

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI AGRARIA

Dottorato in

**VALORIZZAZIONE E GESTIONE DELLE RISORSE
AGROFORESTALI**

XXVI ciclo

**Dinamica di crescita e risposta produttiva di una
coltura da biomassa lignocellulosica (*Arundo donax L.*)
in tre ambienti del territorio campano**

ADRIANA IMPAGLIAZZO

Tutor:

Prof. Fabrizio Quaglietta Chiarandà

Co-Tutor:

Prof. Massimo Fagnano

Coordinatore:

Prof. Guido D'Urso

INDICE

PARTE MONOGRAFICA

| | |
|--------------------------------------------------------------------|---------|
| PREMESSA | pag. 5 |
| 1. INTRODUZIONE | pag. 6 |
| 1.1 Perché coltivare le specie da energia | pag. 6 |
| 1.2 Necessità di superfici per le colture energetiche | pag. 8 |
| 1.3 Il quadro normativo per le agro energie | pag. 9 |
| 1.3.1 Situazione energetica e politiche di riferimento | pag. 9 |
| 1.3.2 I Biocarburanti a livello mondiale | pag. 12 |
| 1.3.3 I Biocarburanti in Italia | pag. 13 |
| 1.3.4 La politica comunitaria e regionale per le agro energie | pag. 14 |
| 1.4 Biomasse | pag. 16 |
| 1.5 Colture dedicate ad uso energetico | pag. 17 |
| 1.5.1 Colture da carboidrati | pag. 18 |
| 1.5.2 Colture oleaginose | pag. 18 |
| 1.5.3 Colture lignocellulosiche | pag. 19 |
| 1.5.3.1 Arboree | pag. 20 |
| 1.5.3.2 Erbacee annuali | pag. 20 |
| 1.5.3.3 Erbacee poliennali | pag. 21 |
| 1.6 Processi e prodotti realizzabili | pag. 23 |
| 1.6.1 Filiera carboidrati | pag. 23 |
| 1.6.2 Filiera lipidi | pag. 24 |
| 1.6.3 Filiera lignocellulosica | pag. 25 |
| 1.7 Coltura in esame: Canna comune (<i>Arundo donax L.</i>) | pag. 27 |
| 1.7.1 Inquadramento botanico | pag. 27 |
| 1.7.2 Esigenze e adattamento ambientale | pag. 28 |
| 1.7.3 Aspetti ambientali | pag. 29 |
| 1.7.4 Tecnica colturale | pag. 30 |
| 1.7.5 Raccolta | pag. 33 |
| 1.7.6 Produzione | pag. 34 |
| 1.7.7 Usi tecnologici | pag. 34 |
| 1.7.8 Bilancio energetico | pag. 36 |

| | | |
|---------------------------|----------------------------------------------------------|---------|
| 1.8 | Scopo della ricerca | pag. 37 |
| PARTE SPERIMENTALE | | |
| 2. | MATERIALI E METODI | pag. 38 |
| 2.1 | Descrizione dei siti sperimentali | pag. 38 |
| 2.1.1 | Sito di Bellizzi (SA) | pag. 38 |
| 2.1.2 | Sito di Acerra (NA) | pag. 39 |
| 2.1.3 | Sito di Sant'Angelo dei Lombardi (AV) | pag. 41 |
| 2.2 | Rilievi sulla coltura | pag. 42 |
| 2.2.1 | Raccolta della biomassa aerea | pag. 42 |
| 2.2.2 | Analisi di crescita (Growth analysys) | pag. 43 |
| 2.3 | Rilievi sul suolo | pag. 46 |
| 2.4 | Elaborazioni statistiche | pag. 46 |
| 3. | RISULTATI E DISCUSSIONI | pag. 47 |
| 3.1 | Sito sperimentale di Bellizzi (SA) | pag. 47 |
| 3.1.1 | Andamento climatico | pag. 47 |
| 3.1.2 | Produzione | pag. 49 |
| 3.1.3 | Asportazione di azoto | pag. 51 |
| 3.1.4 | Analisi di crescita | pag. 52 |
| 3.1.4.1 | Analisi di crescita 2011 | pag. 52 |
| 3.1.4.2 | Analisi di crescita e asportazione 2012 | pag. 56 |
| 3.1.4.3 | Analisi di crescita e asportazione 2013 | pag. 62 |
| 3.1.4.4 | Sintesi delle differenze comportamentali nei tre anni | pag. 67 |
| 3.2 | Sito sperimentale di Acerra (NA) | pag. 69 |
| 3.2.1 | Andamento climatico | pag. 69 |
| 3.2.2 | Produzione | pag. 71 |
| 3.2.3 | Asportazione di Azoto | pag. 73 |
| 3.2.4 | Analisi di crescita | pag. 74 |

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 3.2.4.1 | Analisi di crescita 2011 | pag. 74 |
| 3.2.4.2 | Analisi di crescita e asportazioni 2012 | pag. 79 |
| 3.2.4.3 | Sintesi delle differenze comportamentali nei due anni | pag. 85 |
| 3.3 | Sito sperimentale di Sant'Angelo dei Lombardi (AV) | pag. 86 |
| 3.3.1 | Andamento climatico | pag. 86 |
| 3.3.2 | Produzione | pag. 88 |
| 3.3.3 | Asportazione di Azoto | pag. 89 |
| 3.3.4 | Analisi di crescita | pag. 91 |
| 3.3.4.1 | Analisi di crescita e asportazioni 2012 | pag.91 |
| 3.3.4.2 | Analisi di crescita e asportazioni 2013 | pag.96 |
| 3.3.4.3 | Sintesi delle differenze comportamentali nei due anni | pag. 102 |
| 3.4 | Sintesi del confronto delle risposte produttive dei tre siti | pag. 103 |
| 3.5 | Bilanci parziali di carbonio e azoto organico nel suolo | pag. 105 |
| 4. | APPROFONDIMENTO: | |
| | Determinazione della Water Productivity (WP) nel sito di Bellizzi (SA) | pag. 111 |
| 4.1 | Determinazione del parametro WP per l'Arundo donax per gli anni 2012 – 2013 | pag. 113 |
| 4.2 | Risultati simulazioni modellistiche e determinazione del WP in entrambi le tesi al confronto | pag. 119 |
| 5. | CONCLUSIONI | pag. 125 |
| 6. | BIBLIOGRAFIA | pag. 129 |

PREMESSA

Le preoccupazioni per l'esaurimento delle risorse energetiche derivanti da energia fossile, hanno portato negli ultimi anni ad una maggiore attenzione verso fonti energetiche alternative rinnovabili, in particolare verso il settore agro energetico, il quale rappresenta una importante opportunità per lo sviluppo di riforme in campo sociale, ambientale ed economico. Inoltre, le filiere bioenergetiche offrono l'opportunità per compiere operazioni di tutela e valorizzazione ambientale, riducendo le emissioni di inquinanti atmosferici (con i conseguenti effetti positivi sul riscaldamento globale ed i cambiamenti climatici) seguendo di fatto gli indirizzi comunitari, e, contribuendo a risolvere il problema dell'approvvigionamento energetico, soprattutto nei Paesi non energeticamente autosufficienti e indipendenti.

E' importante sottolineare che il fabbisogno energetico globale è tale per cui, anche utilizzando a fini energetici tutta la produzione delle colture oggi impiegate per produrre biocarburanti, il fabbisogno non sarebbe soddisfatto ma si andrebbe a coprire solo una piccola porzione di esso. I biocarburanti sono solo una parte (circa il 2%) dell'insieme più grande delle cosiddette bioenergie (o energie da biomasse) che rappresentano circa il 70% delle cosiddette energie rinnovabili, le quali, allo stato attuale, coprono una porzione limitata del fabbisogno globale (18%) per la quale i biocarburanti concorrono con lo 0,3% (REN21, 2008).

Pensare all'uso dei biocombustibili come una soluzione del problema energetico è da considerarsi del tutto fuori luogo in quanto non perseguibile, anche se è bene non dimenticare che esistono altre risorse energetiche rinnovabili potenzialmente, di maggior portata, come l'ampia classe delle cosiddette bioenergie. (Esposti, 2008).

Alcune bioenergie non pongono il problema della competizione tra uso alimentare ed energetico delle risorse agricole, essendo basate su sottoprodotti o scarti, ma addirittura consentono all'agricoltore di ricavarne un beneficio economico grazie ad una minore intermediazione del settore della trasformazione industriale (filiera corte). Possono essere economicamente valide anche a piccola scala, rendendosi particolarmente interessanti anche per sistemi agricoli di molte realtà italiane. Va inoltre ricordato che, anche la coltivazione di "colture dedicate" per le bioenergie possono avere ricadute positive sul territorio, se ben inserite, soprattutto nel caso in cui vengano utilizzati suoli poco adatti per la coltivazione di colture alimentari.

1. INTRODUZIONE

1.1 Perché coltivare le specie da energia

Lo sviluppo delle fonti rinnovabili, con particolare attenzione allo sviluppo del settore agro-energetico, potrebbe risultare un'ottima opportunità per implementare importanti riforme in campo sociale, ambientale ed economico. L'utilizzo delle biomasse a fini energetici è una delle possibili strategie per ridurre le emissioni di CO₂ e di non contribuire direttamente all'effetto serra, poiché la quantità di CO₂ rilasciata durante la decomposizione, sia che essa avvenga naturalmente sia per effetto della conversione energetica, è equivalente a quella assorbita durante la crescita della biomassa stessa. Non vi è, quindi, un contributo netto che generi aumento del livello di CO₂ nell'ambiente. La compensazione delle emissioni di anidride carbonica avviene grazie all'azione di cattura da parte delle colture (radici, paglia e semi) e all'accumulo (sequestro) in forma organica nel suolo; fattore chiave è il tempo di permanenza del carbonio nel suolo stesso. Come ormai è ben noto, il suolo rappresenta la più cospicua riserva di carbonio (C) degli ecosistemi terrestri su scala mondiale: del solo carbonio organico esistono 1550 Gt (1 Gt = 1000 milioni di tonnellate) fino a 1 m di profondità; di quello inorganico ce ne sono invece 950 Gt. Il carbonio organico del suolo rappresenta da solo più della riserva biotica (560 Gt) e atmosferica (760 Gt) messe insieme (Lal, 2004). Il Protocollo di Kyoto sottolinea che il suolo svolge una funzione importante per lo stoccaggio del carbonio, che deve essere tutelata e, se possibile, anche rafforzata. (COM(2006) 231). I segnali di cambiamento climatico generano diverse preoccupazioni per il futuro del pianeta, le emissioni di anidride carbonica sono aumentate di oltre l'80% dai primi anni '70 al 2004, principalmente a causa dell'utilizzo di combustibili fossili (IPCC, 2007), ed in misura minore, dai cambiamenti nell'utilizzo del suolo. L'innalzamento della temperatura globale è ancor più preoccupante in visione dell'incremento notevole di emissioni che è previsto per i prossimi decenni (IPCC, 2007), soprattutto dovuto all'avanzamento economico dei paesi in via di sviluppo che non può prescindere da un aumento dei consumi energetici e, conseguentemente, delle emissioni di gas climalteranti. Tra le strategie per la riduzione dei gas serra e per la mitigazione dei cambiamenti climatici, si richiede all'agricoltura di ridurre le proprie emissioni di gas serra (10% del totale delle emissioni di gas serra) (Freibauer, 2003). L'agricoltura può contribuire in maniera significativa alla mitigazione dei cambiamenti climatici attraverso l'adozione di pratiche colturali basate su lavorazioni conservative o fertilizzazione con compost che a livello globale potrebbero sequestrare 25 Gt C nei prossimi 50 anni (Pacala e Socolow, 2004).

Il primo strumento comunitario diretto alla riduzione del riscaldamento globale, avviato nel 2000, è stato quello del Programma europeo sui cambiamenti climatici (*European Climate Change Programme - ECCP*) che ha dato origine a misure specifiche per la promozione delle fonti rinnovabili, per la produzione energetica a ciclo combinato, il risparmio energetico ed il settore dei trasporti nonché cattura e stoccaggio della CO₂, gas fluororati, ecc.

Il gruppo specifico di lavoro sui *sink* di assorbimento connessi ai settori agricoli, costituito nell'ambito dell' (ECCP), ha stimato il potenziale di sequestro del carbonio a circa l'1.5-1.7 % delle emissioni di CO₂ di origine antropica dell'UE nel primo periodo di impegno previsto dal Protocollo di Kyoto. In un contesto di cambiamento climatico futuro, nuovi sistemi di produzione agricola dovrebbero essere sviluppati che integrino sistemi produttivi bioenergetici, alimentari e mangimistici. Infatti, nell'ultimo decennio si è sempre più consolidata una visione multifunzionale dell'agricoltura: (a) la conversione verso modelli colturali a basso input, per l'adozione di metodi colturali integrati e biologici; (b) la conservazione di pratiche atte a tutelare il paesaggio rurale e a mantenere le sistemazioni idraulico-agrarie, anche in territori predisposti a fenomeni di marginalizzazione; (c) produzioni con finalità non alimentari che permettono di derivare materie prime a sostituzione dei prodotti di sintesi e l'utilizzazione a tali fini dei sottoprodotti colturali e industriali. Questo potrebbe essere ottenuto con colture perenni a basso impatto ambientale (ovvero senza irrigazione e fertilizzati con compost da residui organici) che riescano a fornire materie prime per bio-raffinerie per la produzione di biocarburanti, biomateriali e mangimi per il bestiame (Smith and Olesen, 2010). Anche se alcuni Autori (McKendry, 2002) segnalano che la situazione economica del settore agricolo nella UE, caratterizzato da eccedenze alimentari nella UE, può essere migliorata con l'introduzione di colture da biomassa come alternativa alle colture alimentari tradizionali, tuttavia, la concorrenza per la risorsa terra tra colture alimentari e non alimentari deve essere evitata.

1.2 Necessità di superfici per le colture da energia

La riduzione della disponibilità di prodotti petroliferi ed il conseguente prevedibile aumento dei prezzi sta spingendo le principali industrie ad intensificare i loro investimenti nel settore della chimica verde basato sull'uso di risorse rinnovabili quali le biomasse verdi e le molecole prodotte dalla fotosintesi (cellulosa, lignina, trigliceridi, ecc).

Gli incentivi dedicati alle colture energetiche potrebbero avere effetti "distorsivi" sul mercato agricolo, riducendo così la disponibilità di cibo e di conseguenza aumentando il loro prezzo, fino a determinare il "*land grabbing*" che seriamente può ridurre la sicurezza alimentare in vaste aree del mondo (Scheidel e Sorman, 2012; Wong, 2012). La recente crescita nella domanda di terreni si sta verificando su una scala senza precedenti, la loro acquisizione per l'espansione agricola non è una novità nella storia, ma oltre alla produzione di biocarburanti, le cause di tali offerte di terreni agricoli stanno rappresentando una minaccia per la sicurezza alimentare (GRAIN, 2008). Un'altra serie di processi che aumentano in modo significativo il fenomeno "*land grabbing*" sono da attribuire all'espansione delle aree protette e di eco-turismo, acquisti di terreni da parte dei migranti nel loro paese d'origine, la migrazione residenziale, progetti turistici e creazione di infrastrutture su vasta scala (Zoomers, 2010).

Prima del 2008, per esempio, l'espansione dei terreni agricoli annuo medio è stato meno di 4 milioni di ettari. Attualmente, le offerte di terra annunciate entro un solo anno (2008-2009) sono pari a 45 milioni di ettari a livello globale (Scheidel e Sorman, 2012). Ciò ha determinato un ampio dibattito sull'impatto sociale della produzione di bioenergia/biocarburanti (van der Horst e Vermeylen, 2011) e la necessità di sviluppare forme efficaci per la certificazione di sostenibilità (Scarlat e Dallemand, 2011). Come detto in precedenza, In questo contesto è importante che le colture energetiche non vadano in contrasto con le colture alimentari evitando di sottrarre suoli utili per le colture tradizionali. Le biomasse da energia dovrebbero essere coltivate sui suoli non idonei per le colture alimentari, come ad esempio suoli con falda affiorante, suoli con falda salina, suoli inquinati e suoli di aree marginali.

In questi ambienti le specie dedicate ad uso energetico potrebbero avere un notevole sviluppo ed una sostenibilità sociale ed economica tale da rilanciare il settore agrario e contrastare l'abbandono dei territori più disagiati.

Per contro autori come Connor et al. (2011) hanno sostenuto che non vi è alcuna possibilità che le colture energetiche possano essere coltivate su un suolo che non è adatto per colture

alimentari. Dal momento che le colture energetiche dedicate sono inevitabilmente in concorrenza con quelle alimentari per la terra, sostanze nutritive e di acqua, è obbligatorio che i terreni destinati alla produzione di biocarburanti siano effettivamente sfruttati coltivando specie ad alto rendimento. Pertanto, la produttività comparata delle diverse specie è di primaria importanza per l'industria dei biocarburanti (Kiniry et al., 2012).

1.3 Il quadro normativo per le agro energie

1.3.1 Situazione energetica e politiche di riferimento

La domanda di energia cresce nel mondo ad un ritmo elevato, soprattutto in virtù del forte sviluppo dei paesi emergenti asiatici e di pari passo aumenta anche il consumo di fonti energetiche primarie. Si prevede che la domanda mondiale di energia aumenterà di circa l'1.8% tra il 2000 e il 2030. L'impatto della crescita economica e demografica (rispettivamente del 3.1% e dell'1% l'anno in media) è attenuato da una riduzione dell'intensità energetica dell'1.2% dovuta all'effetto combinato dei cambiamenti strutturali in campo economico, del progresso tecnologico e dell'aumento dei prezzi energetici. Nei paesi industrializzati si registra un rallentamento della crescita della domanda di energia pari, nell'UE, allo 0.4% l'anno. Viceversa, la domanda di energia dei paesi in via di sviluppo aumenta rapidamente. Si prevede che nel 2030 oltre la metà della domanda di energia verrà dai paesi in via di sviluppo, rispetto al 40% attuale.

Il sistema energetico mondiale continuerà ad essere dominato dai combustibili fossili che rappresenteranno quasi il 90% dell'approvvigionamento complessivo di energia nel 2030. Il petrolio resterà la fonte principale di energia (34%), seguito dal carbone (28%). Nell'UE, si prevede che il gas naturale rappresenterà la seconda principale fonte di energia, dopo il petrolio ma prima del carbone e della lignite. Le energie nucleari e rinnovabili rappresenteranno nell'insieme poco meno del 20% dell'approvvigionamento energetico dell'UE.

L'Unione Europea ha sottoscritto diversi accordi internazionali per la riduzione delle emissioni di anidride carbonica in atmosfera, e recentemente anche altri paesi che non avevano aderito in passato a tali accordi stanno riconsiderando le proprie posizioni. La situazione energetica e i vincoli ambientali hanno delineato precise scelte politiche all'interno dell'UE, ponendo vincoli ai paesi membri per il raggiungimento di determinati obiettivi in tempi prestabiliti. L'Unione Europea deve affrontare problematiche energetiche reali sia sotto il profilo della sostenibilità e delle emissioni dei gas serra che dal punto di vista

della sicurezza dell'approvvigionamento e della dipendenza dalle importazioni, senza dimenticare la competitività e la realizzazione effettiva del mercato interno dell'energia.

La promozione e l'incentivazione delle energie rinnovabili ha avuto il suo inizio con la firma nel dicembre 1997 del Protocollo di Kyoto che impegnava i Paesi industrializzati e quelli con economia in transizione a ridurre nel quinquennio 2008-2012 dell'8% i livelli di emissione dei principali gas serra prodotti dall'attività antropica. Dieci anni più tardi il Consiglio, congiuntamente al Parlamento europeo, intervenne sul tema con il cosiddetto "Pacchetto Clima-Energia", fissando obiettivi molto ambiziosi e impegnandosi entro il 2020 a ridurre del 20% le emissioni di gas serra, di aumentare del 20% l'efficienza energetica rispetto ai livelli del 1990 ed infine, di contare su un mix energetico proveniente per il 20% da fonti rinnovabili e tra queste, l'8% dovrà essere generato da biomasse e biocarburanti, arrivando a fissare per questi un minimo obbligatorio per l'utilizzo, promuovendo biocarburanti di "seconda generazione" a minor impatto ambientale, provenienti da materiale forestale e graminacee. Gli obiettivi comunitari sono stati fissati ripartendoli in maniera differenziata sulla base dello stesso meccanismo del Protocollo di Kyoto, che tiene conto delle posizioni di partenza dei singoli Paesi. Pertanto, la quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale di energia al 2020 fissata per l'Italia è pari al 17%.

Di conseguenza, nel 2009 il Consiglio europeo ed il Parlamento europeo hanno adottato il pacchetto integrato clima ed energia contenente la seguente normativa:

- Decisione n. 406/2009/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, concernente gli sforzi degli Stati membri per ridurre le emissioni dei gas a effetto serra entro il 2020 in settori non rientranti nel sistema comunitario di scambio delle quote di emissione (come il settore agro-forestale, i trasporti, l'edilizia, i servizi, i piccoli impianti industriali e i rifiuti), per l'Italia, il valore di riduzione al 2020, corrisponde a -13% rispetto alle emissioni del 2005.
- Direttiva 2009/29/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 che modifica la Direttiva 2003/87/CE al fine di perfezionare ed estendere il sistema comunitario per lo scambio di quote di emissione di gas a effetto serra: sono aboliti i piani di assegnazione delle quote nazionali e viene esteso l'ambito di applicazione della direttiva;
- Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE: viene istituito un

quadro comune per la produzione e la promozione di energia a partire da fonti rinnovabili e per ciascuno Stato membro è fissato un obiettivo per la quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia entro il 2020. Inoltre gli Stati membri sono obbligati ad adottare un piano di azione nazionale che fissa la quota di energia da fonti rinnovabili consumata nel settore dei trasporti, dell'elettricità e del riscaldamento per il 2020.

Nell'ambito delle misure su energia e cambiamenti climatici, le istituzioni europee hanno adottato nel 2009 la seguente normativa:

- Direttiva 2009/30/CE, del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, sulle specifiche relative a benzina, combustibile diesel e gasolio;
- Direttiva 2009/31/CE, del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, sullo stoccaggio geologico di biossido di carbonio;
- Direttiva 2009/33/CE, del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, sulla promozione di veicoli a basso consumo energetico.

L'Italia ha ratificato il Protocollo di Kyoto con la legge 120 del primo giugno 2002. La responsabilità del rispetto degli obblighi del Protocollo di Kyoto è attribuita al governo italiano, anche se alcune politiche sono dirette da Regioni, Province e Comuni. Con la Delibera CIPE n.123/2002 il Governo ha approvato il Piano nazionale di riduzione delle emissioni di gas serra, documento di riferimento per l'attuazione del Protocollo di Kyoto in Italia. All'interno di tale Piano, particolare attenzione è rivolta al settore agro-forestale e al suo potenziale contributo per il raggiungimento dell'obiettivo nazionale di riduzione delle emissioni di gas serra. La delibera è stata aggiornata nel corso del 2007 per quel che riguarda i valori di emissione del 1990, e di conseguenza il target di Kyoto e lo scenario tendenziale al 2010. L'inventario nazionale delle emissioni di gas ad effetto serra relativo all'anno 2008, presentato alla convenzione UNFCCC, evidenzia che le emissioni totali di gas serra, escludendo gli assorbimenti di CO₂ da parte del settore agroforestale, sono aumentate dal 1990 al 2008 del 4.7%, passando da 517 MtCO₂eq del 1990 a 541 MtCO₂eq del 2008 (ISPRA 2010), le quali, al fine del conseguimento del nostro obiettivo di riduzione di emissioni, dovranno essere ridotte del 11.2% entro il 2012.

1.3.2 I Biocarburanti a livello mondiale

La produzione di biocarburanti a livello mondiale è fortemente concentrata in pochi Paesi: Usa, Brasile, ed UE. Oltre il 75% della produzione mondiale di biocarburante si concentra in Brasile e Usa in proporzioni pressoché uguali in cui la produzione di bioetanolo prevale nettamente rispetto a quella di biodiesel (rispettivamente, circa 80% e 20% sul totale). La produzione di bioetanolo in Brasile si è consolidata nel tempo a partire già negli anni '70, ed ha continuato la sua crescita anche di recente ma a tassi abbastanza contenuti; al contrario, la produzione di bioetanolo era trascurabile negli Usa fino ad un decennio fa ed è cresciuta repentinamente negli ultimi anni (raddoppiando tra 2004 e 2007). Quindi, gli Usa sono avviati ad essere stabilmente il principale produttore di bioetanolo nel mondo.

Circa l'11% della produzione mondiale di biocarburante è costituito dal biodiesel prodotto dalla UE (che, da sola, ne realizza oltre il 60% della produzione mondiale). La produzione di biodiesel è fortemente concentrata in Germania (circa il 50%) e in Francia (15%) che detengono anche le più elevate quote di produzione di bioetanolo (nel 2007, circa 23% e 26%, rispettivamente, seguiti dalla Spagna che deteneva il primato fino al 2005). L'Italia detiene il 9% per bioetanolo e il 6% per biodiesel. (Fonte: Elaborazioni su dati F.O. Licht).

Diversi altri grandi Paesi agricoli si stanno affacciando al business, sia del bioetanolo che del biodiesel, con tassi di crescita elevati: in particolare, Cina, Australia ed Argentina, a cui si aggiungono Canada, India, Colombia, Indonesia, Thailandia. Anche il primato della UE nella produzione di biodiesel si è consolidato negli ultimi anni, i rapporti di forza sembrano consolidati con Germania e Francia che prima e più di altri hanno puntato su questi comparti. Per quanto riguarda la matrice agricola (mais e semi oleosi), in particolare, Italia e Spagna vantano superfici e volumi che consentirebbero analoghe performance nella produzione di biocarburante.

È piuttosto la componente industriale (energetica, ma anche automobilistica ed alimentare) e l'intera filiera agro energetica ad essersi organizzata prima in questa direzione, accompagnata dalle politiche nazionali di promozione del comparto. Per questo motivo, se e quanto più il business dei biocarburanti risulterà di successo nei prossimi anni, difficilmente tali rapporti di forza potranno essere modificati nel breve-medio termine.

Il Fondo Monetario Internazionale (Lipsky, 2008) valuta che i biocarburanti abbiano determinato il 70% dell'aumento recente dei prezzi del mais ed il 40% della soia; Mitchell (2008) uno dei capo-economisti della Banca Mondiale, in una recentissima e controversa nota, peraltro resa pubblica a titolo personale e non come posizione ufficiale della Banca

Mondiale (Chakraborty, 2008), attribuisce ai biocarburanti il 75% del rialzo dei prezzi agricoli degli ultimi due anni. La vera impennata dei prezzi secondo Fischer Boel (2008) è la crescita della domanda alimentare nei Paesi emergenti che, tra l'altro, si accompagna ad un cambiamento della dieta che privilegia maggiormente la carne con conseguente ricaduta in crescente domanda di alimenti per animali; una contrazione dell'offerta, soprattutto di cereali, in alcune grandi aree produttrici (da Australia, a Russia e Canada) a causa di annate climaticamente sfavorevoli che, peraltro, potrebbero in parte essere ricondotte ad un cambiamento strutturale del clima stesso per via dell'effetto-serra (proprio ciò che i biocarburanti vorrebbero contribuire a contenere); il già analizzato aumento del prezzo petrolio che si riflette sui costi e quindi sui prezzi agricoli; le speculazioni, soprattutto dopo che su questi mercati, viste le difficoltà delle piazze finanziarie, si sono riversate ingenti quantità di risorse e notevole interesse speculativo (Vaciago, 2008).

1.3.3 I Biocarburanti in Italia

La strategia italiana per l'impiego di biocarburanti sul territorio si basa su:

- il recepimento della normativa europea di riferimento, al fine del raggiungimento degli obiettivi stabiliti dall'UE;
- il provvedimento relativo alla costituzione di adeguate forme di incentivazione.

In particolare, si fa riferimento alla Direttiva 2003/30/CE, recepita con la Legge finanziaria 2007, che istituisce un quadro chiaro e preciso che traccia un percorso progressivo dal 2008 (con obiettivi per la miscelazione di biocarburanti del 2%), per concludersi nel 2010 con una percentuale di immissione al consumo pari al 5.75%. Alla fine del 2009, questi obiettivi sono stati rivisti e l'obiettivo per il 2010 è stato fissato nel 3.5%. Il raggiungimento degli obiettivi è basato sull'imposizione dell'obbligo nei confronti dei soggetti che immettono al consumo il combustibile fossile. Oltre alla strategia utilizzata dalla Legge finanziaria, il Governo fornisce garanzie per l'uso dei biocarburanti con l'adozione di due Decreti:

- Decreto Legge N.110, 29 aprile 2008, del MIPAAF, che esplicita le procedure per l'attuazione dell'obbligo di consumo di biocarburanti, individuando sia la qualità, sia gli enti soggetti all'obbligo;
- Decreto Legge N.100, 23 aprile 2008, dell'MSE, che stabilisce un quadro di sanzioni per chi non miscela biocarburanti.

Dal pacchetto 20-20-20 la quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale di energia al 2020 fissata per l'Italia è pari al 17%. Questo ha portato il Ministero dello Sviluppo

Economico a dover ricalibrare la propria politica energetica attraverso la redazione del Piano di Azione Nazionale (PAN) per le energie rinnovabili approvato nel Giugno 2010. In questo contesto e in attuazione alla Direttiva 28/2009, le biomasse dovrebbero diventare entro il 2020 le prime rinnovabili in Italia, coprendo il 44% dei consumi (20% dell'elettricità; 58% del calore; 84% dei biocarburanti), per un totale di 22,3 Mtep.

La Direttiva 2009/30/CE, che introduce il concetto di sostenibilità nella produzione di biocarburanti, è in fase di recepimento. Tuttavia, il Decreto Legislativo in attesa di pubblicazione delinea già il quadro di sostenibilità dei biocarburanti, definendo sostenibili quelli che riducono in maniera sostanziale le emissioni di GHGs durante tutta la loro fase di produzione. Infatti, secondo i criteri di sostenibilità della Direttiva, non potranno essere computati ai fini del raggiungimento dell'obbligo quei biocarburanti che sono prodotti impiegando terreni ad elevata biodiversità, con alti stocks di carbonio o utilizzati per le filiere alimentari. È previsto un meccanismo premiante ai fini del raggiungimento dell'obbligo, per quei biocarburanti che sono prodotti all'interno dell'UE a partire dai rifiuti, dai residui non alimentari, dalle materie prime lignocellulosiche e dalle alghe.

Gli attuali meccanismi di incentivo non sono stati in grado di attivare delle filiere nazionali di produzione di bioetanolo da colture energetiche ed attualmente ci sono delle iniziative sporadiche, legate sostanzialmente alla sfera della R&S. L'attivazione delle filiere nazionali non può prescindere dal pieno coinvolgimento degli agricoltori e l'approccio verso impianti decentralizzati di taglia medio-piccola favorisce questo processo di partecipazione. Al contempo devono essere sostenute le attività di Ricerca & Sviluppo, per ottimizzare quei processi, che permetteranno di convertire a bioetanolo i materiali residuali a base lignocellulosica.

1.3.4 La politica comunitaria e regionale per le agro energie

Il primo incentivo a favore delle agro energie è insito nell'ultima riforma della Politica Agricola Comune (PAC) del 2003 che ha come finalità quella di creare le condizioni per una multifunzionalità del sistema agricolo. Con tale concetto si esprime la possibilità di affiancare alla classica produzione agricola di alimenti e di materie prime per uso non alimentare, la fornitura di servizi di varia natura. Nell'ambito della riforma Fischeler, nel regolamento orizzontale 1782/2003 viene dedicato un ampio spazio all'integrazione delle tematiche ambientali all'interno della politica di intervento a sostegno del settore agricolo. Tale riforma, slega il sostegno al reddito degli agricoltori con la produzione agricola, in tal modo

gli agricoltori hanno facoltà di praticare qualunque coltivazione sulle superfici beneficiarie, mantenendo l'aiuto medio percepito durante il periodo 2000-2002. Ciò consente all'agricoltore di rispondere liberamente alla domanda di colture energetiche. In particolare la riforma ha introdotto:

- Un regime speciale di aiuto alle colture energetiche di 45 euro/ha per tutte le superfici agricole investite a qualsiasi prodotto, a condizione che i prodotti ottenuti siano destinati alla produzione di energia termica, elettrica o meccanica e/o biocarburanti e biocombustibili
- La possibilità di utilizzare i terreni soggetti ad obbligo di ritiro dalla produzione (set side) per l'impianto di colture energetiche, comprese le colture a breve ciclo di rotazione (es. short rotation forestry) ed altre colture perenni.

Per entrambi i casi l'agricoltore che intende beneficiare di tali aiuti è tenuto a sottoscrivere un apposito contratto di coltivazione con un'industria di trasformazione che attesti la destinazione agro energetica. Misure di sostegno a favore delle agro energie si trovano anche all'interno della politica di sviluppo rurale e della specifica regolamentazione applicativa (Reg. CE 1698/2005). L'attuazione della politica di sviluppo rurale avviene attraverso degli specifici programmi attuati a livello di singoli Stati membri che eseguono la strategia di sviluppo rurale attraverso una serie di misure. Il raggiungimento degli obiettivi può avvenire attraverso la presentazione di un unico programma per l'intero territorio oppure di specifici programmi regionali. In tale contesto l'Italia, potendo scegliere, ha optato per i 21 Programmi di Sviluppo Rurale (16 PSR Competitività e 5 PSR Convergenza) e un Programma nazionale di coordinamento "Rete rurale". In coerenza con le strategie delineate a livello comunitario e nazionale relativamente allo sviluppo delle energie rinnovabili, il Programma di Sviluppo Rurale (PSR) 2007-2013 della Regione Campania, approvato dalla Commissione con Decisione C(2007)5712 del 20/11/07, affronta il tema della produzione di energia da fonti alternative prevedendo misure che investono direttamente nella produzione di biomassa per scopi energetici e che prevedono premialità per tutti gli interventi tesi all'uso di fonti di energia rinnovabile. Tale sfida viene ulteriormente rafforzata introducendo nuovi interventi tesi a consolidare, in termini sia di strumenti operativi che di risorse finanziarie, la coerenza con le nuove sfide dettate dall'Healt Check, oltre che delineate nel Piano Energetico Ambientale Regionale (PEAR). La base di partenza delle politiche regionali consiste nello sviluppare le potenzialità agro-energetiche delle biomasse derivate dai residui inutilizzati dall'agricoltura (le biomasse generate da scarti e/o

sottoprodotti di origine agricola, agroindustriale ed agroforestale, ecc.). A questo si unisce anche l'esigenza di valorizzare le aree dove non sussistono attualmente le condizioni agro ambientali per le coltivazioni (aree interessate dal cuneo salino o con status ambiente alterato) e le aree a rischio di marginalità (aree a rischio idrogeologico, abbandono colturale) per essere dedicate temporaneamente a colture energetiche.

Questa scelta consente di focalizzare l'attenzione su filiere con concreta possibilità di sviluppo ed anche correttamente inserite nei contesti locali, ma anche di conseguire un ulteriore risultato: l'utilizzo energetico di materiali che, se non correttamente smaltiti, avrebbero conseguenze negative per l'ambiente (come le deiezioni animali) oltre alla salvaguardia di aree boscate da fenomeni di dissesto ed abbandono (recupero della biomassa ligno-cellulosica attraverso la corretta gestione forestale). L'area agricoltura, ha concorso alle elaborazione delle scelte strategiche e nucleate nel PEAR attraverso la partecipazione al "Gruppo di lavoro per la promozione delta filiera agro energetica" costituito con delibera di G.R. n. 2233 del 21.12.07, a cui hanno partecipato diversi settori (sperimentazione, ricerca e consulenza in agricoltura, interventi per la politica agricola, ecc.) con lo scopo di promuovere e facilitare l'opportuna integrazione multidisciplinare di supporto alle valutazioni, alle attività, agli studi e agli strumenti di programmazione in materia di agro energia.

1.4 Biomasse

Tra le fonti rinnovabili, le biomasse suscitano un notevole interesse e le Istituzioni hanno attribuito ad esse prospettive di sviluppo a breve termine superiori a tutte le altre fonti rinnovabili (energia geotermica, eolica, fotovoltaica e idroelettrica). Il termine biomassa riunisce una grande quantità di materiali, di natura estremamente eterogenea; in forma generale si definisce biomassa tutto ciò che possiede matrice organica e che deriva dal processo di organizzazione fotosintetica della CO₂, con esclusione delle plastiche e dei materiali fossili. La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come combustibili oppure trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi. Sono biomasse, oltre alle colture coltivate espressamente per scopi energetici, tutti i prodotti delle coltivazioni agricole e della forestazione, compresi i residui delle lavorazioni agricole e della silvicoltura, gli scarti dei prodotti agro-alimentari destinati all'alimentazione umana o alla zootecnia, i residui, non trattati chimicamente, dell'industria della lavorazione del legno e della carta, tutti i prodotti

organici derivanti dall'attività biologica degli animali e dell'uomo, come quelli contenuti nei rifiuti urbani (la cosiddetta FORSU, frazione organica dei rifiuti solidi urbani). I combustibili solidi, liquidi o gassosi derivati da questi materiali (direttamente o in seguito a processi di trasformazione) sono definiti biocombustibili, mentre qualsiasi forma di energia ottenuta con processi di conversione della biomassa è definita bioenergia. Le biomasse rappresentano una delle soluzioni più interessanti nella ricerca di nuove risorse energetiche rinnovabili, nel breve-medio periodo, per almeno tre ragioni:

- possibilità di produrre energia con investimenti relativamente modesti;
- costituire un'alternativa alle colture tradizionali non in grado di reggere la concorrenza di un mercato ormai globalizzato;
- immagazzinare quantità rilevanti di carbonio nel suolo (e quindi usufruire dei *certificati verdi*, cioè bonus economici scaturiti dal Protocollo di Kyoto).

1.5 Colture dedicate ad uso energetico

Gli interventi più efficaci per favorire lo sviluppo di filiere agro-energetiche sostenibili sotto il profilo ambientale, sociale ed economico, sono quelli volti ad identificare e selezionare specie e/o varietà adatte alla produzione di biomassa in condizioni di coltivazione a bassi "input" (resistenti a stress ambientali) e massima efficienza energetica (anche in ambienti limitanti).

Inoltre, tali specie devono essere ad elevata produttività, economicamente competitive e presentare parametri chimico-qualitativi idonei alle diverse utilizzazioni industriali.

L'identificazione di una coltura energetica e la sua valutazione, deve considerare molteplici aspetti, tra cui: (i) il valore netto della produzione per unità di superficie, indipendentemente dalla destinazione finale della biomassa, (ii) il rapporto tra gli *output* e gli *input* colturali (*output/input*) ed (iii) il guadagno energetico netto (*output – input*). Quest'ultimo rappresenta il fattore che suscita maggior interesse, in quanto un rapporto seppur elevato, tra input ed output del sistema suolo-pianta, può anche riflettere condizioni di basse produzioni, quindi con limitato interesse economico; invece, il guadagno netto fornisce un'idea dell'energia potenziale prodotta in differenti condizioni pedoclimatiche, in funzione delle diverse tecniche colturali utilizzate.

Le colture energetiche vengono suddivise in funzione della loro specializzazione produttiva, ovvero alle caratteristiche chimico fisiche delle specie coltivate alle quali è legato anche il processo di trasformazione, e definite come colture "dedicate". Queste ultime possono

essere raggruppate in tre categorie principali: colture da carboidrati, colture oleaginose e colture da biomassa lignocellulosica.

1.5.1 Colture da carboidrati

Le colture da carboidrati sono utilizzate per la produzione del bioetanolo attraverso la fermentazione del saccarosio e glucosio o di zuccheri complessi (amido) provenienti rispettivamente da colture saccarifere (barbabietola da zucchero, canna da zucchero, sorgo zuccherino) o amilacee (cereali, in particolare frumento tenero e mais). Successivamente il bioetanolo viene trasformato etil-tertiobutiletere (ETBE) ed addizionato alle benzine.

Nel caso di produzione di bioetanolo da zuccheri semplici si parla di produzione di bioetanolo di *prima generazione*. Sono però oramai in avanzato stadio di studio le tecnologie per la produzione di bioetanolo a partire da zuccheri più complessi, come la cellulosa e l'emicellulosa, questo permetterebbe di utilizzare anche altre tipologie di biomasse, siano esse derivanti da colture dedicate che da materiali vegetali residuali, caratterizzate da una minor competizione con le produzioni alimentari e dal costo di approvvigionamento più contenuto; convenzionalmente in questo caso si parla di biocarburanti di *seconda generazione*.

Le colture saccarifere presentano un elevato contenuto in zuccheri semplici: l'estratto zuccherino fermentescibile nella barbabietola costituisce in media il 20% della biomassa secca raccolta mentre nel sorgo il 18%. L'amido contenuto nelle colture amilacee, sotto forma di granuli, viene idrolizzato per ottenere il glucosio per la fermentazione e produzione di bioetanolo. Nel caso del frumento tenero il contenuto in amido corrispondente a circa il 70% mentre nel mais il 78%. (INEA, 2011).

1.5.2 Colture oleaginose

Le colture oleaginose producono semi caratterizzati da un elevato contenuto in olio.

Dall'esterificazione di oli vegetali si ottiene il biodiesel, con proprietà e prestazioni simili a quelle del gasolio minerale. Il biodiesel si caratterizza per l'assenza di zolfo e di composti aromatici, il contenimento del particolato fine (Pm10) e la capacità di contribuire alla riduzione dell'effetto serra. E' utilizzato come combustibile per riscaldamento e/o carburante per autotrazione, puro o miscelato con gasolio minerale. Attualmente la produzione di biodiesel non risulta ancora competitiva rispetto a quella del gasolio. Tuttavia la differenza di redditività tra biodiesel e gasolio potrebbe ridursi notevolmente

incrementando la produttività e riducendo i costi colturali. Si stima che l'attuale soglia minima di convenienza sia attorno ad una tonnellata/ettaro di olio.

Le colture ritenute maggiormente adatte alla produzione di biodiesel sono girasole, colza e soia. In particolare le prime due sembrano fornire le produzioni più elevate sia per quantità che qualità. Altre specie di interesse sono rappresentate dal crambe, tabacco da olio, ecc.

Il colza (*Brassica napus L. var. Oleifera*) è una erbacea annuale conosciuta per l'olio estratto dai semi che trova un largo impiego nell'industria come lubrificante per macchinari. Tale olio non è utilizzato per l'alimentazione umana poiché *tossico* a causa dell'elevato contenuto di acido erucico (circa il 45%)(acido grasso monoinsaturo a catena lunga ampiamente utilizzato come intermedio nella produzione di materie plastiche, emulsioni e soprattutto lubrificanti). Un ettaro di suolo coltivato a colza può arrivare a produrre anche 850 kg di biodiesel puro.

Come per il colza anche l'olio estratto dal crambe (*Crambe abyssinica*) presenta un elevato contenuto (45-55%) di acido erucico.

Il girasole (*Helianthus annuus*), produce un olio commestibile con un elevato contenuto di acido linoleico ed un potere calorifico di 34.1 MJ/l.

Il tabacco (*Nicotiana Tabacum*) produce semi con un contenuto elevato di olio non alimentare (Stanisavljevic' et al., 2007). Nei sistemi agricoli attuali i semi di tabacco rappresentano un sottoprodotto della coltivazione, diventando residui vegetali (non vengono raccolti). Una buona produzione di olio da tabacco si aggira tra il 33 ed il 43% della produzione di seme (Giannelos et al., 2002; Patel et al., 2008; Sifola e Di Giacomo, 2009). Tale olio è ricco di acido linoleico (circa 70%) e oleico (circa 14%) (Giannelos et al., 2002; Patel et al., 2008), presentando proprietà fisiche particolarmente interessanti per l'industria dei biocarburanti (Giannelos et al., 2002; Usta, 2005; Velikovic et al., 2006) e dei polimeri (Patel et al., 2008).

1.5.3 Colture lignocellulosiche

Sono specie a elevata produzione di sostanza secca che possono essere sottoposte a differenti processi: combustione, pirolisi, gassificazione, liquefazione, produzione di etanolo di II generazione ecc. Tra le specie arboree più importanti ritroviamo il salice, il pioppo, l'eucalipto e la robinia, mentre tra le erbacee annuali e poliennali utili per la produzione di biomasse ai fini energetici il kenaf, la canapa, il sorgo da fibra, il panico, il miscanto, il cardo e la canna comune.

1.5.3.1 Arboree

Appartengono al gruppo delle colture da biomassa lignocellulosica anche le specie arboree a rapido accrescimento allevate ad alta densità di impianto e con turno breve di taglio (*Short Rotation Forestry*) di impiego nel settore agroforestale. Le sperimentazioni finora svolte sulle *SRF* hanno consentito di individuare 4 specie più performanti: pioppo, salice, eucalipto e robinia. La specie più largamente impiegata in Italia è senz'altro il pioppo, essenza in grado di garantire buone produzioni di biomassa in vasti areali del nostro territorio senza risentire di particolari limitazioni termiche, come accade nel caso dell'eucalipto, o idriche come nel caso del salice. (Bonari et al, 2004)

Le colture arboree a ciclo breve rappresentano un mezzo efficace per combattere l'erosione del suolo nelle aree in pendio od anche dei terreni di pianura particolarmente sensibili. Tale compito (antierosivo) è svolto sia dalla copertura vegetale che costituisce direttamente una valida protezione dall'azione incidente della pioggia, sia dall'azione di trattenimento del suolo operato dagli apparati radicali. Inoltre l'effetto «mulching» che le foglie cadute ogni anno sul terreno inevitabilmente producono, incrementa la sostanza organica negli strati più superficiali favorendo l'aggregazione nel suolo.

1.5.3.2 Erbacee annuali

Le colture erbacee annuali offrono il vantaggio di non occupare il terreno agricolo in modo permanente, potendosi inserire nei cicli tradizionali di rotazione colturale e consentendo la coltivazione anche su terreni tenuti a *set-aside* rotazionale. Tale flessibilità è un fattore importante per quanto riguarda l'impatto che può avere la coltivazione di specie a destinazione energetica sui sistemi agricoli e sugli agricoltori i quali sono più propensi ad impiantare specie a loro inusuali quando il suolo non è vincolato in modo duraturo.

Tra le specie erbacee annuali, il sorgo sembra essere la specie più performante dal punto di vista energetico.

Il sorgo (*Sorghum bicolor L. Moench*) è una graminacea appartenente alla famiglia delle *Poaceae*, tribù delle *Andropogoneae* (cui appartiene anche la canna da zucchero), caratterizzata da un ciclo fotosintetico C4. Risulta in grado di valorizzare una vasta gamma di suoli a diversa tessitura (e.s. suoli argillosi con mediocre struttura) e reazione (Es. suoli con pH compreso tra 5,5 e 8,5). Infine, si adatta discretamente anche a condizioni di stress salino, caratteristica che rende questa coltura preziosa nell'ottica della valorizzazione di aree

costiere a rischio di salinizzazione, in cui specie meno resistenti agli stress salini incontrerebbero maggiori difficoltà di adattamento. (Bonari et al., 2004)

Le sue caratteristiche di crescita rapida, di ridotte esigenze idriche ed assenza di parassiti, unite ad una tecnica di coltivazione simile a quella del sorgo da granella lo rendono particolarmente conveniente (Candolo, 2006). La coltivazione del sorgo presenta, inoltre, la possibilità di una facile meccanizzazione dovuta a semplici adattamenti delle macchine agricole generalmente utilizzate per le colture alimentari.

Grazie all'utilizzo di cultivar più rustiche, più adattabili e meno esigenti per quanto riguarda le disponibilità idriche ed azotate, il sorgo è sembrato essere tra le specie più adatte ai fini energetici, con produzioni di sostanza secca fino a 25 t ha⁻¹ (Schenone et al., 1994; Fagnano et al., 1996).

Il potere calorifico della biomassa secca prodotta, in funzione della varietà utilizzata, oscilla tra 16 e 17 MJ kg⁻¹; con un contenuto in ceneri variabile dal 4% fino a oltre il 9% della sostanza secca, con un contenuto di silice compreso tra il 32 ed il 35%. (Bonari et al., 2004)

1.5.3.3 Erbacee poliennali

Le piante erbacee poliennali, a differenza delle annuali, presentano un maggior impatto sull'organizzazione dell'azienda agricola (occupano il suolo per diversi anni, 10-15 anni) ed un elevato costo d'impianto. Di contro il loro vantaggio d'utilizzo è rappresentato dalla notevole quantità di biomassa prodotta per più anni con bassi costi aggiuntivi una volta entrate in produzione (rispetto alle specie annuali). Si tratta inoltre di specie generalmente poco esigenti che richiedono modesti quantitativi di acqua, di fertilizzanti e antiparassitari, con esigue lavorazioni del suolo. Tra le piante erbacee poliennali, le più interessanti dal punto di vista energetico sono: il cardo, il miscanto e la canna comune.

Il *Cardo* (*Cynara cardunculus* L.) appartiene alla famiglia delle *Asteraceae* o *Compositae* ed è una coltura orticola tradizionale dell'orizzonte termomediterraneo utilizzata anche per la destinazione energetica. Per quest'ultimo utilizzo l'interesse è cresciuto negli ultimi anni grazie ai molteplici utilizzi delle diverse parti, ad esempio: il fusto può essere usato come fonte di biomassa lignocellulosica per l'energia (Piscioneri et al., 2000; Raccuia e Melilli, 2007) e pasta di carta (alta qualità della fibra) (Gominho et al., 2001), il seme come fonte di proteine e olio edibile (Foti et al., 1999; Maccarone et al., 1999; Raccuia and Melilli, 2007), od anche come olio per la produzione di biodiesel (Encinar et al., 2002) ed infine le radici

possono essere usate come fonte di inulina. Numerosi studi europei condotti sul cardo, hanno evidenziato una produzione media annua di circa 15.2 t ha⁻¹ di s.s., molto sensibile alla gestione colturale e condizioni climatiche, in particolare alla quantità e alla distribuzione degli apporti pluviometrici (445 mm anno⁻¹) (Fernández, 1998).

La biomassa di cardo può essere utilizzata per la produzione di energia per termoconversione con un potere calorifico inferiore di 16-17 MJ kg⁻¹ (compresi i semi), il contenuto in ceneri della biomassa è comunque piuttosto alto (13-15% della sostanza secca) con un contenuto in silice piuttosto basso (12-18%).

