gli impianti sperimentali annuali sono distribuiti in Lombardia e Piemonte, tutti in zone pianeggianti; i siti sperimentali sono indicati in tabella 4.1.1

I terreni erano precedentemente usati come seminativi con mais in coltura principale a Bigarello mentre a Zinasco il seminativo era principalmente coltivato a riso. Non è stata effettuata alcuna fertilizzazione di fondo all'epoca d'impianto.

<i>Località</i>	N° piante ha ⁻¹	Ciclo culturale	Caratteristiche Terreno
Zinasco (Pv)	14.084	Annuale	Terreno sabbioso, mediamente alcalino e mediamente calcareo. N tot.solubile: basso P ass.: alto - K scamb.: basso
Bigarello (Mn)	14.286	Annuale	Terreno argilloso, alcalino e mediamente calcareo. N tot.solubile: medio P ass.: medio - K scamb.: medio

Tabella 4.1.1: Piantagioni sperimentali in Nord Italia.

È importante evidenziare come nell'anno dell'impianto sia le precipitazioni annue che le precipitazioni estive sono state inferiori alla media degli anni precedenti, mentre le temperature sono state superiori alla media del periodo, entrambi i fattori hanno causato aridità estiva soprattutto a Bigarello. La preparazione del terreno per l'impianto è stata effettuata a fine inverno con aratura a 30 cm seguita da un buon affinamento del terreno con erpicatura. La piantagione è stata realizzata manualmente nel mese di marzo, utilizzando talee legnose della lunghezza di circa 20 cm. Immediatamente dopo l'impianto è stato praticato un diserbo chimico in pre-emergenza con pendimethalin (5 kg ha⁻¹). Successivamente nella prima stagione vegetativa il controllo delle infestanti è stato effettuato meccanicamente con zappettature sulle file (luglio e agosto) ed erpicature nell'interfila (giugno, luglio e agosto).

Località	Anno			
	2003	2004	2005	2006
Zinasco (Pv)	1D.3I.3E	2I	-	-
Bigarello (Mn)	1D.2I.3E	2I	1I.2E	2I.2E

Tabella 4.1.2: Cure colturali alle piantagioni. Dove i numeri indicano il numero di interventi e le lettere D, E, I, T indicano rispettivamente: Diserbo, Erpicatura, Irrigazione (30-50 mm) e Trinciatura infestanti.

La tabella 4.1.2 riassume le cure colturali praticate nelle piantagioni nei quattro anni di sperimentazione.

I cloni utilizzati nella Rete sperimentale sono indicati in tabella 4.1.3 e si distinguono in nuovi cloni da colture a ciclo breve e cloni tradizionali.

I nuovi cloni sono stati scelti in ragione di una più elevata produttività e opportunamente selezionati per una ceduzione ravvicinata. Questi ultimi sono i cloni selezionati dall'azienda Alasia Franco Vivai: AF1, AF10 e AF12 (in sperimentazione non ufficiale); AF6®, AF7 AF8 (per i quali è stata recentemente richiesta la sperimentazione ufficiale); AF2®, Monviso®, Sirio® e Marte® già registrati in via provvisoria nel Registro nazionale dei cloni forestali; 83.148.041® (Istituto Sperimentale per la Pioppicoltura).

Sezione	Specie ed incroci nella sezione	Clone
Aigeiros	<i>P. x euramericana</i>	I214
	<i>P. x euramericana</i>	Boccalari
	<i>P. x euramericana</i>	Sirio
	<i>P. x euramericana</i>	Neva
	<i>P. x euramericana</i>	AF2
	<i>P. x euramericana</i>	83.148.041
	<i>P. deltoides</i>	Lux
	<i>(P. x euramericana) x P. nigra</i>	Po
Tacamahaca x Aigeiros	<i>P. x interamericana</i>	AF1
	<i>P. x interamericana</i>	AF12
	<i>(P. x interamericana) x P. x nigra</i>	AF6
	<i>(P. x interamericana) x (P. x euramericana)</i>	AF7
	<i>(P. x interamericana) x P. trichocarpa</i>	AF8
	<i>(P. x interamericana) x P. nigra</i>	AF9
	<i>P. maximowiczii x P. nigra</i>	AF10
	<i>(P. x interamericana) x P. nigra</i>	Monviso
Populus	<i>P. alba</i>	Villafranca
	<i>P. alba</i>	Marte

Tabella 4.1.3: Elenco dei cloni di pioppo della sperimentazione

I cloni tradizionali utilizzati nella sperimentazione come testimoni sono: I-214, Lux , Boccalari e Villafranca, iscritti al Registro nazionale dei cloni forestali

Gli impianti presentano diverse densità e turni di ceduzione in modo da confrontarne i modelli colturali. Quelli a turno annuale (Bigarello e Zinasco) sono stati realizzati a file binate con distanze di $2,80 \times 0,75 \times 0,40$ m e investimento di circa 14.000 piante/ha (foto 4.1).

Ogni piantagione è costituita da un disegno sperimentale a blocchi randomizzati con quattro repliche per ogni genotipo in separate parcelle. Per le piantagioni con modello colturale a turno annuale la parcella è costituita da 5 file binate con 14 piante per fila. Le

misurazioni sono state effettuate nella bina centrale sulle 10 ceppaie centrali (vedi Figura 4.2)



Foto 4.1: Impianto annuale a file binate

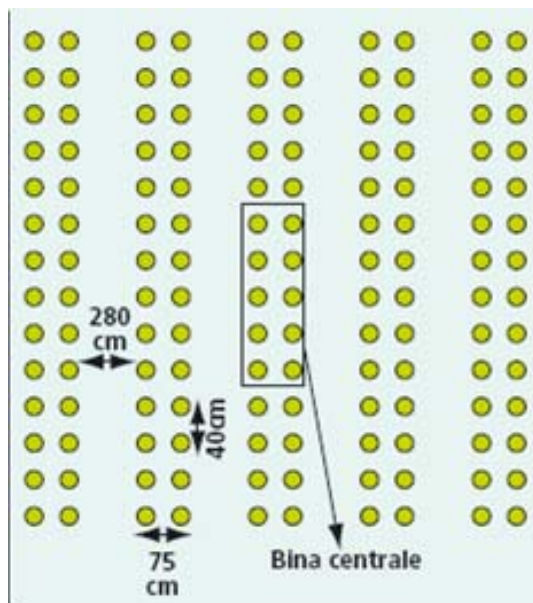


Fig 4.2: Schema degli impianti a turno annuale

4.1.2 Rilievi sperimentali

4.1.2(a) *Stima della biomassa epigea*

Per ogni parcella, alla fine di ogni stagione vegetativa, è stato valutato il numero di ceppaie vive, il numero di polloni per ceppaia e la percentuale di sopravvivenza delle ceppaie.

Tutte le misure, sia distruttive che non, sono state fatte su un campione rappresentativo della piantagione, esattamente sulla bina centrale di ogni parcella, per escludere influenze degli altri cloni o dell'effetto margine (vedi fig.4.2)

Le tecniche distruttive per la stima della biomassa sono generalmente dispendiose in termini di tempo pertanto la stima della biomassa è stata ottenuta con metodi semi distruttivi. Il peso della biomassa può infatti essere ottenuto da misure facili e non distruttive da prendere come il diametro (Verwijst, 1999). Essendo la *srf* costituita per lo più da polloni, questi sono stati scelti come unità di campionamento. Il primo anno sono state rilevate misure non distruttive di diametro di tutti i fusti vivi a 20 cm dal suolo ed a 100 cm dal suolo con la precisione di 1 mm. La relazione allometrica tra il peso secco del pollone (P_s) ed il diametro (D_{100}) è descritta dalla seguente equazione:

(Equazione 4.1) $Ps = b D^c$

Dove b e c sono parametri legati al clone, all'età ed al sito (Telenius, 1995).

Per la stima dei parametri b e c sono stati tagliati ogni anno almeno 12 polloni per clone, stratificati secondo i diametri. I polloni sono stati pesati allo stato fresco (Peso fresco Pf) in campo, dividendo il fusto dai rami e ne è stato preso un campione rappresentativo per la determinazione dell'umidità. L'umidità è stata ottenuta pesando campioni di fusto e rami in campo allo stato fresco e successivamente in laboratorio allo stato secco, previa disidratazione in stufa a 103°C fino a peso costante.

Nelle tabelle 4.1.4 sono riportate le stime dei valori di b , c ed r^2 , utilizzati nella equazione allometrica, per la stima della biomassa legnosa epigea negli impianti annuali.

Zinasco	1° anno			2° anno			3° anno		
	b	c	r^2	b	c	r^2	b	c	r^2
AF1				0,121	2,552	0,992	0,221	2,393	0,987
AF2	0,380	2,244	0,974	0,405	2,156	0,991	0,217	2,339	0,993
AF6	0,268	2,384	0,979	0,113	2,564	0,988	0,290	2,275	0,994
83.148.041	0,362	2,303	0,977	0,388	2,254	0,994	0,299	2,337	0,986
Monviso	1,142	1,884	0,845	0,361	2,250	0,987	0,304	2,298	0,997
Sirio				1,106	1,862	0,951	0,121	2,502	0,996
I-214	0,240	2,406	0,986	0,986	1,882	0,974	0,334	2,227	0,983
Lux	1,893	1,792	0,905	0,335	2,260	0,977	0,139	2,544	0,989

Bigarello	1° anno			2° anno			4° anno		
	b	c	r^2	b	c	r^2	b	c	r^2
AF2	0,215	2,386	0,885	0,039	0,206	0,979	0,265	2,351	0,996
AF6	0,773	2,048	0,911	0,124	0,246	0,949	0,284	2,355	0,998
AF8	0,497	2,075	0,941	0,412	2,209	0,983	0,431	2,240	0,994
I-214	0,478	2,110	0,943	0,497	2,122	0,892	0,277	2,326	0,996
Lux	0,091	2,695	0,983	0,147	2,476	0,965	0,916	2,009	0,982
Monviso	0,215	2,386	0,885	0,305	2,329	0,839	0,018	3,173	0,965

Tabella 4.1.4 : Relazione allometrica per gli impianti a turno annuale, tra il diametro del fusto espresso in mm a 100 cm dalla base (D) ed il relativo peso secco della biomassa legnosa epigea espressa in g (Ps): stima dei parametri b , c and r^2 per la funzione $PS = b D^c$

Per il quarto anno a Zinasco è stata utilizzata l'equazione del terzo anno, in quanto dalla comparazione delle curve del secondo e terzo anno, con una curva cumulata con i valori di entrambi gli anni, è emerso che non vi sono significative differenze tra il secondo ed il terzo anno ($p=0,128$). Questo dimostra che nello stesso sito e con lo stesso trattamento l'equazione della stima della biomassa non cambia molto da un ciclo all'altro per lo stesso genotipo.

I rilievi effettuati a livello di area campione sono stati poi estrapolati al popolamento, tenendo conto della reale densità dello stesso.

4.12(b) *Analisi Statistica*

Tutti i dati rilevati sono stati sottoposti ad analisi della varianza (ANOVA) e le differenze tra le medie sono state confrontate con il test di *Tukey* per $p \leq 0,05$. Per l'analisi è stata valutata la significatività di tutti i caratteri valutati per i diversi cloni nello stesso sito. E' stata inoltre effettuata una analisi per il confronto dei diversi siti e per i ciclo di rotazione. Per questa analisi è stato usato il software *GraphPad Prism*, 1999 (San Diego, CA).

4.2 Risultati

Essendo le condizioni stazionali dei due impianti notevolmente diverse, la produttività dei cloni sperimentati ha presentato, secondo l'ANOVA differenze altamente significative di produttività tra i siti di Bigarello e di Zinasco; pertanto i risultati ottenuti sono stati analizzati separatamente per ogni piantagione.

4.2.1 *Piantagione di Bigarello (MN).*

La facilità di radicazione per talea legnosa è un carattere che deve essere attentamente valutato soprattutto per le piantagioni a breve rotazione che richiedono un elevato investimento ad ettaro. Gli attecchimenti dei cloni nei diversi impianti sono indicati nelle tabelle. Nell' impianto esaminato gli attecchimenti dei cloni impiegati sono stati generalmente ben superiori al 90%, ad eccezione dei cloni Lux (*P. deltoides*), che ha notoriamente problemi di attecchimento, Po , Marte (*P. alba*) e Villafranca (*P. alba*) e Bocculari, che hanno evidenziato attecchimenti medi rispettivamente del 67%, 47,5%, 80% e 90%. Come mostra la tabella 4.2.1, nei caratteri rilevati sono evidenti differenze altamente significative per l'attecchimento dei genotipi, nel numero di polloni emessi dalla talea; le differenze rilevate per il diametro medio a 100 cm dal colletto riguardano unicamente il clone Lux rispetto agli altri. Il numero di polloni ad ettaro è quindi il risultato della combinazione dell'attecchimento delle talee con il numero di polloni emessi dalla stessa. I pioppi bianchi emettono più polloni rispetto agli altri cloni, ma comunque hanno un attecchimento scarso. Non sono emerse differenze significative nel valore dell'altezza media e della percentuale di rami rispetto alla biomassa legnosa epigea totale. In questo sito con problemi edafici (vedi tabella 4.1.1) la produttività media è stata scarsa al primo anno ($2 \text{ t ss ha}^{-1}\text{anno}^{-1}$), come mostrato nella figura 4.2.1.

Bigarello: annuale 1° anno (R1/F1)												
Clone	Att. %	Tukey Test	Poll. X cepp.	Tukey Test	Poll. X ha	Tukey Test	D ₁₀₀ (cm)	Tukey Test	H (cm)	Tukey Test	Rami %	Tukey Test
AF2	97,5 (1,3)	ab	1,31 (0,08)	b	18214 (899)	ab	1,475 (0,09)	b	251 (17)		7,8 (1,3)	
AF6	100 (-)	a	1,60 (0,14)	b	22857 (1934)	a	1,183 (0,08)	b	220 (13)		17,2 (2,2)	
AF8	97,5 (1,3)	ab	1,25 (0,09)	b	17500 (1473)	ab	1,312 (0,09)	b	235 (20)		12,9 (3,4)	
Boccalari	90 (5)	ab	1,42 (0,09)	b	18214 (1220)	ab	1,322 (0,14)	b	236 (28)		17,4 (3,5)	
I-214	97,5 (1,3)	ab	1,34 (0,10)	b	18571 (1010)	ab	1,250 (0,06)	b	243 (25)		12,9 (2,4)	
Lux	57,5 (22,5)	cd	2,11 (0,46)	ab	14286 (2654)	b	2,138 (0,18)	a	286 (27)		21,4 (3,4)	
Marte	47,5 (26,3)	d	2,99 (0,56)	a	18929 (1220)	ab	1,294 (0,07)	b	- -		- -	
Monviso	95 (2,5)	ab	1,76 (0,06)	ab	23929 (1584)	a	1,181 (0,03)	b	229 (12)		19,0 (6,7)	
Po	67,5 (16,3)	bc	1,61 (0,13)	b	15357 (1071)	b	1,325 (0,13)	b	223 (20)		16,3 (1,6)	
Villafranca	80 (10)	bc	1,88 (0,21)	ab	21905 (2974)	ab	1,275 (0,15)	b	- -		- -	
Media	74,2 (13,1)	***	1,95 (0,25)	**	18829 (1310)	**	1,41 (0,10)	***	245 (21)	ns	17,4 (3,6)	ns

Tabella 4.2.1: Misure del primo anno nella piantagione di Bigarello (MN).

Dove Att. %: Attecchimento delle talee %; poll x cepp: numero di polloni per ceppaia; poll x ha¹: numero di polloni ad ettaro; D₁₀₀ (cm): diametro misurato a 100 cm; H: altezza media; % rami: percentuale di rami sulla biomassa epigea. T Test: indica il confronto tra le medie con il post test di Tukey. Non significativo (n.s.) $p > 0,05$; (*) $0,01 \leq p \leq 0,05$; (**) $0,001 \leq p \leq 0,01$; (***) $p \leq 0,001$.

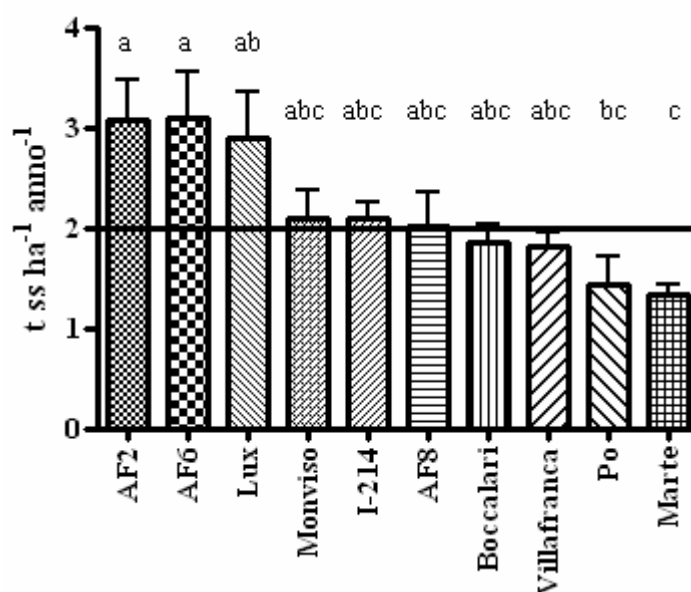


Fig. 4.2.1: Bigarello 2003 (R1/F1). Produttività al primo anno di tutti i cloni impiegati nella piantagione a turno annuale di Bigarello (MN). (*) I genotipi con la stessa lettera non hanno produzioni significativamente differenti per $p \leq 0,05$.

Sono presenti differenze significative tra i genotipi dovute in primo luogo al diverso attecchimento delle talee e quindi alle potenzialità produttive.

I cloni migliori sono stati AF2, AF6, mentre i peggiori sono stati Marte, Po, Villafranca e Boccalari, con produzioni variabili tra 1,5 e 1,9 t di sostanza secca ha⁻¹ anno⁻¹.

I cloni con produttività inferiore alla media e con problemi di attecchimento (Marte, Po, Villafranca e Boccalari) sono stati così esclusi dalla valutazione nel proseguo della sperimentazione. Il clone Lux, pur avendo problemi di attecchimento, è stato incluso come clone testimone.

Nel secondo anno di sperimentazione, dopo la prima ceduzione, il soprassuolo ha preso le caratteristiche del ceduo e non si è riscontrata mortalità delle ceppaie che hanno così emesso un numero di polloni medio di 3,2 per ceppaia. Il clone che ha emesso il maggior numero di polloni è il Lux (3,7) e quelli con minor numero di polloni i cloni AF2, AF8 e I-214. Il popolamento, rispetto al primo anno, ha subito un cambiamento notevole della struttura, in quanto il numero di polloni medio ad ettaro è passato da 18.000 a 40.000 circa, il diametro medio è diminuito da 1,41 cm a 1,32 cm e la biomassa dei rami è diminuita dal 17,4% al 7,7 %. L'analisi della varianza e l'analisi a posteriori effettuata con il Tukey's Multiple Comparison Test, nell'impianto di Bigarello, non ha mostrato significative differenze di produttività tra i genotipi confrontati in entrambi i cicli di sperimentazione.

Bigarello: annuale 2° anno (R2/F1)												
Clone	Sopr. %	Tukey Test	Poll. X cepp.	Tukey Test	Poll. X ha	Tukey Test	D ₁₀₀ (cm)	Tukey Test	H (cm)	Tukey Test	Rami %	Tukey Test
AF2	97,5	a	3,1		41901		1,34	b	232	b	4,7	
	(2,5)		(0,18)	(1562)	(0,05)	(6)	(1,2)					
AF6	100	a	3,3		46479		1,17	b	209	b	10,1	
	(-)		(0,14)	(1992)	(0,07)	(8)	(2,3)					
AF8	97,5	a	3,1		42254		1,21	b	241	ab	7,0	
	(2,5)		(0,19)	(3498)	(0,12)	(13)	(1,6)					
I-214	95,0	a	3,1		40493		1,16	b	246	ab	5,2	
	(5,0)		(0,31)	(2327)	(0,05)	(5)	(1,6)					
ux	57,5	b	3,7		29225		1,81	a	276	a	8,2	
	(15)		(0,24)	(7304)	(0,08)	(9)	(3,0)					
Monviso	95,0	a	3,2		43310		1,22	b	221	b	10,9	
	(5,0)		(0,18)	(3916)	(0,06)	(8)	(2,2)					
Media	90,4 (5,0)	**	3,2 (0,21)	ns	40610 (3433)	ns	1,32 (0,07)	***	238 (8)	***	7,7 (2,0)	ns

Tabella 4.2.2: Misure al secondo anno nella piantagione a turno annuale di Bigarello (MN).

Legenda: vedi tabella 4.2.1

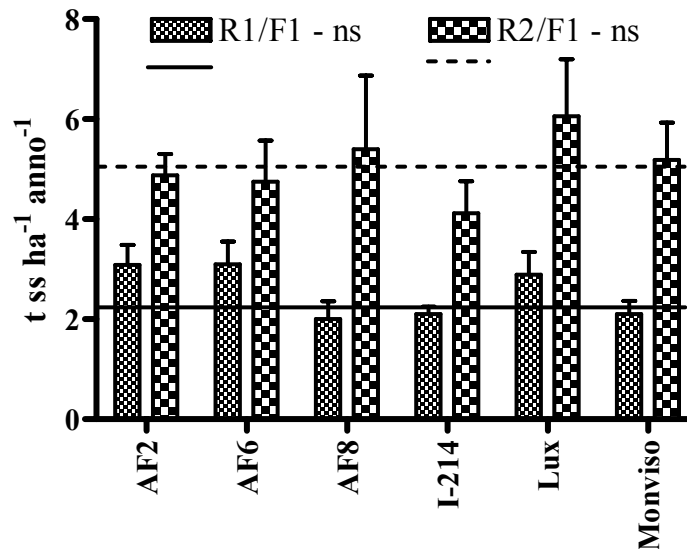


Fig 4.2.2 Produttività del primo (R1/F1) e secondo (R2/F1) anno dei cloni studiati nella piantagione a turno annuale di Bigarello (MN). Non significativo (n.s.) $p > 0,05$

La scarsa fertilità del suolo non ha esaltato le differenze genetiche, livellando la produzione a valori medi annui di 2,3 t/ha di sostanza secca nel primo anno e 5,1 t/ha di sostanza secca nel secondo anno.

L'incremento di produzione tra il primo ed il secondo anno è superiore al 200% ed appare statisticamente significativo, mentre non vi è una interazione significativa tra i cloni ed i ciclo di rotazione (vedi tabella 4.2.3).

Fonte di Variazione	Valore di P
Interazione (Ciclo x Clone)	0,7015
Ciclo	$P < 0.0001$
Clone	0,5582

Tabella 4.2.3: Analisi della varianza della produttività dei cloni nei due cicli annuali - Bigarello (MN).

In questa piantagione, a causa dell'evidente stato di sofferenza del soprassuolo, dell'impraticabilità del terreno e della scarsa dimensione dei polloni, non è stato possibile effettuare i rilievi nel terzo anno di sperimentazione; è seguita quindi la decisione di allungare il turno di un anno. Per questo motivo i risultati del secondo biennio di sperimentazione andrebbero descritti tra gli impianti a turno biennale, pur avendo questo una densità molto più elevata, ma per semplicità sarà mostrato in questo paragrafo. Nonostante l'allungamento del turno, i risultati produttivi sono stati comunque bassi.

Infatti nella figura 4.2.3 viene mostrata la produzione di un biennio in questo popolamento con 4 anni di radice e 2 di fusto (R4/F2). La produzione media di questo biennio è stata pari a quella del secondo anno (5,3 t), ciò significa che la produzione si è dimezzata dal 2° al 4° anno. Tale decremento è avvenuto per tutti i genotipi.

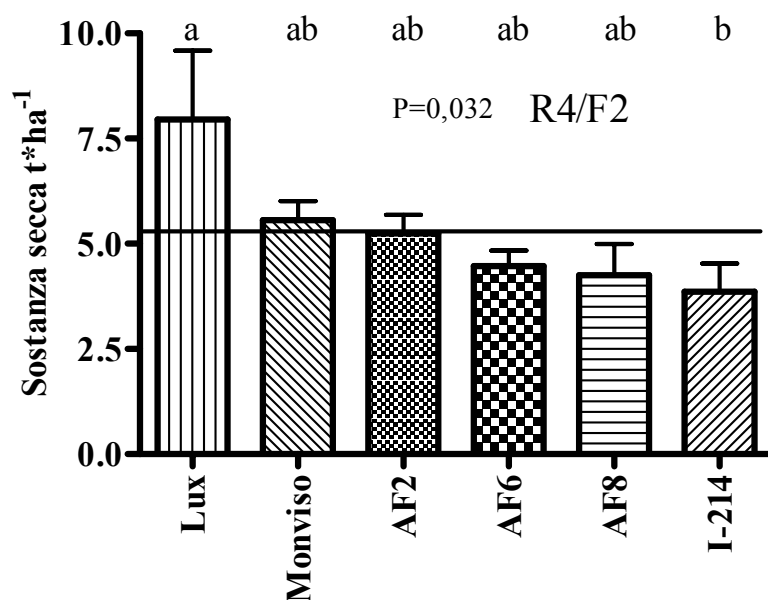


Fig 4.2.3 Produttività di un biennio (3 e 4°anno) nella piantagione ad alta densità di Bigarello (MN).



Foto 4.2: Condizioni di ristagno idrico al terzo anno dall'impianto nella piantagione a turno annuale di Bigarello (MN)

Bigarello: annuale 4° anno (R4/F2)												
Clone	Sopr. %	Tukey Test	Poll. X cepp.	Tukey Test	Poll. X ha	Tukey Test	D ₁₀₀ (cm)	Tukey Test	H (cm)	Tukey Test	Rami %	Tukey Test
AF2	97,5	a	3,4	b	46127		1,7	ab	321	ab	6,6	
	(2,5)		(0,1)		(1664)		(0,06)		(9)		(1,4)	
AF6	100	a	4,3	ab	59859		1,4	b	249	c	11,4	
	(-)		(0,2)		(3474)		(0,07)		(7)		(1,6)	
AF8	97,5	a	4,3	ab	59859		1,3	b	259	c	17,1	
	(2,5)		(0,6)		(8880)		(0,04)		(5)		(6,9)	
I-214	95,0	a	3,4	b	46479		1,5	b	289	bc	10,5	
	(2,5)		(0,2)		(3771)		(0,14)		(15)		(1,9)	
Lux	57,5	b	6,4	a	43662		2,1	a	361	a	9,2	
	(16,5)		(1,2)		(10318)		(0,22)		(23)		(2,0)	
Monviso	95	a	4,7	ab	64085		1,3	b	278	bc	12,0	
	(2,5)		(0,1)		(2603)		(0,04)		(4)		(1,8)	
Media	90,4 (4,4)	**	4,4 (0,4)	*	53345 (5118)	ns	1,5 (0,10)	**	293 (11)	***	11,1 (2,6)	ns

Tabella 4.2.4: Misure al quarto anno su polloni di due anni (ritardo del taglio) - Bigarello (MN).
Legenda: vedi tabella 4.2.1

In queste condizioni di elevata densità (53.345 polloni ad ettaro), il clone che ha reso di più è stato il Lux. Questo clone, avendo un 43 % di ceppaie ha⁻¹ in meno, ha potuto emettere un maggior numero di polloni per ceppaia e soprattutto avere un diametro medio degli stessi di 2,1 cm, rispetto alla media generale di 1,5 cm.

4.2.2 Piantagione di Zinasco (PV)

Nella piantagione di Zinasco, con caratteristiche del suolo idonee alla coltivazione del pioppo, gli attecchimenti sono stati superiori al 90% ad eccezione del clone Lux che ha avuto un attecchimento del 37,5% (tab. 4.2.5).

Zinasco: annuale 1° anno (R1/F1)										
Clone	Att. %	Tukey Test	Poll. X cepp.	Tukey Test	Poll. X ha	Tukey Test	D₁₀₀ (cm)	Tukey Test	Rami %	Tukey Test
AF2	97,5 (2,5)	a	1,20 (0,09)		16549 (1452)	a	2,6 (0,18)	a	13,3 (3,3)	-
AF6	100 (-)	a	1,53 (0,09)		21479 (1203)	a	1,7 (0,06)	b	14,3 (1,7)	-
Lux	37,5 (9,6)	b	1,25 (0,25)		5282 (1056)	b	2,4 (0,23)	ab	32,1 (3,6)	-
I-214	100 (-)	a	1,52 (0,11)		21479 (1562)	a	1,7 (0,17)	b	14,7 (2,4)	-
Monviso	95 (2,9)	a	1,30 (0,12)		17254 (1056)	a	1,9 (0,14)	ab	- -	-
83.148.041	97,5 (2,5)	a	1,23 (0,11)		16901 (1725)	a	2,0 (0,06)	ab	15,9 (2,4)	-
Media	82,5 (3,7)	***	1,3 (0,15)	ns	15229 (1350)	***	2,0 (0,02)	**	20,9 (2,8)	-

Tabella 4.2.5: Misure al primo anno - Zinasco (PV). Legenda: vedi tabella 4.2.1

Zinasco: annuale 2° anno (R2/F1)												
Clone	Sopr. %	Tukey test	Poll. X cepp.	Tukey test	Poll. X ha	Tukey Test	D₁₀₀ (cm)	Tukey Test	H (cm)	Tukey test	Rami %	Tukey test
AF2	97,5 (-)	a	3,1 (0,19)	ab	44014 (2720)	ab	2,1 (0,10)	abc	419 (40)	abc	2,0 (0,7)	b
AF6	100 (-)	a	2,8 (0,18)	ab	39085 (2531)	ab	1,9 (0,05)	cd	372 (36)	bc	4,5 (1,1)	ab
AF1	85 (5)	a	2,7 (0,18)	ab	32394 (3450)	bc	2,1 (0,13)	abc	424 (50)	a	1,8 (0,7)	b
Lux	37,5 (6,5)	b	3,5 (0,35)	a	22535 (4341)	c	2,5 (0,14)	a	361 (47)	ab	10,8 (2,3)	a
I-214	97,5 (2,5)	a	2,8 (0,14)	ab	38380 (2255)	ab	1,8 (0,05)	cd	360 (34)	c	4,3 (1,2)	b
Monviso	95 (2,9)	a	3,2 (0,19)	ab	42606 (2397)	ab	1,8 (0,10)	bcd	390 (38)	bc	6,6 (1,4)	ab
Sirio	90 (-)	a	2,5 (0,13)	b	31338 (1664)	bc	2,4 (0,12)	ab	402 (45)	ab	2,5 (0,9)	b
83.148.041	100 (-)	a	3,3 (0,12)	ab	46127 (1761)	a	1,9 (0,07)	bc	460 (39)	abc	1,9 (0,7)	b
Media	84,2 2,8	***	3,0 (0,19)	*	35563 (2645)	***	2,1 (0,10)	***	400 (42)	***	4,6 (1,2)	***

Tabella 4.2.6: Misure al secondo anno - Zinasco (PV). Legenda: vedi tab 4.2.1

Zinasco: annuale 3° anno (R3/F1)								
Clone	Sopr. %	Tukey test	Poll. X cepp.	Tukey Test	Poll. X ha	Tukey test	D₁₀₀ (cm)	Tukey test
AF2	97,5 (2,5)	a	3,4 (0,17)	b	46479 (1992)	ab	1,7 (0,07)	abcd
AF6	100 (-)	a	3,2 (0,50)	b	45070 (7112)	ab	1,4 (0,08)	d
AF1	85 (5,0)	a	2,8 (0,17)	b	33803 (2506)	bc	2,0 (0,07)	ab
Lux	37,5 (7,5)	b	5,1 (0,63)	a	26408 (4613)	c	2,0 (0,15)	a
I-214	97,5 (-)	a	2,9 (0,23)	b	41197 (3221)	ab	1,5 (0,12)	cd
Monviso	95 (2,9)	a	3,8 (0,19)	ab	51408 (3836)	ab	1,5 (0,03)	d
Sirio	92,5 (2,5)	a	3,6 (0,28)	ab	46831 (2658)	abc	1,9 (0,11)	abc
83.148.041	97,5 (2,5)	a	3,7 (0,22)	ab	51408 (3070)	a	1,6 (0,08)	bcd
Media	84,2 (3,4)	***	3,7 (0,29)	**	41843 (3317)	**	1,7 (0,09)	***

Tabella 4.2.7: Misure al terzo anno - Zinasco (PV).

Legenda: vedi tab 4.2.1

Zinasco: annuale 4° anno (R4/F1)								
Clone	Sopr. %	Tukey test	Poll. X cepp.	Tukey test	Poll. X ha	Tukey test	D₁₀₀ (cm)	Tukey test
AF2	97,5 (2,5)	a	3,7 (0,38)	b	51056 (6230)	ab	1,2 (0,04)	bc
AF6	95 (5,0)	a	2,8 (0,29)	b	36972 (3063)	b	0,9 (0,08)	d
AF1	80 (4,1)	a	2,9 (0,22)	b	32394 (2988)	b	1,7 (0,08)	a
Lux	37,5 (9,1)	b	6,3 (1,08)	a	31690 (3659)	b	1,5 (0,05)	ab
I-214	92,5 (2,5)	a	3,2 (0,34)	b	41901 (4824)	ab	0,9 (0,03)	d
Monviso	92,5 (2,5)	a	4,8 (0,54)	ab	62324 (7549)	a	1,0 (0,04)	cd
Sirio	85 (2,9)	a	3,4 (0,22)	b	40845 (3857)	ab	1,6 (0,04)	a
83.148.041	97,5 (2,5)	a	4,0 (0,32)	b	54577 (5282)	ab	1,2 (0,06)	c
Media	80,8 (3,9)	***	4,1 (0,45)	***	43955 (4693)	**	1,3 (0,05)	***

Tabella 4.2.8: Misure al quarto anno - Zinasco (PV).

Legenda: vedi tab 4.2.1

Come si vede dalle tabelle descrittive dei caratteri rilevati per ogni anno di sperimentazione (tab 4.2.5 – 8), la mortalità delle ceppaie in seguito alle successive ceduazioni è stata molto contenuta ed è appena apprezzabile dopo la terza ceduazione.

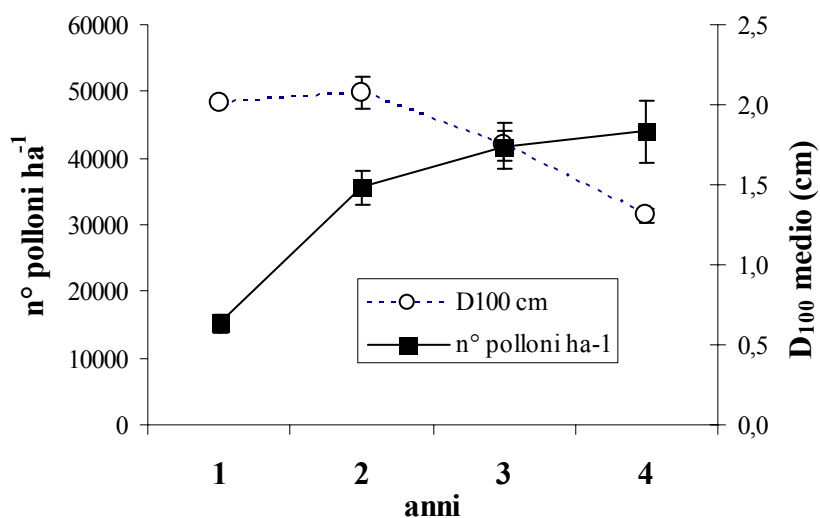


Fig 4.2.4 Andamento del numero dei polloni ad ettaro e del loro diametro medio nei 4 anni di sperimentazione - Zinasco (PV).

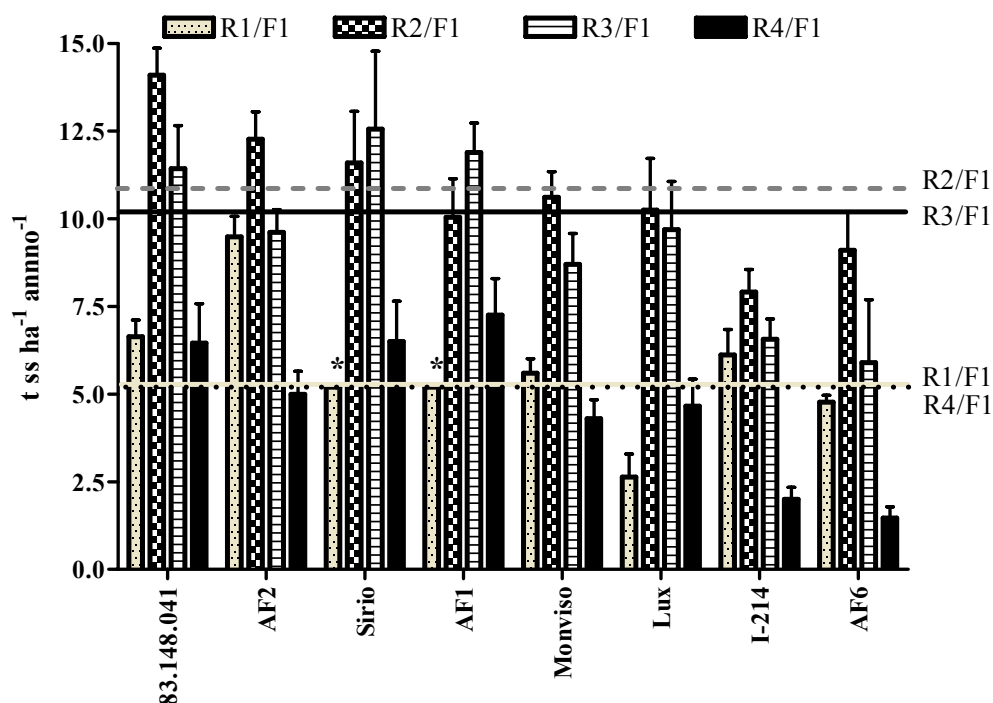


Fig 4.2.5 Produttività di quattro anni dei cloni impiegati nella piantagione a turno annuale di Zinasco (PV). Le linee orizzontali indicano le produzioni medie di ogni anno. (*) Indica valori calcolati con la media dell'anno degli altri cloni.

Cloni	1° anno ***	2° anno *	3° anno *	4° anno ***	1° / 2° anno	1° / 3° anno	1° / 4° anno	2° / 3° anno	2° / 4° anno	3° / 4° anno
AF1	b	ab	ab	a	**	***	ns	ns	ns	**
AF2	a	ab	ab	ab	ns	ns	*	ns	***	**
AF6	bc	b	b	b	*	ns	ns	ns	***	*
I-214	b	b	ab	b	ns	ns	*	ns	***	**
Lux	c	ab	ab	ab	***	***	ns	ns	***	**
Monviso	b	ab	ab	ab	**	ns	ns	ns	***	*
Sirio	b	ab	a	a	***	***	ns	ns	**	***
83.148.041	ab	a	ab	a	***	**	ns	ns	***	**

Tabella 4.2.9: Analisi della Varianza sulla produttività dei cloni e confronto degli stessi nei diversi cicli - Zinasco (PV). I cloni con la stessa lettera non hanno produzioni significativamente differenti per $p \leq 0,05$. Non significativo (n.s.) $p > 0,05$; (*) $0,01 \leq p \leq 0,05$; () $0,001 \leq p \leq 0,01$; (***) $p \leq 0,001$.**

I ripetuti tagli annuali hanno però determinato un forte incremento del numero dei polloni ad ettaro, che è passato dai 15.200 del primo anno fino ai 43.950 del quarto anno, con punte massime di 62.300 polloni ha^{-1} per il clone Monviso.

Questo progressivo incremento del numero di polloni ad ettaro ha comportato una significativa riduzione del diametro medio degli stessi; infatti mentre al secondo anno il popolamento aveva un diametro medio di 2,1 cm, al quarto anno si riduceva a 1,3 cm (vedi Figura 4.2.4).

Nell'impianto di Zinasco la produzione media di biomassa è stata circa doppia rispetto a quella di Bigarello sia nel primo ($5,8 \text{ t ha}^{-1}$) che nel secondo anno ($10,7 \text{ t ha}^{-1}$). A Zinasco i valori di produttività hanno mostrato differenze significative sia nel primo che nel secondo anno (vedi tabella 4.2.9), mentre dall'ANOVA sulle repliche le differenze sono risultate non significative, evidenziando una buona omogeneità delle condizioni sperimentali. Ma l'indicazione principale tratta da questa piantagione a turno annuale, in assenza di fertilizzazione, riguarda l'andamento della produzione dei quattro anni, ovvero produzione crescente nel primo biennio e decrescente nel secondo (vedi Figura 4.2.5).

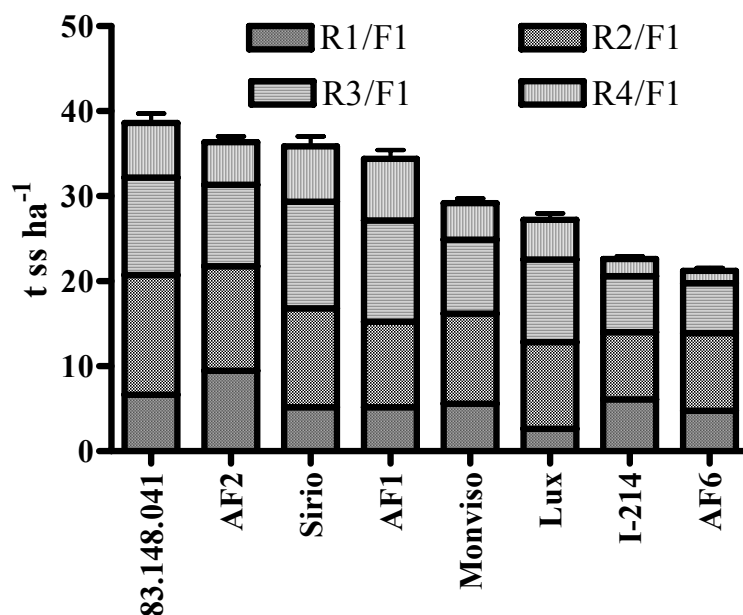


Fig 4.2.6 Produttività cumulata di quattro anni dei cloni impiegati nella piantagione a turno annuale di Zinasco (PV).

La tabella 4.2.10 mostra il confronto statistico tra le produzioni nei diversi anni; quello che emerge è che dopo un generale aumento della produzione dal primo al secondo anno, non si hanno differenze di produzione significative per nessun clone tra il secondo ed il terzo anno, cioè la produzione non cresce, mentre se confrontiamo il terzo anno con il quarto si vede una diminuzione significativa per tutti i cloni.

Fonte di Variazione	Valore P
Interazione (Ciclo x Clone)	0,0017
Ciclo	<0.0001
Clone	<0.0001

Tabella 4.2.10: Analisi della varianza della produttività dei cloni nei quattro cicli annuali - Zinasco (PV).

Quindi in assenza di fertilizzazione, con questo modello colturale si ha una netto decremento della produzione dopo il terzo anno ai livelli del primo anno. Se cumuliamo le produzioni di quattro cicli produttivi, il clone che ha prodotto maggiormente è l' 83.148.041 con circa 39 t ha⁻¹, seguito dai cloni AF2 e Sirio con 38 t ha⁻¹; quelli peggiori sono stati l'AF6, l'I-214 ed il Lux che hanno prodotto rispettivamente 23, 24 e 27 t ha⁻¹ (vedi Fig. 4.2.6).

4.3 Discussioni e Conclusioni

I risultati di questi primi quattro anni di sperimentazione sul confronto di cloni di pioppo per piantagioni a turno breve devono essere interpretati in relazione alle caratteristiche podologiche dei siti di sperimentazione, all'età dell'impianto, all'andamento climatico ed al modello colturale utilizzato.

4.3.1 Attecchimento delle talee

Per il successo della piantagione è indispensabile utilizzare materiale con elevata capacità di attecchimento delle talee legnose. Le talee usate avevano dimensioni ridotte (diametro di circa 1,5 cm e lunghezza intorno ai 20 cm). Il decorso climatico della primavera-estate dell'anno d'impianto (2003) è stato eccezionalmente secco e caldo, anche nelle stazioni di studio. Nonostante ciò l'attecchimento è stato ottimo nelle tre località studiate per la maggior parte dei cloni sperimentati, ad eccezione del clone Marte (*P. alba*), successivamente abbandonato nella sperimentazione e del clone Lux. Quest'ultimo è un clone di *P. deltoides*, che ha notoriamente problemi di radicazione delle talee caulinari (Dickman e Stuart, 1983).

I valori di attecchimento riscontrati sono in linea con altri esperimenti condotti in ambiente simile (Facciotto et al 2006), mentre in piantagioni sperimentali dell'Italia centrale, con condizioni climatiche limitanti (clima meso-mediterraneo), vengono riportati attecchimenti medi dei cloni intorno al 74% (Facciotto et al 2006) o molto inferiori a questo valore (Breccia 2006) in caso di competizione con le infestanti.

La mortalità delle ceppaie in seguito alla ceduazione è stata molto bassa in tutti i campi sperimentali a turno biennale (4% circa), valore molto vicino a quello riportato in analoghi esperimenti (5-10%) (Frison et al, 1990); mentre la mortalità diviene apprezzabile nell'impianto a turno annuale di Zinasco (PV) alla terza ceduazione.

L'attecchimento delle talee quindi, oltre che dalle condizioni di idratazione delle stesse al momento dell'impianto, è influenzato dall'andamento climatico della prima stagione vegetativa, soprattutto in assenza di irrigazione. In condizioni climatiche più siccitose, l'attecchimento delle talee dei cloni studiati è molto più difficoltoso e richiede in tempestivo uso dell'irrigazione oltre ad un meticoloso controllo delle infestanti.

4.3.2 Produzioni

La produzione della biomassa legnosa epigea è molto variabile in funzione dell'età dell'impianto, del suolo, del clima, del clone impiegato e della tecnica colturale. Gli incrementi annui di sostanza secca nel turno annuale oscillano da 1,4 t ha⁻¹anno⁻¹ a 14 t ha⁻¹anno⁻¹.

Nella piantagione di Zinasco, dove le ceduazioni sono state effettuate annualmente, la produzione è andata crescendo dal primo al secondo anno; dopo il secondo anno, in assenza di fertilizzazione azotata, la produzione dell'impianto annuale inizia a decrescere ed al quarto anno si attesta sui valori dell'anno d'impianto, in linea con precedenti studi analoghi (*Frison et al 1990, Piccioni e Bonari, 2006*). In caso di apporto di fertilizzante viene invece riportata una produzione superiore ed in progressivo aumento dal primo al quarto anno (*Frison et al 1990*), con densità di piantagione di 38.000 piante ha⁻¹.

A Zinasco, pur non avendo riscontrato un significativo decremento della sopravvivenza delle ceppaie in seguito alle ceduazioni, la produzione è declinata a causa della riduzione drastica del diametro medio dei sempre più numerosi polloni, come mostrato in Fig. 4.2.4.

Dai dati degli impianti annuali emerge che la sostenibilità di questo modello colturale in assenza di fertilizzazione è di breve tempo (3-5 anni), periodo dopo il quale si assiste ad una riduzione della produttività per la moria delle ceppaie e/o per la diminuzione della dimensione dei polloni. L'investimento ad ettaro di talee negli annuali è eccessivo con distanze sulla bina di 40 cm, infatti con le ceduazioni ripetute sembra che i cloni migliori al quarto anno siano quelli che emettono un minor numero di polloni per ceppaia (Sirio e AF1), mantenendo il diametro medio degli stessi sopra la media (Fig. 4.2.5 e Tab. 4.2.8)

Per quanto riguarda il confronto dei due modelli colturali e l'influenza sulla qualità della biomassa si rimanda alla discussione nel capitolo successivo.

CAPITOLO 5 - PIANTAGIONI A TURNO BIENNALE: ASPETTI PRODUTTIVI E DENSITA' DEL LEGNO

INTRODUZIONE

Oltre a quanto già introdotto nel capitolo 4, in questo capitolo riguardante la sperimentazione sulle piantagioni a turno biennale sono state valutate le caratteristiche della biomassa oltre alla produttività. Infatti, non si conosce molto sulla qualità della biomassa legnosa da utilizzare come combustibile in impianti di generazione elettrica.

La densità del legno è considerata uno dei più importanti parametri per la biomassa legnosa, in quanto ha un impatto diretto sul valore economico del prodotto legnoso. Studi *inter clone* ed *intra clone* sulla variabilità della densità del legno in specie di pioppo (Ivkovich 1996, Olson *et al* 1985) o su ibridi di pioppo (Yu *et al* 2001, Koubaa *et al* 1998, Hernandez *et al* 1998) hanno mostrato la presenza di variazioni genotipiche significative tra ibridi nelle caratteristiche fisiche e meccaniche. Queste ricerche indicano che gli incroci per il miglioramento genetico della densità del legno è possibile (Pliura *et al* 2006).

5.1 Materiali e Metodi

5.1.1 Descrizione dei siti, dei cloni impiegati e della gestione delle piantagioni

Per verificare le potenzialità produttive di nuovi cloni selezionati, è stata realizzata nell'area padanoveneta una rete di impianti sperimentali. I nuovi cloni analizzati sono stati messi a confronto con alcuni dei cloni già presenti sul mercato e iscritti al Registro nazionale dei cloni forestali. La Rete sperimentale è stata realizzata nell'ambito di una collaborazione tra soggetti privati (Alasia Franco Vivai) e pubblici (Istituto di biologia agroambientale e forestale del CNR; Dipartimento di scienze dell'ambiente forestale e delle sue risorse dell'Università della Tuscia; Ersaf Lombardia). Nella primavera del 2003 sono state realizzate in Nord Italia diverse piantagioni sperimentali di cloni di pioppo per la produzione di biomassa, con turni di ceduzione annuali o biennali. I cloni impiegati sono descritti nel precedente capitolo. Gli impianti sperimentali a turno biennale sono distribuiti in Veneto, Lombardia, Piemonte, tutti in zone pianeggianti; i siti sperimentali sono indicati in tabella 5.1.1

I terreni erano precedentemente usati come seminativi con mais in coltura principale a Bigarello, Vinovo e Mira. Non è stata effettuata alcuna fertilizzazione di fondo all'epoca d'impianto.