Il *Miscanto* (famiglia delle *Graminaceae*) è una specie rizomatosa, originaria dell'Asia, caratterizzata da un ciclo fotosintetico C4 (con maggiore efficienza nell'utilizzazione della luce, dell'acqua e dell'azoto rispetto alle piante C3), non particolarmente esigente in termini di nutrizione minerale, con asportazioni minerali piuttosto contenute rispetto ad altre colture da biomassa, in relazione alla traslocazione autunnale degli elementi nutritivi dall'apparto aereo ai rizomi.

La varietà più studiata è il *Miscanthus x giganteus* che per le sue caratteristiche di accrescimento e di rusticità risulta essere più idoneo per la produzione sia di cellulosa che di biomassa a fini energetici. La produzione di biomassa è medio-elevata e negli ambienti mediterranei, in assenza di irrigazioni, le rese hanno raggiunto valori di 20-25 t ha⁻¹ anno di sostanza secca.

Il potere calorifico della biomassa è pari a circa 16-18 MJ/kg s.s. (come per l'*Arundo donax*), con un contenuto di ceneri medio, che seppur variabile nello spazio e nel tempo risulta inferiore alle paglie dei cereali, ma maggiore rispetto a salice e al pioppo (Bonari et al., 2004).

La *Canna comune* (*Arundo donax L.*) appartiene alla (famiglia delle *Graminaceae*) è una specie rizomatosa perenne, diffusa in tutto il mondo negli ambienti umidi e ripariali a quelli più marginali. E' caratterizzata da un ciclo fotosintetico C3, presenta un inusuale alta capacità fotosintetica che le conferisce importanti vantaggi ecologici. E' tra le più promettenti dal punto di vista produttivo e la sua biomassa può essere utilizzata a diversi livelli tecnologici. Essendo tale specie analizzata nell'ambito del lavoro di tesi, la sua descrizione verrà trattata in modo più approfondito nel paragrafo n° 1.7.

Va sottolineato come nell'attuale panorama sperimentale, le specie considerate più interessanti per la produzione di energia sono proprio le ligno-cellulosiche poiché utilizzabili in processi a diverso livello tecnologico, come la combustione diretta oppure la fermentazione anaerobica per la produzione di metano, o anche la produzione di etanolo di seconda generazione.

1.6 Processi e prodotti realizzabili

1.6.1 Filiera zuccheri

Dalle colture zuccherine si produce, per fermentazione dei carboidrati, il bioetanolo che viene addizionato alle benzine, previa trasformazione in etil-tertiobutiletere.

Com'è noto l'etanolo corrisponde al prodotto finale della fermentazione alcolica di zuccheri direttamente fermentescibili (es. saccarosio, glucosio, ecc.) presenti maggiormente nelle colture zuccherine ed amilacee. Onde evitare l'uso di molecole pregiate come l'amido, ci si interroga sempre più sulla possibilità di utilizzare la lignina come prodotto di partenza per la produzione di etanolo (bioetanolo di II generazione) anche in considerazione del fatto che nessun essere vivente è in grado di trasformare la lignina in energia metabolica utile per l'uomo. Quindi le biomasse lignocellulosiche potrebbero essere usate anche per la produzione di bioetanolo e quindi energia senza troppi scrupoli.

La lignina è un polimero del glucosio che, per essere usato ai fini energetici, deve essere necessariamente trattato con acidi caldi. Tale procedura effettuata sul materiale vegetale facilita l'idrolisi ad opera degli enzimi cellulasi e xilanasi della cellulosa e dell'emicellulosa. La conversione di quest'ultime molecole in etanolo si realizza attraverso due passaggi fondamentali: la scomposizione della lunga catena delle molecole di cellulosa in glucosio e altri zuccheri, e la fermentazione di tali zuccheri in etanolo. In natura, questi processi sono svolti da organismi diversi come funghi mesofili e termofili, batteri aerobi ed anaerobi che utilizzano alcuni enzimi (cellulasi, endo e eso-glucanasi, beta-glucosidasi) per "liberare" gli zuccheri presenti nella cellulosa, e altri microrganismi, in primo luogo i lieviti, che inducono la fermentazione dello zucchero trasformandolo in alcool.

Più si riesce ad agire sui microrganismi che generano l'etanolo, riducendo il numero di passaggi nel processo di conversione, più si abbattano i costi della procedura e prima l'etanolo da cellulosa diventerà un'alternativa commercialmente competitiva nel settore della bioenergia. La strada percorribile è quella di individuare, attraverso una selezione biotecnologica mirata, ceppi microbici in grado di compiere un'efficace cellulolisi (a carico

di una determinata matrice) e ceppi di lieviti (o microrganismi fermentanti gli zuccheri pentosi) ad elevata attività fermentativa che al tempo stesso siano in grado di resistere alle alte concentrazioni di etanolo che si sviluppano durante il processo. Quest'ultimo aspetto è rilevante poiché nelle tecniche di produzione tradizionale, l'etanolo deve essere continuamente rimosso dai serbatoi dove avviene la fermentazione, in quanto i lieviti non riescono a tollerarne grossi quantitativi. Chiaramente l'ottimizzazione del processo di produzione di bioetanolo non può prescindere dalla messa a punto e controllo, almeno alla scala di laboratorio, della scelta delle migliori condizioni tecnologiche relative al processo di degradazione a carico della cellulosa e alla fermentazione.

1.6.2 Filiera lipidi

Gli oli vegetali derivanti dalla spremitura dei semi di girasole, colza, ecc. (miscela di esteri metilici degli acidi grassi) possono essere trasformati in biodiesel. Il procedimento chimico per la trasformazione è la trans-esterificazione, (gli oli reagiscono con metanolo, in presenza di catalizzatori alcalini, per formare l'estere metilico e, come prodotto secondario, glicerina grezza). La crescente domanda di biodiesel ha determinato un aumento del costo degli oli vegetali che, oltre ad abbassare la competitività economica del biodiesel (il cui prezzo è determinato in larga parte dal costo delle materie prime), sta provocando notevoli problemi sociali nei paesi poveri in cui questi oli rappresentano un alimento fondamentale.

Una prospettiva possibile di sviluppo del biodiesel è legata alla diffusione di biodiesel cosiddetto di II generazione, ottenuto cioè da materiali lignocellulosici. Negli ultimi anni, tra i metodi per ottenere biodiesel da biomasse, l'impiego dei microrganismi oleaginosi ha suscitato un crescente interesse. In particolare rivolto al possibile utilizzo di microalghe, la cui applicazione industriale però presenta ancora una elevata complessità dovuta all'esigenze colturali delle stesse, o di lieviti oleaginosi per la produzione di trigliceridi da biomasse lignocellulosiche. Quest'ultimi hanno la capacità di accumulare lipidi in misura maggiore del 20% della loro biomassa. Inoltre a differenza delle microalghe, hanno esigenze colturali relativamente limitate (per aumentare la resa in lipidi, è necessario impiegare terreni di coltura caratterizzati da un rapporto C/N superiore a 30).

La sintesi di poliesteri potrebbe essere realizzata utilizzando come materiale di partenza trigliceridi di origine microbica, nel caso in cui l'impiego dei microrganismi oleaginosi consenta di ottenere oli con proprietà adeguate alle tipologie di polimeri considerate strategicamente importanti dal settore industriale. Lì dove fosse necessario, trigliceridi e

glicerina potrebbero essere fatti reagire secondo i metodi suggeriti dalla catalisi enzimatica in ambienti non acquosi per ottenere monogliceridi. Questi ultimi possono reagire con poliacidi consentendo la sintesi di poliesteri.

Il glicerolo o poliglicerolo potrebbero essere impiegati per plasticizzare film polimerici edibili capaci di creare una barriera alla migrazione di gas e vapore. Tali film possono essere posizionati sia sulla superficie degli alimenti, per limitarne i fenomeni di disidratazione o rallentare i processi respiratori, che all'interno di essi per separare componenti con umidità sensibilmente.

Il glicerolo potrebbe essere impiegato nelle vernici biodegradabili per agricoltura (es. usate per pacciamare) perché è in grado di influenzare positivamente il comportamento elastico dei film preparati. La vernice è direttamente spruzzata al suolo e alla fine dell'utilizzo, il sottile strato di film, viene semplicemente macinato dalla macchina agricola, che lo porta negli strati inferiori del terreno, dove rapidamente viene bioassimilato dalla microflora.

Ancora, il sottoprodotto della trans-esterificazione potrebbe essere riutilizzato mediante sua trasformazione e funzionalizzazione chimica, per la preparazione di polimeri innovativi. Una delle modifiche chimiche che permetterà di utilizzare il glicerolo come intermedio di sintesi è la sua carbonatazione, che ha il vantaggio di incorporare CO₂ sottraendola all'ambiente. Il glicerolo carbonato è un solvente protico che ha diversi impieghi potenziali come solvente reattivo, e come monomero per la preparazione di polimeri. Il prodotto ottenuto sarà quindi omopolimerizzato per la realizzazione di polimeri iper-ramificati, che trovano impiego sempre crescente nel campo biomedicale e nella catalisi in fase omogenea.

1.6.3 Filiera lignocellulosica

Le biomasse lignocellulose (colture dedicate, scarti, colture da fibra, SRF) sono impiegate ai fini energetici attraverso modalità di conversione di tipo termochimico (combustione, gassificazione, pirolisi) per la produzione di energia termica o elettrica.

Combustione

È il processo più tradizionale che per essere efficiente richiede la riduzione del contenuto d'acqua della biomassa. La combustione è, da un punto di vista termodinamico, un processo di conversione dell'energia chimica del combustibile (biomasse) in calore, quest'ultimo si genera grazie alla reazione di ossidazione del carbonio in presenza di sufficiente ossigeno. Infine, per ottenere energia elettrica dalla combustione è necessario operare ulteriori

trasformazioni, come ad esempio cedendo calore all'acqua che sottoforma di vapore alimenta una turbina collegata ad un alternatore (conversione dell'energia termica del vapore in energia meccanica alla turbina, che a sua volta viene convertita in energia elettrica da un alternatore).

Pirolisi

È un processo di conversione termochimica della materia organica, chiamata anche *distillazione a secco*, che si basa sulla trasformazione della biomassa a opera del calore in forte carenza di ossigeno. Il materiale organico viene portato a temperature comprese tra 200 e 1000°C, talvolta immettendo opportune quantità di ossigeno che consentono l'innesco di una parziale combustione che porta ad un aumento della temperatura. Come risultato finale si ottengono prodotti gassosi, liquidi e solidi in percentuale dipendente dai parametri di reazione. Tale processo si può applicare a qualsiasi materiale organico purché presenti un basso contenuto di acqua (< 15%).

La ricerca ha individuato tre tipi di processi di pirolisi: (i) *pirolisi lenta*, ottenuta con temperature inferiori a 600°C e un lungo periodo di permanenza, il prodotto ottenuto è un carbone da legna;

(ii) *pirolisi veloce*, ottenuta con temperature tra 500 e 650°C, si ottengono prodotti gassosi;

(iii) *flash pirolisi* detta anche liquefazione, buona efficienza del processo, basse emissioni e una certa economicità (Sipila, 1994).

La flash pirolisi è condotta con temperature sui 650 °C e tempi di permanenza molto ridotti, inferiori a 1 secondo, consente di ottenere prodotti liquidi di natura diversa: gas, oli, soluzioni zuccherine, idrocarburi vari, benzina o anche, combustibili per motori diesel. I prodotti liquidi derivati hanno un elevato contenuto energetico, facilmente trasportabile e conservabile per lungo tempo senza problemi di degradazione.

Gassificazione

È un processo fisico-chimico per mezzo del quale si trasforma un combustibile solido (legno, biomasse vegetali in genere) in un combustibile gassoso. Il processo consiste in un'ossidazione incompleta dei composti carboniosi portati ad elevata temperatura (circa 1.000°C) in ambiente carente di ossigeno. Il gas ottenuto è una miscela di azoto, metano, idrogeno, monossido di carbonio e altri gas, che può essere utilizzato per alimentare caldaie, per la produzione di energia termica, oppure per alimentare turbine a gas per la produzione

di energia elettrica. Il rendimento dei gassificatori per la produzione di energia elettrica è dell'ordine del 30-35%, valori nettamente superiori agli impianti a combustione. Il rendimento varia a seconda delle biomasse utilizzate in particolare il liquido ottenuto rappresenta il 75 % in peso del legno utilizzato come materia prima, percentuale che arriva fino all'85 % nel caso in cui sia la cellulosa ad alimentare la reazione (Boukis et al., 1994). La gassificazione delle biomasse legnose può costituire una straordinaria opportunità per ottenere a costi relativamente bassi idrogeno, da utilizzare, per esempio, nelle celle a combustibile.

1.7 Coltura in esame: Canna comune (*Arundo donax L.*)

1.7.1 Inquadramento botanico

La canna comune (*Arundo donax L.*) o canna domestica è una specie geofita rizomatosa perenne originaria del Medio Oriente, naturalizzata e coltivata in tutto il bacino del Mediterraneo tanto da essere ormai considerata una pianta tipica dell'area, appartenente alla famiglia delle *Poaceae.*, della tribù *Arundinee*; al genere *Arundo* afferiscono diversi taxa, in quelli tipici degli ambienti caldi, in Italia troviamo, oltre ad *A. donax L.*, anche la più piccola *A. plinana* Turra, tipica dell'orizzonte mediterraneo. È una pianta che cresce in acque dolci o moderatamente salmastre formando dense macchie in terreni umidi di ambiente ripariale, lungo gli argini di fiumi e stagni ma anche sui margini di campi coltivati ed eventualmente anche sulle dune sabbiose. La canna comune presenta una parte ipogea composta da un ricco sistema di rizomi carnosì (5-50 cm di lunghezza) dal quale dipartono delle radici fibrose che si sviluppano su tutta la superficie in grado di crescere nel suolo fino a 5 m di profondità (Frandsen, 1997) e da una parte epigea caratterizzata da fusti (culmi) alti e lignificati. Il sistema radicale è in grado di accrescersi annualmente da 30 a 70 cm, in funzione della tessitura del suolo e dell'orientamento (Onofry, 1940). Il rizoma legnoso presenta gemme primarie e secondarie dalle quali si sviluppano i culmi e gemme di prolungamento dalle quali si accrescono, alla ripresa vegetativa, nuovi rizomi e nuovi germogli colonizzatori, raggiungendo dimensioni e peso variabile in funzione delle condizioni pedoclimatiche. Le gemme primarie germogliano alla ripresa vegetativa (marzo-aprile), dando origine a canne "maggenghe", mentre le gemme secondarie, che nel periodo di ripresa vegetativa si allungano e si accrescono allontanandosi dalla gemma primaria, germogliano in giugno-luglio sviluppando le canne "agostane". La germogliazione delle gemme secondarie può avvenire anticipatamente in presenza di condizioni pedoclimatiche favorevoli e buona disponibilità

idrica. I culmi sono costituiti da nodi (da 30 a 40) e internodi di lunghezza e spessore decrescenti dal basso verso l'alto e possono raggiungere altezze ragguardevoli, anche di 6-7 m, in un solo ciclo vegetativo e in condizioni ideali possono superare anche i 10 m di altezza. Le foglie alterne con la lamina lunga (30-70 cm) e ampia (5-8 cm) ricoprono interamente i culmi a formare una guaina protettiva. I culmi e le foglie contengono una vasta gamma di sostanze chimiche nocive, compresa la silice (Jackson e Nunez, 1964), tri-terpeni e steroli (Chandhuri e Ghosal, 1970), e numerosi altri alcaloidi che probabilmente proteggono dalla maggior parte degli insetti autoctoni e altri erbivori (Miles et al., 1993; Zuñiga et al., 1983).

Il culmo (1-4 cm di diametro) termina con vistosa pannocchia di un colore che va dal verde pallido al violaceo (lunga 40-70 cm) costituita da spighe di fiori. Il frutto è una cariosside, secco ed indeiscente, caratteristico delle graminacee. La stagione di fioritura va dalla fine dell'estate fino a settembre-ottobre, l'impollinazione è di tipo anemogama non porta a maturazione le cariossidi ed i rari semi prodotti non danno luogo a germinazione. La sterilità può essere considerata un carattere positivo poiché tutti i prodotti della fotosintesi possono essere indirizzati alla produzione di biomassa lignocellulosica e non alla produzione di semi (Di Candilo e Ceotto, 2012). Di contro, la sterilità rappresenta un serio ostacolo per la realizzazione di programmi di breeding, provocando una drastica riduzione della variabilità genetica (Mariani et al., 2010).

La propagazione della specie avviene esclusivamente per via agamica, in natura mediante la dispersione di tratti di culmo o di rizoma operata dal vento, dall'acqua, dall'uomo, ecc., mentre per la costituzione di nuovi impianti di coltivazione, mediante talee di fusto, frammenti di rizomi o piantine micro propagate.

1.7.2 Esigenze e adattamento ambientale

La canna comune è una pianta ideale per affrontare situazioni di condizioni del suolo e di disponibilità idrica estreme: essa può crescere in tutte le tipologie di suoli, dagli argillosi ai sabbiosi ed ai rocciosi, tollerando elevati livelli di salinità. Tendenzialmente preferisce quantitativi di acqua abbondanti ma in ogni caso riesce a sopportare prolungati periodi di siccità (Lewandosky et al., 2003). Tollera valori di pH compresi fra 5 e 8.7 (Di Tomaso, 1998). Ed è inoltre in grado di sopravvivere in condizioni di alta umidità, tra cui paludi, anche se le migliori prestazioni si ottengono in terreni ben drenati, con buona disponibilità idrica.

Genericamente si può affermare che risulta sensibile alle temperature molto basse, dannose soprattutto per la vitalità del rizoma, che è tanto più sensibile quanto più il canneto è

giovane e quanto più questo è stato impiantato superficialmente; con il passare degli anni, invece, i rizomi tendono ad approfondirsi naturalmente e a beneficiare dell'azione protettiva del suolo nei confronti delle basse temperature. Resiste alle basse temperature durante l'inverno ma è molto sensibile alle gelate tardive in primavera (Perdue, 1958). Si ritiene che per iniziare l'accrescimento nella fase di ripresa vegetativa, la canna comune abbia bisogno che le temperature del suolo giungano a valori di circa 13-14°C.

Il vigore e la capacità di espansione dell'apparato radicale sono tali da rendere la coltura in grado di avvalersi di falde acquifere poste a profondità superiori ad un metro.

Cristou et al. (2003) riportano che la canna comune è in grado di incrementare la sua efficienza di utilizzo dell'acqua in relazione alle condizioni ambientali, in particolare: in condizioni ottimali di disponibilità idrica hanno stimato una produzione di sostanza secca pari a 2-3 g/l di acqua, mentre in condizioni di stress idrico l'indice è risultato essere pari a 6-10 g/l di acqua. Le esigenze nutrizionali della coltura sono particolarmente elevate nei primi anni di impianto, durante il periodo di accrescimento e di accumulo di sostanze nutritive nei rizomi (che fungono da serbatoio di nutrienti per la pianta). Successivamente, il decadimento dei rizomi esauriti e la loro mineralizzazione consente la restituzione degli elementi nutritivi al suolo. Ricerche condotte sulle esigenze nutrizionali hanno evidenziato che le asportazioni maggiori sono a carico del potassio, segue l'azoto e infine il fosforo con pochi kg per ogni tonnellata di sostanza secca prodotta. (Bonari et al., 2004). Inoltre, la raccolta eseguita dopo la defogliazione invernale consente una buona pacciamatura, la riduzione di fenomeni di evaporazione e la restituzione al terreno dei minerali contenuti nell'apparato fogliare.

1.7.3 Aspetti ambientali

L'adattabilità alle condizioni di suolo estreme combinate con una crescita rapida e vigorosa conferiscono a questa specie un potenziale utilizzo ai fini della fitodepurazione. Alcuni studi hanno recentemente messo in evidenza le capacità di *A. donax* per il risanamento o la decontaminazione ambientale di siti fortemente inquinati da sostanze organiche o metalli pesanti mediante il loro assorbimento, degradazione e stabilizzazione come soluzione efficace e sostenibile dal punto di vista economico e ambientale. La canna comune presenta, inoltre, il vantaggio ecologico di non essere appetita dagli animali, e quindi evita il trasferimento delle sostanze tossiche e persistenti (es. metalli pesanti) nella catena alimentare. Gou e Miao (2010) hanno mostrato come la canna comune possieda una forte tolleranza ai metalli pesanti, in particolare in presenza di cadmio e nichel, non sono stati

osservati effetti depressivi a carico del tasso fotosintetico e della crescita Papazoglou et al. (2005) così come di altri importanti parametri fisiologici, quali conduttanza stomatica, concentrazione intercellulare di CO₂, resistenza stomatica, contenuto e fluorescenza della clorofilla Papazoglou et al. (2007).

L'uso di piante per rimuovere i contaminanti da acqua e suolo inquinato può essere una strategia vantaggiosa dal punto di vista ambientale, poiché combina altri effetti conservativi del territorio tra cui effetto antierosivo (grazie alla grande resistenza di trazione delle radici l'Arundo donax è in grado di vivere su suoli soggetti ad erosione). In tali ambienti risulta quindi particolarmente importante l'uso di tali essenze colturali (es. Arundo donax), le quali garantiscono una elevata protezione del suolo, soprattutto se si considerano i cambiamenti climatici in atto che incrementano l'erosività delle piogge durante i periodi di lavorazione del suolo delle colture annuali, causando importanti perdite di suolo fino a 250 t ha⁻¹ (Diodato et al., 2009). Inoltre, protegge le falde dalla lisciviazione dei nitrati e di inquinanti, grazie alla gestione del suolo limitata, è in grado di fornire validi carbon sink formati anche grazie all'accumulo di carbonio negli organi di riserva (rizomi e foglie).

Tali caratteristiche permettono di considerare l'utilizzo di tale coltura nelle aree marginali un modo efficace per il raggiungimento degli obiettivi preposti dalla Comunità Europea nell'ambito della *Soil Thematic Strategy*. La strategia è finalizzata principalmente a proteggere il suolo e a garantire un uso sostenibile in base a due principi guida: (i) prevenire l'ulteriore degrado del suolo e mantenere le sue funzioni, (ii) riportare i suoli degradati ad un livello di funzionalità corrispondente almeno all'uso attuale e previsto, considerando anche le implicazioni, in termini di costi, del ripristino del suolo.

1.7.4 Tecnica colturale

La lavorazione principale del terreno consiste in una aratura (in alcuni casi anche sostituibile con la ripuntatura) effettuata ad adeguata profondità, seguita da un erpicatura con erpice trainato o rotante che sminuzza gli aggregati di suolo grossolani preparando il suolo alla semina od al trapianto.

Nel caso in cui sia necessario apportare elementi nutritivi è opportuno distribuire il fertilizzante al suolo prima della lavorazione principale per ottenere un incorporamento più profondo col fine di rendere i nutrienti più disponibili all'apparato radicale, ma nel contempo inaccessibili alla flora infestante. Si ottiene così il letto di semina pronto per la messa a dimora dei rizomi, di culmi (o sezioni di culmo) o piantine micro propagate.

L'impianto della coltivazione rappresenta la fase più critica della filiera agro-energetica in rapporto ai costi dell'operazione e alla reperibilità del materiale di propagazione.

La propagazione per rizoma è la tecnica più impiegata per la costituzione dell'impianto, da ottimi risultati tecnici ma è onerosa per gli elevati costi di espianto, sezionamento e reimpianto dei rizomi, i quali potrebbero costituire una limitazione alla estensione in tempi brevi della specie su larga scala poiché il numero di rizomi prodotti annualmente per pianta risulta comunque limitato (Marton, 2002).

La dimensione dei rizomi come materiale di propagazione, gioca un ruolo importante poiché il rizoma deve presentare riserve sufficienti a generare germogli vigorosi capaci di ridurre la competizione con le specie infestanti e contenere il rischio di fallanze compreso tra il 10-15%. Per tali motivi devono pesare almeno 200 g, avere almeno una gemma attiva ed un diametro minimo di 1 cm. Sull'importanza della dimensione del rizoma e del suo effetto sulla resa dell'impianto Copani et al. (2013) riportano che rizomi di 700 g consentono una sopravvivenza del 100% accompagnata da una resa maggiore di biomassa negli anni successivi alla costituzione dell'impianto.

Un'altra tecnica per la costituzione di un impianto, ancora in fase di perfezionamento, si basa sull'uso di culmi o sezioni di esso. Alcuni autori riportano che talee da diverse parti del fusto (pianta intera, basale, mediana e taglio apicale) non mostrano differenze in termini di produzione di biomassa, sia nei primi che nei successivi anni dopo l'impianto. Dall'altra parte invece sembrerebbe che un ruolo importante, ai fini dell'attecchimento delle talee e dell'uniformità di emergenza dei germogli, è svolto dall'epoca di prelievo delle talee stesse (Ceotto, 2007). Talee prelevate in primavera su culmi di seconda età, sono più performanti a condizione che nel suolo ci sia sufficiente umidità. (Ceotto e Di Candolo., 2010).

Ulteriore tecnica d'impianto si basa sull'impiego delle piantine micro propagate, le quali presentano una serie di vantaggi legati alla flessibilità delle operazioni di trapianto (trapiantatrice a pinze o a tazza) ed alla garanzia di un prodotto agricolo con standard industriali, ma di contro comportano ancora un costo di impianto elevato seppur minore dell'uso dei rizomi.

Dal punto di vista dello sviluppo dell'impianto e della produzione di biomassa, i canneti ottenuti da talee di culmi e da piante micro propagate, almeno nel primo biennio di vita presentano performance produttive inferiori agli impianti ottenuti attraverso rizomi. Tali differenze, dopo due tre anni, iniziano a farsi meno rilevanti non appena gli impianti

derivanti da talee di fusto o piante micro propagate avranno formato i rizomi in grado di supportare l'accrescimento dei culmi.

Per la messa a dimora dei rizomi vengono impiegate macchine piantatuberi derivate da quelle per la patata e altri prototipi specifici per rizomi, mentre nel caso dei culmi è possibile adattare le macchine trapiantatrici già utilizzate per la canna da zucchero. Queste ultime, infatti, in un solo passaggio aprono il solco, interrano i fusti, li ricoprono e rullano il terreno in modo tale da farli aderire al suolo per favorire la radicazione e l'attecchimento. I segmenti di culmo possono essere interrati in fila singola o doppia con una distanza tra le file di 60-70 cm. Per quanto riguarda l'epoca ottimale di impianto, nel caso di impiego dei rizomi generalmente si interviene da febbraio a marzo, non appena le condizioni del terreno lo consentono e nell'ambiente diminuiscono i rischi di gelate tardive. Nel caso di talee di culmi, questi vanno piantati nel tardo autunno o comunque alla fine del periodo vegetativo della pianta e il più possibile prima delle gelate invernali.

La densità di impianto va scelta in funzione dei fattori di natura economica, come ad esempio il raggiungimento in tempi brevi di alti rendimenti produttivi, e dall'operatività dei mezzi agricoli da adottare durante i diversi cicli vegetativi.

In sperimentazioni condotte in Veneto, la densità di 12.500 piante ha⁻¹ rappresenta il livello di investimento iniziale che più sembra conciliare la produttività con la riduzione dei costi di impianto (Vecchiet, 1994). Anche in prove condotte nella pianura pisana si è osservata nel tempo una maggiore produttività della coltura con densità iniziali piuttosto basse (di circa 2 piante m⁻²), in altre situazioni molti autori convergono nell'uso di una densità di impianto di circa 10 mila rizomi per ettaro. Le migliori rese con basse densità di impianto sono da attribuire ad una riduzione dei fenomeni competitivi intra-specifici.

Generalmente i rizomi vengono interrati ad una profondità di 15 cm con una distanza di 1m x 1m. Dopo la messa a dimora è consigliabile un intervento irriguo per consentire alle particelle di suolo di aderire alla superficie dei rizomi, ed un trattamento con un erbicida di pre-emergenza. Quest'ultimo si rende necessario poiché la coltura subisce, limitatamente al primo anno, la competizione con le infestanti dovuto dello scarso vigore delle piante e della insufficiente copertura del suolo. (Di Candilo e Ceotto, 2012). Inoltre è consigliabile una sarchiatura per eliminare le malerbe nell'interfila.

Va ricordato che la canna comune non presenta particolare suscettibilità a patogeni ed insetti e quindi nella gestione dell'impianto non sono previsti trattamenti per la difesa fitopatologica.

I germogli iniziano ad emergere dal suolo tra la fine di aprile e l'inizio di maggio, in quest'ultimo mese la parte aerea raggiunge una altezza variabile tra 40-60 cm. A fine giugno la copertura del suolo è pressoché completata.

Dalle ricerche sinora compiute non è stata riscontrata una risposta univoca alla concimazione minerale ed in particolare a quella azotata (Dalianis et al., 1994; Cristou 1999; Monti e Venturi, 1999; Cosentino et al., 2005) sia per esperienze condotte in impianti di età avanzata, con apparati radicali profondi e ben sviluppati, sia in impianti di recente realizzazione. Risulta evidente che seppur la coltura abbia una forte richiesta di azoto sembra attingere bene dalle riserve accumulate nei suoli agricoli con le colture precedenti e dalla naturale dotazione del suolo.

Come norma generale Di Candilo e Ceotto (2012) riportano le seguenti dosi di concime da applicare: in terreni di media fertilità è bene apportare 150-200 kg ha⁻¹ di P e K, in pre-impianto, e 100-120 kg ha⁻¹ di N in copertura; dal secondo anno in poi ci si può limitare alla somministrazione di 60-80 kg ha⁻¹ di N.

Inoltre, va sottolineato che l'*Arundo donax* è una pianta con elevata efficienza d'uso dell'azoto, poiché trasloca i nutrienti in autunno dalle foglie ai rizomi (Bell, 1997) ed è in grado, grazie al suo apparato radicale che già al secondo ciclo di crescita può superare i 2 metri di profondità, può intercettare l'acqua di falda e i nitrati in essa disciolta.

1.7.5 Raccolta

Come la maggior parte delle colture poliennali, la raccolta viene effettuata ogni anno.

Il periodo utile va da dicembre a marzo, quando il colore delle foglie vira da verde intenso al giallo-verdino. Nel caso la biomassa sia destinata alla combustione, la raccolta è programmata in pieno inverno poiché in questa epoca il prodotto presenta un minor contenuto di umidità ed un maggiore livello qualitativo a seguito della più completa traslocazione degli assimilati al rizoma e per la perdita naturale delle foglie (notoriamente più ricche in ceneri e in silice) (Monti et al., 2008).

Nel caso la biomassa sia destinata alla produzione di bioetanolo è importante che il prodotto sia poco lignificato per cui la raccolta sarà eseguita in estate od inizio autunno (Di Candilo e Ceotto, 2012)

La meccanizzazione della raccolta è stata sperimentata con successo sulla canna con l'utilizzo della falcia-trincia-caricatrici abitualmente utilizzate per colture da foraggio. I migliori

risultati sono stati ottenuti con le stesse macchine munite di testate prive di file (tipo “Kemper”) con le quali sono stati registrati tempi di raccolta dell’ordine di un’ora ad ettaro. Tali macchinari tagliano il fusto ad un’altezza dal suolo di circa 10 cm, e lo sminuzzano restituendo la biomassa in una pezzatura idonea sia per il successivo stoccaggio sia per l’alimentazione automatizzata dell’impianto energetico.

La falcia-trincia-caricatrice è generalmente affiancata da trattore dotato di carro rimorchio che raccoglie direttamente la biomassa trinciata in uscita dal collettore di lancio. Le dimensioni del cippato possono variare da 2 a 8 cm e può essere stoccato in cumuli all’aperto dove il contenuto di acqua può diminuire in pochi mesi arrivando anche ad un valore pari a circa la metà dell’umidità iniziale.

1.7.6 Produzione

In condizioni ambientali favorevoli, una notevole resa di sostanza secca è stata raggiunta in diverse regioni italiane: 37.7 t ha⁻¹ anno⁻¹ in Toscana (Angelini et al., 2009), 39.9 t ha⁻¹ anno⁻¹ in Emilia Romagna (Di Candilo et al., 2008) e 42 t ha⁻¹ anno⁻¹ in Sicilia (Cosentino et al., 2005). Sebbene la canna comune sembra perfettamente adatta alla produzione di biomassa per uso energetico, la sua ecologia è ancora in gran parte inesplorata. Nonostante sia descritta come una pianta a ciclo C3, mostra un’elevata capacità fotosintetica che le conferisce importanti vantaggi ecologici. In particolare analizzando alcuni parametri come scambio di gas, fluorescenza e conduttanza stomatica in condizioni di crescita naturali, si è registrato un massimo tasso fotosintetico pari a 37 μmoli m⁻² s⁻¹, un valore molto superiore ad altre piante dotate di ciclo C4 (Rossa et al., 1998), valori che in qualche modo metterebbero in discussione la sua appartenenza alle piante a ciclo C3.

Tuttavia non è ancora chiaro se l’elevata produttività è dovuta principalmente alla capacità di intercettare la radiazione solare durante la stagione di crescita od all’efficienza nel convertire la radiazione intercettata in biomassa vegetale oppure ad una combinazione sinergica di entrambi i fattori.

1.7.7 Usi tecnologici

L’*Arundo donax* risulta particolarmente interessante come biomassa ligno-cellulosica perché utilizzabile in processi a diverso livello tecnologico, infatti è considerata una delle più promettenti colture energetiche per la combustione (co-generazione) o per la pirogassificazione (Vervaeke et al., 2006). Inoltre va ricordato che la combustione per la

produzione di calore rappresenta la più efficiente tecnologia di biomasse per la riduzione delle emissioni dei gas serra, infatti consiste di pochi passaggi intermedi dalla biomassa raccolta all'uso dell'energia finale (Hoffmann et al., 2010).

Sebbene la trasformazione termica mostra un eccellente bilancio energetico positivo, la qualità della biomassa è piuttosto scarsa per l'utilizzazione nel processo di combustione, con un potere calorifico compreso tra 16.7 e 18.3 MJ kg⁻¹ (Bonari et al., 2004). Analisi chimiche su trinciato di *A. donax* hanno mostrato elevate quantità di ceneri totali (tra il 4.8 e il 7.4%), cloro, zolfo, azoto, silice e altri metalli, che possono creare problemi nelle centrali di combustione. Inoltre, le emissioni derivanti dalla combustione mostrano alte concentrazioni sia in polvere e in particelle (< 1 micron) e produzione di alcuni composti nocivi per la salute umana e l'ambiente, come gli ossidi di azoto, acido cloridrico, monossido di carbonio e biossido di zolfo (Dahl e Obernberger, 2004; Coulson et al., 2004).

La biomassa lignocellulosica rappresenta un interessante fonte di cellulosa per la produzione di carta (Ververis et al., 2004), in passato per la produzione di rayon (Facchini, 1941), etanolo di seconda generazione e biopolimeri (Williams e Biswas 2010) o per la coltivazione di lieviti oleaginosi dai quali è possibile estrarre lipidi per la produzione di biodiesel (Pirozzi et al., 2010). L'etanolo di II generazione a differenza del bioetanolo di I generazione derivante dalla fermentazione di zuccheri di cereali o colture amidacee è prodotto previa separazione della cellulosa, idrolisi, fermentazione alcolica e distillazione. Il processo di estrazione di bioetanolo a partire da biomassa lignocellulosica mostra una maggiore efficienza, con un valore EROEI (Energy Return On Energy Investment) di 3.91-6.57 (l'etanolo di prima generazione di circa 0.74-1.34) (Cleveland, 1984; Hattori e Morita, 2010), con una riduzione delle emissioni di gas serra del 94 % (Hattori e Morita, 2010) pari ad una riduzione tra il 12 ed il 18% dell'etanolo di prima generazione (Farrell et al., 2006; Hill et al., 2006).

Nel confronto tra il rendimento in bioetanolo tra diverse biomasse fibrose, l'*Arundo donax* ha mostrato un comportamento intermedio compreso tra il valore minimo espresso dal legno ai più alti valori espressi dalle biomasse erbacee, dovuto per lo più al basso tenore zuccherino ed alla presenza dopo i pretrattamenti di alte concentrazioni di acetato (4.8 g/l) che rappresenta un composto inibitore della fermentazione alcolica (Jeon et al., 2010). Il rendimento leggermente inferiore nel rilascio di glucosio e nella produzione di bioetanolo potrebbe essere dovuto agli elevati contenuti di lignina nei culmi (Neto et al., 1997). Inoltre il residuo contenente di lignina (15-20%) (Ververis et al., 2004) può essere interessante per la

produzione di compost o di altri materiali ad alto valore come rivestimenti (resine e compositi) a base di lignina (Piccolo et al., 1997; Park et al., 2008).

1.7.8 Bilancio energetico

La resa energetica e cioè la differenza tra il contenuto energetico della biomassa raccolta (output) e l'energia utilizzata in tutto il ciclo vegetativo per la lavorazione del terreno, semina, fertilizzanti, prodotti chimici, ecc (input) (definizione di Angelini et al., 2005b), è risultata essere pari a 280 GJ ha⁻¹ in corrispondenza della prima raccolta ma con successivi valori di 592 GJ ha⁻¹ dal 2° anno in poi (Venturi e Venturi, 2003). Prove effettuate in Sicilia tra il 2002 e il 2007 (Mantineo et al., 2009) indicano che nel 2° ed il 3° anno di coltivazione si raggiungono valori di 400 e 600 GJ ha⁻¹ rispettivamente, con punte prossime a 700 GJ ha⁻¹ in condizioni ottimali di umidità del suolo e concimazione azotata, questi valori sono di gran lunga superiori a quelli registrati per il miscanto la cui resa energetica al 3° anno è pari a 426 GJ ha⁻¹ o per il cardo che nell'anno più produttivo raggiunge valori pari a 365 GJ ha⁻¹.

Altro vantaggio, per lo più economico, di una coltura da energia poliennale perenne come la canna comune è legato alla possibilità di ammortizzare i costi di impianto su un lungo periodo (es. una lunghezza di ciclo di 10 anni) riducendo la loro incidenza nel 1° anno.

Tra le diverse specie erbacee le colture rizomatose, come l'*A. donax*, hanno mostrato avere un interessamento maggiore dovuto al loro bilancio energetico favorevole se comparato con le piante erbacee annuali le quali richiedono circa il 50% dell'energia totale spesa in operazioni di aratura e semina. Il rapporto tra energia in output ed input nella produzione di *A. donax* nei primi sei anni di crescita è 26-100 per tesi fertilizzate e non fertilizzate, valori di gran lunga migliori rispetto alle colture da grano pari a 8.5 (Lewandowski et al., 1995) o del *Miscanthus sinensis* (valori tra 15 e 20) riportati da Lewandowski e Kicherer (1997) oppure compresi tra 22 e 47 come riportati da Ercoli et al., (1999) e che risultavano dipendenti dall'irrigazione e dai livelli di concimazione azotata.

1.8 Scopo della ricerca

Sulla base del crescente interesse verso la coltivazione di specie dedicate ad uso energetico, risulta importante testare anche sul territorio nazionale, il loro adattamento e le loro risposte produttive in ambienti di coltivazione non idonei alle colture alimentari. Per tali motivi, il presente lavoro si pone l'obiettivo di studiare il comportamento dell'*Arundo donax* L., (specie erbacea perenne a destinazione energetica più promettente per l'areale mediterraneo) in aree considerate "marginali" del territorio campano, cioè caratterizzate da fattori ambientali limitanti (es. aree contaminate, presenza di falda affiorante, aree potenzialmente interessate alla progressiva salinizzazione, aree cerealicole collinari soggette ad erosione, ecc) che le rendono non idonee per le colture tradizionali o poco convenienti dal punto di vista economico

Per migliorare la conoscenza delle dinamiche di accumulo di biomassa, di sviluppo fogliare e delle asportazioni azotate durante il ciclo annuale e nel lungo periodo e comprendere le eventuali limitazioni di carattere ambientale e/o di tecnica colturale, è stata effettuata l'analisi di crescita che ha il vantaggio di utilizzare dati semplici primari in forma di aree, pesi e volumi al fine di studiare e descrivere i vari processi che coinvolgono lo sviluppo della coltura.

I siti individuati ricadono in tre sistemi differenti del territorio campano, in particolare: pianura irrigua a rischio salinizzazione (sito di Bellizzi, SA), pianura a rischio inquinamento dei suoli (sito di Acerra, NA) e collina a rischio erosione (sito di Sant'Angelo dei Lombardi, AV).

Le prove sono state condotte in tutti i siti in assenza d'irrigazione e con due tesi a confronto (due livelli di concimazione azotata per la provincia di Salerno ed Avellino e due livelli di fertilizzazione, con e senza compost, per la provincia di Napoli).

2. MATERIALI E METODI

2.1. Descrizione dei siti sperimentali oggetto di studio:

2.1.1 Sito di Bellizzi (SA)

La prova sperimentale è stata condotta presso l'azienda sperimentale "Torre Lama" dell'Università degli studi di Napoli Federico II, situata a Bellizzi (SA) (40°37'N, 14°58'E, 30 m s.l.m), nella Piana del Sele. L'azienda rientra nel Comprensorio di Bonifica Destra Sele, si estende su una superficie di 48 ettari di cui 7 ettari costituiscono tare e 41 ettari sono utilizzati per la ricerca. I suoli dell'azienda sono franco-argillosi, scuri e molto profondi (vertisuoli ed alfisuali). L'appezzamento oggetto di studio è situato in località "Scalera" il cui suolo è classificato come *Vertic Luvisols*; profondo, con tessitura che va da franco-limosa nella parte superiore del profilo a franca nella parte inferiore; non pietroso, non calcareo con drenaggio mediocre. Dal punto di vista chimico presenta un pH da neutro a moderatamente alcalino in profondità, un complesso di scambio sempre dominato dallo ione calcio, che varia dal 90.8 % al 96.9 %, con percentuali poco inferiori nell'ultimo strato.

I valori di Na e K sono relativamente bassi ed il magnesio infine è presente con valori poco significativi. L'orizzonte superficiale ha una struttura granulare, molto grande, moderatamente sviluppata. L'orizzonte profondo, ha struttura prismatica, di dimensioni medie, fortemente sviluppata con scarsa presenza di scheletro.

Tabella 2.1 - Bellizzi: Proprietà chimico - fisiche del suolo

| Granulometria | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------|------|---------|------------------|-----|------|------|-----|----------------|-----------|-----|-----|-----|
| Orizzonte | Sabbia | Limo | Argilla | pH | pH | Norg | C.O | S.O | CSC | Basi S. % | | | |
| (cm) | (%) | (%) | (%) | H ₂ O | KCl | (%) | (%) | (%) | cmol(+) /kg | Ca | Mg | Na | K |
| Ap1 (0-4) | 25.2 | 50.5 | 24.3 | 6.8 | 5.8 | 0.14 | 1.92 | 3.3 | 20.4 | 90.8 | 0.5 | 3.4 | 5.3 |
| Ap2 (4-40) | 33.3 | 36.0 | 30.6 | 7.7 | 6.2 | 0.11 | 1.15 | 2.0 | 16.9 | 96.9 | 0.4 | 2.4 | 0.3 |
| Bss (40-70) | 36.0 | 14.8 | 49.3 | 7.9 | 6.2 | 0.07 | 1.06 | 1.0 | 32.0 | 85.7 | 0.5 | 7.9 | 5.9 |

La preparazione del suolo è iniziata nell'autunno 2007 attraverso una rippatura (60 cm) e successiva fresatura (20 cm). E' stata effettuata una concimazione prima dell'impianto distribuendo 150 kg ha⁻¹ di K₂O (da solfato potassico al 52%) e 150 kg ha⁻¹ di P₂O₅ (da perfosfato triplo al 46%).

E' stata effettuata una concimazione azotata nell'aprile 2008 pari a 100 kg ha⁻¹ di N ed a partire dall'anno 2009, sono stati adottati due livelli di concimazione, pari rispettivamente a 50 e 100 kg ha⁻¹ di N. La concimazione azotata con urea è stata effettuata ogni anno, subito dopo la ripresa vegetativa.

Il materiale di propagazione (rizomi) è stato raccolto da genotipi locali adattati alle condizioni climatiche della zona: pezzi di rizomi con almeno 3 gemme sono stati trapiantati nel mese di febbraio 2008, con un sesto di impianto di 1.0 x 1.0 m ad una profondità di 10 cm.

I trattamenti indicati rispettivamente con N100 (dose di concime pari a 100 kg ha⁻¹ di N) e N50 (dose di concime pari a 50 kg ha⁻¹ di N) sono stati combinati in un disegno sperimentale a blocchi randomizzati con tre repliche in parcelle da 528 m² (16 x 333 m).

La tecnica colturale utilizzata è stata a basso input energetico, in particolare non si è fatto ricorso all'irrigazione, le piante sono state irrigate solo dopo il trapianto, con l'obiettivo di assicurare un buon contatto tra radici e suolo; mentre durante le diverse stagioni di crescita la coltura si è avvantaggiata unicamente dell'acqua meteorica.

Durante i 5 anni di prova, i parametri agrometeorologici (temperature e le precipitazioni mensili) sono stati acquisiti dalla Rete Agrometeorologica Regionale (stagione agrometeorologica di Battipaglia, SA).

L'azienda è situata in una zona dove il clima è definito temperato caldo, tipico delle regioni mediterranee. Gli inverni sono particolarmente freddi e le temperature medie annuali, fatta eccezione per alcuni giorni dell'anno, sono comprese tra 5°C e 29°C.

Le precipitazioni sono concentrate nel periodo autunno - vernino, quindi tra i mesi di ottobre e marzo, generalmente con punte massime a gennaio e minime ad agosto. Quasi mai si verificano nevicate, mentre più frequenti sono i casi di grandinate soprattutto nel periodo primaverile ed autunnale. I venti sono, di norma, moderati.

2.1.2 Sito di Acerra (NA)

Il campo sperimentale è situato ad Acerra, (longitudine 40° 59'56 "N , latitudine 14°20'58" E) in provincia di Napoli, località inclusa nel Sito di Interesse Nazionale (SIN) Litorale Domizio Flegreo ed Agro Aversano, che dispone di suoli vulcanici particolarmente adatti per le colture orticole intensive. La prova sperimentale è stata condotta presso un'azienda privata il cui suolo è classificato come *Vitrantic Haplustepts* appartenente al gruppo degli Inceptisols (Soil Taxonomy), sviluppato su ceneri e pomice piroclastiche, localmente ridistribuite da

acque di superficie. La tessitura del suolo è sabbioso-limosa (USDA), con un alto contenuto di carbonati (50% in media), un pH sub-alcalino e un alto tenore di carbonio organico e azoto (tabella 2.2)

Il suolo è classificato dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale non idoneo per l'attività agricola a causa della contaminazione da cadmio valutata mediante monitoraggio ambientale svolto. Le concentrazioni di cadmio nel suolo erano basse se paragonate ad altri siti inquinati e, quindi, è stata valutata la possibilità di effettuare un esperimento a medio termine di "bonifica" del suolo.

E' stato utilizzato compost come fertilizzante organico, ottenuto da scarti verdi e frazione organica dei rifiuti solidi urbani (RSU), che presentava un bassissimo contenuto in elementi potenzialmente tossici (PTE) con caratteristiche che rientravano nei parametri di legge in materia di fertilizzanti organici (L 784/94, DL 99/92) che ne consentono l'utilizzo in agricoltura senza nessuna restrizione. La distribuzione del fertilizzante organico alla dose di 20 t ha⁻¹, corrispondenti a 130 kg N ha⁻¹ è stata effettuata manualmente il 14/04/2009 seguito (dopo due giorni) da un l'interramento a 20 cm con una fresatrice. Il materiale di propagazione è stato raccolto da ecotipi proveniente dall'azienda sperimentale Torre Lama di Bellizzi (SA); pezzi di rizomi con almeno 3 gemme sono stati trapiantati il 17/04/2009 ad una profondità di 0.10 m con una distanza di 0.60 m tra le file con una densità di 2.7 piante m⁻². Il compost e l'inoculo dei rizomi con *T. harzianum* A6 sono stati combinati in quattro diversi trattamenti: rizomi non inoculati e non fertilizzati (NT-NC); rizomi inoculati e non fertilizzati (T-NC), rizomi non inoculati e fertilizzati (NT-C); rizomi inoculati e fertilizzati con compost (TC). I trattamenti sono stati disposti in un disegno a blocchi completamente randomizzati con tre repliche in plots da 132 m² (6 x 22 m).

Nel caso studio riportato nella seguente tesi sono state monitorate solo le parcelle (NT+NC e NT+C) rispettivamente definite con le seguenti sigle: NoCOM e COM. La scelta è stata motivata dal fatto che le tesi erano più "simili" a quelle realizzate negli altri due siti analizzati. Le piante sono state irrigate solo dopo il trapianto, con l'obiettivo di assicurare un buon contatto tra radici e suolo, mentre durante l'intera stagione di crescita la coltura si è avvantaggiata unicamente dell'acqua meteorica.

Durante i 4 anni di prova, i parametri agrometeorologici (temperature e le precipitazioni mensili) sono stati acquisiti grazie alla Rete Agrometeorologica Regionale (stagione agrometeorologica di Marigliano, NA). Il clima è quello caratteristico della pianura costiera

con inverni temperati e con frequenti precipitazioni concentrate nei periodi primaverili - autunnali, con estate calda e asciutta.

Tabella 2.2 - Acerra: Proprietà chimico - fisiche del suolo.

| Granulometria | | | | | | | | | | |
|---------------|--------|------|---------|-----|-------|------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Strato | Sabbia | Limo | Argilla | pH | N org | S.O. | N-NO ₃ | N-NH ₄ | CaCO ₃ | Ece |
| (cm) | (%) | (%) | (%) | | (%) | (%) | ppm | ppm | (%) | dS m ⁻¹ |
| 0-20 | 59.2 | 25.0 | 15.8 | 7.7 | 0.18 | 2.99 | 9.7 | 7.7 | 48.3 | 1.93 |
| 20-40 | 57.8 | 25.3 | 16.8 | 7.7 | 0.18 | 2.97 | 15.0 | 9.7 | 50.6 | 2.15 |
| 40-60 | 50.2 | 32.3 | 17.5 | 7.8 | 0.12 | 1.95 | 8.0 | 8.7 | 23.7 | 2.11 |

2.1.3 Sito di Sant'Angelo dei Lombardi (AV)

La prova sperimentale è stata condotta presso il Centro Rotary gestito dall'ex Dipartimento di Ingegneria Agraria e Agronomia del Territorio dell'Università di Napoli, sito a S. Angelo dei Lombardi (AV) (40°92'N, 15°12'E, 700 m s.l.m.), nella collina interna dell'alta Irpinia in località "Ruggiano". L'appezzamento è caratterizzato da una pendenza del 10% con suoli argillosi e profondi ed un basso contenuto di sostanza organica (tab. 2.3)

Le parcelle oggetto di studio rientrano in un impianto sperimentale costruito nel 1993 composto da tredici parcelle ciascuna delle quali con un'estensione di circa 280 m² (28 m x 10 m) con lo scopo di studiare gli effetti dei sistemi colturali sull'erosione del suolo. Tre plot sono stati dedicati alla coltura della canna comune. La preparazione del suolo è iniziata nell'agosto 2003 attraverso una rippatura (60 cm) seguita da un'aratura (40 cm) e fresatura (20 cm).

Nella fase di pre-impianto è stata somministrata paglia nella dose di 10 t ha⁻¹ e 75 kg ha⁻¹ di azoto (urea) al fine di aumentare la dotazione di sostanza organica e migliorare la struttura.

Il materiale di propagazione (rizomi) è stato raccolto da genotipi locali adattati alle condizioni climatiche dell'Irpinia; pezzi di rizomi con almeno 3 gemme sono stati trapiantati nel mese di febbraio 2004, con un sesto di impianto di 1.0 x 1.0 m ad una profondità di 10-20 cm. Le parcelle sono state sottoposte alle ordinarie tecniche di coltivazione (scerbatura manuale nel 1° anno e sfalcatura della flora infestante negli anni successivi). La tecnica colturale utilizzata è stata a basso input energetico, in particolare non si è fatto ricorso all'irrigazione, le piante sono state irrigate solo dopo il trapianto, con l'obiettivo di assicurare un buon contatto tra radici e suolo; mentre durante le stagioni di crescita la coltura si è

avvantaggiata unicamente di acqua meteorica. E' stata effettuata una concimazione azotata nell'aprile 2005 pari a 50 kg ha⁻¹ di N; a partire dall'anno 2007, sono stati adottati due livelli di concimazione pari rispettivamente a 50 e 100 kg ha⁻¹ di N. La concimazione azotata (urea) è stata effettuata ogni anno, durante la ripresa vegetativa.

Tabella 2.3 - Sant'Angelo dei Lombardi: Proprietà chimico - fisiche del suolo

| Granulometria | | | | | | | |
|---------------|--------|------|---------|------|-----------------------|------|--------------------------------------|
| Strato | Sabbia | Limo | Argilla | pH | Norg | S.O. | P ₂ O ₅ ass |
| (cm) | (%) | (%) | (%) | | (g kg ⁻¹) | (%) | (mg kg ⁻¹) |
| 0-20 | 36.9 | 24.3 | 38.8 | 8.07 | 0.97 | 1.16 | 17.4 |
| 20-40 | 37.2 | 24.2 | 37.1 | 8.18 | 0.82 | 1.06 | 14.8 |
| 40-60 | 36.6 | 25.4 | 38.0 | 8.36 | 0.66 | 0.86 | 9.8 |

Durante i 9 anni di prova, le temperature e le precipitazioni mensili sono state misurate attraverso una stazione climatica posta nei pressi del campo sperimentale.

Il clima è quello caratteristico della collina interna della Campania, con inverno freddo e con frequenti precipitazioni nevose, con estate calda e asciutta. I mesi più asciutti sono giugno, luglio e agosto, le precipitazioni sono concentrate nei mesi autunnali ed invernali e spesso assumono carattere temporalesco.

2.2. Rilievi sulla coltura

2.2.1 Raccolta della biomassa aerea

Per tutti i siti studiati, la raccolta della biomassa aerea, è stata effettuata manualmente alla fine di ogni ciclo di crescita annuale su un'area di saggio di 10 m² escludendo le piante di bordo. Le date di raccolta dei 3 siti nei diversi anni sono riportate nella tabella 2.4. Le piante sono state tagliate a circa 5 cm dal suolo con successiva ripartizione in foglie e in culmi per la determinazione del peso fresco. Inoltre, sono stati determinati: altezza, diametro basale e numero dei culmi. Un sottocampione rappresentativo di ciascuna frazione vegetale è stato posto in stufa ventilata a 60° C fino a peso costante per determinare la percentuale di sostanza secca. I campioni di vegetale sono stati successivamente macinati (4 mm) con *Molino a coltelli SM 300 (Retsch Italia s.r.l)* ed inviati in laboratorio per la determinazione del contenuto (%) in azoto effettuata con il metodo Kjeldhal.

Tabella 2.4 - Data di Impianto e date di raccolta

| | |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sant'Angelo dei Lombardi (Avellino) | Impianto: febbraio 2004 Data di raccolta: novembre 2004, novembre 2005, ottobre 2006, ottobre 2007, febbraio 2009, gennaio 2010, gennaio 2011, gennaio 2012, febbraio 2013. Cicli di crescita tot: 9 |
| Bellizzi (Salerno) | Impianto: febbraio 2008 Data di raccolta: novembre 2008, novembre 2009, dicembre 2010, dicembre 2011, febbraio 2013. Cicli di crescita tot: 5 |
| Acerra (Napoli) | Impianto: aprile 2009 Data di raccolta: novembre 2009, febbraio 2011, gennaio 2012, febbraio 2013. Cicli di crescita tot: 4 |

2.2.2 Analisi di crescita (Growth analysis)

Considerata la complessità dei fattori naturali e tecnici che intervengono nel determinismo della resa, l'analisi delle componenti di questa, non è sufficiente a renderci ragione dei fatti e dei fenomeni che in un dato ambiente contribuiscono a deprimerla o ad esaltarla.

Per accettare le basi fisiologiche delle variazioni della produzione vegetale, il progresso della ricerca scientifica ha richiesto metodi di indagine più analitici ed approfonditi.

Tra questi va ricordata l'analisi di crescita che si riferisce generalmente ad una serie di metodi quantitativi utilizzati per descrivere e interpretare il comportamento di un'intera pianta o un sistema colturale in condizioni naturali, semi-naturali o controllate.

E' in grado di fornire un approccio esplicativo, olistico ed integrato della morfologia delle piante interpretandone la fisiologia, fenologia e funzioni ed ha il vantaggio di utilizzare dati semplici primari in forma di aree, pesi e volumi al fine di studiare e descrivere i vari processi che coinvolgono l'intero sistema. (Evans, 1972; Causton e Venus, 1981; Hunt, 1990).

E' fondata sul rilievo, in corrispondenza di stadi o momenti successivi del ciclo biologico, del peso secco totale e della superficie fogliare, sia di una pianta singola che di un gruppo di piante facenti parte di una comunità coltivata. Questi dati, opportunamente elaborati, servono a calcolare una serie di indici, attraverso i quali è possibile analizzare il procedere dell'accrescimento e alla luce dei fattori ambientali e tecnici che intervengono nelle

successive fasi del processo stesso comprendere meglio il determinismo della produzione, analizzare o individuare le cause che possono limitarla, mettere a punto mezzi per esaltarla. Gli indici adottati sono stati i seguenti:

CGR (Crop Growth Rate): espresso come il quantitativo di sostanza secca di una coltura prodotto nell' unità di tempo e per unità di superficie, dalla seguente formula:

$$CGR = (B2-B1)/(t2-t1)$$

dove:

CGR = Crop Growth Rate (espresso in $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ o in $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$)

B1 e *B2* = biomassa secca ($g\ m^{-2}$) rispettivamente al tempo *t1* e *t2*

t1 e *t2* = numero di giorni che intercorro tra un prelievo (*t1*) ed il successivo (*t2*)

Il *CGR* dipende dalla genetica, soprattutto per l'ampiezza dell'apparato fotosintetizzante, ma viene fortemente condizionato dai fattori ambientali, dalla competizione e dalle operazioni colturali. E' sensibile a qualunque carenza nella disponibilità di risorse (energia, CO_2 , acqua ed elementi minerali), alla presenza di sostanze tossiche, e in generale a qualunque tipo di stress;

LAI (Leaf Area Index): rapporto tra l'area fogliare per unità di superficie di suolo, viene espresso in $m^2\ m^{-2}$;

LAR (Leaf Area Ratio): rapporto tra l'area fogliare e il peso secco totale della coltura, viene espresso in $cm^2\ kg^{-1}$ o $m^2\ kg^{-1}$;

LAD (Leaf Area Duration): Esprime la durata dell'apparato fogliare, dalla quale, congiuntamente con l'estensione dell'apparato stesso e con l'intensità di assimilazione, dipende la quantità di materia organica prodotta da una pianta o da una coltura. In pratica è l'indice che descrive meglio il potenziale assimilatorio di una coltura. Il relativo valore medio, in un determinato intervallo di tempo, si ricava dalla seguente espressione:

$$LAD = (LA2 + LA1) * (t2 - t1)/2$$

dove:

LAD = Leaf Area Duration (giorni)

LAI1 e *LAI2* = *LAI* rispettivamente al tempo *t1* e *t2*

t1 e *t2* = numero di giorni dalla semina ai prelievi rispettivamente 1 e 2

Espresso in $m^2\ m^{-2} \times$ giorni rappresenta l' integrale della curva del *LAI* in funzione del tempo espresso in giorni (n di giorni con *LAI* unitario);

NAR (Net Assimilation Rate): misura l'efficienza produttiva della superficie fogliare esprimendo la quantità di sostanza secca prodotta per unità di superficie assimilatoria in un certo intervallo di tempo, espresso dalla seguente formula:

$$NAR = 1/(L2-L1)*(B2-B1)/(t2-t1)$$

dove:

NAR= Net Assimilation Rate (espresso in $g\ m^{-2}\ d^{-1}$)

t1 e t2 = numero di giorni che intercorro tra un prelievo (t1) ed il successivo (t2)

B1 e B2 = biomassa secca ($g\ m^{-2}$) rispettivamente al tempo 1 e 2

L1 e L2 = superficie fogliare al tempo t1 e t2

Il NAR dipende dalla velocità di fotosintesi, dal tasso di respirazione, e dalla traspirazione e funzionalità delle foglie;

LWR (Leaf Weigth Ratio): rapporto tra peso secco delle foglie e peso secco totale della coltura, viene espresso in percentuale (%), utile per indicare la ripartizione degli assimilati.

Per i tre siti a confronto, i rilievi sono iniziati 30 giorni dopo la ripresa vegetativa (tab. 2.5).

E' stata scelta per ogni data di campionamento un'area di saggio di $1\ m^2$ ripetuta 3 volte, le piante sono state tagliate, anche in questo caso, a circa 5 cm dal suolo.

I rilievi effettuati hanno riguardato: (I) peso fresco biomassa aerea (culmi e foglie), (II) n° foglie verdi e secche, (III) area fogliare, (IV) altezza della pianta, (VI) diametro basale dei culmi, (VII) numero di culmi. I campioni di ciascuna frazione sono stati posti in stufa ventilata a $60^{\circ}\ C$ fino a peso costante per la determinazione della percentuale di sostanza secca. Il materiale vegetale è stato successivamente macinato (4 mm) con *Molino a coltelli SM 300 (Retsch Italia s.r.l.)* per la determinazione del contenuto (%) in azoto, effettuata con il metodo Kjeldhal. L'area fogliare è stata misurata mediante l'utilizzo dell'areometro *LI-3100C Area Meter*.

Tabella 2.5 - Cicli di crescita monitorati nei tre siti.

| | |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sant'Angelo dei Lombardi (Avellino) | 8° Ciclo di crescita (2012) : periodo maggio - novembre 9° Ciclo di crescita (2013) : periodo maggio - novembre |
| Bellizzi (Salerno) | 3° Ciclo di crescita (2011) : periodo maggio - ottobre 4° Ciclo di crescita (2012) : periodo maggio - novembre 5° Ciclo di crescita (2013) : periodo maggio - novembre |
| Acerra (Napoli) | 3° Ciclo di crescita (2011) : periodo maggio - ottobre 4° Ciclo di crescita (2012) : periodo maggio - novembre |

2.3. Rilievi sul suolo

Per tutti i siti a confronto, durante il periodo di sperimentazione, sono stati raccolti campioni di suolo in tre strati (0-20, 20-40 e 40-60 cm) al momento dell'impianto, negli anni successivi in corrispondenza della raccolta della biomassa aerea, (tab. 2.4) (vedi sopra) e durante le stagioni vegetative monitorate per lo studio dell'analisi di crescita (tab. 2.5).

Sui campioni di suolo è stato determinato il contenuto dell'acqua, attraverso il metodo gravimetrico, eseguito pesando il campione umido e rimuovendo successivamente l'acqua attraverso il disseccamento in stufa (100-110°C) e successiva pesata del campione: la differenza tra le due pesate permette di conoscere la quantità d'acqua che era contenuta nel campione. Tale valore moltiplicato per la densità ci consente di conoscere il quantitativo di acqua in termini volumetrici.

Una quota parte di questi campioni è stata essiccata in stufa a 60° fino a peso costante ed analizzata per la determinazione delle caratteristiche chimico fisiche secondo i metodi ufficiali indicati dai D.M. n. 79 del 11/05/1992 e D.M. n. 185 del 13/09/1999. In particolare, per la determinazione del contenuto di Azoto organico, Azoto minerale e Carbonio organico, rispettivamente sono stati adottati i metodi: Kjeldhal, Hach, Walkley - Black.

2.4. Elaborazioni statistiche

Tutti i dati sono stati elaborati statisticamente utilizzando il software MSTAT-C (Crop and Soil Science Department, Michigan State University). I dati di produzione e di asportazione di N sono stati analizzati tramite ANOVA utilizzando un disegno a blocchi randomizzati a 1 fattore (Fertilizzazione) combinata con gli anni. Tutte le medie sono state separate utilizzando il test delle DMS per un p-value ≤ 0.05 (*) e p-value ≤ 0.01 (**).

3. RISULTATI E DISCUSSIONI

3.1. Sito sperimentale di Bellizzi (SA)

3.1.1 Andamento climatico

Il clima è stato monitorato dall'anno dell'impianto della coltura(2008) al 2013.

Durante i sei anni di monitoraggio le temperature non hanno mostrato particolari variazioni con un valore medio di circa 17°C (tab. 3.1), temperature minime assolute comprese tra 0 e - 3 °C e massime tra 35 e 37 °C. Gli apporti pluviometrici medi annui sono stati di circa 621 mm con una richiesta evapotraspirativa (Hargreaves) media di 1105 mm. Tali condizioni descrivono un ambiente caratterizzato da un importante deficit idrico (differenza tra apporti pluviometrici e richiesta evapotraspirativa atmosferica) pari a circa 485 mm su base annuale e di 117 mm nella stagione primaverile-estiva (maggio-settembre). Condizione normalmente affrontata dal settore agricolo con la gestione irrigua del territorio, grazie alla presenza di pozzi, falde superficiali e la rete consortile del consorzio di Bonifica Destra Sele che fornisce acqua per l'irrigazione a domanda.

Tabella 3.1. Bellizzi (SA) - Parametri agrometeorologici durante il periodo di crescita dell'*Arundo donax* (2008-2013) (*dato giornaliero)

| Anno | T. media annuale | T. min ass. * | T. max ass.* | P | ET0 |
|------|---------------------|---------------|-----------------------|-------|--------|
| | ° C | | mm anno ⁻¹ | | |
| 2008 | 17.0 | -1.0 | 35.6 | 655.4 | 1118.9 |
| 2009 | 17.1 | 0.3 | 37.4 | 713.6 | 1103.8 |
| 2010 | 16.7 | -2.6 | 34.8 | 809.9 | 1083.5 |
| 2011 | 17.1 | 0.2 | 37.1 | 433.0 | 1107.9 |
| 2012 | 17.0 | -1.3 | 37.0 | 527.5 | 1121.8 |
| 2013 | 17.1 | 0.1 | 35.7 | 588.1 | 1097.9 |

Dei sei anni di prova sperimentale, gli ultimi tre fanno riferimento al lavoro di tesi sviluppato ed all'analisi di crescita, per cui di seguito, nei grafici 3.1.a ed 3.1.b, sono riportati gli andamenti dell'apporto pluviometrico cumulato e della temperatura media degli anni 2011, 2012 e 2013. L'andamento delle piogge cumulate ha evidenziato una similitudine nella distribuzione delle stesse tra gli anni 2011 e 2012, con una importante differenziazione del 2013, (già dal mese di gennaio, 0-30 DOY), nel quale gli apporti pluviometrici sono stati più elevati con l'evidenza di lievi incrementi anche durante il periodo estivo (182-253 DOY) dove per gli altri anni l'andamento è risultato piatto, con una ripresa dell'incremento della curva anticipato nel 2011 rispetto al 2012 al 241 esimo giorno (nel 2012 la ripresa inizia con 20

giorni di ritardo: 265 DOY). Per le temperature medie invece si riscontra un comportamento simile nei tre anni, con una variabilità stagionale che ha mostrato solo nel periodo di fine novembre inizio dicembre dell'anno 2011 una temperatura media dell'aria più elevata (intorno ai 15 °C), diversa dagli altri due anni analizzati, ma al tempo stesso atipica per il periodo.

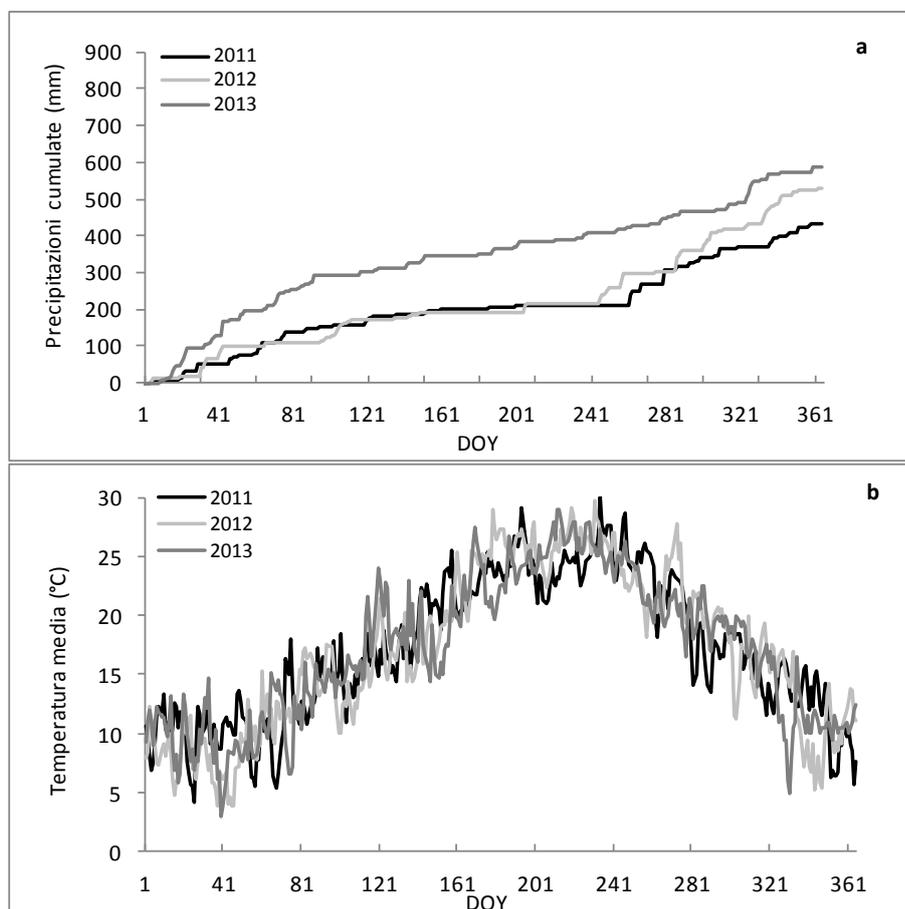


Fig. 3.1 - a) Andamento delle precipitazioni cumulate (mm); b) Andamento della temperatura media (°C) nel periodo in cui è stata effettuata l'analisi di crescita (2011-2013).

Durante le tre stagioni di crescita monitorate, si è registrato un forte deficit idrico in accordo con quanto riscontrato durante tutta l'annata. In particolare, l'anno 2011 è stato quello caratterizzato da un valore di deficit idrico più elevato (706.4 mm) (tab. 3.2).

Tabella 3.2 - Valori annuali e stagionali di Pioggia, ET0 e Deficit (mm) relativi al periodo in cui è stata effettuata l'analisi di crescita (2011-2013)

| Anno | Valori annuali | | | Stagione di crescita (aprile-novembre) | | |
|------|----------------|--------|---------|----------------------------------------|-------|---------|
| | Pioggia | ET0 | Deficit | Pioggia | ET0 | Deficit |
| | mm | | | | | |
| 2011 | 433.0 | 1107.9 | -674.9 | 221.7 | 928.1 | -706.4 |
| 2012 | 527.5 | 1121.8 | -594.3 | 354.8 | 942.0 | -587.2 |
| 2013 | 588.1 | 1097.9 | -509.8 | 279.8 | 931.3 | -651.5 |

3.1.2 Produzione

Il monitoraggio della produzione è stato realizzato su due tesi a diverso apporto di concime azotato: (100 e 50 kg ha⁻¹N) per cinque annate di produzione (2008-2012).

Per entrambe le tesi, la produzione di biomassa aerea durante gli anni di studio, ha mostrato un andamento crescente iniziale (primi tre anni) ed il raggiungimento di una fase stazionaria dal terzo anno in poi (fig. 3.1 e tab. 3.3). Sono emerse differenze significative per il fattore anno (tab. 3.4) e non significative tra le dosi di concime, anche se dal terzo anno in poi le due tesi sembrerebbero diversificarsi con produzioni più alte del 36 % con le dosi maggiori di N.

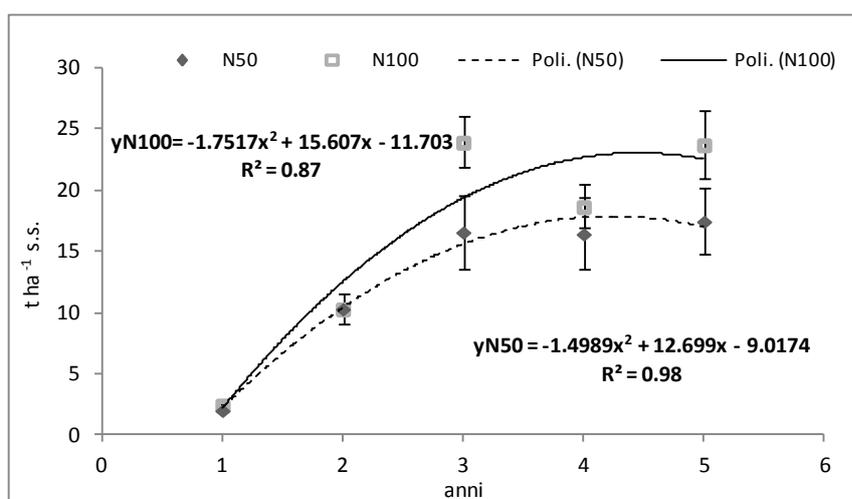


Figura 3.1 - Bellizzi: : Produzione di sostanza secca in *A. donax* (analisi di regressione con due dosi di azoto N100 e N50). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Tra i parametri produttivi analizzati (tab. 3.3), differenze significative tra gli anni si sono riscontrate anche per la percentuale di foglie e culmi sul peso secco totale e per l'altezza dei culmi (tab. 3.4). Per quanto riguarda la percentuale di foglie sul peso secco totale, questa si è differenziata soprattutto nell'ultimo anno, molto probabilmente dovuto al fatto che la raccolta è stata effettuata in pieno inverno quando la caduta delle foglie è oramai terminata, a differenza degli altri anni in cui la raccolta è stata effettuata a fine autunno quando la percentuale di foglie sul totale risultava essere più alta (pari a 18.6%). C'è da sottolineare che l'epoca di raccolta è indicata come un fattore chiave per la produzione di biomassa utile alla conversione energetica che è costituita dalla frazione lignocellulosica dei culmi. Ipotizzando l'impiego di tali biomasse nella termovalorizzazione, le foglie sono da ritenersi meno pregiate per problemi di vetrificazione nelle celle di combustione dovute all'elevata presenza di silicio e potassio.

La raccolta in pieno inverno può essere vista come una soluzione tecnica particolarmente efficace nel garantire una biomassa di qualità ai centri di trasformazione riducendo i costi per la defogliazione. L' altezza dei culmi è stata diversa tra gli anni ed è stata influenzata dalla fertilizzazione azotata (100 vs 50 kg ha⁻¹) con valori rispettivamente di 386.5 vs 358.9 cm (tab. 3.3), nessuna differenza significativa è stata riscontrata per gli altri parametri produttivi analizzati (tab. 3.4). La percentuale di sostanza secca alla raccolta per entrambe le tesi nei diversi anni è risultata pressoché uguale, i valori si collocano in un *range* ottimale per le fasi successive della filiera quali la raccolta meccanica e il trasporto in impianti di trasformazione.

Tabella 3.3 - Bellizzi: Produzione e parametri produttivi alla raccolta in *A. donax* nel periodo 2008-2012.

| Anno | Biomassa aerea | Sostanza secca | Culmi | Foglie | Diametro basale | Altezza | N culmi |
|-------------------|---------------------------|----------------|---------|---------|-----------------|---------|------------------|
| | (t ha ⁻¹ s.s.) | (%) | (% tot) | (% tot) | cm | cm | n°m ² |
| 2008 | 2.3 c | 46.5 | 79.9 c | 20.1 a | n.p | n.p | n.p |
| 2009 | 10.3 b | 45.8 | 81.5 c | 18.5 a | 1.9 | 291.7 b | 8.5 |
| 2010 | 20.3 a | 49.8 | 82.7 c | 17.3 a | 1.9 | 395.8 b | 10.6 |
| 2011 | 17.6 ab | 45.5 | 86.7 b | 13.3 b | 1.7 | 408.2 a | 10.2 |
| 2012 | 20.6 a | 45.6 | 96.8 a | 3.3 c | 1.5 | 395.2 a | 14.0 |
| Fertilizzazione N | | | | | | | |
| N 50 | 12.6 | 46.3 | 86.7 | 13.3 | 1.7 | 358.9 b | 10.3 |
| N 100 | 15.9 | 45.8 | 87.1 | 12.9 | 1.8 | 386.5 a | 11.4 |

Tabella 3.4 - Analisi della varianza: significatività dei fattori principali e dell' interazione (P <5% = *; P <1% = **)

| | Fattori principali | | | | Interazione | |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|-----|--------------------------|-------------|-----------------|
| | Anno | Fertilizzazione N | | Anno x Fertilizzazione N | | |
| | | Significatività | DMS | Significatività | DMS | Significatività |
| Biomassa aerea (t ha ⁻¹) | * | 8.48 | ns | - | ns | - |
| Sostanza secca (%) | * | 3.58 | ns | - | ns | - |
| Culmi (% tot) | ** | 3.32 | ns | - | ns | - |
| Foglie (% tot) | ** | 3.31 | ns | - | ns | - |
| Diametro basale (cm) | ns | - | ns | - | ns | - |
| Altezza (cm) | ** | 46.5 | ** | 18.8 | ns | - |
| N culmi (n°m ²) | ns | - | ns | - | ns | - |

3.1.3 Asportazione di Azoto

Il monitoraggio delle asportazioni azotate è stato realizzato dal 2010 al 2012.

Successivamente al 2010, in associazione con le successive annate fisiologiche (in incremento in termini di biomassa, dopo il terzo anno, vedi fig. 3.1), l'effetto del ridotto apporto di azoto della tesi N50 rispetto alla N100 ha prodotto una differenziazione sia in termini di produzione che di asportazione di azoto totale (tab. 3.5). Comportamento evidenziato anche in tabella 3.6 dai contenuti di azoto nei tessuti vegetali e dai risultati dell'analisi della varianza (tab. 3.7).

Le asportazioni di azoto totali non sono state significativamente differenti né tra gli anni né tra le dosi di concime (tab. 3.5), anche se dai dati di asportazioni di N da parte delle foglie e di contenuto percentuale di N da parte delle foglie e dei culmi, è possibile vedere un'inversione di tendenza con una progressiva riduzione dei valori con le dosi più basse di azoto. Probabilmente nei primi anni le riserve di N del terreno sono sufficienti a compensare le esigenze della coltura anche nel caso di dosi ridotte di N. Invece dal quarto anno in poi, venendo a mancare il contributo delle riserve del terreno, l'effetto delle dosi di concime azotato diventa sempre più marcato.

Infatti, dall'analisi della varianza è risultata significativa l'interazione anni x dose di N per quanto concerne le asportazioni azotate (kg ha^{-1}) da parte della biomassa fogliare e la concentrazione (%) di azoto nei tessuti vegetali (culmi e foglie) (tab. 3.7).

Tabella 3.5 - Bellizzi: Asportazioni di N in *A. donax* nel periodo (2010-2012).

| Anno | Asportazione (kg ha^{-1} N) | | | | | | | | |
|------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| | Culmi | | | Foglie | | | totale | | |
| | N50 | N100 | <i>media</i> | N50 | N100 | <i>media</i> | N50 | N100 | <i>media</i> |
| 2010 | 66.0 | 53.0 | 59.5 | 65.9 a | 45.4 b | 55.7 | 131.9 | 98.4 | 115.2 |
| 2011 | 37.5 | 35.3 | 36.4 | 18.6 b | 35.7 bc | 27.2 | 56.1 | 71.0 | 63.5 |
| 2012 | 47.2 | 77.1 | 62.1 | 9.8 d | 12.2 d | 11.0 | 57.0 | 89.3 | 73.1 |
| <i>media</i> | 50.2 | 55.1 | 52.6 | 31.5 | 31.1 | 31.3 | 81.7 | 86.2 | 83.9 |
| <i>Signif.</i> | | | | | | | | | |
| <i>Anni</i> | <i>n.s.</i> | | | ≤ 0.01 | | | <i>n.s.</i> | | |
| <i>Fertilizzazione</i> | <i>n.s.</i> | | | <i>n.s.</i> | | | <i>n.s.</i> | | |
| <i>Anni x fert.</i> | <i>n.s.</i> | | | ≤ 0.05 | | | <i>n.s.</i> | | |

Tabella 3.6 - Bellizzi: Contenuto di N (g:100g) in tessuti vegetali di *A. donax* nel periodo (2010-2012).

| Anno | Contenuto N (g:100g) | | | | | |
|-----------------|----------------------|--------|-------------|--------|--------|-------------|
| | Culmi | | | Foglie | | |
| | N50 | N100 | media | N50 | N100 | media |
| 2010 | 0.50 a | 0.26 c | 0.38 | 1.98 a | 1.30 d | 1.64 |
| 2011 | 0.26 c | 0.22 c | 0.24 | 1.04 e | 1.21 d | 1.12 |
| 2012 | 0.28 c | 0.34 b | 0.31 | 1.46 c | 1.75 b | 1.60 |
| media | 0.34 | 0.27 | 0.31 | 1.49 | 1.42 | 1.45 |
| <i>Signif.</i> | | | | | | |
| Anni | ≤0.01 | | | ≤0.01 | | |
| Fertilizzazione | ≤0.01 | | | n.s | | |
| Anni x fert. | ≤0.01 | | | ≤0.01 | | |

Tabella 3.7 - Analisi della varianza: significatività dei fattori principali e dell' interazione (P <5% = *; P <1% = **)

| | Fattori principali | | | | Interazione | |
|----------------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-------|
| | Anno | Fertilizzazione N | | Anno x Fertilizzazione N | | |
| | Significatività | DMS | Significatività | DMS | Significatività | DMS |
| Asportazione Culmi (kg N ha ⁻¹) | n.s | - | n.s | - | ns | - |
| Asportazione Foglie (kg N ha ⁻¹) | ** | | n.s | - | * | 18.58 |
| Asportazione Tot (kg N ha ⁻¹) | n.s | | n.s | - | ns | - |
| Contenuto N Culmi (g:100g) | ** | | n.s | - | ** | 0.14 |
| Contenuto N Foglie (g:100g) | ** | | ** | | ** | 0.06 |

3.1.4 Analisi di crescita

3.1.4.1 Analisi di crescita 2011

Il monitoraggio dello sviluppo colturale è stata effettuato a cadenza mensile da maggio ad ottobre dell'anno 2011 per entrambe le tesi (N100 ed N50).

Lo sviluppo della biomassa aerea è risultato graduale in entrambe le tesi (fig. 3.2.a) con una differenziazione sul valore ed il momento del raggiungimento del picco massimo di produzione che è risultato pari a 2004 g m² s.s. per la tesi N100 nel mese di settembre ed 1500 g m² s.s. per la tesi N50 nel mese di agosto.

Diversamente, per l'indice di area fogliare (*LAI*) (fig. 3.2.b), la differenziazione del picco massimo raggiunto è stata solo in termini quantitativi (3.0 e 2.6 m²m⁻² rispettivamente per la tesi N50 ed N100) e non temporali (per entrambe le tesi si è verificato nella prima decade di agosto). L'incremento di peso secco per unità di tempo (*CGR*) (fig. 3.2.c), ha mostrato un anticipo del raggiungimento del picco massimo per la tesi N100 (giugno-luglio) rispetto alla tesi N50 (luglio-agosto) con rispettivi valori di 13 g m⁻² e 17 g m⁻² di sostanza secca al giorno.

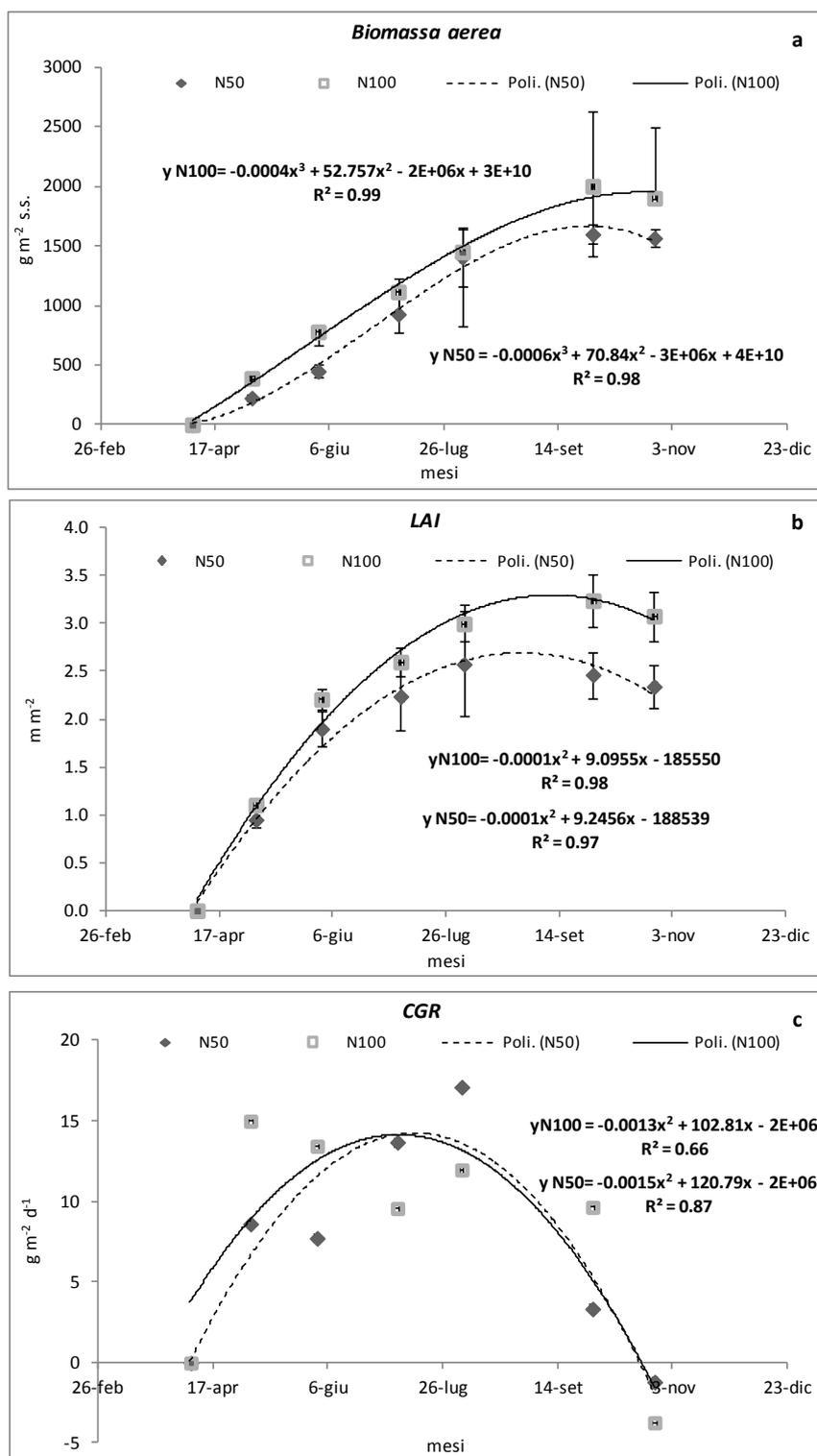


Figura 3.2 – Bellizzi, 2011: a) Biomassa aerea (culmi e foglie - $g\ m^{-2}\ s.s.$), b) Indice di area fogliare (LAI - $m^2\ m^{-2}$), c) Incremento di peso secco per unità di tempo e superficie (CGR - $g\ m^{-2}\ d^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Per l'analisi di crescita è stato calcolato per entrambe le tesi l'indice *LAD* che rappresenta la durata complessiva della superficie fogliare espressa in LAI x giorni (vedi materiali e metodi). Il confronto delle due tesi ha mostrato una durata della superficie fogliare più elevata del 24 % per la tesi N 100 rispetto a N50 (691.96 vs 556.80 $m^2\ m^{-2} \times$ giorni).

Nella figura 3.3 sono riportati gli andamenti di altri due indici dipendenti dallo sviluppo fogliare: area fogliare per unità di sostanza secca (*LAR*) e percentuale di foglie sul peso totale (*LWR*). In entrambe le tesi l'andamento del *LAR* (fig. 3.3.a) è decrescente da maggio a novembre, descritto da una cinetica di secondo ordine, in cui il picco massimo è nel mese di maggio con una differenza di circa $200 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ tra le due tesi (N100= 282.3 vs. N50=452.3), fino ad arrivare a metà settembre a valori di 161.8 e $149.4 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ rispettivamente per la tesi N100 e N50. L'andamento dell'indice *LWR* (fig. 3.3.b) è risultato molto simile a quello dell'indice *LAR*, con picco massimo nel mese di maggio e valori decrescenti nei mesi successivi fino a valori del 13% e 17% rispettivamente per la tesi N50 ed N100.

L'andamento della percentuale di sostanza secca (fig. 3.3.c), è stato pressoché identico tra le due tesi, con un graduale aumento, dal mese di maggio a novembre, determinato dalla progressiva perdita di umidità da parte della biomassa aerea e in particolar modo dalle foglie (dal 13% al 44%). Il tasso di assimilazione netta (*NAR*) (fig. 3.3.d) che rappresenta la capacità fotosintetica dell'apparato assimilatore definito come la produzione di sostanza secca per unità di superficie fogliare per unità di tempo, ha mostrato un andamento decrescente durante la stagione di crescita per entrambe le tesi, con valori più elevati a maggio ($27 \text{ vs } 18 \text{ gm}^2 \text{ d}^{-1}$ N100 ed N50) e valori negativi alla raccolta.

L'andamento decrescente di tale indice è correlabile alla diminuzione nella quantità di radiazione intercettata per unità di superficie fogliare. Inoltre è interessante notare come, escluso il primo mese di misura, le due tesi mostrano un andamento pressoché simile e lineare.

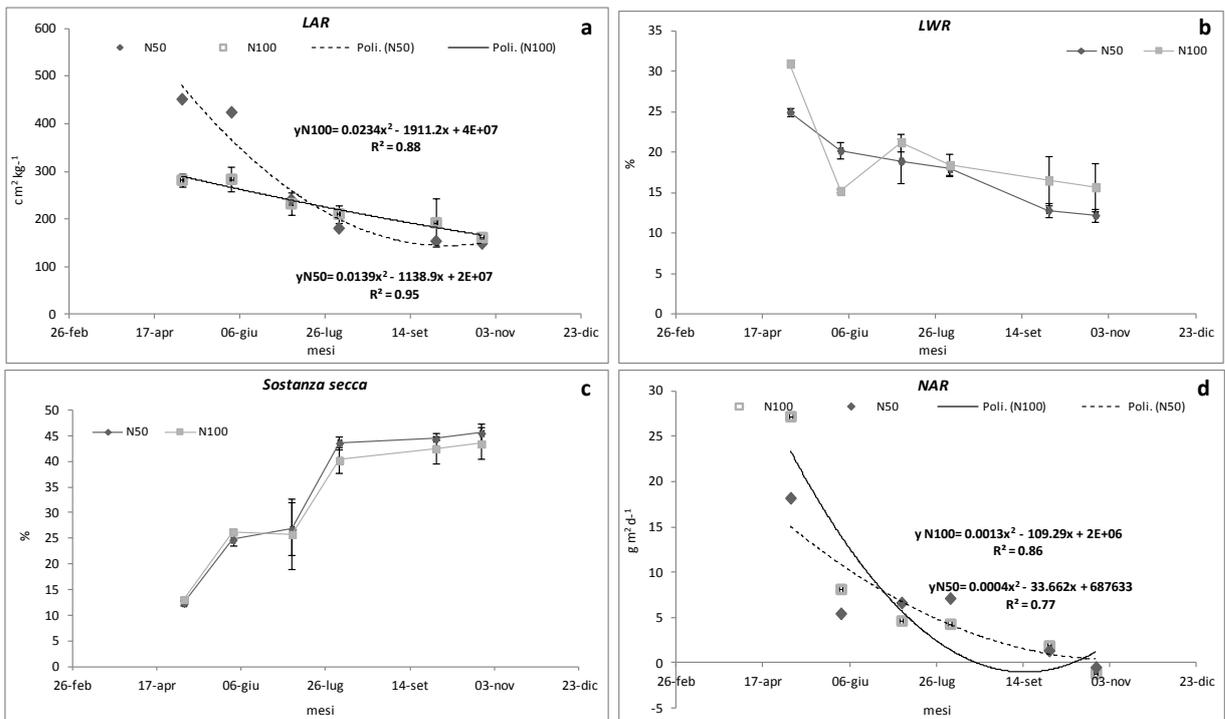


Figura 3.3 Bellizzi - 2011: a) Area fogliare per unità di sostanza secca (*LAR* - $\text{cm}^2 \text{kg}^{-1}$), b) Percentuale di foglie sul peso secco totale (*LWR* - %), c) Percentuale di sostanza secca (*S.S* - %), d) Indice di assimilazione netta (*NAR* - $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie ($n=3$).

Nella figura 3.4 sono riportati gli andamenti delle altezze dei culmi per entrambe le tesi durante la stagione di crescita. In generale per entrambe le tesi la velocità di accrescimento in altezza è maggiore a inizio ciclo pari (5 cm al giorno) come riportato da Perdue (1958). Vi è un accordo con le considerazioni precedentemente riportate relative al *CGR* per le quali la tesi N50 presenta un crollo dello sviluppo dopo il mese di agosto. La differenziazione tra le due tesi si fa più marcata a partire dal mese di settembre, fino ad arrivare al momento più vicino alla raccolta i cui valori sono pari a 442.8 vs 389.5 cm rispettivamente per la tesi N100 e N50. Dai valori misurati non si sono riscontrate differenziazioni importanti del diametro medio basale dei culmi tra le tesi a confronto (valori non riportati), pari in media a 2 cm.

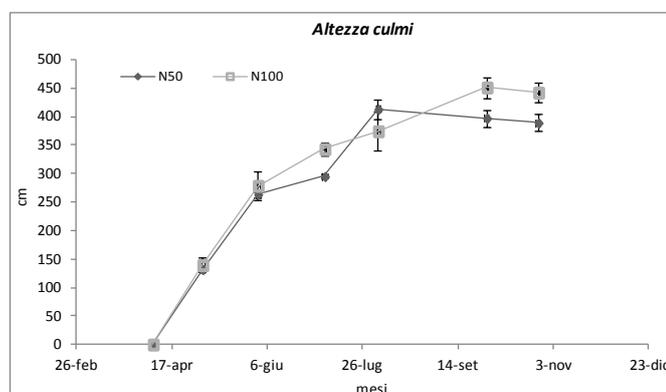


Figura 3.4. Bellizzi - Andamento dell'altezza dei culmi (cm) durante il ciclo di crescita 2011. Le barre indicano l'errore standard delle medie ($n=3$).

3.1.4.2 Analisi di crescita 2012

Nell'anno 2012 il primo rilievo è stato effettuato 30 giorni dopo la ripresa vegetativa, a partire dal 7 maggio per un totale di 7 rilievi su entrambe le tesi (N100 e N50).

Lo sviluppo della biomassa aerea (fig. 3.5.a) è stato graduale per entrambi i trattamenti a confronto, con una vera e propria differenziazione dopo il mese di agosto, quando per la tesi N50 è stato raggiunto il picco massimo di produzione $1675 \text{ g m}^2 \text{ s.s.}$ (pressoché costante fino a novembre) e la tesi N100 ha continuato la crescita raggiungendo il picco massimo nell'ultima decade di novembre ($2205 \text{ g m}^2 \text{ ss}$). La differenziazione del peso secco dopo il mese di agosto sembra essere correlata al maggiore sviluppo della superficie fogliare realizzato dalla tesi più concimata. Infatti, dopo un inizio graduale simile, l'area fogliare si è differenziata tra le tesi dal mese di agosto in poi, con valori più alti per la tesi N100 rispetto alla N50, con picco massimo nel mese di novembre ($6 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$) e di luglio ($4.8 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$) (fig. 3.5.b) rispettivamente per N100 ed N 50. Durante il periodo giugno - luglio si sono verificati i picchi di incremento del peso secco per unità di tempo e superficie (*CGR*) per entrambe le tesi con valori pari a $31 \text{ g m}^2 \text{ s.s.}$ e $28 \text{ g m}^2 \text{ s.s.}$ al giorno per la tesi N50 ed N100. Il valore del *LAD* è stato superiore nella tesi N100 di circa il 26 % rispetto a N50 ($1131.63 \text{ vs } 897.85 \text{ m}^2 \text{m}^{-2} \times \text{giorni}$).

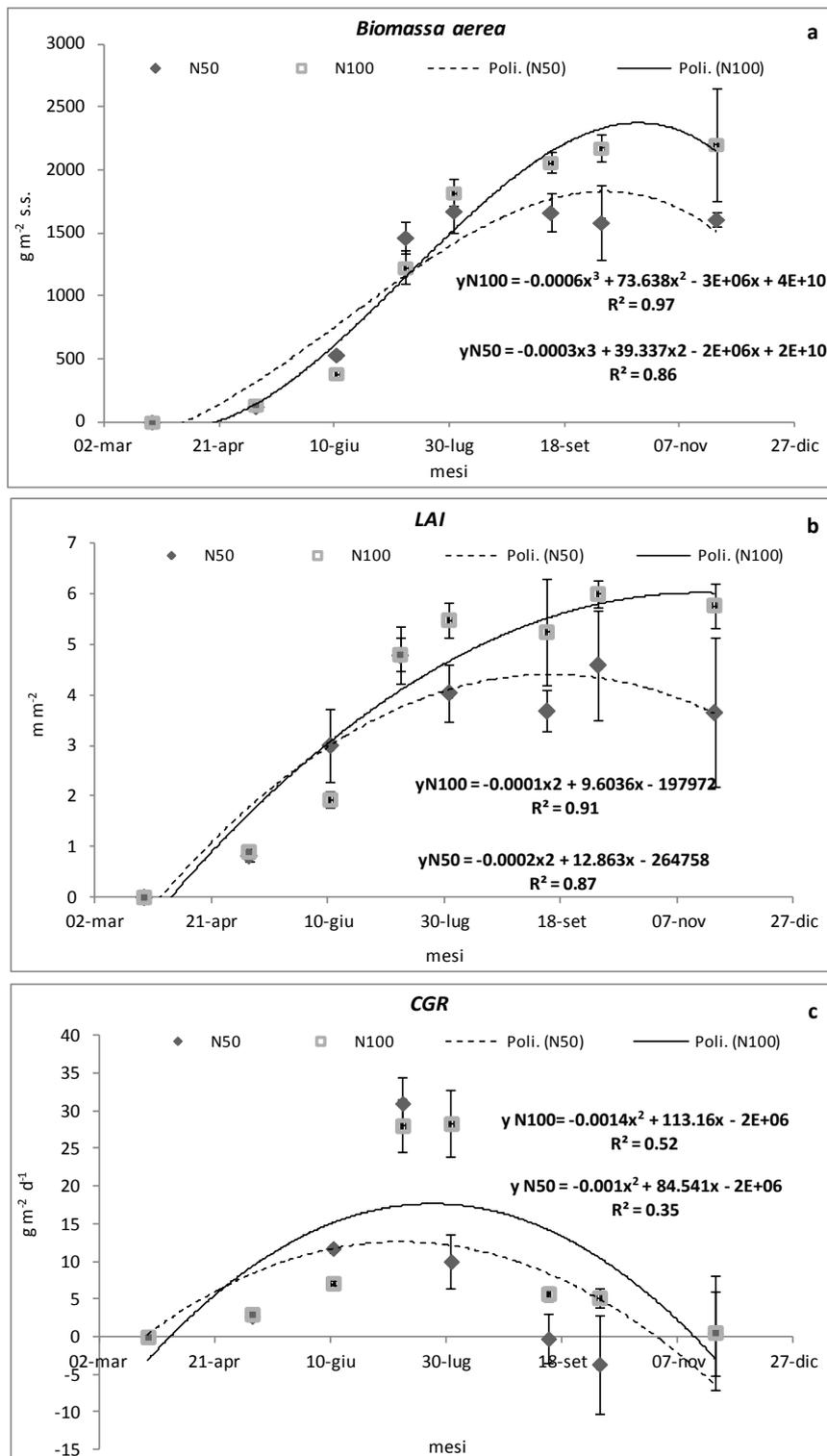


Figura 3.5 - Bellizzi, 2012: a) Biomassa aerea (culmi e foglie - $g\ m^{-2}\ s.s.$), b) Indice di area fogliare (LAI - $m^2\ m^{-2}$), c) Incremento di peso secco per unità di tempo e superficie (CGR - $g\ m^{-2}\ d^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie ($n=3$).