<i>Località</i>	N° piante ha ⁻¹	Ciclo culturale	Caratteristiche Terreno
Bigarello (Mn)	5.952	Biennale	Terreno argilloso, alcalino e mediamente calcareo. N tot.solubile:medio P ass.: medio - K scam.: medio
Vinovo (To)	5.952	Biennale	Terreno franco limoso, a reazione neutra, mediamente calcareo. N tot solubile:basso P ass.: alto - K scamb.: basso
Mira (Ve)	6.061	Biennale	Terreno sabbioso limoso, mediamente alcalino e calcareo - N tot.solubile: basso P ass.: alto - K scamb.: molto basso

Tabella 5.1.1: Piantagioni sperimentali a turno biennale in Nord Italia.

Le precipitazioni medie annue negli impianti variano dai 710 mm a Bigarello ai 1.083 mm di Vinovo. È importante evidenziare come nell'anno dell'impianto sia le precipitazioni annue che le precipitazioni estive sono state inferiori alla media degli anni precedenti, mentre le temperature sono state superiori alla media del periodo, entrambi i fattori hanno causato aridità estiva soprattutto a Bigarello. La preparazione del terreno per l'impianto è stata effettuata a fine inverno con aratura a 30 cm seguita da un buon affinamento del terreno con erpicatura. La piantagione è stata realizzata manualmente nel mese di marzo, utilizzando talee legnose della lunghezza di circa 20 cm. Immediatamente dopo l'impianto è stato praticato un diserbo chimico in pre-emergenza con pendimethalin (5 kg ha⁻¹). Successivamente nella prima stagione vegetativa il controllo delle infestanti è stato effettuato meccanicamente con zappettature sulle file (luglio e agosto) ed erpicature nell'interfila (giugno, luglio e agosto).

Località	Anno			
	2003	2004	2005	2006
Bigarello (Mn)	1D.2I.3E	2I	1I.2E	2I.2E
Vinovo (To)	1D.3I.3E	-	1I.2E	2I.2E
Mira (Ve)	1D.3E	-	C.2E.2T	C.2E

Tabella 5.1.2: Cure colturali alle piantagioni. Dove i numeri indicano il numero di interventi e le lettere C, D, E, I, T indicano rispettivamente: Concimazione, Diserbo, Erpicatura, Irrigazione (30-50 mm) e Trinciatura infestanti.

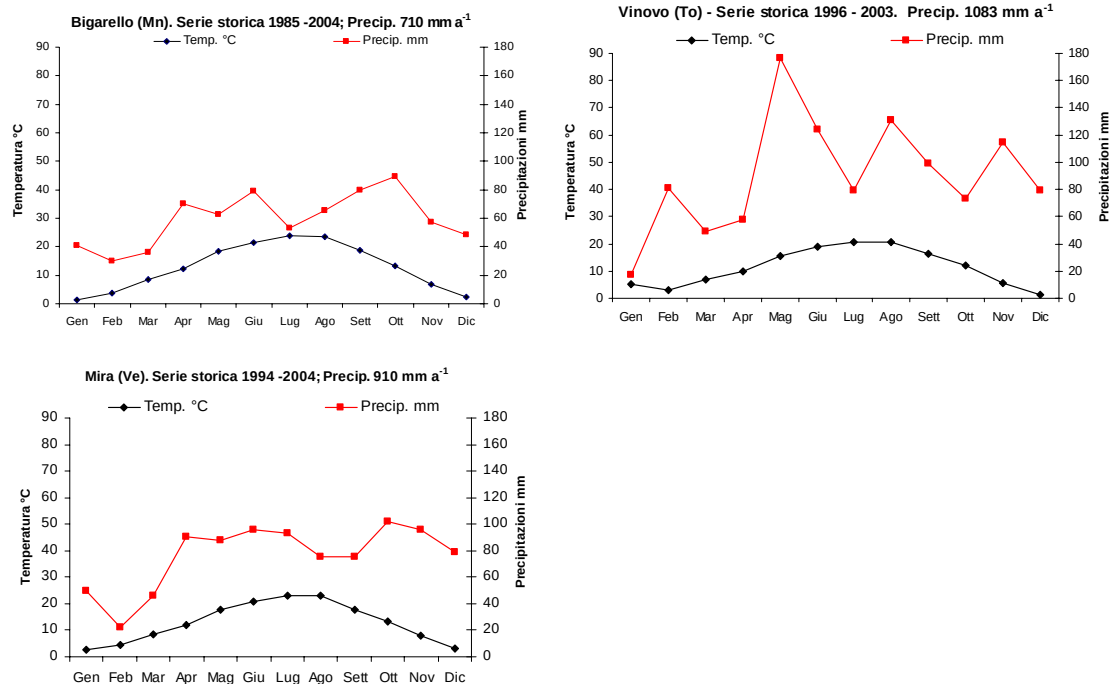


Figura n°5.1 :Andamento termopluviometrico nelle piantagioni a turno biennale

Gli impianti presentano fila singola con sesto rettangolare ($2,80 \times 0,60$ m) e densità pari a 5.900 piante/ha (foto 5.1). Ogni piantagione è costituita da un disegno sperimentale a blocchi randomizzati con quattro repliche per ogni genotipo in separate parcelle. Per le piantagioni con modello colturale a turno biennale ogni replicazione contiene 5 file di 14 piante per un totale di 70 piante. Per prevenire l'effetto bordo, le misure sono state rilevate solo sulle 10 piante centrali della fila di mezzo (vedi Figura 5.2).



Foto 5.1:Impianto biennale a file singole

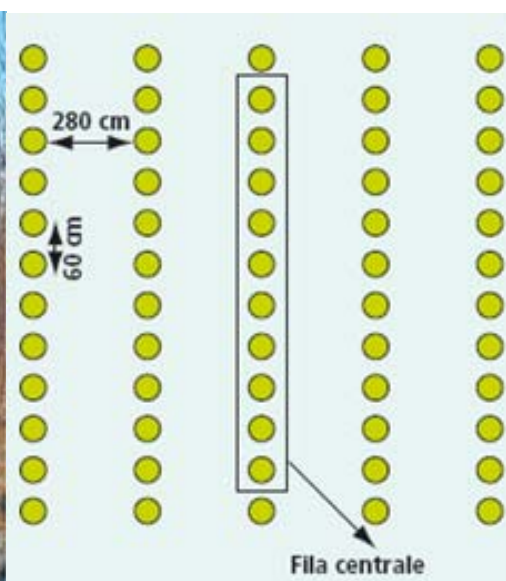


Fig 5.2:Schema degli impianti a turno biennale

5.1.2 Rilievi sperimentali

5.1.2(a) Stima della biomassa epigea

Per ogni parcella, alla fine di ogni stagione vegetativa, è stato valutato il numero di ceppaie vive, il numero di polloni per ceppaia e la percentuale di sopravvivenza delle ceppaie.

Tutte le misure, sia distruttive che non, sono state fatte su un campione rappresentativo della piantagione, esattamente sulla fila centrale di ogni parcella, per escludere influenze degli altri cloni o dell'effetto margine (vedi fig.5.2)

Le tecniche distruttive per la stima della biomassa sono generalmente dispendiose in termini di tempo pertanto la stima della biomassa è stata ottenuta con metodi semi distruttivi. Il peso della biomassa può infatti essere ottenuto da misure facili e non distruttive da prendere come il diametro (Verwijst, 1999). Essendo la *srf* costituita per lo più da polloni, questi sono stati scelti come unità di campionamento. Il primo anno sono state rilevate misure non distruttive di diametro di tutti i fusti vivi a 20 cm dal suolo ed a 100 cm dal suolo con la precisione di 1 mm. La relazione allometrica tra il peso secco del pollone (P_s) ed il diametro (D_{100}) è descritta dalla seguente equazione:

(Equazione 5.1)
$$P_s = b D^c$$

Dove b e c sono parametri legati al clone, all'età ed al sito (Telenius, 1995).



Figura 5.3: Pesatura di campioni di fusto (a sinistra) e rami (destra) allo stato fresco.

1° ciclo	Bigarello			Vinovo			Mira		
	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>r</i> ²	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>r</i> ²	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>r</i> ²
AF2	0,0614	2,318	0,985	0,0583	2,301	0,9788	0,0635	2,284	0,990
AF6	0,0775	2,198	0,929	0,0421	2,560	0,9928	0,0571	2,404	0,983
AF8	0,1638	1,715	0,636	0,0775	2,166	0,9701	0,1032	2,060	0,979
AF10	-	-	-	-	-	-	0,1351	1,950	0,972
83.148.041	0,1201	2,042	0,880	0,0471	2,603	0,9822	0,0918	2,319	0,988
I-214	0,0638	2,301	0,979	0,0771	2,107	0,9805	0,0368	2,565	0,988
Lux	0,0554	2,512	0,992	0,0767	2,108	0,9862	0,1486	1,950	0,908
Monviso	0,1284	1,952	0,886	0,0988	2,146	0,9881	0,0995	2,176	0,995
Sirio	0,0115	3,450	0,918						
2° ciclo									
AF2	0,0847	2,112	0,983	0,0370	2,596	0,986	0,0529	2,360	0,989
AF6	0,0529	2,486	0,999	0,0380	2,573	0,987	0,1022	2,065	0,995
AF8	0,0606	2,375	0,992	0,0968	2,019	0,980	0,0854	2,225	0,994
AF10							0,0441	2,614	0,998
83.148.041	0,0819	2,407	0,993	0,0450	2,664	0,998	0,0475	2,632	0,998
I-214	0,0833	2,055	0,984	0,0544	2,339	0,998	0,0491	2,436	0,998
Lux	0,0886	2,138	0,987	0,0509	2,367	0,960	0,1212	2,082	0,991
Monviso	0,0715	2,381	0,997	0,0608	2,316	0,991	0,1117	2,072	0,996
Sirio	0,0430	2,526	0,975						

Tabella 5.1.1: Relazione allometrica per gli impianti a turno biennale, tra il diametro del fusto espresso in cm a 100 cm dalla base (D) ed il relativo peso secco della biomassa legnosa epigea espressa in Kg (Ps): stima dei parametri *b*, *c* and *r*² per la funzione $PS = b D^c$

Per la stima dei parametri *b* e *c* sono stati tagliati ogni anno almeno 12 polloni per clone, stratificati secondo i diametri. I polloni sono stati pesati allo stato fresco (Peso fresco Pf) in campo, dividendo il fusto dai rami e ne è stato preso un campione rappresentativo per la determinazione dell'umidità. L'umidità è stata ottenuta pesando campioni di fusto e rami (vedi figura 5.3) in campo allo stato fresco e successivamente in laboratorio allo stato secco, previa disidratazione in stufa a 103°C fino a peso costante.

Nella tabella 5.1.1 sono riportate le stime dei valori di *b*, *c* ed *r*², utilizzati nella equazione allometrica, per la stima della biomassa legnosa epigea negli impianti biennali.

5.1.2(b) La densità basale

Negli impianti a turno biennale di Bigarello, Vinovo e Mira si è proceduto alla stima della densità basale dei fusti alla fine del primo ciclo biennale; per le piantagioni di Bigarello e Vinovo la stima della densità basale è stata ripetuta al momento del secondo raccolto sul popolamento ceduo.

La densità basale è data dal rapporto tra peso secco (Ps) e volume fresco (Vf) del legname ed stata calcolata secondo la formula:

$$(Equazione 5.2) \quad D_B = P_s / V_f \text{ [g cm}^{-3}\text{]}$$

Per la stima di questo importante indicatore della quantità effettiva di sostanza secca che un dato volume di legno contiene, sono state prelevate su tre piante di diametro medio per ogni genotipo tre sezioni di fusto della lunghezza di circa 15 cm.

I campioni di fusto sono stati prelevati a tre diverse altezze:

- o 20 cm dalla base
- o Metà altezza (H/2)
- o Dove il diametro del fusto misura 2 cm

Di queste sezioni di fusto è stato misurato:

- o il volume allo stato fresco (Vf), tramite il principio di Archimede (*Giordano, 1980*), essendo l'acqua di massa volumica uguale a 1 g cm^{-3} , la spinta espressa in grammi equivale al volume espresso in cm^3 delle rotelle.
- o Il peso anidro (Ps), mediante essiccazione in stufa a 103°C fino a peso costante.

Calcolando il volume delle sezioni ed il relativo peso secco con l'utilizzo della DB della rotella più vicina o la media delle due rotelle, si è ottenuto il volume cormometrico ed il peso secco del fusto, potendo così calcolare la DB dell'intero fusto.

5.1.2(c) *Analisi Statistica*

Tutti i dati rilevati sono stati sottoposti ad analisi della varianza (ANOVA) e le differenze tra le medie sono state confrontate con il test di *Tukey* per $p \leq 0,05$. Per l'analisi è stata valutata la significatività di tutti i caratteri valutati per i diversi cloni nello stesso sito. E' stata inoltre effettuata una analisi per il confronto dei diversi siti e per i ciclo di rotazione. Per questa analisi è stato usato il software *GraphPad Prism, 1999* (San Diego, CA).

5.2 **Risultati**

Va nuovamente ricordato che le tre piantagioni sperimentali a turno biennale rappresentano condizioni pedoclimatiche diverse. Si va dalla piantagione di Bigarello con scarsa fertilità e suolo non idoneo, all'impianto di Vinovo con condizioni di fertilità medio alta, sino alla piantagione di Mira, realizzata in condizioni pedoclimatiche ottimali e dove nel secondo biennio, l'asportazione di azoto è stata reintegrata con fertilizzazione.

Nelle tabelle che seguono sono mostrati i dati salienti delle piantagioni alla fine del primo e secondo biennio dall'impianto.

Il clone che ha mostrato caratteristiche alquanto diverse dagli altri cloni è senz'altro il Lux. A causa dello scarso attecchimento delle talee, tutti gli altri parametri di questo clone si discostano significativamente dalla media.

L'attecchimento delle talee per tutti gli altri cloni è stato più che soddisfacente in tutte le piantagioni, superando frequentemente la percentuale del 90%. Inoltre, in seguito alla prima ceduzione avvenuta nell'inverno 2004-05, la sopravvivenza delle ceppaie è risultata elevata e la mortalità appena apprezzabile in tutti gli impianti.

5.2.1 Piantagione di Bigarello

Nella piantagione a turno biennale di Bigarello, come precedentemente detto, i genotipi hanno attecchito molto bene, ad eccezione del clone Lux (37%) (tab. 4.2.1)

Nel primo biennio sono presenti differenze significative su tutti i parametri rilevati (vedi tab. 4.2.1).

Bigarello: Biennale 1° ciclo di rotazione R2/F2												
Clone	Att. %	Tukey test	Poll. X cepp.	Tukey test	Poll. X ha	Tukey Test	D₁₀₀ (cm)	Tukey test	H (cm)	Tukey test	Rami %	Tukey test
AF2	95,0 (2,9)	a	1,00 (-)	b	5655 (172)	ab	4,4 (0,25)	ab	536 (16)	a	22 (1,9)	b
AF6	100 (-)	a	1,28 (0,07)	a	7589 (446)	a	3,8 (0,16)	ab	476 (12)	ab	24 (2,4)	ab
AF8	87,5 (9,5)	a	1,00 (-)	b	5208 (563)	b	4,1 (0,10)	ab	506 (5)	a	23 (2,1)	ab
Sirio	90,0 (4,1)	a	1,06 (0,06)	b	5655 (384)	ab	4,2 (0,44)	ab	492 (27)	ab	27 (4,0)	ab
Monviso	95,0 (2,9)	a	1,16 (0,07)	ab	6548 (486)	ab	4,1 (0,10)	ab	505 (6)	a	30 (1,5)	a
83.148.041	100 (-)	a	1,03 (0,03)	b	6101 (149)	ab	3,8 (0,12)	ab	512 (9)	a	31 (1,8)	a
I-214	92,5 (4,8)	a	1,12 (0,05)	ab	6101 (149)	ab	3,4 (0,31)	B	425 (21)	b	31 (1,7)	a
Lux	37,5 (17,5)	b	1,00 (-)	b	2232 (1042)	c	5,0 (0,43)	A	552 (29)	a	33 (2,9)	a
Media	87,2 (5,2)	***	1,08 (0,03)	**	5636 (424)	***	4,1 (0,24)	*	501 (16)	**	28 (2,3)	***

Tabella 5.2.1: Misure del primo ciclo biennale nella piantagione di Bigarello (MN).

Dove Att. %: Attecchimento delle talee %; Sopr. %: Sopravvivenza dopo una ceduzione %; poll x cepp: numero di polloni per ceppaia; poll x ha¹: numero di polloni ad ettaro; D₁₀₀ (cm): diametro misurato a 100 cm; H: altezza media; % rami: percentuale di rami sulla biomassa epigea. I valori tra parentesi indicano l'errore standard.

Tukey Test: indica il confronto tra le medie con il post test di Tukey.

Non significativo (n.s.) $p > 0,05$; (*) $0,01 \leq p \leq 0,05$; (**) $0,001 \leq p \leq 0,01$; (***) $p \leq 0,001$.

Dopo la piantagione delle talee legnose, i cloni testati hanno emesso un numero di polloni significativamente diverso; i genotipi che emettono maggior numero di polloni per talea sono AF6 (1,28), Monviso (1,16) ed I-214 (1,12), mentre i cloni AF2, AF8 e Lux, sono quelli che emettono un minor numero di polloni per talea. A parità di attecchimento (escludendo il clone Lux), il numero di polloni per talea determina il numero di fusti ad ettaro, che è infatti significativamente differente per il clone AF6 (7589 polloni ha⁻¹). Il diametro dei cloni misurato a 100 cm dal suolo alla fine del biennio è stato mediamente di 4,1 cm con differenze significative tra i cloni con massimo di 5 cm (Lux) e minimo 3,4 cm (I-214). L'altezza media alla fine del secondo anni dall'impianto è mediamente di 500 cm, con punte di 552 per il clone Lux e minimi di 425 cm per il clone I-214.

Lo spazio a disposizione dei polloni è ancora sufficiente per lo sviluppo di numerosi rami che in questo caso raggiungono mediamente il 28% del totale della biomassa legnosa epigea. E' interessante notare che il clone AF2 è quello che forma una minor quantità di rami.

Bigarello: Biennale 2° ciclo di rotazione R4/F2												
Clone	Sopr. %	Tukey test	Poll. X cepp.	Tukey test	Poll. X ha	Tukey test	D₁₀₀ (cm)	Tukey test	H (cm)	Tukey test	Rami %	Tukey test
AF2	93 (2,5)	a	4,1 (0,11)	b	22470 (1013)	bc	2,4 (0,09)	abc	435 (10)	ab	11,3 (1,7)	
AF6	100 (-)	a	4,6 (0,38)	ab	27530 (2245)	ab	2,0 (0,01)	c	319 (2)	de	19,3 (1,5)	
AF8	83 (8,5)	a	5,0 (0,27)	ab	24702 (2901)	ab	2,0 (0,06)	c	363 (8)	bcd	12,5 (1,8)	
Sirio	88 (4,8)	a	3,8 (0,24)	b	19940 (1967)	bc	2,7 (0,27)	ab	464 (30)	a	13,6 (1,6)	
Monviso	95 (2,9)	a	5,3 (0,34)	ab	29911 (2053)	ab	2,1 (0,10)	bc	260 (12)	e	16,8 (1,7)	
83.148.041	100 (-)	a	6,1 (0,25)	a	36310 (1478)	a	2,0 (0,11)	c	422 (20)	abc	11,5 (1,2)	
I-214	90 (7,1)	a	4,6 (0,30)	ab	25000 (2823)	ab	1,8 (0,11)	c	340 (14)	cde	17,3 (2,5)	
Lux	38 (17,5)	b	5,1 (0,59)	ab	11161 (5024)	c	3,0 (0,29)	a	464 (35)	a	17,2 (2,8)	
Media	86 (5,4)	***	4,8 (0,31)	**	24628 (2438)	***	2,2 (0,13)	***	383 16	***	14,9 (1,8)	ns.

Tabella 5.2.2: Misure del secondo ciclo biennale nella piantagione di Bigarello (MN).

Legenda: vedi tabella 4.3.1

Dopo la prima ceduzione con turno biennale, la mortalità delle ceppaie è stata dell'ordine dell' 1% cioè appena apprezzabile (tab 5.2.1 e 5.2.2), confermando l'attitudine del pioppo

alla ceduazione. La struttura del soprassuolo cambia notevolmente dal primo (tab 5.2.1) al secondo ciclo (tab 5.3.2), a seguito della ceduazione: i polloni per ceppaia passano da poco più di 1 a 4,8; il numero dei polloni per ettaro passa da 5.600 a 24.600; il diametro medio dei polloni decresce di un 50% circa, passando da 4,1 cm, a 2,2 cm. La distribuzione dei polloni in base al diametro è di tipo normale nel primo ciclo, mentre nel secondo ciclo la frequenza maggiore si ha nei diametri inferiori, (figura 5.2.1); in appendice 1 è riportata la tabella relativa alla distribuzione diametrica per tutti i genotipi.

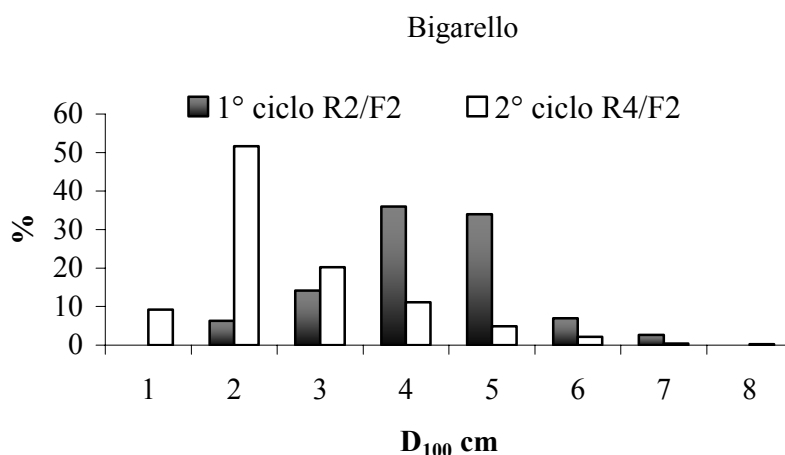


Fig.5.2.1: Distribuzione % dei diametri nel primo e secondo ciclo – Bigarello (MN)

Anche l'altezza media diminuisce notevolmente passando da 500 a 380 cm dal primo al secondo ciclo biennale. La componente della biomassa dei rami, a causa del minore spazio a disposizione dei polloni, si riduce del 50% tra il primo ed il secondo ciclo. Nella tabella 5.2.3 vengono invece confrontati i parametri rilevati tra i cloni nei due cicli di rotazione e l'eventuale interazione tra ciclo e clone.

Fonte di variazione	Att. %	Poll. x cepp.	Poll. x ha	D ₁₀₀ (cm)	H (cm)	Rami %	Produzione t ss ha ⁻¹
Interazione Ciclo x Clone	1,0000	0,0002	0,0002	0,7855	<0.0001	0,0232	0,5172
Ciclo	0,6819	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0,0042
Clone	<0.0001	0,0003	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0,0003	0,0073

Tabella 5.2.3: Analisi statistica (ANOVA Two Ways) valore di P - Bigarello (MN).

Dove Att. %: Attecchimento delle talee %; Sopr. %: Sopravvivenza dopo una ceduazione %; poll x cepp: numero di polloni per ceppaia; poll x ha¹: numero di polloni ad ettaro; D₁₀₀ (cm): diametro misurato a 100 cm; H: altezza media; % rami: percentuale di rami sulla biomassa epigea.

Anche negli impianti biennali, la produttività dei cloni sperimentati ha presentato, secondo l'analisi della varianza, differenze altamente significative di produttività tra le piantagioni.

In generale possiamo affermare che nei terreni inadatti a ospitare il pioppo come quelli di Bigarello le differenze genetiche rimangono inesprese e le produzioni sono chiaramente inferiori a quelle potenziali della specie.

Nella figura 5.2.2, sono riportate le produzioni dei genotipo testati, sia per il primo che per il secondo ciclo, mentre in appendice 1 è riportata la figura 1 che mostra la produttività di ogni anno di sperimentazione. Come si può vedere, la produttività media nel primo biennio è stata di circa 10 t di ss ha⁻¹ e non si sono riscontrate differenze significative tra i cloni sperimentati.