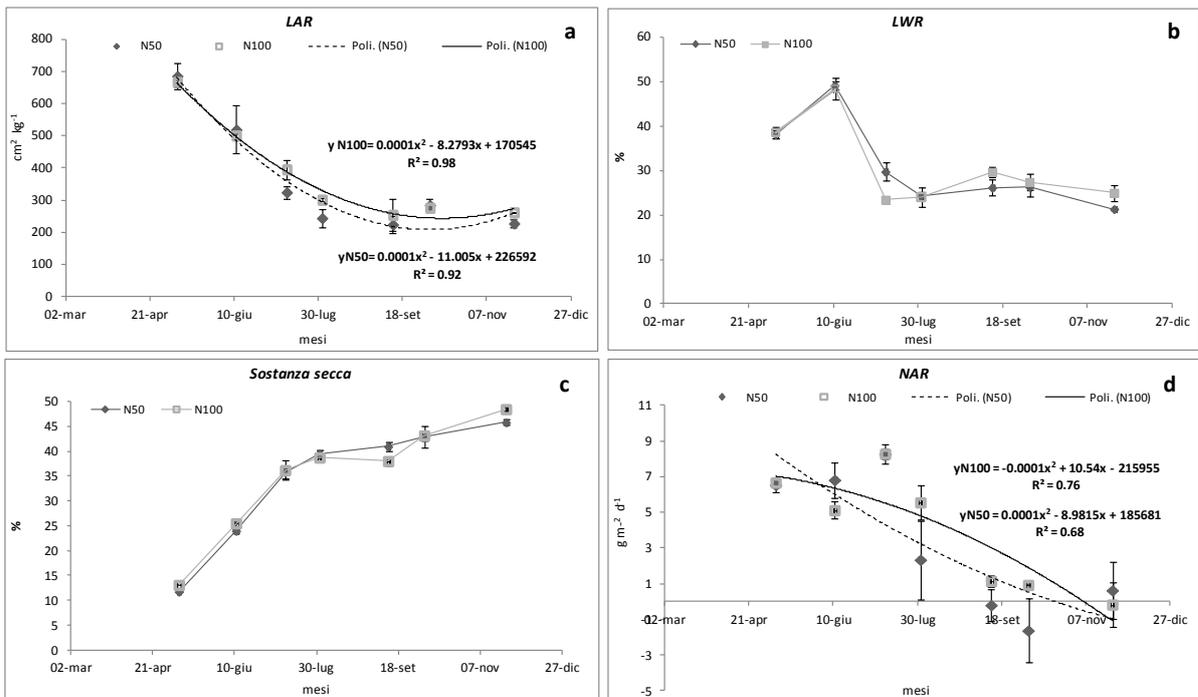


Figura 3.6. Bellizzi, 2012: A) Area fogliare per unità di sostanza secca (LAR - $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$), B) Percentuale di foglie verdi sul peso secco totale (LWR - %), C) Percentuale di sostanza secca (S.S - %), D) Indice di assimilazione netta (NAR - $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Nelle figure 3.6 sono riportati gli andamenti di altri due indici dipendenti dallo sviluppo fogliare: area fogliare per unità di sostanza secca (LAR) e percentuale di foglie sul peso totale (LWR).

In entrambe le tesi l'andamento del LAR (fig. 3.6.a) è decrescente da aprile a novembre, descritto da una cinetica del secondo ordine. Lo sviluppo dell'indice è molto simile tra le tesi con uguale picco massimo a maggio (valore medio di $676.9 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$) con successiva e lieve differenziazione dal mese di giugno in poi, con il raggiungimento di un valore minimo di 262.0 e $227.3 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ rispettivamente per la tesi N100 e N50.

L'andamento dell'indice LWR (fig. 3.6.b) a differenza dell'anno 2011 ha presentato il picco massimo nel mese di giugno (49%) con valori non differenti tra le tesi. Tale indice dopo un incremento iniziale tra maggio e giugno è crollato per poi assumere un andamento pressoché costante con una lieve differenziazione tra le tesi, raggiungendo valori finali di 25 e 21 % per la tesi N100 ed N50.

L'andamento della percentuale di sostanza secca (fig. 3.6.c), è stato pressoché identico tra le due tesi, con un graduale aumento dal mese di maggio a novembre (dal 12 al 47%).

Il tasso di assimilazione netta (NAR) ha mostrato un chiaro andamento decrescente durante la stagione di crescita per entrambe le tesi al confronto (valore iniziale a maggio di $6.6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), con un incremento dal mese di giugno ad agosto (supportato da due rilievi per la tesi N100 e da una elevata variabilità della misura nella tesi N50). L'andamento decrescente di

tale indice è correlabile alla diminuzione nella quantità di radiazione intercettata per unità di superficie fogliare. (fig. 3.6.d)

Nell'annata 2012 l'altezza della coltura (fig. 3.7) è arrivata a sfiorare nel mese di novembre i 500 cm nella tesi N100 ed i 400 cm nella N50. Per entrambi i trattamenti a confronto, la velocità di crescita dell'altezza è stata maggiore soprattutto da maggio a giugno con una crescita pari a circa 4 cm al giorno. Sul diametro basale, il livello di input azotato più elevato non ha determinato variazioni di rilievo tra i trattamenti a confronto (dati non riportati).

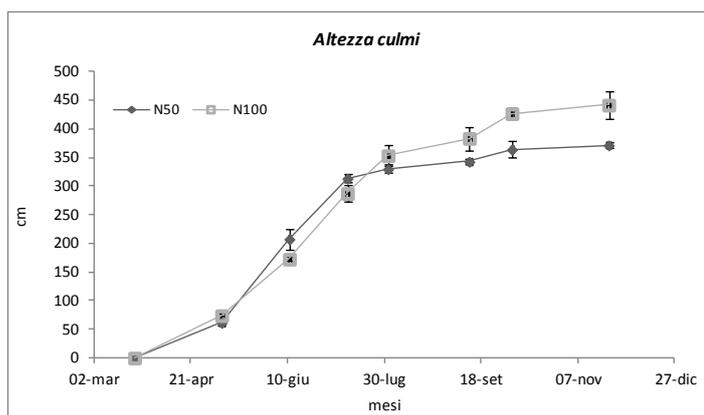


Figura 3.7. Bellizzi: Andamento dell'altezza dei culmi (cm) durante il ciclo di crescita 2012. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Asportazione (kg N ha^{-1}) e contenuto di N (%) durante il ciclo di crescita 2012

Per gli anni 2012 e 2013 sono state monitorate ed analizzate le asportazioni colturali di azoto (kg N ha^{-1}) durante i rispettivi cicli di crescita per entrambe le tesi al confronto.

Come di evince dalla figura 3.8, nell'anno 2012, le asportazioni sono state crescenti durante la prima fase di crescita, con il raggiungimento del picco massimo a fine estate per la tesi N100 (153 kg N ha^{-1}) ed in piena estate per la tesi N50 (117 kg N ha^{-1}). Ad inizio ciclo le asportazioni sono risultate simili tra le tesi, sia in termini quantitativi che di andamento, per poi differenziarsi in modo marcato dal mese di luglio in poi, con una differenza pressoché costante di circa 36 Kg N ha^{-1} .

Dal momento in cui si verifica il picco massimo di asportazione fino a fine ciclo le asportazioni si riducono fino a valori di 92 kg ha^{-1} e 59 kg ha^{-1} (N100 e N50 nel mese di febbraio).

Le asportazioni più elevate della tesi N100 (dal mese di luglio in poi), sono da attribuire ad un insieme di fattori che riguardano il funzionamento del sistema suolo-pianta-atmosfera ed alla concentrazione di azoto nitrico nel suolo. Se si osserva l'andamento del LAI (fig.XXX), nel mese di luglio si verifica una importante differenziazione dello sviluppo fogliare tra le tesi,

con valori più elevati per la tesi N100 rispetto alla N50, che a parità di condizioni climatiche, incrementa la traspirazione della coltura e quindi l'assorbimento dell'azoto nitrico dal suolo attraverso trasporto passivo radicale.

Inoltre, tale incremento d'asportazione è supportato dalla maggiore disponibilità azotata fornita al sistema dalla concimazione raddoppiata. Infatti se si osservano gli andamenti della concentrazione di azoto minerale nel suolo (media strato 0-60 cm) è evidente che nel periodo successivo al mese di agosto (fig. 3.10) la tesi N100 mostra valori più bassi dovuti proprio ad un maggiore *uptake* rispetto alla N50. Il risultato dell'insieme di questi fattori è una migliore performance produttiva della tesi N100.

La variabilità della misura aumenta durante la stagione di crescita soprattutto per la tesi N100, tale comportamento probabilmente è dovuto all'effetto della pratica della concimazione azotata e nella distribuzione dell'azoto al suolo. In ogni caso, va sottolineato come le asportazioni registrate nel periodo estivo sono in accordo con quelle riportate da Nassi o Di Nasso et al. (2011b) per i quali il massimo contenuto di N nella pianta era registrato in estate con un valore di circa 130 kg ha^{-1} .

L'andamento calante delle curve di asportazione dell'azoto nel periodo autunno-vernino sono da attribuire alla senescenza fogliare (la quale, verificatasi a partire da fine settembre sui palchi di foglie basali, riduce la traspirazione e l'attività fotosintetica) ed alla parziale restituzione di azoto al suolo. Inoltre, la pianta potrebbe in parte traslocare parte dell'azoto dalla biomassa aerea ai rizomi. (Smith e Slater, 2011; Nassi o Di Nasso, 2013)

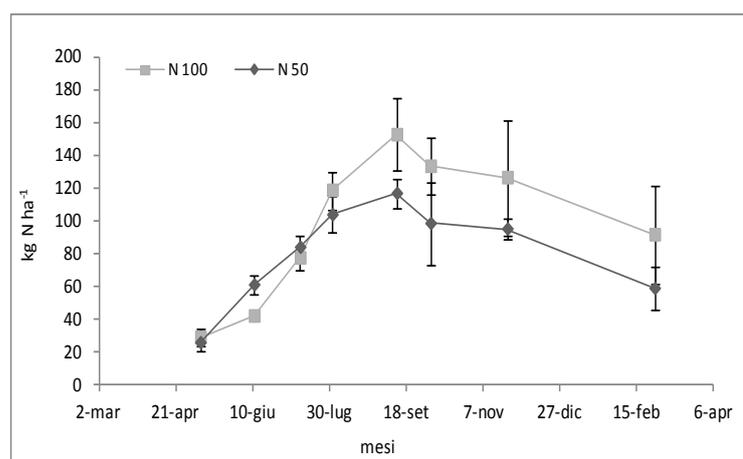


Figura 3.8 - Bellizzi: Asportazioni (kg N ha^{-1}) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2012. Le barre indicano l'errore standard delle medie ($n=3$).

Il contenuto di azoto nei tessuti vegetali (fig. 3.9) non è stato differente tra le tesi a confronto. La maggior concentrazione di azoto sia per i culmi che per le foglie verdi, è stata

riscontrata nel mese di maggio (pari rispettivamente a 2.9% e 1.6%), concentrazione che, nel periodo di crescita attiva (giugno-luglio) cala bruscamente rimanendo costante fino all'inverno con valori rispettivamente di 1.07 e 0.3% alla raccolta (fine inverno). Inoltre va evidenziato un leggero incremento di N per le foglie verdi in settembre, dovuto molto probabilmente alle precipitazioni registrate ad inizio del mese a seguito di un periodo di forte siccità del mese di agosto (0 mm di pioggia rilevati) che hanno favorito l'assorbimento dal suolo e quindi l'accumulo nelle foglie.

I risultati così ottenuti sembrano in accordo con quanto riportato da Beale e Long (1997) per i quali le concentrazioni di nutrienti nella biomassa aerea sembrano diluirsi all'aumentare della % di sostanza secca della biomassa per poi calare ulteriormente con la senescenza.

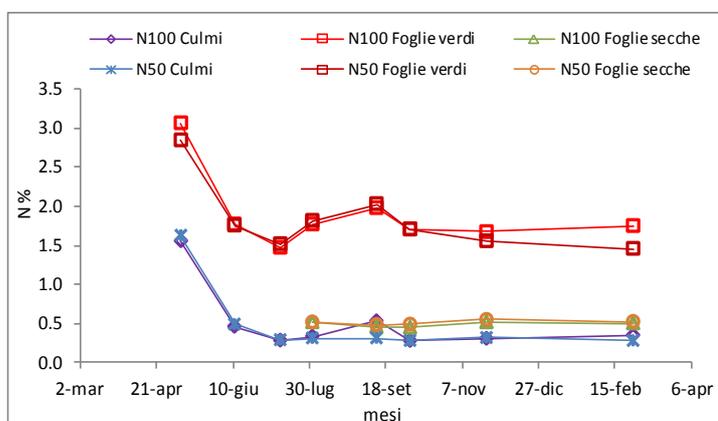


Figura. 3.9 - Bellizzi: Concentrazione (%) di N nei tessuti vegetali (Culmi, Foglie verdi, Foglie secche) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2012.

Inoltre secondo alcuni autori, il declino del contenuto in macronutrienti nella parte aerea legato alla traslocazione verso gli organi di accumulo sotterranei (es. rizomi) è coerente con il ciclo dei nutrienti in specie rizomatose perenni, rappresentando una strategia di sopravvivenza per la specie (Himken et al., 1997; Sharma et al., 1999; Heaton et al., 2009; Nassi o di Nasso et al., 2009). Inoltre, la traslocazione dei macronutrienti verso il rizoma può rappresentare una strategia ambientale favorevole che potrebbe ridurre la domanda di fertilizzanti (Rowe et al., 2009).

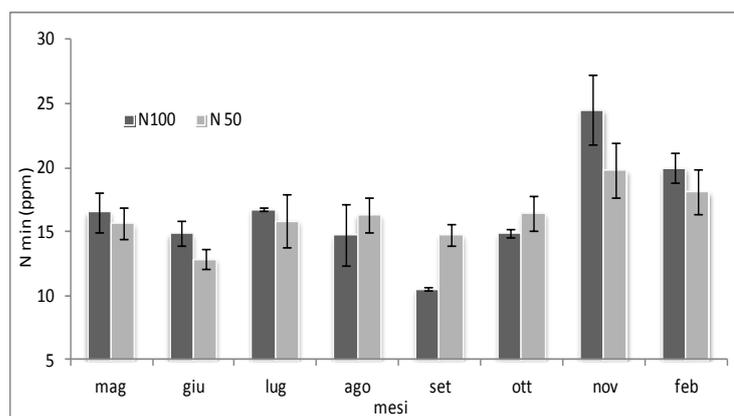


Figura. 3.10- Bellizzi: Contenuto di Azoto minerale nel suolo (strato 0-60 cm) in *A.donax* durante il ciclo di crescita 2012. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

3.1.4.3 Analisi di crescita 2013

Il monitoraggio dello sviluppo colturale è stata effettuato dopo la ripresa vegetativa a cadenza mensile dal mese maggio a novembre dell'anno 2013 per entrambe le tesi (N100 ed N50) per un totale di sette rilievi.

Lo sviluppo della biomassa aerea è risultato graduale in entrambe le tesi (fig. 3.11.a), con l'inizio della differenziazione della produzione successivamente al mese di giugno ed il raggiungimento del picco massimo di produzione nel mese di novembre con valori di 1875 g m² s.s. e 1209 g m² s.s. rispettivamente per la N100 ed N50.

Come avvenuto nel 2011 e diversamente dal 2012, l'indice di area fogliare (*LAI*) (fig. 3.11.b) si è subito differenziato in termini quantitativi tra le tesi, con un andamento molto simile sottolineato dal raggiungimento del picco massimo nel mese di settembre (3.5 e 2.6 m²m⁻² rispettivamente per la tesi N50 ed N100).

L'incremento di peso secco per unità di tempo (*CGR*) (fig. 3.11.c), ha mostrato un andamento simile tra le tesi ad inizio ciclo fino al mese di luglio, con una successiva importante riduzione dei valori della tesi N50 rispetto alla N100, il picco massimo si è verificato per entrambi i trattamenti nel periodo giugno-luglio con valori pari a 16 g m⁻² e 13 g m⁻² di sostanza secca al giorno per la tesi N100 ed N50.

Nell'annata 2013 l'indice LAD ha mostrato una durata della superficie fogliare più elevata del 42 % per la tesi N 100 rispetto a N50 (677.41 vs 476.77 m²m⁻² x giorni).

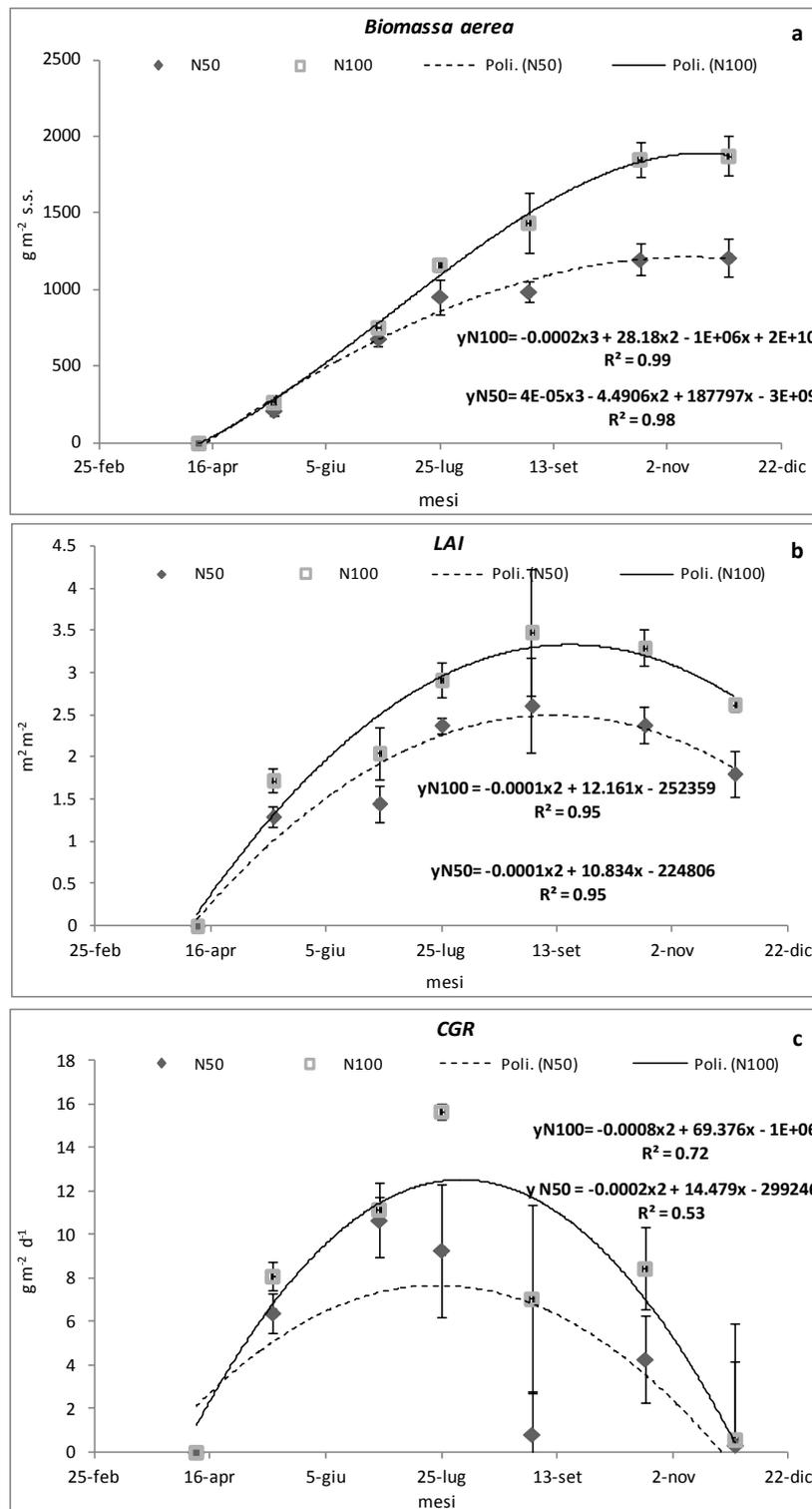


Figura 3.11 - Bellizzi, 2013: a) Biomassa aerea (culmi e foglie - $g\ m^{-2}\ s.s.$), b) Indice di area fogliare (LAI - $m^2\ m^{-2}$), c) Incremento di peso secco per unità di tempo e superficie (CGR - $g\ m^{-2}\ d^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Nelle figura 3.12 sono riportati gli andamenti di altri due indici dipendenti dallo sviluppo fogliare: area fogliare per unità di sostanza secca (LAR) e percentuale di foglie sul peso totale (LWR).

In entrambe le tesi l'andamento del LAR (fig. 3.12.a) è decrescente da maggio a novembre, in accordo con gli andamenti delle precedenti annate, descritto da una cinetica del secondo ordine, in

cui il picco massimo si verifica ad inizio ciclo colturale nel mese di maggio senza differenziazione tra le due tesi (circa $6348 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$), fino ad arrivare a fine novembre a valori di $144.6 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$.

L'andamento dell'indice *LWR* (fig. 3.12.b) è risultato molto simile tra le tesi con una lieve differenziazione solo ad inizio ciclo (3% tra le tesi), con andamento decrescente e picco massimo nel mese di maggio per la tesi N50 (38%) ed in giugno per la tesi N100 (34%) e valore minimo di circa il 19% nella fase finale per entrambi i trattamenti.

L'andamento della percentuale di sostanza secca (fig. 3.12.c), è stato simile tra le due tesi, in accordo con le precedenti annate, con un graduale aumento, dal mese di maggio a novembre, dettato dalla progressiva perdita di umidità da parte della biomassa aerea e in particolar modo dalle foglie (dal 16% al 50%). Vanno sottolineati dei valori leggermente più alti della tesi N100 rispetto alla N50 nei mesi di luglio ed ottobre.

Il tasso di assimilazione netta (*NAR*) (fig. 3.12.d) ha mostrato un andamento decrescente durante la stagione di crescita per entrambe le tesi, con valori più elevati a maggio e valori prossimi allo zero alla raccolta.

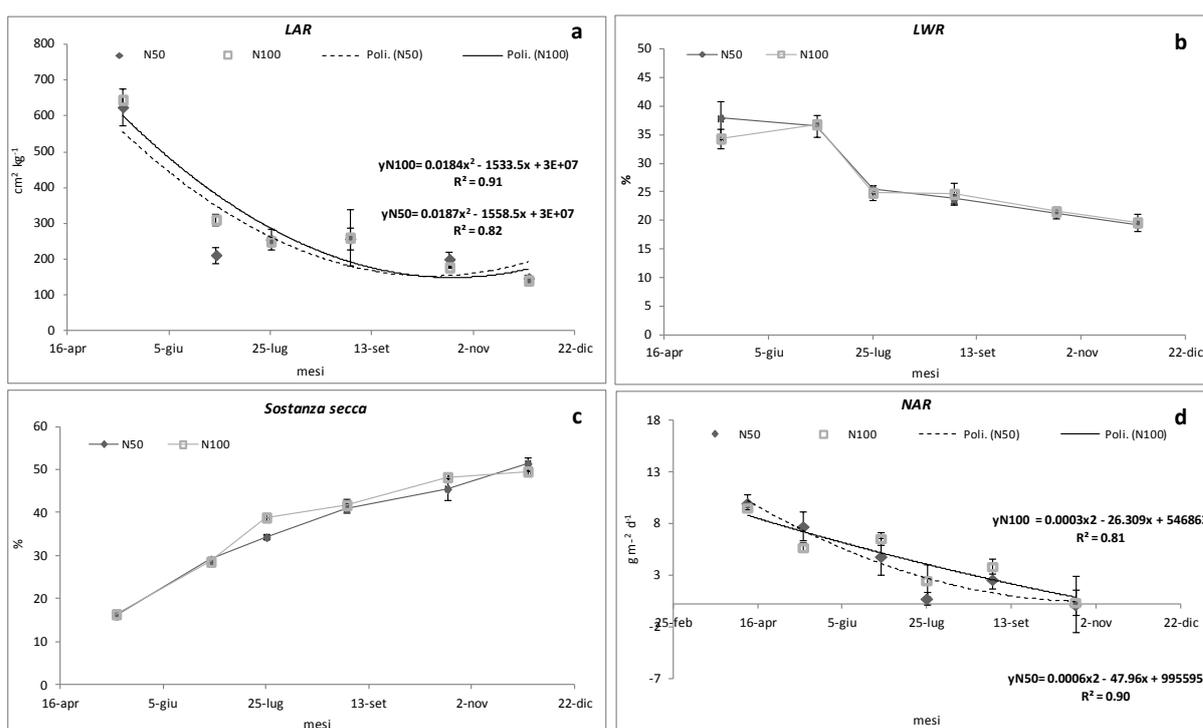


Figura 3.12. Bellizzi, 2013 a) Area fogliare per unità di sostanza secca (*LAR* - $\text{cm}^2 \text{ kg}^{-1}$), b) Percentuale di foglie sul peso secco totale (*LWR* - %), c) Percentuale di sostanza secca (*S.S* - %), d) Indice di assimilazione netta (*NAR* - $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Nell'annata 2013 l'altezza della coltura (fig. 3.13) è arrivata a sfiorare già a partire dal mese di settembre i 400 cm di altezza per la tesi N100 ed i 300 cm per N50 (negli anni precedenti valori simili si riscontravano più in avanti nella stagione di crescita). Per entrambi i trattamenti a confronto, la velocità di crescita dell'altezza è stata maggiore soprattutto nell'intervallo di tempo da aprile a maggio (in anticipo di circa un mese rispetto al 2012) con

una crescita pari a circa 3 cm al giorno. Sul diametro basale, il livello di input azotato più elevato non ha determinato variazioni di rilievo tra i trattamenti a confronto (dati non riportati) con un valore medio di 1.6 cm.

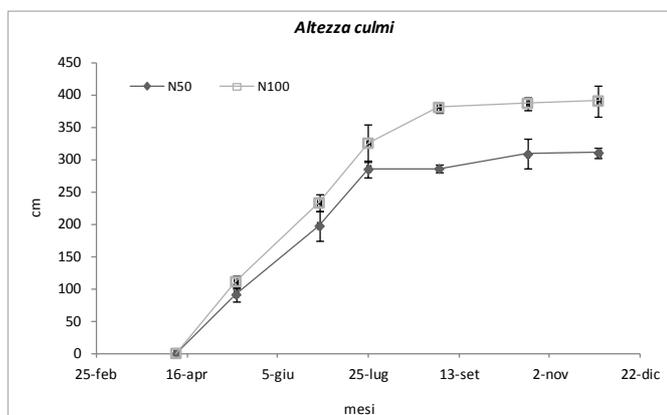


Figura 3.13 - Bellizzi: Andamento dell'altezza dei culmi (cm) durante il ciclo di crescita 2013. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Asportazione (kg N ha^{-1}) e contenuto di N (%) durante il ciclo di crescita 2013

Come di evince dalla figura 3.14, nell'anno 2013 le asportazioni hanno avuto per entrambe le tesi un andamento diverso rispetto al 2012, poiché non si è verificata una vera e propria fase decrescente durante il ciclo colturale.

Infatti, la tesi N100 ha mostrato un andamento degli asporti sempre crescente fino al raggiungimento del picco massimo nel mese di novembre (64 kg ha^{-1}) mentre la tesi N50 dopo un rapido accrescimento simile nell'andamento alla tesi N100, con il raggiungimento del picco massimo di asportazione è pari a 48 kg ha^{-1} nel mese di giugno, mostra un andamento costante per i mesi successivi (valore di novembre 41 kg ha^{-1}) con un gap finale tra le tesi di circa 23 kg ha^{-1} pari al 56% dell'asporto della tesi N50.

In ogni caso nel periodo estivo è stata registrata una riduzione degli asporti per entrambe le tesi, probabilmente coincidente con condizioni idriche del suolo più rigide.

Le asportazioni di azoto per entrambe le tesi a confronto sono state più basse da luglio a novembre rispetto a quelle registrate nell'anno 2012 (-43%). In particolare la tesi N100 nel periodo di crescita più attiva (maggio-giugno) ha asportato il 38% in più rispetto al 2012. Tale comportamento è spiegabile attraverso la maggiore produzione di biomassa aerea realizzata (+49% rispetto al 2012) nonostante la concentrazione di azoto nei tessuti sia risultata ridotta (-24% rispetto al 2012).

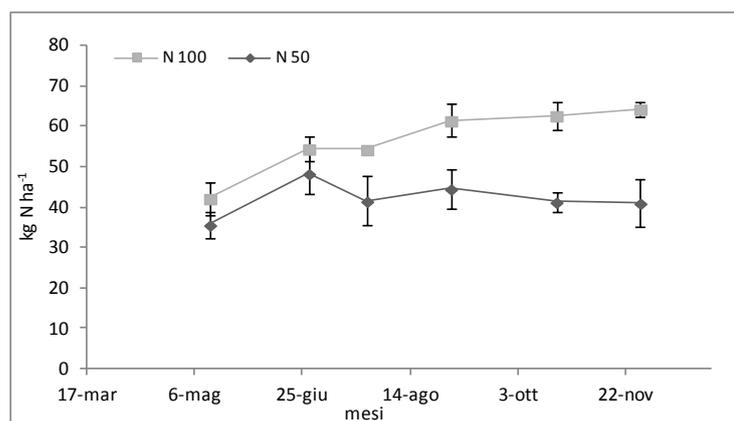


Figura 3.14 - Bellizzi: Asportazioni (kg N ha⁻¹) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2013. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Il contenuto di azoto nei tessuti vegetali (fig. 3.15) non è stato differente tra le tesi a confronto. La maggior concentrazione di azoto sia per i culmi che per le foglie verdi, è stata riscontrata nel mese di maggio (pari rispettivamente a 2.63% e 1.10%), concentrazione che, nel periodo di crescita attiva (giugno-luglio) cala bruscamente (un abbattimento del 41% per i culmi ed il 70% per le foglie) rimanendo costante fino all'inverno con valori rispettivamente di 1.07 e 0.20% alla raccolta (in accordo con i valori misurati nel 2012). E' importante sottolineare che dal mese di luglio in avanti le foglie basali cominciano a seccare aumentando nel tempo la percentuale di foglie gialle sul totale delle stesse presenti sul culmo raggiungendo nel mese di novembre valori del 3 % ed 5% per la tesi N100 e N50. Per tali foglie, il contenuto di azoto è stato costante nel tempo con un valore medio di azoto pari 0.45% del peso secco, valore in accordo con quanto rilevato durante l'annata 2012.

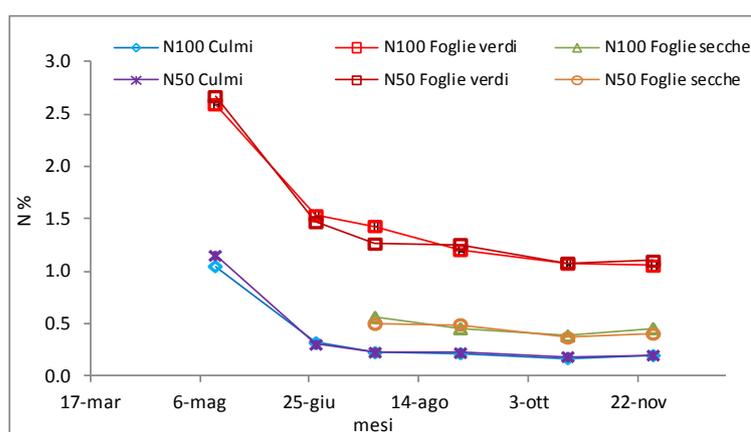


Figura. 3.15 - Bellizzi: Concentrazione (%) di N nei tessuti vegetali (Culmi, Foglie verdi, Foglie secche) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2013.

Per quanto riguarda l'andamento della concentrazione di azoto media nei primi 60 cm di suolo, (fig. 3.16) è interessante notare come a differenza dell'annata 2012 non vi è una

diminuzione del valore nel suolo del trattamento N100 rispetto alla tesi N50 dal mese di agosto in poi, comportamento attribuibile da un lato alla minore asportazione realizzata in quest'annata rispetto al 2012 (circa un terzo nei periodi di punta rispetto al 2012, annata nella quale si è misurato un picco di asportazione nella tesi N100 vicino ai 160 Kg N ha⁻¹ rispetto ai circa 50 Kg N ha⁻¹ misurati nel 2013 nello stesso periodo) dall'altro a condizioni climatiche più favorevoli per i processi a carico dell'azoto nel suolo (mineralizzazione, nitrificazione).

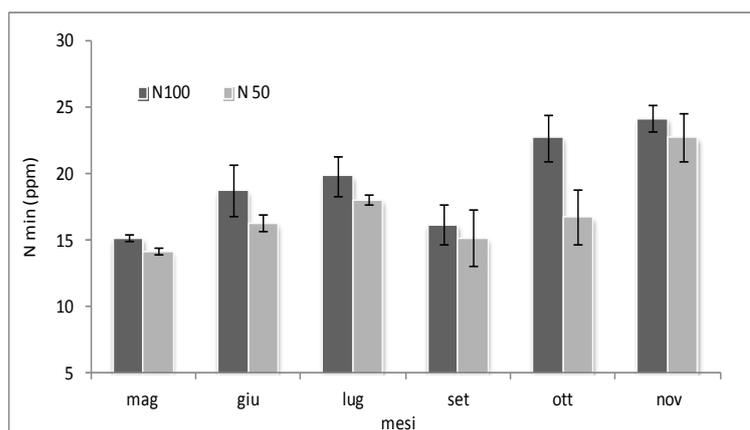


Figura 3.16 - Bellizzi: Contenuto di Azoto minerale nel suolo (strato 0-60 cm) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2013. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

3.1.5 Sintesi delle differenze comportamentali nei tre anni

Nella tabella 3.8 sono riportati i confronti di sintesi tra i parametri di sviluppo analizzati nei tre anni di prova sperimentale. Tali valori ci indicano che le produzioni di biomassa aerea sono state più alte nei primi due anni con valori identici per la tesi N50 e leggermente superiori nel 2012 per la tesi N100, diversamente nel 2013 le produzioni hanno mostrato un forte calo (25% tesi N50 e 15% per la N100 dal 2012). Inoltre, sembrerebbe che con gli anni stiano aumentando le differenze tra le due tesi a confronto, molto probabilmente a causa del depauperamento delle riserve del suolo nella tesi con la dose di concime minore.

I valori di *LAI* e *CGR* massimi sono stati riscontrati nell'annata 2012 in accordo con le maggiori produzioni ed con quelli riportati da Nassi o Di Nasso et al., (2011a) (*CGR* max pari a 33 gm⁻²d⁻¹ e *LAI* pari a 5.8 m²m⁻²). È importante sottolineare che il *CGR* è condizionato dall'ampiezza dell'apparato fotosintetizzante ed è sensibile a qualunque carenza nella disponibilità di risorse (energia, CO₂, acqua ed elementi minerali), alla presenza di sostanze tossiche, e in generale a qualunque tipo di stress.

La durata totale dell'apparato fotosintetico (*LAD*) è stata per tutti gli anni più alta per la tesi con la dose di concime maggiore, proprio a sottolineare che con l'aumento della disponibilità di azoto aumenta la dimensione della foglia e la sua longevità, con effetti sulle produzioni e le asportazioni di azoto.

Tabella 3.8 - Bellizzi: Valori massimi di Biomassa aerea (g m^{-2} s.s.), *LAI* (m^2m^{-2}), *CGR* ($\text{g m}^2 \text{d}^{-1}$) e *LAD tot* ($\text{m}^2\text{m}^{-2} \text{d}$), registrati nel periodo 2011-2013

| Anno | Biomassa aerea | | | <i>LAI</i> | | <i>CGR</i> | | <i>LAD TOTALE</i> | |
|------|------------------------|------|---------------------|---------------------------|------|------------------------------|------|------------------------------------|--------|
| | g m^{-2} s.s. | | % | m^2m^{-2} | | $\text{g m}^2 \text{d}^{-1}$ | | $\text{m}^2\text{m}^{-2} \text{d}$ | |
| | N50 | N100 | <i>N100 vs. N50</i> | N50 | N100 | N50 | N100 | N50 | N100 |
| 2011 | 1600 | 2004 | 25.3 | 2.6 | 3.2 | 17.1 | 13.5 | 556.8 | 691.96 |
| 2012 | 1609 | 2205 | 37.0 | 4.6 | 5.8 | 31.0 | 28.3 | 897.8 | 1131.6 |
| 2013 | 1209 | 1875 | 55.0 | 2.6 | 3.5 | 10.7 | 15.6 | 476.7 | 677.4 |

Per quel che riguarda il confronto tra gli indici utilizzati nell'analisi di crescita (tab. 3.9), i valori medi a confronto hanno mostrato che : (i) per l'indice *LWR* (la percentuale di foglie sul peso totale) non ci sono differenze tra le due tesi nei tre anni; (ii) il *LAR* mostra un valore più elevato nel primo anno per la tesi N50 rispetto alla N100 la quale riporta valori leggermente superiori per il biennio 2012-2013; (iii) che le differenze tra le due tesi del *NAR* si riducono nel tempo dal 2011 al 2013 (si passa da una differenza di 1.1 ad $0.4 \text{ g m}^2 \text{d}^{-1}$)

Tabella 3.9 - Valori medi (\pm dev.st) degli indici (*LAR*, *LWR*, *NAR*) registrati nel periodo 2011-2013

| Anno | <i>LAR</i> | | <i>LWR</i> | | <i>NAR</i> | |
|------|------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------------------|-----------------|
| | $\text{cm}^2 \text{kg}^{-1}$ | | % | | $\text{g m}^2 \text{d}^{-1}$ | |
| | N50 | N100 | N50 | N100 | N50 | N100 |
| 2011 | 267(\pm 137.0) | 227(\pm 49.0) | 17.9(\pm 4.8) | 19.7(\pm 6.0) | 6.4(\pm 4.8) | 7.5(\pm 6.0) |
| 2012 | 358(\pm 112.3) | 379(\pm 97.6) | 30.7(\pm 10.0) | 30.9(\pm 9.5) | 3.2(\pm 4.0) | 3.9(\pm 3.3) |
| 2013 | 263(\pm 190.0) | 277(\pm 202.4) | 27.4(\pm 7.9) | 27.0(\pm 7.0) | 4.2(\pm 3.9) | 4.6(\pm 3.2) |

3.2. Sito sperimentale di Acerra (NA)

3.2.1 Andamento climatico

L'andamento climatico è stato monitorato dall'anno dell'impianto della coltura (2009) fino al 2013. La temperatura media annuale non ha mostrato particolari variazioni durante i cinque anni della prova sperimentale, la temperatura media annua è stata di circa 16°C (tab. 3.10), con temperature minime assolute comprese tra -3 e -6 °C e massime tra 37 e 42 °C. Gli apporti pluviometrici medi annui sono circa 1060 mm con una richiesta evapotraspirativa (Hargreaves) media di 1264 mm. Tali condizioni descrivono un ambiente caratterizzato da un deficit idrico non elevato (differenza tra apporti pluviometrici e richiesta evapotraspirativa atmosferica) pari a circa 204 mm su base annuale e di 123 mm nella stagione primaverile-estiva (maggio-settembre). Condizione normalmente affrontata dall'agricoltura della zona con la gestione irrigua del territorio, grazie alla presenza di pozzi.

Tabella 3.10 - Acerra (NA) - Parametri agrometeorologici durante il periodo di crescita dell'*Arundo donax* (2009-2013) (* dato giornaliero)

| Anno | T media annuale | T. min ass * | T. max ass * | P | ETO |
|------|-----------------|--------------|-----------------------|--------|--------|
| | °C | | mm anno ⁻¹ | | |
| 2009 | 16.6 | -3.1 | 37.2 | 1204.8 | 1246.5 |
| 2010 | 16.1 | -5.8 | 36.4 | 1287.8 | 1207.1 |
| 2011 | 16.3 | -3.5 | 38.8 | 982.4 | 1250.8 |
| 2012 | 16.4 | -5.1 | 38.6 | 891.6 | 1285.5 |
| 2013 | 16.3 | -3.0 | 41.9 | 933.6 | 1332.0 |

Dei cinque anni di prova, il 2011 e il 2012 fanno riferimento al lavoro di tesi sviluppato ed all'analisi di crescita della coltura oggetto di studio, per cui di seguito sono stati analizzati gli andamenti delle variabili climatiche quali precipitazioni e temperatura durante l'anno. Il 2013 viene riportato in quanto i dati meteo di tale anno sono utili per descrivere il momento della raccolta della stagione 2012 che è avvenuto nell'inverno 2013 (5 febbraio 2013).

Nei grafici 3.16.a ed 3.16.b sono riportati gli andamenti dell'apporto pluviometrico cumulato e della temperatura media per gli anni 2011, 2012 e 2013.

L'andamento delle piogge cumulate evidenzia una differenziazione tra i tre anni in termini di distribuzione degli apporti pluviometrici. In particolare il 2013 mostra livelli più alti di incrementi di pioggia cumulata fino all'inizio del mese di giugno (dal DOY 1 al 151) rispetto agli anni 2011 e 2012 i quali a loro volta mostrano un andamento simile. Inoltre è evidente

che durante il periodo estivo da giugno a inizio settembre (DOY 151 al 244) gli apporti pluviometrici risultano più bassi nell'anno 2012 con incrementi finali simili nei tre anni.

Per le temperature medie (fig 3.16.b) invece si riscontra un comportamento simile tra i tre anni, con una variabilità stagionale che ha mostrato solo nel periodo di fine novembre-inizio dicembre dell'anno 2012 una temperatura media dell'aria più bassa (intorno ai 5 °C) diversa dagli altri due anni analizzati.

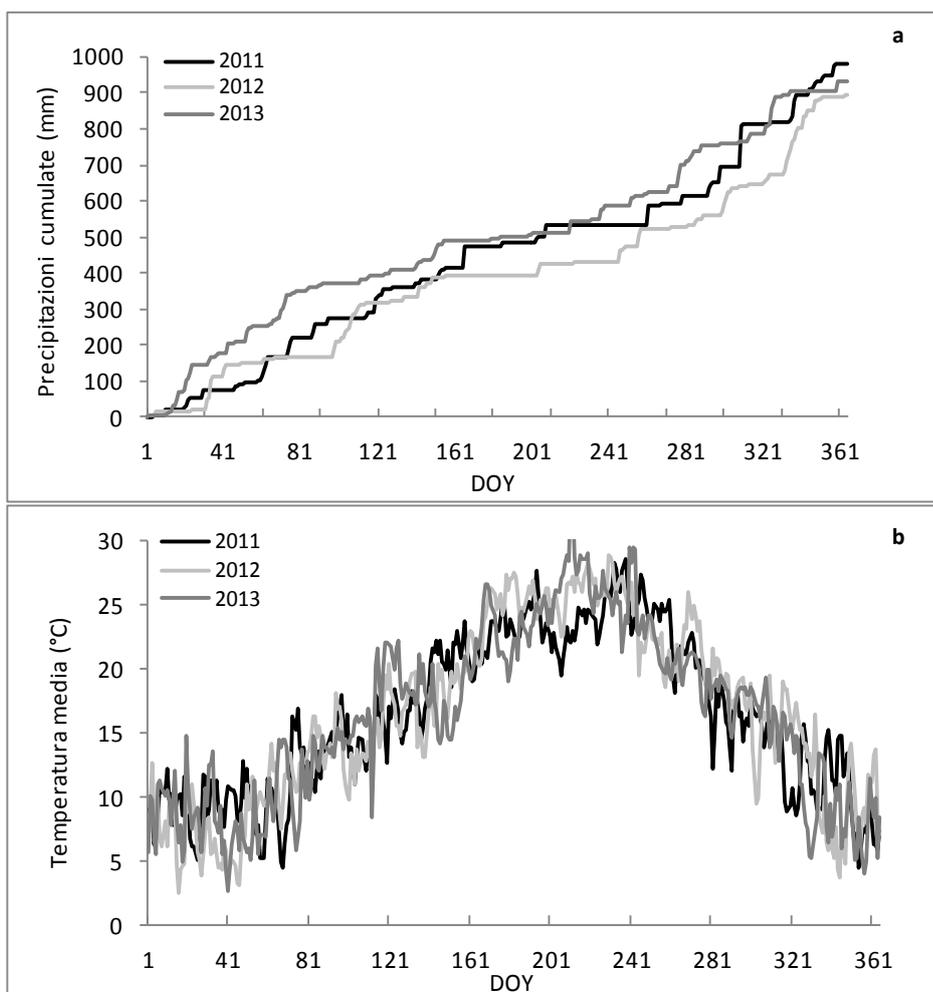


Figura 3.16 - Acerra: a) Andamento delle precipitazioni cumulate (mm); b) Andamento della temperatura media (°C) nel periodo in cui è stata effettuata l'analisi di crescita (2011-2013).

Durante le due stagioni di crescita monitorate (tab. 3.11), si è registrato un deficit idrico non elevato (515 mm in media) in accordo con quanto evidenziato durante tutta l'annata, con apporti pluviometrici e distribuzione delle piogge molto simili (circa 561 mm).

Tabella 3.11 - Valori annuali e stagionali di Pioggia, ETO e Deficit (mm) relativi al periodo in cui è stata effettuata l'analisi di crescita (2011-2012).

| Anno | Valori annuali | | | Stagione di crescita (aprile-novembre) | | |
|------|----------------|--------|---------|----------------------------------------|--------|---------|
| | Pioggia | ETO | Deficit | Pioggia | ETO | Deficit |
| | mm | | | | | |
| 2011 | 982.4 | 1250.8 | -268.4 | 560.5 | 1061.0 | -500.5 |
| 2012 | 861.6 | 1285.5 | -393.9 | 561.4 | 1092.2 | -530.8 |

3.2.2 Produzione

Il monitoraggio della produzione è stato realizzato su due tesi a diversa fertilizzazione organica, con e senza compost (COM e NoCOM), per le quattro annate (2009-2012).

Per entrambe le tesi, la produzione di biomassa aerea durante gli anni di monitoraggio ha mostrato un andamento crescente, nel quale l'incremento tra gli anni si riduce tra il terzo ed il quarto verso la condizione di stazionarietà individuata negli altri siti (es. Bellizzi) (fig. 3.17) Dall'analisi della varianza (tab. 3.13), la produzione di biomassa è stata inferiore nei primi 2 anni e poi è stata significativamente superiore senza differenze nel 2011 e nel 2012 (tab. 3.12).

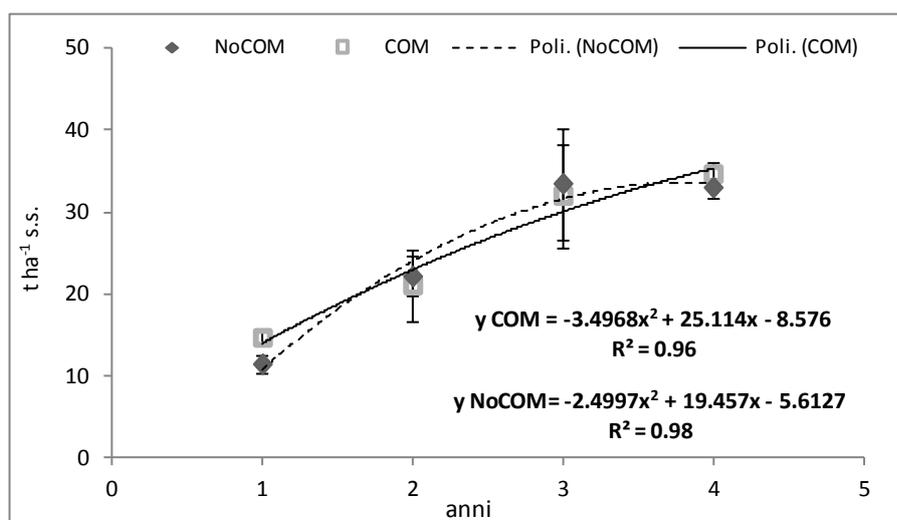


Figura 3.17 - Acerra: Produzione di sostanza secca in *A. donax* (analisi di regressione con fertilizzazione con compost (COM) e senza compost (NoCOM). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Tra i parametri produttivi analizzati (tab. 3.13), differenze significative tra gli anni si sono riscontrate per la percentuale di foglie e culmi sul peso secco totale, diametro basale, altezza e numero di culmi a m². La percentuale di culmi è stata inferiore nel primo anno di raccolta, significativamente superiore senza differenze dal 2010 al 2012. La percentuale di foglie sul totale, tranne nel primo anno, in cui i valori si sono mantenuti elevati per entrambe le tesi con valori di 26 e 29% (NoCOM e COM), è stata molto bassa negli anni successivi con valori al di sotto del 3%, con produzione di abbondante lettiera (vedi foto 3.1.A e 3.1.B). Le

differenze registrate al primo anno dipendono dalla scelta del periodo di raccolta, effettuata in autunno, quando la percentuale di foglie sul peso secco totale risulta essere più alta a differenza del periodo invernale in cui il distacco naturale delle foglie comincia ad essere più spinto. Il diametro basale dei culmi è risultato essere significativamente più alto al secondo anno di crescita. Il numero dei culmi negli anni è aumentato per entrambe le tesi passando da circa 10 culmi a m² a 34.7 e 30.1 culmi per le tesi No COM e COM. Il valore medio nell'ultimo anno è risultato essere significativamente superiore a quello del terzo anno, di fatto con effetto compensativo tra le produzioni 2012 e 2011. L'altezza dei culmi è risultata variabile tra gli anni con picco massimo nel terzo anno d'impianto in cui i culmi hanno superato i 6 metri di altezza. Sull'altezza dei culmi c'è stato anche un effetto della fertilizzazione con compost: i valori registrati sono risultati pari a 493.6 cm e 464.1 cm rispettivamente per la tesi COM e NoCOM (tab. 3.12) La percentuale di sostanza secca alla raccolta per entrambe le tesi nei diversi anni è risultata pressoché uguale, i valori si collocano in un *range* ottimale per le fasi successive della filiera quali la raccolta meccanica e il trasporto in impianti di trasformazione. (tab. 3.12).

Tabella 3.12 - Acerra: Produzione e parametri produttivi alla raccolta in *A.donax* nel periodo 2009-2012.

| Anno | Biomassa aerea | Sostanza secca | Culmi | Foglie | Diametro basale | Altezza | N culmi |
|------------------------|---------------------------|----------------|---------|---------|-----------------|---------|------------------|
| | (t ha ⁻¹ s.s.) | (%) | (% tot) | (% tot) | cm | cm | n°m ² |
| 2009 | 13.0 b | 39.3 | 72.7 b | 27.3 ab | 1.4 c | 327.1 d | 9.8 c |
| 2010 | 21.6 b | 42.1 | 98.8 a | 1.1 b | 2.3 a | 522.6 b | 11.4 c |
| 2011 | 32.7 a | 42.8 | 97.8 a | 2.2 b | 1.8 b | 663.3 a | 15.3 b |
| 2012 | 33.8 a | 44.2 | 97.8 a | 2.2 b | 1.3 c | 493.6 c | 32.4 a |
| Fertilizzazione | | | | | | | |
| NoCOM | 25.0 | 49.1 | 92.2 | 7.7 | 1.7 | 464.1 b | 17.7 |
| COM | 25.6 | 47.1 | 91.3 | 8.7 | 1.7 | 493.6 a | 16.7 |

Tabella 3.13 - Analisi della varianza: significatività dei fattori principali e interazione (P <5% = *; P <1% = **)

| | Fattori principali | | | | Interazione | |
|--------------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----|
| | Anno | Fertilizzazione | | Anno x Fertilizzazione | | |
| | Significatività | DMS | Significatività | DMS | Significatività | DMS |
| Biomassa aerea (t ha ⁻¹) | ** | 11.0 | ns | - | n.s. | - |
| Sostanza secca (%) | n.s. | - | ns | - | n.s. | - |
| Culmi (% tot) | ** | 3.1 | ns | - | n.s. | - |
| Foglie (% tot) | ** | 3.1 | ns | - | n.s. | - |
| Diametro basale (cm) | ** | 0.2 | ns | - | n.s. | - |
| Altezza (cm) | ** | 45.9 | * | 24.2 | n.s. | - |
| N culmi (n°m ²) | ** | 3.2 | ns | - | n.s. | - |

3.2.3 Asportazione di Azoto

Il monitoraggio delle asportazioni azotate è stato realizzato dal 2009 al 2012.

Dalle misure effettuate (tab. 3.14) si è evidenziato un asporto di azoto medio dei culmi nei quattro anni superiore di circa 5.2 kg N ha⁻¹ nella tesi COM rispetto alla tesi NoCOM, con valori assoluti superiori nel secondo anno per entrambe le tesi (123 e 146 kg N ha⁻¹ per NoCOM e COM) e minimi nel primo (44.2 e 52.1 kg N ha⁻¹ per NoCOM e COM): quest'ultimi rappresentano circa metà del valore medio espresso negli anni successivi. Di contro, le asportazioni fogliari, mostrano il loro massimo assoluto nel primo anno (59.5 e 80.6 kg N ha⁻¹ per NoCOM e COM), per poi mostrare valori molto bassi nei due anni centrali della prova (2010 e 2011) riportando valori compresi tra 3 e 6 kg N ha⁻¹. In generale il valore totale delle asportazioni è risultato mediamente più elevato nella tesi COM con 134 kg N ha⁻¹ rispetto ai 123 kg N ha⁻¹ della tesi NoCOM. Il contenuto di azoto nei culmi e nelle foglie è risultato costante negli ultimi due anni di sperimentazione tra le tesi con piccole differenze riscontrate nei primi due anni. In ogni caso la media delle misure per i quattro anni ha riportato valori identici di contenuto di azoto tra le tesi pari a 0.5% per i culmi e 1.9% per le foglie.

Tabella 3.14 - Asportazione di Azoto (kg N ha⁻¹) e Contenuto di N (g:100g) nelle tesi NoCOM e COM alla raccolta in *A. donax* nel periodo di crescita 2009-2012

| | Fertilizzazione | Asportazioni (kg N ha ⁻¹) | | | Contenuto N (g:100g) | |
|------|-----------------|---------------------------------------|--------|--------|----------------------|--------|
| | | Culmi | Foglie | totale | Culmi | Foglie |
| 2009 | NoCOM | 44.2 | 59.5 | 103.7 | 0.5 | 2.0 |
| | COM | 52.1 | 80.6 | 132.7 | 0.6 | 2.2 |
| 2010 | NoCOM | 123.0 | 4.2 | 127.2 | 0.6 | 2.1 |
| | COM | 146.3 | 5.9 | 152.2 | 0.7 | 2.0 |
| 2011 | NoCOM | 133.0 | 2.9 | 135.9 | 0.4 | 1.8 |
| | COM | 111.3 | 2.7 | 113.9 | 0.4 | 1.8 |
| 2012 | NoCOM | 114.0 | 11.3 | 125.3 | 0.4 | 1.5 |
| | COM | 125.1 | 12.6 | 137.7 | 0.4 | 1.5 |

Tabella 3.15 - Analisi della varianza: significatività dei fattori principali e interazione (P <5% = *; P <1% = **)

| | Fattori principali | | | | Interazione | |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|------|------------------------|-----------------|-----|
| | Anno | Fertilizzazione | | Anno x Fertilizzazione | Significatività | DMS |
| | | Significatività | DMS | | | |
| Asportazione Culmi (kg N ha ⁻¹) | * | 49.5 | n.s. | - | n.s. | - |
| Asportazione Foglie (kg N ha ⁻¹) | ** | 11.3 | n.s. | - | n.s. | - |
| Asportazione Totale (kg ¹ N ha ⁻¹) | n.s. | - | n.s. | - | n.s. | - |
| Contenuto N (g:100g) Foglie | ** | 0.25 | n.s. | - | n.s. | - |
| Contenuto N (g:100g) Culmi | ns | - | n.s. | - | n.s. | - |

Per quanto riguarda le asportazioni di Azoto (kg ha^{-1}) da parte della coltura, l'analisi della varianza (tab. 3.15) ha fatto riscontrare differenze significative tra gli anni per quanto riguarda l'asportazione di culmi e foglie, nessuna differenza per quanto riguarda l'asportazione totale. Le minori asportazioni dei culmi (tab. 3.16) si sono registrate alla fine del primo ciclo di crescita, legate essenzialmente ad una minore % di culmi sul peso secco totale, per contro, le foglie hanno asportato un quantitativo di azoto maggiore legato ad una maggiore percentuale rispetto al totale accompagnata da un maggior contenuto di N nei tessuti vegetali. Il contenuto di N delle foglie non si è differenziato nei primi tre anni con un valore medio del 2%, mentre nell'ultimo anno di raccolta il contenuto è stato più basso pari a 1.5 %, nessuna differenziazione per quanto riguarda il contenuto di N nei culmi che è stato in media pari allo 0.5 %.

Tabella 3.16 - Asportazione di Azoto (kg N ha^{-1}) e Contenuto di N (g:100g) alla raccolta in *A.donax* nel periodo di crescita 2009-2012

| Anni | Asportazione kg N ha^{-1} | | | Contenuto N (g:100g) | |
|------------------------|---------------------------------------|--------|--------|------------------------------------|--------|
| | Culmi | Foglie | Totale | Culmi | Foglie |
| 2009 | 48.1 b | 70.1 a | 118.2 | 0.5 | 2.1 a |
| 2010 | 134.7 a | 5.0 b | 139.7 | 0.6 | 2.1 a |
| 2011 | 122.1 a | 2.8 b | 124.9 | 0.4 | 1.8 a |
| 2012 | 119.5 a | 11.9 b | 131.5 | 0.4 | 1.5 c |
| Fertilizzazione | | | | | |
| NoCOM | 103.5 | 19.5 | 123.0 | 0.5 | 1.9 |
| COM | 108.7 | 25.4 | 134.1 | 0.5 | 1.9 |



Foto 3.1 - Acerra: Momento della raccolta di *A.donax* a fine ciclo di crescita 2012 - A) Piante intere B) Lettiera di foglie.

3.2.4 - Analisi di crescita

3.2.4.1 Analisi di crescita 2011

Il monitoraggio dello sviluppo colturale è stato effettuato a cadenza mensile da maggio a novembre dell'anno 2011 per entrambe le tesi (COM e NoCOM) per un totale di sei rilievi.

Lo sviluppo della biomassa aerea è risultato graduale e praticamente identico in entrambe le tesi (fig. 3.18.a) con una differenziazione sul valore misurato nel mese di agosto in cui la tesi NoCOM ha mostrato valori più elevati di circa il 12%.

Il picco massimo di produzione è stato realizzato in settembre con valori di circa 3357 g m² s.s. per entrambe le tesi, periodo dopo il quale le produzioni sembrano stabilizzarsi.

Stesso discorso vale per l'indice di area fogliare (*LAI*) (fig. 3.18.b), il quale risulta poco variabile tra le tesi e con lo stesso andamento durante il ciclo di crescita, con picco massimo realizzato nel mese di agosto con un valore di circa 8.6 m²m⁻².

L'incremento di peso secco per unità di tempo (*CGR*) (3.18.c), ha mostrato già durante il periodo giugno-luglio valori elevati (in media a 25 g m⁻² d⁻¹), il picco massimo si è registrato ad agosto con valori rispettivamente per la tesi COM e NoCOM di 41 e 53 g m⁻² d⁻¹, periodo dopo il quale si ha un decremento dell'intensità di accrescimento leggermente più marcato per la tesi NoCOM.

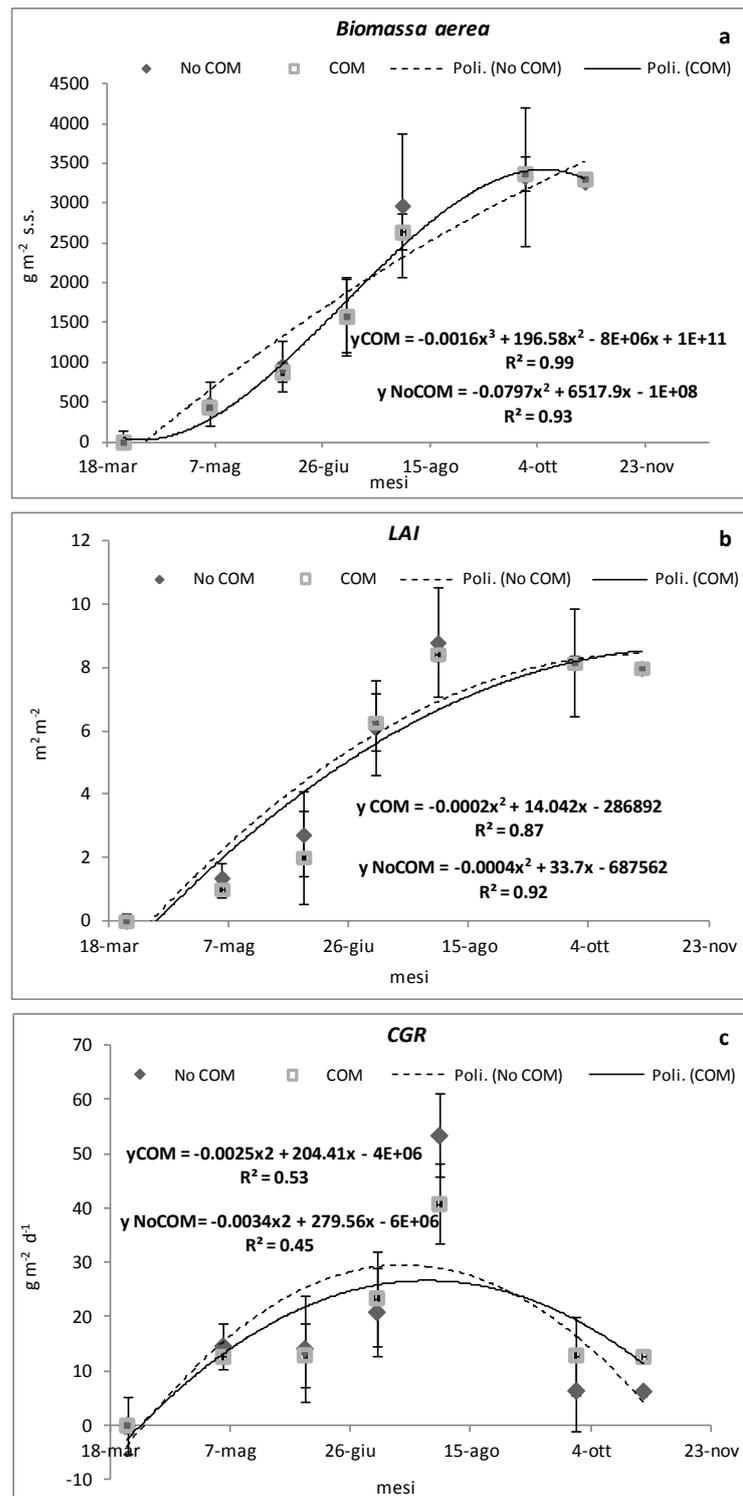


Figura 3.18 - Acerra, 2011: a) Biomassa aerea (culmi e foglie - $g\ m^{-2}\ s.s.$), b) Indice di area fogliare (LAI - $m^2\ m^{-2}$), c) Incremento di peso secco per unità di tempo e superficie (CGR - $g\ m^{-2}\ d^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

E' importante sottolineare che la biomassa di una coltura è influenzata dall'estensione dell'apparato assimilatore, dalla intensità di assimilazione nonché dalla durata del funzionamento dell'apparato fotosintetico. Poiché l'andamento del LAI è stato molto simile tra le tesi, i valori espressi dall'indice LAD non hanno mostrato nessuna differenza sostanziale tra le tesi, esprimendo un valore medio di $1625.7\ m^2\ m^{-2}\ x\ giorni$.

Nella figura 3.19 sono riportati gli andamenti di altri due indici dipendenti dallo sviluppo fogliare: area fogliare per unità di sostanza secca (*LAR*) e percentuale di foglie sul peso totale (*LWR*).

In entrambe le tesi l'andamento del *LAR* (fig. 3.19.a) è risultato simile tra le tesi e decrescente da maggio a novembre, con valori leggermente più elevati su tutto il periodo per la tesi NoCOM. Il picco massimo è nel mese di luglio con una differenza di circa $24.2 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ tra le due tesi (COM = $406.7 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ e NoCOM = $382.5 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$), fino ad arrivare a novembre con valori di 207 e $245 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ rispettivamente per la tesi COM e NoCOM.

L'andamento dell'indice *LWR* (fig. 3.19.b) è risultato decrescente durante il ciclo produttivo per entrambe le tesi, con picco massimo nel mese di maggio (con valori del 26% per la tesi COM ed 41% per la NoCOM), fino a valori del 10 e 14% per la tesi COM e NoCOM.

L'andamento della percentuale di sostanza secca (fig. 3.19.c), è stato pressoché identico tra le due tesi, con un graduale aumento, dal mese di maggio a novembre, dettato dalla progressiva perdita di umidità da parte della biomassa aerea e in particolar modo dalle foglie passando dal 10% al 42%.

Il tasso di assimilazione netta (*NAR*) (fig. 3.19.d) ha mostrato un andamento decrescente durante la stagione di crescita per entrambe le tesi, con valori molto simili durante la stagione tranne il primo mese in cui si sono registrati i valori più elevati pari a 16.6 g e di 22.6 g m^{-2} s.s. al giorno rispettivamente per la tesi NoCOM e COM.

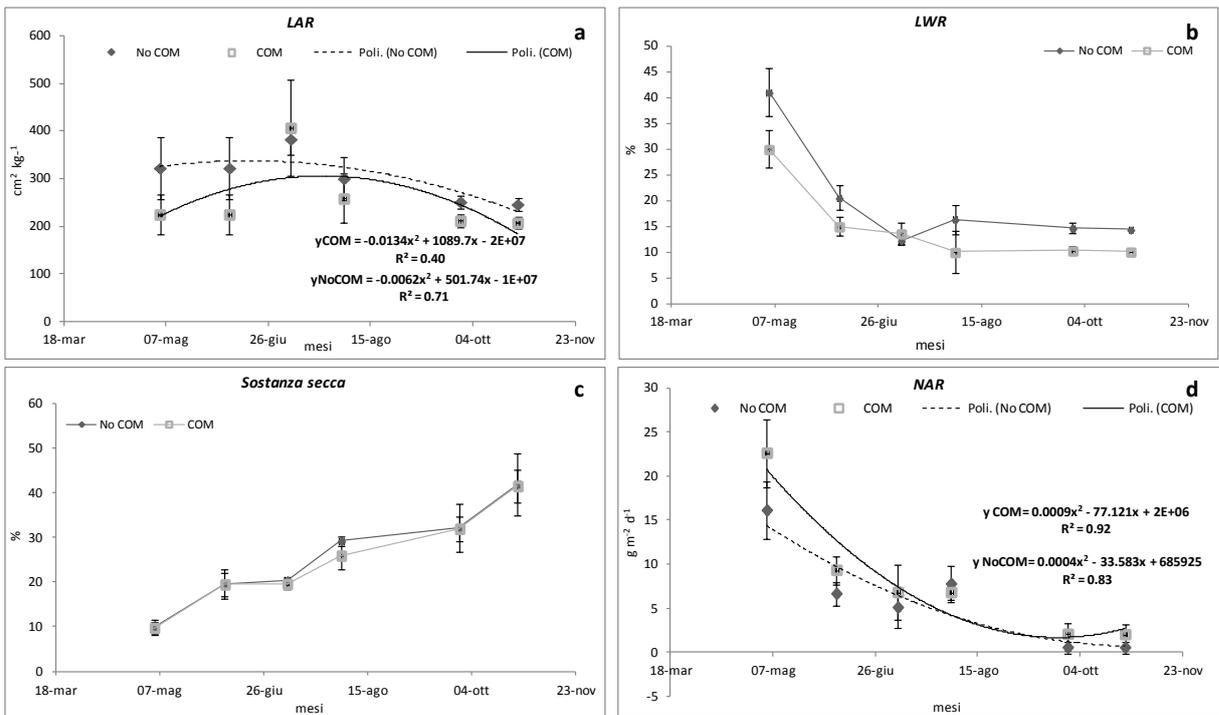


Figura 3.19 - Acerra, 2011: a) Area fogliare per unità di sostanza secca ($LAR - \text{cm}^2 \text{kg}^{-1}$), b) Percentuale di foglie verdi sul peso secco totale ($LWR - \%$), c) Percentuale di sostanza secca (S.S. %), d) Indice di assimilazione netta ($NAR - \text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie ($n=3$).

L'altezza massima della coltura (fig. 3.20) è stata raggiunta nell'ultima decade di settembre con valori di 636 e 690 cm per la tesi NoCOM e COM, valori che si sono mantenuti pressoché costanti fino alla raccolta. Entrambe le tesi hanno mostrato una velocità di accrescimento più elevata durante la fase iniziale di crescita (pari a 6 e 5 cm al giorno per la tesi COM e NoCOM), in accordo con quanto riportato da (Purdue ,1958).

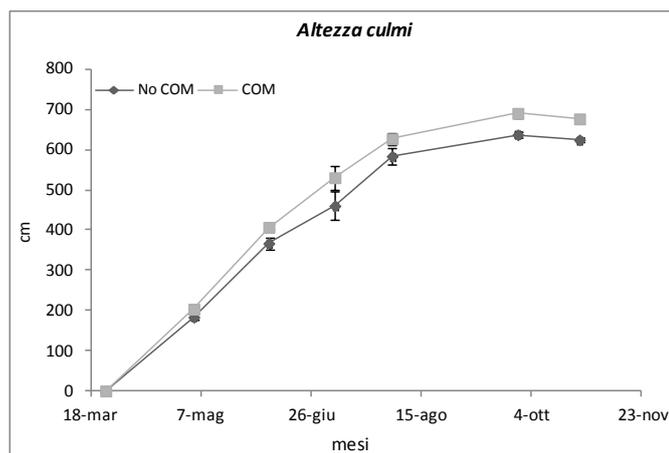


Figura 3.20 - Acerra: Andamento dell'altezza dei culmi (cm) durante il ciclo di crescita 2011. Le barre indicano l'errore standard delle medie ($n=3$).

3.2.4.2 Analisi di crescita 2012

Nell'anno 2012 il primo rilievo è stato effettuato 30 giorni dopo la ripresa vegetativa, a partire dal 4 maggio per un totale di 7 rilievi su entrambe le tesi (COM e NoCOM).

Lo sviluppo della biomassa aerea (fig. 3.21.a) è stata graduale per entrambi i trattamenti a confronto, con una vera e propria differenziazione nel mese di luglio, quando la tesi COM ha raggiunto valori superiori alla tesi NoCOM di circa il 34%. Il picco massimo di produzione è stato raggiunto in entrambe le tesi nel mese di settembre (3849 g m⁻² s.s. per il trattamento COM e 3302 g m⁻² s.s. per il NoCOM).

Per quanto riguarda l'indice di area fogliare (fig. 3.21.b), il raggiungimento del picco massimo si è verificato il 10 settembre, con valori di 9.5 e 11 m²m⁻², rispettivamente per il trattamento COM e NoCOM, con una successiva lieve flessione nei mesi successivi.

A partire dal mese di giugno gli incrementi di sostanza secca sono stati più elevati, il valore massimo di *CGR* si è verificato in anticipo nella tesi COM rispetto alla tesi NoCOM, rispettivamente nel periodo giugno-luglio con valori di 32 g m⁻²d⁻¹ e di luglio-settembre con valori di 33 g m⁻²d⁻¹ (fig. 3.21.c)

Va inoltre evidenziato come la tesi NoCOM, nel periodo giugno-luglio mostri un importante decremento del *CGR* rispetto alla tesi COM, decremento che avviene in concomitanza di valori di *LAI* più elevati e che da come risposta una minore produzione di biomassa aerea (vedi fig. 3.21a), ovvero inizia la fase di differenziazione tra le due tesi. Tale comportamento probabilmente è dovuto alla difficoltà della pianta di estrarre azoto dal suolo dettata molto probabilmente dalle condizioni di umidità dello stesso, poiché è stata riscontrata una minore asportazione di azoto (fig. 3.24) ed una sua maggiore concentrazione nel suolo (fig. 3.26), in una condizione in cui la tesi NoCOM presentava un indice fogliare (*LAI*) molto elevato (circa 8 m²m⁻²) di due punti superiore alla tesi COM. Il *LAD* non ha mostrato differenze rilevanti tra le tesi a confronto, con un valore medio di 1415.7 m²m⁻² x giorni.

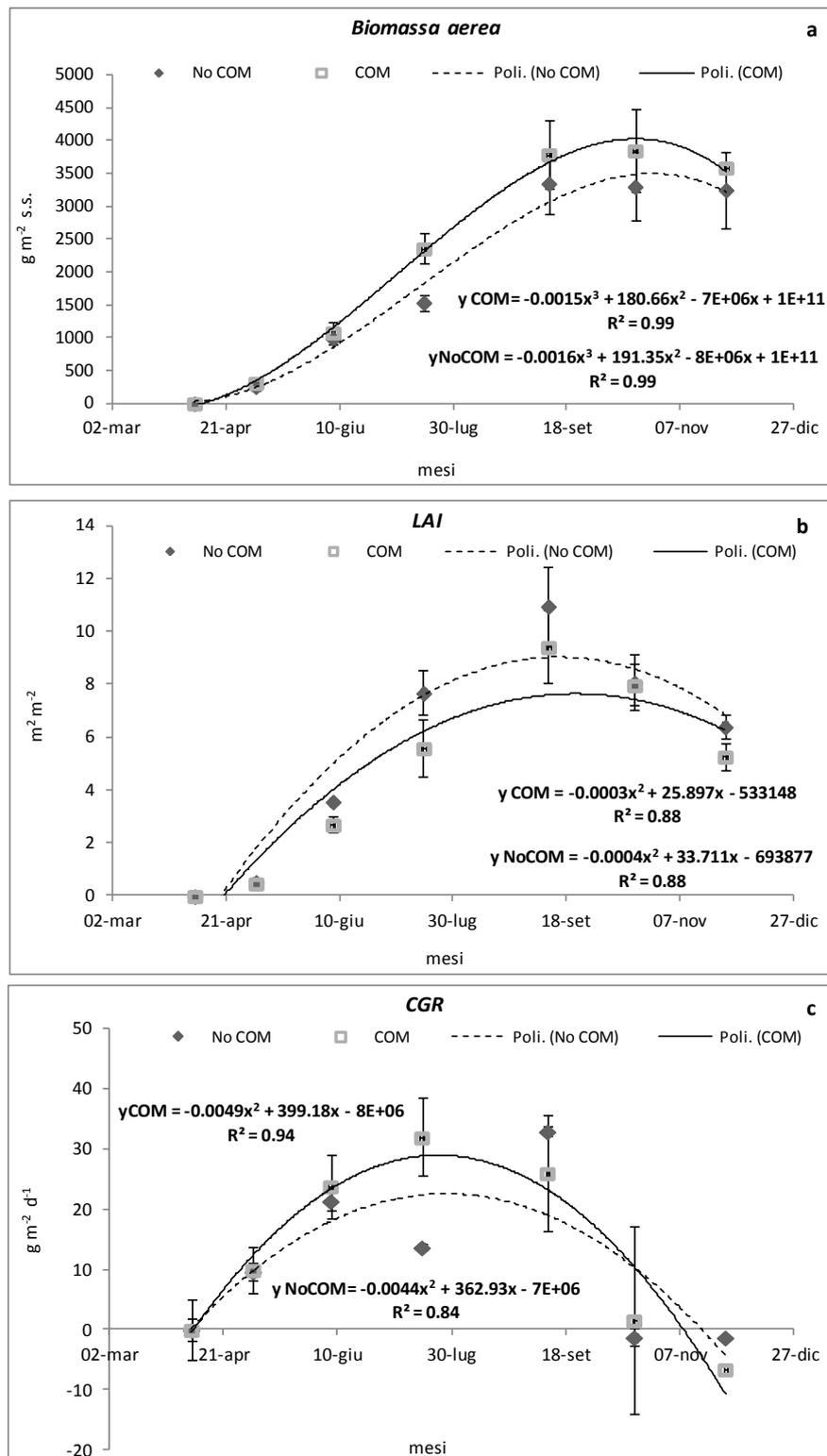


Figura 3.21 - Acerra, 2012: a) Biomassa aerea (culmi e foglie - $g\ m^{-2}\ s.s.$), b) Indice di area fogliare (LAI - $m^2\ m^{-2}$), c) Incremento di peso secco per unità di tempo e superficie (CGR - $g\ m^{-2}\ d^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Nella figura 3.22 sono riportati gli andamenti di altri due indici dipendenti dallo sviluppo fogliare: area fogliare per unità di sostanza secca (LAR) e percentuale di foglie sul peso totale (LWR).

In entrambe le tesi l'andamento del *LAR* (fig. 3.22.a) è prima crescente fino al raggiungimento del picco massimo nella seconda decade di luglio per la tesi NoCOM (498 cm² kg⁻¹) e nel mese di giugno (255 cm² kg⁻¹) per la tesi COM, e poi decrescente, con pendenza maggiore nella tesi NoCOM, fino a valori di 208 e 146 cm² kg⁻¹ rispettivamente per la tesi No COM e COM nel mese di novembre.

L'andamento dell'indice *LWR* (fig. 3.22.b) è risultato molto simile tra le tesi con una lieve differenziazione solo nel mese di giugno (3% tra le tesi), con andamento decrescente e picco massimo nella prima decade del mese di maggio (per entrambe le tesi di circa il 45%). Il decremento di tale indice è dovuto ad un sempre più elevato distacco naturale delle foglie, con il raggiungimento di un valore medio del 16% nel periodo autunnale ed all'aumento dei *sink* di stoccaggio degli assimilati (culmi e rizomi).

L'andamento della percentuale di sostanza secca (fig. 3.22.c), è stato simile tra le due tesi, in accordo con le precedenti annate, con un graduale aumento, dal mese di maggio a novembre, dettato dalla progressiva perdita di umidità da parte della biomassa aerea e in particolar modo dalle foglie. In particolare nella tesi COM si è passato dal 14% al 40% s.s. e dal 16% al 45% s.s. nel trattamento NoCOM. Vanno sottolineati dei valori leggermente più bassi della tesi No COM rispetto alla COM nel mese di luglio, in accordo con quanto detto in precedenza sull'andamento del *CGR*.

Il tasso di assimilazione netta (*NAR*) (3.22.d) ha mostrato un andamento decrescente durante la stagione di crescita per entrambe le tesi, con valori più elevati da maggio a settembre per la tesi COM, valori successivamente non differenti tra le tesi nei mesi finali del ciclo. Il picco massimo si è verificato nel mese di maggio per entrambe le tesi con valori di 36.9 g m⁻² s.s. per la tesi NoCOM g m⁻² s.s. 42.3 per la tesi COM.

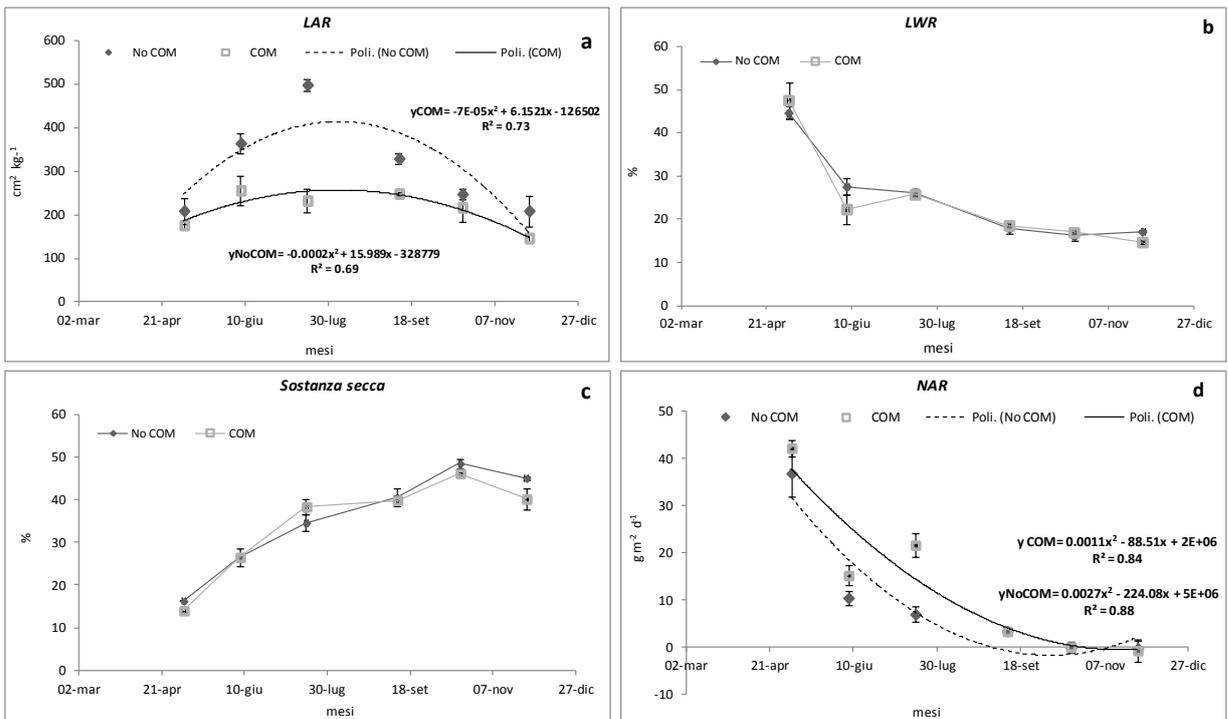


Figura 3.22 - Acerra, 2012: a) Area fogliare per unità di sostanza secca ($LAR - \text{cm}^2 \text{kg}^{-1}$), b) Percentuale di foglie verdi sul peso secco totale ($LWR - \%$), c) Percentuale di sostanza secca (S.S. %), d) Indice di assimilazione netta ($NAR - \text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie ($n=3$).

Nell'annata 2012 l'altezza massima della coltura (fig. 3.23) è stata raggiunta nell'ultima decade di novembre, con valori di 486 e 456 cm per il trattamento COM e NoCOM.

Per entrambi i trattamenti a confronto, la velocità di crescita dell'altezza è stata maggiore soprattutto nell'intervallo di tempo aprile-maggio con una crescita pari a circa 4 cm al giorno. Sul diametro basale (dati non riportati) la fertilizzazione con compost non ha determinato nessuna variazione di rilievo tra i trattamenti a confronto.

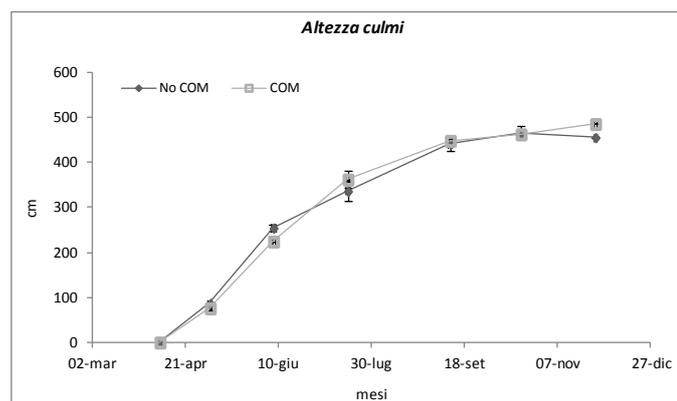


Figura 3.23 - Acerra: Andamento dell'altezza dei culmi (cm) durante il ciclo di crescita 2012. Le barre indicano l'errore standard delle medie ($n=3$).

Asportazione (kg N ha^{-1}) e contenuto di N (%) durante il ciclo di crescita 2012

Nell'annata 2012 è stato possibile monitorare le asportazioni azotate durante il ciclo di crescita. Come mostrato dalla figura 3.24, nell'anno 2012, le asportazioni sono state crescenti durante la prima fase di crescita, con il raggiungimento del picco massimo a metà settembre per entrambe le tesi con valori di 236 e 216 kg N ha^{-1} (COM e NoCOM) e successivamente decrescenti fino alla raccolta con valori di 135 e 125 kg N ha^{-1} (COM e NoCOM). È importante sottolineare che, nel primo periodo di crescita tra il mese di maggio e giugno, non c'è stata nessuna differenziazione tra le tesi sulle quantità di azoto asportato, corrispondente ad un quantitativo di biomassa prodotta praticamente identica tra le stesse. Inoltre, come discusso in precedenza nell'analisi di crescita, va evidenziata il calo nel periodo di luglio registrato per la tesi NoCOM.

Nonostante le produzioni di sostanza secca dopo il picco massimo si siano mantenute costanti, la quantità di azoto asportato è risultata essere più bassa come riscontrato dalla minore concentrazione di N nei tessuti vegetali (fig. 3.25).

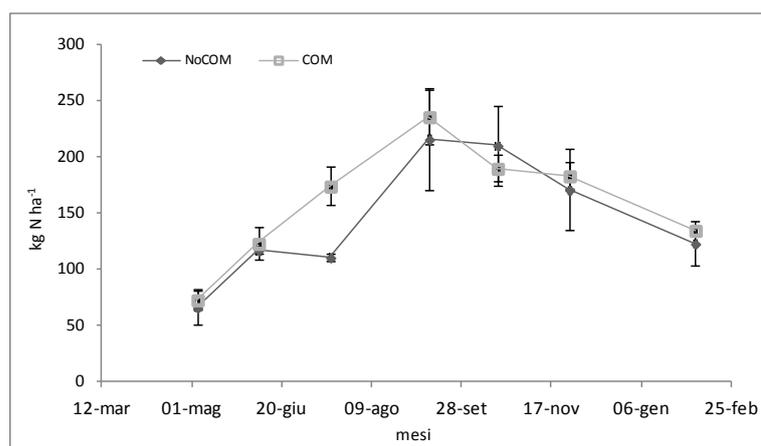


Figura 3.24 - Acerra: Asportazioni (kg N ha^{-1}) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2012. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Il contenuto di azoto nei tessuti vegetali (fig. 3.25) non è stato differente tra le tesi a confronto. La maggior concentrazione di azoto sia per i culmi che per le foglie verdi, è stata riscontrata nel mese di maggio (pari rispettivamente a 3.6% e 1.8%), concentrazione che, nel periodo di crescita attiva (giugno-agosto) cala bruscamente rimanendo costante fino all'inverno con valori rispettivamente 1.5 e 0.36 % alla raccolta. (fine inverno).

Tale riduzione può essere dovuta all'effetto diluizione determinato dall'accumulo dei carboidrati, oltre che dal flusso di assimilati verso i rizomi. Inoltre è importante ricordare che

da fine luglio è iniziato il disseccamento naturale delle foglie basali, con l'aumento della % di foglie "secche" (gialle)

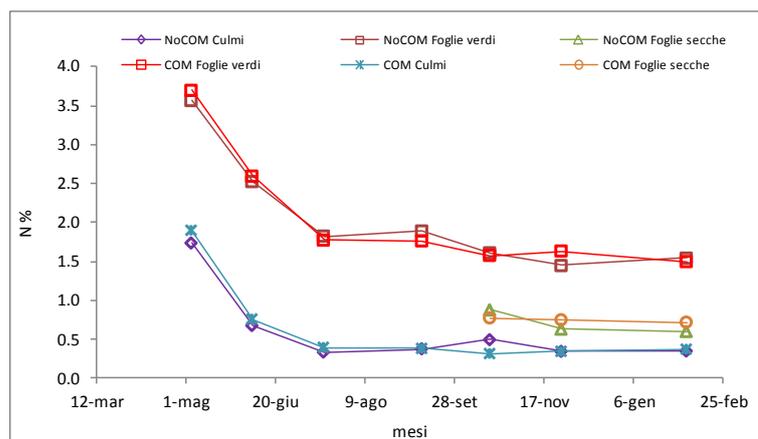


Figura 3.25 - Acerra: Concentrazione (%) di N nei tessuti vegetali (Culmi, Foglie verdi, Foglie secche) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2012.

Per quanto riguarda il contenuto di azoto minerale nel suolo, è possibile notare che nella fase centrale del ciclo di crescita, in concomitanza con il periodo estivo ed autunnale, vi è un abbassamento della concentrazione di azoto minerale del suolo nello strato 0-60cm. Tale comportamento, confermato dalle misure precedentemente discusse, è da imputare ad un aumento delle asportazioni della coltura in quel periodo ed alle condizioni al contorno influenzanti il ciclo dell'azoto e della sostanza organica nel suolo (es. temperatura, umidità del suolo). Successivamente nel mese di novembre, quando la pianta rallenta la sua attività vitale, le concentrazioni di azoto aumentano sia per una ridotta estrazione da parte della pianta, sia per le temperature ancora favorevoli ai processi a carico dell'azoto nel suolo, sia per una restituzione dell'azoto al suolo dovuta alla caduta delle foglie (T. media del mese di novembre di 16° C; dati non riportati).

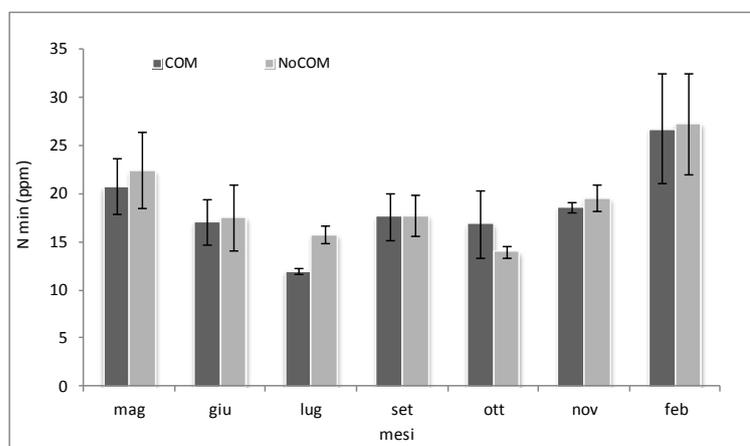


Figura 3.26 - Acerra: Contenuto di azoto minerale (ppm) nel suolo (strato 0-60 cm) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2012. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

3.2.5 Sintesi delle differenze comportamentali nei 2 anni

Nella tabella 3.17 sono riportati i confronti di sintesi tra i parametri di sviluppo analizzati nei due anni di prova sperimentale. Tali valori ci indicano che la produzione di biomassa aerea è stata simile nel 2011 tra le tesi, mentre si è differenziata concretamente nel 2012 con valori della tesi COM del 16% più elevati (3849 vs 3302 g m^{-2} s.s.). Diversamente il *CGR* si è differenziato il primo anno tra le tesi con valori più alti del 30% per la tesi NoCOM, ed il secondo anno ha mostrato valori simili (circa 32 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$), valori quest'ultimi in linea con quanto riportato da altri autori Nassi o Di Nasso et al. (2011a). Lo sviluppo fogliare più elevato per entrambe le tesi è stato registrato nell'annata 2012 con valori di 11 m^2m^{-2} e 9.4 m^2m^{-2} per la tesi No COM e COM, infine la durata totale dell'apparato fotosintetico (*LAD*) è stata uguale per entrambe le tesi a confronto con un valore medio nei due anni di circa 1415.7 $\text{m}^2\text{m}^{-2} \times \text{d}$.

Tabella 3.17 - Acerra: Valori massimi di Biomassa aerea (g m^{-2} s.s.), *LAI* (m^2m^{-2}), *CGR* ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e *LAD tot* ($\text{m}^2\text{m}^{-2} \text{d}$), registrati nel periodo 2011-2012.

| Anno | Biomassa aerea | | <i>LAI</i> | | <i>CGR</i> | | <i>LAD TOTALE</i> | |
|------|------------------------|--------|---------------------------|-----|---------------------------------|------|-------------------------------------------|--------|
| | g m^{-2} s.s. | | m^2m^{-2} | | $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | | $\text{m}^2\text{m}^{-2} \times \text{d}$ | |
| | No COM | COM | No COM | COM | No COM | COM | No COM | COM |
| 2011 | 3336.6 | 3376.4 | 8.8 | 8.4 | 53.3 | 40.8 | 1646.1 | 1605.3 |
| 2012 | 3302.4 | 3849.0 | 11 | 9.4 | 32.9 | 31.9 | 1404.7 | 1415.7 |

Alcune considerazioni vanno fatte sul comportamento della tesi NoCOM che sembrerebbe non differenziarsi molto dalla tesi COM, addirittura mostra uno sviluppo di *LAI* di picco sempre più elevato nei due anni ed un *CGR* più performante. Le differenze di produzioni riscontrate nel 2012 probabilmente sono da attribuirsi alla diminuzione registrata tra il mese di giugno ed agosto, discussa in precedenza e riportata nella figura 3.21. Per quel che riguarda il confronto tra gli indici utilizzati nell'analisi di crescita (tab. 3.18), i valori medi a confronto hanno mostrato che: (i) per l'indice *LWR* (la percentuale di foglie sul peso totale) nel 2012 non ci sono state differenze tra le due tesi; (ii) il *LAR* è stato sempre più elevato per la tesi NoCOM rispetto alla COM; (iii) che il *NAR* risulta essere sempre più elevato per la tesi COM.

Tabella 3.18 – Acerra: Valori medi ($\pm dev.st$) degli indici (*LAR*, *LWR*, *NAR*) registrati nel periodo 2011-2012

| Anno | <i>LAR</i> | | <i>LWR</i> | | <i>NAR</i> | |
|------|------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|------------------|
| | $\text{cm}^2 \text{kg}^{-1}$ | | % | | $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | |
| | NoCOM | COM | NoCOM | COM | NoCOM | COM |
| 2011 | 303.9(± 56.0) | 255.7(± 76.0) | 19.9(± 10.7) | 14.8(± 7.7) | 6.0(± 5.7) | 8.2(± 7.6) |
| 2012 | 309.3(± 112.3) | 212.6(± 42.9) | 25.0(± 10.8) | 24.4(± 12.0) | 9.9(± 14) | 13.7(± 16) |

3.3. Sito sperimentale di Sant'Angelo dei Lombardi (AV)

3.3.1 Andamento climatico

L'andamento climatico è stato monitorato dall'anno dell'impianto della coltura (2004) al 2013.

La temperatura media annuale non ha mostrato particolari variazioni durante i nove anni della prova sperimentale, la temperatura media annua è stata di circa 12°C (tab. 3.19), con temperature minime assolute comprese tra -2 e -10 °C e massime tra 24 e 36.5 °C. Gli apporti pluviometrici medi annui sono circa 1079 mm con una richiesta evapotraspirativa (Hargreaves) media di 929 mm. Tali condizioni descrivono un ambiente caratterizzato da una assenza di deficit idrico (differenza tra apporti pluviometrici e richiesta evapotraspirativa atmosferica) con un surplus medio sui nove anni di sperimentazione pari a circa 150 mm su base annuale. Va detto che nei nove anni di studio solo 4 su 5 sono risultati in deficit idrico con un valore medio di 78 mm ed un picco massimo di surplus nei 5 anni di 829 mm.

Tabella 3.19 . Sant'Angelo dei Lombardi (AV) - Parametri agrometeorologici durante il periodo di crescita dell'Arundo donax (2004-2013) (* dato giornaliero)

| Anno | T. media annuale | T. min ass * | T. max ass * | P | ET0 |
|------|------------------|--------------|--------------|-----------------------|--------|
| | | °C | | mm anno ⁻¹ | |
| 2004 | 12.6 | -2.1 | 29.3 | 1139.0 | 881.8 |
| 2005 | 10.9 | -10.0 | 35.5 | 991.1 | 1025.2 |
| 2006 | 11.7 | -9.0 | 35.5 | 776.6 | 878.6 |
| 2007 | 12.1 | -8.0 | 35.5 | 755.3 | 925.7 |
| 2008 | 12.3 | -9.0 | 34.0 | 977.2 | 923.8 |
| 2009 | 12.1 | -7.0 | 34.0 | 1176.6 | 888.2 |
| 2010 | 11.2 | -8.5 | 33.0 | 1672.2 | 842.8 |
| 2011 | 12.1 | -6.0 | 34.5 | 879.8 | 885.8 |
| 2012 | 12.5 | -7.0 | 24.0 | 1142.0 | 929.2 |
| 2013 | 12.3 | -8.8 | 36.5 | 1289.6 | 1114.0 |

Dei nove anni di prova, il 2012 e il 2013, fanno riferimento al lavoro di tesi sviluppato ed all'analisi di crescita della coltura oggetto di studio, per cui di seguito sono stati analizzati gli andamenti delle variabili climatiche quali precipitazioni e temperatura durante l'anno.

Nei grafici 3.27.a ed 3.27.b sono riportati gli andamenti dell'apporto pluviometrico cumulato e della temperatura media per gli anni 2012 e 2013.

L'andamento delle piogge cumulate evidenzia una differenziazione tra i due anni in termini di distribuzione e volumi degli apporti pluviometrici, in particolare il 2013 mostra livelli più

alti di incrementi di pioggia cumulata da fine maggio a fine luglio (dal DOY 134 al 201) rispetto al 2012, con valori finali di apporto pluviometrico annuale più elevato di circa 150 mm nel 2013. Per le temperature medie (fig 3.27.b) invece si riscontra un comportamento simile tra i due anni, con una variabilità stagionale che ha mostrato ad inizio estate ed inizio inverno valori leggermente più bassi (circa 3.6°C medi) e più alti (circa 2°C medi) per l'anno 2013.

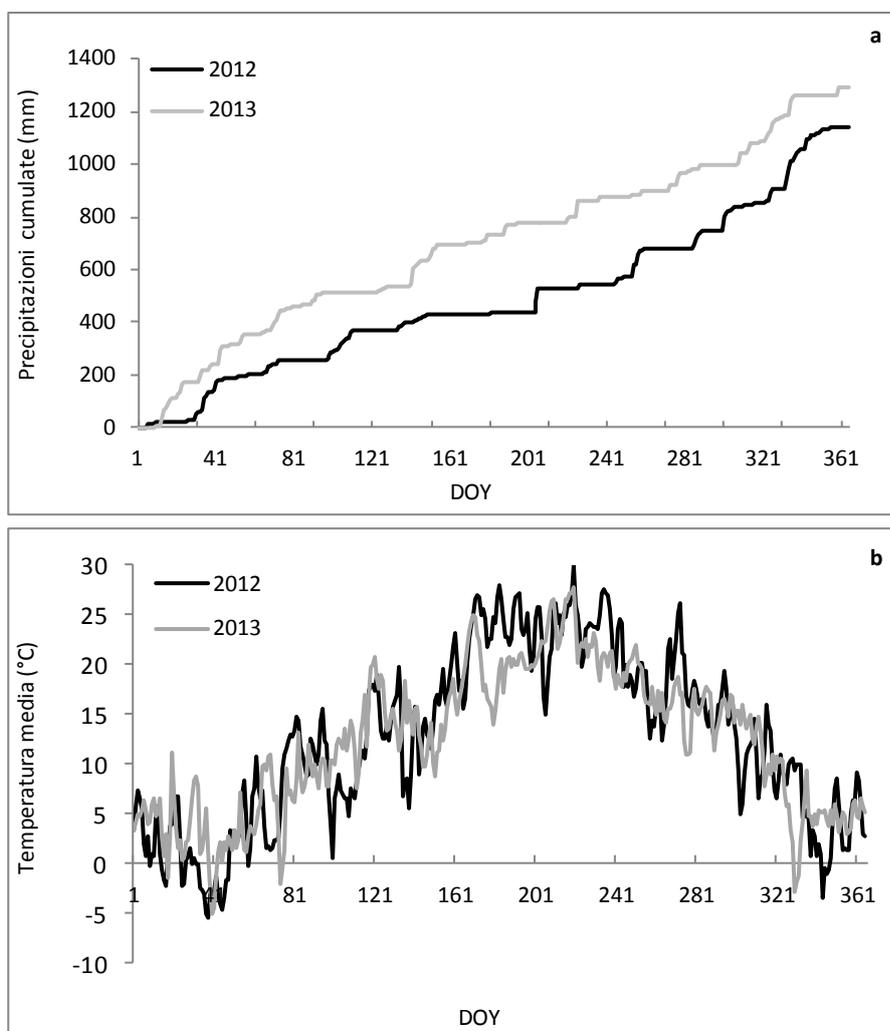


Figura 3.27 - a) Andamento delle precipitazioni cumulate (mm); b) Andamento della temperatura media (°C) nel periodo in cui è stata effettuata l'analisi di crescita (2012-2013) per la stazione meteo di Sant'Angelo dei Lombardi.

Durante le due stagioni di crescita monitorate, si è registrato un deficit idrico molto basso nel 2012 e basso nel 2013 (circa il 50% in meno rispetto agli altri siti), in accordo con il comportamento dell'intera annate. Gli apporti pluviometrici e la distribuzione delle piogge sono stati molto simili (circa 755 mm) con una diversificazione della richiesta evapotraspirativa nella stagione di crescita 2013 (valore più elevato di circa il 17%) (tab. 3.20)

Tabella 3.20 – Sant’Angelo dei Lombardi: Valori annuali e stagionali di Pioggia, ETO e Deficit (mm) relativi al periodo in cui è stata effettuata l’analisi di crescita (2012-2013)

| Anno | Valori annuali | | | Stagione di crescita (aprile-novembre) | | |
|------|----------------|--------|---------|----------------------------------------|-------|---------|
| | Pioggia | ETO | Deficit | Pioggia | ETO | Deficit |
| | | mm | | | mm | |
| 2012 | 1142.0 | 929.2 | 212.8 | 754.8 | 809.2 | -54.8 |
| 2013 | 1289.6 | 1114.0 | 175.6 | 755.0 | 971.8 | -216.8 |

3.3.2 Produzione

Il monitoraggio della produzione è stato realizzato su due tesi con diverso apporto azotato: (100 e 50 kg N ha⁻¹) per 9 annate di produzione alla raccolta (2004-2012).