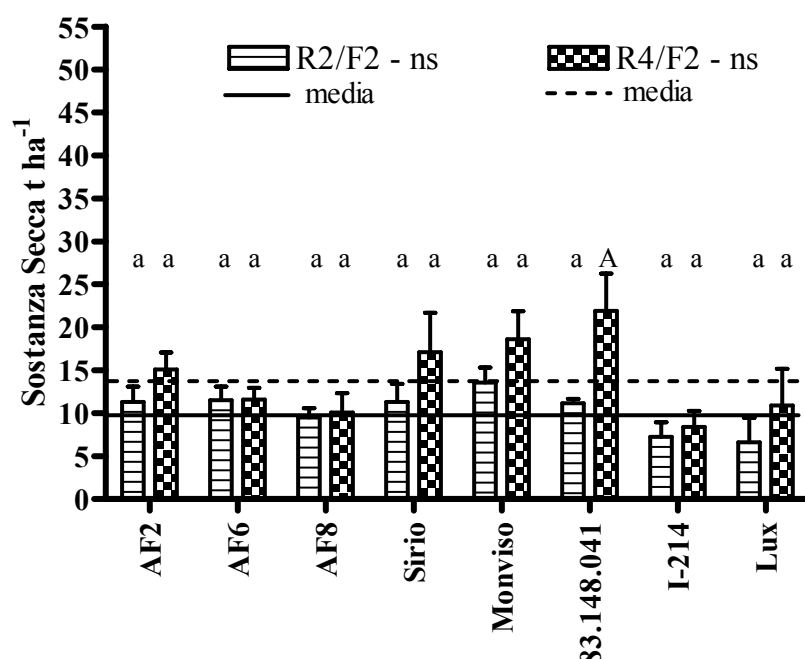


Fig 5.2.2: Produttività di due cicli nella piantagione a turno biennale di Bigarello (MN). I cloni con la stessa lettera non hanno produzioni significativamente differenti per $p \leq 0,05$. La lettera maiuscola indica una differenza tra il 1° e 2° ciclo. Non significativo (n.s.) $p > 0,05$; (*) $0,01 \leq p \leq 0,05$; () $0,001 \leq p \leq 0,01$; (***) $p \leq 0,001$.**

Pur in assenza di fertilizzazioni, nel secondo ciclo la produttività media è aumentata di un 40% circa, passando da 10 a 14,3 t ha⁻¹. Anche nel secondo ciclo di rotazione, nella piantagione di Bigarello non sono emerse significative differenze di produttività tra i cloni. Infatti, come mostrato in tabella 5.2.3 ed in figura 5.2.2, per la produzione l'unica differenza significativa è relativa all'incremento di produzione del clone 83.148.041 tra il primo ed il secondo ciclo. I cloni che hanno prodotto sopra la media sia nel primo che nel secondo biennio sono l'AF2, AF6, Sirio, Monviso ed 83.148.041. I cloni che invece hanno dato scarsi risultati sono il Lux e l'I-214.

5.2.2 Piantagione di Vinovo

La piantagione di Vinovo è quella con fertilità intermedia tra quelle a turno biennale, così anche i parametri rilevati assumono valori intermedi tra quella di Bigarello e quella di Mira. Il primo carattere valutato è l'attecchimento delle talee legnose; tutti i cloni hanno avuto attecchimenti elevati (circa 90%), con l'eccezione del Lux, valutato come clone testimone che è l'unico ad avere attecchimenti molto inferiori agli altri cloni (28%) (tab 5.2.4).

Dopo la messa a dimora delle talee legnose i cloni testati hanno emesso un numero di polloni significativamente diverso; i genotipi che emettono maggior numero di polloni per talea sono AF6 (1,5), Monviso (1,3) ed I-214 (1,4), mentre i cloni 83.148.041, AF2, AF8 e Lux quelli che emettono un minor numero di polloni per talea. A parità di attecchimento (escludendo il clone Lux), il numero di polloni per talea determina il numero di fusti ad ettaro, che è infatti significativamente differente per il clone AF6 (8.780 polloni ha⁻¹) (vedi tabella 5.2.4).

Vinovo: Biennale 1° ciclo di rotazione R2/F2												
Clone	Att. %	Tukey test	Poll. X cepp.	Tukey test	Poll. X ha	Tukey test	D ₁₀₀ (cm)	Tukey test	H (cm)	Tukey test	Rami %	Tukey test
AF2	100 (-)	a	1,2 (0,05)	bc	6845 (298)	abc	6,3 (0,34)	ab	846 (20)	a	15,5 (1,2)	c
AF6	98 (2,5)	a	1,5 (0,06)	a	8780 (563)	a	5,4 (0,30)	b	766 (26)	ab	16,9 (1,3)	c
AF8	98 (2,5)	a	1,2 (0,07)	bc	6696 (285)	bc	6,0 (0,27)	ab	804 (17)	abc	16,9 (1,7)	c
Monviso	88 (6)	a	1,3 (0,08)	ab	6845 (515)	abc	5,4 (0,22)	b	732 (13)	cd	24,1 (1,2)	ab
83.148.041	93 (5)	a	1,1 (0,03)	bc	5804 (285)	c	5,2 (0,21)	b	818 (16)	ab	19,6 (1,5)	bc
I-214	98 (2,5)	a	1,4 (0,12)	ab	7887 (508)	ab	5,5 (0,06)	b	742 (4)	bcd	17,5 (1,9)	bc
Lux	28 (8,5)	b	1,0 (-)	c	1637 (508)	d	7,3 (0,32)	a	722 (7)	d	31,3 (2,6)	a
Media	86 (3,9)	***	1,2 (0,06)	***	6356 (423)	***	5,9 (0,25)	***	776 (15)	***	20,2 (1,6)	***

Tabella 5.2.4: Misure del primo ciclo biennale nella piantagione di Vinovo (TO).

Legenda: vedi tabella 5.2.1

Il diametro dei cloni misurato a 100 cm dal suolo alla fine del primo biennio è stato mediamente di 5,9 cm, con differenze significative tra i cloni con massimo di 7,3 cm (Lux) e minimo 5,2 cm (83.148.041). L'altezza media alla fine del secondo anno dall'impianto è

mediamente di 776 cm, con punte di 846 per il clone AF2 e minimi di 732 cm per il clone Monviso. La percentuale di rami rispetto alla biomassa legnosa epigea è del 20,2%, ed è stata riscontrata una differenza altamente significativa tra i cloni; quello con maggiore percentuale di rami è chiaramente il clone Lux, a causa dello scarso attecchimento e quindi densità delle piante, seguito dal Monviso, mentre anche qui il clone AF2 è quello con percentuali inferiori (15,5%) (tab. 5.2.5).

Vinovo: Biennale 2° ciclo di rotazione R4/F2												
Clone	Sopr. %	Tukey test	Poll. X cepp.	Tukey test	Poll. X Ha	Tukey test	D ₁₀₀ (cm)	Tukey test	H (cm)	Tukey test	Rami %	Tukey test
AF2	93 (2,5)	A	3,9 (0,33)		21429 (1769)	a	3,5 (0,13)	ab	629 (12)	a	8,0 (1,7)	
AF6	95 (2,9)	A	4,2 (0,27)		23363 (855)	a	3,1 (0,03)	ab	588 (3)	ab	9,7 (1,6)	
AF8	98 (2,5)	A	4,3 (0,40)		24702 (1921)	a	3,1 (0,15)	ab	619 (17)	a	7,1 (1,5)	
Monviso	88 (6,3)	A	4,6 (0,36)		24107 (3088)	a	2,9 (0,18)	b	512 (18)	b	13,2 (2,0)	
83.148.041	93 (4,8)	A	3,9 (0,36)		20982 (783)	a	3,1 (0,16)	ab	591 (20)	ab	9,8 (1,8)	
I-214	95 (2,9)	A	4,2 (0,47)		23810 (2695)	a	2,9 (0,11)	b	560 (12)	ab	10,9 (1,8)	
Lux	10 (4,1)	B	5,3 (2,08)		2976 (1417)	b	4,1 (0,49)	a	550 (40)	ab	14,7 (3,6)	
Media	81 (3,7)	***	4,3 (0,61)	ns	20196 (1790)	***	3,2 (0,2)	*	578 (17)	**	10,5 (2,0)	ns

Tabella 5.2.5: Misure del secondo ciclo biennale nella piantagione di Vinovo (TO).

Legenda: vedi tabella 5.2.1

Dopo la prima ceduzione con turno biennale la mortalità delle ceppaie è stata bassa per tutti i cloni, ad eccezione del clone Lux che dal 28% di talee attecchite si è ridotto a solo il 10% di piante presenti dopo la ceduzione.

La struttura del soprassuolo cambia notevolmente dal primo al secondo ciclo, in quanto i polloni per ceppaia passano da 1,2 a 4,3. Non sono state rilevate differenze significative tra i cloni nel numero di polloni per ceppaia emessi dopo la prima ceduzione. In conseguenza dell'aumento del numero dei polloni per ceppaia, i fusti ad ettaro divengono nel secondo ciclo molto numerosi (mediamente 20.200 polloni ha⁻¹), senza differenze significative tra i cloni con buon attecchimento. Il diametro medio dei polloni decresce più del 50% circa, passando da 5,9 cm, a 3,2 cm.

La distribuzione dei polloni in base al diametro è di tipo normale nel primo ciclo, mentre nel secondo ciclo la frequenza maggiore si ha nei diametri inferiori e nella figura 5.2.3 viene mostrata la distribuzione relativa a tutti i cloni in questa piantagione per il primo e

secondo biennio; in appendice 1 è riportata la tabella relativa alla distribuzione diametrica per tutti i genotipi.

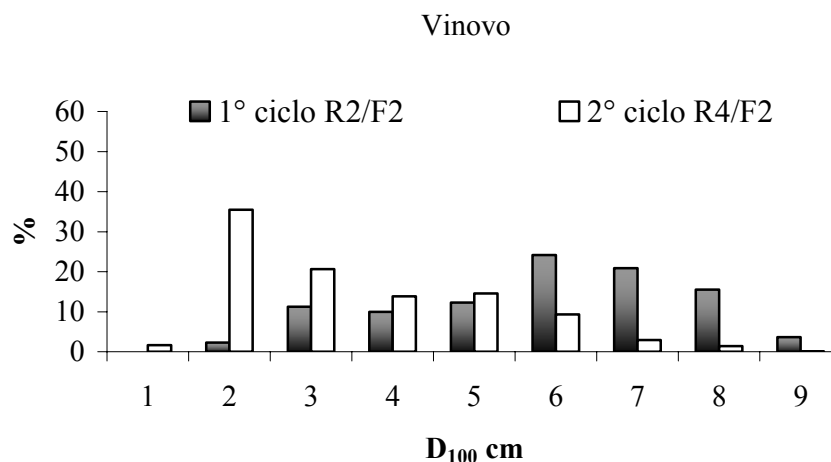


Fig.5.2.3: Distribuzione % dei diametri nel primo e secondo ciclo – Vinovo (TO)

Anche l'altezza media diminuisce notevolmente passando da 776 a 578 cm. La componente della biomassa dei rami, a causa del minore spazio a disposizione dei polloni, si riduce anche in questo impianto del 50% tra il primo ed il secondo ciclo, e non si rilevano più differenze significative tra i cloni.

Nella tabella 5.2.6. vengono invece confrontati i parametri rilevati tra i cloni, tra i due cicli di rotazione e l'eventuale interazione tra ciclo e clone.

Fonte di variazione	Att. %	Poll. x cepp.	Poll. x ha	D ₁₀₀ (cm)	H (cm)	Rami %	Produzione t ss ha ⁻¹
Interazione Ciclo x Clone	0,3811	0,7496	<0.0001	0,3759	0,5554	0,1309	0,3666
Ciclo	0,0711	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0,9332
Clone	<0.0001	0,9602	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Tabella 5.2.6: Analisi statistica (ANOVA Two Ways) valori di P - Vinovo (TO).

Dove Att. %: Attecchimento delle talee %; Sopr. %: Sopravvivenza dopo una ceduzione %; poll x cepp: numero di polloni per ceppaia; poll x ha¹: numero di polloni ad ettaro; D₁₀₀ (cm): diametro misurato a 100 cm; H: altezza media; % rami: percentuale di rami sulla biomassa epigea.

La produttività di questo impianto si è attestata su valori medi rispetto alle altre piantagioni. Nella figura 5.2.4, sono riportate le produzioni dei genotipo testati, sia per il primo che per il secondo ciclo, mentre in appendice 1 è riportata la figura 2 che mostra la produttività di ogni anno di sperimentazione.

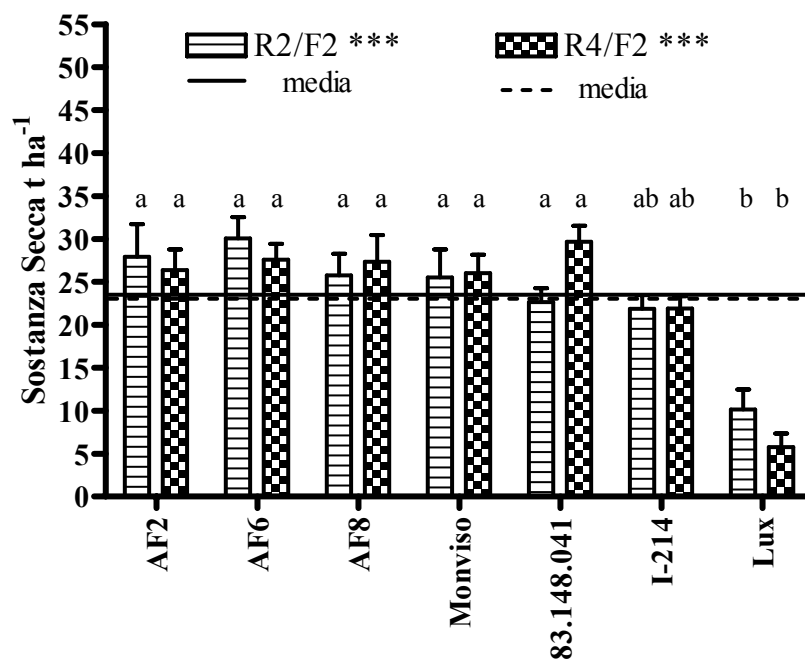


Fig 5.2.4: Produttività di due cicli nella piantagione a turno biennale di Vinovo (TO). I cloni con la stessa lettera non hanno produzioni significativamente differenti per $p \leq 0,05$. La lettera maiuscola indica una differenza tra il 1° e 2° ciclo. Non significativo (n.s.) $p > 0,05$; (*) $0,01 \leq p \leq 0,05$; () $0,001 \leq p \leq 0,01$; (***) $p \leq 0,001$.**

Come si può vedere, la produttività media nel primo biennio è stata di circa 23 t di ss ha⁻¹ e le uniche differenze statisticamente significative riguardano il clone Lux, che ha prodotto sensibilmente meno degli altri.

In assenza di fertilizzazioni, dopo la prima ceduazione, nel secondo biennio le produzioni sono rimaste stabili. Ovvero non sono state riscontrate differenze di produttività tra il primo ed il secondo ciclo in nessun clone testato.

5.2.3 Piantagione di Mira

L'impianto di Mira (VE) risulta quello con migliori condizioni pedoclimatiche. Il primo carattere valutato è l'attecchimento delle talee legnose. Tutti i cloni rivelano attecchimenti elevati (circa 90%) ed il Lux, valutato come clone testimone, è l'unico ad avere attecchimenti molto inferiori agli altri cloni (35%) (tab.5.2.7).

Dopo la piantagione delle talee legnose i cloni testati hanno emesso un numero di polloni significativamente diverso; il genotipo che ha emesso maggior numero di polloni per talea è Monviso (1,3), mentre i cloni AF8 e Lux quelli che emettono un minor numero di polloni per talea (1). A parità di attecchimento (escludendo il clone Lux), il numero di

polloni per talea determina il numero di fusti ad ettaro, che è infatti significativamente differente per il clone Monviso (7.879 polloni ha⁻¹), rispetto all'AF8 (5.606 polloni ha⁻¹), (vedi tabella 5.2.7).

Mira: Biennale 1° ciclo di rotazione R2/F2												
Clone	Att. %	Tukey Test	Poll. X cepp.	Tukey test	Poll. X ha	Tukey test	D₁₀₀ (cm)	Tukey test	H (cm)	Tukey test	Rami %	Tukey Test
AF2	98 (2,5)	a	1,2 (0,08)	ab	6970 (525)	ab	6,5 (0,4)	ab	921 (31)	a	14,7 (1,2)	D
AF6	100 (-)	a	1,2 (0,09)	ab	7576 (525)	ab	5,8 (0,3)	b	771 (23)	c	19,9 (1,3)	Bcd
AF8	93 (4,8)	a	1,0 (-)	b	5606 (290)	b	6,8 (0,1)	ab	885 (5)	ab	16,8 (2,1)	Cd
AF10	93 (4,8)	a	1,1 (0,05)	ab	6061 (429)	ab	6,4 (0,25)	b	820 (16)	bc	17,9 (1,2)	Bcd
Monviso	98 (2,5)	a	1,3 (0,07)	a	7879 (553)	a	5,8 (0,4)	b	787 (25)	c	20,9 (1,1)	Abcd
83.148.041	98 (2,5)	a	1,1 (0,05)	ab	6364 (303)	ab	6,3 (0,2)	b	950 (16)	a	25,5 (3,7)	Ab
I-214	93 (4,8)	a	1,2 (0,09)	ab	6667 (655)	ab	5,9 (0,4)	b	738 (25)	c	25,1 (1,5)	Abc
Lux	35 (2,9)	b	1,0 (-)	b	2121 (175)	c	7,9 (0,4)	a	785 (12)	c	29,5 (1,8)	A
Media	88 (3,1)	***	1,15 (0,06)	*	6169 (432)	***	6,4 (0,29)	***	834 (19)	***	21,3 (1,7)	***

Tabella 5.2.7: Misure del primo ciclo biennale nella piantagione di Mira (VE).

Legenda: Vedi tabella 5.2.1

Il diametro dei cloni misurato a 100 cm dal suolo alla fine del primo biennio è stato mediamente di 6,4 cm, con differenze significative tra i cloni con massimo di 7,9 cm (Lux) e minimo 5,8 cm per i cloni AF6 ed AF8. L'altezza media alla fine del secondo anno dall'impianto è mediamente di 834 cm, con punte di 921 per il clone AF2 e minimi di 738 cm per il clone I-214. La percentuale di rami rispetto alla biomassa legnosa epigea è del 21% ed è stata riscontrata una differenza altamente significativa tra i cloni; quello con maggiore percentuale di rami è chiaramente il clone Lux, a causa dello scarso attecchimento e quindi densità delle piante, seguito dai cloni 83.140.041 (25,5%), I-214 (25,1%) e Monviso (20,9), mentre anche qui il clone AF2 è quello con percentuali inferiori (14,7%).

Prima dell'esposizione dei risultati relativi al secondo ciclo di rotazione (Tab. 5.2.8), è indispensabile ricordare che in questa piantagione è stata effettuata una fertilizzazione azotata nel terzo e quarto anno, somministrando Urea 46% in quantità di 200 Kg ha⁻¹ nel terzo anno e 100 Kg ha⁻¹ nel quarto.

Mira: Biennale 2° ciclo di rotazione R4/F2												
Clone	Sopr. %	Tukey Test	Poll. X cepp.	Tukey test	Poll. X ha	Tukey test	D ₁₀₀ (cm)	Tukey test	H (cm)	Tukey test	Rami %	Tukey test
AF2	93 (4,8)	A	4,6 (0,23)		25909 (1611)	a	3,4 (0,05)	b	642 (6)	b	4,3 (1,2)	b
AF6	95 (2,9)	A	5,0 (0,26)		29091 (2281)	a	2,8 (0,06)	b	522 (9)	c	7,5 (1,3)	b
AF8	93 (4,8)	a	5,1 (0,20)		28333 (672)	a	3,3 (0,07)	b	697 (8)	bc	6,0 (0,9)	B
AF10	90 (4,1)	a	5,1 (0,35)		27576 (2107)	a	3,2 (0,17)	b	645 (22)	bc	7,6 (0,9)	B
Monviso	98 (2,5)	a	5,0 (0,12)		29394 (1035)	a	3,1 (0,07)	b	591 (9)	bc	9,5 (1,5)	Ab
83.148.041	95 (2,9)	a	4,7 (0,21)		27121 (1858)	a	3,1 (0,11)	b	636 (14)	bc	8,5 (2,5)	Ab
I-214	85 (6,5)	a	5,0 (0,29)		25909 (2148)	a	3,3 (0,19)	b	633 (23)	bc	6,4 (1,6)	B
Lux	33 (4,8)	b	5,7 (1,02)		10606 (1453)	b	4,5 (0,23)	a	603 (20)	a	14,1 (2,1)	A
Media	84 (4,1)	***	5,0 (0,34)	ns	25492 (1646)	***	3,3 (0,12)		621 (14)	***	8,0 (1,5)	**

Tabella 5.2.8: Misure del secondo ciclo biennale nella piantagione di Mira (VE).

Legenda: Vedi tabella 5.2.1

Dopo la prima ceduazione con turno biennale la mortalità delle ceppaie è stata bassa per tutti i cloni, mediamente dall' 88% di attecchimento si è passati all'85% di sopravvivenza delle ceppaie, rispetto al numero iniziale di talee impiantate. Il numero di polloni emesso dai cloni testati dopo la ceduazione è in media di 5 polloni/ceppaia, e non sono presenti differenze significative tra i cloni.

Anche in questo impianto, in conseguenza dell'aumento del numero dei polloni per ceppaia, i fusti ad ettaro divengono nel secondo ciclo molto numerosi (mediamente 25.490 polloni ha⁻¹), senza differenze significative tra i cloni con buon attecchimento. Il diametro medio dei polloni decresce poco meno del 50% circa, passando da 6,4 cm, a 3,3 cm.

La frequenza percentuale dei polloni in base al diametro nel primo ciclo è più alta per i diametri alti (6-8 cm), mentre nel secondo ciclo la frequenza maggiore si ha nei diametri inferiori (2-4 cm) (figura 5.2.5); in appendice 1 è riportata la tabella relativa alla distribuzione percentuale dei diametri per tutti i genotipi. Anche l'altezza media diminuisce notevolmente passando da 834 a 621 cm.

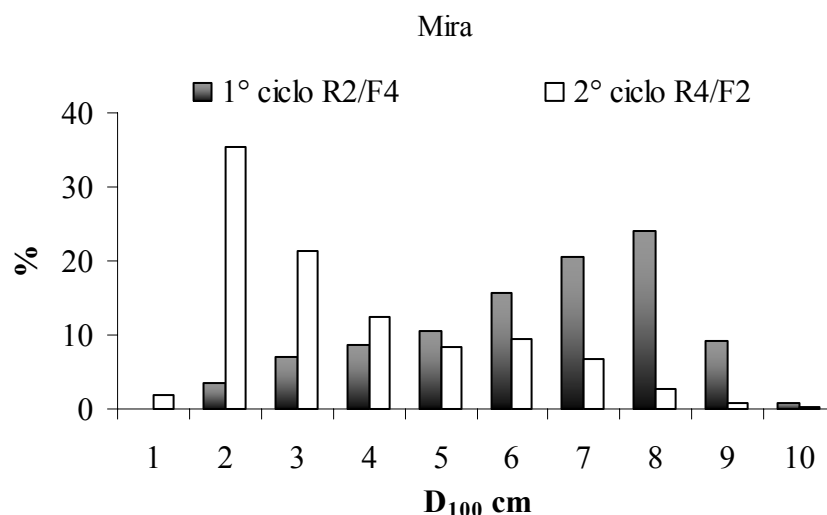


Fig.5.2.5: Distribuzione % dei diametri nel primo e secondo ciclo – Mira (VE)

La componente della biomassa dei rami, si riduce anche in questo impianto dal 21 all'8% tra il primo ed il secondo ciclo. Sono presenti differenze significative nella ramosità dei cloni; nel secondo ciclo il clone meno ramoso è AF2, mentre tra quelli con densità simile, il clone più ramoso è il Monviso.

Nella tabella 5.2.9 vengono confrontati i parametri rilevati tra i cloni, tra i due cicli di rotazione e l'eventuale interazione tra ciclo e clone.

Fonte di variazione	Att. %	Poll. X cepp.	Poll. X ha	D ₁₀₀ (cm)	H (cm)	Rami %	Produzione t ss ha ⁻¹
Interazione Ciclo x Clone	0,9795	0,6219	<0.0001	0,5812	<0.0001	0,1020	0,0016
Ciclo	0,1174	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Clone	<0.0001	0,8663	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Tabella 5.2.9: Analisi statistica (ANOVA Two Ways) - Mira (VE).

Dove Att. %: Attecchimento delle talee %; Sopr. %: Sopravvivenza dopo una ceduzione %; poll x cepp: numero di polloni per ceppaia; poll x ha¹: numero di polloni ad ettaro; D₁₀₀ (cm): diametro misurato a 100 cm; H: altezza media; % rami: percentuale di rami sulla biomassa epigea.