La produzione di biomassa è stata inferiore nei primi 3 anni e poi è stata significativamente superiore senza differenze nel periodo 2007-2012 (fig. 3.28 e tab. 3.21) anche se è possibile vedere l'inizio di una tendenza decrescente a partire dall'8° ciclo di crescita. Per quanto riguarda l'effetto delle due dosi di concime, un 16 % di aumento della produzione è stato ottenuto con dose di concime maggiore (16.2 vs 13.9 t ha⁻¹ s.s.) .

L' altezza dei culmi è stata influenzata dal diverso apporto azotato (223 vs 209 centimetri) mentre la percentuale di sostanza secca e la percentuale di culmi sulla biomassa totale non sono state significativamente differenti tra le 2 dosi .

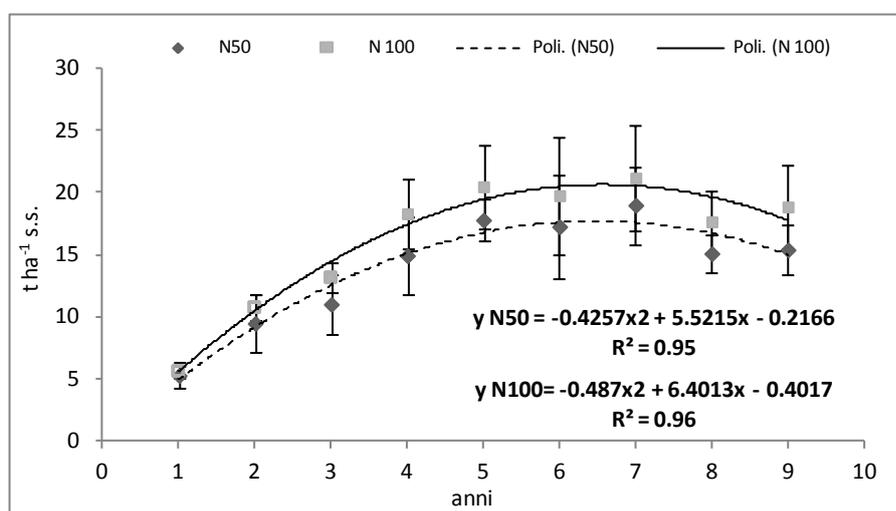


Figura 3.28 - Sant’Angelo dei Lombardi: Produzione di sostanza secca in *A.donax* (analisi di regressione con due dosi di azoto N100 e N50). Le barre indicano l’errore standard delle medie (n=3).

La percentuale di sostanza secca (tab. 3.21) è stata inferiore al 45 % nei primi 4 anni, quando la raccolta è stata effettuata nel periodo autunnale, superiore al 45 % dal 5° anno in poi, periodo in cui la raccolta è stata effettuata in pieno inverno, con l’obiettivo di ridurre l’umidità della biomassa e migliorarne quindi la conservazione post-raccolta. La diminuzione

dell'umidità della biomassa in modo "naturale" è considerata una pratica importante poiché consente un risparmio economico, abbattendo i costi di essiccazione, processo necessario per ridurre al minimo i rischi di fermentazione ed ottenere quindi una corretta conservazione (Nasso o di Nasso et al., 2011b; Borkowska et al., 2013). Questo cambiamento di gestione ha modificato la composizione della biomassa alla raccolta con una riduzione della percentuale di foglie, le quali, sono passate da un valore medio di 28.7 % del periodo 2004-2007 al 12.9 % nel 2007-2013.

Tabella 3.21 - Sant'Angelo dei Lombardi: Produzione e parametri produttivi alla raccolta in *A. donax* nel periodo 2004-2012.

| Anno | Biomassa aerea (t ha ⁻¹ s.s.) | Sostanza secca (%) | Culmi (% tot) | Altezza cm |
|----------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------|------------------|---------------|
| 2004 | 5.4 d | 45.6 d | 70.1 b | 212.7 |
| 2005 | 10.1 cd | 45.0 d | 70.1 b | 235.7 |
| 2006 | 12.1 bcd | 44.1 d | 70.3 b | 228.2 |
| 2007 | 16.6 abc | 43.0 d | 74.8 b | 224.3 |
| 2008 | 19.2 ab | 48.8 c | 87.1 a | 220.2 |
| 2009 | 18.5 ab | 49.4 bc | 87.5 a | 210.2 |
| 2010 | 20.1 a | 49.3 bc | 92.8 a | 222.2 |
| 2011 | 16.4 abc | 53.5 ab | 81.6 a | 191.9 |
| 2012 | 17.1 abc | 54.4 a | 86.4 a | 199.7 |
| <i>Significatività anno</i> | ≤ 0.05 | ≤ 0.01 | ≤ 0.01 | <i>n.s.</i> |
| Fertilizzazione N | | | | |
| N 50 | 13.9 | 48.4 | 79.9 | 208.8 |
| N 100 | 16.2 | 47.7 | 80.3 | 223.4 |
| <i>Significatività Fert.N</i> | ≤ 0.01 | <i>n.s.</i> | <i>n.s.</i> | ≤ 0.01 |
| <i>Interazione Anno x Fert.N</i> | | | | |
| <i>Fert.N</i> | <i>n.s.</i> | <i>n.s.</i> | <i>n.s.</i> | <i>n.s.</i> |

3.3.3 Asportazione di Azoto

Il monitoraggio delle asportazioni azotate è stato realizzato dal 2004 al 2012. Dalle misure effettuate (tab. 3.22) è stato evidenziato un asporto di azoto medio (kg ha⁻¹ N) dei culmi nei nove anni superiore di circa il 22% nella tesi N100 rispetto alla tesi N50, con una differenza superiore al quarto anno (36%) e minima al primo (7%). Dal quinto anno in poi le differenze si stabilizzano con valori del 21%. Comportamento simile si verifica per le asportazioni di azoto totale con una differenza minima tra le tesi (pari al 10%) nel primo anno e massima al quarto (26%), mentre per le asportazioni fogliari il discorso è diverso poiché vi è l'effetto del cambiamento del momento della raccolta che incide sulla presenza e sullo stato fogliare. Infatti, escludendo il primo anno d'impianto, il secondo ed il terzo ciclo colturale mostrano differenze stabili pari al 25% tra le tesi, differenze più elevate tra tutti e nove anni a

confronto. Successivamente le differenze mostrano una elevata variabilità. Infine, il contenuto di N nelle foglie è stato superiore nel 2004-2007 (1.0 % in media) e il 18% in meno negli anni successivi (0.82% in media), comportamento analogo anche per il contenuto di N nei culmi, è stato superiore nel 2004-2007 (0.37% in media) e negli anni successivi è stato poco più che superiore allo 0.30%.

Tabella 3.22 - Sant'Angelo dei Lombardi: Asportazione di Azoto (kg N ha⁻¹) e Contenuto di N (g:100g) alla raccolta in *A. donax* nel periodo 2004-2012

| Anni | Asportazione kg N ha ⁻¹ | | | Contenuto N (g:100g) | |
|-----------------|---------------------------------------|-----------|----------|-------------------------|---------|
| | Culmi | Foglie | Totale | Culmi | Foglie |
| 2004 | 14.37 d | 17.00 de | 31.36 c | 0.38 a | 1.05 a |
| 2005 | 25.92 cd | 30.80 abc | 56.76 b | 0.37 a | 1.02 ab |
| 2006 | 31.35 bc | 36.67 ab | 68.05 ab | 0.37 a | 1.02 ab |
| 2007 | 44.70 ab | 40.50 a | 85.21 a | 0.36 a | 0.97 ab |
| 2008 | 48.57 a | 19.87 cde | 68.44 ab | 0.29 b | 0.80 c |
| 2009 | 45.87 a | 18.50 de | 64.36 ab | 0.30 b | 0.83 c |
| 2010 | 53.77 a | 10.32 e | 64.09 ab | 0.30 b | 0.74 d |
| 2011 | 43.32 ab | 24.73 bcd | 68.04 ab | 0.32 ab | 0.83 c |
| 2012 | 45.93 a | 19.83 cde | 65.74 ab | 0.32 ab | 0.89 bc |
| Fertilizzazione | | | | | |
| 50 N | 35.29 b | 22.41 b | 57.71 b | 0.33 | 0.89 |
| 100 N | 43.32 a | 26.08 a | 69.40 a | 0.34 | 0.91 |

Tabella 3.23 - Analisi della varianza: significatività dei fattori principali e dell' interazione (P <5% = *; P <1% =)**

| | Fattori principali | | | | Interazione | |
|----------------------------------------------|--------------------|-----------------|------------------------|-----------------|-------------|-----------------|
| | Anno | Fertilizzazione | Anno x Fertilizzazione | Significatività | DMS | Significatività |
| Asportazione Culmi (kg N ha ⁻¹) | ** | 14.48 | ** | 5.42 | ns | - |
| Asportazione Foglie (kg N ha ⁻¹) | ** | 12.11 | * | 3.27 | ns | - |
| Asportazione Totale (kg N ha ⁻¹) | * | 23.95 | ** | 7.83 | ns | - |
| Contenuto N (g:100g) Foglie | ** | 0.13 | ns | - | ns | - |
| Contenuto N (g:100g) Culmi | * | 0.06 | ns | - | ns | - |

3.3.4 Analisi di crescita

3.3.4.1 Analisi di crescita 2012

Il monitoraggio dello sviluppo colturale è stato effettuato a cadenza mensile da aprile a novembre dell'anno 2012 per entrambe le tesi (N100 ed N50).

Lo sviluppo della biomassa aerea è risultato graduale in entrambe le tesi (fig. 3.29.a) con una differenziazione sul valore ed il momento del raggiungimento del picco massimo di produzione, che è risultato pari a 1744 g m^{-2} s.s. per la tesi N100 nel mese di novembre ed 1529 g m^{-2} s.s. per la tesi N50 nel mese di ottobre.

Diversamente, per l'indice di area fogliare (*LAI*) (fig. 3.29.b), la differenziazione tra le tesi è avvenuta nel mese di agosto, mese in cui la tesi N100 ha mostrato il suo picco massimo pari a $3.8 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$, mentre per la tesi N50 si è verificato nel mese successivo (settembre) con un valore di $3.3 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$, valore quest'ultimo rimasto per lo più invariato fino al mese di novembre, a differenza della tesi N100 che ha mostrato un lieve decremento ed una successiva stazionarietà. L'incremento di peso secco per unità di tempo (*CGR*) (fig. 3.29.c), ha mostrato un andamento simile tra le tesi, con una differenziazione da giugno in poi, con valori tendenzialmente più elevati per la tesi N100 (tranne nel mese di settembre), con il raggiungimento del picco massimo nel mese di giugno per la tesi N50 (12.8 g m^{-2} s.s. al giorno) e agosto per la tesi N100 (16.4 g m^{-2} s.s. al giorno).

Il confronto delle due tesi ha mostrato una durata della superficie fogliare più elevata del 24 % per la tesi N 100 rispetto a N50 (824.0 vs $624.6 \text{ m}^2\text{m}^{-2}\times$ giorni).

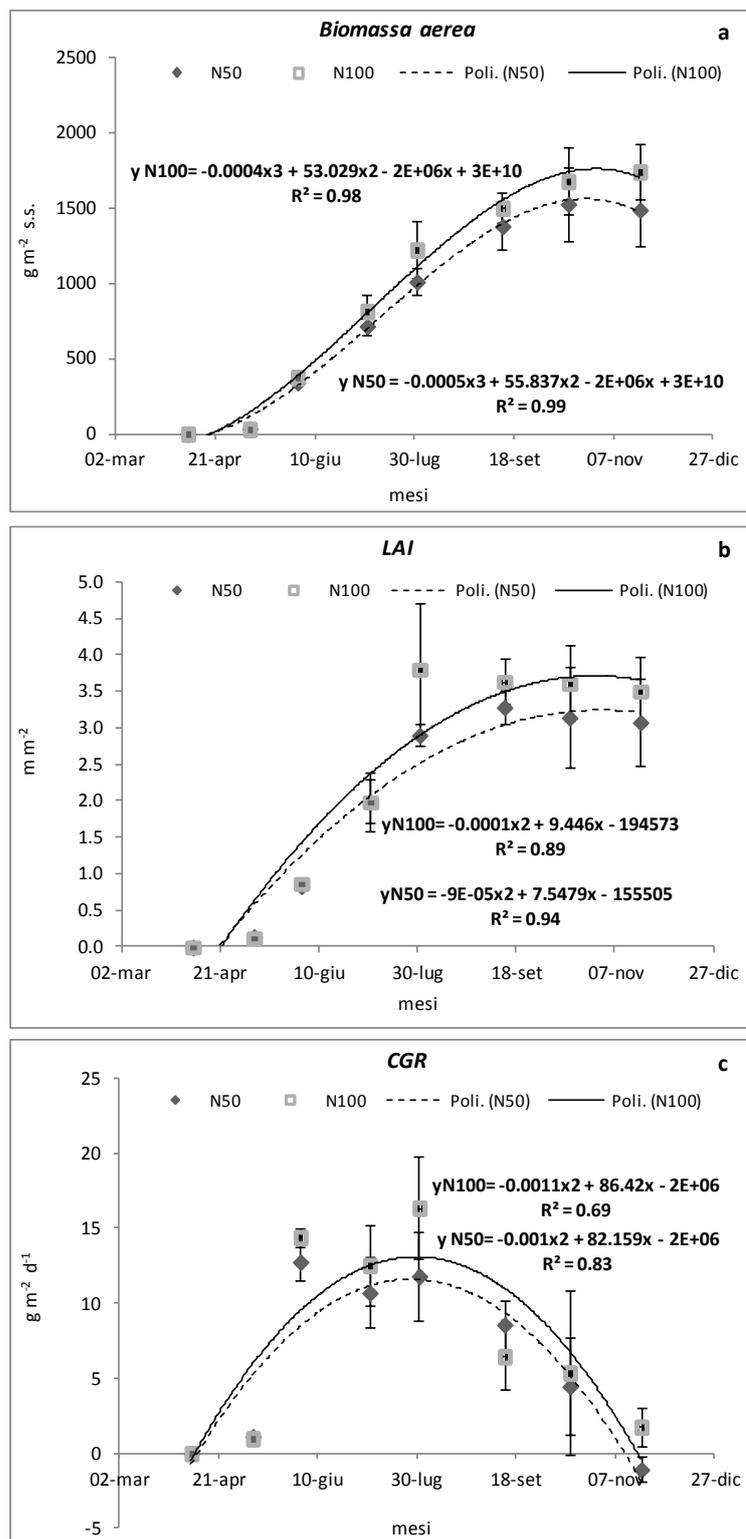


Figura 3.29 - Sant'Angelo dei Lombardi, 2012: a) Biomassa aerea (culmi e foglie - $g\ m^{-2}\ s.s.$), b) Indice di area fogliare (LAI - $m^2\ m^{-2}$), c) Incremento di peso secco per unità di tempo e superficie (CGR - $g\ m^{-2}\ d^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

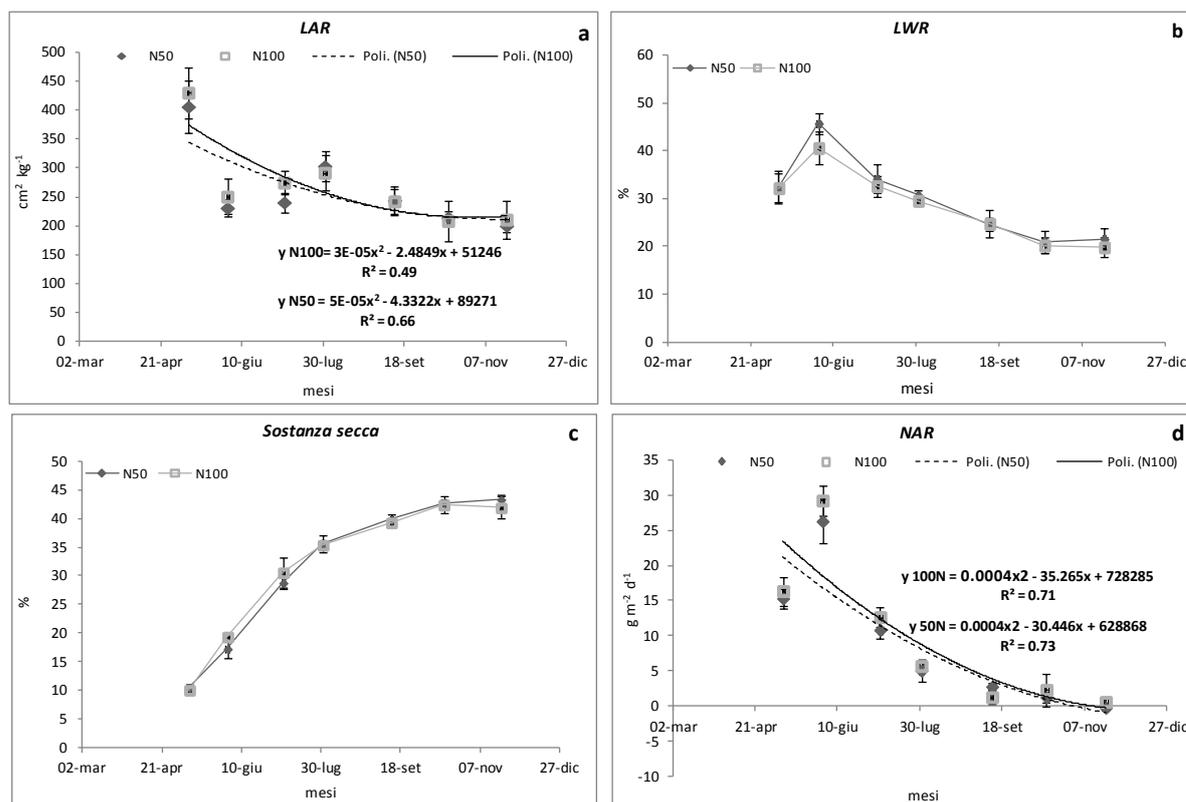


Figura 3.30 - Sant'Angelo dei Lombardi, 2012: a) Area fogliare per unità di sostanza secca (LAR - $\text{cm}^2 \text{kg}^{-1}$), b) Percentuale di foglie sul peso secco totale (LWR - %), c) Percentuale di sostanza secca (S.S. - %) d) Indice di assimilazione netta (NAR - $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Nella figura 3.30 sono riportati gli andamenti di altri due indici dipendenti dallo sviluppo fogliare: area fogliare per unità di sostanza secca (LAR) e percentuale di foglie sul peso totale (LWR). In entrambe le tesi l'andamento del LAR (fig. 3.30.a) è molto simile e decrescente da maggio a novembre, descritto da una cinetica del secondo ordine, in cui il picco massimo è stato raggiunto nel mese di maggio con una differenza di circa $27 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ tra le due tesi (N100 = $430 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ ed N50 = $403 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$), per poi ridursi gradualmente nel corso della stagione vegetativa ed arrivare al mese di novembre con valore medio per entrambi i trattamenti di $205 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$. L'andamento dell'indice LWR (fig. 3.30.b) è risultato molto simile tra le tesi, con picco massimo nel mese di giugno e valori decrescenti nei mesi successivi fino ad un valore medio del 21% per entrambe le tesi.

L'andamento della percentuale di sostanza secca (fig. 3.30.c), è stato pressoché identico tra le due tesi, con un graduale aumento, dal mese di aprile a novembre, dettato dalla progressiva perdita di umidità da parte della biomassa aerea e in particolar modo dalle foglie (dal 10% al 43%). Il tasso di assimilazione netta (NAR) (fig. 3.30.d) ha mostrato un andamento decrescente dal mese di giugno in avanti, mese in cui entrambe le tesi hanno raggiunto il valore di picco pari a $29 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $26 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ per le tesi N100 e N50. L'andamento decrescente di tale indice è correlabile alla diminuzione nella quantità di radiazione

intercettata per unità di superficie fogliare. Inoltre, come mostrato dagli andamenti dei grafici del *NAR* e del *LWR*, l'andamento del *NAR* è intimamente connesso all'andamento della % di foglie sul peso secco totale.

Per quanto riguarda l'altezza dei culmi in entrambe le tesi (fig. 3.31), l'accrescimento è stato graduale, e nel periodo giugno-luglio l'incremento in altezza è stato pari a 2 cm al giorno. L'accrescimento è in accordo con lo sviluppo della biomassa con lieve differenziazione solo nei mesi di ottobre e novembre. Inoltre non si sono riscontrate differenze importanti sul diametro basale dei culmi tra le due tesi a confronto (dati non riportati), con valore medio di 1.8 cm.

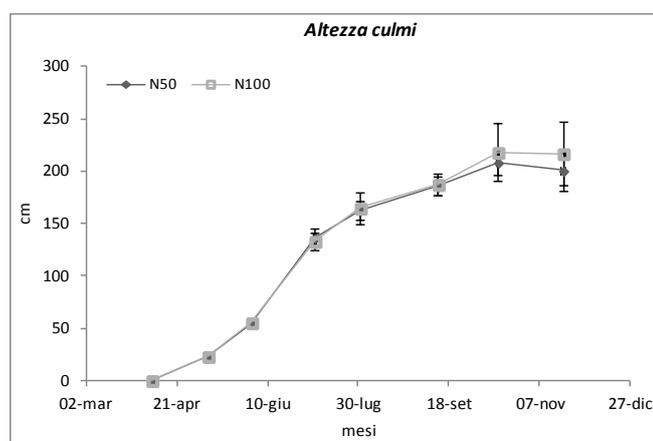


Figura 3.31 - Sant'Angelo dei Lombardi - Andamento dell'altezza dei culmi (cm) durante il ciclo di crescita 2012. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Asportazione (kg N ha^{-1}) e contenuto di N (%) durante il ciclo di crescita 2012

Per gli anni 2012 e 2013 sono state monitorate ed analizzate le asportazioni colturali di azoto (kg N ha^{-1}) per entrambe le tesi al confronto. Come si evince dalla figura 3.32, nell'anno 2012, le asportazioni sono state crescenti durante la prima fase di crescita, con valori simili tra le tesi fino al mese di luglio e successiva differenziazione dal mese di agosto in avanti con valori della tesi N100 sempre superiori tranne che nel mese di settembre in cui entrambe le tesi hanno raggiunto il picco massimo pari a 110 kg N ha^{-1} , per poi decrescere fino al momento in cui è stata effettuata la raccolta (inverno) i cui valori sono stati sensibilmente più bassi e differenti $73.9 \text{ vs } 57.3 \text{ kg N ha}^{-1}$ (N100 vs N50). Le asportazioni più elevate della tesi N100 (dal mese di luglio in poi), sono da attribuire molto probabilmente al trattamento e quindi alle maggiori dosi di azoto fornite al sistema. Inoltre, la prima differenziazione nell'asporto è da attribuire anche ad una superficie fogliare superiore della tesi N100 nel periodo di luglio (vedi fig. 3.29.b) che ha consentito una maggiore traspirazione e quindi

assorbimento di azoto da parte della coltura, corrispondente anche alla differenziazione di biomassa aerea prodotta (vedi fig 3.29.a). Tale ipotesi è supportata anche (i) dalla minore concentrazione misurata di azoto nei primi 60 cm di suolo nel periodo giugno-luglio per la tesi N100 (a maggior apporto azotato) (fig 3.34), e (ii) dal maggiore *uptake* derivante da parte della coltura, confermato nella figura 3.33 dall'aumento dell'azoto delle foglie verdi per la tesi N100 nei mesi di luglio ed agosto. L'andamento calante delle curve di asportazione dell'azoto nel periodo autunno-vernino sono da attribuire alla senescenza fogliare, alla parziale restituzione di N al suolo, ad una riduzione dei *source* dell'azoto nel suolo (rallentamento dei processi a carico dei microrganismi del suolo quali mineralizzazione e nitrificazione per abbassamento della temperatura) ed ad un probabile meccanismo fisiologico della coltura stessa che a fine ciclo aumenta il flusso degli assimilati verso gli organi di accumulo sotterranei. (Smith e Slater, 2011; Nasso o Di Nasso et al., 2013).

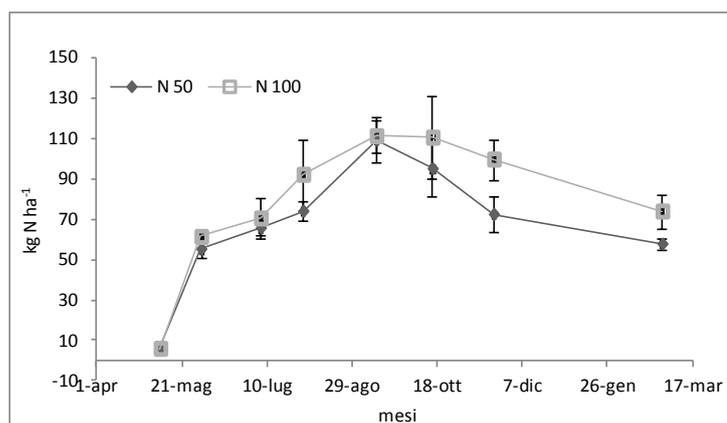


Figura 3.32 - Sant'Angelo dei Lombardi: Asportazioni (kg N ha⁻¹) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2012. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Il contenuto di azoto nei tessuti vegetali (fig. 3.33) è risultato simile tra le tesi a confronto. La maggior concentrazione di azoto sia per i culmi che per le foglie verdi, è stata riscontrata nel mese di maggio (pari rispettivamente a 2.9 % e 1.3%), concentrazione che come detto in precedenza si diversifica tra le tesi solo nei mesi di luglio ed agosto, con un andamento decrescente e graduale fino alla raccolta con valori identici tra le tesi per i culmi (0.4 %), poco differenti per le foglie secche (0.5 e 0.4%) e per le verdi (1.0 e 0.8 %) rispettivamente per la tesi N100 e N50.

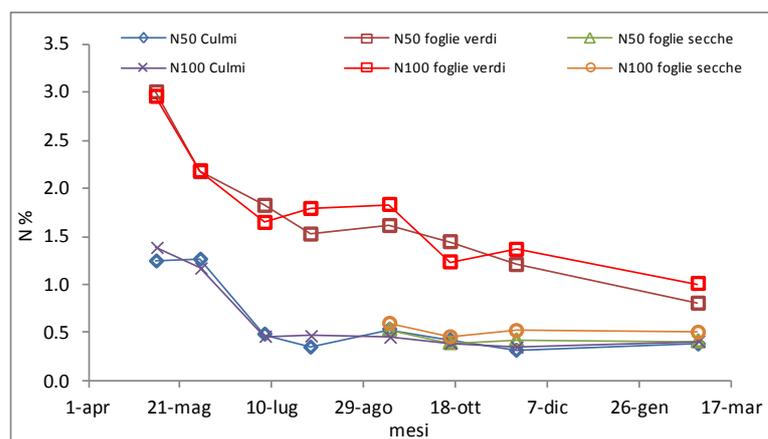


Figura 3.33 - Sant'Angelo dei Lombardi: Concentrazione (%) di N nei tessuti vegetali (Culmi, Foglie verdi, Foglie secche) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2012.

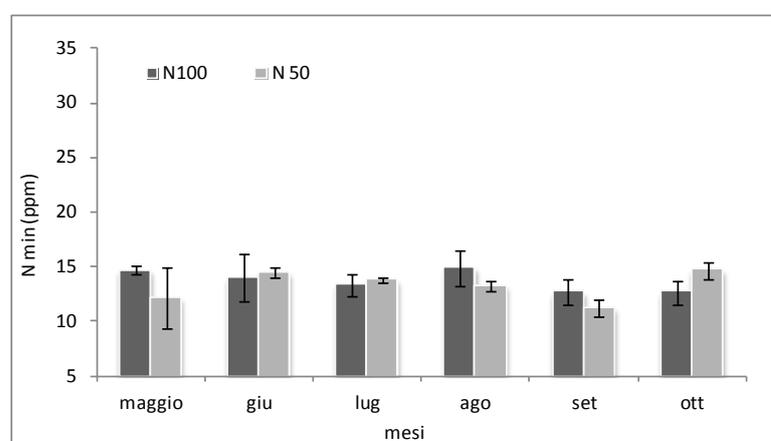


Figura 3.34 - Sant'Angelo dei Lombardi: Contenuto di Azoto minerale nel suolo (strato 0-60 cm) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2012. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

3.3.4.2 Analisi di crescita 2013

Il monitoraggio dello sviluppo culturale è stato effettuato dopo la ripresa vegetativa a cadenza mensile dal mese di maggio a quello novembre dell'anno 2013 per entrambe le tesi (N100 ed N50) per un totale di sei rilievi. Lo sviluppo della biomassa aerea è risultato graduale in entrambe le tesi (fig. 3.35.a), con il raggiungimento del picco massimo di produzione nel mese di novembre con valori di 2065 g m² s.s. e 1741 g m² s.s. rispettivamente per N100 ed N50. Sembra che la fertilizzazione azotata effettuata alla ripresa vegetativa abbia avuto il suo effetto già a partire dalla metà di giugno in cui le produzioni si sono differenziate del 24%, a luglio del 43%, differenza che si è ridotta nei mesi successivi.

L'indice di area fogliare (*LAI*) (fig. 3.35.b) si è subito differenziato in termini quantitativi tra le tesi, con un andamento molto simile, con una differenziazione nel momento del

raggiungimento del picco massimo che è risultato di $4.2 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ per la tesi N100 nel mese di luglio e di $3.7 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ per la tesi N50 nel mese di settembre.

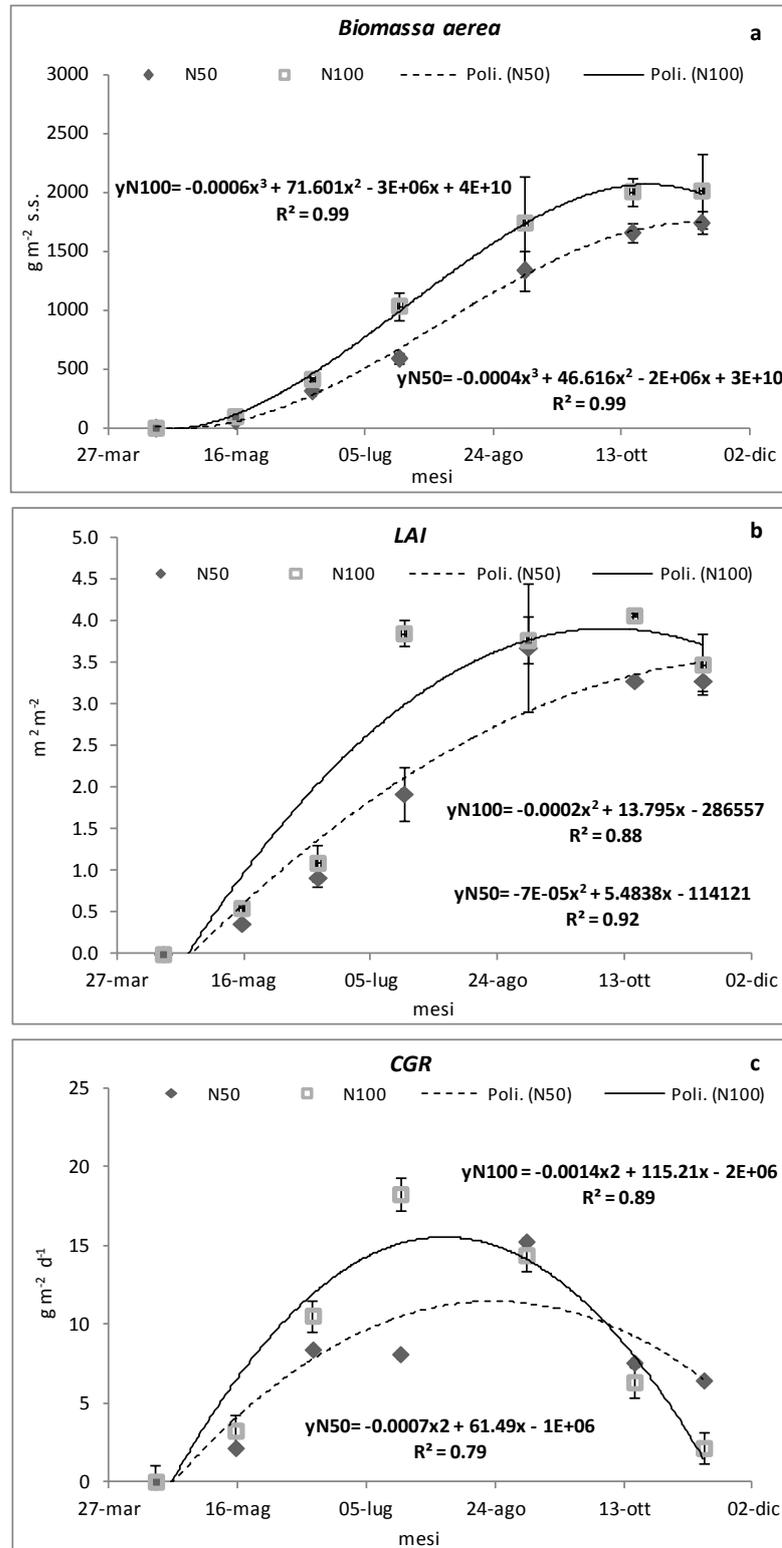


Figura 3.35 - Sant'Angelo dei Lombardi, 2013: a) Biomassa aerea (culmi e foglie - $\text{g m}^{-2} \text{ s.s.}$), b) Indice di area fogliare (LAI - m^2m^{-2}), c) Incremento di peso secco per unità di tempo e superficie (CGR - $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

L'incremento di peso secco per unità di tempo (*CGR*) (fig. 3.35.c), ha mostrato una fase crescente simile tra le tesi fino al raggiungimento del picco massimo per la tesi N100 nel mese di luglio ($18 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) con una successiva riduzione nel tempo per la stessa. Mentre la tesi N50 ha raggiunto il picco massimo ($15 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) nel mese di settembre per poi decrescere anch'essa verso fine ciclo.

Nell'annata 2013 l'indice *LAD* ha mostrato una durata della superficie fogliare più elevata del 24 % per la tesi N 100 rispetto a N50 ($800 \text{ vs } 611 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \times \text{giorni}$).

Durante il ciclo di crescita 2013, gli andamenti degli indici *LAR*, *NAR*, *LWR* ed infine la percentuale di sostanza secca, sono stati simili tra le tesi a confronto. Il *LAR* (fig. 3.36.a) è stato decrescente da maggio a novembre, descritto da una cinetica del secondo ordine, in cui il picco massimo si è verificato ad inizio ciclo colturale nel mese di maggio senza differenziazione tra le due tesi (circa $566 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$), fino ad arrivare a novembre con valori pari a $144 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$. L'andamento dell'indice *LWR* (fig. 3.36.b) è risultato anch'esso decrescente durante il ciclo con una lieve differenziazione tra le tesi ad inizio ciclo per la tesi N50 (53%) ed N100 (48%) e valore minimo di circa il 19% nella fase finale.

L'andamento della percentuale di sostanza secca (fig. 3.36.c), è stato praticamente identico tra le due tesi con un graduale aumento, dal mese di maggio a novembre, dovuto alla progressiva perdita di umidità da parte della biomassa aerea e in particolar modo dalle foglie (dal 17% al 49% s.s.).

Il tasso di assimilazione netta (*NAR*) ha mostrato un andamento decrescente dalla realizzazione del picco massimo nel mese di giugno ($13 \text{ gm}^2 \text{ d}^{-1}$) per entrambe le tesi e valori prossimi allo zero alla raccolta. (fig. 3.36.d)

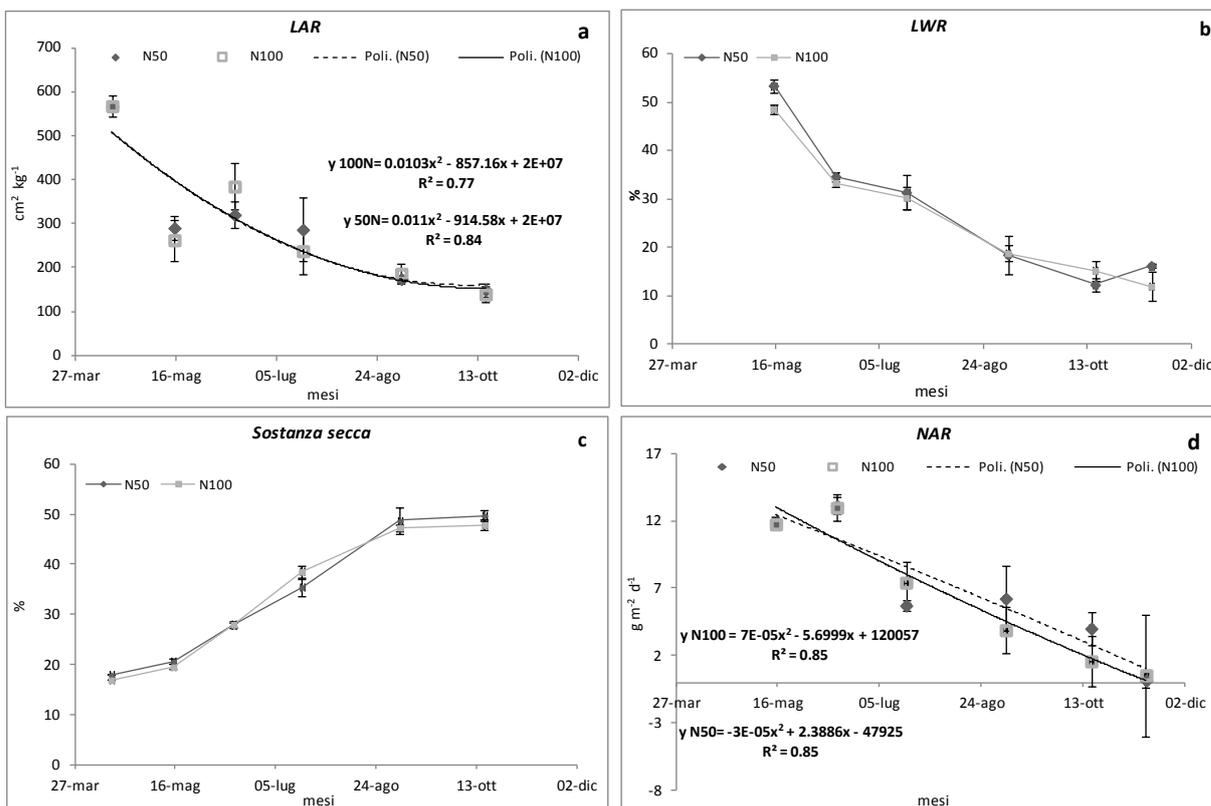


Figura 3.36 - Sant'Angelo dei Lombardi, 2013: a) Area fogliare per unità di sostanza secca (LAR - $\text{cm}^2 \text{kg}^{-1}$), b) Percentuale di foglie verdi sul peso secco totale (LWR - %), c) Percentuale di sostanza secca (S.S - %), d) Indice di assimilazione netta (NAR - $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Rispetto alla precedente annata si è verificata ad inizio ciclo vegetativo una maggiore presenza di foglie verdi sul totale (+ 64%) per la tesi N50 e (+51%) per la tesi N100, dal mese di luglio fino a inizio settembre si è verificata una forte riduzione della percentuale di foglie sul totale. A partire dal mese di settembre inizia ad esserci la presenza di foglie secche sulla pianta con una percentuale inizialmente bassa (2%) per entrambe le tesi, questa percentuale nel periodo autunnale è cresciuta notevolmente con un valore medio tra ottobre e novembre pari al 26% per la tesi N50 e 23% per la tesi N100.

Durante la stagione di crescita sono stati valutati due parametri produttivi (diametro basale dei culmi e altezza della pianta): i valori dell'altezza sono riportati in figura 3.37 in cui la crescita è stata graduale durante tutto il monitoraggio per entrambe le tesi, con un incremento iniziale più elevato, ed una differenziazione tra le tesi durante la stagione di circa 1 cm al giorno tra la tesi N100 ed N50. L'altezza massima è stata raggiunta nel periodo autunnale pari a 300 e 282 cm rispettivamente per la tesi N100 e N50. Il diametro basale non ha mostrato nessuna differenza di rilievo tra le tesi durante la stagione di crescita con un valore medio di 2 cm (dati non riportati).

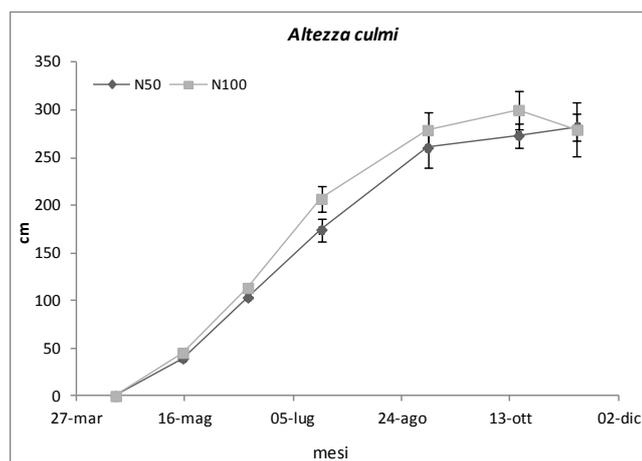


Figura 3.37 - Sant'Angelo dei Lombardi - Andamento dell'altezza dei culmi (cm) durante il ciclo di crescita 2013. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Asportazione (kg N ha^{-1}) e contenuto di N (%) durante il ciclo di crescita 2013

Come si evince dalla figura 3.38, nell'anno 2013 le asportazioni hanno avuto per entrambe le tesi un andamento diverso rispetto al 2012, poiché non si è verificata una vera e propria fase decrescente durante il ciclo colturale. Infatti, la tesi N100 ha mostrato un andamento degli asporti sempre crescente fino al raggiungimento del picco massimo nel mese di giugno ($120.5 \text{ kg N ha}^{-1}$) mentre il raggiungimento del picco massimo per la tesi N50 è avvenuto nel mese di novembre con valori di $85.3 \text{ kg N ha}^{-1}$. Nel caso della tesi N100 dopo il picco massimo a giugno si raggiunge un a fase stazionaria ($107.3 \text{ kg N ha}^{-1}$), che non si verifica nella tesi N50 dove si riscontra un incremento continuo fino al mese di mese di novembre.

A differenza dell'annata precedente le due tesi a confronto si sono differenziate già a partire dall'inizio della stagione di crescita, a causa di una produzione di sostanza secca superiore per la tesi N100 rispetto alla N50 accompagnata da un maggior contenuto (%) di N nelle foglie verdi, in particolare nel mese di luglio (fig. 3.39) pari a 2.2 vs 1.8 %.

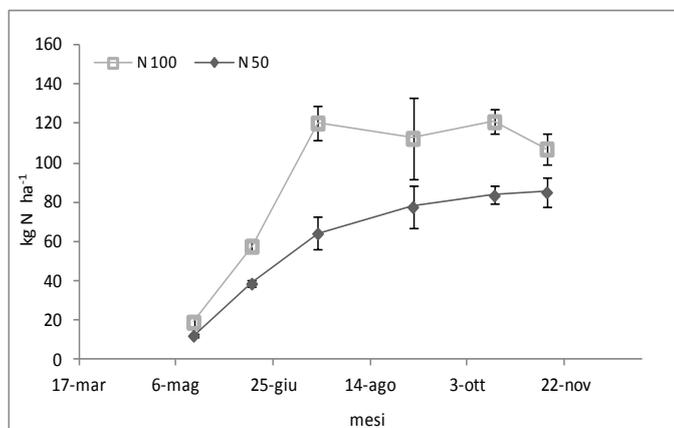


Figura 3.38 - Sant'Angelo dei Lombardi: Asportazione d azoto (kg N ha^{-1}) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2013. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Il contenuto di azoto nei tessuti vegetali (fig. 3.39), a differenza dell'annata precedente e delle tesi analizzate negli altri siti, ha mostrato una differenziazione significativa nelle foglie verdi per le tesi a confronto. L'andamento della concentrazione di azoto nelle foglie verdi è stato decrescente durante il ciclo colturale per entrambe le tesi con un lieve incremento durante il periodo giugno-luglio. La differenza media tra gli andamenti delle due tesi su tutto il ciclo colturale è stata del 17%.

Nessuna differenziazione significativa si è riscontrata negli andamenti delle concentrazioni di azoto nei culmi e delle foglie secche nelle due tesi a confronto. La concentrazioni di azoto nei culmi è passata da un valore massimo di maggio di 1.5% ad un valore dello 0.5% del mese di novembre.

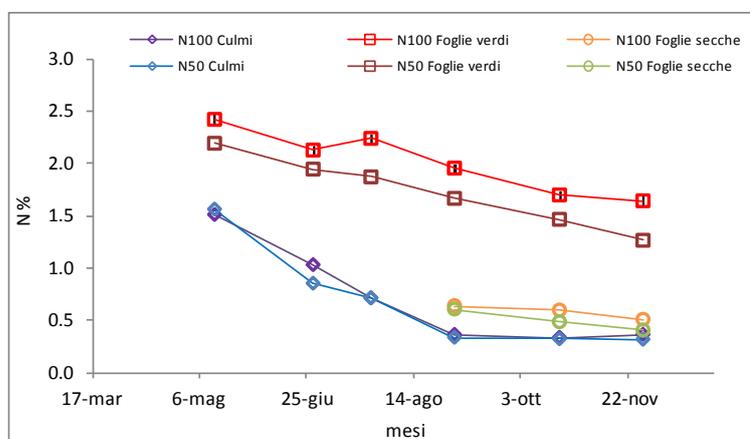


Figura 3.39 - Sant'Angelo dei Lombardi: Concentrazione (%) di N nei tessuti vegetali (Culmi, Foglie verdi, Foglie secche) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2013. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Le differenti asportazioni azotate delle tesi sono supportate dagli andamenti della concentrazione di azoto nei primi 60 cm di suolo (fig. 3.40) che risultano più bassi nella tesi N100 durante la fase di maggior sviluppo vegetativo (dal mese di luglio ad ottobre) rispetto alla tesi N50, sintomo di un maggiore assorbimento di azoto da parte della coltura anche se la concimazione di partenza era più elevata.

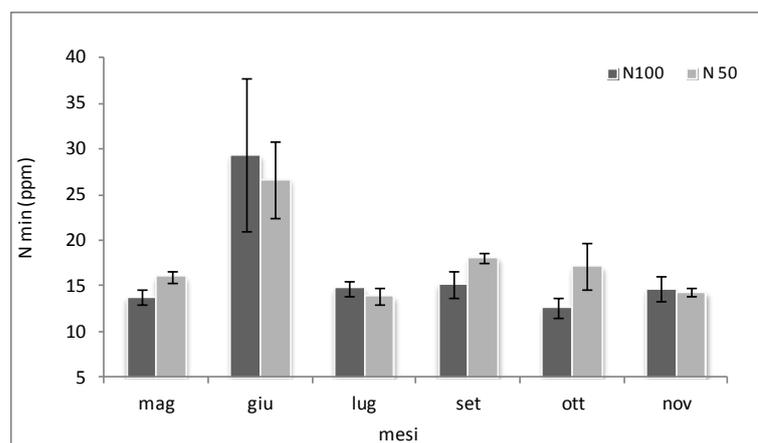


Figura 3.40 - Sant'Angelo dei Lombardi: Contenuto di azoto minerale (ppm) nel suolo (strato 0-60 cm) in *A. donax* durante il ciclo di crescita 2013. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

3.3.4.3 Sintesi delle differenze comportamentali nei due anni

Nella tabella 3.24 sono riportati i confronti di sintesi tra i parametri di sviluppo analizzati nei due anni di prova sperimentale. Tali valori ci indicano che le produzioni di biomassa aerea sono state sempre più alte per la tesi N100 di circa il 14%, allo stesso modo i valori di *LAI* e *CGR* sono stati superiori mediamente del 11% e del 19%, con differenze più alte nell'annata 2012. La durata totale dell'apparato fotosintetico (*LAD*) è stata per tutti gli anni più alta per la tesi con la dose di concime maggiore, proprio a sottolineare che con l'aumento della disponibilità di azoto aumenta la dimensione della foglia e la sua longevità, con effetti sulle produzioni e le asportazioni di azoto, con un valore del 14% superiore per la tesi N100 in entrambe le annate.

Tabella 3.24 – Sant'Angelo dei Lombardi: Valori massimi di Biomassa aerea (g m^{-2} s.s.), *LAI* (m^2m^{-2}), *CGR* ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e *LAD tot* ($\text{m}^2\text{m}^{-2} \text{d}$), registrati nel periodo 2011-2012

| Anno | Biomassa aerea | | <i>LAI</i> | | <i>CGR</i> | | <i>LAD TOTALE</i> | |
|------|------------------------|--------|---------------------------|------|---------------------------------|------|-------------------------------------------|-------|
| | g m^{-2} s.s. | | m^2m^{-2} | | $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | | $\text{m}^2\text{m}^{-2} \times \text{d}$ | |
| | N50 | N100 | N50 | N100 | N50 | N100 | N50 | N100 |
| 2012 | 1490.5 | 1744.6 | 3.3 | 3.8 | 12.8 | 16.4 | 624.6 | 824.1 |
| 2013 | 1741.5 | 2013.5 | 3.7 | 4.1 | 15.3 | 18.3 | 611.1 | 800.3 |

Per quel che riguarda il confronto tra gli indici utilizzati nell'analisi di crescita (tab. 3.25), i valori medi a confronto hanno mostrato che: (i) l'indice *LWR* (la percentuale di foglie sul peso totale) è risultato più elevato per la tesi N50 in entrambi gli anni con un valore superiore mediamente del 5%; (ii) Il *NAR* è maggiore per la tesi N100 nel 2012 e minore della tesi N50 nel 2013 con differenze del 10% e del 6%.

Tabella 3.25 – Valori medi (\pm dev.st) degli indici (*LAR*, *LWR*, *NAR*) registrati nel periodo 2011-2012

| Anno | <i>LAR</i> | | <i>LWR</i> | | <i>NAR</i> | |
|------|------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|------------------|
| | $\text{cm}^2 \text{kg}^{-1}$ | | % | | $\text{g m}^2 \text{d}^{-1}$ | |
| | N50 | N100 | N50 | N100 | N50 | N100 |
| 2012 | 262.8(\pm 71.0) | 272.8(\pm 75.8) | 30.0(\pm 8.7) | 28.5(\pm 7.5) | 8.7(\pm 9.5) | 9.7(\pm 10.5) |
| 2013 | 297.6(\pm 148.4) | 296.1(\pm 156.7) | 27.7(\pm 15.3) | 26.3(\pm 13.8) | 6.8(\pm 4.8) | 6.4(\pm 5.2) |

3.4. Sintesi del confronto delle risposte produttive dei tre siti.

Nella figura 3.26, sono riportati gli andamenti nel tempo delle produzioni alla raccolta nei tre siti a confronto e le rispettive tesi. Dai grafici è evidente il comportamento comune per la produzione di biomassa aerea (fig 3.26) in cui la biomassa è stata più bassa nel primo anno di crescita per poi aumentare rapidamente fino ad arrivare ad una fase stazionaria a partire dal 3° - 4° anno. I risultati raggiunti sono in linea con quelli ottenuti da Angelini et al. (2009) che ha individuato tre fasi in *Arundo donax* coltivata in Italia: una fase crescente fino al 3° anno, una fase stazionaria dal 4° al 8° anno ed una fase decrescente dal 9° al 12° anno di crescita.

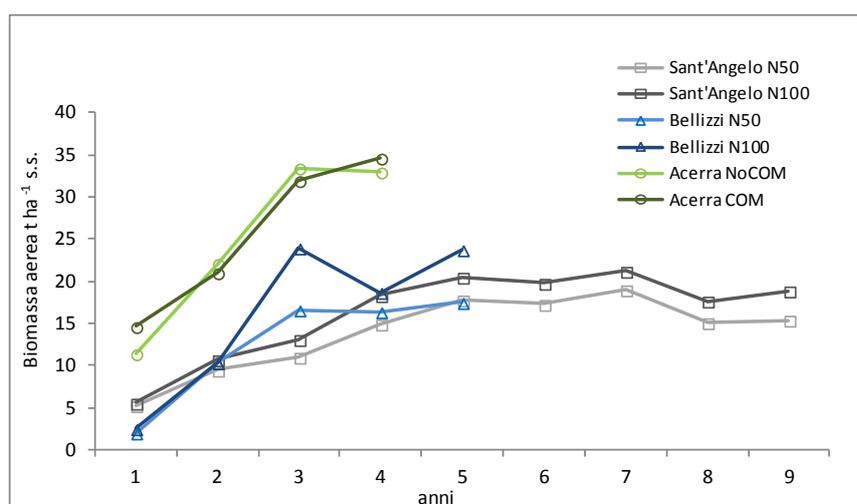


Figura 3.26 - Andamento nel tempo della produzione di sostanza secca (alla raccolta) nei siti di Sant'Angelo dei Lombardi (tesi N50-N100), Bellizzi (tesi N50 - N100), Acerra (NoCOM, COM).

Il grafico (fig 3.26) evidenzia che le produzioni maggiori si sono ottenute nel sito di Acerra, già a partire dal primo anno di crescita in cui le produzioni si sono attestate su valori medi di $13 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$ pari a circa il 50% e doppie rispetto agli altri due siti (Sant'Angelo e Bellizzi). Successivamente tale sito ha sempre mostrato valori superiori agli altri due, con un incremento di produzione tra il primo e il secondo anno del 65% (circa $22 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$) fino ad arrivare a valori di $33 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$ nel 3° e 4° ciclo di crescita.

I risultati ottenuti sono in linea con quelli registrati da Cosentino et al. (2006) che hanno effettuato uno studio su 39 cloni di canna comune coltivati nel sud Italia le cui produzioni medie sono state rispettivamente nel primo e secondo anno di crescita pari a 11 e 22 t ha⁻¹ s.s.

Per il sito di Bellizzi, le produzioni al primo anno sono state basse (2.2 t ha⁻¹ s.s.) per entrambe le tesi a confronto (N100 - N50) probabilmente per una bassa % di attecchimento dei rizomi.

Le produzioni al secondo ciclo di crescita sono più che raddoppiate e sono state uguali per entrambe le tesi, dal terzo anno di crescita in poi si verifica la differenziazione tra le tesi, in particolare la tesi N100 ha mostrato un incremento del 70% nei due anni (secondo e terzo ciclo di crescita). In generale la tesi N50 mostra un andamento nel tempo più costante rispetto alla N100 con un raggiungimento del plateau di crescita già al terzo anno.

Per quanto riguarda l'impianto realizzato a Sant'Angelo dei Lombardi, i livelli di produzione nei primi tre anni sono stati bassi, ma superiori e costanti dal 4° al 9° anno di crescita. La tesi con la dose di concime maggiore ha mostrato di produrre di più nel corso del tempo (+16%).

I livelli di produzione di biomassa ottenuti in queste condizioni erano simili a quelli ottenuti in Italia in terreni marginali (Nassi o di Nasso et al., 2010; 2013), ma inferiori a quelli riportati in ambienti più fertili (Angelini et al, 2005a , Cosentino et al., 2006).

Le differenze delle performance produttive sono collegabili alla diverse caratteristiche del suolo (fertilità, ecc) alla diversa gestione colturale (fertilizzazione, densità di impianto) ma anche le caratteristiche genetiche del clone utilizzato possono giocare un ruolo cruciale soprattutto nella fase iniziale di attecchimento. I risultati positivi del sito di Acerra e la bassa differenziazione tra le tesi sono riconducibili ad una densità di impianto più che doppia rispetto a quelle normalmente indicate in letteratura e soprattutto ad una fertilità intrinseca del suolo (suoli vulcanici) che hanno supportato ed annullato le differenze di trattamento tra le tesi.

3.5. Bilancio parziale del carbonio organico e azoto organico nel suolo

Di seguito sono riportati i risultati relativi al bilancio del carbonio e dell'azoto organico nel suolo per la valutazione dell'impatto ambientale della coltura di *Arundo donax* nei tre siti studiati.

Sito di Acerra (NA)

Come atteso, l'effetto dell'ammendamento con compost si è espresso soprattutto nello strato superficiale di suolo 0-20 cm. Gli input di sostanza organica stabilizzata (3.5 t C ha^{-1}) hanno significativamente contribuito all'incremento del pool di carbonio organico nel suolo incrementandone i valori in modo stabile anche dopo 4 anni (fig. 3.26).

Al termine del secondo ciclo di crescita (2011) il valore per le parcelle fertilizzate è risultato significativamente più elevato rispetto al controllo (1.93 vs 1.76 g C/100 g rispettivamente per COM ed NoCOM), mentre nel terzo ciclo di crescita (2012) i trattamenti non sono risultati differenti sebbene i valori per COM restino più elevati (1.87 vs 1.74 g C/100 g), analogo discorso anche per l'ultimo ciclo analizzato (2013) i cui valori sono stati rispettivamente di (1.95 vs 1.82 g C/100 g).

Le variazioni assolute del pool di carbonio nello strato 0-20 cm riferite al periodo 2009-2013 sono mostrate in figura 3.26.b. Dall'andamento dei valori è possibile notare come entrambi i trattamenti abbiano favorito un incremento delle riserve di carbonio, sebbene le parcelle non fertilizzate facciano rilevare variazioni non subito positive e comunque se riferite al momento zero molto basse (nell'ordine di 0.08 g C/100g). In ogni caso osservando la tesi non trattata con compost è interessante notare come la coltura durante il primo anno utilizzi parte del carbonio del suolo per poi restituirlo l'anno successivo sotto forma di residui colturali. Questo comportamento è particolarmente interessante perché, come verificato dalle misure, non ci sono state differenze significative in termini di produzione tra le tesi e quindi spiega come in questo sistema l'*Arundo donax* anche senza la presenza di compost, da origine a rese elevate e consente la segregazione del carbonio nel suolo.

D'altra parte l'ammendamento con compost prima del trapianto ha determinato un incremento significativamente superiore alla tesi non trattata dopo la prima annata, incremento che si è mantenuto relativamente stabile fino al 2013 con variazioni assolute pari a 0.22 g C/100 g (circa tre volte superiori alla tesi non trattata). Tale incremento corrisponde a 5.7 t C ha^{-1} ($18.7 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$) e, considerando che il compost ha fornito un input iniziale di 3.5 t C ha^{-1} , tali risultati indicano che oltre all'apporto di sostanza organica

stabilizzata, la pianta con i suoi residui colturali e la tecnica agronomica che non prevede lavorazioni durante il ciclo colturale, hanno svolto un ruolo chiave nell'incremento di C nello strato superficiale di suolo.

In conclusione, da questi dati emerge chiaramente che l'interramento di compost consente di sottrarre in maniera stabile CO₂ dall'atmosfera e quindi di mitigare l'effetto serra.

Inoltre tale efficienza nella segregazione del carbonio, non è da riferire unicamente al carbonio fornito al sistema attraverso il trattamento con il compost ma anche dagli input endogeni (foglie, turnover radicale) come evidenziato dalla tesi non trattata, la cui permanenza viene favorita dalla gestione agronomica basata.

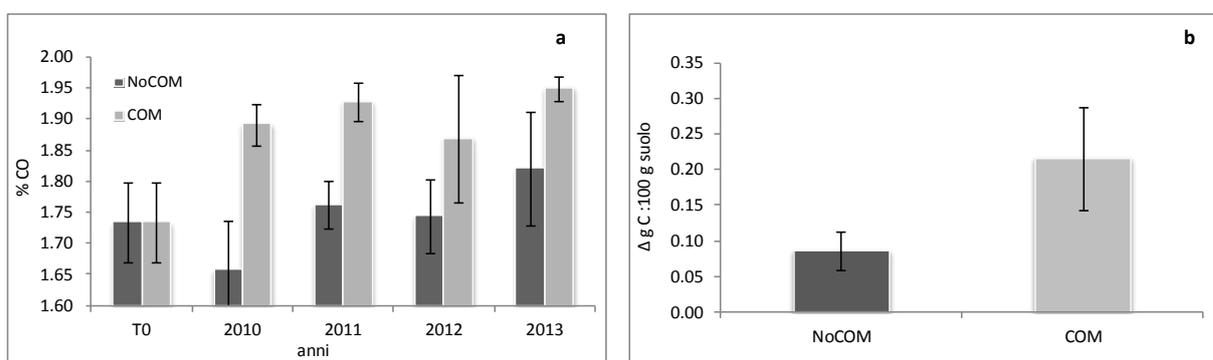


Figura 3.26 - Acerra: a) Andamento del contenuto di carbonio organico (CO); b) variazioni assolute (2009 - 2013) rispetto all'anno di impianto dell'*Arundo donax* nello strato 0-20 cm. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

L'andamento del contenuto di N organico mostra alcune differenze rispetto al C, dovute alla maggiore dinamicità di questo elemento ed ai contenuti medi presenti nel suolo che sono di un ordine di grandezza più bassi. La fertilizzazione con compost ha fatto registrare un picco nell'annata in cui è stata effettuata, con valori di circa 2.6 % N contro gli 1.8 % N del suolo non fertilizzato (fig. 3.27.a). Successivamente tale incremento si è ridotto facendo risultare i due trattamenti non differenti tra loro con una variazione assoluta mediamente pari a 0.15 % N al termine del 4 ciclo di crescita (fig. 3.27.b). I dati registrati nel 2010 per la tesi COM sono probabilmente dovuti all'effetto della lavorazione per l'interramento del compost che ha favorito nel primo anno il processo di mineralizzazione a causa della maggiore ossigenazione del suolo e dell'aumento della superficie a disposizione dei microrganismi. Successivamente con l'effetto delle piogge e dell'accrescimento radicale le caratteristiche fisiche del suolo si sono modificate avvicinandosi a quelle dal suolo di partenza.

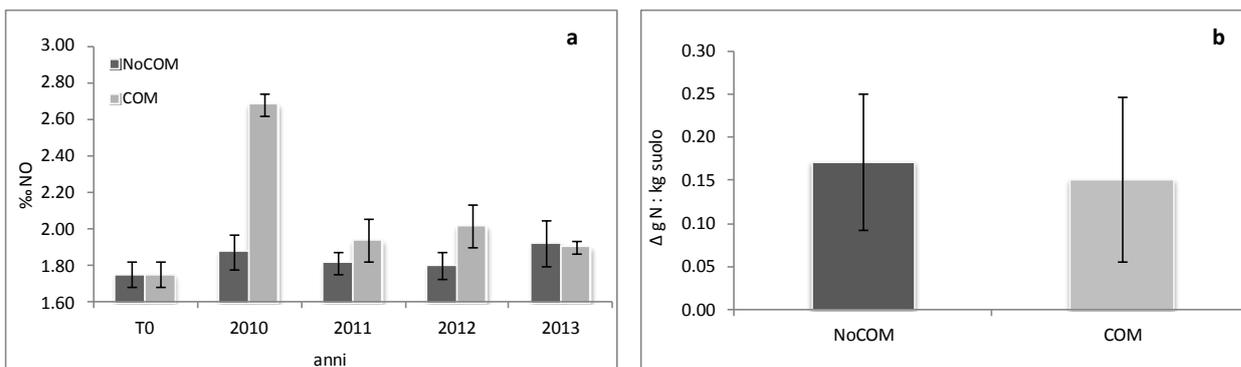


Figura 3.27 - Acerra: a) Andamento del contenuto di azoto organico (NO); b) variazioni assolute del contenuto di N rispetto all'anno di impianto dell'*Arundo donax* nello strato 0-20 cm. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Sito di Bellizzi (SA)

In figura 3.28 a sono riportati gli andamenti del contenuto di Carbonio Organico (CO) nello strato 0-20 cm. Come fatto notare per il sito di Acerra, anche in questo caso è evidente come il sistema colturale studiato (coltura poliennale con abbondanza di residui colturali a vario livello di decomposizione che annualmente sono restituiti al suolo) producono un andamento fluttuante di tali misure nei primi cm di suolo. Tuttavia è possibile notare che, dopo un primo anno di assestamento, i trattamenti N50 ed N100 cominciano a separarsi con valori più elevati espressi dalla tesi ad elevato input energetico.

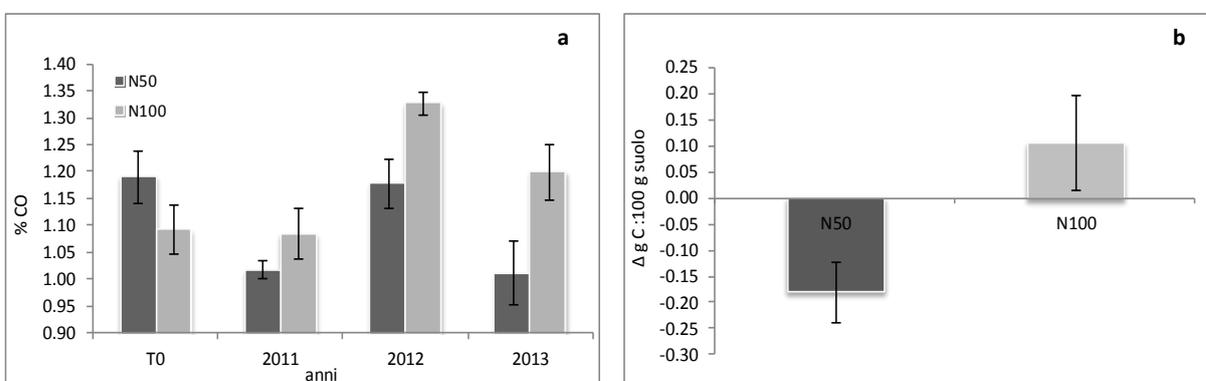


Figura 3.28 - Bellizzi: a) Andamento del contenuto di carbonio organico (CO); b) variazioni assolute (2008-2013) rispetto all'anno di impianto dell'*Arundo donax* nello strato 0-20 cm. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

I valori di carbonio stoccati nel suolo (figura 3.28.a) mostrano chiaramente una tendenza all'accumulo di carbonio nella tesi N100 che risulta significativa sull'arco temporale 2008-2013. La tesi N50 sembra depauperare le riserve di sostanza organica nel suolo, come si evince dal grafico 3.28.b, probabilmente perché a basse dosi di N le produzioni della pianta si riducono e con esse la produzione di residui colturali (es. foglie) così da non compensare le perdite di carbonio che si verificano al suolo per la mineralizzazione.

Contrariamente nella tesi N100, l'assenza di lavorazioni (per il minore stimolo alla degradazione della sostanza organica) accoppiata alla produzione di una quantità maggiore di residui colturali legata alla dose più elevata di concime, si conferma uno strumento efficace per la mitigazione dei cambiamenti climatici, contribuendo a sequestrare una quantità di C compresa tra 0.8 ed i 0.4 Mg CO₂ ha⁻¹ in 5 anni.

Per quanto riguarda l'N organico, sebbene non sia mai stata raggiunta la significatività statistica (fig. 3.29), è possibile notare valori tendenzialmente più bassi per N50, imputabili alle maggiori asportazioni non compensate dalle concimazioni che quindi in un tempo superiore a quello della nostra indagine potrebbero rivelarsi non sostenibili depauperando le riserve di N nel suolo.

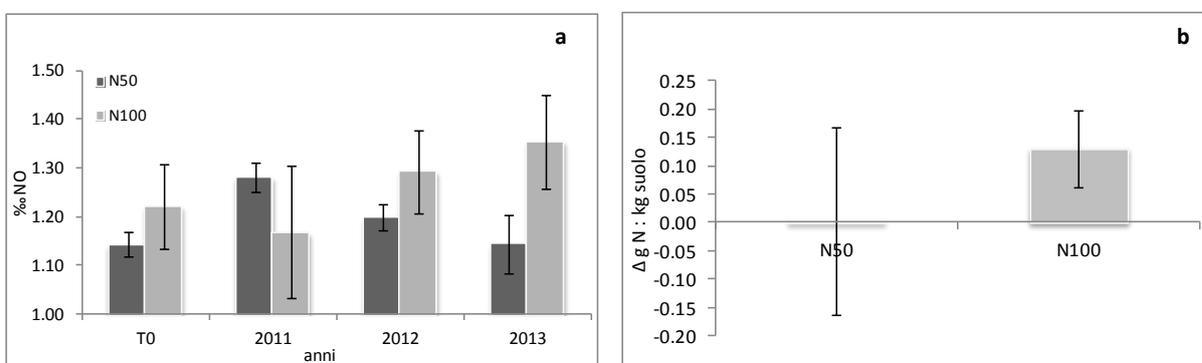


Figura 3.29 - Bellizzi: a) Andamento del contenuto di azoto organico (NO); b) variazioni assolute rispetto all'anno di impianto dell'*Arundo donax* nello strato 0-20 cm. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

Sito di Sant'Angelo dei Lombardi (AV)

Sebbene il disegno sperimentale in questo sito sia lo stesso di quello del sito di Bellizzi, i risultati mostrano un comportamento in generale e tra le tesi differente, a dimostrazione che l'effetto del pedoclima può essere determinante a parità di trattamento agronomico del suolo.

Salvo alcune eccezioni rappresentate dagli anni 2007 e 2009, i trattamenti N50 ed N100 hanno fatto registrare gli stessi livelli di carbonio organico nei primi 20 cm di suolo con un incremento assoluto di 0.11 g C/100g al termine del nono ciclo culturale (fig. 3.30). Un trend simile, anche se meno marcato è stato riscontrato per l'N organico, che a febbraio 2013 ha fatto registrare un incremento pari a circa 0.30 g N/1000 g suolo (fig. 3.31).

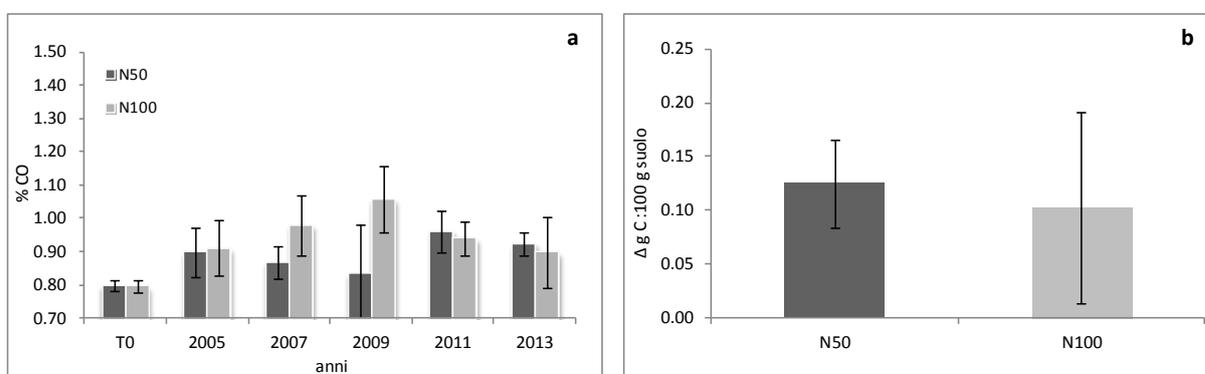


Figura 3.30 - Sant'Angelo dei Lombardi: a) Andamento del contenuto di carbonio organico (CO); b) variazioni assolute rispetto all'anno di impianto dell'*Arundo donax* nello strato 0-20 cm. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

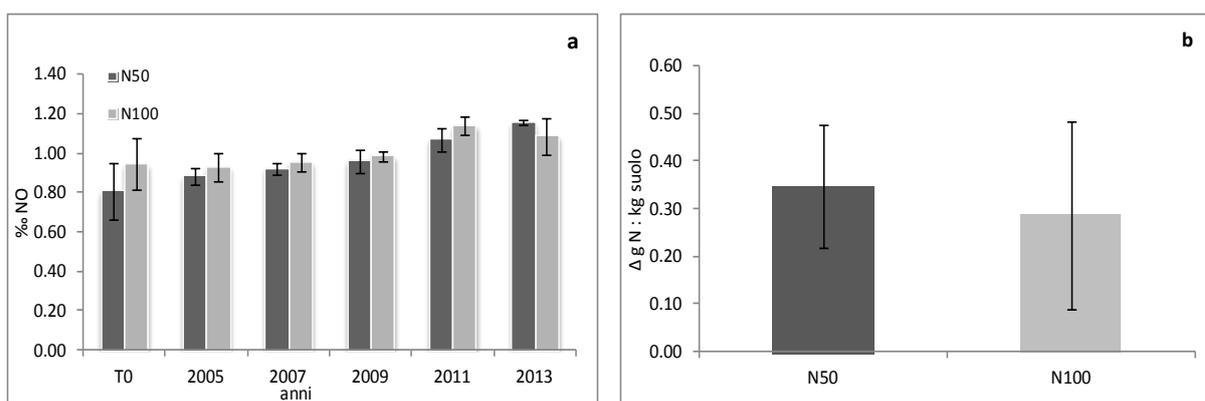


Figura 3.31 - Sant'Angelo dei Lombardi: a) Andamento del contenuto di azoto organico (NO); b) variazioni assolute rispetto all'anno di impianto dell'*Arundo donax* nello strato 0-20 cm. Le barre indicano l'errore standard delle medie (n=3).

A differenza dei risultati ottenuti nel sito di Bellizzi, la tesi con maggiore apporto di azoto è capace soltanto di compensare la riduzione del C, che nel suolo procede naturalmente, mantenendo la dotazione iniziale inalterata.

Infine nel caso studio di S. Angelo dei Lombardi il clima più freddo ed il ridotto deficit idrico dovuto ai maggiori apporti pluviometrici e ad una minore richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera, fanno sì che i processi di mineralizzazione siano rallentati durante l'anno rispetto al sito di Bellizzi, come dimostrato dai valori di azoto che non si differenziano significativamente tra i due trattamenti a confronto.

4. Approfondimento: DETERMINAZIONE DEL WP PER IL SITO DI BELLIZZI (SA)

L'adattamento colturale viene attualmente valutato attraverso prove sperimentali di campo come nel caso del lavoro di tesi proposto od attraverso modelli matematici che simulano l'accrescimento della coltura come nel caso di previsioni di adattamento colturale ai cambiamenti climatici o più semplicemente al cambio di gestione agronomica (es. strategie irrigue differenti). La grossa differenza tra i due approcci è in termini di costi, tempo e possibilità di effettuare o meno prove sperimentali (es. cambiamenti climatici), nell'approccio di tipo modellistico è infatti possibile fare previsioni definendo le condizioni al contorno (es. clima) senza dover sperare nell'annata climatica giusta per i test che si vogliono realizzare. D'altro canto però, va detto che i due approcci sono complementari o meglio sequenziali poiché dalle sperimentazioni di campo è possibile calibrare i modelli sulle risposte colturali in specifiche condizioni climatiche e di gestione e validare gli stessi in annate differenti per poi procedere con una maggiore robustezza all'analisi previsionale di risposta produttiva al variare delle condizioni del campo di moto del modello stesso (es. clima, presenza di falda, strategia irrigua, ecc).

Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi modelli di crescita colturale dedicati alla predizione della produzione al variare delle condizioni climatiche, dei nutrienti, dell'acqua e della luce.

I nuovi approcci di modellizzazione hanno cercato di migliorare i modelli classici, sostituendo le descrizioni dei singoli processi e le loro interazioni, integrandoli con meccanismi fisiologici di recente comprensione (Gayler e Priesack, 2005; Yin e van Laar, 2005). Attualmente la modellazione della crescita delle colture per la determinazione dell'accumulo di sostanza secca (o produzione potenziale) viene realizzato con tre approcci principali:

1. **Modello di crescita basato sul carbonio** (*carbon-driven growth-engine*): approccio basato sul processo della fotosintesi (modelli *processes oriented*) e quindi sull'assimilazione della CO₂ in base all'intercettazione della radiazione solare e sulla traslocazione e ripartizione dei fotoassimilati nei diversi organi. Questo concetto viene utilizzato nella famiglia dei modelli SUCROS (Simple and Universal CROp growth Simulator) (Goudriaan and Van Laar, 1994; Van Laar et al., 1997), WOFOST (Boogaard et al. 1998) ed INTERCOM (Kropff and van Laar 1993).
2. **Modello di crescita basato sulla radiazione solare** (*solar-driven growth-engine*): distinguiamo due approcci semplificati: (i) il primo basato sulla *Light use efficiency*

(*LUE*), ovvero sulla radiazione solare intercettata, applicato nella famiglia dei modelli LINTUL (Light INTERception and Utilisation) (Spitters and Schapendonk, 1990).

Il secondo basato sulla *Radiation use efficiency (RUE)*, ovvero sulla radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) intercettata, applicata nella famiglia dei modelli CERES (Jones and Kiniry 1986; Ritchie et al. 1987) ed in CropSyst (Cropping System simulation model; Stöckle et al., 2003), sebbene CropSyst presenta anche un secondo modello di crescita colturale.

Tali modelli usano la relazione tra la produzione di biomassa e la quantità di radiazione intercettata dalla copertura della coltura (*canopy cover*) (Monteith, 1977); tale relazione è stata trovata per molte specie colturali lineare in condizioni ottimali (assenza di stress idrici, nutritivi e biotici), ciò significa che tale parametro rimane conservativo (ovvero con pendenza costante).

3. **Modello di crescita basato sull'acqua** (*water-driven growth-engine*): questo approccio si basa sulla relazione tra l'accumulo di biomassa e la quantità di acqua consumata dalla coltura attraverso la traspirazione. Questa relazione è definita come *Biomass water-productivity (WP)* ed è applicata nel modello in uso alla FAO AquaCrop (Raes et al., 2009) e nel modello CropSyst come uno dei due motori di crescita colturale.

Nell'ambito della seguente tesi di dottorato, i dati rilevati nel sito di Bellizzi (SA) negli anni 2012-2013, sono stati utilizzati per determinare il valore dell'indice *Water Productivity (WP)* applicato nel modello di crescita AquaCrop, nel quale la produzione potenziale di biomassa (*B*) è data dal prodotto dell'indice WP per la traspirazione attuale (T_a) realizzata in un determinato intervallo (Steduto et al., 2009) :

$$B = WP \cdot \sum T_a$$

Il *water productivity* è espressa in kg di biomassa per m². WP tende ad essere costante (de Wit, 1968; Tanner e Sinclair 1983), quando è normalizzato per la richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera, diventando così un parametro conservativo (Steduto et al., 2007), ovvero con pendenza costante.

Inoltre, WP è risultato mantenersi conservativo anche in condizioni di moderato stress idrico mentre ha dimostrato una sensibilità al deficit di nutrienti (vedi Steduto et al., 2000; Steduto ed Albrizio, 2005).

La normalizzazione del WP attraverso il clima è basata sulla richiesta evapotraspirativa potenziale (ET_0)

$$WP = \left[\frac{B}{\sum \left(\frac{T_a}{ET_0} \right)} \right]_{[CO_2]}$$

Questa normalizzazione consente di produrre valori di WP specifici per ogni coltura applicabili in diversi siti e climi, compresi scenari climatici futuri (Steduto et al., 2009).

4.1. Determinazione del parametro WP per l'Arundo donax per gli anni 2012-2013

Nell'approfondimento dello studio delle risposte produttive dell'*Arundo donax*, è stato determinato il parametro WP applicato nei modelli di crescita colturali basati sull'acqua traspirata dalla coltura (*water-driven growth-engine*).

Per raggiungere tale scopo è stata determinata la traspirazione attuale della coltura nelle due stagioni di crescita per entrambi le tesi a confronto (N100 ed N50) attraverso un modello agro-idrologico fisicamente basato (SWAP) opportunamente calibrato e validato per la descrizione del bilancio idrico nel sito di Bellizzi (SA).

La procedura applicata (fig. 4.1) ha previsto le seguenti fasi:

- *Calibrazione e validazione del modello SWAP per la descrizione del bilancio idrico per entrambi le tesi:* per la realizzazione di tale fase sono stati utilizzate le seguenti informazioni: (i) dati climatici giornalieri (2012-2013); (ii) proprietà idrauliche del suolo di riferimento di Bellizzi (vedi M&M) (derivate attraverso le funzioni le di pedotrasferimento (PTF) HYPRESS (Wösten et al., 1998); (iii) andamento del LAI misurato in entrambi gli anni e le tesi; (iv) contenuto d'acqua misurato con il metodo gravimetrico a tre diverse profondità (0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm) durante i due cicli colturali. La procedura di calibrazione è stata realizzata nell'annata 2012 confrontando i contenuti idrici giornalieri misurati e quelli stimati dal modello con un approccio *trial and error*, apportando degli aggiustamenti sui parametri fisici del suolo stimati dalle pedofunzioni. La validazione del modello è stata realizzata sul dataset indipendente dell'anno 2013. Infine la bontà della stima del modello è stata valutata attraverso quattro indici statistici (RMSE, EF, CRM e r).
- *Determinazione del WP per entrambi le tesi (N100 ed N50) e anni (2012-2013):* una volta calibrato e validato il modello, la traspirazione attuale ottenuta dal bilancio

idrico realizzato è stata applicata nella formula del WP normalizzato per la richiesta evapotraspirativa di riferimento.

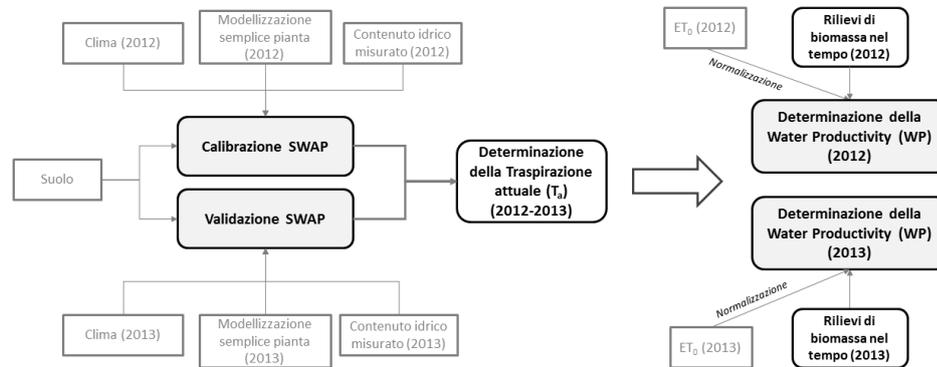


Figura 4.1 - Procedura applicata per la determinazione della water productivity (WP) in entrambi le tesi al confronto (N100 ed N50)

Il modello agro-idrologico SWAP

Il modello applicato per la simulazione del bilancio idrico nel sistema suolo-pianta-atmosfera è il modello agro-idrologico pseudo-bidimensionale SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) (Kroes et al., 2008).

Il modello SWAP è un modello matematico basato sull'originario SWATRE (Belmans et al., 1983) e descrive il moto dell'acqua nel suolo utilizzando l'equazione di Richards e risolvendola con uno schema numerico a differenze finite (van Dam et al., 1997) attraverso le funzioni idrauliche del suolo descritte dalle espressioni analitiche di van Genuchten e Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980). (fig. 4.2)

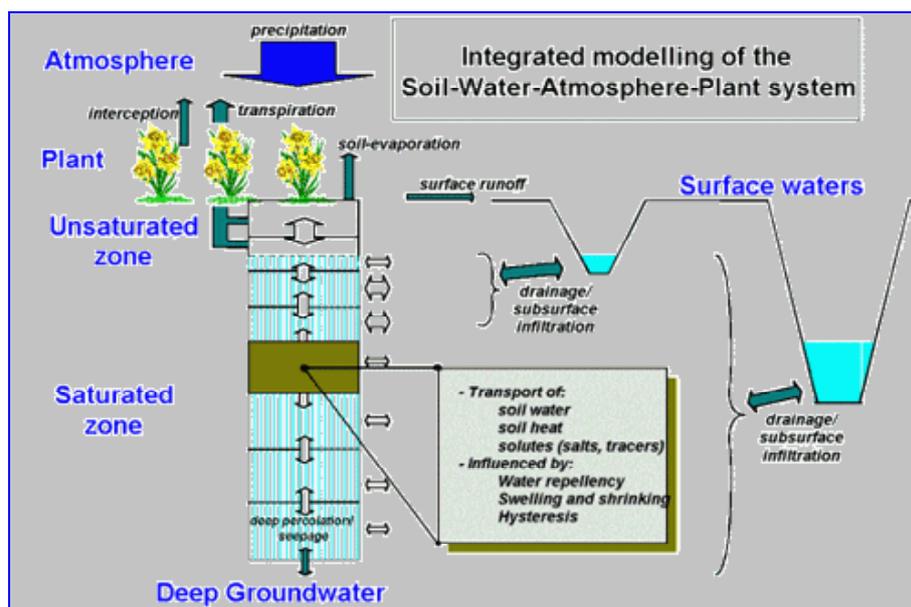


Figura 4.2 – Schema SWAP

Nell'equazione di Richards il moto dell'acqua nel suolo viene schematizzato combinando la legge di Darcy con l'equazione di continuità:

$$\frac{\partial h}{\partial t} C(h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial x_i} - 1 \right) \right] - S \quad [1]$$

in cui h è il potenziale dell'acqua nel suolo dovuto alle interazioni con la matrice, θ è il contenuto d'acqua volumetrico, x_i rappresenta le coordinate nello spazio, t è il tempo, $K(\theta)$ è la funzione di conducibilità idraulica e $C(h)=d(\theta)/d(h)$ è la capacità capillare (o idrica) del suolo; S è un termine additivo per tenere conto dell'attingimento radicale delle piante.

La funzione di ritenzione idrica $[\theta(h)]$ descritta dall'espressione analitica proposta da van Genuchten risulta:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + |\alpha h|^n \right]^{-m} \quad h < 0$$

$$\theta = \theta_s \quad h \geq 0 \quad [2]$$

dove θ_r e θ_s rappresentano rispettivamente il contenuto d'acqua volumetrico residuo ed alla saturazione, n ed m sono parametri adimensionali di pendenza della curva, relativi rispettivamente alla zona a maggiori e minori valori di potenziale; α è un parametro empirico il cui inverso è legato approssimativamente alla pressione di ingresso dell'aria.

La funzione di conducibilità idraulica $[K(S_e)]$ è descritta mediante la soluzione in forma chiusa dell'eq.[2], ponendo $m=1-1/n$ ed utilizzando il modello probabilistico di Mualem (1976) basato sulla distribuzione dei diametri equivalenti dei pori:

$$K_r(S_e) = \frac{K(S_e)}{K_0} = S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad [3]$$

dove $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ è la saturazione effettiva K_r , conducibilità idraulica relativa, è il rapporto K/K_0 , con K_0 la conducibilità idraulica alla saturazione (o in condizioni molto prossime alla saturazione) e l'esponente l è un parametro empirico legato alla tortuosità del sistema di pori.

In tale modello lo sviluppo della pianta può essere descritto attraverso un modello complesso a crescita attiva (basato sul modello WOFOST -WORld FOod STudies) oppure un modello semplificato detto anche a “pompa”, nel quale lo sviluppo della pianta viene descritto in termini di *development stages* (DVS) ai quali corrispondono le misure realizzate di sviluppo colturale quale ad esempio il *LAI*.

Nell’applicazione realizzata, la pianta è stata descritta con il modello semplificato utilizzando le misure realizzate durante i due anni di sperimentazione. Lo scopo ultimo, come riportato in precedenza, è di calibrare il modello sui contenuti idrici misurati e risolvere il bilancio idrico per determinare la variabile traspirazione attuale, la quale consentirà di determinare il WP. La traspirazione giornaliera colturale viene determinata dal modello SWAP come la somma degli assorbimenti radicali giornalieri a diversa profondità. Il suolo viene quindi suddiviso in comparti e per ognuno il modello determina l’attingimento di acqua potenziale e quello attuale. L’attingimento potenziale ad una certa profondità z viene definito dalla seguente relazione:

$$Sp(z) = Tp/Droot (z) \quad [9]$$

dove:

$Sp(z)$ = attingimento potenziale alla profondità z .

Tp = traspirazione potenziale della coltura

$Droot (z)$ = densità radicale alla profondità z

La traspirazione potenziale viene determinata in accordo con la relazione di Ritchie (1972) che, tramite il *LAI*, suddivide evapotraspirazione potenziale in evaporazione e traspirazione potenziale. La traspirazione attuale giornaliera è data dall’integrazione dell’attingimento attuale giornaliero nei diversi comparti di suolo.

Il processo di attingimento viene calcolato come quota della traspirazione potenziale, in accordo con i coefficienti di riduzione da stress idrico (α_{rw}) e salino (α_{rd}). (Feddes et al., 1978)

$$Sa(z) = \alpha_{rw} * \alpha_{rd} * Sp(z) \quad [10]$$

dove:

$Sa(z)$ = attingimento attuale alla profondità z

α_{rw} = coefficiente di riduzione da stress idrico

α_{rd} = coefficiente di riduzione da stress salino

Nell'applicazione di SWAP non si è tenuto conto del coefficiente di stress salino ma solo del coefficiente di stress idrico descritto da Feddes et al., (1978) riportato in figura 4.3:

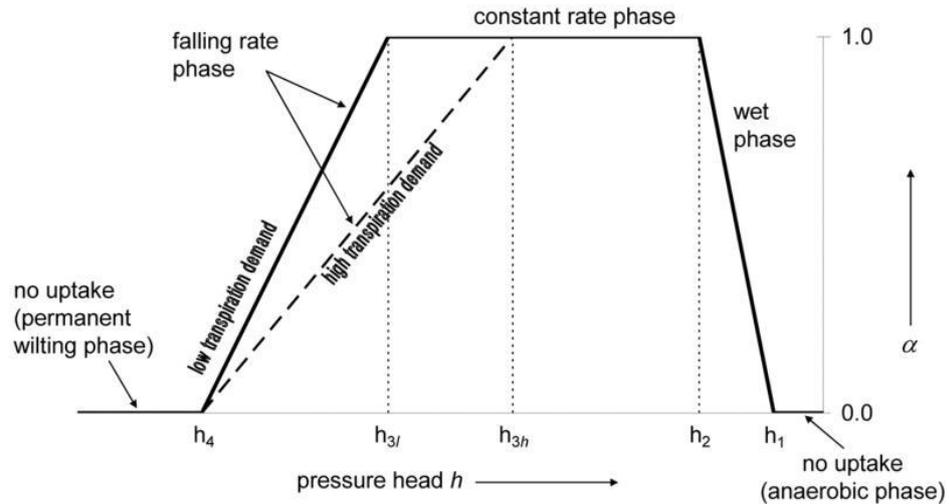


Figura 4.3 - Coefficiente di stress idrico descritto da Feddes et al (1978)

Dove il coefficiente di riduzione (α_{rw}) è funzione del potenziale dell'acqua nel suolo h e del tasso di traspirazione potenziale.

$$\alpha_{rw} = \frac{T_{a,t}}{T_{p,t}} \quad [11]$$

dove:

$T_{a,t}$ = traspirazione attuale al momento t

$T_{p,t}$ = traspirazione potenziale al momento t

Nell'applicazione realizzata, mancando informazioni sui parametri di Feddes per l'*Arundo donax*, in letteratura, sono stati adattati valori di h_3 della canna da zucchero (h_{3h} -1500 cm; h_{3l} -2000 cm) che risultavano in ogni caso superiori ai valori riportati per il mais.

Per valutare la bontà dei dati stimati dal modello, in riferimento al moto dell'acqua nel suolo, nella fase di calibrazione e validazione dello stesso, sono stati utilizzati i seguenti indici statistici:

- Errore quadratico medio (RMSE) (Fox D.G., 1981)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

- Coefficiente di efficienza (EF) (Greenwood et al., 1985)

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

- Coefficiente di massa residua (CRM) (Loague and Green, 1991)

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

- Coefficiente di correlazione di Karl Pearson (1894)

$$\rho_{OP} = \frac{\sigma_{op}}{\sigma_o \cdot \sigma_p}$$

dove:

O_i = dato iesimo osservato o misurato

P_i = dato iesimo stimato o predetto

\bar{O} = dato medio osservato

σ_{op} = covarianza tra dati misurati e stimati

σ_o = deviazione standard dei dati osservati o misurati

σ_p = deviazione standard dei dati stimati o predetti

L'indice di efficienza RMSE calcola la differenza media tra il dato simulato e stimato ed il valore minimo statistico è pari ad zero, una ottima stima si ottiene con valori tendenti a zero. Il coefficiente EF fornisce un confronto (stimato-misurato) tra l'efficienza del dato stimato dal modello e l'efficienza dei dati descritti come la media delle osservazioni. L'indice di efficienza è ottimale quando assume valore pari ad 1 (il valore dei dati predetti è pari a quello dei misurati); può assumere valori negativi ed in quel caso ci dice che il valore medio osservato è uno stimatore migliore della stima prodotta dal modello.

Il coefficiente CRM (*Coefficient of residual mass*) indica se i dati osservati sono sottostimati ($CRM > 0$) o sovrastimati ($CRM < 0$) dalle simulazioni. Il valore ottimale è zero.

Il coefficiente di correlazione (lineare) di Pearson indica se c'è una dipendenza lineare tra i dati misurati e stimati. Il coefficiente assume valori compresi tra -1 e +1. Nel caso di indipendenza lineare il coefficiente assume valore zero, mentre non vale la conclusione

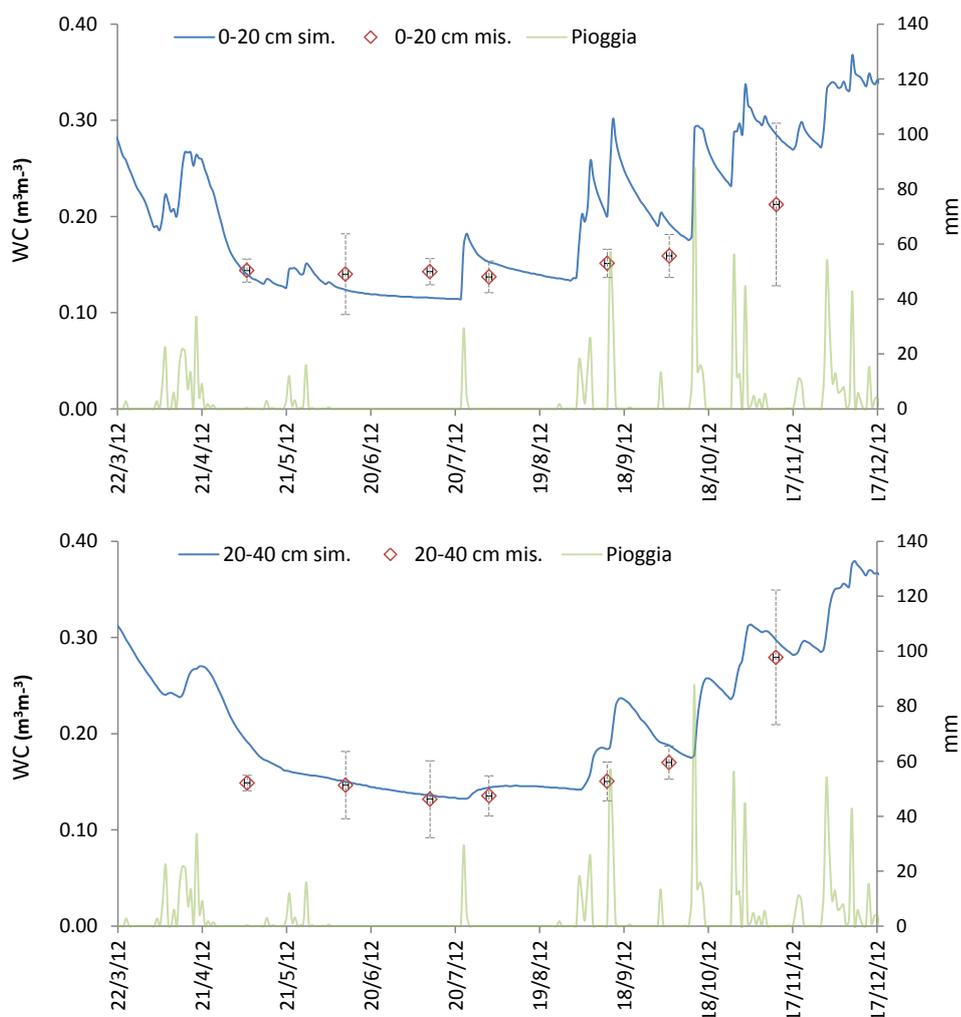
opposta, ovvero dal coefficiente nullo non si può desumere l'indipendenza lineare. Valori prossimi a +1 (o -1) possono essere misurati anche in presenza di relazioni non lineari.

4.2. Risultati simulazioni modellistiche e determinazione del WP in entrambi le tesi al confronto.

Calibrazione e validazione del modello idrologico per la tesi N100 e determinazione del WP.

Come riportato in materiali e metodi la procedura di calibrazione è stata realizzata sulle misure di contenuto idrico gravimetrico realizzate nell'anno di crescita 2012 attraverso una procedura trial and error.

Nella figura 4.4 sono riportati gli andamenti dei contenuti idrici stimati dal modello (linea continua) nell'anno di calibrazione (2012) e quelli misurati (punti) a tre diverse profondità 0-20 cm, 20-40 cm ed 40-60 cm.



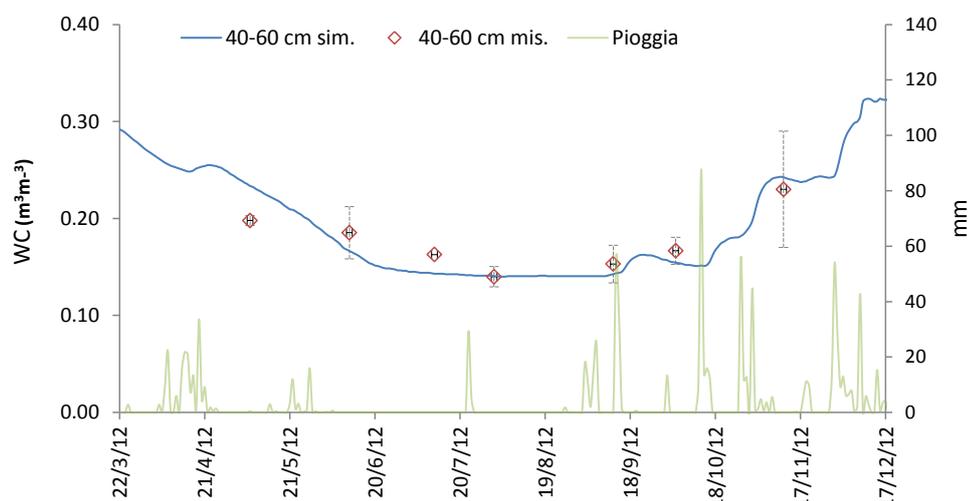


Figura 4.4: Nelle tre figure sono riportati i confronti tra gli andamenti dei contenuti idrici misurati (mis.) e stimati (sim.) nell'anno di calibrazione 2012. In verde sono riportati gli apporti pluviometrici.

La bontà della procedura di calibrazione è la successiva validazione è stata valutata attraverso quattro indici statistici RMSE, EF, CRM e r , i cui risultati sono riportati nella tabella 4.1. Dalle figure e dai risultati degli indici è evidente come il modello abbia più difficoltà a stimare gli andamenti del primo strato di suolo (0-20 cm) rispetto a quelli più profondi, in cui il trend invernale a fine ciclo è coerente con le misure realizzate in campo. I valori espressi dall'indice RMSE sono considerabili buoni, poiché non distanti dall'errore di misura del campione e della sua variabilità. L'indice di efficienza EF ci dice che il modello si comporta bene nei secondo e terzo strato ma non è un miglior predittore della media delle misure nel primo strato. Questo comportamento è in ogni caso enfatizzato dalle misure realizzate che risultano poco dinamiche e particolarmente piatte (dipende dal momento scelto per la misura). Infine il modello pur presentando un accordo elevato con la dinamicità dei dati (vedi valori indici $r > 0.92$) risulta sottostimare un po' i contenuti idrici nei primi due orizzonti (CRM -0.11)

Tabella 4.1 - Indici statistici RMSE, EF, CRM e r

| Indici Statistici | Calibrazione 2012 | | | Validazione 2013 | | |
|------------------------------------------|----------------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|
| | 0-20 cm | 20-40 cm | 40-60 cm | 0-20 cm | 20-40 cm | 40-60 cm |
| RMSE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| EF | -1.43 | 0.77 | 0.56 | 0.13 | -2.80 | 0.58 |
| CRM | -0.11 | -0.11 | 0.01 | -0.10 | -0.24 | -0.02 |
| r | 0.92 | 0.96 | 0.92 | 0.61 | 0.96 | 0.79 |

La validazione del modello nell'anno 2013 (fig. 4.5), ha mostrato (tab.4.1) valori di RMSE in linea con l'anno di calibrazione (valore medio $0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), un peggioramento nell'indice di efficienza nel secondo strato ed un miglioramento nel primo, valori del CRM in come tendenza in linea con la calibrazione e valori dell'indice r che mostrano un peggioramento nel primo strato (si passa da 0.92 a 0.69).