La produttività di questo impianto è stata maggiore rispetto alle altre piantagioni. Nella figura 5.2.6 sono riportate le produzioni dei genotipo testati, sia per il primo che per il secondo ciclo, mentre in appendice 1 è riportata la figura 3 che mostra la produttività di ogni anno di sperimentazione. Nell'impianto di Mira i cloni hanno espresso in pieno le loro differenze genetiche, infatti sono presenti differenze significative di produttività sia nel primo biennio che nel secondo. La produttività media dell'impianto di Mira nel primo ciclo è stata di 30,5 t ha⁻¹ di sostanza secca; i cloni che hanno dato i migliori risultati sono stati

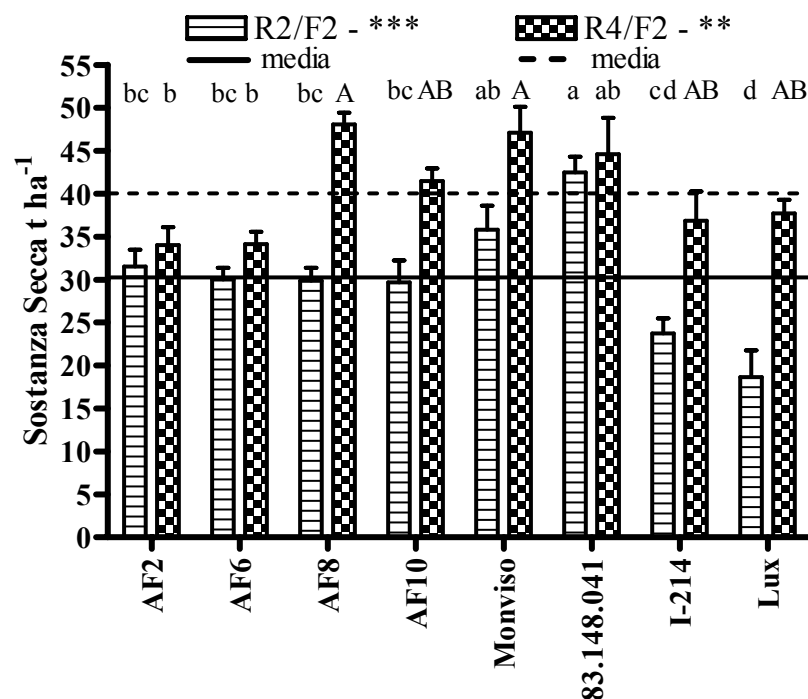


Fig 5.2.6: Produttività di due cicli nella piantagione a turno biennale di Mira (VE). I cloni con la stessa lettera non hanno produzioni significativamente differenti per $p \leq 0,05$, nello stesso ciclo.

Dove appare lettera maiuscola, vi è una differenza del clone tra il 1° e 2° ciclo per $p \leq 0,05$. Non significativo (n.s.) $p > 0,05$; (*) $0,01 \leq p \leq 0,05$; () $0,001 \leq p \leq 0,01$; (***) $p \leq 0,001$.**

83.148.041 che nel primo ciclo ha raggiunto incrementi medi annui di $21 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ e Monviso $18 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$; i meno produttivi sono stati Lux ($9,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$) e I-214 ($11,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$). Nel secondo ciclo la produttività media dell'impianto è aumentata in modo significativo da $30,5 \text{ t ha}^{-1}$ a $40,3 \text{ t ha}^{-1}$ di sostanza secca; i cloni che hanno prodotto di più sono stati l'AF8 con un incremento medio annuo di $24 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$, il Monviso $23 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ e l'83.148.041 con $22 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$.

5.2.4 La Densità Basale

La variabilità della densità basale, secondo l'analisi ANOVA, mostra come l'effetto sito sia statisticamente significativo per $p < 0,001$ e questa variabilità tra le diverse piantagioni rappresenta la principale fonte di variazione (31,66 %) sul totale della varianza. L'effetto clone, pur costituendo una parte minore nella varianza totale (27,36%), mostra significative differenze tra i cloni per $p < 0,001$; non è presente una significativa interazione sito x clone (tab.5.2.10).

Alcuni cloni come l'83.148.041, il Lux ed il Monviso hanno mostrato una densità basale superiore agli altri e questa differenza è evidente nelle diverse condizioni ambientali (vedi Fig. 5.2.7).

Fonte di Variazione	% di variazione sul totale	Valore di P
Interazione	1,27	0,4791
Sito	31,66	P<0.0001
Genotipo	27,36	P<0.0001

Tabella 5.2.10: Analisi statistica (ANOVA Two Ways) eseguita su tutti i valori di densità basale rilevati in entrambi i cicli produttivi.

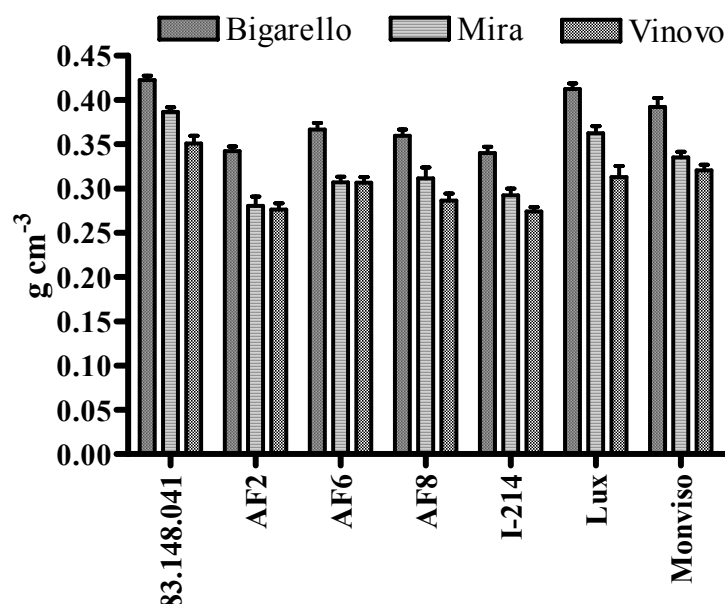


Figura 5.2.7: Densità basale nelle tre piantagioni a turno biennale

Nelle piantagioni di Bigarello e Vinovo è stata misurata la densità basale alla fine del primo e del secondo ciclo di rotazione, per verificare l'effetto del cambio di struttura del soprassuolo sulla densità basale del legno. I risultati sono mostrati nelle figure 5.2.8 e 5.2.9.

Nella piantagione di Bigarello non si sono riscontrate significative differenze nella densità basale dei cloni tra il primo ed il secondo ciclo, anche se per molti cloni si è registrato un piccolo incremento. Nella piantagione di Vinovo si può notare un incremento della densità basale tra il primo ed il secondo ciclo. Tale incremento risulta statisticamente significativo, con $p = 0,0038$ (tab. 5.2.11).

	Bigarello		Vinovo	
Fonte di Variazione	% variazione sul totale	Valore di P	% variazione sul totale	Valore di P
Interazione	1,85	0,7189	0,48	0,9684
Ciclo	0,21	0,4746	3,08	0,0038
Clone	46,21	P<0.0001	39,45	P<0.0001

Tabella 5.2.11: Analisi statistica (ANOVA Two Ways) eseguita sul confronto dei valori di densità basale del primo e secondo ciclo produttivo.

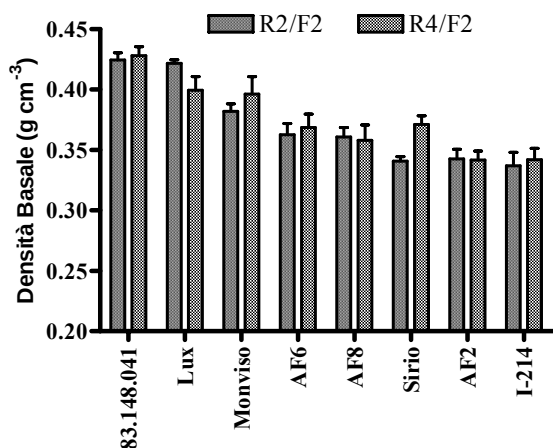


Figura 5.2.8: Densità basale nel primo e Secondo ciclo di rotazione – Bigarello

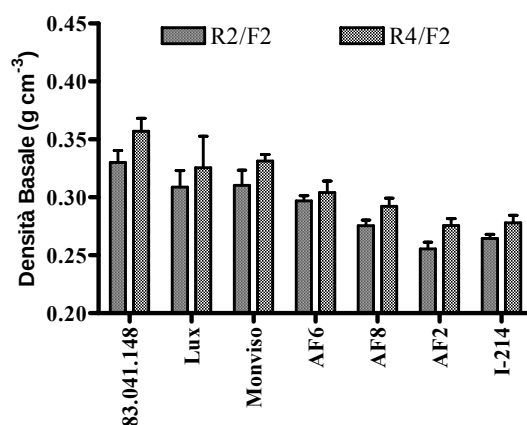


Figura 5.2.9: Densità basale nel primo e secondo ciclo di rotazione – Vinovo

Bigarello*** n=121						Vinovo*** n=151					
Cloni	Media	Gruppo				Cloni	Media	Gruppo			
83.148.041	0,427	A				83.041.148	0,348	A			
Lux	0,412	A	B			Monviso	0,323		B		
Monviso	0,392		B			Lux	0,313		B	C	
AF6	0,366			C		AF6	0,301			C	D
AF8	0,359			C	D	AF8	0,280				D
Sirio	0,357			C	D	I-214	0,274				E
AF2	0,342				D	AF2	0,268				E
I-214	0,340				D						

Tabella 5.2.12: Analisi delle differenze della densità basale (intervallo di confidenza 95%) eseguito su dati medi del primo e secondo ciclo, con il test di Fisher (LSD) n = numero di osservazioni

Secondo il post test di Fischer (LSD) eseguito nelle due nelle due piantagioni, vi sono significative differenze di densità basale ed valori sono stratificati secondo quanto riportato nella tabella 5.2.12.

5.3 Discussioni e Conclusioni

I risultati di questi primi quattro anni di sperimentazione sul confronto di cloni di pioppo per piantagioni a turno breve devono essere interpretati in relazione alle caratteristiche podologiche dei siti di sperimentazione, all'età dell'impianto, all'andamento climatico ed al modello colturale utilizzato.

5.3.1 Attecchimento delle talee

Per il successo della piantagione è indispensabile utilizzare materiale con elevata capacità di attecchimento delle talee legnose. Le talee usate avevano dimensioni ridotte (diametro di circa 1,5 cm e lunghezza intorno ai 20 cm). Il decorso climatico della primavera-estate dell'anno d'impianto (2003) è stato eccezionalmente secco e caldo, anche nelle stazioni di studio. Nonostante ciò l'attecchimento è stato ottimo nelle tre località studiate per la maggior parte dei cloni sperimentati, ad eccezione del clone Marte (*P. alba*), successivamente abbandonato nella sperimentazione e del clone Lux. Quest'ultimo è un clone di *P. deltoides*, che ha notoriamente problemi di radicazione delle talee caulinari (Dickman e Stuart, 1983).

I valori di attecchimento riscontrati sono in linea con altri esperimenti condotti in ambiente simile (Facciotto et al 2006), mentre in piantagioni sperimentali dell'Italia centrale, con condizioni climatiche limitanti (clima meso-mediterraneo), vengono riportati attecchimenti medi dei cloni intorno al 74% (Facciotto et al 2006) o molto inferiori a questo valore (Breccia 2006) in caso di competizione con le infestanti.

La mortalità delle ceppaie in seguito alla ceduzione è stata molto bassa in tutti i campi sperimentali a turno biennale (4% circa), valore molto vicino a quello riportato in analoghi esperimenti (5-10%) (Frison et al, 1990); mentre la mortalità diviene apprezzabile nell'impianto a turno annuale di Zinasco (PV) alla terza ceduzione.

L'attecchimento delle talee quindi, oltre che dalle condizioni di idratazione delle stesse al momento dell'impianto, è influenzato dall'andamento climatico della prima stagione vegetativa, soprattutto in assenza di irrigazione. In condizioni climatiche più siccitose, l'attecchimento delle talee dei cloni studiati è molto più difficoltoso e richiede in tempestivo uso dell'irrigazione oltre ad un meticoloso controllo delle infestanti.

5.3.2 Produzioni

A livello europeo le produzioni di biomassa derivanti da *SRF* di cloni di pioppo sono riportate nella tabella seguente (Tab. 5.3.1). La produzione della biomassa legnosa epigea è molto variabile in funzione dell'età dell'impianto, del suolo, del clima, del clone impiegato e della tecnica colturale. Gli incrementi annui di sostanza secca nel turno annuale oscillano da 1,4 t ha⁻¹anno⁻¹ a 14 t ha⁻¹anno⁻¹. Nel turno biennale gli incrementi annui variano da 1,4 t ha⁻¹anno⁻¹ a 34 t ha⁻¹anno⁻¹. Mentre gli incrementi medi annui riferiti ai 4 anni di sperimentazione, oscillano dalla 4 t ha⁻¹anno⁻¹ per il clone I-214 nell'impianto di Bigarello, alle oltre 20 t ha⁻¹anno⁻¹ per i cloni Monviso ed 83.041.148 nell'impianto di Mira. Questi valori sono superiori a quanto riportato nelle sperimentazioni europee nella tab. 5.3.1 (Vande Walle *et al*, 2007) ed in linea con quanto riportato da altri autori (Facciotto *et al*, 2006; Frison *et al* 1990) in ambienti simili e con la produzione ottenibile in condizioni ottimali (clima favorevole, irrigazione, fertilizzazione ecc...) secondo altri autori (Heilman and Stettler, 1985; Heilman *et al.*, 1994; Scarascia Mugnozza *et al.*, 1997).

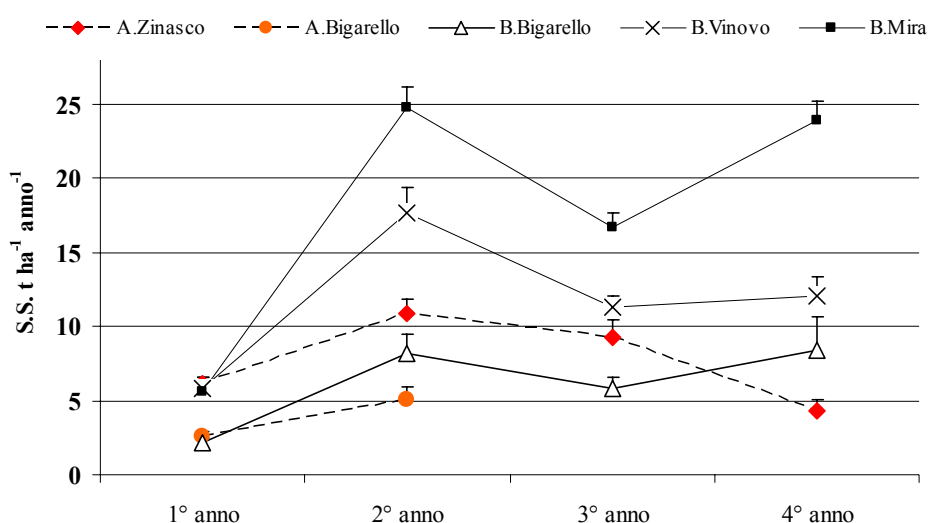


Figura 5.3.1 Andamento della produzione media nei quattro anni di sperimentazione.
Le sigle A o B prima del nome della piantagione indicano il turno Annuale o Biennale.

Nell'anno dell'impianto non si riscontrano significative differenze tra gli impianti annuali ad alta densità e quelli biennali, dato che l'anno dell'impianto serve soprattutto all'insediamento attraverso la formazione di un robusto apparato radicale; dal secondo anno gli impianti a ciclo biennale producono maggiore biomassa.

Infatti l'incremento percentuale di produzione nel secondo anno è mediamente del 200% rispetto al primo anno negli impianti annuali, mentre nei biennali per secondo anno si hanno incrementi medi di sostanza secca del 400% rispetto al primo anno.

Biomass production of European SRF plantations of poplar

Species	Country	Soil type	pH	Management	Planting density (trees ha ⁻¹)	Rotation length (y)	Biomass production (t DM ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Reference
D × N	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	2.2	[19]
— ^a	D	Sand	7.2–7.7	F	8333	4	2.3 ^a	[22]
D × T	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	2.8	[19]
Ta × To	D	Sand	n.i.	None	5000	5	3.0	[30]
Ta × To	D	Sand	n.i.	F	8333	5	3.0	[30]
Ta × To	D	Sand	n.i.	F	5000	5	3.2	[30]
T × D	B	Sand	4.5	None	20,000	4	3.5	This study
Ta × To	D	Sand	n.i.	None	8333	5	3.6	[30]
D × T	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	3.6	[19]
T × D	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	3.7	[19]
D × T	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	3.7	[19]
T	D	Sand	n.i.	F	8333	5	3.7	[30]
T	D	Sand	n.i.	F	16,667	5	4.1	[30]
D × N	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	4.7	[19]
T	D	— ^b	n.i.	None	16,667	5	4.8 ^b	[30]
T	D	Sand	n.i.	None	8333	5	4.8	[30]
T × B	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	4.8	[19]
Ta × To	D	Sandy clay	n.i.	None	16,667	5	5.2	[30]
D × N	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	5.2	[19]
Ta × To	D	Sandy clay	n.i.	F	16,667	5	5.5	[30]
T × D	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	5.8	[19]
T	D	Sandy clay	n.i.	F	16,667	5	5.9	[30]
T × D	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	5.9	[19]
T × D	GB	Heavy clay loam	n.i.	W	10,000	C+4	6.4	[25]
T × D	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	6.6	[19]
T × D	S	Clay	6–7	W	5000	6	7.3	[12]
T	GB	Heavy clay loam	n.i.	W	10,000	C+4	7.5	[25]
T × D	S	Clay	6–7	W	5000	6	7.6	[12]
T	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	8.0	[19]
T × D	GB	Heavy clay loam	n.i.	W	10,000	C+4	8.1	[25]
N	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	8.2	[19]
T	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	8.3	[19]
T	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	8.5	[19]
T	GB	Argilic brown earth	n.i.	W	10,000	C+4	9.2	[25]
— ^c	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	10.1 ^c	[19]
T × D	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	10.4	[19]
T × D	B	Loam/sandy-loam	7.3–8.0	W	10,000	C+4	11.4	[19]
T × D	GB	Argilic brown earth	n.i.	W	10,000	C+4	12.8	[25]
T × D	GB	Argilic brown earth	n.i.	W	10,000	C+4	13.6	[25]

Species refers to the parentage of the poplar clone used: B, *P. balsamifera*; D, *P. deltoides*; N, *P. nigra*; T, *P. trichocarpa*; Ta, *P. tremula*; To, *P. tremuloides*; country code B, Belgium; D, Germany; GB, England; S, Sweden; management code W, weed control; F, fertilizers; rotation length, C means coppiced after establishment year; n.i., no information.

^aMean of eight poplar clones.

^bMean of two sites.

^cMixture of clones.

Tabella 5.3.1: Produttività delle SRF di pioppo in alcuni paesi europei (Fonte Vande Walle et al 2007)

- Impianti Biennali

Negli impianti a turno biennale il *trend* rimane crescente anche nel secondo ciclo di rotazione in due impianti su tre esaminati.

In seguito alla ceduzione si è registrato un aumento della produttività nell'impianto fertilizzato di Mira ed in quello di Bigarello, dove al primo turno la produzione era stata scarsa. Il mancato incremento della produzione nella piantagione di Vinovo può essere

imputabile ad una ridotta disponibilità di nutrienti, che a sua volta può influenzare l'allocazione della biomassa tra fusto e radici. Come mostrato da *Paris et al.*(2006), la coltivazione di pioppo per la produzione di biomassa asporta dal suolo una quantità di azoto paragonabile a quella di una coltura agraria, pertanto la previsione di un piano di concimazione adeguato appare indispensabile per il mantenimento nel tempo della produzione e della fertilità del suolo.

Fonte di Variazione	% della varianza totale	Valore P
Clone	14,78	P<0.0001
Sito	67,91	P<0.0001
Interazione	7,01	0,0004

Tabella 5.3.2: Analisi della varianza della produttività delle piantagioni a turno biennale sulla produzione media annua dei genotipi nei tre impianti.

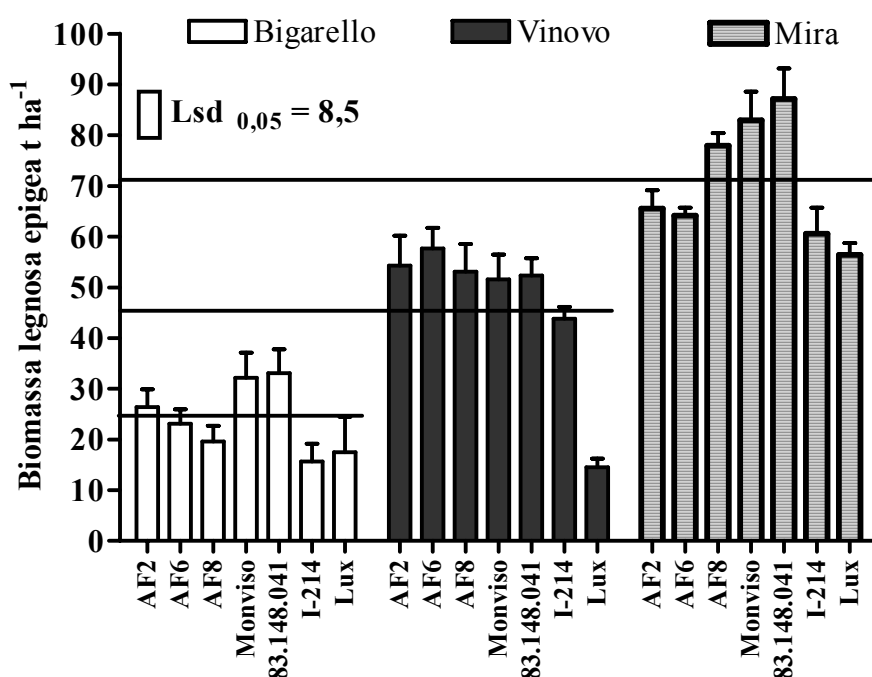


Figura 5.3.2 Produzione totale dei cloni negli impianti a turno biennale, durante i quattro anni di sperimentazione. LSD = Least significant difference

La ceduzione comporta un sostanziale cambiamento nella composizione del soprassuolo, che si traduce in un netto incremento del numero di polloni per ettaro, una riduzione del

loro diametro ed altezza ed una riduzione della percentuale di rami rispetto alla biomassa totale epigea. Negli impianti di Vinovo e Mira dopo la ceduazione non si è riscontrata una differenza significativa tra i cloni nel numero di polloni per ceppaia emessi, comunque questo valore non è risultato correlato significativamente alla produzione di biomassa. Mentre la produzione di biomassa per ceppaia è maggiormente determinata dal diametro dei suoi uno o due polloni dominanti, come riportato anche da altri autori (*Laureysens et al, 2003*), sembra che i polloni dominati e di piccolo diametro, diano solo un piccolo contributo al totale della biomassa epigea.

Nelle piantagioni a turno biennale, cambiamenti della produttività dei cloni sono stati registrati tra le due rotazioni. Il clone migliore nella piantagione di Mira nella prima rotazione biennale è stato l'83.041.148 con 42,4 t ha⁻¹, mentre nella seconda rotazione il migliore clone è stato l'AF8 con una produzione di 48,2 t ha⁻¹, seguito dal clone Monviso con 46,9 t ha⁻¹. Questi tre cloni sono anche quelli che mostrano una densità basale del fusto superiore alla media.

Le differenze genotipiche emergono soprattutto nei terreni idonei alla coltivazione del pioppo, i cloni utilizzati negli impianti biennali mostrano un'ampia variabilità produttiva. I cloni selezionati appositamente per queste tipologie colturali producono in misura maggiore rispetto ai cloni tradizionalmente impiegati in pioppicoltura (I-214 e Lux) (vedi figura 5.3.2)

5.3.3 **Densità basale e qualità della biomassa**

Il fatto di avere numerosi polloni di dimensioni ridotte aumenta di fatto la percentuale di corteccia della biomassa, quindi la percentuale di azoto e di ceneri contenuta, con effetti negativi sulla qualità del combustibile e sull'efficienza d'uso dei nutrienti. L'allungamento del turno sembrerebbe una soluzione ottimale per migliorare la qualità del combustibile attraverso un aumento della frazione del fusto sulla biomassa raccolta ed aumentare la sostenibilità ecologica della piantagione, ma attualmente questo comporterebbe difficoltà tecniche nella raccolta meccanica, oltre ad allungare il periodo di assenza di reddito da parte dell'imprenditore.

Sia la produzione di biomassa che la sua qualità sono importanti fattori che influenzano la scelta del turno per le piantagioni energetiche a rapida crescita. All'aumentare dell'età dei fusti la taglia degli stessi aumenta e la proporzione di corteccia, così come la densità del legno decrescono (*Klasnja et al. 2002*). La densità basale del legno è un'importante

caratteristica per le piantagioni *Srf* nella scelta del turno, del genotipo in quel determinato sito. La densità basale è stata riscontrata molto variabile sia nelle diverse piantagioni che tra i diversi genotipi.

Il cloni con performance produttive migliori (83.041.148, AF8, Monviso), a parità di attecchimento, sono stati anche quelli che avevano una densità basale del legno superiore alla media. A dimostrazione dell'importanza di questo dato è da ricordare che le industrie che utilizzano il legno per scopi energetici e per l'estrazione della cellulosa sono interessate, piuttosto che al volume di legno acquistato, alla quantità di sostanza secca che esso contiene.