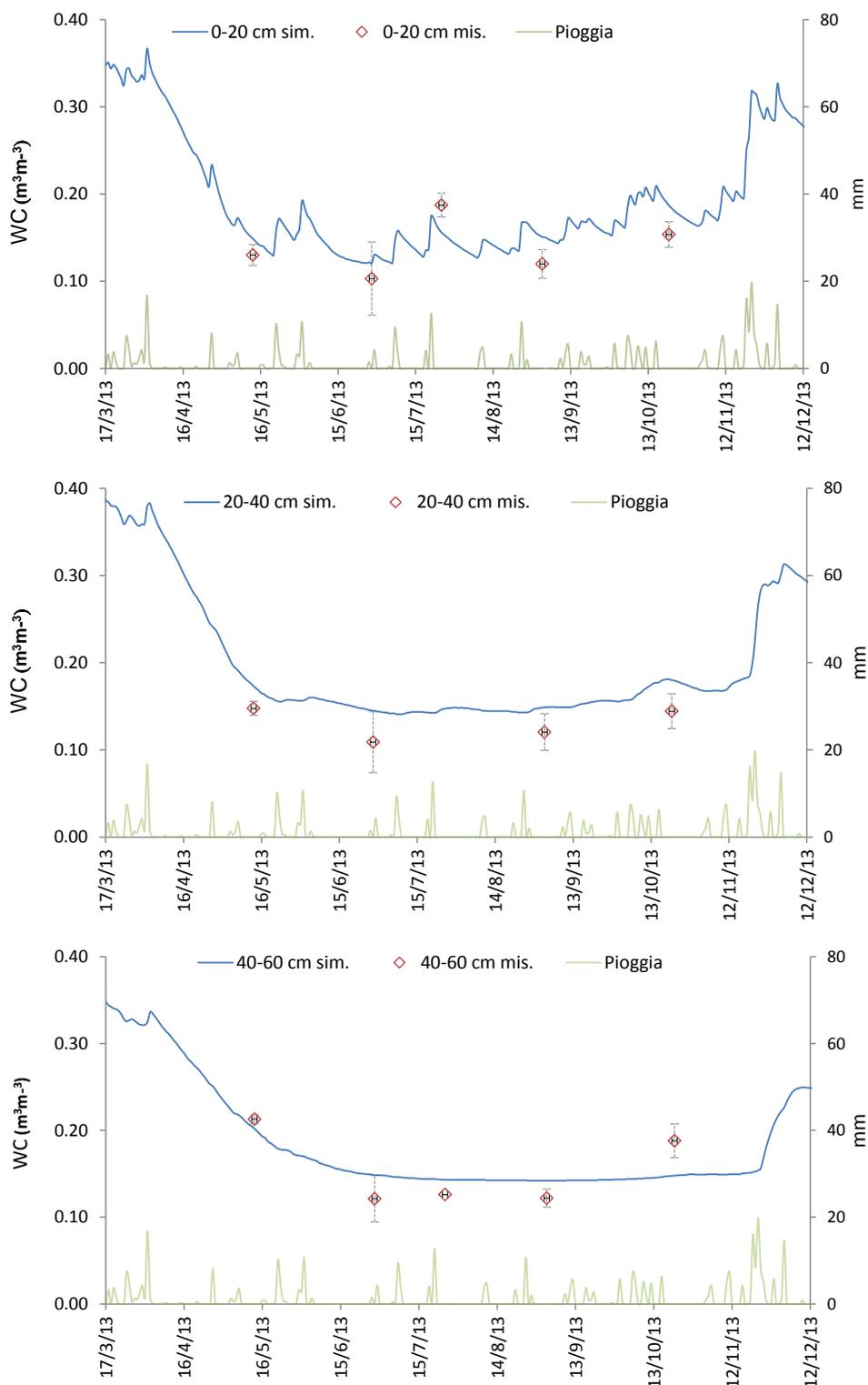


Fig. 4.5: Nelle tre figure sono riportati i confronti tra gli andamenti dei contenuti idrici misurati (mis.) e stimati (sim.) nell'anno di validazione 2013. In verde sono riportati gli apporti pluviometrici.

Dagli output del modello è stata estratta la traspirazione attuale per la determinazione del WP. Nella figura 4.6 è riportato l'andamento di WP espressa in g/m^2 .

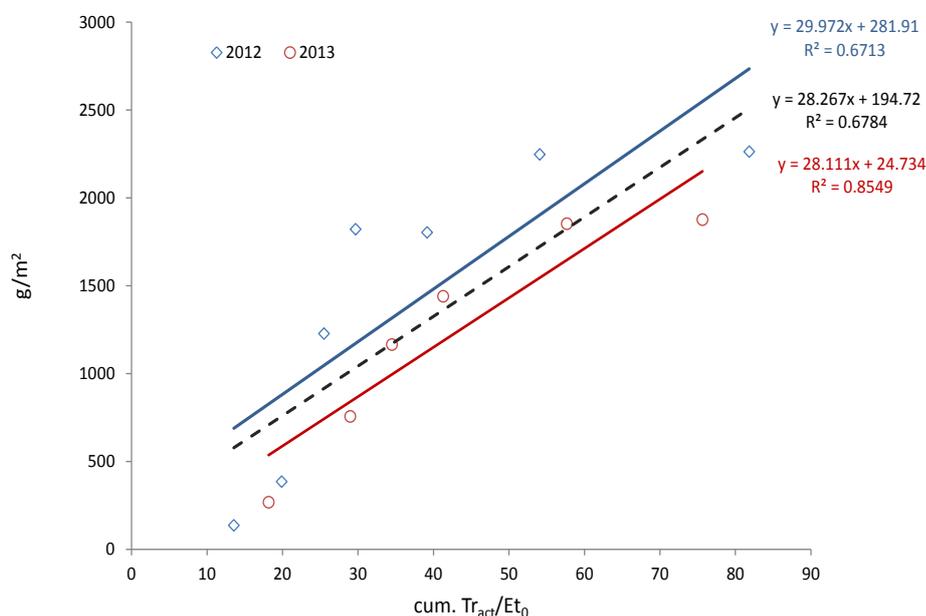


Figura 4.6: Andamento dei confronti tra le produzioni di biomassa espressa in g m^{-2} e la traspirazione attuale cumulata normalizzata per l'evapotraspirazione di riferimento tesi N100.

I valori di WP ottenuti per la tesi N100 nei due anni sono compresi tra 29.9 e 28.1 g/m^2 . Poiché i due anni rappresentano il comportamento della pianta nella fase di produzione di plateau, è stato determinato un valore di WP univoco considerando i due anni come due ripetizioni (fig. 4.6 linea tratteggiata nera) poiché tale parametro è anche normalizzato per le condizioni climatiche che si sono verificate. Il valore così ottenuto è pari a 28.3 g/m^2 , ed è da considerarsi in assenza di stress da nutrienti.

Calibrazione e validazione del modello idrologico per la tesi N50 e determinazione del WP.

Per evitare fraintendimenti nel lettore è stata lasciata la dicitura di anno di calibrazione per l'annata 2012 ed anno di validazione per l'annata 2013. Di fatto, l'applicazione del modello SWAP per la tesi N50 ha rappresentato un'ulteriore validazione della bontà della calibrazione del sistema fisico (suolo) realizzata per la tesi N100. Infatti, non sono stati modificati i parametri idrologici ma solo gli input relativi allo sviluppo colturale. Quindi l'assunzione è che il suolo tra le tesi come sistema fisico era lo stesso.

Nella tabella successiva (tab.4.2) sono riportati gli indici statistici calcolati per i due anni per la tesi N50 confrontando gli andamenti del contenuto idrico realizzati con SWAP e le misure effettuate per tale tesi a tre diverse profondità 0-20 cm, 20-40 cm ed 40-60 cm.

Tabella 4.2 – Indici statistici calcolati per i due anni per la tesi N50.

| Indici Statistici | Anno di Calibrazione | | | Anno di Validazione | | |
|---------------------------------------------|----------------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|
| | 2012 | | | 2013 | | |
| | 0-20 cm | 20-40 cm | 40-60 cm | 0-20 cm | 20-40 cm | 40-60 cm |
| RMSE (cm ³ cm ⁻³) | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.04 |
| EF | -1.32 | -1.70 | -2.33 | -2.05 | -1.07 | -1.97 |
| CRM | -0.22 | -0.23 | 0.09 | -0.17 | -0.18 | 0.12 |
| r | 0.48 | 0.45 | 0.68 | 0.85 | 0.74 | 0.40 |

Gli andamenti degli indici mostrano una minore capacità predittiva del contenuto idrico rispetto alla tesi N100, con un generale aumento dell'errore relativo assoluto e della sottostima del dato. L'andamento dei dati misurati e simulati risulta meno performante (valori dell'indice r più bassi della tesi N100) ed un valore dell'indice di efficienza elevato che indica una migliore predizione del valore medio del dato misurato rispetto alla stima del modello. Quest'ultimo punto è frutto di misure nel tempo che hanno mostrato dati poco variabili. Per tali casi l'indice EF non rappresenta un ottimo indice da usare per i confronti.

In ogni caso, l'errore non è elevato e risulta anche diminuire tra gli anni con il dimezzamento del suo valore nei primi due strati dall'annata 2012 alla 2013.

Dagli output del modello è stata estratta la traspirazione attuale per la determinazione del WP. Nella figura 4.7 è riportato l'andamento dei confronti tra la traspirazione cumulata normalizzata per l'evapotraspirazione di riferimento e la biomassa prodotta espressa in g m⁻² per la determinazione del WP.

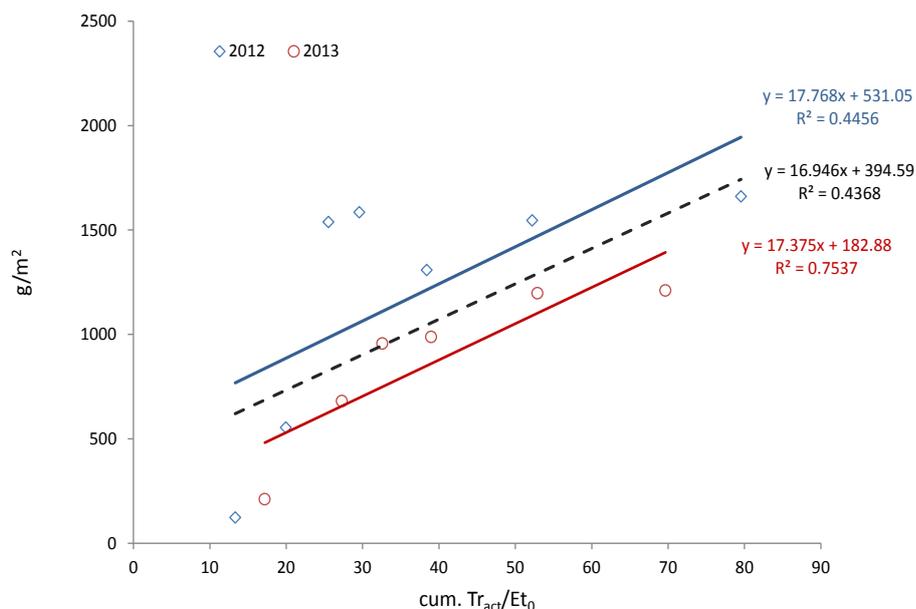


Figura 4.7: Andamento dei confronti tra le produzioni di biomassa espressa in $g\ m^{-2}$ e la traspirazione attuale cumulata normalizzata per l'evapotraspirazione di riferimento tesi N50.

I valori ottenuti per la tesi N50 nei due anni sono compresi tra 17.7 e 17.4 g/m^2 . Come nel caso della tesi N100 è stato determinato il WP considerando in due anni come due ripetizioni (fig. 4.7 linea tratteggiata nera) che ha mostrato un valore pari a 16.9 g/m^2 . I valori così ottenuti di WP, sono da considerarsi valori in presenza di stress nutritivi (azoto in particolare). Confrontando il valore medio di WP ottenuto nella tesi N100 con quello della tesi N50 si evidenzia una riduzione del 40% del valore a fronte di una riduzione della dose di concime azotato del 50%. Se si considerano i singoli anni, tale rapporto è abbastanza stabile: nel 2012 la riduzione è del 40% e nel 2013 del 38%. La progressiva riduzione dal 2012 al 2013 potrebbe anche dipendere dalla riduzione della disponibilità di azoto intrinseca del suolo che nel tempo viene depauperata dalla carente fertilizzazione.

In conclusione è interessante notare come, confrontando i valori di WP in entrambi le tesi con i range riportati da Steduto in Acquacrop per le piante a ciclo C3 (tra 30-35 g/m^2) e C4 (tra 15 e 20 g/m^2) è evidente come l'Arundo donax si è posizionata come comportamento a cavallo tra una pianta a ciclo C3 e C4. In particolare in assenza di stress nutrizionale essa si posiziona vicino ad una pianta a ciclo C3. Cosa che risulta in accordo con l'incertezza in letteratura sulla fisiologia dell'Arundo donax che anche se considerata una coltura a ciclo C3 ha mostrato performance produttive molto simili alle C4 (Rossa et al., 1998).

5. CONCLUSIONI

Le ricerche condotte nei tre areali campani potenzialmente interessati alla coltivazione di *Arundo donax*, hanno dato risposte produttive differenti riconducibili ai diversi trattamenti applicati in combinazione con differenti condizioni pedoclimatiche. Infatti, nel caso studio di Acerra, gli effetti del trattamento sono stati annullati dalla elevata fertilità intrinseca del suolo.

Per tutti i siti e tesi a confronto, lo sviluppo della biomassa aerea negli anni di coltivazione è risultata in accordo con quanto riportato in letteratura, ed in particolare sulla presenza di tre stadi di sviluppo della pianta, con il raggiungimento del plateau produttivo tra il 3° e 4° anno di crescita (Angelini et al. 2009).

Le risposte produttive dei siti di Bellizzi (SA) e Sant'angelo dei Lombardi (AV), ambienti meno fertili rispetto al sito di Acerra, sono risultate in linea con quelle ottenute in Italia in suoli marginali da Nasso o di Nasso et al. (2010; 2013) ed inferiori a quelle riportate in letteratura per gli ambienti più fertili (Angelini et al., 2005a; Cosentino et al., 2006) le quali risultano in accordo con le produzioni ottenute nel sito di Acerra.

Rispetto all'individuazione del periodo migliore per la raccolta della biomassa aerea, lo studio degli andamenti dei parametri di accrescimento ha portato ad identificare come miglior periodo per la raccolta quello invernale. Tale indicazione nasce dal monitoraggio dell'umidità dei tessuti vegetali nel periodo della possibile raccolta che va da novembre a febbraio-marzo. In inverno si riscontra il miglior compromesso sulla presenza di acqua e di azoto (N) nella biomassa rappresentando un indicatore qualitativo della stessa per la trasformazione (minori problemi di conservazione e di utilizzazione industriale) ed inoltre una maggiore sostenibilità del sistema (ritorno al suolo di N superiore attraverso la lettiera e quindi meno esigenze in fertilizzanti azotati) ed un abbattimento dei costi necessari per ridurre l'umidità nella matrice prima della lavorazione.

Per quanto riguarda l'effetto dei diversi trattamenti a confronto, va detto che nel sito di Bellizzi con le tesi N100 ed N50 a confronto, nel lungo periodo il minor apporto di azoto al sistema da parte della concimazione (tesi N50) si traduce in un lento depauperamento delle riserve del suolo con un effetto riduttivo anche sulla biomassa prodotta, con una differenziazione sempre più evidente e marcata tra le due tesi nei diversi anni a confronto. Inoltre va sottolineato che nei due siti con le tesi (N100 e N50) a confronto (S. Angelo dei

Lombardi e Bellizzi) la differenziazione in termini di biomassa aerea prodotta dalle tesi, è avvenuta dal terzo anno con un valore pressoché identico di differenza (circa il 16%).

Diversamente nel sito di Acerra, le tesi a confronto: compost (COM) e no compost (NoCOM), hanno mostrato andamenti e produzioni simili senza diversificarsi. Tale comportamento è riconducibile alla qualità del suolo che ha ben supportato la crescita colturale. Inoltre va sottolineato come in questo sistema colturale, l'uso dell'*Arundo donax* facilita l'accumulo di carbonio nel suolo sottraendolo all'atmosfera anche in assenza di trattamento con compost. Ciò è dovuto in gran parte all'apporto organico annuale che si realizza a fine ciclo colturale (residui vegetali) costituito per lo più da foglie, che creano una fitta e consistente lettiera sul suolo. Quindi in questa situazione la canna comune ha confermato la sua propensione a coltura "mitigatrice" dei cambiamenti climatici.

Dall'inizio della stagione di crescita ogni anno, in tutti i siti sperimentali e tesi a confronto, i nuovi germogli emergono nel mese di marzo crescendo rapidamente durante il periodo estivo (giugno-luglio) producendo culmi e foglie. A fine luglio inizia la senescenza delle foglie basali (disseccano), con un interessamento successivo anche della restante parte aerea che subisce un'accelerazione del disseccamento durante il periodo autunnale. Inoltre va sottolineato che la diminuzione dell'umidità dei tessuti si verifica in concomitanza dell'antesi dall'inizio di ottobre fino alla fine di novembre. In tale periodo il rendimento massimo, in termini di peso, della biomassa aerea secca è stato raggiunto e le colture possono essere raccolte. Tali risultati sono in accordo con quanto riportato da Angelini et.al. (2009). Petrini et al., (1996), Acaroglu e Semi Aksoy (2006) ed Ercoli et al., (1999).

Inoltre il tasso di accrescimento più elevato è stato registrato per tutti i siti e tesi nei mesi estivi in concomitanza con i valori più alti di LAI (registrati a fine estate).

La durata dell'apparato fotosintetico (LAD) per i siti di Sant'Angelo dei Lombardi e Bellizzi è stata per tutti gli anni di studio più alta per la tesi con la dose di concime maggiore (N100), proprio a sottolineare come l'aumento della disponibilità di azoto influenzi l'accrescimento fogliare e la sua longevità, con effetti diretti sulle produzioni.

I valori registrati, nell'anno 2012 per i tre siti a confronto sono stati rispettivamente per Sant'angelo dei Lombardi, Bellizzi ed Acerra pari a 824, 1131 e 1415 $m^2m^{-2} \times d$, di gran lunga superiori rispetto a colture C4 molto produttive come il mais. In particolare, nell'area di studio della Piana del Sele, i valori di LAD riscontrati con alti apporti di azoto in assenza di stress idrico sono risultati pari a 353 $m^2m^{-2} \times d$ con valori di LAI di 6 $m^{-2}m^{-2}$ (valori medi su tre

anni di misura, Basile A. e Terribile F., 2008); rispetto a valori di letteratura più bassi come riportati da Ahmad M. alias Bukhsh H. A. et al., 2010 (valore medio di LAD pari a 168.64 in ibridi i mais Pioneer). Le differenze sono dovute sicuramente dalla lunghezza del ciclo dell'*Arundo donax* (in media circa 284 gg) che risulta di gran lunga superiore a quello del mais classe 700 compreso tra i 90 ed i 115 gg.

Contrariamente per il sito di Acerra l'uso del compost non ha prodotto differenze, confermando quello detto in precedenza rispetto alla fertilità intrinseca del suolo di origine vulcanica. In ogni caso la pianta ha sviluppato un apparato fogliare importante e durevole che ha permesso un'ottimizzazione della radiazione solare.

Le concentrazioni di azoto nella biomassa aerea (culmi e foglie) sembrano ridursi all'aumentare della % di sostanza secca della biomassa aerea, con un'accelerazione della diminuzione in concomitanza della senescenza, confermando il processo di traslocazione dei nutrienti dalla parte aerea verso gli organi di accumulo ipogei (rizomi).

Nell'ambito della tesi realizzata, col fine di trasformare le informazioni raccolte in parametri di input per modelli di simulazione della produzione di biomassa aerea, basati sui modelli *water growth engine*, è stata determinata la *water productivity (WP)* dell'*Arundo donax*, non presente in letteratura, per le due tesi a confronto (N100 ed N50) del sito di Bellizzi per gli anni di monitoraggio (2012 e 2013).

I valori ottenuti hanno confermato come questa coltura in presenza di limitato stress idrico e nutritivo mostri un comportamento a limite tra colture a ciclo fotosintetico C3 e C4 mostrando valori di *WP* vicini a 29 g m^{-2} (piante a ciclo C3 valori in letteratura tra $30\text{-}35 \text{ g m}^{-2}$ e C4 tra $15 \text{ e } 20 \text{ g m}^{-2}$). Confermando le perplessità che si sollevano dai risultati ottenuti da Rossa et al., 1998 che mostravano un comportamento fotosintetico di tale specie (descritta come C3) superiore alle piante dotate di ciclo C4.

Dai dati raccolti, uno dei motivi che spiegano l'enorme potenziale produttivo dell'*Arundo donax* è l'ampiezza e la durata dell'apparato fotosintetizzante che le consentono di accumulare grandi quantità di assimilati pur avendo un metabolismo tipico delle piante C3.

Per cui da questo punto di vista si renderebbero necessari ulteriori studi, più approfonditi e mirati del comportamento fisiologico relativo ai meccanismi coinvolti nel processo di fotosintesi. Infine i valori di *WP* determinati consentiranno di fare previsioni future di adattamento della coltura ai cambiamenti climatici, in termini di valutazione della convenienza alla stessa, attraverso modelli di simulazione della crescita colturale (Aquacrop)

nel sito di Bellizzi ed anche in altri luoghi poiché tale parametro è conservativo in quanto normalizzato per la richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera.

In conclusione, le prove realizzate per la produzione di biomassa in ambienti caratterizzati da fattori limitanti, come quelli di Sant'Angelo dei Lombardi da erosione dei versanti, oppure in ambienti di pianura mediamente contaminati (Acerra) e meno fertili (Bellizzi), apre buone prospettive per la produzione di energia o di materie prime per lo sviluppo di chimica verde in tali territori. Questo consentirebbe di recuperare reddito per gli agricoltori sui suoli non destinabili alle produzioni alimentari e, in tempi medi, di restituire i suoli alle produzioni ordinarie in condizioni di maggiore fertilità.

6. BIBLIOGRAFIA

- Acaroglu M., Semi Aksoy A. (2005). The cultivation and energy balance of *Miscanthus x giganteus* production in Turkey. *Biomass and Bioenergy*;29(1):42-8.
- Ahmad M. alias Bukhsh H. A., Ahmad R., Malik A. U., Hussain S. and Ishaque M. (2010). Agro-physiological traits of three maize hybrids as influenced by varying plant density. *The Journal of Animal & Plant Sciences* 20(1): 2010, Pages: 34-39 ISSN: 1018-7081.
- Angelini L.G., Ceccarini L, Bonari E. (2005a) Biomass yield and energy balance of Giant reed (*Arundo donax L.*) cropped in central Italy as related to different management practices. *European Journal of Agronomy*; 22:375-389.
- Angelini L.G., Ceccarini L., Nassi N., Bonari E. (2005b). Long term evaluation of biomass production of Giant reed (*Arundo donax L.*) to different fertilization input, plant density and harvest time in a Mediterranean environment. *Proceedings of the 14th European Biomass*, Paris, France, 141-144.
- Angelini L.G., Ceccarini L., Nassi N., Bonari E. (2009) Comparison of *Arundo donax L.* and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass and Bioenergy*, 33:635-643.
- Basile A. e Terribile F. (2008) La ricerca sull'inquinamento da nitrati nei suoli campani: un approccio modellistico nella gestione agro-ambientali. *Monografia Regione Campania Ed.*, Napoli, Italy. ISBN 978-88-95230-07-8.
- Beale C.V., Long S.P. (1997). Seasonal dynamics of nutrient accumulation and partitioning in the perennial C4-grasses *Miscanthus x giganteus* and *Spartina cynosuroides*. *Biomass Bioener.* 12:419- 428.
- Bell Gary P., 1997. Ecology and management of *Arundo donax*, and approaches to riparian habitat restoration in southern California. In: Brock J.H., Wade M., Pysek P, Green D. (eds). *Plant invasions: studies from North America and Europe*. Leiden, The Netherlands: Backhuys Publishers: 103-113. [43820].
- Belmans C., Wesseling J.G., Feddes R.A., 1983 – Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. Hydrol.*, 63, pp. 271-286
- Bonari E., Picchi G., Guidi W., Piccioni E., Fraga A., Villani R., Ginanni M, Pisa. (2004) *Le colture dedicate ad uso energetico: il progetto bioenergy farm*. Quaderno Arsia 6.
- Boogaard H., van Diepen C., Rötter R., Cabrera J., van Laar H. (1998) *WOFOST 7.1, User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST control center 1.5*. Tech. rep., DLO Winand Staaring Centre.
- Borkowska H., Molas R. (2013). Yield comparison of four lignocellulosic perennial energy crop species. *Biomass & Bioenergy*. 51:145-153.

- Boukris I., Gabriel L., Vassilatos V., Kyritsis S. (1994). Biomass flash pyrolysis in a circulating fluidised bed reactor. Proceedings of the 8th European Biomass Conference "Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry", Vienna, Austria, 3-5 ottobre 1994; 1887-1893
- Candolo G. (2006). "Energia dalle biomasse vegetali: le opportunità per le aziende agricole". *Agronomica*, 4, 26-35.
- Causton D R., Venus J. C., 1981. *The Biometry of Plant Growth*. Ed Arnold.
- Ceotto E. (2007). A simple and straightforward method for shoot cutting propagation of giant reed (*Arundo donax L.*). In: M. Borin, S. Bacelle, (eds.) Proceedings of the international conference on Multiple Roles of Wetlands, Padova, Italy, 84.
- Ceotto E., Di Candilo M. (2010). Shoot cutting propagation of giant reed (*Arundo donax L.*) in water moist soil: The path forward? *Biomass and Bioenergy*, 34: 1614-1623.
- Chandhuri R.K. and S. Ghosal. (1970). Triterpines and sterols from the leaves of *Arundo donax*. *Phytochemistry* 9: 1895-1896.
- Christou M. (1999). Comparative studies of two potential energy crops in Greece. (www.switchgrass.nl).
- Christou M., Mardikis M., Alexopoulos E., Cosentino S., Copani V. and Sanzone E. (2003). Environmental studies on *Arundo donax*. Proc. 8th International Conference Environmental Science and Technology. Lemnos island, Greece, 8-10 September 2003, pp. 102-110.
- Cleveland CJ., Costanza R., Hall CAS, Kaufmann R. (1984). Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective. *Science*, 225: 890-897.
- Connor D.J., Loomis R.S., Cassman K.G. (2011). *Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Copani V., Cosentino S.L, Testa G., Scordia D. (2013). Agamic propagation of giant reed (*Arundo donax L.*) in semi-arid Mediterranean environment. *Italian Journal of Agronomy* ; volume 8(s1):e 4.
- Cosentino, S., Foti, S., Venturi, G., Giovanardi, R., Copani, V., Mantineo, M., D'Agosta, G., Bezzi, G., Mazzocco, T., (2005). Colture erbacee annuali e poliennali da biomassa per energia di possibile coltivazione in Italia. *Agroindustria* 1, 35-48.
- Cosentino SL., Copani V., D'Agosta GM., Sanzone E., Mantineo M. (2006) First results on evaluation of *Arundo donax L.* clones collected in Southern Italy. *Industrial Crops and Products*; 23:212-222.
- Coulson M., Dahl J., Gansekoele E., Bridgwater AV., Obernberger I., van de Beld L. (2004). Ash characteristics of perennial energy crops and their influence on thermal processing,

- 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome, Italy.
- Dahl J., Obernberger I. (2004). Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (*Arundo donax*, *Cynara cardunculus*, *Miscanthus x Giganteus* and *Panicum virgatum*), 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome, Italy.
- Dalianis C., Sooter C. and Cristou M. (1994). Growth and biomass productivity of *Arundo donax* and *Miscanthus sinensis x giganteus*. In: Proceedings of 8th European Community Conference on Biomass for Energy, Environment Agriculture and Industry, Vienna 3-5 October 1994, pp. 575-582.
- De Wit, C.T., (1965). Photosynthesis of leaf canopies. Agricultural Research Reports 663, Pudoc, Wageningen. 88p.
- Di Candilo M., Ceotto E., Diozzi M. (2008). Comparison of 7 ligno-cellulosic biomass feedstock species: 6-years results in the Low Po Valley. In: Rossi Pisa, P. (Ed.), 10th Congress of the European Society of Agronomy, Bologna, Multi-functional Agriculture, Agriculture as a Resource for Energy and Environmental Preservation. Italian Journal of Agronomy 3 (suppl.), 481-482.
- Di Candilo M., Ceotto E. (2012). Canna comune nel Nord Italia. Supplemento n.2 a Sherwood n.183 anno 18 n.4 maggio.
- Diodato N., Fagnano M., Alberico I. (2009). ClIFEM – Climate Forcing and Erosion Response Modelling at Long-Term Sele River Research Basin (Southern Italy). Natural Hazard and Earth System Science 9: 1693-1702.
- Di Tomaso J.M. (1998). Biology and ecology of giant reed. In: Bell, Carl E., ed. In: arundo and saltcedar: the deadly duo: proceedings of a workshop on combating the torea from arundo an saltcedar; 1998 June 17; Ontario, CA: University of California, Cooperative Extension: 1-5. (47117).
- Encinar J.M., González J.F., Rodríguez J.J., Tejedor A. (2002). Biodiesel fuels from vegetable oils: transesterification of *Cynara cardunculus* L. oils with ethanol. Energy Fuel 16 (2), 443-450.
- Ercoli L., Mariotti M., Masoni A., Bonari E. (1999). Effect of irrigation and nitrogen fertilisation on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of *Miscanthus*. Field Crops Research 63, 3-11.
- Esposti R., Working paper n.10 Novembre 2008. Food, feed & fuel: biocarburanti, mercati agricoli e politiche.
- Evans G. C. (1972). The Quantitative Analysis of Plant Growth. (U.C. Press, Berkeley).
- Facchini P. (1941). La Canna gentile per la produzione della cellulosa nobile, l'impresa agricolo-industriale di Torviscova. SNIA VISCOSA, Milano.

- Fagnano M., Sifola M.I., Zarone A., Postiglione L. (1996). Ricerche sul sorgo (*Sorghum spp.*) da energia in area mediterranea. Atti VII Cong. Naz. Della Soc. Ital. Ecol. Napoli (IT), 11-14 settembre 1996. Napoli: SitE. 17, 189-192.
- Farrell AE., Plevin RJ., Turner BT., Jones AD., O'Hare M., Kammen DM. (2006). Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science*, 311: 506-508.
- Feddes R.A., Kowalik P.J. and Zaradny H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. Pudoc, Centre Agric. Publ. Doc., Wageningen.
- Fernández, J. (1998). *Cynara cardunculus* network. Final Report AIR CTT 921089. Commission of the European Communities, Brussels, 248 pp.
- Fischer Boel M., Biofuel: More Valuable as Fuel than as a Scapegoat, Speech/08/228, Policy dialogue on Biofuels, European Policy Centre, 6 maggio 2008.
- Foti, S., Mauromicale, G., Raccuia, S.A., Fallico, B., Fanella, F., Maccarone, E. (1999). Possible alternative utilisation of *Cynara* spp. Part I. Biomass, grain yield and chemical composition of grain. *Ind. Crops Prod.* 10, 219-228.
- Fox D.G. (1981) – Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 62:599-609.
- Frandsen PR. (1997). Team *Arundo*: Interagency Cooperation to Control Giant Reed Cane (*Arundo donax*). In: James OL and Thiart JW. Assessment and Management of Plant Invasions, Springer, New York, USA, pp: 244-247.
- Freibauer, A. (2003). Regionalised inventory of biogenic green house gas emissions from European agriculture. *Eur. J, Agron.*, 19, 135-160.
- Giannelos, P.N., Zannikos, F., Stournas, S., Lois, E., Anastopoulos, G. (2002). Tobacco seed oil as an alternative diesel fuel: physical and chemical properties. *Ind. Crops Prod* 16, 1-9.
- Gominho, J., Fernandez, J., Pereira, H. (2001). *Cynara cardunculus* L.- a new fibre crop for pulp and paper production. *Ind. Crops Prod.* 13, 1-10.
- Gou Z.H., Miao X.F. (2010). Growth changes and tissues anatomical characteristics of giant reed (*Arundo donax* L.) in soil contaminated with arsenic, cadmium and lead. *J. Cent. South Univ. Technol* 17, 770-777.
- Goudriaan J., van Laar H. (1994). Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic, Dordrecht.
- Greenwood D.J., J.J. Neeteson, and A. Draycott. 1985. Response of potatoes to N fertilizer: dynamic model. *Plant Soil*, 85:185-203.
- Hattori T., Morita S. (2010). Energy crops for sustainable bioethanol production; which, where and how? *Plant Prod. Sci.* 13: 221-234.

- Heaton E.A., Dohleman F.G., Long S.P. (2009). Seasonal dynamics of *Miscanthus x giganteus* and *Panicum virgatum*. *GCB Bioener.* 1:297-307.
- Hill J., Nelson E., Tilman D., Polasky S., Tiffany D. (2006). Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 103: 11206-11210.
- Himken M., Lammel J., Neukirchen D., Czepionka-Krause U., Olf H.W. (1997). Cultivation of *Miscanthus* under west European conditions: seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization. *Plant Soil* 189:117-126.
- Hoffmann G., Schingnitz D., Schnapke A., Bilitewski B. (2010). Reduction of CO₂-emissions by using biomass in combustion and digestion plants. *Waste Manage.* 30: 893-901
- Hunt R. (1990). *Basic Growth Analysis*. University Park Press, Baltimore. Causton D R, Venus J C 1981. *The Biometry of Plant Growth*. Ed Arnold.
- INEA, 2011 - Biomasse e agro energia un modello di governance regionale attraverso l'analisi del caso Campania a cura di Roberta Ciaravino e Vincenzo Sequino. Collana POLITICHE PER L'AMBIENTE E L'AGRICOLTURA. ISBN 9788881xxxxxx.
- IPCC, *Climate Change 2007: Synthesis Report*, Ginevra: Ipcc, 2007.
- ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale 2010, *National Greenhouse Gas Inventory System in Italy. Year 2010*. ISPRA rapporto tecnico 120/2010. Roma.
- Jackson G.C. and J.R. Nunez. (1964). Identification of silica present in the giant reed (*Arundo donax* L.). *J. Agric. Univ. (Puerto Rico)* 48: 60-62.
- Jeon YJ., Xun Z., Rogers PL. (2010). Comparative evaluations of cellulosic raw materials for second generation bioethanol production. *Lett. Appl. Microbiol.* 51: 518-524.
- Jones C.A., Kiniry, N., 1986. *CERES-Maize, a simulation model of maize growth and development*. Texas A&M University Press, College Station, TX.
- Kiniry J.R., Johnson M.V.V., Bruckerhoff S.B., Kaiser J.U., Cordsiemon R.L., Harmel R.D. (2012). Clash of the titans: comparing productivity via radiation use efficiency for two grass giants of the biofuel field. *Bioenergy Res.* 5, 41-48.
- Kroes J.G., Van Dam J.C., Groenendijk P., Hendriks R.F.A., Jacobs C.M.J., (2008). *SWAP version 3.2. Theory description and user manual*. Wageningen, Alterra, Alterra Report 1649, 262 pp.
- Kropff MJ., van Laar HH (1993). *Modelling crop-weed interactions*. CAB International, Wallingford, UK.

- Lal R., (2004) - Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security – Science 11 June 2004: Vol. 304. no. 5677, pp. 1623-1627 DOI: 10.1126/science.1097396.
- Lewandowski, I., Kicherer, A., Vonier, P., 1995. CO₂-balance for the cultivation and combustion of *Miscanthus*. Biomass Bioenergy 8, 81–90.
- Lewandowsky, I., Kicherer, A. (1997). Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus* × *Giganteus*. Eur. J. Agron. 6, 163-177.
- Lewandosky I, Scurlock JMO, Lindvall E, Christou M. (2003) The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. Biomass and Bioenergy, 25:335e61.
- Lipsky J., Commodity Prices and Global Inflation, Remarks of the First Deputy Managing Director, IMF, at the Council on Foreign Relations, New York City, 8 maggio 2008.
- Loague K., and R.E. Green. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. J. Contam. Hydrol., 7:51-73.
- Maccarone. E., Fallico B., Fanella F., Mauromicale G., Raccuia S.A., Foti S. (1999). Possible alternative utilization of *Cynara* spp. Part II. Chemical characterisation of their grain oil. Ind. Crop Prod. 10, 229-237.
- Mantineo M., D'Agosta G.M., Copani V., Patanè C., Cosentino S.L. (2009) - Biomass yield and Energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment. Field Crop Research, 114:204-213.
- Mariani C., Cabrini R., Danin A., Piffanelli P., Fricano A., Gomarasca S., Di Candilo M., Grassi F., Soave C. (2010). Origin, diffusion and reproduction of the giant reed (*Arundo donax* L.): a promising weedy energy crop. Annals of Applied Biology 157, 191-202.
- Marton L., 2002- United States Patent Application: 0020166149
- McKendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource Technology 2002; 83:37-46.
- Miles D.H, K. Tunsuwan. V., Chittawong U., Kokpol M. I., Choudhary J., Clardy. (1993). Boll weevil antifeedants from *Arundo donax*. Phytochemistry (Oxford): 34: 1277-1279.
- Mitchell D., A Note on Rising Food Prices, Policy Research Working Paper 4682, The World Bank, Development Prospects Group, luglio 2008.
- Monteith, J.L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 281,277/294.

- Monti A., Venturi P. (1999). Risposta della canna comune (*Arundo donax* L.) alla concimazione azotata. In: Bona S. (ed), Atti XXXIII Convegno annuale Società Italiana di Agronomia. Le colture non alimentari. Legnaro (PD), 20-23 settembre 1999.
- Monti A., Di Virgilio N., Venturi G. (2008). Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass and Bioenergy* 32, 216-223.
- Mualem, Y., 1976, "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." *Water Resources Research*, vol. 12, 3, 513-522.
- Nasso N., Angelini L.G., Bonari E. (2009a). Improving energy crop cultivation in the Mediterranean region: nutrient content, uptake and nutrient use efficiency in giant reed (*Arundo donax* L.). Pages 321-322, Proc. 16th Nitrogen Workshop – Connecting Different Scales of Nitrogen Use in Agriculture, Turin, Italy.
- Nasso N., Roncucci N., Triana T., Tozzini C., Bonari E., (2011a). Productivity of giant reed (*Arundo donax* L.) and miscanthus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deuter) as energy crops: growth analysis *Italian Journal of Agronomy*, volume 6:e22.
- Nasso N., Roncucci N., Triana T., Tozzini C., Bonari E., (2011b). Seasonal nutrient dynamics and biomass quality of giant reed (*Arundo donax* L.) and miscanthus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deuter) as energy crops. *Italian Journal of Agronomy*, volume 6:e24.
- Nasso N., Angelini L.G., Bonari E. (2010) Influence of fertilisation and harvest time on fuel quality of giant reed (*Arundo donax* L.) in central Italy. *European Journal of Agronomy*; 32(3):219-227.
- Nasso N., Roncucci N., Bonari E. (2013). Seasonal Dynamics of Aboveground and Belowground Biomass and Nutrient Accumulation and Remobilization in Giant Reed (*Arundo donax* L.): A Three-Year Study on Marginal Land. *Bioenergy Research* 2013;6:725-736.
- Neto CP., Seca AML., Nunes AM., Coimbra MA., Domingues F., Evtuguin D., Silvestre A., Cavaleiro JAS. (1997). Variations in chemical composition and structure of macromolecular components in different morphological regions and maturity stages of *Arundo donax*. *Ind. Crop. Prod.* 6: 51-58.
- Onofry A. (1940). *La canna comune (Arundo donax L.)*. Cremonese Libraio Editore. Roma.
- Pacala, S., Socolow, R., (2004). Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 305, 968-972.
- Papazoglou E.G., Karantounias G.A., Vemmos S.N., Bouranis D.L. (2005). Photosynthesis and growth responses of giant reed (*Arundo donax* L.) to the heavy metals Cd and Ni. *Environ.* 31(2), 243-249.

- Papazoglou E.G., Serelis K.G., and Bouranis D.L. (2007). Impact of high cadmium and nickel soil concentration on selected physiological parameters of *Arundo donax L.* European J. of Soil Biol. 43, 207-215.
- Park Y., Doherty W.O.S., Halleya P.J. (2008). Developing lignin-based resin coatings and composites. Industrial Crops and Products, 27:163-167.
- Patel, K.I., Parmar, R.J., Parmar, J.S. (2008). Novel Binder System for Ultraviolet-Curable Coatings Based on Tobacco Seed (*Nicotiana rustica*) Oil Derivatives as a Renewable Resource. *J. Applied Polymer Sci.* 107, 71-81.
- Perdue, R.E. (1958). *Arundo donax* - source of musical reeds and industrial cellulose. Economic Bot. 12: 368-404.
- Petrini C., Bazzocchi R., Bonari E., Ercoli L., Masoni A. (1996). Effect of irrigation and nitrogen supply on biomass production from Miscanthus in Northern-Central Italy. *Agricoltura Mediterranea*, 126:275-84.
- Piccolo R.S.J., Santos F., Frollini E. (1997). Sugar cane bagasse lignin in resol-type resin: alternative application for ligninphenol-formaldehyde resins. *Journal of Macromolecular Science Part A-Pure and Applied Chemistry*, 34:153-164.
- Pirozzi, D., Yousuf, A., Fagnano, M., Mori, M., Fiorentino, N., Impagliazzo, A. (2010). Lipids production by yeast grown on giant reed biomass. *Journal of biotechnology*, 150, S1, 167-168. doi:10.1016/j.jbiotec.2010.08.434.
- Piscioneri, I., Sharma, N., Baviello, G., Orlandini, S. (2000). Promising industrial energy crop, *Cynara cardunculus*: a potential source for biomass production and alternative energy. *Energy Convers. Manage.* 41, 1091-1105.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., and Fereres, E. (2009). AquaCrop -The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3): 438-447.
- Raccuia S.A., Melilli M.G. (2007). Biomass and grain oil yields in *Cynara cardunculus L.* genotypes grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Research* 101 187-197.
- REN21, Renewable. (2007) Global Status Report, Paris: REN21 Secretariat and Washington, DC: Worldwatch Institute, 2008.
- Ritchie, J.T. (1972). A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.*, 8, 1204-1213.
- Ritchie J., Godwin D., Otter-Nacke S. (1987) CERES-Wheat – A simulation model of wheat growth and development. Texas A&M University Press, College Station, TX
- Rossa B., Tüffers A.V., Naidoo G., von Willert, D.J. (1998). *Arundo donax L.* (Poaceae) a C3 species with unusually high photosynthetic capacity. *Bot. Acta* 111, 216-221.

- Rowe R.L., Street N.R., Taylor G., 2009. Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13:271-290.
- Scarlat N., Dallemand JF. (2011). Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: A global overview. *Energy Policy*, 39, 1630-1646.
- Scheidel A, Sorman AH (2012). Energy transitions and the global land rush: Ultimate drivers and persistent consequences. *Global environmental change-human and policy*, 22, 588-595.
- Schenone G., Parrini F., Smedile E. (1994). Biomass crops for electricity production: Research programme promoted by ENEL (Italian electricity Board). *Proceed. 8th European Biomass Conference "Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry"*, Vienna, 3-5 Ottobre 1994. 156-166.
- Sharma K.P., Kushwaha S.P.S., Gopal B. (1999). Nutrient dynamics in an *Arundo donax* wetland: nutrient uptake, seasonal changes in tissue concentration and release during in situ decomposition. *Int. J. Ecol. Environ. Sci.* 25:1-20.
- Sifola M.I., Di Giacomo M. (2009). Produzione di olio energetico da semi di tabacco. XXXVIII SIA, Firenze 22-24 settembre 2009.
- Sipila K (1994). Research into thermochemical conversion of biomass into fuel, chemicals and fibres. *Proceedings of the 8th European Biomass Conference "Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry"*, Vienna, Austria, 3-5 ottobre 1994. 156-167.
- Smith P, Olesen JE. (2010) Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. *The Journal of Agricultural Science*, 148:543-552.
- Smith R, Slater FM.(2011). Mobilization of minerals and moisture loss during senescence of the energy crops *Miscanthus giganteus*, *Arundo donax* and *Phalaris arundinacea* in Wales, UK. *GCB Bioenergy*; 3:148-157.
- Spitters C.J.T., Schapendonk A.H.C.M. (1990). Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. *Plant and Soil* 123, 193/ 203.
- Stanisavljević I.T., Lazic', M.L, Veljkovic, V.B. (2007). Ultrasonic extraction of oil from tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seeds. *Ultrasonics Sonochemistry* 14, 646-652.
- Steduto P., Albrizio R., Giorio P., Sorrentino G. (2000). Gas-exchange response and stomatal and non-stomatal limitations to carbon assimilation of sunflower under salinity. *Envir. Exper. Botany*, 44: 243-255.
- Steduto P. and Albrizio R. (2005). Resource-use efficiency of field grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. II Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Agric. For. Meteorol.* 130: 269-281
- Steduto P., T.C. Hsiao and E. Fereres. (2007). On the conservative behavior of biomass

- water productivity. *Irrig. Sci.* 25: 189-207.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres E. (2009). AquaCrop -The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3): 426-437.
- Stöckle C.O., Donatelli M., Nelson R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.*, 18, 289-307.
- Tanner, C. B. and Sinclair, T. R. (1983). Limitations to Efficient Water Use in Crop Production efficient water use in crop production: research or research? American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Thoenes P., Biofuels and Commodity Markets – Palm Oil Focus, Fao, Commodities and Trade Division, Roma, ottobre 2006.
- Usta, N., 2005. An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester. *Energy Conversion Manage.* 46, 2373-2386.
- van Dam J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., van Walsum P., Groenendijk P., & van Diepen C.A., 1997 – Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil-Atmosphere-Plant environment. Theory of SWAP 2.0. Technical Document 45 DLO-SC, 168 pp.
- van der Horst D., Vermeylen S. (2011). Spatial scale and social impacts of biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, 35:2435-2443.
- van Laar HH., Goudriaan J., van Keulen H. (1997) SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. Quantitative Approaches in System Analysis 14. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation, Wageningen.
- van Genuchten, M. Th., (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- Vecchiet M., Jodice R., Smedile E., Parrini F. (1994) - *La canna comune: riscoperta di una possibilità produttiva*. *AEI*, 30/31: 78-85.
- Vecchiet, M., Jodice, R., Schenone, G. (1996). Agronomic research on giant reed (*Arundo donax* L.) management system and cultivation of two different provenances. In: Proceedings of the Ninth European Bioenergy Conference, Copenhagen, 24–27 June, pp. 644-648.
- Veljkovic, V.B., Lakicevic, S.H., Stamenkovic, O.S., Todorovic, Z.B., Lazic, M.L. (2006). Biodiesel production from tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seed oil with a high content of free fatty acids. *Fuel* 85, 2671–2675.

- Venturi P., Venturi G. (2003). Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass Bioenergy*, 25:235-255.
- Vervaeke P., Tack, F.M.G., Navez F., Martin J., Verloo M.G., Lust N. (2006). Fate of heavy metals during fixed bed downdraft gasification of willow wood harvested from contaminated sites. *Biomass and Bioenergy*, 30:58-65.
- Ververis C., Georghiou K., Christodoulakis N., Santas P., Santas R. (2004). Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. *Industrial Crops and Products*, 19:245-254.
- Williams C., Biswas T. (2010). Commercial Potential of Giant reed for Pulp, Paper and Biofuel Production. Rural Industries Research and Development Corporation. Australia.
- Wong S. EU's 'Renewable Revolution' (2012). Does it Create More Energy Injustice in Developing Countries? *J Earth Sci Climate Change*, 3:1.
- Wösten J.H.M., A. Lilly, A. Nemes and C. Le Bas. (1998). Using existing soil data to derive hydraulic properties for simulation models in environmental studies and in land use planning. Report 156, Winand Staring Centre, The Netherlands.
- Yin X, van Laar H (2005). *Crop Systems Dynamics*. Wageningen Academic, Wageningen.
- Zoomers A. (2010). Globalisation and the foreignisation of space: seven processes driving the current global land grab. *Journal of Peasant Studies* 37, 429-447.
- Zúñiga G.E., V.H. Argandoña, H.M. Niemeyer and L.J. Corcuera. (1983). Hydroxamic acid content in wild and cultivated Gramineae. *Phytochemistry* 22: 2665-2668.

Bibliografia online

- Chakraborty A., "Secret report: biofuel caused food crisis", *The Guardian*, 4 luglio 2008.
<http://www.theguardian.com/environment/2008/jul/03/biofuels.renewableenergy/print>
- Gayler S, Priesack E (2005) PLATHO, a simulation model of resource allocation in the plant-soil system. Tech. rep., GSF – Institute of Soil Ecology.
<http://www.sfb607.de/english/projects/c2/platho.pdf> Cited 31 Dec 2007
- GRAIN SEIZED!. (2008). The 2008 land grab for food and financial security. GRAIN Briefing. Available online: <http://www.grain.org/briefings/?id=212> (15.09.2010).
- Pearson Karl (1894) - On the dissection of asymmetrical frequency curves.
http://it.wikipedia.org/wiki/Indice_di_correlazione_di_Pearson
- Vaciago G., Alimenti ed energia: ancora una bolla? Working paper n. 7, Gruppo 2013 - Forum Internazionale dell'Agricoltura e dell'Alimentazione, Roma, ottobre 2008.
<http://www.gruppo2013.it/workingpaper/Documents/WP%20n.7%20Gruppo%202013%20-%20-%20Vaciago.pdf>

Siti e documenti online consultati:

http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key_messages_it.pdf

http://europa.eu/comm/environment/climat/pdf/finalreport_agricsoils.pdf

http://www.bridgeconomies.enea.it/Eventi/2GBM/AmedeoD_Antonio/LineeStrategicheAgroenergie.pdf

http://www.agrinnovazione.regione.sicilia.it/reti/Agroenergia/politica_agricola.html