In questo quadro appare importante la scelta di siti e di modelli di gestione colturale idonei, la selezione di cloni con caratteristiche morfologiche (proporzione di fusto, rami ecc...) che ottimizzino la qualità del combustibile e l'efficienza d'uso dei nutrienti. Questi risultati indicano la possibilità di produrre energia da pioppi molto giovani attraverso la *Short rotation forestry*.

CAPITOLO 6 - BIOMASSE LIGNOCELLULOSICHE E ASPORTAZIONI DI AZOTO

INTRODUZIONE

L'obiettivo principale delle piantagioni forestali a ciclo breve (*Short rotation forestry*) è quello della produzione di biomassa a fini energetici. Le produttività di queste piantagioni sono attualmente molto variabili in relazione ai principali fattori che influenzano la produttività della coltura: fertilità del sito, genotipo impiegato, intensità della coltivazione, tra cui *in primis* irrigazione e fertilizzazione. La fertilizzazione azotata può costituire sino al 65% del fabbisogno energetico di una *Srf* di pioppo (*Balsari e Airoidi, 2002*) e l'applicazione della esatta quantità di fertilizzante è importante per minimizzare i costi di produzione e limitare l'inquinamento da fertilizzanti (*Heilman and Norby, 1998*).

L'operazione di raccolta della biomassa con turni più o meno corti comporta la rimozione di nutrienti (azoto, fosforo e potassio; micronutrienti) dall'ecosistema piantagione, e l'esatta conoscenza di questa entità è importante per la sostenibilità del sistema ed è necessaria per il reintegro degli elementi asportati. Il sostegno alla produttività di una piantagione *Srf* richiede un apporto nutritivo sufficiente e l'azoto (N) è considerato spesso come uno dei principali fattori limitanti la produzione delle *Srf* (*Hansen et al, 1988; Miegroet et al 1994*). I problemi di base nella fertilizzazione *Srf* includono le difficoltà nel valutare il bisogno reale e l'efficienza d'uso del nutriente, l'abilità della pianta a svilupparsi sopra la media quando le condizioni nutrizionali sono ottimali (*Hansen et al 1988, Rytter et al 1993, Heilman et al 1998*). In generale possiamo affermare che ad alte produzioni di biomassa legnosa, corrispondono crescenti quantità di nutrienti rimosse con la raccolta dal sistema, ma con significative variazioni in funzione di alcuni parametri come l'età della piantagione al momento del taglio, i residui del taglio lasciati al suolo, la specie arborea, l'epoca di taglio, l'entità sottospecifica (clone) ed infine l'irrigazione e la fertilizzazione stessa. Un recente studio (*Calfapietra et al., 2007*) sull'efficienza d'uso dell'azoto (*NUE*) in una piantagione *SRF* di cloni di pioppo mostra come la componente legnosa epigea (fusto e rami) rappresenta solo il 46% dell'azoto totale assorbito da tutte le componenti. Infatti per una piantagione di tre anni (R3/F3), viene stimata una asportazione di azoto della biomassa raccolta di 280 Kg ha⁻¹ (circa 93 Kg ha⁻¹anno⁻¹), contro una asportazione globale di 610 Kg ha⁻¹ includendo le foglie, la lettiera, ceppaia, e radici. Nello stesso studio quindi si mostra come le foglie asportino una quantità di azoto variabile dal 22 al 35% del totale della pianta, in funzione della specie (*Calfapietra et al., 2007*). *Lars*

(2002), analizzando il contenuto di nutrienti su ibridi di pioppo a varie altezze del fusto, osserva che la concentrazione media di nutrienti nei fusti diminuisce all'aumentare dell'età della piantagione. È evidente che la rimozione delle parti superiori del fusto e dei rami comportano rimozione di frazioni con alta concentrazione di N. Una più alta concentrazione di N nelle parti di piccola dimensione della pianta può essere spiegata da un maggiore rapporto tra corteccia e legno (*Sander & Ericsson, 1998*).

Nei popolamenti giovani la parte superiore del fusto e la frazione dei rami è piuttosto significativa, mentre più tardi si trasforma in una più piccola parte della biomassa totale. Nelle piantagioni *Srf*, con turni di taglio biennali, la maggior parte delle componenti dell'albero sono asportate utilizzando le apposite macchine integrate (*harvesters* taglia-trinciatrici). Nel caso del pioppo, la rimozione delle foglie, ricche di nutrienti, è evitata raccogliendo durante l'inverno.

Nell'ambito d'ogni specie arborea da *Srf*, selezionare ed utilizzare genotipi con elevata efficienza d'uso dei nutrienti può minimizzare la rimozione di nutrienti da parte della coltura. *Heilman e Stettler* (1986) hanno trovato una variazione considerevole nell'efficienza d'uso dei nutrienti fra le selezioni di *Populus trichocarpa*.

Gli *input* colturali, come fertilizzazione ed irrigazione, aumentano le asportazioni di nutrienti, attraverso un incremento della biomassa legnosa prodotta e rimossa con la raccolta, anche se all'aumentare della produzione si ha un parallelo decremento della concentrazione di nutrienti, per un sorta di effetto diluizione, così come specificatamente riscontrato su salici da *Srf* in USA (*Adegbidi et al, 2000*).

Il contenuto percentuale di nutrienti nella biomassa legnosa influenza anche i parametri di qualità del combustibile legnoso, fortemente correlata alla composizione percentuale in legno del fusto, di rami e ramoscelli, nonché corteccia nella biomassa raccolta; in particolare la corteccia ha più alte concentrazioni delle sostanze nutrienti, di cenere e di determinati metalli pesanti rispetto al legno (*Heilman 1986, Zsuffa 1992*). Per ciò che concerne specificatamente il contenuto di N nella biomassa legnosa asportata con la raccolta, questo parametro risulta utile per valutare alcuni fondamentali aspetti ambientali delle *Srf*, riguardo la fitodepurazione e l'effetto serra. Le piantagioni legnose *Srf*, con destinazione *no food* della produzione di biomassa, si adattano anche alle fitodepurazione di reflui urbani e zootecnici, ricchi d'elementi fertilizzanti (nitrati e fosfati), tanto più che la fitodepurazione può avere un ruolo determinante a favore della redditività della coltura. Esperienze positive, sia dal punto di vista tecnico che economico, di fitodepurazione di liquami urbani e zootecnici sono state condotte in Svezia, dove la pratica è oramai adottata

comunemente nella gestione di piantagioni commerciali *Srf*. Come dimostrato da ricercatori dell'Università di Uppsala (Svezia) e della Stazione sperimentale di miglioramento vegetale dell'Irlanda del Nord, le coltivazioni *Srf* di salice (*Rosenqvist and Dawson, 2005*) possono essere efficacemente impiegate per sostituire, almeno in parte, i costosi trattamenti a cui le acque di scarico urbane devono essere sottoposte, dopo il primo ciclo di aerazione/sedimentazione condotto nei depuratori; infatti, prima di poter scaricare queste acque nei corpi idrici naturali (fiumi, laghi e mare) è necessario ridurre drasticamente il loro contenuto inquinante di N e P per rispettare i limiti imposti dalle normative di protezione dell'ambiente. In questo caso, il costo del trattamento secondario delle acque di scarico dei depuratori con piantagione arborea *Srf* con funzione di filtro è stato stimato pari a $1300 \text{ € ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$; per contro, il costo del trattamento tradizionale svolto nei depuratori per un'azione di biorimedio (assorbimento di N e P) comparabile a quella ottenuta con la piantagione *Srf* si può stimare in media pari a $2100 \text{ € ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$, includendo sia i costi di investimento che quelli di funzionamento, con una differenza a vantaggio della soluzione del biofiltro arboreo pari a $800 \text{ € ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$, considerato che la piantagione sia già disponibile e quindi senza includere i costi per il suo impianto che potrebbero già essere stati coperti dai contributi europei e nazionali previsti per le colture agro-forestali ed energetiche. Se soltanto una parte di questi 800 € fossero destinati all'imprenditore agro-forestale, la redditività delle colture da biomassa aumenterebbe in modo significativo. Con queste tipologie di biorimedio si valuta, infatti, che l'assorbimento di N possa ammontare ad almeno $150\text{-}200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ (*Dimitriou and Aronsson, 2005*). L'obiettivo del presente lavoro è un primo contributo alla conoscenza delle asportazioni di azoto nella biomassa legnosa epigea di cloni di pioppo a *Srf* ed i principali parametri stazionali, genetici e di morfologia produttiva (produttività, dimensione delle piante, ramosità) che influenzano le asportazioni di N, la sua concentrazione nella biomassa legnosa epigea.

6.1 Materiali e metodi

6.1.1 Descrizione delle piantagioni e cloni impiegati

Le misure di contenuto in N sono state effettuate in due piantagioni *Srf* di pioppo della rete padana Vinovo (To) e Bigarello (Mn), contrastanti per caratteristiche produttive, alla fine del secondo e del quarto anno. Le stesse misure sono state realizzate in centro Italia nella piantagione di Terni Loc. Sabbione alla fine del primo biennio. Le tre piantagioni

sperimentali a turno biennale sono descritte in tabella 5.1. Le caratteristiche dei siti del nord Italia sono riportate nel precedente capitolo, mentre l'impianto di Terni, è stato realizzato nell'inverno-primavera 2004 dal Consorzio A.T.E.N.A. di Acquasparta (Tr). La zona è prevalentemente pianeggiante e l'impianto si trova a sinistra del corso del fiume Nera nella pianura che va da Terni a Narni ad una altitudine di circa 110 m s.l.m. Le sue coordinate geografiche sono: 42° 33' 18'' nord di latitudine e 12° 36' 12'' est di longitudine. Il clima è di tipo mediterraneo, in particolare di tipo sub-litoraneo, con estati calde e con scarse precipitazioni ed inverni relativamente freddi; la temperatura media annua è di 15 °C; le temperature massime si raggiungono tra luglio ed agosto, mentre le minime tra dicembre e gennaio. La piovosità media annua è di 857 mm; le precipitazioni sono concentrate soprattutto nel periodo tra settembre e novembre ed in aprile. I dati relativi alle temperature medie mensili e alla pluviometria sono riferiti al decennio 1991-2000 e sono stati forniti dall'*Istituto Idrografico Nazionale*.

Precedentemente alla sperimentazione sui cloni di pioppo da Srf, i terreni erano dei seminativi coltivati con mais in coltura principale. Nessun apporto di fertilizzanti è stato effettuato negli impianti del Nord Italia, mentre in quello di Terni è stato apportato azoto nella quantità di 50 Kg di Urea ha⁻¹ anno⁻¹.

In Tabella 6.2 sono riportate le principali caratteristiche fisico-chimiche del suolo dei siti sperimentali del nord Italia, su campioni di terreno prelevati nei primi 20 cm del profilo all'inizio dell'inverno 2004. I cloni di pioppo ibrido utilizzati nei siti sperimentali sono indicati in tabella 5.3, e si distinguono in nuovi cloni da colture a ciclo breve e cloni tradizionali; una più dettagliata descrizione dei cloni è disponibile nel capitolo 4.

<i>Località</i>	Turno	Modello colturale	Epoca 1° rilievo	D_{1m} (cm)	N° polloni ha⁻¹	Epoca 2° rilievo	D_{1m} (cm)	N° polloni ha⁻¹
Bigarello (MN)	Biennale	Fila singola	R2/F2	4,1	5.636	R4/F2	2,2	24.628
Vinovo (TO)	Biennale	Fila singola	R2/F2	5,9	6.356	R4/F2	3,2	20.196
Terni (TR)	Biennale	Fila binata	R2/F2	3,25	16.510	-		

Tabella 6.1. Principali caratteristiche culturali e di morfologia produttiva dei polloni (diametro ad 1 m di altezza, polloni per ha) alla fine del primo e del secondo ciclo produttivo biennale.

Parametro	Unità di Misura	Vinovo	Bigarello
Sabbia	%	19,9	16,8
Limo	%	64,7	39,9
Argilla	%	15,4	43,3
pH in acqua (rapp. 1:2,5)	-	7	8,34
Sostanza Organica	%	1,54	1,73
C/N	-	8,9	9,5
N tot solubile	mg N kg ⁻¹	10,1	10,6
Fosforo	mg P kg ⁻¹	30	11
Potassio scambiabile	mg K kg ⁻¹	79	158

Tabella 6.2 Principali caratteristiche fisico-chimiche del suolo nei due impianti sperimentali di cloni di pioppo a SRF del nord Italia.

Sigla/Nome	Ibrido	Sigla/Nome	Ibrido
"I-214"	<i>P.x euramericana</i>	"AF6"	<i>(P. x interamericana) x (P.x euramericana)</i>
"AF2"	<i>P.x euramericana</i>	"Monviso"	<i>P. maximowiczii x P. nigra</i>
83.148.041	<i>P.x euramericana</i>		

Tabella 6.3. Cloni di pioppo ibrido oggetto dello studio nei due impianti sperimentali a SRF di Vinovo e Bigarello.

6.1.2 Rilievi sperimentali

Il prelievo dei campioni legnosi per la determinazione del contenuto di N è stato condotto con le seguenti modalità. Nel primo ciclo di rotazione, negli impianti di Vinovo e Bigarello, le analisi sulla percentuale di azoto sono state condotte su tre piante di diametro medio per clone. Nel secondo ciclo e nell'impianto di Sabbione le piante campione sono state selezionate stratificandole secondo la variabilità dei diametri (4-6 polloni per clone). Le piante così selezionate sono state suddivise tra fusto e rami; il fusto è stato diviso in sezioni e per ognuna si è prelevata una sottile rotella trasversale per la stima della Densità Basale (Vedi capitolo 5). Ogni sezione è stata cubata (vedi figura 6.1), e si è risaliti al peso secco della stessa moltiplicando il volume allo stato fresco per la densità basale della rotella. Per il materiale di Sabbione, ogni campione è stato scortecciato con bisturi, per la

determinazione della percentuale di corteccia e successivamente per le analisi di laboratorio distinte tra corteccia e legno.

Gli stessi campioni di fusto e rami sono stati essiccati in stufa a 103°C fino a peso costante. Dalle rotelle prelevate, sono state estratte sottili sezioni trasversali, che sono state sminuzzate e triturate in un mulino che ha permesso di ottenere materiale omogeneo di polvere di legno e corteccia.

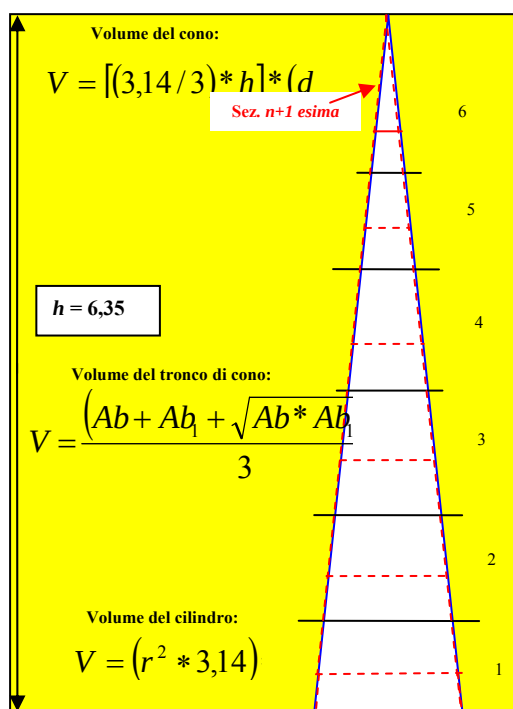


Figura 6.1: Schema riassuntivo della metodologia seguita per l'analisi dei fusti; il numero di campioni prelevati ed analizzati è funzione dell'altezza della pianta.

Nel calcolare il contenuto nutriente di una sezione del fusto, sono state usate una media delle concentrazioni dei nutrienti dei dischi della parte inferiore e la parte superiore della sezione. Per il cimale è stata usata la concentrazione nutriente del disco più elevato, per la parte basale quella della prima sezione. Il contenuto dei nutrienti per un fusto è stato ottenuto sommando gli importi nutrienti delle sezioni del fusto, compreso il cimale.

La valutazione dell'azoto nei rami è stata realizzata tramite campioni casuali.

La determinazione di %N è stata condotta nei laboratori del Di.S.A.F.R.i, presso l'Università della Tuscia di Viterbo. La polvere ottenuta dal vaglio è stata nuovamente posta in stufa a 50°C per una notte, quindi analizzata con un CHN analizzatore elementare (NA1500 Carlo Erba Strumenti, Rodano, Italia) per la determinazione analitica del N. I dati di %N di ciascun campione, stratificato per sito, clone, sezione di campionamento del

fusto o dei rami, sono stati usati per determinare il contenuto di N per ogni pianta (Vedi Fig. 6.1), e quindi le asportazioni di azoto in relazione ai dati di produttività di biomassa legnosa.

6.2 Risultati

6.2.1 Relazione componenti della biomassa e percentuale di N

La percentuale di corteccia è un'importante parametro per la determinazione della qualità della biomassa prodotta e per l'asportazione di nutrienti. La corteccia ha alte concentrazioni delle sostanze nutrienti, di determinati metalli pesanti rispetto al legno (Heilman 1986, Kenney, 1992, Punshon et al, 1997) e produce elevate quantità di ceneri in seguito alla combustione. Come mostrato nella figura 6.2, la percentuale di corteccia nella biomassa legnosa epigea decresce rapidamente all'aumentare del diametro dei polloni, con valori che oscillano tra il 10 ed il 48 %. Non sono state rilevate differenze statisticamente significative tra i cloni in sperimentazione nella relazione tra dimensione della pianta e percentuale di corteccia. L'importanza del contenuto di corteccia della biomassa si riflette sulla quantità di azoto asportato, infatti come mostrato nella figura 6.3, il contenuto percentuale di azoto della corteccia è molto superiore a quello del legno. La correlazione tra il diametro della sezione e la concentrazione di azoto per la corteccia è bassa, mentre per il legno la concentrazione dell'elemento decresce all'aumentare del diametro della sezione, secondo l'equazione riportata nella figura 6.3.

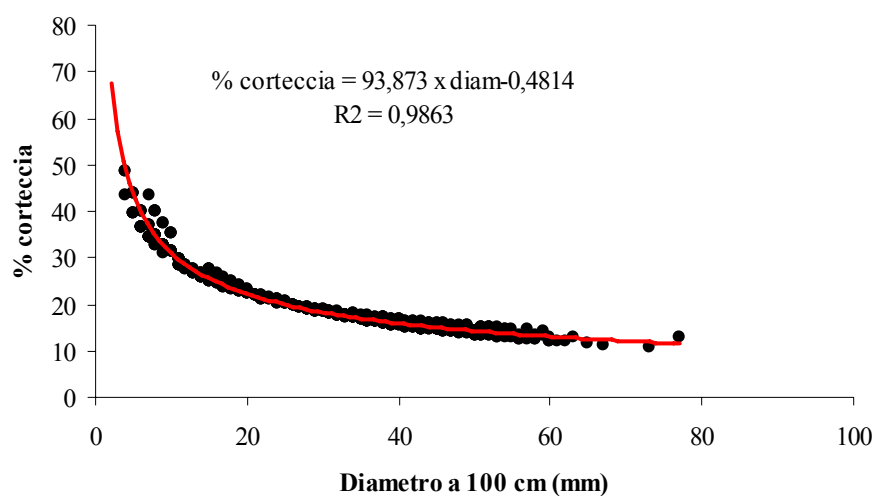


Figura 6.2: Andamento della percentuale di corteccia in relazione al diametro del pollone nella piantagione di Terni.

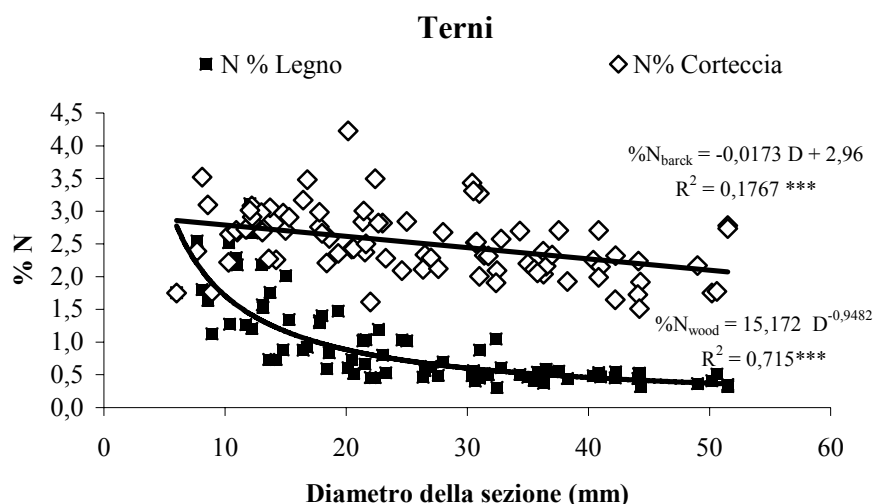


Figura 6.3: Andamento della percentuale di azoto nella corteccia e nel legno in sezioni di fusto con diametro crescente.

6.2.2 Percentuale di N nella biomassa legnosa in due raccolti successivi

Dalla figura 6.4 emerge che la percentuale di N della biomassa legnosa delle *Srf* è stata mediamente uguale o inferiore allo 0,8% nel primo ciclo biennale, mentre nel secondo ciclo, in seguito alla ceduzione, la concentrazione del nutriente nella biomassa raccolta aumenta di oltre il 10%, arrivando allo 0,94% nella piantagione di Vinovo. Non si sono riscontrate significative differenze di concentrazione nelle due piantagioni, mentre differenze ci sono tra i cloni sia come piante monocaule che dopo la ceduzione (vedi tabella 6.4).

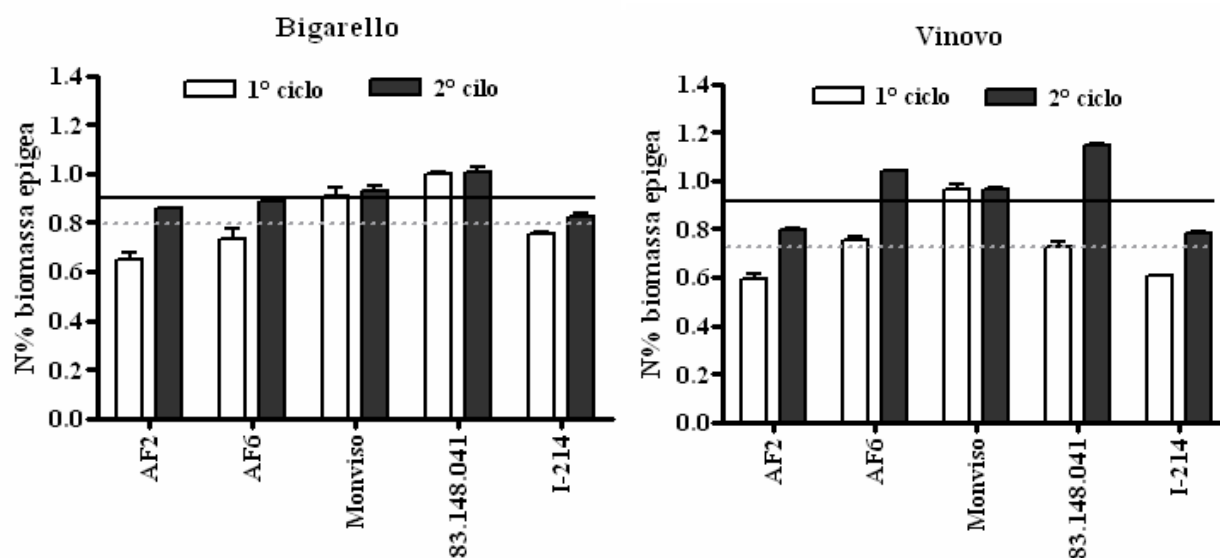


Figura 6.4: Percentuale di azoto nella biomassa legnosa epigea nel primo e secondo ciclo, in due piantagioni del nord Italia.

E' presente inoltre una interazione tra il ciclo ed il clone in entrambi gli impianti, ovvero l'effetto della ceduzione non ha estrinsecato il medesimo effetto su tutti i cloni e probabilmente questo diverso effetto è dovuto alla percentuale di rami presente nel primo ciclo nei vari genotipi e la riduzione degli stessi in seguito alla ceduzione nella biomassa totale. E' comunque evidente che alcuni cloni come AF2 e I-214 hanno una concentrazione minore di N nella parte epigea, rispetto ad altri come Monviso e 83.148.041 (vedi fig.6.4).

Fonte di Variazione	Valore P
Interazione Bigarello (Ciclo x Clone)	0,0002
Interazione Vinovo (Ciclo x Clone)	<0.0001
Ciclo	<0.0001
Clone	<0.0001
Sito	0,7907
Interazione (Sito x Clone)	0,2060

Tabella 6.4: Analisi della varianza della concentrazione di N% dei cloni nel primo e secondo ciclo biennale

6.2.3 Dinamica delle asportazioni in due raccolti successivi

Le asportazioni dal sistema piantagione sono correlate alla produttività dei genotipi nei siti dove sono stati impiegati, oltre che dalla concentrazione del nutriente nei tessuti. In figura 6.5 sono quantificate le asportazioni azotate della biomassa legnosa epigea; le evidenze riguardano un incremento del nutriente asportato dal primo al secondo ciclo di rotazione.

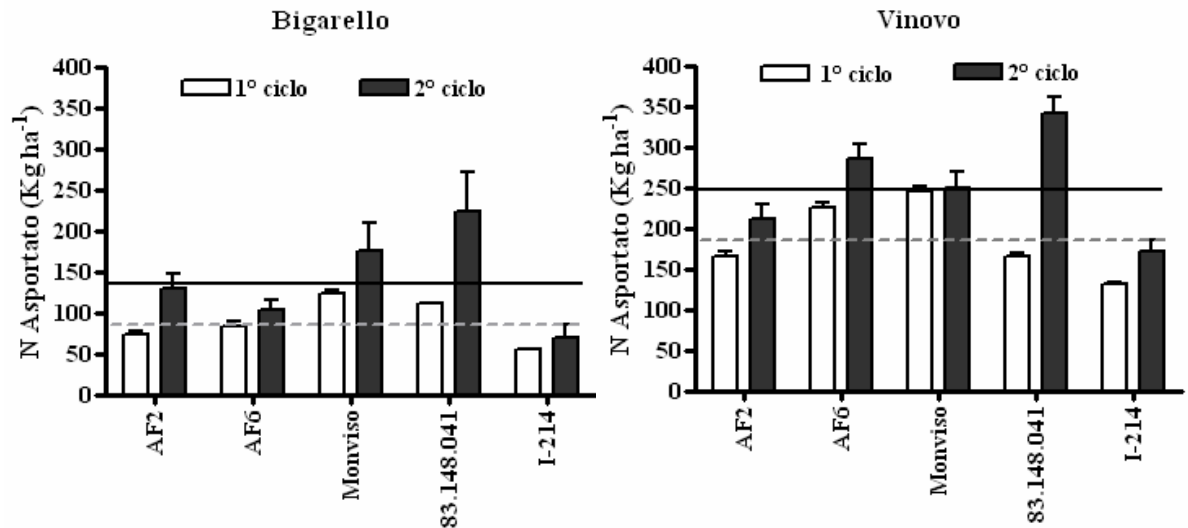


Figura 6.5:Asportazioni azotate con la raccolta a turno biennale, in due cicli di rotazione. Le linee orizzontali rappresentano la media del primo (linea chiara tratteggiata) e del secondo (linea scura) raccolto.

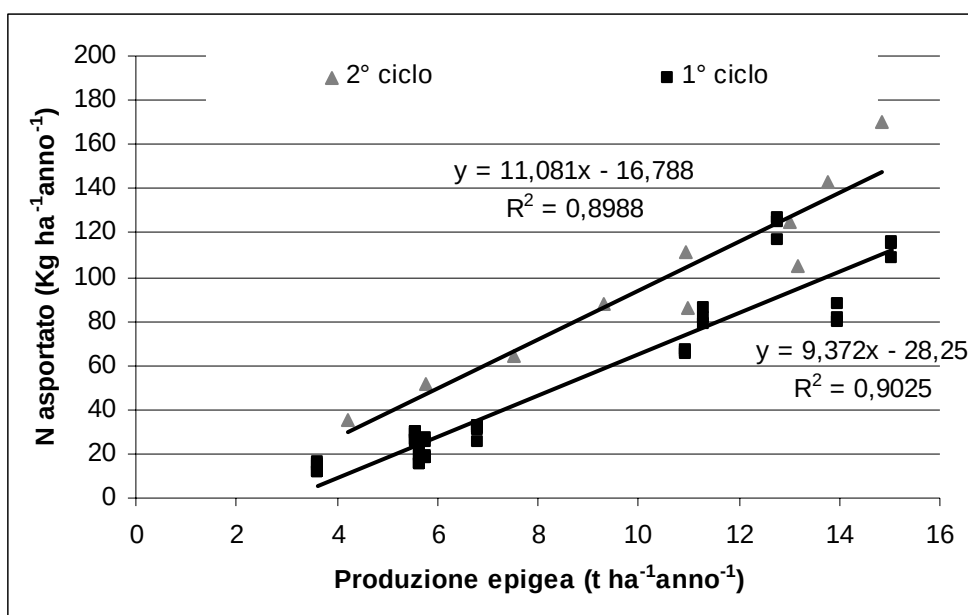


Figura 6.6: Relazione tra produzione di biomassa epigea espressa come sostanza secca e azoto (N), asportato con la raccolta della stessa.

Ovviamente il valore assoluto della rimozione del nutriente dal sistema dipende dalla quantità di biomassa prodotta da ciascun genotipo. Nella figura 6.6 è mostrata la relazione tra produttività epigea ed asportazioni azotate; per questa relazione sono stati uniti i dati di entrambe le piantagioni. La relazione è crescente con un R^2 di 0,9. Emerge perciò nuovamente la maggiore asportazione azotata, a parità di produttività, nelle piantagioni ceduate rispetto a quelle non ceduate.

Fonte di Variazione	Valore P
Interazione Bigarello (Ciclo x Clone)	0,3214
Interazione Vinovo (Ciclo x Clone)	0,0001
Ciclo Bigarello	0,0033
Ciclo Vinovo	<0.0001
Clone Bigarello	0,0015
Clone Vinovo	<0.0001
Sito	<0.0001
Interazione (Sito x Clone)	0,2497

Tabella 6.5: Analisi della varianza della asportazione di N dei cloni nel primo e secondo ciclo biennale

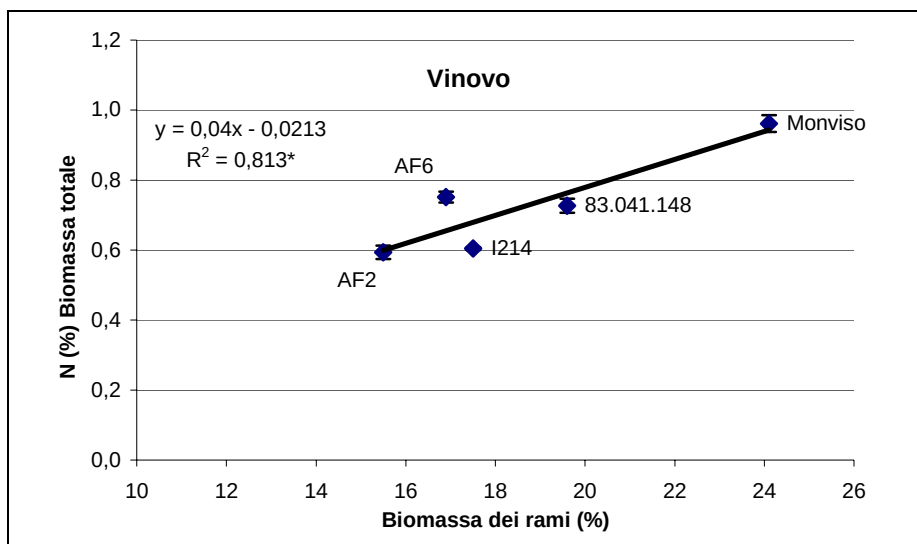


Figure 6.7 Relazione tra contenuto di azoto (%) della biomassa legnosa secca epigea e percentuale di biomassa allocata sui rami alla fine del primo ciclo di rotazione (Vinovo TO). Le barre verticali rappresentano le s.e.m. (standard error of the mean). * medie significative per $P \leq 0,05$.

Nel primo ciclo di rotazione è stata trovata una relazione positiva nella piantagione di Vinovo, tra la percentuale di biomassa allocata sui rami e la percentuale di azoto della biomassa totale (vedi fig. 6.7).

Nel secondo ciclo l'importanza della ramosità va diminuendo in seguito alla ceduzione, infatti questa passa da una media del 20,2% nel primo ciclo al 10% nel secondo per la piantagione di Vinovo, mentre acquista importanza la riduzione delle dimensioni dei polloni emessi dopo la ceduzione, come mostrato dalla figura 5.8, con conseguente aumento delle asportazioni azotate nella biomassa legnosa.

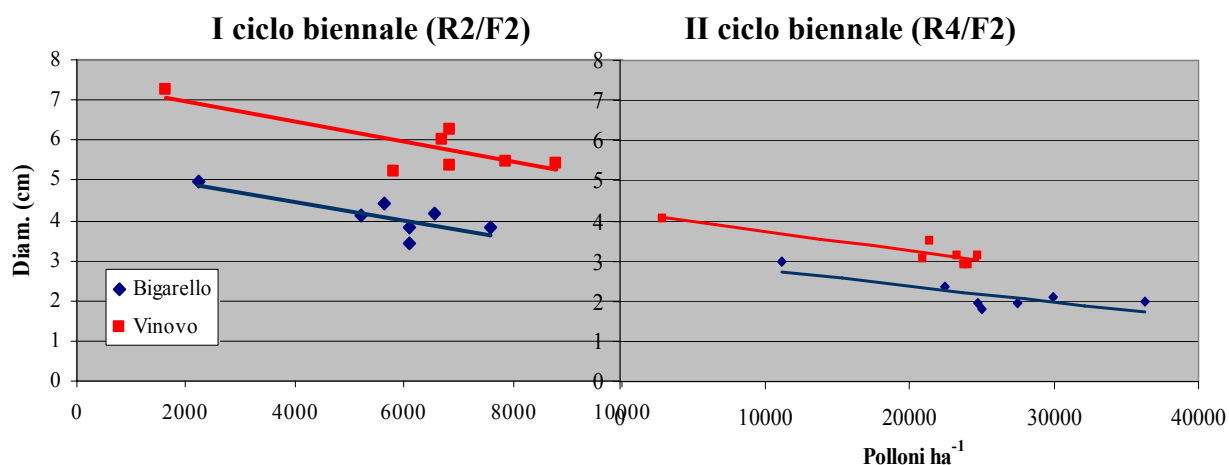


Figura 6.8 Relazione tra diametro a 100 cm dal suolo e numero di polloni ha⁻¹ nel primo e secondo ciclo di rotazione biennale

5.3 Discussione e conclusioni

5.3.1 Asportazioni azotate delle SRF ed altre coltivazioni

Nessun apporto di fertilizzanti è stato effettuato negli impianti del Nord Italia, mentre in quello di Terni è stato apportato azoto nella quantità di 50 Kg di Urea ha⁻¹ anno⁻¹. In base a questi dati preliminari sulle asportazioni di N nella biomassa legnosa prodotta nel primo e secondo ciclo biennale, possiamo affermare che nelle piantagioni cedue di pioppo da bioenergia, con turni di ceduazioni biennali, le asportazioni di azoto nella biomassa raccolta sono comparabili a quelle di alcune colture erbacee (frumento) e ben superiori rispetto alla pioppicoltura tradizionale, con cicli colturali di circa 10 anni e dimensioni al taglio delle piante ben superiori a quelle delle piante nella SRF (vedi tab. 6.6).

Coltura	Prodotto	Resa (t ha ⁻¹)	SS (%)	N% in SS	Asportazione annue N (kg ha ⁻¹ anno ⁻¹)
Mais ¹	granella	9	84.5	1.7	182
	stocchi e foglie	15	50	0.7	
Frumento ¹	granella	5	86	2.3	117
	paglia	4	88	0.5	
Pioppicoltura (turno 10-13 anni) ²	Legname da industria	200	50	0.4	40-31
Pioppo SRF, cl. Monviso, Vinovo, To. (R2/F2, fila singola) ³	Biomassa da energia	52	55	0.96	122
Pioppo SRF, cl. Monviso, Sabbione, Tr. (R3/F2, file binate) ⁴	Biomassa da energia	66	55	0.74	122

Tabella 6.6. Confronto delle asportazioni d'azoto nella SRF di pioppo, in base ai dati di questa ricerca, rispetto ai dati bibliografici per la pioppicoltura ed alcune delle più comuni colture erbacee. 1. Giardini L., 1986; 2. AA.VV., 1987; 3. Questo studio; 4. De Luca S., 2006. Rn: età in anni (n) della radice (R); Fn: età in anni (n) del fusto (F).

Questo ci indica che le fertilizzazioni azotate nelle piantagioni cedue di pioppo da biomassa devono essere gestite, per la quantità di unità di N da somministrare, al pari di una coltura erbacea e non come nella pioppicoltura tradizionale.

In particolare appare evidente un incremento delle dosi di fertilizzante in relazione all'aumento della produttività della coltura nei primi anni (figura 6.6) ed in relazione al ciclo di rotazione esaminato. Il maggiore contenuto di azoto nella biomassa raccolta nel secondo ciclo di rotazione, rispetto al primo, è facilmente spiegabile come conseguenza

della riduzione del diametro medio dei polloni costituenti il ceduo e quindi con un maggiore contenuto di corteccia più ricca di azoto.

6.3.2 La scelta del genotipo e del modello colturale in relazione allo scopo principale della piantagione SRF

Per migliorare la sostenibilità di queste piantagioni, appare evidente come un allungamento del turno possa avere effetti positivi sull'efficienza d'uso dei nutrienti ed anche sul miglioramento della qualità del combustibile. Alcuni cloni come AF2 e I-214, presentano una percentuale di N nella biomassa inferiore agli altri e questo si traduce in una maggiore efficienza d'uso dell'N (NUE).

D'altra parte, le suddette asportazioni d'azoto riferite al quadriennio creano interessanti opportunità per l'uso delle piantagioni cedue da biomassa di pioppo per il fitorimedio, con possibilità di smaltimento di reflui zootecnici ad esempio, con carichi di smaltimento non inferiori a quelle delle colture erbacee.

Se l'obiettivo prioritario è la massimizzazione della funzione di fitorimedio della piantagione da biomassa, sono allora da prediligere i cloni che, a parità di produzione, hanno più bassa efficienza d'uso del N (NUE). Il clone Monviso coniuga ambedue le caratteristiche, essendo il clone a minore NUE in ambedue i siti sperimentali, questo per una più alta incidenza percentuale della ramosità, che aumenta le asportazioni di N per una maggiore incidenza di corteccia e tessuti giovanili sulla biomassa legnosa asportata.

Queste osservazioni sono concordi con quanto osservato in un altro studio su cloni di pioppo da Srf in Italia centrale (*De Luca, 2006*), su di un impianto sperimentale a file binate. Anche in questo caso il clone che asporta maggiormente l'N è il Monviso, che è anche quello più produttivo. In questo studio abbiamo trovato una relazione positiva tra asportazione di N e produttività di biomassa legnosa. Le stesse relazioni, tra produttività di biomassa e parametri dell'azoto nella biomassa legnosa, sono state trovate su cloni di salice da Srf negli Stati Uniti (*Adebidi et al, 2001*). C'è quindi una relazione negativa tra produzione ed asportazione di azoto nelle piantagioni Srf da biomassa, per cui al crescere della produttività la %N diminuisce, con un aumento della NUE.

APPENDICE 1

	AF2		AF6		AF8		Sirio		Monviso		83.148.041		I-214		Lux		Tutti cloni	
Classe	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%
0-1	11	7	19	10	13	8	12	9	15	7	21	9	29	17	2	3	122	9
1-2	64	42	105	57	90	54	42	31	118	59	148	61	88	52	29	39	684	52
2-3	37	25	35	19	41	25	42	31	33	16	35	14	28	17	17	23	268	20
3-4	19	13	22	12	18	11	12	9	17	8	25	10	23	14	11	15	147	11
4-5	16	11	2	1	1	1	14	10	10	5	10	4	0	0	12	16	65	5
5-6	4	3	1	1	3	2	6	4	7	3	5	2	0	0	3	4	29	2
6-7	0	0	1	1	0	0	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	6	0
7-8	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	3	0
Polloni	151	100	185	100	166	100	134	100	201	100	244	100	168	100	75	100	1324	100

Tabella 2: Distribuzione di frequenza e percentuale dei polloni in base al diametro misurato a 100 cm nel secondo ciclo della piantagione di Bigarello (MN)

	AF2		AF6		AF8		Monviso		83.148.041		I-214		Lux		Tutti cloni	
Classe cm	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%	<i>Frequenza</i>	%
0-1	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
1-2	0	0,0	0	0,0	3	6,7	1	2,1	2	4,9	1	1,9	0	0,0	7	2,3
2-3	0	0,0	14	23,7	2	4,4	8	17,0	2	4,9	8	15,1	0	0,0	34	11,3
3-4	4	8,9	9	15,3	3	6,7	4	8,5	4	9,8	5	9,4	0	0,0	30	9,9
4-5	6	13,3	6	10,2	3	6,7	4	8,5	8	19,5	9	17,0	1	9,1	37	12,3
5-6	8	17,8	8	13,6	10	22,2	19	40,4	17	41,5	11	20,8	0	0,0	73	24,2
6-7	12	26,7	9	15,3	14	31,1	7	14,9	7	17,1	10	18,9	4	36,4	63	20,9
7-8	11	24,4	10	16,9	8	17,8	4	8,5	1	2,4	7	13,2	6	54,5	47	15,6
8-9	4	8,9	3	5,1	2	4,4	0	0,0	0	0,0	2	3,8	0	0,0	11	3,6
Polloni	45	100	59	100	45	100	47	100	41	100	53	100	11	100	302	100

Tabella 3: Distribuzione di frequenza e percentuale dei polloni in base al diametro misurato a 100 cm nel primo ciclo della piantagione di Vinovo (TO)

	AF2		AF6		AF8		Monviso		83.148.041		I-214		Lux		Tutti cloni	
<i>Classe</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>
<i>cm</i>																
0-1	2	1,4	1	0,6	4	2,4	6	3,7	1	0,7	1	0,6	1	4,8	16	1,7
1-2	29	20,1	67	42,4	50	30,1	73	44,5	48	34,0	65	40,6	6	28,6	338	35,4
2-3	29	20,1	28	17,7	34	20,5	34	20,7	36	25,5	32	20,0	4	19,0	197	20,6
3-4	30	20,8	20	12,7	25	15,1	16	9,8	18	12,8	23	14,4	0	0,0	132	13,8
4-5	28	19,4	20	12,7	33	19,9	14	8,5	19	13,5	20	12,5	5	23,8	139	14,6
5-6	22	15,3	7	4,4	19	11,4	10	6,1	11	7,8	17	10,6	3	14,3	89	9,3
6-7	4	2,8	9	5,7	0	0,0	7	4,3	7	5,0	0	0,0	1	4,8	28	2,9
7-8	0	0,0	5	3,2	1	0,6	4	2,4	1	0,7	2	1,3	1	4,8	14	1,5
8-9	0	0,0	1	0,6	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,1
Polloni	144	100	158	100	166	100	164	100	141	100	160	100	21	100	954	100

Tabella 4: Distribuzione di frequenza e percentuale dei polloni in base al diametro misurato a 100 cm nel secondo ciclo della piantagione di Vinovo (TO)

	AF2		AF6		AF8		AF10		Monviso		83.148.041		I-214		Lux		Tutti cloni	
<i>Classe</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>
<i>cm</i>																		
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-2	1	2	1	2	0	0	1	3	6	12	0	0	2	5	0	0	11	3
2-3	4	9	10	20	0	0	0	0	6	12	1	2	2	5	0	0	23	7
3-4	4	9	6	12	1	3	6	15	3	6	4	10	4	9	0	0	28	9
4-5	4	9	6	12	3	8	3	8	6	12	4	10	7	16	1	7	34	10
5-6	4	9	3	6	8	22	9	23	7	13	10	24	10	23	0	0	51	16
6-7	9	20	10	20	8	22	9	23	10	19	12	29	7	16	2	14	67	21
7-8	14	30	11	22	13	35	7	18	10	19	8	19	12	27	3	21	78	24
8-9	6	13	3	6	4	11	4	10	4	8	3	7	0	0	6	43	30	9
9-10	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	2	14	3	1
Polloni	46	100	50	100	37	100	40	100	52	100	42	100	44	100	14	100	325	100

Tabella 5: Distribuzione di frequenza e percentuale dei polloni in base al diametro misurato a 100 cm nel primo ciclo della piantagione di Mira (VE)

	AF2		AF6		AF8		AF10		Monviso		83.148.041		I-214		Lux		Tutti cloni	
<i>Classe</i>																		
<i>cm</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>	<i>Frequenza</i>	<i>%</i>
0-1	2	1	10	5	4	2	2	1	2	1	2	1	5	3	0	0	27	2
1-2	46	27	94	49	58	31	66	36	79	41	61	34	63	37	11	16	478	36
2-3	47	27	33	17	44	24	37	20	40	21	49	27	26	15	13	19	289	21
3-4	25	15	15	8	19	10	25	14	25	13	22	12	25	15	11	16	167	12
4-5	14	8	10	5	20	11	12	7	15	8	15	8	17	10	9	13	112	8
5-6	21	12	12	6	19	10	22	12	15	8	16	9	18	11	6	9	129	10
6-7	12	7	9	5	19	10	11	6	9	5	10	6	12	7	9	13	91	7
7-8	4	2	5	3	4	2	7	4	4	2	4	2	4	2	6	9	38	3
8-9	0	0	3	2	0	0	0	0	3	2	0	0	1	1	4	6	11	1
9-10	0	0	1	1	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1	1	4	0
Polloni	171	100	192	100	187	100	182	100	194	100	179	100	171	100	70	100	1346	100

Tabella 6: Distribuzione di frequenza e percentuale dei polloni in base al diametro misurato a 100 cm nel secondo ciclo della piantagione di Mira (VE)

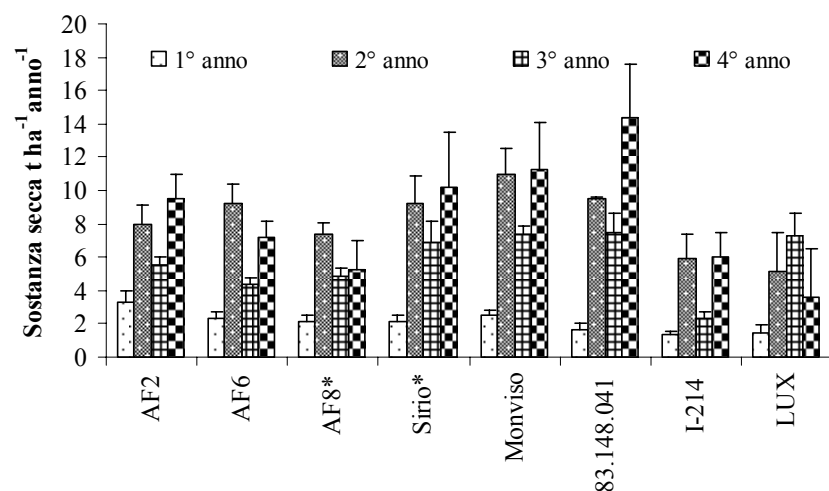


Figura 1: Produzione stimata annualmente della piantagione a turno biennale di Bigarello (MN)

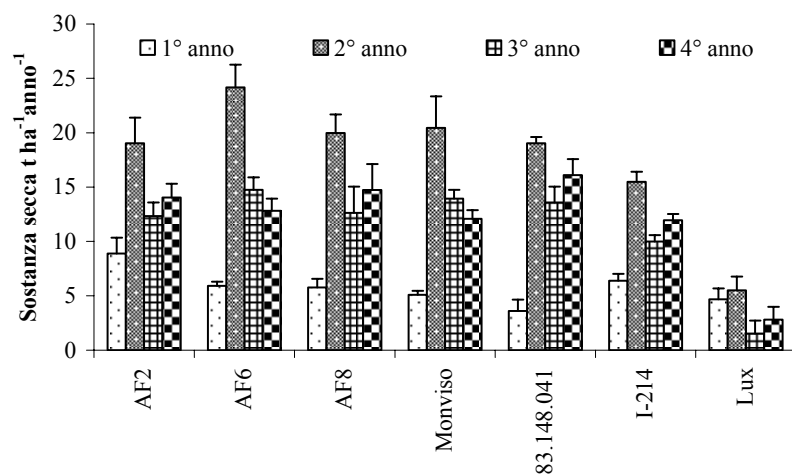


Figura 2: Produzione stimata annualmente della piantagione a turno biennale di Vinovo (TO)

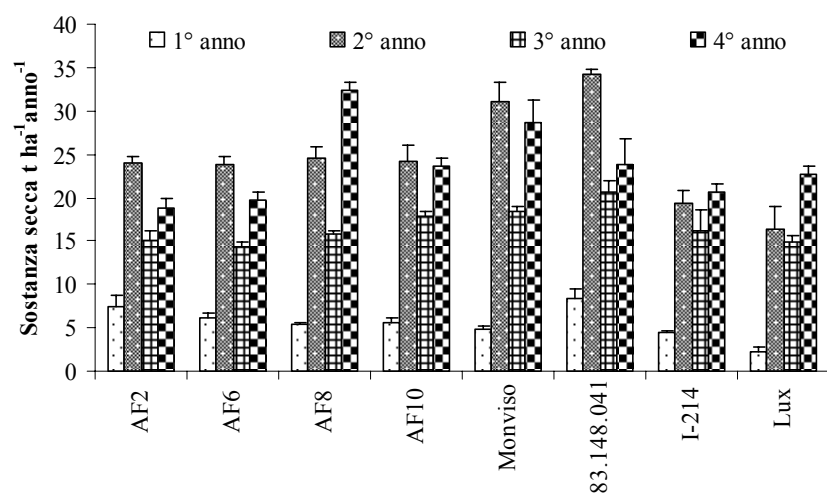


Figura 3: Produzione stimata annualmente della piantagione a turno biennale di Mira (VE)

	Bigarello		Vinovo		Mira	
83.148.041	0,423	(0,005)	0,351	(0,009)	0,387	(0,005)
Lux	0,412	(0,006)	0,313	(0,012)	0,363	(0,008)
Monviso	0,392	(0,010)	0,320	(0,007)	0,335	(0,006)
AF6	0,366	(0,008)	0,306	(0,007)	0,307	(0,006)
AF8	0,359	(0,007)	0,286	(0,008)	0,312	(0,012)
AF2	0,342	(0,005)	0,276	(0,007)	0,280	(0,010)
I-214	0,340	(0,007)	0,274	(0,005)	0,292	(0,007)

Tabella 7: Densità Basale g cm⁻³ dei genotipi nelle piantagioni; i valori tra parentesi indicano l'errore standard

BIBLIOGRAFIA

AA.VV. 2004 Le colture dedicate ad uso energetico: il progetto Bioenergy Farm. ARSIA. 6. Quaderno Arsia.

AA.VV.2006 How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? EEA (European Environment Agency), OPOCE Office for Official Publications of the European Communities. 7.

AA.VV. 1997 Selvicoltura a breve rotazione (SRF) per la produzione di biomassa ad uso energetico. Rapporto di avanzamento 1995. G. Schenone. ENEL Spa.

AA.VV. 1999. Le coltivazioni da biomassa per un'energia alternativa. *Agricoltura* 293:57-99.

Adegbidi H. G., Volk T. A., White E. H., Abrahamson L. P., Briggs R. D. and Bickelhaupt D. H.. 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York state. *Biomass and Bioenergy* 20, 6:399-411.

Allegro G., Bisoffi S., Chiarabaglio P.M., Coaloa D., Castro G., Facciotto G., Giorcelli A. e Vietto L. 2000. *Pioppicoltura: produzioni di qualità nel rispetto dell'ambiente*. Casale Monferrato (AL): Istituto di Sperimentazione per la Pioppicoltura di Casale Monferrato (AL).

Armstrong, A., Johns C. and Tubby I.. 1999. Effects of spacing and cutting cycle on the yield of poplar grown as an energy crop. *Biomass and Bioenergy* 17, 4:305-314.

Balsari P., Arioldi G. 2002. Valutazione energetica ed economica di una coltivazione a ciclo breve di pioppo per la produzione di biomassa. *Rivista di Agronomia* 36:163-169.

Baral, A. and Guha G. S.. 2004. Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: The issue of cost vs. carbon benefit. *Biomass and Bioenergy* 27, 1:41-55.

Bernetti G. 1995. I pioppi e la pioppicoltura UTET. In *Selvicoltura Speciale*, edited by UTET.

Beyea, J. Cook J. Hall D. Socolow R. and Williams R. 1991. Toward ecological guidelines for large-scale biomass energy development. Workshop report. National Audubon Society and Princeton University, Princeton, New Jersey.

Bona S. 2001. Biodiesel e bioetanolo: bilanci energetici e della CO₂. *Rivista di Agronomia* 35:219-229.

Bonari E., Pàmpana S. & Silvestri N. 1999 Prime analisi di impatto ambientale della selvicoltura a breve rotazione (SRF) negli ambienti litoranei toscani. *I Georgofili. Quaderni*. IV, 135-145. Valorizzazione energetica delle biomasse agro-forestali.

Breccia L. 2006. Prima valutazione di cloni di pioppo da biomassa in cedui a breve rotazione nell' Italia centrale. Elaborato finale in Selvicoltura generale, Università della Tuscia di Viterbo.

Brown S.1997 Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer FAO - Forestry-Paper. Food and Agriculture Organization to the United Nations. 134. Rome, FAO Forestry-Paper.

Browning B.L. 1967. Methods of wood chemistry. Interscience.

Bungarta R., Huttel R. F. 2001. Production of biomass for energy in postmining landscapes and nutrient dynamics. Biomass and Bioenergy 20:181-187.

Calfapietra C., De Angelis P., Gielen B., Lukac M., Moscatelli M.C., Avino G., Lagomarsino A., Polle A., Ceulemans R., Scarascia Mugnozza G., Hoosbeek M.R. and Cotrufo M.F. 2007. Increased nitrogen - use efficiency of short-rotation poplar plantation under elevated CO₂ concentration. Tree Physiology 27:1153-1163.

Calfapietra C., Gielen B., Galema ANJ, Lukac M. De Angelis P. Moscatelli M. C. Ceulemans R. Scarascia-Mugnozza G. 2003. Free-air CO enrichment (FACE) enhances biomass production in a short-rotation poplar plantation (POPFACE). Tree Physiology 23:805-814.

Cannell M.G.R., Sheppard L. J. Ford E. D. Wilson R. H. F. 1983. Clonal differences in dry matter distribution, wood specific gravity and foliage "efficiency" in *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. Silvae Genet. 32:195-202.

Christersson L. 2005. Plant physiological aspects of woody biomass production for energy purposes. K.S.Verma, D.K.Khurana & L.Christersson, eds.Short rotation forestry for industrial and rural development Nauni, Solan, Himachal Pradesh, India, Indian Society of Tree Scientists.

Christian, D. P., Hoffman W., Hanowski J. M., G. J. Niemi G. J. and Beyea J.. 1998. Bird and mammal diversity on woody biomass plantations in North America. Biomass and Bioenergy 14, 4:395-402.

Christian, D. P. Niemi G. J. Hanowski J. M. and Collins P. 1994. Perspectives on biomass energy tree plantations and changes in habitat for biological organisms. Biomass Bioenergy 6:31-39.

Ciccarese L., Spezzati E. Pettenella D. 2003 Le Biomasse Legnose. Un'indagine sulle potenzialità del settore forestale italiano nell'offerta di fonti di energia. APAT- Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici. 30.

Commission of the European Communities.1995 An energy policy for the EU. White Paper COM(95) 682.

Commission of the European Communities.1996 Energy for the future: renewable sources of energy. Green Paper OM(96)576.

Commissione della Comunità Europea.2005 Piano d'azione per la biomassa. COM (2005).

Corpo Forestale dello Stato. 2005 IFNI - Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio.

Danfors B., Ledin Stig Rosenquist Hakan. 1998. *Short rotation willow coppice. Growers' manual*. Uppsala: Swedish Institute of Agricultural Engineering.

De Luca S. 2006. Piantagioni di pioppo da biomassa: assorbimento di nutrienti e sostenibilità ambientale. Elaborato finale in Selvicoltura generale, Università della Tuscia di Viterbo.

Deraedt W., Ceulemans R. 1998. Clonal variability in biomass production and conversion efficiency of poplar during the establishment year of a short rotation coppice plantation. *Biomass and Bioenergy* 15:391-398.

Desideri U. 2003. L'utilizzo del legno come combustibile nella cogenerazione. *Legno Energia* 1.

Dickmann D.I. 2006. Silviculture and biology of short-rotation woody crops in temperate regions: Then and now. *Biomass and Bioenergy* 30:696-705.

Dickmann D.I., Stuart K. W. 1983 The culture of poplar in eastern North America. East Lansing, Michigan, Michigan State University Publications.

Dickmann, D. I., P. V. Nguyen, and K. S. Pregitzer. 1996. Effects of irrigation and coppicing on above-ground growth, physiology, and fine-root dynamics of two field-grown hybrid poplar clones. *Forest Ecology and Management* 80, 1-3:163-174.

Dimitriou I. and Aronsson P. 2005. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva* 221:47-50.

ECE/FAO. 1996 European Timber Trends and Prospects: Into The 21th Century. UN-ECE Geneva Timber and Forest Study Papers. <http://www.fao.org/wairdocs//x6829e/X6829E00.htm>.

Facciotto G., Bergante S. Lioia C. Rosso L. Mughini G. Zenone T. Nevo G. 2006. Produttività di cloni di pioppo e salice in piantagioni a turno breve. *Forest@* 3, 2:238-252.

FAO. 2003 Wood energy program.

Farinelli U. 1998 Verso un modello energetico sostenibile. Alcune considerazioni sul quadro internazionale ed europeo in campo energetico in vista della Conferenza Nazionale Energia e Ambiente. 44. Energia, Ambiente, Innovazione.

Frison G., Bisoffi S. Allegro G. Borelli M. Giorcelli A. 1990 Short rotation forestry in Italy: past experience and present situation. IEA/BA Task V. Casale Monferrato (Italy), Istituto Sperimentale per la Pioppicoltura (S.A.F. del gruppo E.N.C.C.). Energy Forestry Production Systems Workshop.

Giardini L. 1986 Agronomia generale. Patron Editore, Bologna.

Gellini R., Grossoni P. 1997. *Botanica Forestale*. Edited by CEDAM. Vol. II: Angiosperme.

- Giordano G. 1980. *Tecnologia del legno*. Edited by UTET. Vol. 1 Torino.
- Hakkila P. 1989. Utilization of residual forest biomass. , Berlino. Springer- Verlag.
- Hall DO, Scrase JI Rosillo-Calle F. 1997. *Biomass energy: the global context now and in the future*. Vol. 49: Aspects of Applied Biology.
- Hall, D. O., H. E. Mynick, and R. H. Williams. Carbon sequestration versus fossil fuel substitution: Alternative roles for biomass in coping with greenhouse warming. Carbon Sequestration Versus Fossil Fuel Substitution: Alternative Roles for Biomass in Coping with Greenhouse Warming.
- Hall, D. O., H. E. Mynick, and R. H. Williams. 1991. Cooling the greenhouse with bioenergy. *Nature* 353:11-12.
- Hansen J., Nazarenko L. Rudey R. Sato M. Willis J. Del Genio A. Koch K. Lacis A. Lok. Memon S. Novakov T. Perlwitz J. Russel G. Schmidt G. A. Tausnev N. 2005. Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science* 308:1431-1435.
- Hansen J., Sato M. Rudey R. Lacis A. Oinas V. 2000. Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario . 97, 9875-9880. *Proc.Natl.Acad.Sci* 97:9875-9880.
- Hansen, E. A., R. A. McLaughlin, and P. E. Pope. 1988. Biomass and nitrogen dynamics of hybrid poplar on two different soils: implications for fertilization strategy. *Canadian Journal of Forest Research* 18, 2:223-230.
- Heilman P.E., Ekuan G. Fogle D. 1994. Above- and below - ground biomass and fine roots of 4- year-old hybrids of *Populus trichocarpa* x *Populus deltoides* and parental species in short rotation culture. *Canadian Journal Forest Research* 24:1186-1192.
- Heilman P.E., Stettler R. F. 1985. Genetic variation and productivity of *Poplar trichocarpa* T.& G. and its hybrids.II. Biomass production in a 4-year plantation. *Canadian Journal Forest Research* 15:384-388.
- Heilman P.E., Stettler R. F. 1986. Nutritional concerns in selection of black cottonwood and hybrid clones for short rotation. *Canadian Journal Forest Research* 16:860-863.
- Heilman, P. and R. J. Norby. 1998. Nutrient cycling and fertility management in temperate short rotation forest systems. *Biomass and Bioenergy* 14, 4:361-370.
- Hernandez, R. E., A. Koubaa, M. Beaudoin, and Y. Fortin. 1998. Selected mechanical properties of fast-growing poplar hybrid clones. *Wood and Fiber Science* 30, 2:138-147.
- Hoffert MI, Caldeira K Jain AK Haites EF Harvey LDD Potter SD Schlesinger ME Schneider SH Watts RG Wigley TML Wuebbles DJ. 1998. Energy implications of future stabilization of atmospheric CO₂ content. *Nature* 395:881-884.
- Hoffman-Shielle C., Jug A. Makeschin F. Rehffuess K. E. 1999. Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany.I. Site growth relationships. *Forest Ecology and Management* 121:41-55.

Hos, J. J., M. J. Groeneveld, and W. P. M. van Swaaij. 1980. Gasification of organic solid wastes in cocurrent moving bed reactors. AIAA Paper:333-349.

Houghton RA. 1991. Relases of carbon to the atmosphere from degradation of forests in tropical Asia. Canadian Journal of Forest Research 2.

Hughes, E. and J. R. Benemann. 1997. Biological fossil CO₂ mitigation. Energy Conversion and Management 38, 9999.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).2000 Land use, land-use change, and forestry.

International Energy Agency 2005. Renewables informations

ITABIA.1998 La posizione di ITABIA sullo sviluppo della bioenergia in Italia. l'Istituto Sperimentale per la Meccanizzazione Agricola del MIPA, Monterotondo, Roma., Linee guida discusse ed approvate dall'assemble aperta dell'ITABIA del 30 marzo 1998.

ITABIA - Italian Biomass Association.2003 Le Biomasse per l'energia e l'ambiente - Rapporto 2003. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio.

Ivkovich, M., G. Namkoong, and M. Koshy. 2002. Genetic variation in wood properties of interior spruce. II. Tracheid characteristics. Canadian Journal of Forest Research 32, 12:2128-2139.

J.W.Ranney and L.K.Mann. 1994. Environmental considerations in energy crop production. Biomass and Bioenergy 6:211-228.

Joslin, J. D. and S. H. Schoenholtz. 1997. Measuring the environmental effects of converting cropland to short-rotation woody crops: A research approach. Biomass and Bioenergy 13, 4-5:301-311.

Kavalov B., Peteves S. D.2004 Bioheat application in the European union: an analysis and prospective for 2010. Petten, The Netherlands, European Commission, Directorate General, www.ie.jrc.cec.eu.int.

Kenney WA, Gambles RL Sennerby-Forsse L. 1992. Feedstock characteristic and quality. edited by Mitchell CP, Ford-Robertson JB Hinckley T Sennerby-Forsse L. Ecophysiology of short rotation forest crops ed. (London: Elsevier).

Kintisch E. 2001. Spirit of the road. New Scientist 2274.

Klasnja, B., S. Kopitovic, and S. Orlovic. 2002. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. Biomass and Bioenergy 23, 6:427-432.

Koubaa, A., R. E. ndez, and M. Beaudoin. 1998. Shrinkage of fast-growing hybrid poplar clones. Forest Products Journal 48, 4:82-87.

Lakner K.S.L., Sachs J. D. 2005. A Robust Strategy for Sustainable Energy. Brookings Papers on Economic Activity 2.

Laureysens I., Deraedt W. Indeherberge T. Ceulemans R. 2003. Population dynamics in a six-year old coppice culture of poplar. Clonal differences in stool mortality, shoot dynamics and shoot diameter distribution in relation to biomass production. *Biomass and Bioenergy* 24:81-95.

Laureysens I., Pellis A. Willems J. Ceulemans R. 2005. Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar.III.Second rotation results. *Biomass and Bioenergy* 29:10-21.

Laureysens, I., J. Bogaert, R. Blust, and R. Ceulemans. 2004. Biomass production of 17 poplar clones in a short - rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Forest Ecology and Management* 187:295-309.

Liberloo M., Gielen B. Calfapietra C. Veys C. Pigliacelli R. Scarascia-Mugnozza G. Ceulemans R. 2004. Growth of a poplar short rotation coppice under elevated atmospheric CO₂ concentrations (EUROFACE) depends on fertilization and species. *Ann.For.Sci* 61:299-307.

Magnussen, S., V. G. Smith, and C. W. Yeatman. 1985. Tree size, biomass, and volume growth of twelve 34-year-old Ontario jack pine provenances. *Canadian Journal of Forest Research* 15, 6:1129-1136.

Malhi Y., Meir P. Brown S. 2004. Foreste, carbonio e clima globale. CO₂ e Biodiversità - Un approccio integrato a favore del clima e del patrimonio naturale Ed. Ambiente Milano.

Mareschi L., Paris P. Sabatti M. Nardin F. Giovanardi R Manazzone S. Scarascia Mugnozza G. 2005. Le nuove varietà di pioppo da biomassa garantiscono produttività interessanti. *L'Informatore Agrario*, 18: 49-53. *L'Informatoere Agrario* 18:49-53.

Marland G., Boden T. A. Andres R. J.2005 *Global, Regional, and National CO₂ Emissions*. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

Marland, G. and B. Schlamadinger. Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? a sensitivity analysis. *World Forestry Congress*.

Mc Cloy B.W., O'Conner D. V.1998 *Wood Ethanol: A BC Value Added Opportunity*. Prepared for the Ministry of Environment, Land & Parks and Environment Canada - Pacific & Yukon Region.

Mezzalira G. 2005. Short Rotation Forestry, lavori in corso! *Terra e Vita* 36:77-81.

Minotta G. 2000 Gli impianti di specie legnose a corta rotazione per la produzione di biomassa a fini energetici: quali prospettive per gli ambienti italiani? *Atti convegno: Biomasse agricole e forestali per uso energetico*". Allerona (TR), 28-29 settembre.

Mitchell, C. P. 1999. New cultural treatments and yield optimisation. *Biomass and Bioenergy* 16, 1:89.

Olson J.R., Jourdain C. R. Rosseau R. J. 1985. Selection for cellulose content, specific gravity and volume in young *Populus deltoides* clones. Canadian Journal Forest Research 15:393-396.

Paris P., Pisanelli A. Olimpieri G. Cherubini M. Cannata F. 1999 La robinia (*Robinia pseudoacacia* L.) nella Short Rotation Forestry: influenza della distanza d'impianto e del turno sulla produttività. Poster presentato al XXXIII convegno annuale della Società Italiana di Agronomia "Le Colture non Alimentari", AGRIPOLIS . Legnaro (PD) 20-23 settembre.

Pellis, A., I. Laureysens, and R. Ceulemans. 2004. Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar I. Clonal differences in leaf characteristics in relation to biomass production. Biomass and Bioenergy 27, 1:9-19.

Piccioni E., Bonari E. 2006. SRF di pioppo nella pianura litoranea toscana. Sherwood 128:31-36.

Pliura, A., S. Y. Zhang, J. Bousquet, and J. MacKay. 2006. Age trends in genotypic variation of wood density and its intra-ring components in young poplar hybrid crosses. Annals of Forest Science 63, 7:673-685.

Pontailleur, J. Y., R. Ceulemans, and J. Guittet. 1999. Biomass yield of poplar after five 2-year coppice rotations. Forestry 72, 2:157-163.

Post, W. M. and K. C. Kwon. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. Global Change Biology 6, 3:317-327.

Punshon T, Dickinson NM. 1997. Mobilisation of heavy metals using short-rotation coppice. In *Aspects of Applied Biology* .

Robert P. 1984. De la forêt aux chaufferies à bois. Idf, Parigi.

Rosenqvist, H. and M. Dawson. 2005. Economics of willow growing in Northern Ireland. Biomass and Bioenergy 28, 1:7-14.

Rytter, L. 2002. Nutrient content in stems of hybrid aspen as affected by tree age and tree size and nutrient removal with harvest. Biomass and Bioenergy 23, 1:13-25.

Sabatti M., Kuzminsky E. Giordano E. Anselmi N. Scarascia Mugnozza G. 2000. Esperienze di rinaturalizzazione di terreni agricoli in pianura padana mediante piantagioni forestali. Italia Forestale e Montana, 4:241-252.

Samson R., Mehdi B. 1998 Strategies to reduce the ash content in perennial grasses. R.E.A.P. Canada. BioEnergy '98. Expanding BioEnergy Partnerships.

Sander, M. L. and T. Ericsson. 1998. Vertical distributions of plant nutrients and heavy metals in *Salix viminalis* stems and their implications for sampling. Biomass and Bioenergy 14, 1:57-66.

Scarascia-Mugnozza G., Ceulemans R. Heilman P. E. Isebrands J. G. Stettler R. F. and Hinckley T. M. 1997. Production physiology and morphology of *Populus* species and their

hybrids grown under short rotation. II. Biomass components and harvest index of hybrid and parental species clones. *Canadian Journal Forest Research* 27:285-294.

Scarascia Mugnozza G., De Angelis P. Sabatti M. Calfapietra C. 2005. Dall'albero all'ecosistema: Un esperimento a scala di sistema agro-forestale per la mitigazione dei cambiamenti ambientali. In *Foreste Ricerca Cultura. Scritti in onore di Orazio Ciancio*, edited by Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze.

Scarascia Mugnozza G. 2006. Produzioni agroforestali e benefici ambientali. *Terra e Vita* Supplemento al n° 5.

Schenone G. 1997. *Selvicoltura a breve rotazione (SRF) per la produzione di biomassa ad uso energetico. Rapporto di avanzamento 1995*. Edited by ENEL-CRAM. MILANO.

Schlamadinger, B. and G. Marland. 1996. The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. *Biomass and Bioenergy* 10, 5-6:275-300.

Sedjo R.A. 2001. From foraging to cropping: the transition to plantation forestry and implications for wood supply and demand. *Unasylva* 52.

Shafizadeh F., Chin P. S. 1977. *Thermal deterioration of wood*. Edited by Acs Press. I.S. ed. Vol. Wood Technology: Chemical Aspects Washington, D.C..

Soltes J., Milne T. A. 1988 Pyrolysis oils from biomass. America chemical society. Washington D.C.

Spinelli R., Nati C. Magagnotti N. Moscatelli M. 2006. La raccolta del pioppo a ciclo breve. *L'Informatore Agrario* 28, Speciale Biomasse:32-35.

Telenius, B. and T. Verwijst. 1995. The influence of allometric variation, vertical biomass distribution and sampling procedure on biomass estimates in commercial short-rotation forests. *Bioresource Technology* 51, 2-3:247-253.

Telenius, B. 1999. Stand growth of deciduous pioneer tree species on fertile agricultural land in southern Sweden. *Biomass and Bioenergy* 16:13-23.

Tillmann D.A. 1981. Review of mechanism associated with wood combustion. *Wood Science* 13.

Timmell T.E. 1986. *Compression Wood in gymnosperms*. Springer, Berlin.

Van Miegroet, H., R. J. Norby, and T. J. Tschaplinski. 1994. Nitrogen fertilization strategies in a short-rotation sycamore plantation. *Forest Ecology and Management* 64, 1:13-24.

Vande Walle I., Van Camp N. Van de Castele L. Verheyen K. Lemeur R. 2007. Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) I—Biomass production after 4 years of tree growth. *Biomass and Bioenergy* 31, 5:267-275.

Verwijst, T. and B. Telenius. 1999. Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management* 121, 1-2:137-146.

Vogel M.2003 Heating with wood. Principles of Combustion. MSU Extension Service. MT198405 HR reprinted 3 /2003.

Wenzl H.1970 The chemical technology of wood. Academic press, New York, NY.

Yu, Q., P. Pulkkinen, M. Rautio, M. Haapanen, R. Ale?n, L. G. Stener, E. Beuker, and P. M. A. Tigerstedt. 2001. Genetic control of wood physicochemical properties, growth, and phenology in hybrid aspen clones. Canadian Journal of Forest Research 31, 8:1348-1356.

Zhu S., Tomberlin D. Buongiorno J.1999 Global Forest products consumption, production, trade and prices: global forest products model projections to 2010. GFPOS/WP/01,FAO.

Zsuffa, L., W. A. Kenney, and R. L. Gambles. 1992. Wood feedstock qualities for energy conversion and the potential for their biological improvement. Biomass & bioenergy 2, 1-6:55-69.

Zucconi F.2000 Energia dalle biomasse: Progetti ed utopie di un mondo in rapida trasformazione. Inaugurazione Anno Accademico 1998-1999. 15-38. Università degli Studi di Ancona.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Azienda Alasia Franco Viavai, in modo particolare il Dott. Nardin Fabrizio per il concreto supporto nell'attività di rilievo dei dati sperimentali.

Grazie a tutto il personale del Di.S.A.F.R.I., al Prof. P. De Angelis *in primis* che non ha mai fatto mancare consigli e sostegno specialmente nella fase di analisi di laboratorio ed al Dr. M. Sabatti per i preziosi indirizzi nell'organizzazione della analisi statistica dei risultati.

Grazie a tutto il personale dell'I.B.A.F. – CNR di Porano per la concreta collaborazione quasi quotidiana, in modo particolare al mio Co-Tutore Dr. P. Paris ed infine un grazie davvero speciale al Prof. G. Scarascia Mugnozza che mi ha concesso la sua disponibilità nella progettazione e nell'esecuzione dello studio, oltre che la sua sapiente supervisione durante tutti i tre anni del dottorato di ricerca.

Università degli Studi della Tuscia
Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse (DISAFRI)
Via S. Camillo de Lellis, snc 01100 Viterbo

Corso di Dottorato di Ricerca in Ecologia Forestale
Coordinatore: Prof. Paolo De Angelis

Tesi di Dottorato di Ricerca in Ecologia Forestale (XIX ciclo)
di: Leonardo Mareschi

Gennaio 2008